

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Zerstörungsfreie Prüfung  
Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren

---

# Schadenserkennung in Beton durch Überwachung mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen

---

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grads  
„doctor rerum naturalium“  
(Dr. rer. nat.)  
in der Wissenschaftsdisziplin „Geophysik“

eingereicht an der  
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät  
der Universität Potsdam

von  
Dipl.-Geophys. Julia Wolf

1. Gutachter: Priv.-Doz. Dr. Arno Zang, Universität Potsdam
2. Gutachter: Prof. Dr. Christian Ulrich Große, Technische Universität München
3. Gutachter: Prof. Dr. Yuri Petryna, Technische Universität Berlin

Verteidigt: Potsdam, den 31.03.2017

Dieses Werk ist unter einem Creative Commons Lizenzvertrag lizenziert:  
Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International  
Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Online veröffentlicht auf dem  
Publikationsserver der Universität Potsdam:  
URN [urn:nbn:de:kobv:517-opus4-397363](http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-397363)  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-397363>

## Danksagung

Ich möchte mich bei meinem Betreuer an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Herrn Mielentz bedanken, dass er es mir ermöglicht hat diese Arbeit umzusetzen. Im Laufe der Zeit hat er mich immer wieder auf den richtigen Weg gebracht. Unsere Gespräche werden mir in Erinnerung bleiben und seine unerbittliche Treue zum Detail mich von nun an begleiten.

Herrn Zang möchte ich danken, dass er sich die Zeit genommen hat, mich anzuhören und mein Thema zu präsentieren. Ich bedanke mich für seine Ideen und Vorschläge, die der Arbeit den nötigen geophysikalischen Blickwinkel geben. Auch möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken an seiner Lehre teilzuhaben, was mir einen willkommenen Blick auf andere Aspekte der Promotion gab.

Dem Fachbereich 8.2 der BAM danke ich für die Möglichkeit, an meinen Aufgaben zu wachsen und anstatt unter zu gehen. Die konstanten netten Worte und Ermunterungen, die vielen Gespräche bildeten die Grundlage, die vielen langen Tage im Büro und in der Halle zu mögen. Ich bedanke mich für eure offenen Türen und ständige Diskussionsbereitschaft.

Sean Smith und Marco Lange, zwei sehr geduldige Menschen. Vielen Dank für eure Unterstützung bei den Experimenten und für das nervige Fragen nach dem Wie, Wieso, Warum und Wann. Für meine Vermittlung zu den anderen Fachbereichen danke ich dir, Sean.

Die Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Zusammenarbeit mit Kollegen anderer Fachbereiche, mit denen ein großer Teil der Experimente geplant und durchgeführt wurden. Ich bedanke mich bei Stephan Pirskawetz, Andreas Barner, Bärbel Maier, Frank Haamkens und Philip Drabetzki für ihre Unterstützung.

Bei meiner Familie und Freunden bedanke ich mich für die Stunden fernab der Promotionsarbeit, die rar waren, aber umso mehr geschätzt wurden. Danke, für Eure offene Tür und Geduld.



## Kurzfassung

Die zerstörungsfreien Prüfungen von Bauwerken mit Hilfe von Ultraschallmessverfahren haben in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Durch Ultraschallmessungen können die Geometrien von Bauteilen bestimmt sowie von außen nicht sichtbare Fehler wie Delaminationen und Kiesnester erkannt werden.

Mit neuartigen, in das Betonbauteil eingebetteten Ultraschallprüfköpfen sollen nun Bauwerke dauerhaft auf Veränderungen überprüft werden. Dazu werden Ultraschallsignale direkt im Inneren eines Bauteils erzeugt, was die Möglichkeiten der herkömmlichen Methoden der Bauwerksüberwachung wesentlich erweitert. Ein Ultraschallverfahren könnte mit eingebetteten Prüfköpfen ein Betonbauteil kontinuierlich integral überwachen und damit auch stetig fortschreitende Gefügeänderungen, wie beispielsweise Mikrorisse, registrieren.

Sicherheitsrelevante Bauteile, die nach dem Einbau für Messungen unzugänglich oder mittels Ultraschall, beispielsweise durch zusätzliche Beschichtungen der Oberfläche, nicht prüfbar sind, lassen sich mit eingebetteten Prüfköpfen überwachen. An bereits vorhandenen Bauwerken können die Ultraschallprüfköpfe mithilfe von Bohrlöchern und speziellem Verpressmörtel auch nachträglich in das Bauteil integriert werden. Für Fertigbauteile bieten sich eingebettete Prüfköpfe zur Herstellungskontrolle sowie zur Überwachung der Baudurchführung als Werkzeug der Qualitätssicherung an. Auch die schnelle Schadensanalyse eines Bauwerks nach Naturkatastrophen, wie beispielsweise einem Erdbeben oder einer Flut, ist denkbar.

Durch die gute Ankopplung ermöglichen diese neuartigen Prüfköpfe den Einsatz von empfindlichen Auswertungsmethoden, wie die Kreuzkorrelation, die Coda-Wellen-Interferometrie oder die Amplitudenauswertung, für die Signalanalyse. Bei regelmäßigen Messungen können somit sich anbahnende Schäden eines Bauwerks frühzeitig erkannt werden.

Da die Schädigung eines Bauwerks keine direkt messbare Größe darstellt, erfordert eine eindeutige Schadenserkenkung in der Regel die Messung mehrerer physikalischer Größen die geeignet verknüpft werden. Physikalische Größen können sein: Ultraschalllaufzeit, Amplitude des Ultraschallsignals und Umgebungstemperatur. Dazu müssen Korrelationen zwischen dem Zustand des Bauwerks, den Umgebungsbedingungen und den Parametern des gemessenen Ultraschallsignals untersucht werden.

In dieser Arbeit werden die neuartigen Prüfköpfe vorgestellt. Es wird beschrieben, dass sie sich, sowohl in bereits errichtete Betonbauwerke als auch in der Konstruktion befindliche, einbauen lassen. Experimentell wird gezeigt, dass die Prüfköpfe in mehreren Ebenen eingebettet sein können da ihre Abstrahlcharakteristik im Beton nahezu ungerichtet ist. Die Mittenfrequenz von rund 62 kHz ermöglicht Abstände, je nach Betonart und SRV, von mindestens 3 m zwischen Prüfköpfen die als Sender und Empfänger arbeiten. Die Empfindlichkeit der eingebetteten Prüfköpfe gegenüber Veränderungen im Beton wird an Hand von zwei Laborexperimenten gezeigt, einem Drei-Punkt-Biegeversuch und einem Versuch zur Erzeugung von Frost-Tau-Wechsel Schäden. Die Ergebnisse werden mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren verglichen. Es zeigt sich, dass die Prüfköpfe durch die Anwendung empfindlicher Auswertemethoden, auftretende Risse im Beton

detektieren, bevor diese eine Gefahr für das Bauwerk darstellen. Abschließend werden Beispiele von Installation der neuartigen Ultraschallprüfköpfe in realen Bauteilen, zwei Brücken und einem Fundament, gezeigt und basierend auf dort gewonnenen ersten Erfahrungen ein Konzept für die Umsetzung einer Langzeitüberwachung aufgestellt.

## Abstract

The non-destructive testing of concrete structures with the ultrasound method has become increasingly important in recent years. With the ultrasound technique the geometry of concrete elements can be determined and defects can be detected which are not visible on the surface, such as delaminations and honeycombs.

New ultrasound sensors were developed to monitor changes in concrete structures continuously and permanently. Those ultrasound sensors will be embedded into the concrete to transmit and receive ultrasound waves within the structure. This allows a new interpretation of the condition of a structure. The use of the embedded sensors expands the options of the traditional monitoring methods. The ultrasonic technique could monitor a voluminous part of a concrete structure continuously and integral with just a few strategically placed embedded ultrasound sensors and thus register small changes in the concrete's texture.

Vital parts of concrete structures which are inaccessible for the ultrasonic method after construction can be monitored with embedded sensors. Inaccessibility could be caused by a surface layered with a medium reflecting or absorbing the ultrasonic wave or by too much steel obstructing the wave's path. The sensors can be embedded into existing structures using boreholes and grouting mortar or installed during construction and can thus serve as a tool for quality control. The quick damage evaluation of a construction after a natural disaster such as an earthquake or a flood, is conceivable as well.

As the contact between the embedded sensors and the surrounding concrete is assumed as constant over a long time, highly sensitive signal evaluation tools, such as the cross correlation between signals, the Coda Wave Interferometry and the amplitude evaluation, can be used. Therefore, with regular measurements, damage in a construction can be detected at an early stage. But, the damage of a structure can not be measured directly. A distinct damage detection needs a quantity of measured parameters, such as time of flight and amplitude of the ultrasonic wave as well as temperature, which need to be linked to each other. To achieve this, correlations between the state of the concrete construction and those parameters of the measured ultrasonic signal must be investigated.

In this work the newly developed ultrasound sensors are introduced. Their installation into a concrete structure is described. The sensors' sensitivity to small changes in the concrete is investigated and compared to other Non Destructive Testing (NDT) methods. The highly sensitive signal evaluation tools prove to be particularly advantageous when using embedded sensors. Installations of embedded ultrasound sensors for long time monitoring of real constructions are presented. Based on the gained experience with those installations a concept is presented for the set up of a long time monitoring system.





# Inhaltsverzeichnis

Danksagung . . . . .	ii
Kurzfassung . . . . .	v
English Abstract . . . . .	vi
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung und Motivation . . . . .	1
1.2 Zielstellung der Arbeit . . . . .	2
1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Ultraschallverfahren zur Betonuntersuchung</b>	<b>7</b>
2.1 Grundlagen der Ultraschallprüfung von Betonbauteilen . . . . .	7
2.1.1 Eigenschaften der Ultraschallwelle in Beton . . . . .	7
2.1.2 Einführung in den Baustoff Beton . . . . .	10
2.1.3 Übliche Anwendung des Ultraschallverfahrens in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen . . . . .	12
2.1.4 Schnittstelle zur Geophysik . . . . .	14
2.2 Verwendete Auswertemethoden des Ultraschallverfahrens . . . . .	15
2.2.1 Bestimmung der Wellengeschwindigkeit . . . . .	15
2.2.2 Bestimmung des Frequenzgehalts . . . . .	16
2.2.3 Auswertung der Schalldruckamplituden . . . . .	18
2.2.4 Coda-Wellen-Interferometrie zur Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung	19
2.2.5 Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Signale mit der Kreuzkorrelation . . . . .	21
<b>3 Stand der Forschung zu den Themen Schadensdetektion mit Ultraschallwellen und Dauerüberwachungssysteme</b>	<b>23</b>
3.1 Sich ändernde Einflüsse auf die Ausbreitung der Ultraschallwelle . . . . .	24
3.1.1 Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit . . . . .	24
3.1.2 Risseinflüsse . . . . .	25
3.2 Dauerüberwachung von Betonbauwerken . . . . .	28
3.3 Forschungslücke . . . . .	30

<b>4</b>	<b>In Beton einzubettende Ultraschallprüfköpfe</b>	<b>33</b>
4.1	Herkömmliche Ultraschallprüfköpfe . . . . .	33
4.2	Neuartige einzubettende Ultraschallprüfköpfe . . . . .	34
4.2.1	Mittenfrequenz . . . . .	35
4.2.2	Abstrahlcharakteristik . . . . .	35
4.2.3	Prüfkopfabstände . . . . .	37
4.2.4	Prüfkopfinstallation . . . . .	41
4.3	Zusammenfassung und Diskussion der in Beton einzubettenden Ultraschallprüfköpfe	42
<b>5</b>	<b>Einfluss der Umgebung auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe</b>	<b>45</b>
5.1	Experimente zum Temperatureinfluss . . . . .	45
5.1.1	Temperatureinfluss auf die Prüfköpfe . . . . .	46
5.1.2	Temperatureinfluss auf Prüfköpfe im Beton . . . . .	50
5.2	Experimente zum Einfluss der Feuchtigkeit auf Prüfköpfe im Beton . . . . .	57
5.3	Zusammenfassung und Diskussion des Einflusses der Umgebung auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Einfluss von Makrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe</b>	<b>63</b>
6.1	Beschreibung der Versuchsmethode . . . . .	63
6.1.1	Einführung der begleitenden ZfP-Verfahren Schallemission, Wegaufnehmer und Digitale Bildkorrelation . . . . .	64
6.1.2	Durchführung des Drei-Punkt-Biegeversuchs . . . . .	65
6.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	68
6.2.1	Eingebettete Ultraschallprüfköpfe . . . . .	68
6.2.2	Begleitende ZfP-Verfahren Schallemission, Wegaufnehmer und Digitale Bildkorrelation . . . . .	75
6.3	Zusammenfassung des Einflusses von Makrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Einfluss von durch Frost-Tau-Wechsel induzierten Mikrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe</b>	<b>81</b>
7.1	Beschreibung der Versuchsmethode . . . . .	81
7.1.1	Einführung in die Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes . . . . .	81
7.1.2	Durchführung des Frost-Tau-Wechsel Experiments . . . . .	83
7.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	85
7.3	Zusammenfassung des Einflusses von Mikrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe . . . . .	95

<b>8 Beispiele für Installationen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen</b>	<b>97</b>
8.1 Langzeitüberwachung im Labor . . . . .	97
8.2 Installationen in realen Betonbauteilen . . . . .	101
8.3 Konzept für eine Dauerüberwachung mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen . .	102
<b>9 Zusammenfassung, Bedeutung und Ausblick</b>	<b>107</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>114</b>
<b>Größen und Einheiten</b>	<b>117</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>117</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>Anhang</b>	<b>133</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Einführung und Motivation

Beton ist das am häufigsten verwendete Material für die Errichtung von Ingenieurbauwerken. Mit der alternden Infrastruktur und steigenden Kosten für Neubauten gewinnt die Zustandsuntersuchung von Betonkonstruktionen, etwa bei Brücken, an Bedeutung. Im wachsenden Bereich des Structural Health Monitoring (dt.: strukturelle Zustandsüberwachung) von Ingenieurbauten werden derzeit die geometrischen Größen durch Dehnungs- und Spannungsmesser überwacht, um den Zustand eines Bauteils bis an dessen Lebensende zu beurteilen [Dong & Song (2010), Enckell (2011), Gastineau *et al.* (2009), Chan & Thambiratnam (2011)]. Um die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken in Deutschland zu gewährleisten, sind diese im Abstand von drei bzw. sechs Jahren „handnah zu prüfen“ [(DIN 1076, 1999, Seite 3)]. Hierbei wird die Bauwerksoberfläche begutachtet und Mängel werden dokumentiert. Die Identifikation von plötzlichen Strukturschäden, infolge von Erdbeben oder Fluten, erfordert eine zusätzliche Begutachtung von Bauteilen. Da eine Sichtprüfung nicht immer ausreicht, müssen ergänzend zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP) durchgeführt werden.

Für die manuelle zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen werden seit Jahrzehnten Ultraschallverfahren erfolgreich eingesetzt, entweder als Reflexions- oder Durchschallungsverfahren. In der vorliegenden Arbeit wird das Durchschallungsverfahren genutzt. Beim Einsatz des Ultraschallverfahrens zur Bestimmung der Geometrie von Bauteilen, der Art und Position möglicher Einbauteile (Bewehrung, Spannkanäle) oder zur Lokalisierung von Hohlstellen oder Delaminationen wird in der Regel der direkte Kontakt zur Bauteiloberfläche benötigt. Obwohl es empfindlich gegenüber Veränderungen im Beton ist, wird das Ultraschallverfahren nur selten für eine Dauerüberwachung angewandt. Im Rahmen einer Bauteilüberwachung wird oft nur das passive Schallemissionsverfahren, mit geringer örtlicher Abdeckung und zeitlicher Begrenzung, genutzt [Große & Schumacher (2013)]. Große Impedanzsprünge im Beton, in Form metallischer Einbauteile oder Lufteinschlüsse, sind mit dem Ultraschallverfahren gut detektierbar. Eine Materialänderung in Form von voranschreitenden Schäden stellt hingegen eine schwieriger zu detektierende Größe dar. Das Ultraschallsignal hängt von den physikalischen Materialeigenschaften wie Dichte, Porosität

und Elastizität ab und diese wiederum werden durch Betonschädigungen beeinflusst, weshalb sich Zustandsänderungen im Beton detektieren lassen. Allerdings beeinflussen auch Material unabhängige Faktoren wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit das Ultraschallsignal. Ändert sich einer oder mehrere dieser Umgebungsfaktoren, lassen sich diese nicht von den Materialänderungen, verursacht durch Schädigungen, unterscheiden.

Das Ultraschallmessverfahren ist nicht mehr anwendbar, wenn beispielsweise die Bauteiloberfläche nicht zugänglich ist, wie bei unterirdigen Fundamenten von Windkraftanlagen, oder wenn sie mit einem Material beschichtet ist, das den Ultraschall absorbiert oder vollständig reflektiert. Zudem ist der Kontakt zwischen Bauteil und Ultraschallprüfkopf nicht immer von gleicher stabiler Qualität, wenn Vaseline oder Glyzerin als Koppelmittel genutzt wird. Auch sind Schädigungen schwer detektierbar, wenn sie tief im Bauteil liegen. Aus diesen Gründen ist eine dauerhafte Bauteilüberwachung mittels Ultraschall von der Oberfläche aus nicht immer realisierbar.

Um Zustände von Betonbauwerken über längere Zeiträume zu erfassen, sind Langzeitüberwachungen erforderlich. Hierdurch können Schäden, beispielsweise auf Grund von Lastwechseln, Frost-Tau-Wechseln, einsetzender Alkali-Kieselsäure-Reaktion und Korrosion rechtzeitig erkannt und Reparaturmaßnahmen eingeleitet werden.

Als Alternative zur bisherigen Anwendung des Ultraschallverfahrens lassen sich Ultraschallprüfköpfe direkt in ein Betonbauwerk einbetten. Ein Ultraschallverfahren könnte mit diesen eingebetteten Prüfköpfen verschiedene Bereiche eines Betonbauteils kontinuierlich integral mit zeitlich konstanter Ankopplung über einen langen Zeitraum überwachen. Auch ließen sich Gefügeänderungen, wie beispielsweise sich ausbreitende Mikrorisse, als Vorboten von Schädigungen registrieren. Ergänzend zu regelmäßigen Kontrollen könnten durch die Installation eines Netzes aus eingebetteten Prüfköpfen Schäden der Baustruktur über einen langen Zeitraum überwacht werden und eine zeitnahe Erfassung von gravierenden Veränderungen erfolgen.

## 1.2 Zielstellung der Arbeit

Durch Laborexperimente soll die Hypothese überprüft werden, dass sich durch die Einbettung von aktiv arbeitenden Ultraschallprüfköpfen in ein Betonbauteil das Innere dieses Bauteils dauerhaft überwachen lässt. Dadurch ließen sich sowohl plötzlich auftretende Schäden als auch stetig voranschreitende zeitnah detektieren. Auch in Gebieten die von der Oberfläche aus schlecht zu überwachen sind. Durch die Einbettung der Ultraschallprüfköpfe in den Beton wird eine Langzeitüberwachung mit nahezu konstant guten Ankopplungsbedingungen möglich. Diese dauerhaft gute Ankopplung ermöglicht die Nutzung besonders empfindlicher Signalauswertemethoden, welche bei ständig wechselnden Ankopplungsbedingungen nicht eingesetzt werden könnten. Durch Messungen in entsprechend dichten Intervallen sowie einer automatischen Auswertung der Messdaten kann die Detektion von plötzlich auftretenden Schädigungen in Echtzeit realisiert werden. Nach der Hypothese sollten sich neben der Detektion plötzlich auftretender auch schleichend entstehende Schädigungen durch andauernde regelmäßige Messungen detektieren lassen.

Die Hypothese, eine dauerhafte Überwachung von Stahlbetonkonstruktionen mit dem Einsatz

aktiver Ultraschalltransmissionsmessungen mit eingebetteten Prüfköpfen zu realisieren, soll die Möglichkeiten von Systemen zur strukturellen Zustandsüberwachung (engl.: Structural Health Monitoring (SHM)) erweitern sowie die regelmäßigen Sichtprüfungen nach DIN 1076 (1999) ergänzen. Als einzubettende Ultraschallprüfköpfe werden die im Rahmen des europäischen Projektes ERA.Net RUS: # 23 UNeCOM von der Firma ACSYS in Moskau entwickelten Ultraschallprüfköpfe genutzt.

In dieser Arbeit wird die Hypothese an Betonkonstruktionen im Labor bewiesen. Dazu müssen vier Punkte bearbeitet werden, die wiederum die Beantwortung mehrerer Fragen umfassen.

1. Es wird geprüft, ob sich die hier genutzten, in den Beton einzubettenden Ultraschallprüfköpfe, für die dauerhafte Überwachung von Bauwerken eignen.

Dieser Punkt bildet die Grundlage für die Dauerüberwachung mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Im Besonderen geht es um folgende Fragen: Lassen sich diese Prüfköpfe in das Bauteil einbetten und wie? Wie ist der Kontakt zwischen Prüfkopf und Bauteil? Wie groß kann der Abstand zwischen den Prüfköpfen sein? Ist der Einbau der Prüfköpfe in mehreren Ebenen möglich? Und, ist die Ankopplung dauerhaft?

2. Es wird in Laborexperimenten getestet, ob die eingebetteten Ultraschallprüfköpfe empfindlich genug sind, Veränderungen im Material zu detektieren.

Dieser Punkt befasst sich mit der Erprobung eingebetteter Ultraschallprüfköpfe für die Schadensdetektion in einem Betonbauteil. Sind die Prüfköpfe in das Bauteil eingebettet, muss überprüft werden, ob sie geeignet sind, entstehende Schäden in Form von Mikro- und Makrorissen zu registrieren. Hier stellt sich auch die Frage, wie zusätzliche Faktoren, andere außer Schädigungen, das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe beeinflussen. Zu diesem Punkt müssen im Verlauf der vorliegenden Arbeit folgende Fragen beantwortet werden: Lassen sich Makrorisse detektieren, die laut Norm DIN EN 1992-1-1 (1992) für ein Bauteil Struktur gefährdend sein können? Lässt sich die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen detektieren? Lassen sich die Veränderungen im Beton frühzeitig detektieren, bevor diese sich zu Schäden entwickeln? Wie beeinflussen zusätzliche Faktoren, wie die Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit, das Ultraschallsignal?

3. Es wird untersucht, ob sich die Faktoren, die den Ultraschall beeinflussen, durch die alleinige Analyse der Signalparameter von einander unterscheiden lassen.

Nur durch eine Unterscheidung der den Ultraschall beeinflussenden Faktoren, lassen sich Aussagen über den Zustand eines Bauteils treffen. Den Ultraschall beeinflussende Faktoren können sein: entstehende Risse, Druck sowie die Umgebungstemperatur und -feuchte. Bei diesem Untersuchungspunkt ist das Ziel, durch die Analyse verschiedener Parameter der Ultraschallsignale die verschiedenen Einflussfaktoren zu klassifizieren und dadurch voneinander zu trennen. Durch die kontinuierlich gute Ankopplung der eingebetteten Prüfköpfe an den Beton lassen sich Parameter im Ultraschallsignal auswerten, die empfindlich gegenüber Veränderungen des Materials sind, d.

h. neben der Laufzeit und der Frequenzentwicklung der Zeitsignale auch die Schalldruckamplitude des ersten Maximums, die Gesamtenergie des Signals sowie die maximale Schalldruckamplitude und deren Verschiebung entlang der Zeitachse. Auch lässt sich die Ähnlichkeit zweier Signale durch den Kreuzkorrelationskoeffizienten quantifizieren und mit der Coda-Wellen-Interferometrie die Geschwindigkeitsänderung zwischen ihnen. Durch die Kombination verschiedener Signalauswertemethoden könnten sich die geänderten Parameter der Signale einer Dauerüberwachung identifizieren, den einzelnen Einflussgrößen zuordnen und somit eine Schädigung feststellen lassen. Zu beantwortende Fragen können sein: Welche Signalparameter werden durch entstehende Risse beeinflusst? Welche Signalparameter werden durch veränderte Umgebungsbedingungen beeinflusst? Wie groß ist der Einfluss auf die Signalparameter bei langsam fortschreitenden Materialveränderungen? Mit welchen Auswertemethoden lassen sich die Signalparameter untersuchen? Lassen sich die Einflussfaktoren Schädigung und Umgebung voneinander trennen?

4. Es wird geprüft, ob sich eine praxisnahe Anwendung einer Dauerüberwachung von Betonbauteilen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen realisieren lässt.

Dieser Punkte beinhaltet sowohl die Erprobung einer Dauerüberwachung im Labor als auch an realen Ingenieurbauteilen. Einige zu beantwortende Fragen sind: Wie lassen sich die vorherigen Untersuchungen für die Installation von Prüfköpfen an realen Bauwerken anwenden? Lassen sich die Erkenntnisse der vorherigen Untersuchungen auf Dauerüberwachungen, zunächst im Labor, übertragen? Lassen sich die Erkenntnisse der vorherigen Untersuchungen auf Dauerüberwachungen an realen Bauwerken übertragen? Welche Auswertemethode eignet sich am besten für die dauerhafte Überwachung? Was ist bei Dauerüberwachungen an realen Bauwerken zu beachten? Jeder Punkt ist für das Ziel ein Betonbauwerk über einen langen Zeitraum, in kurzen Zeitintervallen zu überwachen und dadurch, neben plötzlichen Materialveränderungen, auch stetig fortschreitende Schäden zeitnah zu detektieren, von Bedeutung. Besondere Aufmerksamkeit gilt jedoch der Trennung von tatsächlichen Veränderungen im Material und Material unabhängiger Einflussfaktoren, da sonst keine eindeutigen Aussagen über Schädigungen getroffen werden können.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Die für die Analyse der Ultraschallsignale verwendeten Methoden sind im Kapitel 2 vorgestellt. Das Kapitel 3 zeigt den derzeitigen Stand der Forschung zu den Faktoren Temperatur, Feuchte und Rissentstehung und wie diese Faktoren das Ultraschallsignal beeinflussen. Auch die Konzepte bisheriger Dauerüberwachungen werden hier beschrieben. Im Kapitel 4 werden die Ultraschallprüfköpfe vorgestellt. Es werden auch die Methoden beschrieben, mit denen die Prüfköpfe in Betonbauwerke sowohl vor der Betonierung als auch nach der Fertigstellung installiert werden, um auch tiefer liegende Gebiete zu überwachen und die beste Ankopplung an das Bauteil zu



gewährleisten. Kapitel 5 stellt die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zu den Umgebungsfaktoren Temperatur und Luftfeuchtigkeit vor, die untersucht werden, um deren Einfluss auf die Schallausbreitung zwischen den im Beton eingebetteten Prüfköpfen zu bestimmen. Sich ausbreitende Mikrorisse können erste Anzeichen einer Schädigung sein und zu einer Schwächung des Materials führen. Bei lokaler Verdichtung und Ausrichtung der Mikrorisse bilden sich Einzelrisse auf der Makroebene aus. Mikro- und Makrorisse können die Integrität eines Bauteils gefährden. Um die Beeinflussung durch Makrorisse zu simulieren, werden Probekörper mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen in einem Drei-Punkt-Biegeversuch belastet und Veränderungen in den Ultraschallsignalen in Abhängigkeit der Rissausbreitung dokumentiert. Das Experiment hierzu wird im Kapitel 6 beschrieben. Ein Laborversuch, um Schädigungen in Form von sich ausbreitenden Mikrorissen zu simulieren, wird im Kapitel 7 vorgestellt. Hierzu werden Betonprobekörper mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen zyklischen Belastungen in Form von Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Die Ergebnisse beider Laborversuche werden durch die Anwendung weiterer Prüfmethoden verifiziert: mit der Schallemission, der digitalen Bildkorrelation, der Mikroskopie und der Bestimmung des relativen dynamischen E-Moduls mit externen Ultraschallprüfköpfen. Bei einer Dauerüberwachung eines Stahlbetonprobekörpers im Labor, an deren Ende eine Schädigung in Form von Makrorissen herbeigeführt wird, lassen sich die zuvor in Einzelexperimenten gewonnenen Erkenntnisse umsetzen, was im Kapitel 8 beschrieben wird. Ultraschallsignale bereits realisierter Installationen werden präsentiert und abschließend ein Konzept für die Durchführung einer dauerhaften Überwachung von realen Betonbauteilen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen vorgestellt.

Die vorliegende Arbeit entstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) im Fachbereich „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“. Die verwendeten eingebetteten Prüfköpfe wurden im Rahmen des europäischen Projektes ERA.Net RUS: # 23 UNeCOM von der Firma ACSYS in Moskau entwickelt. Die experimentellen Untersuchungen wurden von der Autorin geplant, durchgeführt, ausgewertet und interpretiert. Die Planung und Interpretation erfolgte im Dialog mit Herrn Frank Mielentz, der auch der Betreuer dieser Arbeit war. Die vergleichenden Messungen beim Drei-Punkt-Biegeversuch mit den zerstörungsfreien Prüfverfahren der digitalen Bildkorrelation und der Schallemission wurden von Herrn Barner und Herrn Pirskawetz der Fachbereiche „Ingenieurbau“ und „Baustoffe“ durchgeführt. Das Frost-Tau-Wechsel-Experiment wurde von Frau Maier, Fachbereich „Baustoffe“, begleitet. Die Mikroskopie an den Probekörpern des Frost-Tau-Wechsel-Experiments wurde von Herrn Drabetzki des Fachbereichs „Baustoffe“ durchgeführt.



# Kapitel 2

## Ultraschallverfahren zur Betonuntersuchung

### 2.1 Grundlagen der Ultraschallprüfung von Betonbauteilen

Dieses Kapitel fasst die für die vorliegende Arbeit relevanten theoretischen Grundlagen zum Ultraschallverfahren, zum Material Beton und zu den verwendeten Auswertemethoden zusammen. Wiederholt benutzte Größen werden eingeführt. Zudem wird ein kurzer Überblick über die Anwendung dieses Verfahrens im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) im Bauwesen gegeben und die Schnittstelle zum Fachgebiet der Geophysik aufgewiesen.

#### 2.1.1 Eigenschaften der Ultraschallwelle in Beton

Ultraschallprüfverfahren nutzen mechanische Schwingungen, die sich über die Bewegung einzelner, elastisch verbundener Stoffteilchen ausbreiten. Schwingen die Teilchen in Richtung der Wellenausbreitung, spricht man von der Longitudinalwelle, Kompressions-/Druckwelle oder P-Welle. Die von der Welle übertragene Kraft wirkt senkrecht auf die Fläche. Schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle, wird sie Transversalwelle, Scherwelle oder S-Welle genannt. Die von ihr übertragene Scherkraft wirkt parallel zur Fläche. Im Folgenden werden die Begriffe P-Welle und S-Welle genutzt.

Da Flüssigkeiten und Gase keine Scherkräfte aufnehmen können, breiten sich S-Wellen nur in Festkörpern aus. In elastischen Medien können sich die Wellenarten bei der Reflexion an Grenzflächen, bei nicht senkrechtem Einfall, in die jeweils andere Wellenart umwandeln. Aus P-Wellen werden somit S-Wellen und umgekehrt. Mathematisch lässt sich die Wellenausbreitung des Ultraschalls in elastischen Medien durch die Wellengleichung für ebene Raumwellen beschreiben [Müller (2005)].

#### *Größen*

Die wichtigsten Größen einer Ultraschallwelle sind ihre Frequenz  $f$ , ihre Wellenlänge  $\lambda$  und ihre

Schalldruckamplitude  $A$ . Diese Größen sind von den Eigenschaften des übertragenden Materials abhängig. Für die exakte Quantifizierung der gemessenen Ultraschallsignale ist neben den aufgeführten Größen auch die Kurvenform wichtig. Die Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  stehen mit der Geschwindigkeit  $v$  im Material in folgender Beziehung:

$$v = f\lambda \quad (2.1)$$

Die Geschwindigkeit ist hierbei entweder die der P-Welle oder die der S-Welle. Für die zerstörungsfreie Prüfung von Beton mit Ultraschall wird üblicherweise der Frequenzbereich zwischen

$$20 \text{ kHz} \leq f \leq 200 \text{ kHz}$$

genutzt.

Die P-Wellengeschwindigkeit  $v_P$  und die S-Wellengeschwindigkeit  $v_S$  berechnen sich aus den elastischen Materialkonstanten Elastizitätsmodul  $E$ , Dichte  $\rho$ , dem Schubmodul  $G$  und der Poisson-Zahl  $\nu$  [Krautkrämer & Krautkrämer (1986)]:

$$v_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.2)$$

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.3)$$

Die Beziehung zwischen den beiden Geschwindigkeiten ist

$$v_S = v_P \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 + \nu)}} \quad (2.4)$$

Im Beton ist die Poisson-Zahl  $\nu$  circa 0,2, womit aus Gleichung 2.4  $v_S = 3/5v_P$  folgt. Die S-Welle ist damit im Beton um circa 2/5 langsamer als die P-Welle.

Die Wellengeschwindigkeit wird zwar von den physikalischen Eigenschaften des Materials beeinflusst, ist jedoch für den inhomogenen Werkstoff Beton von Bauteil zu Bauteil starken Schwankungen unterworfen. Die Eigenschaften des Betons hängen von der Gesteinskörnung, dem Zementleim, dem Wasseranteil und deren Mischung ab [DIN EN 12504-4 (2004)]. Auch bei Betongemischen gleicher Rezeptur haben die Ultraschallwellen unterschiedliche Geschwindigkeiten, da auch der Hydratationsprozess und das Alter des Betons die Materialeigenschaften beeinflussen. Hinzu kommt die Abhängigkeit der Schallausbreitung von inneren und äußeren Spannungen sowie von der Temperatur des durchlaufenen Materials. Die Geschwindigkeit, mit der die P-Welle Normalbeton (Beton mit einer Trockenrohichte zwischen 2,0 und 2,6  $kg/dm^3$ ) durchläuft, liegt

zwischen 3500 m/s und 4500 m/s, bei Materialtemperaturen im Bereich zwischen 25 °C und 30 °C [DIN EN 12504-4 (2004)].

#### *Wellenreflexion, -brechung und -umwandlung*

Wird eine Ultraschallwelle von einer Punktquelle ausgesandt, ändert sich ihre Schalldruckamplitude  $A_e$  umgekehrt proportional mit der Entfernung  $r_e$  zur Quelle, in welcher sie die Amplitude  $A_0$  hat:

$$A_e = A_0 \frac{1}{r_e} \quad (2.5)$$

Dieser Zusammenhang wird auch als sphärische Divergenz bezeichnet [Krautkrämer & Krautkrämer (1986), Fertig (2005)]. Wird das Medium durch ein Material begrenzt, in dem sich keine Ultraschallwellen ausbreiten, werden die Wellen reflektiert, wodurch sich ihre Richtung, der Betrag ihrer Amplitude und ihre Art ändern können. Wird das Medium durch ein Material begrenzt, in dem sich Ultraschallwellen ausbreiten können, wird die Welle an der Grenzfläche zwischen den Materialien reflektiert und gebrochen, wodurch sich ebenfalls ihre Richtung, der Betrag ihrer Amplitude und ihre Art ändern können. Das Verhältnis zwischen Reflexion und Transmission hängt hierbei vom Impedanzsprung zwischen den Materialien ab. Die Impedanz  $Z$  ist das Produkt aus der Geschwindigkeit  $v$  der Welle im Material und der Materialdichte  $\rho$ :  $Z = v * \rho$ . Grenzflächen sind bei der ZiP von Beton nicht nur die Außenkanten eines Körpers, sondern auch Fehlstellen und andere Inhomogenitäten wie metallische Einbauteile in dessen Innerem. Die Richtung der reflektierten und transmittierten Welle ist durch das aus der Optik bekannte allgemeine Brechungsgesetz von Snellius bestimmt [Engelmann (1994)].

#### *Wellenschwächung*

Die Schwächung einer Welle wird durch ihre Streuung und Absorption im Medium verursacht. In einem natürlichen Medium kann es je nach Form, Anzahl, Ausdehnung und Grad der Inhomogenitäten zu einer vielfachen Streuung der Welle kommen. Der Einfluss der Streuung auf die Ultraschallausbreitung wird durch das Verhältnis des Durchmessers des Streuers  $D$  zur Wellenlänge  $\lambda$  bestimmt und ist im Bereich von  $0,02 < \frac{D}{\lambda} = 1$  besonders groß (Bereich der stochastischen und diffusen Streuung) [Wüstenberg (2004)]. Die Schallschwächung in einem inhomogenen Medium ist dadurch frequenzabhängig. Die Streuungen der Welle und die Absorption der Energie schwächen die Welle. Für Beton bedeutet das: Je größer die Gesteinskörnung und je höher die Frequenz sind, desto stärker wird die Ultraschallwelle geschwächt. Die durch Schwächung abnehmende Amplitude einer ebenen Raumwelle lässt sich wie folgt berechnen [Große (1996)]:

$$A_e = A_0 \exp(-\alpha(r_e - r_0)) \quad (2.6)$$

$A_0$  ist der Schalldruck am Anfang des Laufweges  $r_0$  und  $A_e$  der Schalldruck am Ende des Laufweges  $r_e$ .  $\alpha$  ist der materialspezifische Schwächungskoeffizient. Zusammen mit der sphärischen

Divergenz (Gleichung 2.5) erhält man für den Schalldruck

$$A_e = \frac{r_0}{r_e} A_0 \exp(-\alpha(r_e - r_0)) \quad (2.7)$$

Für den Schwächungskoeffizienten eines Materials ergibt sich daraus:

$$\alpha = \left[ \ln \left( \frac{A_e}{A_0} \cdot \frac{r_e}{r_0} \right) \right] \frac{1}{r_e - r_0} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 Einführung in den Baustoff Beton

Beton ist der am meisten verwendete Baustoff der Welt. Er wird aus Zement, Gesteinskörnungen und Wasser hergestellt. Das Gewichtsverhältnis von Wasser zu Zement (w/z-Wert), die Art des Zements und der Volumenanteil des Zements, der mit Wasser reagiert (Hydratationsgrad), bestimmen die Festigkeit des erhärteten Betons. Neben der Festigkeitsklasse des Zements und der Gesteinskörnung sind der w/z-Wert und die Hydratationsbedingungen verantwortlich für die Ausbildung des Porensystems des Zementsteins, welches wiederum für die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Betons von großer Bedeutung ist [Schneider (2008)]. Genormt ist die Festlegung des Betons nach dessen Eigenschaften oder nach dessen Zusammensetzung [DIN EN 206-1 (2001)]. In der Literatur, beispielsweise von Reinhardt (2007) und Schneider (2008), werden verschiedene Arten von Betonen nach folgenden Kriterien unterschieden:

- Rohdichte: Leichtbeton (unter  $2,0 \text{ kg/dm}^3$ ), Normalbeton (zwischen  $2,0 \text{ kg/dm}^3$  und  $2,6 \text{ kg/dm}^3$ ) und Schwerbeton (über  $2,6 \text{ kg/dm}^3$ )
- Erhärtungsgrad: Frischbeton, junger Beton und Festbeton
- Konsistenz
- Eigenschaften: z.B. Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Spannungs-Dehnungsverhältnis, Elastizität
- Zusammensetzung
- Zuschlag: Größtkörnung, Art
- Anwendung
- Ort der Herstellung
- Bewehrungsgrad und
- Verarbeitung

Obiger Einteilung folgend wird in dieser Arbeit für die Laborversuche in den Kapiteln 4, 6 und 8 fester Normalbeton der Konsistenz F2, der Druckfestigkeitsklasse C30/37, mit einem w/z-Wert von 0,55 und einem Zuschlag aus überwiegend Ottendorf-Okrilla-Gestein mit einer maximalen Größe von 16 mm und 32 mm, ohne und mit Bewehrung verwendet, der im Betonlabor der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hergestellt wird. Für die Untersuchungen zu den Umwelteinflüssen im Kapitel 5 und für das Frost-Tau-Wechsel Experiment im Kapitel 7 wird der Normalbeton ebenfalls im Betonlabor hergestellt, mit der Konsistenz F2, der Druckfestigkeitsklasse C25/30, einem w/z-Wert von 0,55 und einem Zuschlag aus überwiegend Ottendorf-Okrilla-Gestein mit einer maximalen Größe von 16 mm. Dieser Beton hat mehr Luftporen und dadurch einen geringeren Frost-Tau-Widerstand.

### *Betoneigenschaften*

Die Eigenschaften von Beton sind in der Norm DIN EN 206-1 (2001) zusammengefasst. Eine bautechnische Eigenschaft ist die Druckfestigkeit, eine weitere die Zugfestigkeit. Die Kenntnis der Zugfestigkeit des verwendeten Betons ist unabdingbar für die Bestimmung der Risslast von Stahlbetonkonstruktionen und zur Abschätzung der Mindestbewehrung. Experimentell lässt sich die Zugfestigkeit nur schwer bestimmen, weshalb auf andere Methoden zurückgegriffen wird. So wird mit dem Brazilian-Test die indirekte Zugfestigkeit von Materialien bestimmt [Zang & Berckhemer (1993)] oder mit dem Biegeversuch das Verhalten des Betons bei Zugbeanspruchung in Form der Biegezugfestigkeit ( $f_{CT}$ ) evaluiert [DIN EN 12390-5 (2009), Reinhardt (2007)]. Bei Normalbeton liegt die Zugfestigkeit zwischen  $1,6 \text{ N/mm}^2$  und  $4,1 \text{ N/mm}^2$  [Schneider (2008)]. Eine weitere Betoneigenschaft ist dessen Spannungs-Dehnungsverhältnis, das in einen elastischen und einen unelastischen Bereich unterteilt wird. Im elastischen Bereich ist der Zusammenhang zwischen einer Spannung  $\sigma$  und der von ihr in Lastrichtung verursachten Dehnung  $\epsilon$  linear. Nach dem Hooke'schen Gesetz gilt  $\sigma = E \cdot \epsilon$ , wobei E als der Elastizitätsmodul bezeichnet wird. Der statische Elastizitätsmodul gibt die Verformungseigenschaften von Materialien an und liegt bei Normalbeton zwischen  $25,8 \text{ kN/mm}^2$  und  $36,8 \text{ kN/mm}^2$  [Schneider (2008)]. Bei zunehmender Spannung steigt die Dehnung überproportional an. Die Beziehung ist nicht mehr linear und die Verformung des Materials unelastisch, d. h. irreversibel. Neben dem statischen gibt es den dynamischen Elastizitätsmodul, der häufig bei dynamischen Prozessen verwendet wird. Dieser lässt sich unter anderem über die Laufzeit von Ultraschallwellen bestimmen [Setzer *et al.* (2004)] und ist zwei- bis zehnmal höher als der statische Elastizitätsmodul [Martin & Eiblmaier (2003)]. Neben der Verformung in Lastrichtung verursacht eine uniaxiale Spannung auch Dehnungen senkrecht zur Lastrichtung ( $\epsilon_S$ ). Das Verhältnis  $\nu = -\frac{\epsilon_S}{\epsilon}$  definiert die Poisson-Zahl  $\nu$ , auch Querdehnungszahl genannt. Bei Betonen, die niedrigen Spannungen ausgesetzt sind, liegt sie zwischen 0,15 und 0,25 [Reinhardt (2007)].

### *Druckfestigkeitsklasse*

Die Druckfestigkeitsklasse klassifiziert den Beton nach dessen Druckfestigkeit und dient der sta-

tischen Berechnung von Betonkonstruktionen. Die Druckfestigkeit von Beton wird nach der Norm DIN EN 12390-3 (2009) bestimmt. Betonbauteile, hergestellt mit gleicher Betonrezeptur, können sich in ihrer Festigkeit, ihrem Elastizitätsmodul und ihrer Dichte unterscheiden, wenn die Hydratations- und Verarbeitungsbedingungen nicht gleich sind. Die Eigenschaften zeitlich und örtlich verschieden hergestellter Bauteile aus dem gleichen Beton können nur begrenzt miteinander verglichen werden. Nur durch die Prüfung der Druckfestigkeit bestimmt man die Druckfestigkeitsklasse eines Bauteils eindeutig.

Die Druckfestigkeiten von Normalbeton liegen zwischen  $10 \text{ N/mm}^2$  und  $60 \text{ N/mm}^2$ , welche mit den Druckfestigkeitsklassen C8/10 bis C50/60 gekennzeichnet wird [Schneider (2008)].

### *Verformungen*

Nicht nur Frischbeton und junger Beton, auch Festbeton verändert sich über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerkes. Insbesondere unterliegt der Beton lastunabhängigen und lastabhängigen Verformungen. Ursachen lastunabhängiger Verformungen sind das Schwinden oder Quellen des Betons und dessen Temperaturdehnung, die mit  $\epsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T$  berechnet wird [Reinhardt (2007)].  $\alpha_T$  ist die Wärmedehnzahl der Gesteinskörnung und des Zementsteines der Rezeptur und  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz. Bei Normalbeton liegt  $\alpha_T$  zwischen  $5,5 \cdot 0,01 \text{ mm/mK}$  und  $14 \cdot 0,01 \text{ mm/mK}$ . Lastabhängige Verformungen sind sehr komplex und von Bauwerk zu Bauwerk verschieden. Der Beton beeinflusst die Verformung durch seine Druckfestigkeit, Zugfestigkeit und sein Spannungs-Dehnungsverhältnis.

In Tabelle 2.1 sind einige physikalische Eigenschaften von Beton, Granit, Sandstein, Eis und Wasser zum Vergleichen mit geophysikalischen Materialien aufgeführt. Die Eigenschaften von Beton, Eis und Wasser werden im Verlauf der Arbeit, bei den Untersuchungen zum Temperatureinfluss sowie bei den Experimenten zum Einfluss von Makro- und Mikrorissen, wieder aufgegriffen.

### **2.1.3 Übliche Anwendung des Ultraschallverfahrens in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen**

Das Ultraschallverfahren wird als zerstörungsfreies Prüfverfahren im Ingenieurbauwesen genutzt, um nachträglich die Geometrie einzelner Betonbauteile zu überprüfen und Einbauteile, wie Spannkäme oder Bewehrungsstäbe, zu lokalisieren. Neuere Forschungsergebnisse zeigen, dass sich Fehler wie Delaminationen (Ablösungen horizontal zur Oberfläche) und ungenügende Verpressungen in Spannkämmen ebenfalls mit Ultraschall detektieren lassen [Shokouhi *et al.* (2014), Krause *et al.* (2008)]. Veränderungen in der Geschwindigkeit der Ultraschallwelle unter Last können im Labor ebenso detektiert werden wie die Anisotropie der Ultraschallgeschwindigkeit, hervorgerufen durch ausgerichtete Mikrorisse [Zoëga (2011)].

Je nach Zugänglichkeit eines Untersuchungsobjektes lässt sich die Prüfung von Materialien mit Ultraschall entweder als Transmissionsmessung oder Reflexionsmessung durchführen. Bei Transmissionsmessungen wird der Schall durch einen Sendeprüfkopf auf einer Seite des zu prüfenden



	Normalbeton	Granit	Sandstein	Eis ( $-4^{\circ}\text{C}$ )	Wasser
Dichte <sup>[1]</sup> $\rho$ in $10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 – 2,6 <sup>[8]</sup>	2,6 – 2,9	2,6 – 2,7	0,92 <sup>[2]</sup>	1 <sup>[2]</sup>
P-Wellen- geschwindigkeit $v_P$ in ( $\text{m}/\text{s}$ )	3500 – 4500	4500 – 6000 <sup>[7]</sup>	800 – 4500 <sup>[6]</sup>	3100 – 4200	1430 – 1590
S-Wellen- geschwindigkeit $v_S$ in ( $\text{m}/\text{s}$ )	2400 – 2750	2500 – 3300 <sup>[7]</sup>	320 – 2700 <sup>[6]</sup>	1500 – 2000 <sup>[6]</sup>	—
Temperatur- dehnung <sup>[1]</sup> $\alpha_T$ in $0,01\frac{\text{mm}}{\text{mK}}$	5,5 – 14	7,4	11 – 11,8	—	—
Druckfestigkeit <sup>[1]</sup> $f_{CK}$ in ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	10 – 60 <sup>[8]</sup>	160 – 210	30 – 200	—	—
Biegezugfestigkeit <sup>[3]</sup> $f_{CT}$ in ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	1,6 – 4,1 <sup>[8]</sup>	10 – 20	3 – 20	—	—
Elastizitätsmodul <sup>[1]</sup> $E$ in ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )	25,8 – 36,8 <sup>[8]</sup>	38-76	1,5 – 20	4 – 10 <sup>[4]</sup>	—
Kompressions- modul $K$ in ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )	—	—	—	9 <sup>[4]</sup>	2,15 <sup>[5]</sup>
Poissonzahl <sup>[1]</sup> $\nu$	0,15 – 0,25	0,27	0,15	0,33 <sup>[4]</sup>	0,5 <sup>[5]</sup>

[1] Reinhardt (2007) [2] Engelmann (1994) [3] Schubert (1999) [4] Demtröder (2006)  
[5] Kohlrausch (1960) [6] Fertig (2005) [7] Jaeger (2007) [8] Schneider (2008)

Tabelle 2.1: Zusammenfassung physikalischer Eigenschaften einiger Materialien.

Materials erzeugt. Er breitet sich im Material aus und wird auf der gegenüberliegenden Seite von einem weiteren Prüfkopf empfangen (Abbildung 2.1a). Bei Reflexionsmessungen liegen der Sende- und Empfangsprüfkopf auf derselben Seite. Der Schall wird an einer Grenzfläche zum Material höherer oder niedrigerer Impedanz reflektiert und trifft auf den Empfänger (Abbildung 2.1b). Durch das Verschieben der Prüfköpfe entlang von Profillinien lässt sich der gesamte Bereich zwischen den Prüfköpfen bei der Transmission, beziehungsweise der gesamte Bereich unter den Prüfköpfen bei der Reflexion untersuchen. Detektieren lassen sich größere Impedanzsprünge im Bauteil. In der vorliegenden Untersuchung werden Transmissionsmessungen durchgeführt. Die Ausbreitung des Ultraschalls wird durch Änderungen der physikalischen Eigenschaften oder der Textur des Betons beeinflusst. Die Textur beschreibt die Struktur der Verteilung von Betonbestandteilen, wie Luftporen und Gesteinskörnung, die anisotropische Effekte verursachen können [CT-13 (2013), Krautkrämer & Krautkrämer (1986)]. Ultraschallwellen werden in un-

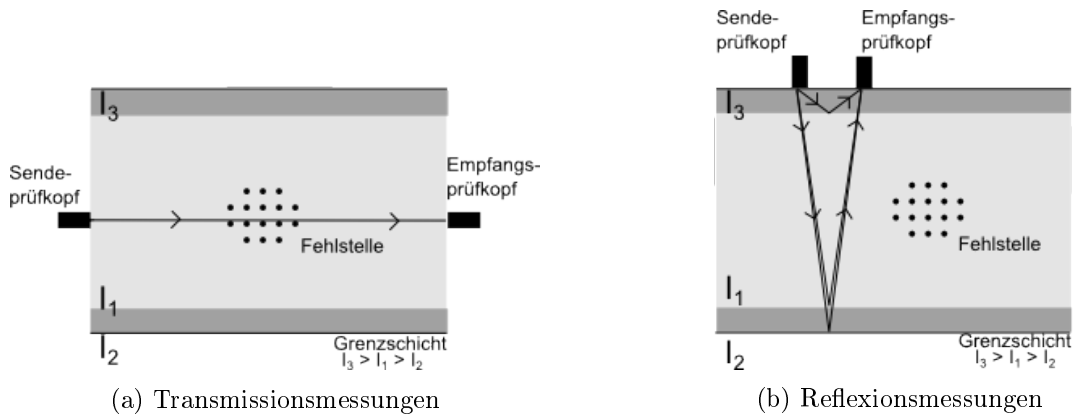


Abbildung 2.1: Vereinfachte Darstellung von Ultraschallmessungen an einem Material.

terschiedlichen Texturen auf verschiedene Art reflektiert, gestreut und geschwächt, so dass sich Ausbreitungsrichtung, Energie und Geschwindigkeit verändern. Daher lässt sich das Ultraschallverfahren nutzen, um Änderungen im Bauteil zu dokumentieren. Veränderte Spannungen im Beton, beispielsweise aufgrund von Lastzunahme oder -abnahme, führen zu einer Ausrichtung von materialbedingten Mikrorissen, also einer Änderung der Betontextur und damit einer Änderung der Ausbreitung des Ultraschalls. Entstehung und Fortpflanzung von Rissen, die mit einer Abnahme der Elastizität einhergehen, sind ebenfalls durch Messungen mit dem Ultraschallverfahren detektierbar [DIN EN 12504-4 (2004)]. Die Größen des Ultraschalls können jedoch auch von Material unabhängigen Faktoren beeinflusst werden. Die Bauteiltemperatur zum Zeitpunkt der Messung hat beispielsweise keinen Einfluss auf den Elastizitätsmodul des Betons, verändert aber die Ultraschallgeschwindigkeit [Crawford (1997)]. Im Kapitel 3 werden die verschiedenen Einflüsse auf das Ultraschallsignal ausführlicher erläutert.

Auf Grund der Komplexität des Baustoffes Beton und dessen physikalischer Eigenschaften kann durch alleinige und einmalige Messungen mit diesem Verfahren keine eindeutige Aussage über den Zustand des Materials getroffen werden. Langsam, über mehrere Jahre, fortschreitende Veränderungen im Beton lassen sich auch durch regelmäßige Wiederholungsmessungen nicht detektieren. Hierfür wäre eine ständig gleiche Ankopplung der Prüfköpfe zur Bauteiloberfläche erforderlich. Eine konstante Ankopplung über lange Zeiträume wie Monate oder sogar Jahre hinweg, ist insbesondere außerhalb des Labors nur schwer umsetzbar. Dicht liegende Reflektoren in Oberflächennähe sowie den Schall stark absorbierendes Material können das Eindringen der Welle in tiefere Regionen des Bauteils behindern. Aus diesen Beschränkungen in der bisherigen Anwendung des Ultraschallverfahrens entsteht die Motivation, die Prüfköpfe in den Beton mit ein zu betonieren, um somit eine konstante Ankopplung an das Bauteil zu realisieren und tiefer liegende Gebiete, unabhängig vom Zustand der nahen Oberfläche, zu überwachen.

Wie sich die Größen des Ultraschallsignals auswerten lassen und wie verschiedene Einflussfaktoren das Signal verändern, wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.

### 2.1.4 Schnittstelle zur Geophysik

Merkmale einer akustischen Welle sind das Spektrum, der Schalldruck und die Phase. Ultraschallwellen unterscheiden sich von seismischen Wellen lediglich durch ihr Spektrum, weshalb sich Methoden aus der Geophysik für das Ultraschallverfahren anwenden lassen. In dieser Arbeit werden geophysikalische Auswertemethoden für die Dauerüberwachung von Betonbauwerken angewendet.

Aus der Geophysik bekannte Signalanalysemethoden, wie die in der Vulkanologie verwendete seismische Interferometrie [Sens-Schönfelder & Wegler (2006)], lassen sich auf die Untersuchung von Betonbauteilen übertragen. Auch die Wellenformanalyse [Foufoula-Georgiou & Kumar (1994)], mit der sich die Frequenzanteile eines Signals zeitlich auflösen lassen, wird adaptiert. In der Seismologie und Seismik werden mit statistischen Klassifizierungen und Mustererkennungstechniken die Quellen bestimmter Signale identifiziert. Zum Beispiel lassen sich auf diese Art und Weise Ursachen von Erdbeben in Vulkannähe klassifizieren und somit die Ausbruchsvorhersage verbessern. Auch in der Erdölexploration werden diese Techniken eingesetzt, um erdölführende Schichten von anderen zu unterscheiden [Sinval (1992)]. Dieser Ansatz lässt sich für die Identifizierung der Ursachen von Veränderung im Ultraschallsignal bei der Überwachung von Betonbauten übernehmen.

## 2.2 Verwendete Auswertemethoden des Ultraschallverfahrens

Die Kenngrößen der Ultraschallwelle sind deren Wellenlänge, Schalldruck und Frequenz. Diese Größen ändern sich mit Veränderungen im Material. Die Auswertung der einzelnen Signalgrößen geben daher Aufschluss über Veränderungen im Beton. Die Ankopplung der eingebetteten Prüfköpfe zum Beton wird über den Zeitraum der in dieser Arbeit durchgeführten Experimente als konstant angenommen (siehe hierzu Kapitel 4). Selbst geringfügige Änderungen in den Signalgrößen sollten daher Veränderungen im Beton widerspiegeln und nicht Veränderungen in den Ankopplungsbedingungen. Neben den herkömmlichen Auswertemethoden, wie die Laufzeitbestimmung und die Betrachtung des Spektrums, lassen sich auch wesentlich empfindlichere Auswertemethoden, wie die Betrachtung des Schalldrucks, die Coda-Wellen-Interferometrie und die Betrachtung der Kreuzkorrelation zwischen zwei Signalen, anwenden. Die in dieser Arbeit verwendeten Auswertemethoden werden im Anschluss vorgestellt.

### 2.2.1 Bestimmung der Wellengeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Welle wird über die Beziehung

$$v = s/t$$

bei bekannter Laufzeit  $t$  der Welle am Empfangsprüfkopf und bekanntem Laufweg  $s$  berechnet. Die Bestimmung der Laufzeit erfolgt manuell oder automatisch mit Hilfe von mathematischen

Algorithmen, wie beispielsweise dem AIC Picker [Zhang *et al.* (2003), Tronicke (2007)]. Die manuelle Bestimmung ist in der Regel genauer als die automatische, dauert jedoch länger und wird vom Anwender beeinflusst. Die automatische Bestimmung ist bei schlechtem Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SRV) nicht immer zuverlässig. Die Ankunftszeit des Ultraschallsignals kann über den Ersteinsatz der Welle, das Überschreiten eines gewissen Schwellwertes oder über das erste Extremum ermittelt werden [Zoëga (2011)].

Um die Laufzeit und damit die Ultraschallgeschwindigkeit möglichst genau zu bestimmen, wird in dieser Arbeit der Ersteinsatz der Ultraschallwelle manuell abgelesen. Zur besseren Ablesbarkeit werden dazu die abgetasteten Punkte des Signals interpoliert. Auch bei manueller Bestimmung ist die Ankunftszeit einer Welle fehlerbehaftet. Neben dem Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist die Abtastfrequenz bei der Datenaufnahme entscheidend. Die Abtastfrequenz gibt an, wie oft ein kontinuierliches analoges Signal in einer Sekunde abgetastet und in ein zeitdiskretes digitales Signal umgesetzt wird.

### 2.2.2 Bestimmung des Frequenzgehalts

Ultraschallsignale werden durch die sich verändernden physikalischen Eigenschaften des durchlaufenden Materials direkt beeinflusst. Durch eine Analyse der zeitlichen Entwicklung des Schalldrucks (Zeitsignal) können Ursachen der Veränderungen aufgeschlüsselt werden. Die Signale werden in der Orts- und Zeitebene aufgenommen. Die Betrachtung der Frequenzebene eines Signals kann zusätzliche Informationen erbringen. In der vorliegenden Arbeit wird sowohl die Fourier-Transformation (FT) als auch die kontinuierliche Wavelet Transformation (WT) zur Untersuchung der Ultraschallsignale genutzt.

#### Fourier-Transformation

Mit Hilfe der Fourier-Transformation lässt sich die komplexe Spektraldichte  $\underline{S}(f)$  nicht periodischer Zeitsignale  $f(t)$  ermitteln. Die Spektraldichte<sup>1</sup> gibt das Frequenzspektrum einer Zeitfunktion  $f(t)$  mit folgender Gleichung wieder:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.9)$$

Das Frequenzspektrum zeigt, mit welchem Gewicht die jeweilige Frequenz im Zeitsignal enthalten ist. Im folgenden wird das Frequenzspektrum vereinfacht als Spektrum bezeichnet. Da der Betrag verwendet wird, lässt sich in dieser Arbeit für die Beschreibung der Spektraldichte  $|S(f)| = \underline{S}(f) = S(f)$  nutzen.

Die Abbildungen 2.2a und 2.2b zeigen zwei Signale, die aus Kosinusanteilen der Frequenzen 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz bestehen. Im Signal in der Abbildung 2.2a sind die Anteile addiert, in der Abbildung 2.2b folgen sie zeitlich aufeinander. Die Signale sind verschieden, ihre

<sup>1</sup>Die Spektraldichte wird in der Literatur oft als Spektralfunktion oder Fourier-Transformierte  $F(f)$  bezeichnet.

Spektren, in den Abbildungen 2.3a und 2.3b, sind jedoch ähnlich, mit gleicher Gewichtung der Frequenzanteile. Hierbei zeigt sich die fehlende zeitliche Auflösung der Frequenzanteile bei Verwendung der Fourier-Transformation. Allein durch ihr Spektrum ließen sich beide Signale nicht eindeutig voneinander unterscheiden.

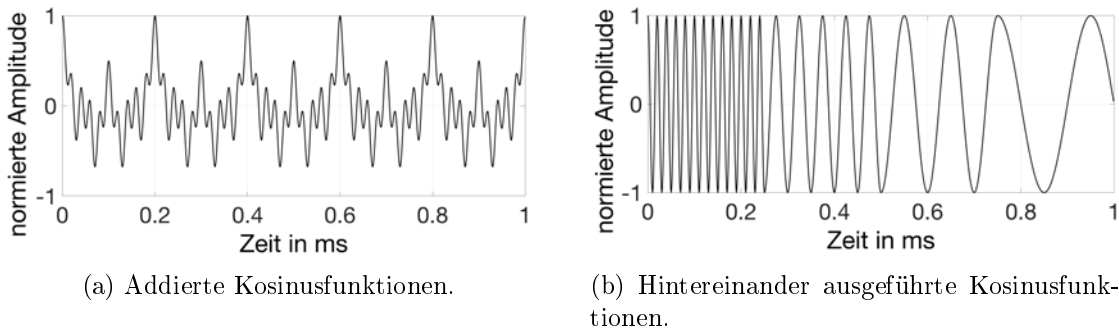


Abbildung 2.2: Zeitsignale bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz.

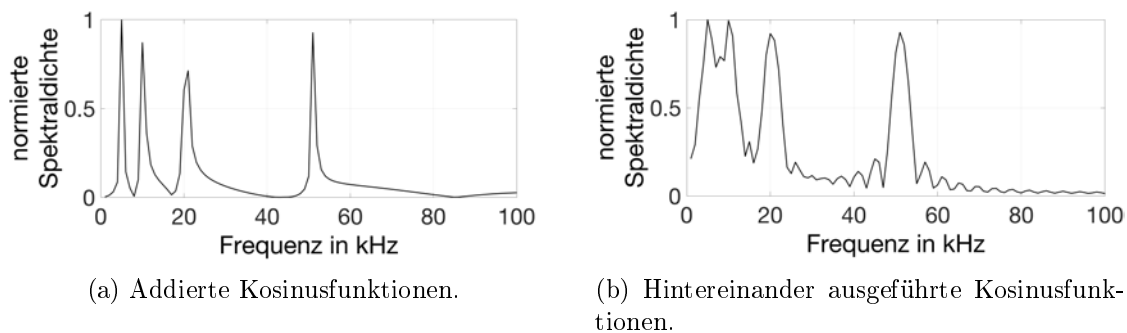


Abbildung 2.3: Spektren der Zeitsignale bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz.

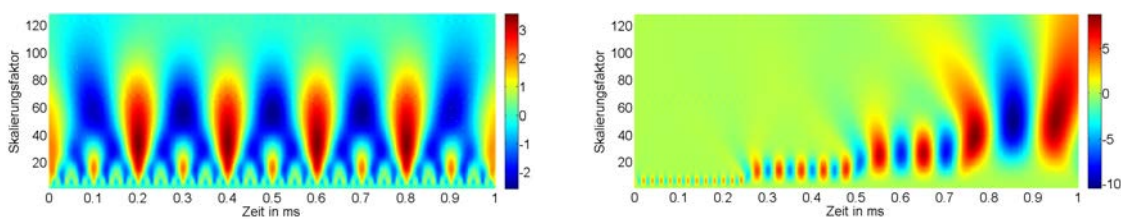
Die Kurzzeit-Fourier-Transformation, die einer gefensterten Fourier-Transformation entspricht, liefert Zeit- und Frequenzbereichsinformationen gleichzeitig. Ein Fenster fester Breite wird entlang des Zeitsignals in gleichen Schrittlängen verschoben. Für jede Fensterposition wird das Spektrum gebildet. Aufgrund der festen Fensterbreite lassen sich jedoch nicht alle Frequenzen gleich gut auflösen. Eine flexible Fensterbreite, deren Größe sich den Frequenzen der verschiedenen Signalkomponenten anpasst, würde die Messgenauigkeit erhöhen. Diese Idee wird in der Wavelet Transformation (WT) umgesetzt [Unbehauen (2002)].

### Kontinuierliche Wavelet Transformation

Mit der einfachen Fourier-Transformation ist keine Aussage über die Entwicklung der Frequenzanteile entlang des Zeitsignals möglich, so dass sich nur lineare, das gesamte Zeitsignal betreffende Änderungen betrachten lassen. Schädigungen im Material können jedoch auch nicht lineare Veränderungen im Ultraschallsignal verursachen, so dass eine Betrachtung der Frequenzen in

verschiedenen Zeitabschnitten notwendig wird. Da der Ansatz für die Unterscheidung zwischen Umwelteinflüssen und tatsächlichen Schäden im Material die Untersuchung verschiedener Parameter des Ultraschallsignals ist, wird in dieser Arbeit auch die Frequenzentwicklung entlang des Zeitsignals ausgewertet.

Die Wavelet Transformation (WT) wird genutzt, um Zeitsignale zu analysieren, die nicht stationäre, also zeitabhängige Charakteristiken haben. Entgegen der Kurzzeit-Fourier-Transformation wird die Breite des Zeitfensters bei gleichbleibender Anzahl von Oszillationen verändert [Unbehauen (2002)], wodurch sich verschiedene Frequenzen gut auflösen lassen. Dieser gleichbleibende Wellenzug im Fenster wird als Wavelet bezeichnet. Das Wavelet, welches im Verlauf der Bearbeitung gestreckt und gestaucht (skaliert) wird, um es der Form des Ultraschallsignals anzupassen, wird Mother-Wavelet genannt. Der Mittelpunkt des Mother-Wavelets wird entlang des Zeitsignals verschoben und die Ähnlichkeit mit dem Ultraschallsignal zu diesem Zeitpunkt über den Koeffizienten der kontinuierlichen Wavelet Transformation quantifiziert. Anschließend wird das Mother-Wavelet gestreckt oder gestaucht und erneut entlang des Zeitsignals verschoben und die Ähnlichkeit quantifiziert. Dieser Vorgang wird mit verschiedenen Skalierungen des Mother-Wavelets wiederholt. Der Koeffizient wird je Wavelet Mittelpunkt und Skalierung farblich kodiert über die Zeitachse des Signals aufgetragen, wodurch man einen Überblick über die im Ultraschallsignal je Zeitpunkt enthaltenden Frequenzen erhält. Die Zeitsignale lassen sich dadurch eindeutig identifizieren. Am Beispiel der beiden Zeitfunktionen der Abbildungen 2.2a und 2.2b wird die Wavelet Transformation in den Abbildungen 2.4a und 2.4b verdeutlicht. Das Signal aus Abbildung 2.2a hat zum gleichen Zeitpunkt verschiedene Frequenzen, während die Frequenzen des Signals in Abbildung 2.2b mit der Zeit abfallen. Der Frequenzabfall spiegelt sich durch größere Koeffizienten bei höheren Skalierungsfaktoren wider.



(a) Das Zeitsignal besteht aus addierten Kosinusfunktionen.

(b) Das Zeitsignal besteht aus hintereinander ausgeführten Kosinusfunktionen.

Abbildung 2.4: Wavelet Transformation von Zeitsignalen mit dem realen Mexican Hat Wavelet, bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz.

Im Anhang wird zusammenfassend die Theorie der Wavelet Transformation und die Eigenschaften der verschiedenen Mother-Wavelets beschrieben. In der vorliegenden Arbeit wird das Mexican Hat Wavelet verwendet, auch Ricker Wavelet genannt, da es sich gut für die Detektion von Übergängen zwischen verschiedenen Frequenzen eignet [Daubechies (1990)].

### 2.2.3 Auswertung der Schalldruckamplituden

Bewegt sich eine Schallwelle in einem Material fort, wird sie durch Absorption und Streuung geschwächt. Je größer die Schwächung ist, desto geringer ist die Amplitude des empfangenen Schalldrucks. Änderungen im Material verursachen eine veränderte Schallausbreitung, was sich auf den Schalldruck auswirkt. Eine Änderung im Schalldruck indiziert wiederum eine Materialänderung, vorausgesetzt der Messaufbau bleibt unverändert. Zur Auswertung des Schalldrucks existieren verschiedene Ansätze: Bei der Auswertung des Schalldrucks am Ersteinsatz wird der Wert der ersten empfangenen Schwingung bestimmt (erstes Maximum) (Abbildung 2.5a). Da sie oft kleiner ist als die maximale Amplitude des Schalldrucks (Scheitelwert), wird auch diese maximale Amplitude bestimmt (Abbildung 2.5b). Die Zeitverschiebung  $\Delta t$  des maximalen Schalldrucks (Abbildung 2.5c) wird unter anderem zur Risstiefenbestimmung im Beton verwendet [Ramamoorthy *et al.* (2004), Quiviger *et al.* (2012)]. Das unterschiedliche Abklingverhalten der Signale wird in der Gesamtenergie der Zeitsignale reflektiert. Die Gesamtenergie eines Signals lässt sich über die Fläche berechnen, die von der Einhüllenden des Zeitsignals eingeschlossen wird (Abbildung 2.5d.). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Schalldruckamplitude verkürzt als Amplitude bezeichnet.

### 2.2.4 Coda-Wellen-Interferometrie zur Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung

Da Beton ein inhomogenes Medium ist, werden Ultraschallwellen darin gestreut und ihre Energie absorbiert. Die Streuung erfolgt an Luftporen und Gesteinszuschlägen. Auch an den Übergängen zu Materialien mit anderen Impedanzen, etwa an den geometrischen Grenzen eines Bauteils oder an Einbauteilen wie Spannglieder und Bewehrung, erfolgt neben der Reflexion auch die Streuung von Wellen. Da deren Anzahl und Verteilung charakteristisch für jedes Betonbauteil ist, kann die Streuung der Energie der Ultraschallwelle als eine Eigenschaft des Materials betrachtet werden [Payan *et al.* (2013)]. Bei konstanter Positionierung und Ankopplung von Sender und Empfänger ergibt die Durchschallung von Beton, bei gleichen Messbedingungen, immer das gleiche Signal [Niederleithinger & Wunderlich (2013)]. Ändert sich die Streueigenschaft im Beton, beispielsweise durch Aufnahme von Wasser, durch Belastung oder durch Rissentstehung, wird die Welle anders gestreut und das empfangene Signal unterscheidet sich von jenem eines früheren Zustands. Die Laufwege der Welle beinhalten die direkte Welle, die einfach gestreute Welle und die mehrfach gestreute Welle. Da gestreute Wellenanteile einen längeren Laufweg als direkte Anteile haben, kommen sie später am Empfänger an. Sie bilden den so genannten Codaanteil des Zeitsignals. Mit der Coda-Wellen-Interferometrie (CWI) lässt sich dieser Signalbereich analysieren.

Die CWI nutzt die Änderung der Laufwege von mehrfach gestreuten Wellen, um Veränderungen in einem Medium zu detektieren. Je nach Stärke der Streuer wird die Welle durch mehrfach gestreute Wellenanteile dominiert [Snieder (2006)]. Das streuende Medium wirkt hierbei als Interferometer. Durch die vielfache Streuung der Welle wird ein Gebiet mehrfach durchlaufen, wodurch diese gestreuten Wellenanteile besonders empfindlich gegenüber kleinsten Veränderungen im Me-

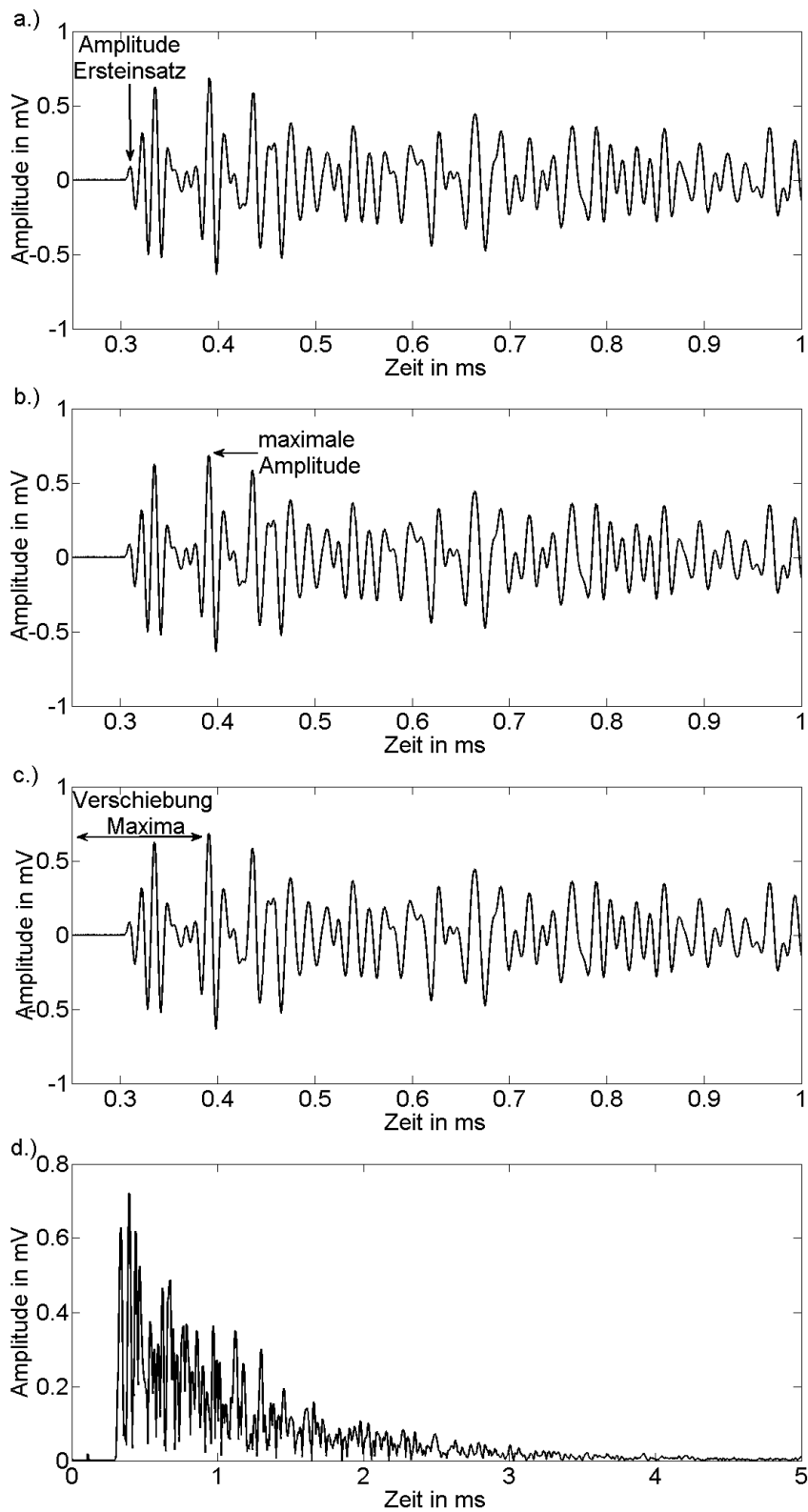


Abbildung 2.5: Verdeutlichung der Auswertung des Schalldrucks der Ultraschallwelle, über die Amplitude der ersten Schwingung a.), über die maximale Amplitude b.), über die zeitliche Verschiebung der maximalen Amplitude c.) und über die Gesamtenergie des Ultraschallsignals d.).



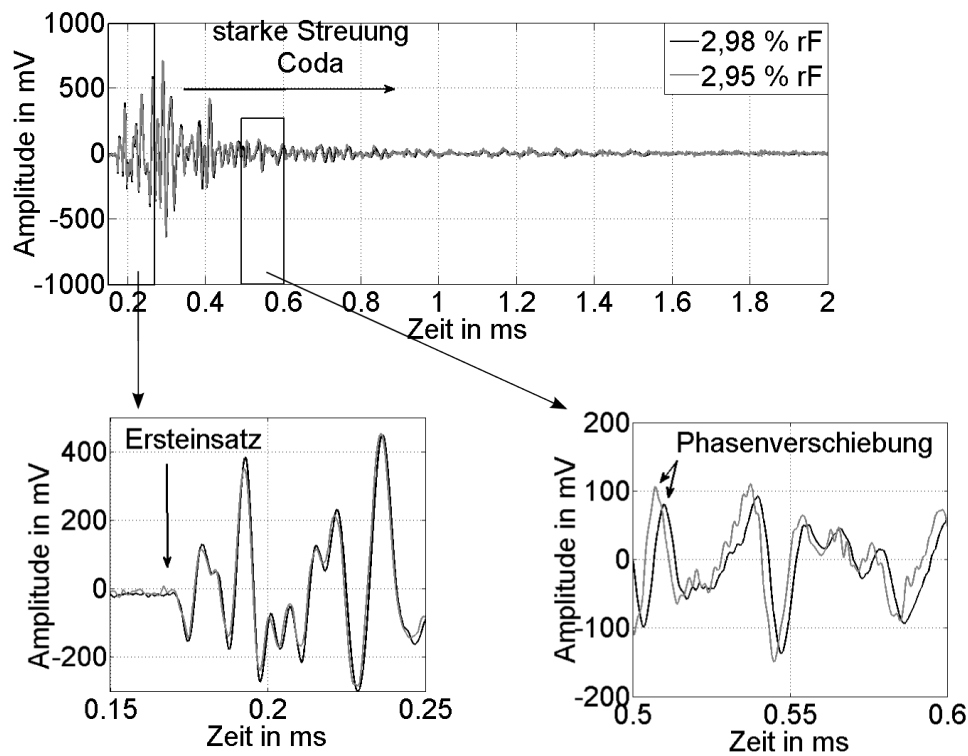


Abbildung 2.6: Vergleich von zwei Signalen des Experiments zum Einfluss der Feuchtesättigung des Betons auf die P-Wellengeschwindigkeit, aus dem Kapitel 5.2.

dium werden [Snieder *et al.* (2002), Snieder (2006)]. Abbildung 2.6 zeigt die Phasenverschiebung zwischen den gestreuten Wellenanteilen zweier Ultraschallsignale, hervorgerufen durch kleinste Veränderungen in der Betonfeuchte, im Vergleich zu den gleich gebliebenen Ersteinsätzen.

Bei der Coda-Wellen-Interferometrie wird ein Signal gegenüber einem Referenzsignal um  $\tau$  gestaucht und gestreckt. Wenn die Position der Streuer und der Prüfköpfe konstant ist, lässt sich  $\tau$ , nach Snieder *et al.* (2002) und Snieder (2006), in eine relative Geschwindigkeitsänderung ( $dv/v$ ), im Bezug zum Referenzsignal, umwandeln. Die CWI Methode eignet sich besonders für die Überwachung von schleichend fortschreitenden Veränderungen im Material, die nur geringen Einfluss auf die als erstes ankommenden Wellenanteile haben. Die CWI kann nur angewandt werden, wenn die Verschiebung zwischen zwei Ultraschallsignalen kleiner als die dominante Periode der Wellen ist [Snieder *et al.* (2002)]. Im experimentellen Teil der Arbeit wird mehrfach auf diese Begrenzung zurückgekommen. Die Theorie hinter der Coda-Wellen-Interferometrie ist im Anhang näher erklärt.

### 2.2.5 Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Signale mit der Kreuzkorrelation

Die CWI eignet sich für die Bestimmung kleinster Geschwindigkeitsänderungen zwischen den Messungen eines ungestörten Referenzzeitpunktes und einem Zeitpunkt nach Auftreten einer Störung der Streueigenschaften des Mediums. Für die schnelle Auswertung einer Dauerüberwachung ist der auf der CWI aufbauende Algorithmus jedoch zu lang und dessen Berechnung mit derzeiti-

gen Standardrechnern zeitintensiv. Basierend auf der Idee, die Änderung im mehrfach gestreuten und damit wesentlich empfindlicheren Wellenanteil zu beziffern, erfolgt die Signalanalyse mit dem Kreuzkorrelationskoeffizienten  $k_{x,y}$ . Der Kreuzkorrelationskoeffizient beschreibt die Ähnlichkeit zweier Signale miteinander. Sind die Signale identisch, wird der Kreuzkorrelationskoeffizient 1. Haben die Signale keine Gemeinsamkeit, wird der Kreuzkorrelationskoeffizient 0. Kommt es zu einer Phasenumkehrung um  $180^\circ$  zwischen zwei Signalen, wird der Kreuzkorrelationskoeffizient -1. Nach Bronstein (1987) wird der Kreuzkorrelationskoeffizient wie folgt berechnet:

$$k_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.10)$$

$\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind die Mittelwerte der Zeitsignale  $x$  und  $y$ , wobei  $x$  das ungestörte Referenzsignal repräsentiert und  $y$  das gestörte Signal.  $n$  ist die Anzahl der Abtastpunkte eines Signals.

## Kapitel 3

# Stand der Forschung zu den Themen Schadensdetektion mit Ultraschallwellen und Dauerüberwachungssysteme

Die Überwachung des Zustandes eines Bauteils kann durch regelmäßige Begehungen nach der DIN 1076 erfolgen. In dieser Arbeit wird jedoch untersucht, ob regelmäßige Messungen mit Ultraschallwellen eine Detektion von Schäden ermöglichen, bevor diese an der Oberfläche sichtbar werden und möglicherweise das Bauteil gefährden. Da diese Bauteile beliebig starken Veränderungen der Umgebung ausgesetzt sein können, müssen sowohl der Einfluss wechselnder Umgebungsbedingungen, wie Lufttemperatur und Luftfeuchte, auf das Ultraschallsignal bekannt sein, als auch der Einfluss üblicher Schäden, wie Rissbildung. Daher wird in diesem Kapitel der derzeitige Wissensstand zum Einfluss der sich ändernden Umgebungstemperatur und Feuchtigkeit zusammengefasst. Zudem werden verschiedene Rissarten und deren Entstehung eingeführt und ebenfalls der Einfluss auf übliche Größen des Ultraschallsignals beschrieben. Die strukturelle Überwachung von Ingenieurbauteilen, sowohl aus Stahl als auch aus Beton, ist ein viel erforschtes Gebiet. Es lohnt sich, die Erkenntnisse aufzugreifen und für die eigene Anwendung zu adaptieren, weshalb der Wissensstand zu Dauerüberwachungssystemen, hier in diesem Kapitel zusammengefasst wird. Die Vorteile diverser Überwachungssysteme werden beschrieben und Forschungslücken aufgetan.

## 3.1 Sich ändernde Einflüsse auf die Ausbreitung der Ultraschallwelle

### 3.1.1 Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit

Seit Jahrzehnten wird der Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Elastizitätsmodul untersucht. Entsprechende Modelle werden entwickelt und Anleitungen geschrieben, wie diese Zusammenhänge am besten zu nutzen sind. Verschiedene Normen verschiedener Länder beschreiben die Durchführung von Ultraschalluntersuchungen an Beton [Komlos *et al.* (1996), Popovics *et al.* (1995), DIN EN 12504-4 (2004)]. Das Thema ist jedoch weiterhin sehr komplex, da es verschiedene Faktoren gibt, die die Ausbreitung der Ultraschallwelle im Beton beeinflussen [Crawford (1997)]. Zum einen sind das Faktoren, die die Betoneigenschaften ändern und damit auch die Ausbreitung des Ultraschalls. Zum anderen sind das Faktoren, die die Ausbreitung des Ultraschalls ändern, aber unabhängig von den Eigenschaften des Betons sind. Einflussfaktoren der letzten Kategorie sind unter anderem der akustische Kontakt der Prüfköpfe zum Bauteil, die Temperatur des Betons und dessen Feuchtegehalt.

Die Ankopplung gilt bei den in dieser Arbeit vorgestellten eingebetteten Ultraschallprüfköpfen als konstant (siehe Kapitel 4). Bei dauerhafter Überwachung von Bauteilen muss jedoch noch der Einfluss der Temperatur und der Feuchtigkeit bewertet werden. In den Normen [Popovics *et al.* (1995), DIN EN 12504-4 (2004)] wird oft von einem geringen Einfluss der Temperatur auf die Ultraschallgeschwindigkeit gesprochen, wenn die Änderungen zwischen  $5^{\circ}\text{C}$  und  $30^{\circ}\text{C}$  liegen. Bei Messungen außerhalb dieses Bereiches sollte aber die Temperatur bei der Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit berücksichtigt werden (siehe Tabelle in Crawford (1997, Seite 50)). Die Empfehlungen basieren auf Untersuchungen, bei denen die Ultraschallgeschwindigkeit über die Laufzeit bestimmt wird. Einige der bereits vorgestellten Auswertemethoden sind wesentlich empfindlicher gegenüber kleinen Veränderungen im Signal und werden somit auch durch temperaturbedingte Änderungen im empfohlenen Temperaturbereich beeinflusst. Niederleithinger & Wunderlich (2013) behandeln den Einfluss der Temperatur auf die Ultraschallgeschwindigkeit mithilfe der CWI-Methode. Die CWI-Methode ermöglicht, die Veränderung der Geschwindigkeit durch Temperaturunterschiede von wenigen Grad Celsius aufzulösen [Zhang *et al.* (2013), Salvemoser *et al.* (2015)].

Die Ergebnisse von Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte im Beton auf das Ultraschallsignal sind sehr heterogen. Crawford (1997, Seite 50) spricht von einem geringen Effekt, Popovics *et al.* (1995) von einer leichten Erhöhung der P-Wellengeschwindigkeit mit zunehmender Feuchte sättigung. Lencis *et al.* (2013) bestimmt einen größeren Einfluss der Feuchtigkeit auf Beton mit geringer Betonfestigkeit als auf Beton mit hoher Festigkeit. Verschiedene Betonarten haben unterschiedliche Feuchteverteilungsgradienten [Nilsson (2002)]. Betone mit einem geringeren  $w/z$ -Wert haben beispielsweise einen geringeren Feuchteverteilungsgradienten als Betone mit hohem  $w/z$ -Wert [Nilsson (2002)]

Ohdaira & Masuzawa (2000) beschreiben einen Anstieg der Wellengeschwindigkeit durch Wasser-

aufnahme, abhängig von der Betonzusammensetzung der verwendeten Probekörper. Lencis *et al.* (2013) behandelt den Einfluss der Hydratationsbedingungen auf die spätere Beziehung zwischen Feuchte und Geschwindigkeit. Popovics (2005) betrachtet die ungleichmäßige Feuchteverteilung in Betonprobekörpern. Danach trocknet die Oberfläche eines Probekörpers schneller aus als dessen Inneres. Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte auf die P-Wellengeschwindigkeit erfolgen bisher mit extern angebrachten Ultraschallprüfköpfen, mit Transmissionsmessungen [Ohdaira & Masuzawa (2000), Popovics (2005)] oder mit Reflexionsmessungen [Lencis *et al.* (2013)]. Aufgrund der Betonarten mit verschiedenen Eigenschaften, Porositäten, w/z-Werten und verschiedenen Hydratationsbedingungen ist kein Betonbauelement wie ein anderes, so dass sich keine Vorhersage über dessen Beeinflussung durch Temperatur- und Feuchteänderungen treffen lässt. Hinzu kommt, dass bei natürlichen Veränderungen der Umweltbedingungen Feuchte und Temperatur nie getrennt voneinander betrachtet werden können [Hedenblad (1993)]. Natürliche Wetterbedingungen, aufsteigende Feuchte, stehendes Wasser oder auch künstliche Beheizung oder Kühlung verursachen Änderungen von Temperatur und Feuchte in der Umgebung des Bauteils, was zu ständigen Veränderungen der Bedingungen in dessen Inneren führen kann. Weshalb die Beeinflussung der Ultraschallsignale durch Temperatur und Feuchtigkeit für jede Betonstruktur individuell beobachtet werden muss.

### 3.1.2 Risseinflüsse

#### Rissarten und Entstehung

Risse sind mikro- oder makroskopische Einschnitte an der Materialoberfläche oder im Material selbst, die thermische oder mechanische Ursachen haben können. Erstere erzeugen Mikrorisse, letztere neben Mikro- auch Makrorisse. Im Folgenden werden Risse im Beton, ihre Entstehung sowie Ansätze zu ihrer Detektion mit dem Ultraschallverfahren diskutiert.

Mikrorisse sind Kavitäten im Material, die zu klein sind, um im Handstück erkennbar zu sein. Das Verhältnis zwischen Rissaufweitung und Risslänge ist kleiner als  $10^{-2}$  [Zang (1991, Seite 23)]. Klassifiziert man Mikrorisse nach ihrem Erscheinungsbild im Material, lassen sich drei Grundtypen unterscheiden [Atkinson (1987, Seite 31) und Zang (1991)]:

- Korngrenzenrisse (GBC) an der Grenzfläche zwischen Gesteinskörnung und Matrix,
- intragranulare Risse (IGC), die nur ein Zuschlagskorn durchlaufen,
- transgranulare Risse (TGC), die mehr als ein Zuschlagskorn durchlaufen.

Mikroskopisch kleine Risse haben zwei typische Verteilungen innerhalb eines spröden Mediums: einerseits eine gleichmäßige Verteilung, bei der die Rissdichte unabhängig von lokalen Strukturen ist und beim gleichmäßigen Erhitzen und Erkalten entsteht, andererseits eine ungleichmäßige Verteilung, bei der die Rissdichte mit dem Abstand zu lokalen Strukturen und Diskontinuitäten variiert. Lokale Strukturen und Diskontinuitäten sind beispielsweise Verbindungsstellen zwischen verschiedenen Bauelementen, Nuten oder bereits bestehende Scherbrüche. Diese Risse entstehen

in mechanischen Prozessen. Wenn Mikrorisse um Scherbrüche und andere Fehlstellen herum auftreten, richten sie sich in der Ebene der Hauptspannungen aus. Mikrorisse verbinden sich zu Makrorissen und können somit ein Vorzeichen eines Bauteilversagens sein [Atkinson (1987, Kapitel 2)], was in Abbildung 3.1, (links) illustriert ist. Thermische Änderungen im Beton können unter anderem durch den Einfluss der Jahreszeiten und dem damit einhergehenden Wechsel von warmen und kalten Temperaturen entstehen [Weise *et al.* (2012)]. Chemische Reaktionen wie die Alkali-Kieselsäure-Reaktion [Saint-Pierre *et al.* (2007)] oder Bewehrungskorrosion [Yeih & Huang (1998), Khan *et al.* (2014), Antonaci *et al.* (2013)] sind Beispiele für mechanische Ursachen der Mikrorissentstehung im Bauwesen. Beide Abläufe bewirken eine Volumenvergrößerung von Nichtbetonbestandteilen, was eine Art Sprengung der Betonbestandteile und damit die Ausbildung von Mikrorissen nach sich zieht. Durch dynamische Belastungen, wie sie an Bahnbauwerken, Autobahnbrücken oder Fundamenten von Windenergieanlagen auftreten, kommt es verstärkt zur Bildung von Mikrorissen, die sich mit der Zeit zu einzelnen Makrorissen zusammenfügen. Die Makrorissentstehung durch dynamische Belastung tritt im Bauwesen häufig auf und motiviert Untersuchungen zur Überwachung der Mikrorissbildung in Betonelementen, bevor es zu einem Einzelriss kommt, der zu einem Versagen des Bauwerkes führen kann. Ab welcher Rissbreite ein Bauteil als gefährdet gilt, ist unter anderem abhängig von der Expositionsklasse und der Art des Bauteils [DIN EN 1992-1-1 (1992, Abschnitt 7.3.1)]. Nach Norm DIN EN 1992-1-1 (1992, Abschnitt 7.3.1) liegt der Grenzwert für die maximale Rissbreite bei 0,2 mm bzw. 0,4 mm.

So genannte Einzelrisse sind Risse auf Makroebene. Diese Rissart ist eine Diskontinuität, hervorgerufen durch einen komplizierten Bruchvorgang, welcher viele Zuschlagskörner durchzieht (interkristalline Risse). Im Handstück sind Makrorisse mit bloßem Auge erkennbar. Klüfte in Fels und Risse in Gesteinen und Beton breiten sich meist unter Mode 1 Belastungszuständen aus, das heißt die Komponenten der maximalen effektiven Zugspannung stehen senkrecht auf der Rissebene [Atkinson (1987, Seite 29), Zang & Stephansson (2010, Seite 54)], wie in der Abbildung 3.1 (rechts) illustriert. Mit einem Drei-Punkt-Biegeversuch lässt sich diese Einzelrissentstehung experimentell nachstellen.

### **Einfluss von Rissen auf den Ultraschall**

Im Folgenden werden die Einflüsse der Rissentstehung auf die Geschwindigkeit, die Schalldruckamplitude und das Streuverhalten dargestellt.

#### *Geschwindigkeit*

Risse können die elastischen Eigenschaften des Betons ändern, was sich in einer Abnahme sowohl des statischen als auch des dynamischen Elastizitätsmoduls zeigt. Diese Abnahme kann wiederum eine Verlangsamung der Ultraschallgeschwindigkeit bewirken. Bei Experimenten an Betonprobestkörpern unter dynamischer einaxialer Belastung kommt es anfänglich zu einer Zunahme der Ultraschallgeschwindigkeit, bevor sie kurz vor dem Erreichen der maximalen Bruchlast stark abfällt. Erklärt wird das von Wu (1998), Shokouhi *et al.* (2012), Suaris & Fernando (1987), Raju

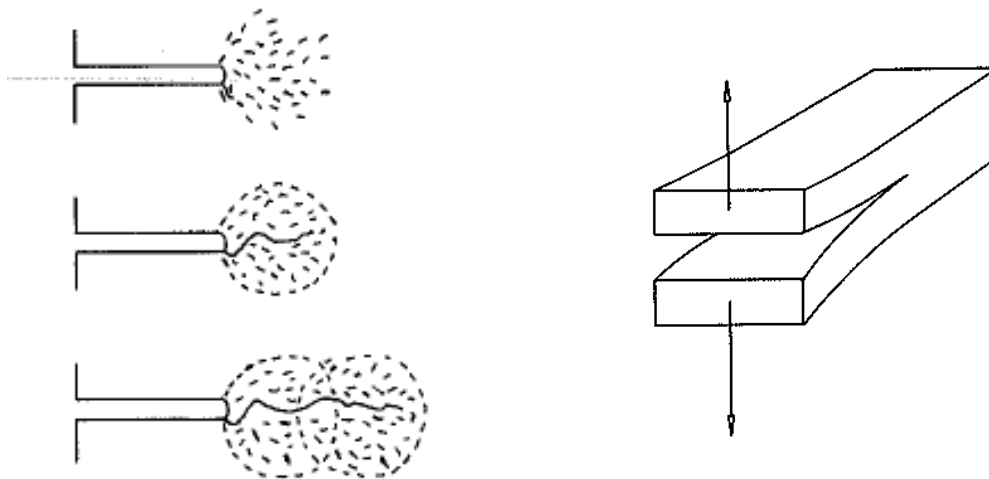


Abbildung 3.1: Links: Darstellung von Mikrorissen in der Nähe einer Störung oder Verbindungsstelle. Rechts: Am häufigsten entstehen Risse senkrecht zu der maximalen Zugspannung. Abbildungen aus Atkinson (1987)

(1970) und Sayers (1988) mit einer anfänglichen Schließung bereits vorhandener ungerichteter Mikrorisse, bevor durch den zunehmenden lateralen Druck in Lastrichtung gerichtete Mikrorisse entstehen. Bei andauernder Last fügen sich diese Mikrorisse zu einem Makroriss zusammen, einem so genannten Ermüdungsbruch. Durch die Ausbildung von Mikrorissen und die damit einhergehende Schwächung des Materials kann die Geschwindigkeitsabnahme beim Ermüdungsbruch dreimal so hoch sein wie bei einem statischen Einzelbruch. Durch zunehmenden Druck und steigende Anzahl ausgerichteter Risse wird ein anisotropischer Effekt im Beton verursacht [Sayers (1988)], der dazu führt, dass die Ultraschallgeschwindigkeit orthogonal zur Lastrichtung geringer ist als in Lastrichtung. An realen Bauteilen sind diese Geschwindigkeitsunterschiede und anisotropen Effekte oft weniger stark ausgeprägt, da sich die Risse beispielsweise durch Reibung an ihren Flanken teilweise wieder verfüllen.

#### *Amplitude*

Antonaci *et al.* (2013), Suaris & Fernando (1987) und Shokouhi *et al.* (2012) beschreiben die Abnahme der Ultraschallamplitude während zyklischer Belastungsversuche von Betonprobekörpern. Demnach nimmt die Amplitude mit zunehmendem Zerstörungsgrad ab. Die Schallamplitude zeigt sich als hoch empfindlich gegenüber der Ermüdung des Bauteils. Wie groß dabei die Amplitudenabnahme ist, hängt von der Schwächung der Welle im jeweiligen Betonelement ab.

Wenn die Amplituden von Ultraschallsignalen zu verschiedenen Zeitpunkten ausgewertet werden, muss eine konstante Ankopplung der Ultraschallprüfköpfe an die Betonoberfläche garantiert sein.

#### *Streuverhalten*

Eine Abnahme in den elastischen Eigenschaften eines Materials führt durch das geänderte Streuverhalten auch zu einer Veränderung der Wellenausbreitung. Für die Analyse dieses Einflusses

untersucht Antonaci *et al.* (2013) die Nichtlinearität des gesamten Ultraschallsignals. Im Wesentlichen wird hierbei die Abnahme der Proportionalität zwischen zwei Signalen betrachtet, also deren Kreuzkorrelation. Diese Veränderung der Ähnlichkeit wird durch Effekte verursacht, die das Signal während der Ausbreitung im Medium beeinflussen. Die Effekte wirken am stärksten auf den zeitlich später eintreffenden, gestreuten Wellenanteil (Coda Anteil). Diese Diffusion, die Streuung an Mikrostrukturen (Gesteinskörnung, Mikrorissen), untersucht unter anderem Anugonda *et al.* (2001). Die Autoren beschreiben, dass die Streuung von Ultraschallwellen höherer Frequenzen an den Zuschlägen (Diffusivität) auf die Energiedichte einen größeren Einfluss als deren Schwächung durch die Betonmatrix (Dissipation) hat. Die Diffusivität sollte daher besonders empfindlich gegenüber mikrostrukturellen Veränderungen beispielsweise durch eine Veränderung in der Anzahl und der Verteilung von Mikrorissen sein [Anugonda *et al.* (2001)]. Ebenso sollten Methoden, welche die Streuung einer Ultraschallwelle auswerten, wie die CWI und Kreuzkorrelation, empfindlicher sein als Methoden, die nur die Schwächung der Ultraschallwelle auswerten, wie die Betrachtung der Amplitudenänderung.

### 3.2 Dauerüberwachung von Betonbauwerken

Unter der Bezeichnung Structural Health Monitoring (SHM) (dt.: strukturelle Zustandsüberwachung) werden Installationen zur Überwachung von Strukturen im Ingenieurwesen zusammengefasst. Nutzt man SHM Systeme, möchte man die Strukturen über lange Zeiträume hinweg auf ihre Sicherheit und Zuverlässigkeit kontrollieren, den gegenwärtigen Zustand einschätzen, die Konstruktionsdauer verkürzen oder die Langzeiteinflüsse auf eine Konstruktion erforschen, um Standards und Inspektionstechniken anzupassen oder auftretende Fehler frühzeitig zu detektieren [Dong & Song (2010), Enckell (2011), Peeters & De Roeck (2001), Cardini & DeWolf (2009)]. Durch die vielen gesammelten Daten eines SHM Systems lassen sich zu dem Computer gestützte Modelle der Konstruktion verbessern, um Schädigungen zu simulieren und dadurch real beobachtete Veränderungen automatisch interpretieren zu können [Dong & Song (2010), Mustapha *et al.* (2015), Nguyen *et al.* (2015)]. Durch Computer gestützte Berechnungen zur strukturellen Integrität einer Struktur ist auch die Bestimmung der Restlebensdauer vorstellbar [Nguyen *et al.* (2015)]. Beispiele zu überwachender Strukturen sind Brücken, Dämme, Fundamente, geotechnische Strukturen, historische Gebäude, Pipelines, Offshore Plattformen und Druckbehälter. Ein SHM System soll zuverlässige Informationen zu der Integrität der Struktur liefern. Welche Parameter dafür überwacht werden, hängt von der Struktur, deren Material und Geometrie, und der Untersuchungsmethode und damit der Art des Überwachungssystems ab.

Nach Dong & Song (2010) werden SHM Systeme in Klassen eingeteilt, die verschiedene Level der Entwicklung und Komplexität repräsentieren. Die Klassifizierung reflektiert auch das Ziel einer Überwachung. Die Komplexität eines Systems reicht vom Ziel, Schäden in der Struktur zu detektieren, bis hin zum Ziel, Schäden in der Struktur zu detektieren, zu lokalisieren, das Ausmaß zu quantifizieren und dadurch die Sicherheit der Struktur einzuschätzen. Eine strukturelle Zustandsüberwachung lässt sich auf verschiedene Arten realisieren: Es können statische



oder dynamische Versuche durchgeführt werden, die Überwachung kann periodisch oder kontinuierlich sein, aktiv oder passiv. Je nach Art der Überwachung können die Sensoren permanent an der Struktur befestigt sein oder temporär während einer Testphase, werden die Daten manuell ausgelesen oder automatisch übertragen. Durch die unterschiedlichen Arten der Überwachung und die verschiedenen Level der Komplexität variieren die Bestandteile eines SHM Systems. In der Tabelle 3.1 sind wesentliche Bestandteile zusammengefasst, die gegebenen Beispiele lassen sich nach belieben ausweiten [Dong & Song (2010), Enckell (2011), Peeters & De Roeck (2001), Mustapha *et al.* (2015), Nguyen *et al.* (2015)].

Bestandteile	Beispiele
Sensornetzwerk	Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren Dehnungssensoren Beschleunigungsaufnehmer Faseroptische Sensoren ...
Datentransfer/Kommunikation	ferngesteuert über das Internet manuell vor Ort ...
Datenbearbeitung	manuell automatisch ...
Datenspeicherung	vor Ort nach ferngesteuerter Übertragung ...
Analyse und Diagnose	manuell oder automatisch Nutzung verschiedener Auswertemethoden Nutzung von künstlichen selbst lernenden Netzwerken Nutzung von strukturellen Modellen ...
Wiedernutzung der Informationen	Anwendung neuer Analysewerkzeuge Vergleich mit anderen SHM Systemen ...

Tabelle 3.1: Übersicht über die Bestandteile eines Systems für die strukturelle Zustandsüberwachung, zusammengestellt aus: Dong & Song (2010), Enckell (2011), Peeters & De Roeck (2001) und Mustapha *et al.* (2015).

Ein SHM System nutzt vermehrt Techniken und Methoden, die aus der ZfP von Stahl- und Betonstrukturen bekannt sind. Wo die klassische ZfP lediglich lokal den gegenwärtigen Zustand eines Materials bestimmt, wird mit einem SHM System die zeitliche Entwicklung der Antwort

der Struktur auf verschiedene äußere und innere Einflüsse beobachtet. Die Antwort der Struktur reflektiert deren Zustand.

Die auf die Auswertung von Vibrationen gestützte Überwachung bedient sich der äußeren Anregung der Struktur durch statische oder dynamische Belastungen. Die Belastungen werden dabei entweder geplant eingeleitet oder entstehen zufällig. Im Falle der Überwachung einer Brücke beispielsweise, wird die zufällige Belastung durch den Verkehr verursacht. Die Reaktion der Struktur auf diverse Belastungen wird durch die Sensoren aufgenommen. Unter anderem lassen sich die Eigenfrequenz, die Moden der Schwingungen, die Lastverteilung, der maximale Stress und das Dämpfungsverhalten der Schwingung auswerten [Cardini & DeWolf (2009), Peeters & De Roeck (2001)]. Änderungen dieser Parameter können ein Indiz für strukturelle Veränderungen des Bauwerks sein und werden weiter analysiert. Die genutzten Sensoren sind oft eine Kombination aus Beschleunigungssensoren und Dehnungsaufnehmern, sie werden an der Oberfläche montiert oder in die Struktur mit eingebettet. Diese auf der Vibrationsantwort basierende Überwachung betrifft das Verhalten der gesamten Struktur, kleinere Schäden wie Mikrorisse lassen sich nicht lokalisieren [Mutlib *et al.* (2016)].

Die auf die Auswertung von sich ausbreitenden Ultraschallwellen gestützte Überwachung basiert meist auf der aktiven Erzeugung von Ultraschallwellen im Inneren der Struktur. Ein Ultraschallsensor erzeugt eine Ultraschallwelle, die sich im Bauteil ausbreitet und von einem weiteren Ultraschallsensor empfangen wird. Änderungen in der Wellenausbreitung können ein Indiz für Veränderungen im Material zwischen Sender und Empfänger sein. Durch die strukturelle Zustandsüberwachung mit Ultraschallwellen lassen sich auch kleinere Schäden, wie Mikrorisse, detektieren. Je nach Material und Geometrie des Untersuchungsobjektes werden verschiedene Arten der Ultraschallwelle genutzt. Mit der Lamb-Welle, eine geführte Oberflächenwelle, lassen sich beispielsweise Risse in homogenem Stahl detektieren, die kleiner als  $1/3$  der Wellenlänge sind. Sie haben eine große Reichweite [Mutlib *et al.* (2016)]. In inhomogenem Material, wie Beton, werden die Lamb-Wellen jedoch stark gedämpft, zudem breiten sie sich nur in dünnen, oberflächennahen Schichten aus. Eine andere Oberflächenwelle, die Rayleighwelle, breitet sich auch in dickeren Betonschichten aus. Sie eignet sich gut für die Detektion von Änderungen in den elastischen Eigenschaften von Beton. Der Messaufbau ist für die kontinuierliche Überwachung von Betonkonstruktionen jedoch zu aufwendig [Wolf (2011)]. Die Raumwellen breiten sich auch in nicht geschichteten Materialien aus. Da sie sich im Inneren einer Struktur ausbreiten, werden sie in der zerstörungsfreien Prüfung sowohl von Stahl als auch von Beton überwiegend für die Untersuchung der Geometrie von Bauteilen, der Art und Position möglicher Einbauteile oder zur Lokalisierung von Hohlstellen, Rissen oder Delaminationen verwendet. Mit dem passiven Verfahren der Schallemission lassen sich aktuelle Veränderungen im Zustand eines Bauteils untersuchen. Dafür werden im Bauteil entstehende Mikrorisse mit Sensoren detektiert [Nair & Cai (2010), Große & Schumacher (2013)]. Die Sensoren sind an der Oberfläche der Struktur installiert. Das Verfahren hat das Potential, die Entstehung von Mikrorissen zu lokalisieren. Auch Langzeitüberwachungen lassen sich mit der Schallemission durchführen. Mutlib *et al.* (2016) hält

die Raumwellen aber für ungeeignet für die Überwachung größerer Strukturen, da durch die Schwächung der Welle der Schalldruck schnell abfällt und keine größeren Entfernungen zurückgelegt werden können.

### 3.3 Forschungslücke

Mit den bekannten SHM Methoden, die Antwort des Bauwerks auf künstliche oder natürliche Vibrationen zu untersuchen, können kleinere Schäden nicht detektiert werden. Mit der Schallemission lassen sich im Bauteil entstehende Mikrorisse detektieren und lokalisieren. Durch die hohe Rauschanfälligkeit der Methode und die relativ geringe Reichweite der Signale auf Grund der großen Schwächung im inhomogenen Beton wird diese Methode im SHM von Betonstrukturen wenig angewandt. In dem Sinne: Das Verfahren hat zwar das Potential die Entstehung von Mikrorissen zu detektieren und zu lokalisieren, ist aber zum derzeitigen Zeitpunkt nicht für größere Betonstrukturen geeignet.

Bei der dauerhaften strukturellen Zustandsüberwachung von Betonstrukturen mit dem Ultraschallverfahren werden die Ultraschallprüfköpfe meist auf der Oberfläche des Bauteils befestigt [Stähler *et al.* (2011), Salvermoser *et al.* (2015)] oder in das Bauteil selber mit einbetoniert [Niederleithinger *et al.* (2015a)]. Die erste Methode erzeugt das Problem von wechselnden Ankopplungsbedingungen und einer starken Beeinflussung der Signale durch die Umgebung. Die Einbettung hingegen birgt die Gefahr einer Zerstörung der Sensoren bei der Installation oder durch strukturelle Belastungen.

Derzeit gibt es kein System, das mit Raumwellen sowohl das Innere einer Betonstruktur als auch dessen oberflächennahe Gebiete auf entstehende Mikro- und Makrorisse dauerhaft aktiv überwacht. Ein großes Problem liegt vermutlich in der fehlenden Sensorik, um solch ein System zu realisieren. Für die Nutzung der Raumwellen in der dauerhaften und kontinuierlichen strukturellen Zustandsüberwachung bieten sich piezokeramische Sensoren an. Diese müssen nach Mutlib *et al.* (2016) robust sein, eine geringe Impulsspannung benötigen und eine große Reichweite haben. Um die Sensorzahl zu reduzieren, sollten sie sowohl als Empfänger als auch als Transmitter arbeiten. Die Leistung der Sensoren muss unabhängig von der Ankopplung sein. Sie sollten sowohl einzubetonieren sein, als auch an der Oberfläche befestigt werden können, um Risse im inneren der Struktur als auch oberflächennahe Risse detektieren zu können. Sind solche Sensoren realisiert und installiert, muss untersucht werden, ob und auf welche Art sich entstehende Schäden auf die sich ausbreitenden Raumwellen auswirken. Peeters & De Roeck (2001) beschreiben den Einfluss von globalen normalen Veränderungen in den Umweltbedingungen auf die Ergebnisse einer auf Vibrationen der Struktur basierenden Dauerüberwachung und untersuchen, wie sich dieser Einfluss von nicht normalen Veränderungen, hervorgerufen durch strukturelle Schäden, trennen lassen. Untersuchungen, wie sich diese globalen Einflüsse auf die Signale eingebetteter Ultraschallprüfköpfe bei einer dauerhaften Überwachung auswirken und diese von lokal auftretenden Schäden unterschieden werden können, gibt es nicht. Die Lambwelle wird durch Mikrorisse, die kleiner als die Wellenlänge sind, beeinflusst, die Überwachung mit Lambwellen gilt daher als

empfindliche Methode, Schäden im Anfangsstadium zu detektieren. Es gilt zu überprüfen, ob sich Mikrorisse auch mit Raumwellen detektieren lassen, wenn man empfindliche Auswertemethoden wie die Kreuzkorrelation, CWI und Amplitudenbestimmung verwendet.

Die in dieser Arbeit genutzten Ultraschallprüfköpfe erfüllen die Anforderungen an Ultraschallprüfköpfe für ein SHM System und machen somit eine dauerhafte, lückenlose Überwachung von Betonstrukturen basierend auf der aktiven Nutzung von Raumwellen möglich. Die in dieser Arbeit vorgestellte Einbetonierung in Betonbauten zeigt die Reichweite und Funktionsfähigkeit der Prüfköpfe. Ihr erfolgreicher Einsatz bei der Detektion von Mikro- und Makrorissen wird durch Laborversuche bewiesen. Durch zusätzliche Überwachung der Umgebungsbedingungen lassen sich natürliche, globale Einflüsse auf die Struktur, wie Temperatur, von unnatürlichen, lokalen Einflüssen, wie Schädigungen, unterscheiden. Je nach Komplexität des SHM Systems kann die Ultraschallmethode als alleinige Überwachungsmethode genutzt werden oder eine wertvolle Ergänzung zu anderen Überwachungsmethoden, wie der Vibrationsmethode, sein.

## Kapitel 4

# In Beton einzubettende Ultraschallprüfköpfe

Durch eine dauerhafte Überwachung von Bauwerken mithilfe von einzubettenden Ultraschallprüfköpfen lassen sich sowohl andauernde geringfügige Veränderungen im Beton als auch plötzliche gravierende Veränderungen über einen langen Zeitraum hinweg beobachten. Beliebig tief eingebettet, liefern diese Prüfköpfe Informationen aus dem Inneren des Bauteils unabhängig von Zugänglichkeiten oder Oberflächenbeschaffenheit. Die Überwachung kann über einen beliebig langen Zeitraum, mit nahezu gleichbleibender Ankopplung erfolgen. Die flächendeckende Installation der Prüfköpfe und der Einsatz von empfindlichen Auswertemethoden, die im Kapitel 2.2 vorgestellt sind, ermöglichen, einen großen Bereich des Betonbauteils integral zu überwachen und so Schädigungen frühzeitig zu registrieren. Die Nutzung der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe und die damit verbundene Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken aus Beton ersetzt nicht die in der DIN 1076 festgelegten Prüfungen, stellt aber eine Erweiterung der herkömmlichen Methoden der Bauwerksprüfung dar.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes ERA.Net RUS: # 23 UNeCOM wurden von der Moskauer Firma Acoustic Systems (ACSYS) piezoelektrische Ultraschallprüfköpfe zur direkten Einbettung in Beton entwickelt. In diesem Kapitel wird zuerst die Bestimmung der Mittenfrequenz dieser neuartigen Prüfköpfe beschrieben. Nachfolgend werden die Untersuchungen zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Abstrahlcharakteristik vorgestellt und mit Modellrechnungen verglichen. Abschließend wird der maximale Abstand zwischen den Prüfköpfen abgeschätzt. Zusätzlich wird die Installation der Prüfköpfe in im Bau befindliche Betonelemente und bereits fertig gestellte beschrieben. Die Ergebnisse dieses Kapitels wurden bereits in Wolf *et al.* (2014b) und Wolf *et al.* (2014a) veröffentlicht.

### 4.1 Herkömmliche Ultraschallprüfköpfe

Üblicherweise können Ultraschallprüfköpfe sowohl als Sender als auch als Empfänger betrieben werden, wobei meist der piezoelektrische Effekt von piezoelektrischen Keramiken genutzt wird.

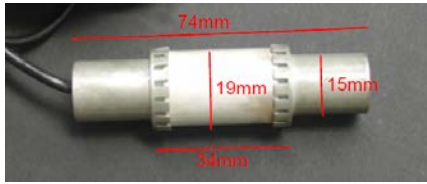


Abbildung 4.1: Ultraschallprüfkopf S0807 der Firma ACSYS zum Einbetten in Beton.

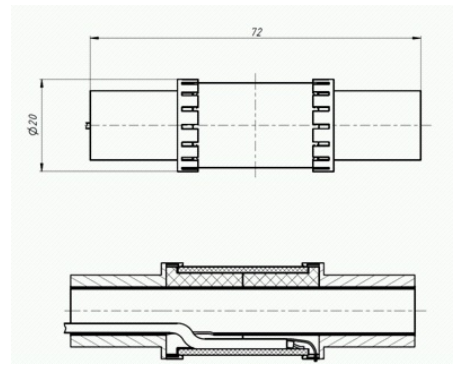


Abbildung 4.2: Aufbauskizze der einzubettenden Ultraschallprüfköpfe [Fa. ACSYS].

Der Prüfkopf arbeitet als Empfänger, wenn bei einer mechanischen Verformung durch äußeren Druck auf der Oberfläche des piezoelektrischen Stoffes elektrische Ladungen erzeugt und gemessen werden. In der Umkehrung verursacht eine angelegte Spannung eine mechanische Verformung, die zur Deformation und Schwingung des piezoelektrischen Stoffes führt. Die dadurch entstehende Welle wird auf das Material übertragen, so dass der Prüfkopf als Sender arbeitet.

Die verwendeten Stoffe sind zumeist piezoelektrische Keramiken, die sich zu Platten verschiedener Dicke, Länge und Form verarbeiten lassen. Die Plattendicke  $d$  und die Ultraschallgeschwindigkeit  $v$  in der Keramik bestimmt deren Eigenfrequenz  $f_0 = v/2d$  [Krautkrämer & Krautkrämer (1986)] und damit auch die Frequenz der erzeugten Welle. Auf Grund der Verformung der Keramik werden neben P-Wellen immer auch S-Wellen ausgesandt<sup>1</sup>.

Für die üblichen Anwendungen bei der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen werden Punktkontakt-, Kontakt- oder SE-Prüfköpfe verwendet. Die Ankopplung der Prüfköpfe an die Oberfläche erfolgt durch Anpressen bzw. mit Hilfe von Koppelmitteln wie Vaseline oder Glycerin. Eine konstante Ankopplung über einen längeren Zeitraum ist mit herkömmlichen Prüfköpfen schwierig. Song *et al.* (2007) und Kee & Zhu (2013) haben flache, zylindrische Piezokeramiken als Prüfköpfe in Probekörper einbetoniert und deren Anwendung für die strukturelle Zustandsüberwachung von Betonbauwerken getestet. Diese Prüfköpfe sind noch in ihrer Reichweite begrenzt.

## 4.2 Neuartige einzubettende Ultraschallprüfköpfe

Die für diese Arbeit verwendeten Prüfköpfe S0807 der Firma ACSYS sind zylinderförmig, ca. 72mm lang und haben einen Durchmesser von 20mm. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen den Prüfkopf und dessen Geometrie. Der Schall wird von einem 30mm hohen Piezokeramikring erzeugt, der über einen PVC-Träger und ein Stahlrohr mit einem Messingkörper verbunden ist. Die Piezokeramik besteht aus einem Blei-Zirkonat-Titanat Stoffverbund mit einer Curie-Temperatur bei  $T_C = 280^\circ C$ . Zur Kontaktierung wird das Prüfkopfkabel durch das Stahlrohr von

<sup>1</sup>Weitere Informationen über piezoelektrische Stoffe, deren Wirkungsweise und Verwendung in Prüfköpfen finden sich bei Krautkrämer & Krautkrämer (1986, Kapitel 7).

innen an den Piezoring geführt. Diese Bauweise erlaubt es, auch mehrere Prüfköpfe, verbunden durch PVC-Rohre, in einer Reihe zu montieren. Die Kabel werden dabei durch die Prüfköpfe geführt. Die Prüfköpfe lassen sich mit Spannungen von bis zu  $U = \pm 200$  V betreiben.

### 4.2.1 Mittenfrequenz

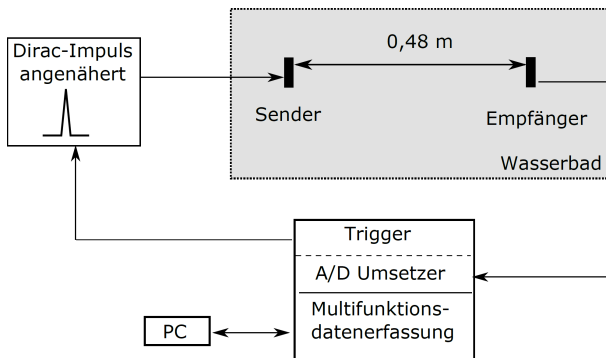


Abbildung 4.3: Illustration des Messaufbaus für die Bestimmung der Mittenfrequenz.

Für die Bestimmung der Mittenfrequenz der Prüfköpfe wird ein kurzer Impuls ( $T_i = 2 \mu\text{s}$ ), in Annäherung an einen Dirac-Impuls, auf einen Sendeprüfkopf gegeben und die Impulsantwort 48 cm entfernt durch einen baugleichen Prüfkopf aufgenommen. Beide Prüfköpfe sind während der Messung in einem Wasserbad angeordnet, um den Einfluss des Kornrauschens des Betons auf das Spektrum zu vermeiden. Der Messaufbau ist in Abbildung 4.3 skizziert. Insgesamt werden zehn Prüfköpfe in unterschiedlichen Sender- und Empfänger-

kombinationen geprüft und jeweils das Maximum der Spektraldichte der Impulsantworten ermittelt. Die Mittenfrequenz der Prüfköpfe liegt demnach bei  $f_M = 62 \text{ kHz} \pm 9 \text{ kHz}$ . Die Schwankungen in der Frequenz der Prüfköpfe entstehen durch minimale Abweichungen in der Dicke der Piezokeramiken und durch Abweichungen in der Verarbeitung. Abbildung 4.4 zeigt den Impuls, mit dem der Sendeprüfkopf angeregt wird, das am Empfängerprüfkopf empfangene Signal, die so genannte Impulsantwort, sowie dessen Spektraldichte.

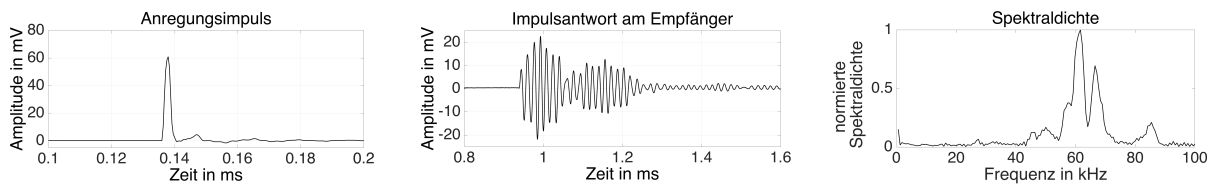


Abbildung 4.4: Der genäherte Dirac-Impuls als Anregung, die Impulsantwort aufgenommen am 48 cm entfernten Empfänger und das Spektrum des Signals. Die maximale Spektraldichte dieser Impulsantwort liegt bei 62 kHz.

### 4.2.2 Abstrahlcharakteristik

Zur Untersuchung der Abstrahlcharakteristiken werden zunächst Messungen in einem Wasserbad durchgeführt. Hierbei wird das Signal des Sendeprüfkopfes mit einem baugleichen Prüfkopf empfangen, während dieser im konstanten Abstand von 18 cm um den Sendeprüfkopf bewegt wird. Zusätzlich werden zwei zylinderförmige Betonprobekörper aus Normalbeton mit einem Größtkorn von 16 mm, einem Durchmesser von 1 m und einer Höhe von 0,5 m mit jeweils einem Prüfkopf

in der Probekörpermitte hergestellt. In einem der beiden Probekörper wird der Prüfkopf waagrecht zur Messebene und im anderen senkrecht dazu angeordnet, um jeweils die axiale und radiale Abstrahlung zu ermitteln. Abbildung 4.5 zeigt den Probekörper mit Prüfkopf waagrecht zur Prüfebene vor der Betonierung. Die Prüfköpfe werden mit einem Sender für bipolare Rechtecksignale mit einer Impulsdauer von  $T_i = 16,6 \mu\text{s}$  verbunden, wodurch der Prüfkopf in etwa mit seiner Eigenfrequenz angeregt wird. An der Betonoberfläche, auf Höhe des Senders, werden alle  $10^\circ$  der Umfang des Betonzylinders mit einem Laservibrometer abgetastet und die Schnelle in Strahlrichtung gemessen. Durch diese Prüfkopfanzordnung lässt sich sowohl die radiale als auch die axiale Abstrahlcharakteristik erfassen. Der Abstand zwischen der Oberfläche des Probekörpers und dem Laservibrometer bleibt dabei konstant.

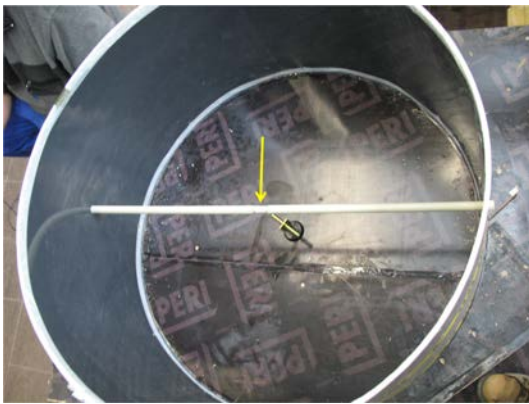


Abbildung 4.5: Schalung des Probekörpers vor der Betonierung. Der Prüfkopf, siehe Pfeil, ist waagrecht zur Messebene positioniert.

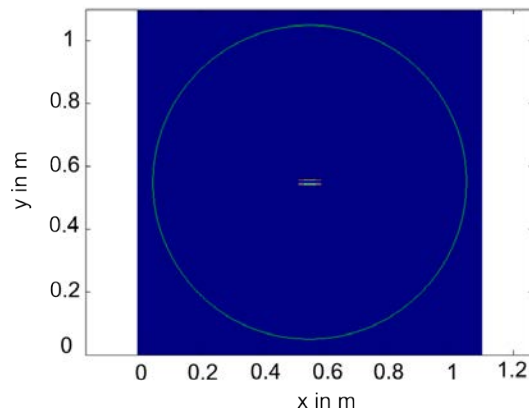


Abbildung 4.6: Anordnung des Prüfkopfs waagrecht zur Messebene und Aufpunktlinie für die Modellierung im Beton [Universität Kassel].

Die normierten Amplituden beider Experimente sind in Polardiagrammen in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Messungen im Wasserbad (Abbildung 4.7, Kreuze) zeigen, dass der Prüfkopf radial in jede Winkelrichtung gleichmäßig abstrahlt. In axialer Richtung ist das Signal deutlich schwächer. Nach der Einbettung des Prüfkopfs in den zylinderförmigen Betonprobekörper zeigt die Richtcharakteristik (siehe Abbildung 4.7, Punkte) deutliche Schwankungen, die durch die inhomogene Struktur des Betons verursacht werden. Bei den Messungen der Abstrahlcharakteristik in Beton zeigt sich in beiden Messebenen ein nahezu ungerichtetes Abstrahlungsverhalten, was die Kombination der Prüfköpfe als Sender und Empfänger auf unterschiedlichen Ebenen ermöglicht.

Neben den Experimenten in Wasser und Beton werden von Dr. Ing. Klaus Mayer des Fachgebietes „Theorie der Elektrotechnik und Photonik“, der Universität Kassel zweidimensionale Modellrechnungen durchgeführt, um die Ergebnisse zu verifizieren. Hierzu wird der Prüfkopf horizontal in einem Kreis mit einem Durchmesser von 0,18 m bzw. 1 m positioniert, je nach experimenteller Vorgabe. Das umgebende Material ist zum einen Wasser mit einer Dichte von  $998 \text{ kg/m}^3$  mit einer vorherrschenden P-Wellengeschwindigkeit von  $1483 \text{ m/s}$  und zum anderen ein Betonmix



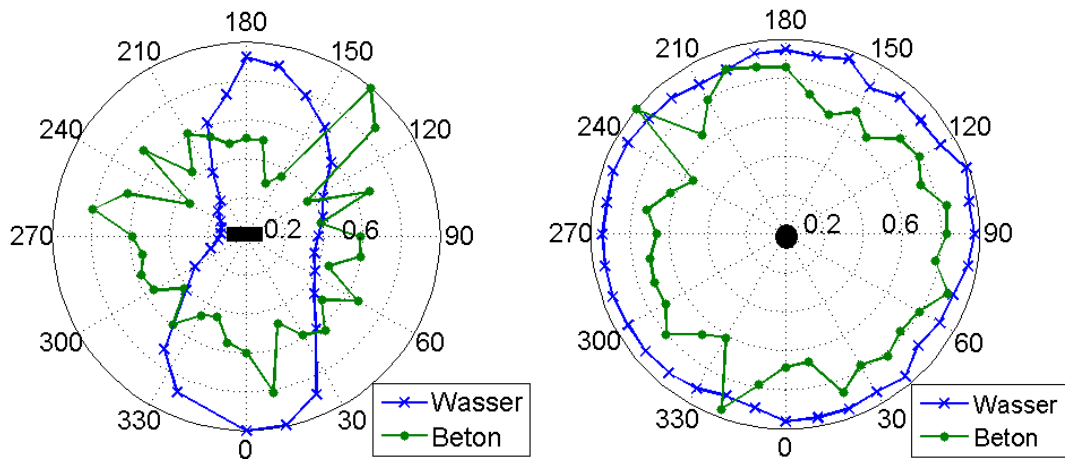


Abbildung 4.7: Darstellung der Beziehung zwischen der normierten relativen Schallschnelle und dem Abstrahlwinkel in Grad, für die waagerechte (links) und senkrechte (rechts) Ausrichtung der Prüfköpfe gegenüber der Messebene.

mit einer mittleren Dichte von  $2430 \text{ kg/m}^3$  und einer P-Wellengeschwindigkeit von  $5040 \text{ m/s}$ . Abbildung 4.6 zeigt das Modell für die Bestimmung der Abstrahlcharakteristik im Beton. Bei der Modellierung der Schallausbreitung im Wasserbad (siehe Abbildung 4.8, links) ist eine fehlende Abstrahlung in axialer Richtung zu erkennen. In der Abbildung 4.8, rechts, ist erkennbar, dass die modellierte Abstrahlung im Beton in axialer und radialer Prüfkopfrichtung ungerichtet ist, was in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Experimente steht.

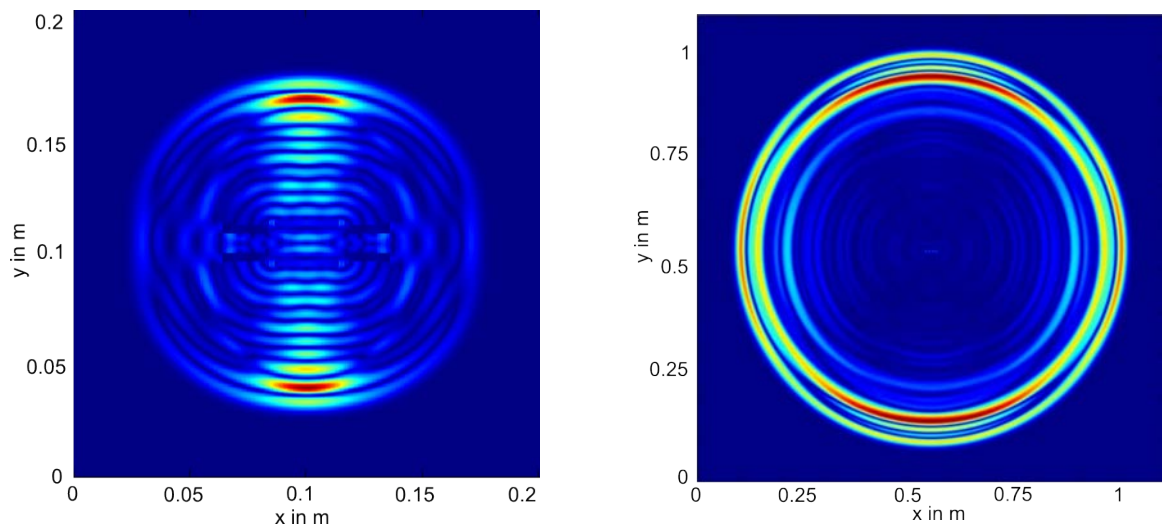


Abbildung 4.8: Darstellung der modellierten Abstrahlung für die waagerechte Ausrichtung der Prüfköpfe gegenüber der Messebene im Wasserbad (links) und im Beton (rechts) [Universität Kassel]. Die Achsen entsprechen den Geometrien der jeweiligen Experimente.

### 4.2.3 Prüfkopfabstände

Für die Planung eines Überwachungssystems mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen ist die Kenntnis des optimalen Prüfkopfabstands wichtig. Sind die Abstände zu groß, ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis für die Bestimmung der Signallaufzeiten eventuell zu gering. Werden die Prüfkopfabstände kleiner gewählt, wird die Aussagesicherheit der Bewertungsmethoden größer, aber es müssen auch mehr Prüfköpfe im Bauwerk installiert werden.

Um abschätzen zu können, wie stark die Signale vom Beton geschwächt werden, werden zwei Betonprobekörper mit den Maßen  $1,5\text{ m} \times 0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$  aus Normalbeton mit jeweils einem Größtkorn von 16 mm (GK 16) und 32 mm (GK 32) hergestellt. Die Betonprobekörper sind stellenweise bewehrt. Ein Teil der Prüfköpfe wird beim Bau direkt einbetoniert, ein anderer Teil nachträglich. Durch die Variation der Sender- und Empfängerkombination (Beispiel siehe Abbildung 4.9) ergeben sich unterschiedlich lange Laufwege der Ultraschallwelle, womit sich die Schallschwächung berechnen lässt.

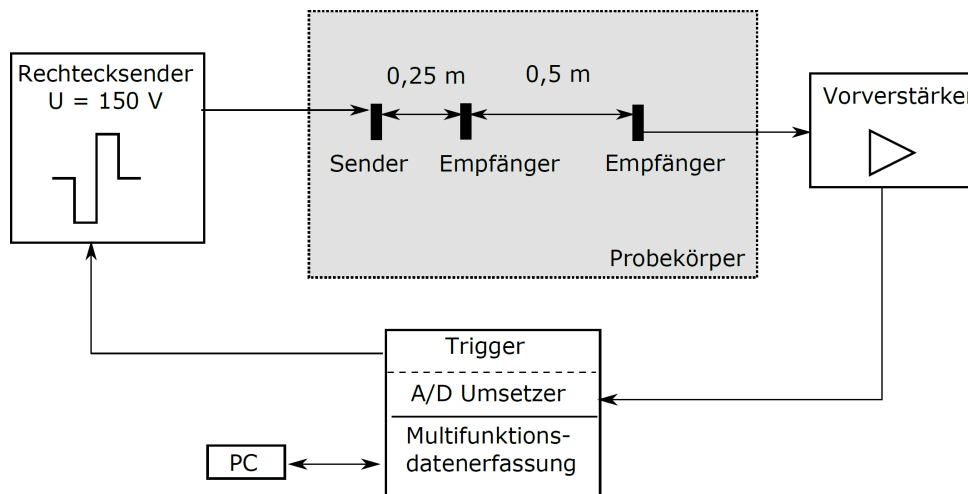


Abbildung 4.9: Illustration des Messaufbaus für die Bestimmung der Schallschwächung in Beton.

Die Experimente zur Richtcharakteristik der Prüfköpfe zeigen im Beton ein fast ungerichtetes Abstrahlungsverhalten, so dass für weitere Betrachtungen die Wellenausbreitung in Form einer Kugelwelle angenommen wird. Die Amplitude einer Kugelwelle nach dem Durchlaufen eines Mediums lässt sich unter Einbeziehung der sphärischen Divergenz durch folgende Formel beschreiben [Große (1996)]:

$$A(r_E) = \frac{r_0}{r_E} A_0 \exp(-\alpha(r_E - r_0)) \quad (4.1)$$

Stellt man diese Formel nach  $\alpha$  um, lässt sich die Schwächung bestimmen:

$$-\alpha = \left[ \ln\left(\frac{A_E}{A_0} * \frac{r_E}{r_0}\right) \right] \frac{1}{r_E - r_0} \quad (4.2)$$

$A_0$  und  $A_E$  sind die Amplituden des kürzeren,  $r_0$ , und des längeren Laufwegs  $r_E$ . Das Balkendiagramm in Abbildung 4.10 zeigt, wie viel Prozent der ursprünglichen Amplitude ( $A_0$ ) nach einem durchlaufenen Schallweg von  $\Delta r = r_E - r_0 = 0,5$  m für die zwei Größtkorngrößen für jeweils den ursprünglichen und den zusätzlich Prüfkopfeinbau verbleiben. Die hier gewählte Größtkörnung hat auf die Schallschwächung bei einer Wellenlänge von 70 mm nur geringen Einfluss, die Art des Einbaus hingegen einen großen. Bei nachträglichem Prüfkopfeinbau ist, in diesem Experiment, die Schwächung geringer als bei direktem Einbetonieren. Die Restamplitude ist jeweils größer. Die geringere Abnahme könnte Folge des nachträglichen Einbaus mit Einpressmörtel sein, der einen besseren Kontakt zwischen Prüfkopf und Beton ermöglicht. Der verwendete Mörtel ist ein Quellschutt der beim Aushärten eine Volumenvergrößerung von bis zu 2,5% erfährt [Zement (2012)]. Der Einfluss der Bewehrung ist vernachlässigbar, wenn die Prüfköpfe mindestens 5 cm vom nächsten Bewehrungsseisen eingebettet sind.

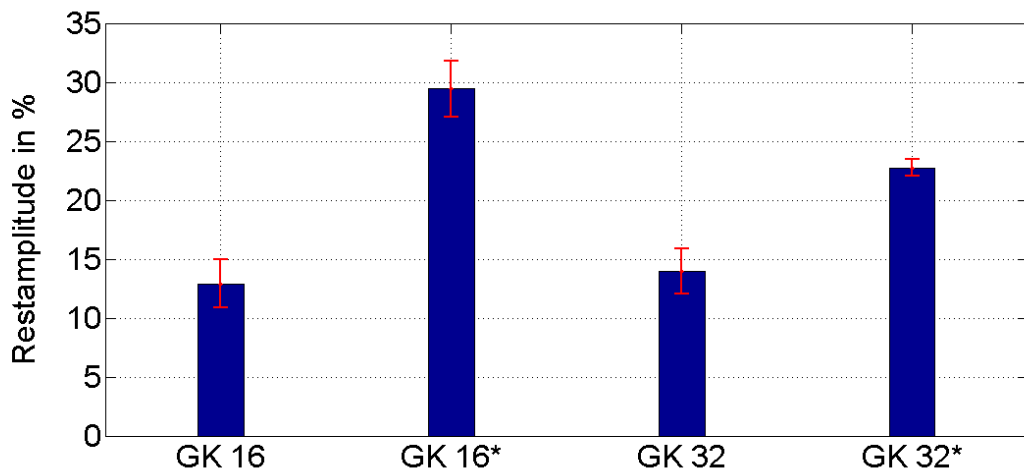


Abbildung 4.10: Restamplitude nach einem Laufweg von 0,5 m in Abhängigkeit von der Betonzuschlagsgröße und der Art des Sensoreinbaus. \* steht für den nachträglichen Einbau der Prüfköpfe. Die Signale der nachträglich eingebetteten Prüfköpfe werden am wenigsten geschwächt.

Um aus der Schwächung die maximalen Prüfkopfabstände zu bestimmen, wird im Folgenden ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von  $SRV \geq 2$  vorausgesetzt, mit dem der Ersteinsatz des Ultraschallsignals noch sicher bestimmt werden kann. Mit der verwendeten Messapparatur ergeben sich je nach Ankopplung der Prüfköpfe in den verwendeten Prüfkörpern Reichweiten zwischen 3 m und 6 m, also auch Prüfkopfabstände von 3m - 6m. Dazu werden in die umgestellte Gleichung 4.1

$$-r_E = \frac{A_0 * r_0}{A_E} * 10 \left[ \frac{-\alpha}{20} * (r_E - r_0) \right], \quad (4.3)$$

folgende Daten eingesetzt: die Amplitude  $A_0$  des kurzen Laufwegs  $r_0$ , der Schwächungskoeffizient  $\alpha$  und die minimale Endamplitude von  $A_E = 2 * U_R$  nach Zurücklegen des Laufweges  $r_E$ . Bei der verwendeten Messapparatur beträgt die Rauschspannung  $U_R = 0,22$  mV. Abbildung 4.11 zeigt die Amplitudenentwicklung der Ultraschallsignale über die Entfernung vom Sender sowie

den Bereich, über dem sich die Ersteinsätze nach dem obigen Kriterium noch detektieren lassen (Detektionsgrenze).

Das elektrische Rauschen des Messsystems, die Ankopplung der Prüfköpfe und die Betonqualität haben entscheidenden Einfluss auf den maximalen Abstand der Prüfköpfe. Die obige Betrachtung beruht auf dem Ziel, den Ersteinsatz des empfangenen Signals auswerten zu wollen. Nutzt man andere Auswertungsmethoden, wie die CWI oder die Kreuzkorrelation, die auf der Betrachtung des gesamten Signals beruhen, lassen sich die Abstände bei gleichbleibender Empfindlichkeit gegenüber Materialveränderungen erhöhen.

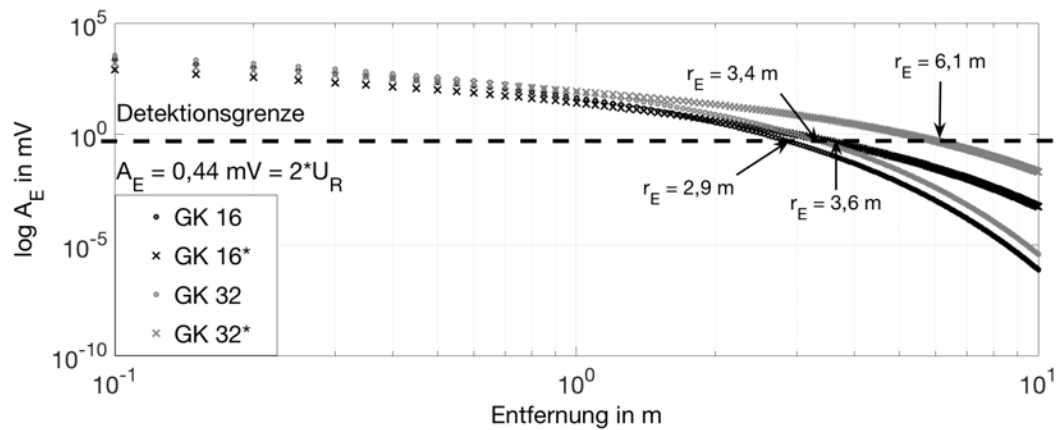


Abbildung 4.11: Abnahme der Signalamplitude am Empfänger mit zunehmender Entfernung zum Sender, für die zwei untersuchten Betonzuschlagsgrößen. \* steht für den nachträglichen Einbau der Prüfköpfe. Die Detektionsgrenze ist zwei mal der Rauschspannung des Messsystems.

#### 4.2.4 Prüfkopfinstallation

Da eine gute Ankopplung der Ultraschallprüfköpfe an den umgebenden Beton Voraussetzung für eine dauerhafte Bauwerksüberwachung ist, bedarf es einer sorgfältigen Installation der Prüfköpfe. Beim Einbau vor der Betonierung werden diese an der Verschalung oder derart an der Bewehrung befestigt, dass die Prüfköpfe keinen direkten Kontakt zu den Bewehrungsseisen haben. Der nachträgliche Einbau ist wesentlich komplizierter. Im Folgenden werden beide Methoden kurz vorgestellt.

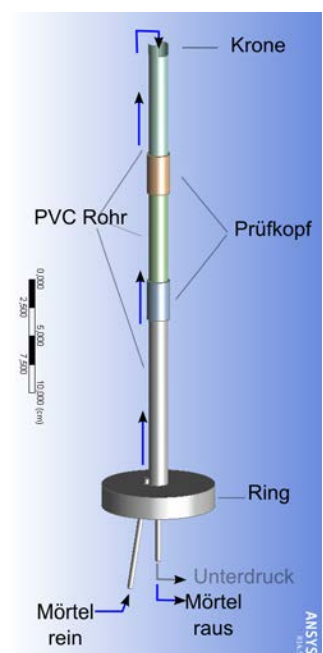


Abbildung 4.12: Das Montieren der Ultraschallprüfköpfe an die Verschalung (links) und an die Bewehrung (rechts).

Bei beiden Installationsarten werden die Prüfköpfe mit PVC-Rohren im Bauteil fixiert und die Prüfkopfkabel durch diese Rohre an die Bauteiloberfläche geführt. Wie in Abbildung 4.12 gezeigt, lassen sich die Prüfköpfe mit den PVC-Röhren an die Verschalung oder die Bewehrung montieren, um ein Verschieben bei der Betonierung zu verhindern. Bei dieser Methode können die Prüfköpfe in beliebiger Tiefe installiert werden. Beim Verdichten des Betons ist darauf zu achten, dass die Piezokeramik des Prüfkopfes nicht durch den Rüttler beschädigt wird.

Bei der nachträglichen Installation werden die Prüfköpfe über Bohrlöcher im Bauteil positioniert. Das Volumen zwischen Prüfkopf/PVC-Rohr und der Bohrlochwand wird mit Einpressmörtel verfüllt<sup>2</sup>. Der Mörtel ist zunächst flüssig. Beim Aushärten vergrößert sich dessen Volumen um bis zu 2,5 % [Zement (2012)], was zu einer guten Ankopplung der Prüfköpfe an den umgebenden Beton führt. Der verwendete Einpressmörtel hat ähnliche akustische Eigenschaften wie herkömmlicher Beton. Der Bohrlochdurchmesser sollte so klein wie möglich sein, um eine Schwächung der

Abbildung 4.13: Skizze der nachträglichen Installation der Prüfköpfe.



<sup>2</sup>In dieser Arbeit wird der Einpressmörtel CEM I 42,5 R rheoment der Dornburger Zement GmbH verwendet [Zement (2012)].

Konstruktion des Bauteils zu vermeiden.

Die nachträgliche Installation in einem Bauwerk wird in Abbildung 4.13 illustriert. Das Bohrloch mit dem PVC-Rohr wird mit einem Abdichtring verschlossen (Abbildung 4.13, Ring). Das Rohr bildet eine von zwei Öffnungen in dieser Bohrlochabdichtung. Bei der Installation über Kopf wird durch die erste Öffnung der Verpressmörtel in das Bohrloch gedrückt (Abbildung 4.13, Mörtel rein). Er steigt gleichmäßig nach oben und umgibt das PVC-Rohr und den Prüfkopf. Wird das Ende des Prüfkopf/PVC-Rohr Konstrukts erreicht, fließt der Mörtel über die obere Kante (Krone in Abbildung 4.13) in das Rohr hinein und aus der zweiten Öffnung im Ring aus dem PVC-Rohr hinaus (Abbildung 4.13, Mörtel raus). In diesem Moment werden beide Öffnungen des Bohrloches geschlossen. Nach dem Aushärten des Verpressmörtels lässt sich der abdichtende Ring abnehmen und wiederverwenden. Das den Prüfkopf umgebende Volumen ist vollständig mit Mörtel gefüllt und stellt so den Kontakt zwischen Prüfkopf und Beton sicher.

Durch die nachträgliche Installation der Prüfköpfe über Bohrlöcher ist die Einbautiefe der Prüfköpfe auf die maximal mögliche Bohrlochtiefe beschränkt. Diese ist von Bauteil zu Bauteil unterschiedlich. Eine dichte oberflächennahe Bewehrung kann das Bohren von Löchern in das Bauteil verhindern und dadurch eine nachträgliche Installation der Prüfköpfe unmöglich machen.

### 4.3 Zusammenfassung und Diskussion der in Beton einzubettenden Ultraschallprüfköpfe

Dieses Kapitel liefert die Grundlage, entstehende Schäden in einem Betonbauteil mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen über lange Zeiträume zu überwachen. Es wird gezeigt, dass sich die einzubettenden Ultraschallprüfköpfe auf Grund ihrer Robustheit und Geometrie gut für die Montage in Betonbauteilen in verschiedenen Tiefen eignen. Die Einbautiefe ist bei der Installation vor der Betonierung beliebig und bei einer nachträglichen Installation abhängig von den möglichen Bohrlochtiefen. Die niedrige Mittenfrequenz, die hohe Impulsspannung und die gute Ankopplung erlauben Abstände von mehreren Metern zwischen den Prüfköpfen. Die Prüfköpfe können in unterschiedlichen Tiefenebenen installiert werden. Die Ankopplung kann als konstant gut und damit dauerhaft angesehen werden.

Die mit der Firma ACSYS entwickelten einzubettenden Ultraschallprüfköpfe haben eine Mittenfrequenz von ca.  $f_M = 62 \text{ kHz}$ . Die Abstrahlcharakteristik in Beton ist fast ungerichtet. Die maximalen Abstände zwischen den Prüfköpfen, die eine Auswertung der Ersteinsätze ermöglichen, sind abhängig vom elektronischen Rauschen der Messapparatur, der Prüfkopfankopplung und dem Beton. Unter Laborbedingungen ergeben sich Abstände, in unbeschädigtem Normalbeton, von mindestens 3 m. Der nachträgliche Einbau von Prüfköpfen in Betonelemente ist möglich, wenn auch komplizierter als das Einbetonieren während der Konstruktion.

Die ungerichtete Abstrahlcharakteristik ermöglicht eine Positionierung der Prüfköpfe in unterschiedlichen Tiefen des Bauteils. Die Befestigung mit PVC-Röhren an der Bewehrung oder der Verschalung vor der Betonierung ermöglicht die Installation an den verschiedensten Orten eines

Bauteils. Durch eine nachträgliche Installation lässt sich die Überwachung von Betonbauteilen mit eingebetteten Prüfköpfen auch nachrüsten. Damit beim Bohren der hierfür notwendigen Löcher die Bewehrung oder andere Einbauteile nicht beschädigt werden, sollte der Bereich zuvor mit anderen ZfP-Verfahren untersucht werden.

Da die Prüfköpfe entweder direkt oder über einen Mörtel mit dem umliegenden Beton verbunden sind, ist die Ankopplung besonders gut, was zu einem hohen Signal-zu-Rausch Verhältnis führt. Wegen dieser guten Signalqualität lassen sich die Signale mit sehr empfindlichen Methoden, wie der Coda-Wellen-Interferometrie oder Kreuzkorrelation, auswerten.

Die Lebensdauer der Prüfköpfe ist zum derzeitigen Zeitpunkt nicht bekannt. Die Ankopplung eines eingebetteten Prüfkopfes an den umgebenden Beton wird bei einem ungeschädigten Bauteil als konstant gut angenommen. Zu einer geringen Veränderung der Ankopplungsbedingungen könnte über die Jahre das Schwinden des Betons führen, da die Prüfköpfe zunehmend fester mit dem Bauteil verbunden sein würden. Die Volumenverminderung durch das Schwinden wird auch Einfluss auf die Ausbreitung des Ultraschalls zwischen den Prüfköpfen haben und könnte mit den empfindlichen Auswertemethoden detektiert werden. Wie groß der Einfluss der natürlichen Alterungsprozesse von Beton im Vergleich zu schadhafte Veränderungen ist, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Aufgrund der zum Bauteilvolumen betrachteten relativ geringen Volumenänderung [DIN EN 1992-1-1 (1992, Abschnitt 3.1.4)] wird nicht erwartet, dass der Einfluss des Schwindens größer ist als der auftretender Schäden im Bauteil. Bei der Untersuchung von Betonbauteilen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen mit dem Ziel, Schäden zu detektieren, wird daher von einer konstanten und dauerhaft guten Ankopplung der Prüfköpfe in gesundem Beton ausgegangen. Ein Experiment zur Langzeitüberwachung einer Staumauer mit Ultraschall zeigt bereits, dass die damalige Generation eingebauter Ultraschallprüfköpfe, bei geringer Ausfallquote, seit bereits über 36 Jahren gleich bleibende Signalqualität liefern [Niederleithinger *et al.* (2015a)].





## Kapitel 5

# Einfluss der Umgebung auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe

Ziel der Arbeit ist, durch Schäden verursachte Änderungen, mit dem Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe zu erfassen. Hierfür müssen Änderungen im Signal, hervorgerufen durch Umgebungseinflüsse, kompensiert werden. An Betonbauwerken verursachen wechselnde Umweltbedingungen die Änderung der Betontemperatur und der Betonfeuchtigkeit. Diese Faktoren sind unabhängig von den Materialeigenschaften, beeinflussen aber die Wellenausbreitung und damit die Prüfergebnisse. Um diese Faktoren von den Materialänderungen selbst zu trennen, muss deren Einfluss auf die Ultraschallwelle besser verstanden werden. Dazu werden Experimente durchgeführt, die im Labor Änderungen in der Temperatur und der Feuchtigkeit an Probekörpern mit eingebetteten Prüfköpfen nachstellen. In Kapitel 5.1 werden Experimente zum Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Prüfköpfe selbst und anschließend auf die eingebetteten Prüfköpfe untersucht. In Kapitel 5.2 werden Messungen an Probekörpern mit unterschiedlichen Feuchtesättigungen vorgestellt.

### 5.1 Experimente zum Temperatureinfluss

Da die Ultraschallgeschwindigkeit im Beton von der Temperatur abhängig ist [DIN EN 12504-4 (2004), Crawford (1997)], muss die Temperatur zum Zeitpunkt einer Messung mit erfasst werden, um diesen Temperatureinfluss kompensieren zu können. Im Folgenden werden neben dem Temperatureinfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit auch deren Einflüsse auf die Signalamplitude und das Spektrum untersucht. Dabei sind der Temperatureinfluss des Messsystems, insbesondere der Temperaturdrift der Prüfköpfe, und die Temperaturempfindlichkeit der P-Welle in Beton zu unterscheiden.

### 5.1.1 Temperatureinfluss auf die Prüfköpfe

Zunächst wird der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Prüfköpfe betrachtet. Im Detail wird untersucht, wie sich die einzelnen Komponenten der empfangenen Impulsantworten unter Temperatureinfluss ändern.

#### Beschreibung der Versuchsmethode

Zwei Prüfköpfe des Typs SO807 von der Firma ACSYS werden in direktem Kontakt zueinander in einem Klimaschrank positioniert und, um eine Positionsänderung zu verhindern, minimal mit Kunststofffasern umwickelt. Die Temperatur im Klimaschrank ändert sich über die Zeit (siehe Abbildung 5.1) über zwei Zyklen (Zyklus 1 = Z1, Zyklus 2 = Z2). Alle 10 min wird der als Sender betriebene Prüfkopf mit einem bipolaren Rechteckimpuls mit einer Frequenz von  $f = 60\text{ kHz}$  angeregt und die Impulsantwort am zweiten Prüfkopf, dem Empfänger aufgezeichnet. Die Temperatur am Ort der Messtechnik, des Signalverstärkers, der Verbindungskabel und des Frequenzgenerators, liegt bei  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ . Ausgewertet werden die manuell bestimmte Vorlaufzeit der Prüfköpfe, das Spektrum der Signale und die Änderung der Schalldruckamplitude gegenüber einem Referenzsignal bei  $20^\circ\text{C}$ .

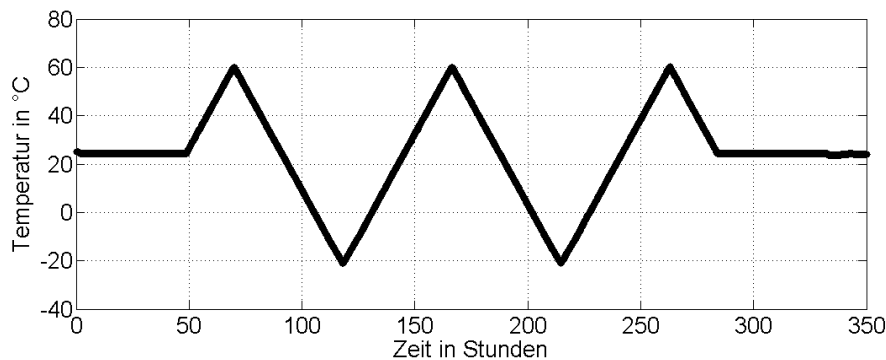


Abbildung 5.1: Temperaturverlauf im Klimaschrank über die Zeit.

## Ergebnisse und Diskussion

### *Vorlaufzeit*

Abbildung 5.2 zeigt die Vorlaufzeit des Messsystems in Abhängigkeit von der Temperatur der Prüfköpfe. Im steigenden Temperaturbereich zwischen  $-20^\circ\text{C}$  und  $60^\circ\text{C}$  gibt es eine Unstetigkeit in der Vorlaufzeit. Sie steigt zwischen den Temperaturen  $0^\circ\text{C}$  und  $25^\circ\text{C}$  leicht an. Im fallenden Temperaturbereich bleibt die Vorlaufzeit dagegen nahezu konstant. Für die Fehlerbetrachtung wird der Mittelwert aller Signale innerhalb einer Temperaturänderung von  $1^\circ\text{C}$  ausgewertet.

### *Spektrum*

In den Abbildungen 5.3 bis 5.5 sind beispielhaft für drei verschiedene Temperaturen typische Ul-

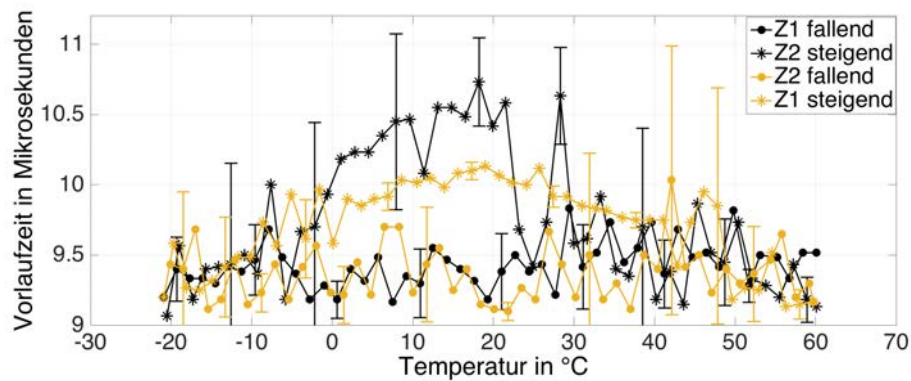


Abbildung 5.2: Die Änderung der Vorlaufzeit der Prüfköpfe mit der Temperatur.

traschallsignale und ihre normierten Spektren abgebildet<sup>1</sup>. Deutlich erkennt man die unterschiedlichen Ausschwingvorgänge. Je höher die Temperatur wird, desto schneller klingt die Schwingung des Prüfkopfes ab. Die Frequenz der größten Spektraldichte bleibt bei allen Signalen ähnlich. Bei höheren Temperaturen wird sie stärker gedämpft, andere Frequenzanteile werden dadurch dominanter.

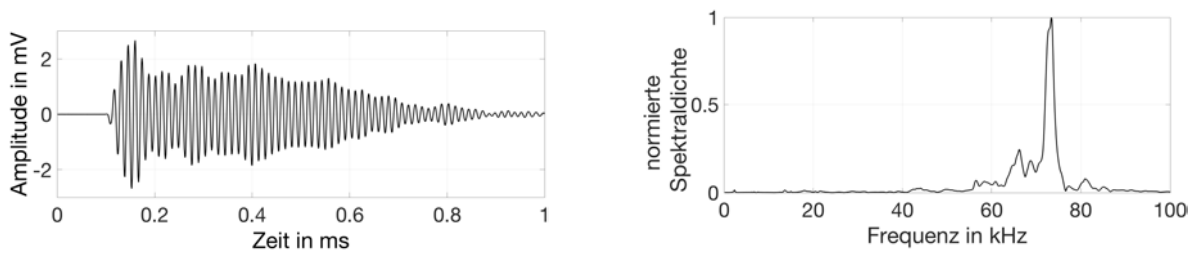


Abbildung 5.3: Impulsantwort des Prüfkopfes und dessen normiertes Spektrum, bei  $-20^{\circ}\text{C}$ .

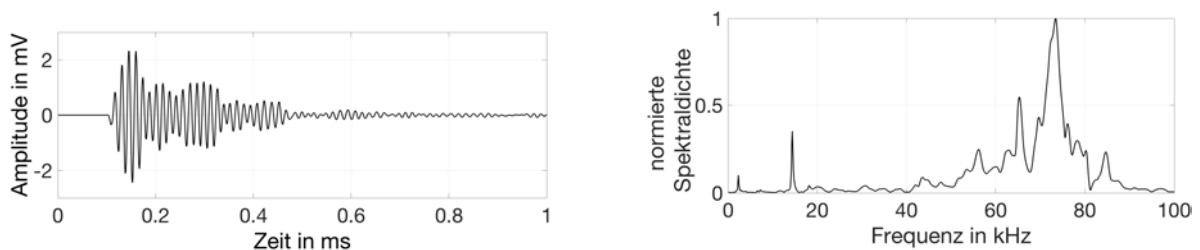


Abbildung 5.4: Impulsantwort des Prüfkopfes und dessen normiertes Spektrum, bei  $20^{\circ}\text{C}$ .

Abbildung 5.6 zeigt die Entwicklung der Maxima der Spektren während der beiden Temperaturzyklen, jeweils bezogen auf das Referenzsignal bei  $20^{\circ}\text{C}$ . Keine nennenswerten Unterschiede gibt es zwischen aufsteigenden und abfallenden Temperaturen. Die Amplitudenspektren haben ihre Maxima um  $72\text{ kHz}$ , bei höheren Temperaturen über  $55^{\circ}\text{C}$  verschieben sich auf Grund der stärkeren Dämpfung die Maxima zu höheren Frequenzen.

Die Untersuchung der Frequenzanteile der Signale mit der kontinuierlichen Wavelet Transforma-

<sup>1</sup>Zur Beschreibung der Begriffe Spektrum und Spektraldichte wird auf das Kapitel 2.2.2 verwiesen.

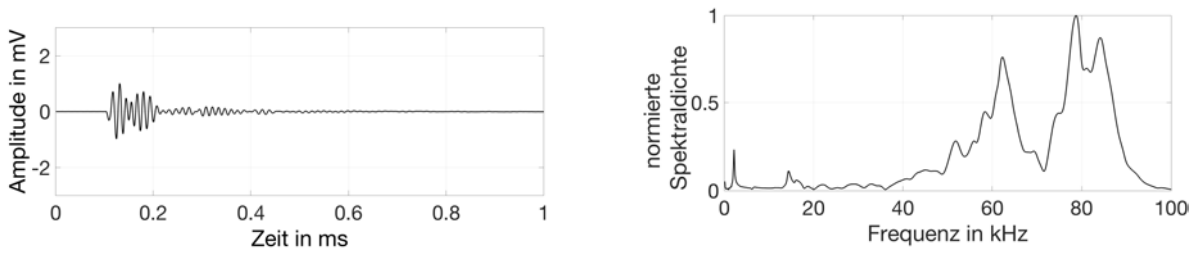


Abbildung 5.5: Impulsantwort des Prüfkopfes und dessen normiertes Spektrum, bei  $60^{\circ}\text{C}$ .

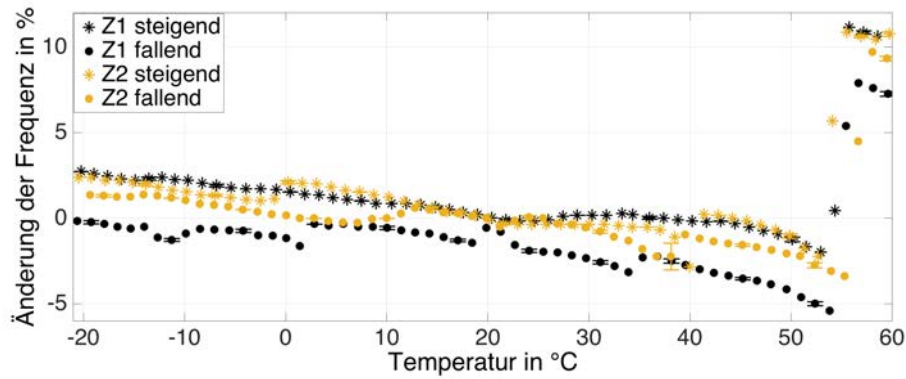


Abbildung 5.6: Entwicklung des Maximums des Spektrums mit der Temperatur der Prüfköpfe.

tion ergibt, dass sich das Spektrum kaum über die Signallänge ändert. Abbildung 5.7 zeigt das jeweilige Spektrum der Impulsantworten der Abbildungen 5.3 bis 5.5 entlang der Zeitachsen. Bei allen Signalen ist die gleiche dominante Frequenz vorhanden, die sich auch beim Abklingen nicht verändert.

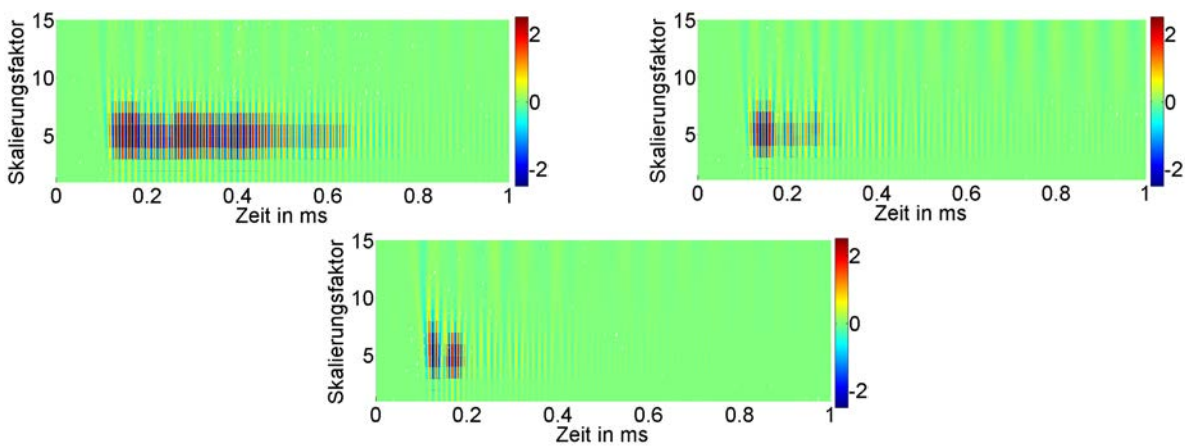


Abbildung 5.7: Vergleich der Frequenzentwicklung entlang der Zeitachse für verschiedene Temperaturen, oben links das Spektrum bei  $-20^{\circ}\text{C}$ , oben rechts bei  $20^{\circ}\text{C}$ , unten mittig bei  $60^{\circ}\text{C}$ . Die dominante Frequenz um den Skalierungsfaktor 5 ist bei allen Temperaturen gleich.

### Amplitude

Die Betrachtung der Amplitudenänderung im Ultraschallsignal erfolgt ebenfalls in Bezug auf das

entsprechende Referenzsignal bei 20 °C Raumtemperatur. Auf die Betrachtung der absoluten Werte wird verzichtet, da bei der Auswertung einer Dauerüberwachung Veränderungen in den Signalparametern ebenfalls in Bezug auf einen Referenzzustand bewertet werden.

Wie in den Abbildungen 5.8 oben links zu sehen, fallen die Amplituden des ersten Maximums der Impulsantworten bei Temperaturen über 30 °C ab, bei tieferen Temperaturen bleiben sie nahezu konstant. Geringfügige Unterschiede gibt es zwischen den Signalamplituden aus dem steigenden Temperaturbereich und dem fallenden. Abbildung 5.8 oben rechts zeigt den starken Abfall der Amplitude des Scheitelwertes bei über 20 °C. Bei tieferen Temperaturen nimmt die Amplitude zu. Im Vergleich zum Referenzwert bei 20 °C Raumtemperatur nimmt die Gesamtenergie der Signale (siehe Abbildung 5.8 unten) bei abfallenden Temperaturen zu und bei ansteigenden Temperaturen ab. Dabei steigt die Energie im negativen Temperaturbereich besonders stark an, was am langsameren Abfall der Signalenergie bei negativen Temperaturen liegt (siehe Abbildung 5.3).

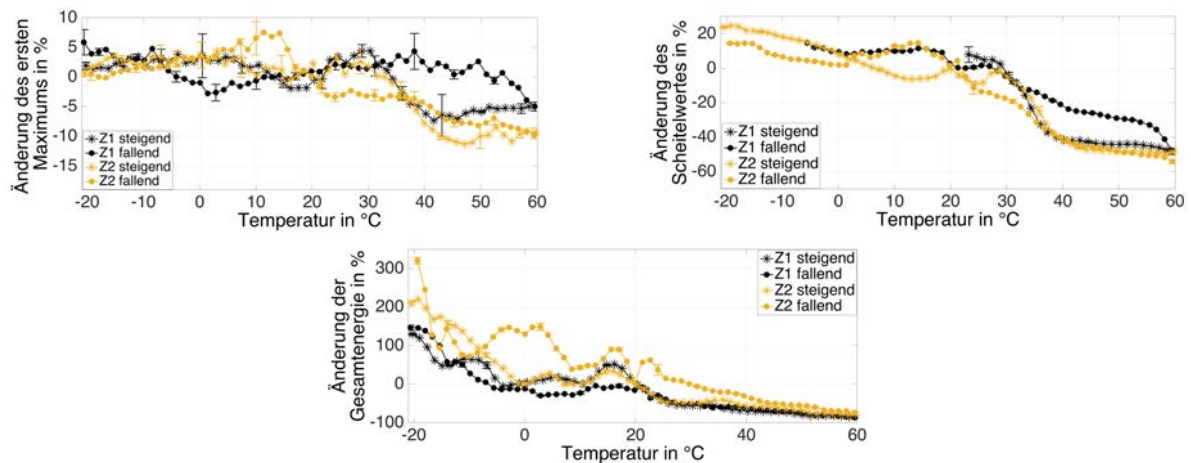


Abbildung 5.8: Änderung der Amplituden des ersten Maximums (oben links), des Scheitelwertes (oben rechts) und der Gesamtenergie (unten mittig) der Impulsantwort mit der Temperatur.

### Zusammenfassung des Temperatureinflusses auf die Prüfköpfe

Die Temperatur hat einen Einfluss auf die Prüfköpfe. Die einzelnen Komponenten der Impulsantwort ändern sich bei veränderten Temperaturbedingungen ohne das Medium Beton zwischen Sender und Empfänger in verschiedenen Maßen. Die Vorlaufzeit der Prüfköpfe ändert sich kaum. Auch die Spektraldichte behält ihr Maximum bei einer Frequenz von 72 kHz über einen großen Temperaturbereich. Dagegen ändert sich das Abklingverhalten der Impulsantwort sehr stark, was sich besonders in der Entwicklung des Scheitelwertes und der Gesamtenergie widerspiegelt. Neben dem Einfluss der Temperatur auf die einzelnen Prüfköpfe sollte auch der Einfluss der Messtechnik, vor allem des Signalverstärkers, der Verbindungskabel und des Frequenzgenerators beobachtet werden, deren Temperatur für dieses Experiment nahezu konstant gehalten wird.

### 5.1.2 Temperatureinfluss auf Prüfköpfe im Beton

Über den Temperatureinfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit in Beton gibt es für den Bereich von  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $40^{\circ}\text{C}$  viele Untersuchungen [DIN EN 12504-4 (2004), Niederleithinger & Wunderlich (2013), Crawford (1997)]. In der vorliegenden Studie wird zudem der Temperaturbereich unter  $0^{\circ}\text{C}$  untersucht, da dieser bei der Überwachung von Bauwerken relevant ist. Neben der Änderung der Geschwindigkeit ist auch die Amplituden- und Frequenzentwicklung der Ultraschallsignale von Interesse.

#### Beschreibung der Versuchsmethode

Für die Untersuchungen werden zwei Zyklen vom Beginn eines Frost-Tau-Wechsel-Experiments ausgewertet, welches im Kapitel 7 detaillierter beschrieben wird (Abbildung 5.9). Für dieses Experiment werden drei Probekörper mit der Druckfestigkeitsklasse C 25/30, mit der Sieblinie B 16 und einem Wasserzementwert von 0,55 hergestellt. Die Probekörper haben die Größe  $0,4\text{ m} \times 0,12\text{ m} \times 0,12\text{ m}$ . Jeweils zwei Ultraschallprüfköpfe werden im Abstand von  $0,28\text{ m}$  eingebetont (siehe Abbildung 5.10). Ein Prüfkopf dient als Sender, der zweite als Empfänger. Der Sender wird mit einem bipolaren Rechteckimpuls mit der Amplitude  $U = 100\text{ V}$  und der Frequenz  $f = 60\text{ kHz}$  angeregt. Das Messintervall beträgt  $10\text{ min}$ . Eingebettete Thermoelemente überwachen die Temperatur in der Probekörpermitte. Sie verläuft von  $-17^{\circ}\text{C}$  bis  $+17^{\circ}\text{C}$ . Die Messtechnik befindet sich außerhalb des Klimaschranks bei Temperaturen von  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Bestimmt werden die Geschwindigkeit der Signale über die Laufzeit, die Amplitudenentwicklung und das Spektrum sowie die Änderung des Kreuzkorrelationskoeffizienten und der Geschwindigkeit, bestimmt mit der Coda-Wellen-Interferometrie Methode. Aus den Messungen aller drei Probekörper werden für die Auswertung jeweils die Mittelwerte gebildet. Die Veränderungen der Signalparameter lassen sich vergleichen, indem sie jeweils in Prozenten gegenüber den Referenzwerten bei  $17^{\circ}$  angegeben sind.

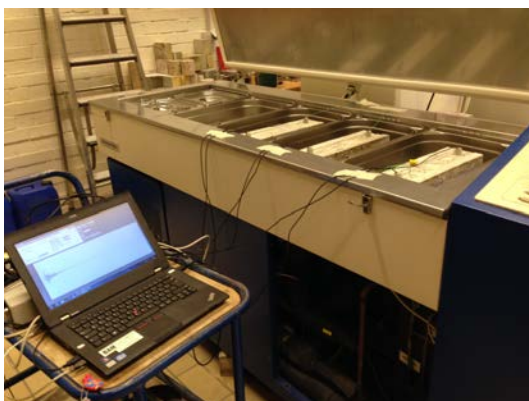


Abbildung 5.9: Experimentieraufbau zur Bestimmung des Einflusses von Frost-Tau-Zyklen auf das Verhalten des Ultraschallsignals.

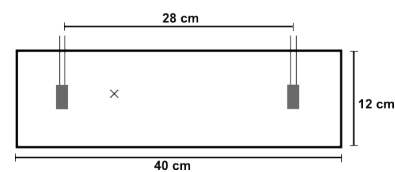


Abbildung 5.10: Probekörper für die Untersuchung des Verhaltens des Ultraschallsignals auf Temperaturänderungen im Beton. Die Quader repräsentieren die eingebetteten Prüfköpfe, das Kreuz das eingebettete Thermoelement.

## Ergebnisse und Diskussion

### *Geschwindigkeit*

Abbildung 5.11 zeigt die Ultraschallgeschwindigkeit über der Temperatur entlang zweier Frost-Tau-Zyklen zu Beginn des FTW-Experiments. Die Geschwindigkeit wird über die Laufzeit des interpolierten empfangenen Signals bestimmt. Sie ist der Mittelwert aller drei Probekörper. Zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $-17^{\circ}\text{C}$  kommt es zu einer Erhöhung der Ultraschallgeschwindigkeit um 6 %. Wie auch von Niederleithinger & Wunderlich (2013) bei positiven Temperaturen beobachtet, unterliegt der funktionale Zusammenhang zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit  $v$  und der Temperatur  $T$  ( $v = f(T)$ ) einer Hysterese. Grund hierfür ist der Temperaturgradient innerhalb des Betons. Bei Temperaturen über  $0^{\circ}\text{C}$  ist keine eindeutige Änderung in der Geschwindigkeit zu erkennen. Zudem erhöht sich der Rauschanteil im Signal wodurch das Bestimmen des Ersteinsatzes ungenauer wird und die Fehlerbalken um den Mittelwert der Geschwindigkeiten zunimmt. Eine empfindlichere Auswertungsmethode, wie sie von Niederleithinger & Wunderlich (2013) genutzt wird, zeigt hier die von den Autoren beobachtete fortlaufende Geschwindigkeitsabnahme. Die Abnahme der P-Wellengeschwindigkeit bei zunehmender Temperatur lässt sich unter anderem durch die Wärmeausdehnung des Betons erklären, wodurch längere Laufwege und Laufzeiten entstehen. Vor allem hat die geringere P-Wellengeschwindigkeit im flüssigen Porenwasser gegenüber der größeren Geschwindigkeit im gefrorenen Porenwasser Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit im gesamten Betonkörper (siehe Tabelle 2.1).

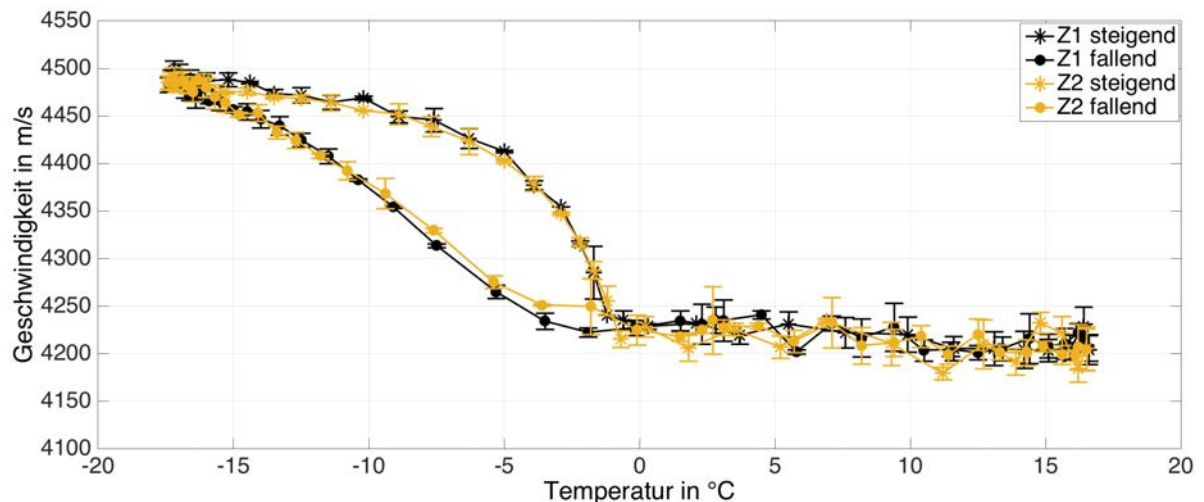


Abbildung 5.11: Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit mit der Temperatur, ausgewertet nach zwei Frost-Tau-Zyklen.

### *Spektrum*

In den Abbildungen 5.12 und 5.13 sind für zwei Temperaturen typische Ultraschallsignale und

ihre normierten Spektren abgebildet. Im Zeitbereich sind unterschiedliche Ausschwingvorgänge zu erkennen. So klingt bei höheren Temperaturen die Schwingung schneller ab als bei niedrigeren, was auch schon im Kapitel 5.1.1 beobachtet wird. Bei der Ausbreitung in Beton erfolgt das Abklingen jedoch aufgrund der gestreuten Wellenanteile langsamer. Die Spektren haben ein Maximum bei 70 kHz und 75 kHz. Die Untersuchung der Frequenzanteile der selben Signale mit der kontinuierlichen Wavelet Transformation ist in Abbildung 5.14 zu sehen. Bei beiden Signalen liegt die dominante Frequenz bei einer Wavelet Skalierung von 5, die 70 kHz entspricht. Zudem gibt es noch niederfrequente Anteile. Bei positiven Temperaturen klingt der hochfrequente Anteil schnell ab.

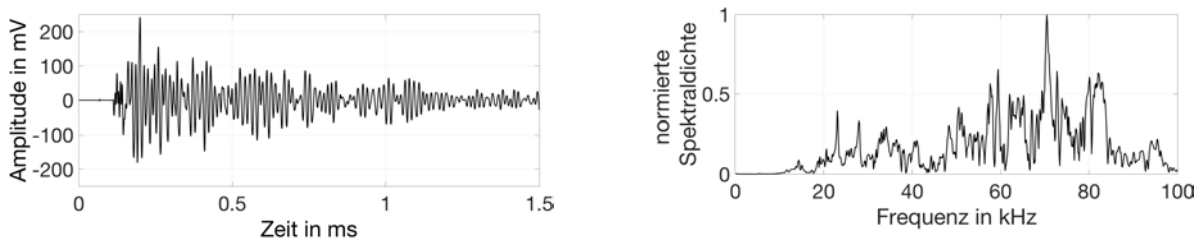


Abbildung 5.12: Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von Beton, bei  $-17^{\circ}\text{C}$ .

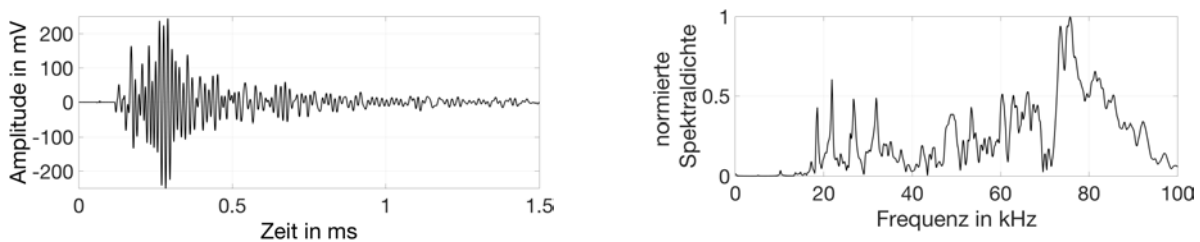


Abbildung 5.13: Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von Beton, bei  $17^{\circ}\text{C}$ .

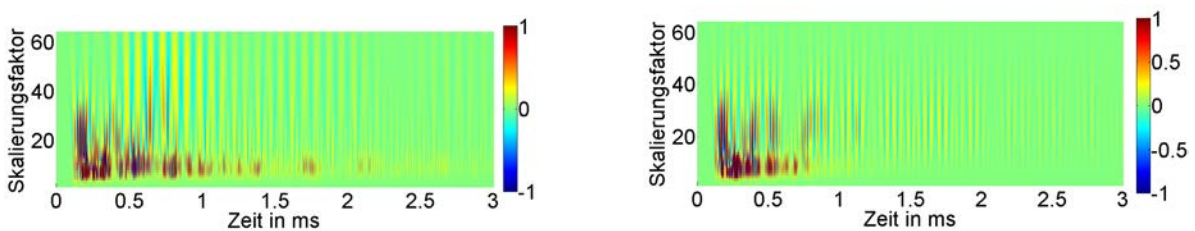


Abbildung 5.14: Vergleich der Skalierungsfaktoren entlang der Zeitachse bei  $-17^{\circ}\text{C}$  (links) und bei  $17^{\circ}\text{C}$  (rechts).

Die Auswertung des Maximums des Spektrums über der Temperatur erweist sich nach der Mittelwertbildung über alle Probekörper als sehr fehlerbehaftet (siehe Anhang: Seite 141, Abbildung A3). Der hohe Fehler von bis zu 100 % Abweichung entsteht durch das Spektrum der Zeitsignale im Beton, mit wenig ausgeprägten Maxima.



### Amplitude

Wie schon in den Zeitsignalen der Abbildungen 5.12 und 5.13 zu sehen, ändern sich die erste Amplitude und die Gesamtenergie der Ultraschallsignale mit den Betontemperaturen. Die Abbildung 5.15 zeigt diese Signalparameter über zwei Frost-Tau-Zyklen. Es zeigt sich eine Hysterese. Die stärkste Veränderung ist beim Übergang vom gefrorenen zum getauten Zustand zu beobachten. Hier bilden sich Amplitudenmaxima oder -minima aus, je nachdem ob die Temperatur steigt oder fällt. Ursache hierfür ist der Phasenübergang des in den Zementporen gesammelten Wassers zu Eis [Setzer (2002)]. Beim Abkühlen wird Wasser aus der Zementmatrix in die Poren gedrückt und gefriert zu Eis. Das Ultraschallsignal wird somit weniger geschwächt. Wenn der Beton auftaut, schmelzen die Eispartikel bereits unter dem makroskopischen Schmelzpunkt [Setzer (2002)], so dass das Ultraschallsignal bereits bei Minusgraden stärker geschwächt ist. Außerhalb des Temperaturbereiches des Phasenüberganges ist die Schalldruckamplitude beinahe konstant, mit größeren Amplituden bei negativen Temperaturen. Die stärkere Amplitudenschwächung bei positiven Temperaturen entsteht durch verstärkte Streuung an den Übergängen zwischen Porenwasser (Flüssigkeit) und Zementmatrix (Festkörper), gegenüber der Streuung zwischen Eis (Festkörper) und Zementmatrix (Festkörper).

Da die Darstellungen des Scheitelwertes und dessen Verschiebung entlang der Zeitachse keine zusätzlichen Informationen liefern und einen großen Fehler aufweisen, werden sie hier nicht weiter betrachtet (siehe Anhang: Seite 141, Abbildung A4).

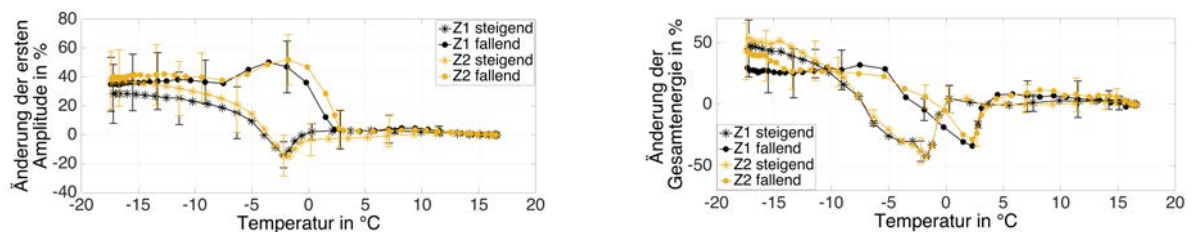


Abbildung 5.15: Entwicklung der ersten Signalamplitude (links) und der Gesamtenergie (rechts) des Ultraschallsignals, nach Transmission im Beton, über die Temperatur.

### Kreuzkorrelation

Der Kreuzkorrelationskoeffizient wird für alle drei Probekörper (PK1, PK2, PK3) bestimmt und in den Abbildungen 5.16 einzeln dargestellt. Als Referenzsignal dient jeweils das Ultraschallsignal aufgenommen bei einer Betontemperatur von 17°C. Auch bei der Entwicklung dieses Signalparameters ist eine Hysterese zu erkennen. Die größten Änderungen zwischen den Signalen sind im Bereich des Phasenüberganges des im Zement gebundenen Wassers (bei 0°C) zu beobachten. Der Verlauf des Kreuzkorrelationskoeffizienten ist für jeden Probekörper, sowohl bei negativen als auch bei positiven Temperaturen, unterschiedlich, weshalb kein Mittelwert gebildet wird. Die Abweichungen zwischen den Probekörpern ergeben sich aufgrund der individuellen, inhomogenen Verteilung der Betonzuschläge und der hohen Empfindlichkeit des Kreuzkorrelationskoeffizienten.

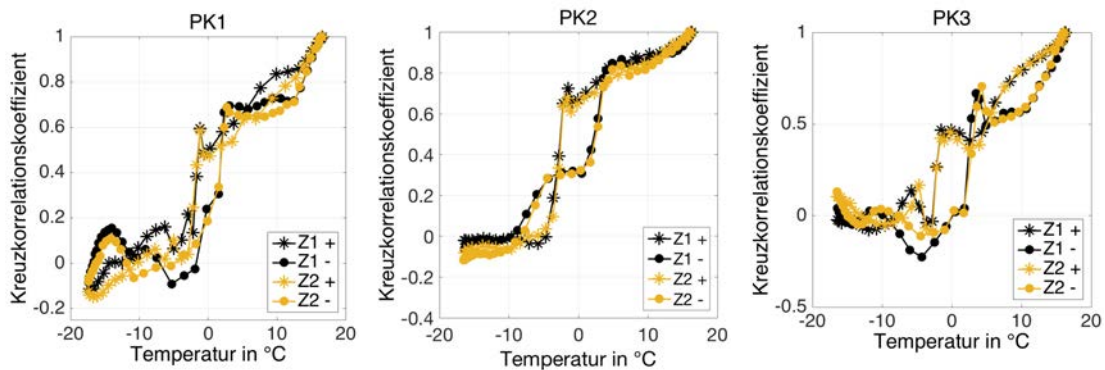


Abbildung 5.16: Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen Ultraschallsignalen bei unterschiedlichen Betontemperaturen, für alle drei Probekörper.

### *Coda-Wellen-Interferometrie*

Bei der Auswertung der Ultraschallsignale mit der Coda-Wellen-Interferometrie (CWI) zeigen sich große Unterschiede zwischen den drei Probekörpern (siehe Abbildung 5.17). Die Geschwindigkeitsänderungen der Signale im negativen Temperaturbereich sind gegenüber dem Referenzsignal bei  $17^{\circ}\text{C}$  sprunghaft und nicht mit Materialveränderungen zu erklären. Ursache ist vielmehr die geringe Korrelation zwischen den Signalen. Die CWI eignet sich besonders, um geringfügige Signalveränderungen zu registrieren. Ist die Zeitverschiebung zwischen zwei Signalen nicht wesentlich kleiner als die dominante Periode der Welle, ist die Gleichung A6 nicht mehr gültig und die Ergebnisse der CWI werden fehlerhaft [Snieder (2006)] (siehe auch Kapitel 2.2.4). Vergleicht man die Ergebnisse der CWI mit denen der Kreuzkorrelation, ist für den vorliegenden Fall die CWI bei Kreuzkorrelationsfaktoren unter 0,5 nicht mehr anwendbar.

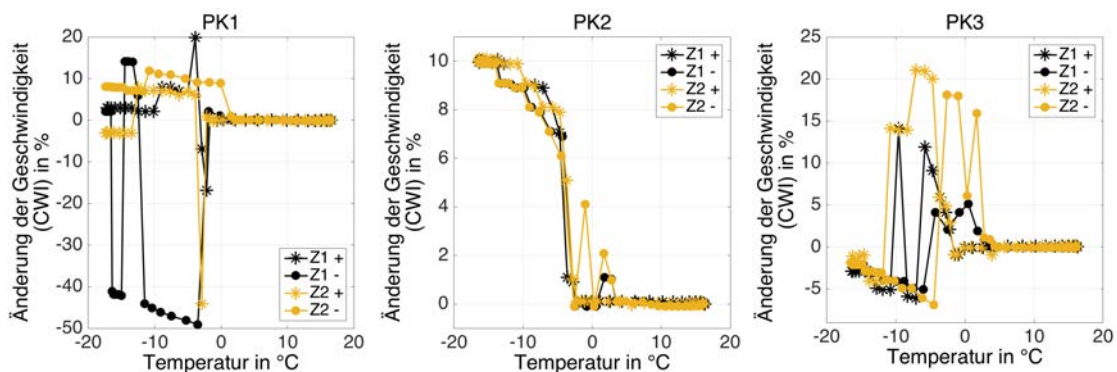


Abbildung 5.17: Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI, zwischen Ultraschallsignalen unterschiedlicher Temperaturzustände, für alle drei Probekörper. Als Referenz dient das Signal bei  $17^{\circ}\text{C}$ .

In der Regel ist das Referenzsignal bei der Auswertung mit der CWI-Methode für eine bestimmte Untersuchung konstant. Es lassen sich jedoch verschiedene Zeitpunkte als Referenz wählen, wenn sich das Material derart verändert, dass die Zeitverschiebung zwischen den Signalen des

Referenzzeitpunktes und eines anderen Zeitpunktes zu groß für die Auswertung mit der CWI ist. Werden langsam fortschreitende Veränderungen durch  $n$  aufeinanderfolgende Messungen beobachtet, wie im vorliegenden Experiment, bietet sich das jeweils vorher aufgenommene Signal  $n-1$  als Referenzsignal an. Das Signal zum Zeitpunkt  $t_n$  wird gegenüber dem Signal des Zeitpunktes  $t_{n-1}$  gestreckt beziehungsweise gestaucht. Die Abbildungen in 5.18 zeigen die Geschwindigkeitsänderungen bezogen auf den jeweils kälteren Zustand. Die maximale Geschwindigkeitsänderung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zuständen beträgt 1 % und liegt beim Auftauen des Betons, also bei Temperaturen unterhalb des makroskopischen Schmelzpunktes. Ursache ist die starke Abnahme der Wellengeschwindigkeit bei der Ausbreitung im Wasser gegenüber der Ausbreitung im Eis. In den Temperaturbereichen außerhalb des Phasenüberganges zwischen dem festen und flüssigen Zustand des Porenwassers sind keine sprunghaften Geschwindigkeitsänderungen zwischen den Signalen zu beobachten.

Es ist zu beachten dass die hier aufgeführten quantitativen Angaben zu den Veränderungen der Signalparameter abhängig von dem Beton, insbesondere dessen Porosität, und der Geometrie des Untersuchungsobjektes sind.

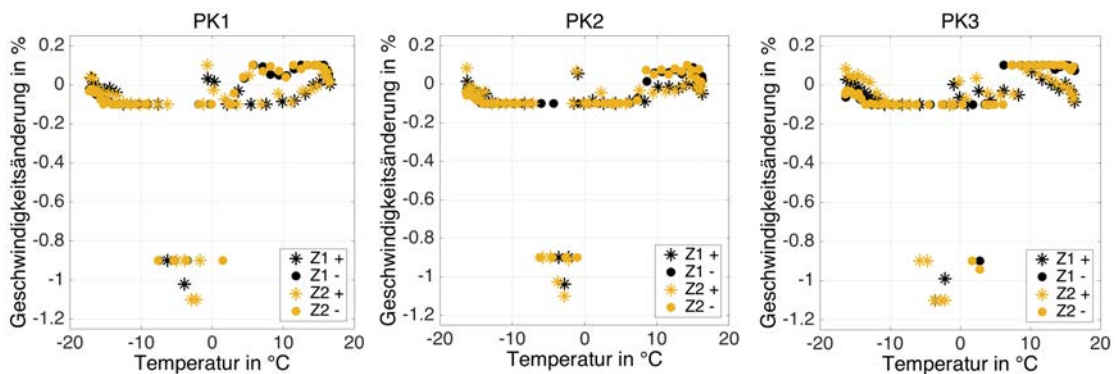


Abbildung 5.18: Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI, zwischen Ultraschallsignalen unterschiedlicher Temperaturzustände, für alle drei Probekörper. Als Referenzsignal diente der jeweils vorherige, kältere Zustand.

### Zusammenfassung des Temperatureinflusses auf die Prüfköpfe im Beton

Zum einen ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Impulsantworten der nicht eingebetteten Prüfköpfe und den Ultraschallsignalen, die sich im Beton ausbreiten, zu erkennen. Zum anderen verursachen verschiedene Betontemperaturen Veränderungen unterschiedlicher Signalparameter. Die Temperatur der Piezokeramik der Prüfköpfe beeinflusst die Charakteristik der empfangenen Signale. Im Detail lassen sich temperaturabhängige Amplituden und Spektren beobachten. Der Einfluss des Betons auf die Ultraschallsignale zeigt sich in der zusätzlichen Streuung und Absorption der Wellen, also deren Schwächung. Die Schwächung entsteht durch die Reflexion der Welle an den Zuschlägen des Betons und an der Geometrie der Probekörper, was zu einer Abnahme der Signalamplituden und zu einem verlangsamten Abklingen der Energie führt. Zudem filtert

der Beton hohe Frequenzanteile.

Auch bei der Ausbreitung im Beton verändern sich die Parameter der Ultraschallsignale mit der Temperatur. So kommt es zu einer Geschwindigkeits- und Amplitudenerhöhung bei negativen Temperaturen. Im Bereich des Frost-Tau-Überganges ändern sich die Signale besonders stark. Eine Hysterese, bei steigenden und fallenden Temperaturen, zeigt sich bei der Auswertung fast aller Signalparameter. Bei zu großen Zeitverschiebungen zwischen einem Signal und dem Referenzsignal zu Beginn einer Messreihe muss für die Auswertung mit der CWI-Methode als Referenzsignal das jeweils vorher aufgenommene genutzt werden.

Die Experimente zum Temperatureinfluss zeigen die Notwendigkeit, bei der Dauerüberwachung die Betontemperatur in Prüfkopfnähe mit aufzuzeichnen, da die Veränderung der Temperatur einen großen Einfluss auf die Ausbreitung des Ultraschallsignals und dessen Parameter hat.

## 5.2 Experimente zum Einfluss der Feuchtigkeit auf Prüfköpfe im Beton

Neben der Temperatur ist auch die Feuchtigkeit ein Faktor, der die Ausbreitung des Ultraschalls beeinflusst, unabhängig von den Materialeigenschaften des ausgehärteten Betons. Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse zu den Auswirkungen der Änderung der Betonfeuchtigkeit auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe vorgestellt.

### Beschreibung der Versuchsmethode

Für die Experimente werden zwei 24 Monate alte 0,4 m x 0,15 m x 0,15 m große Betonprobekörper der Druckfestigkeitsklasse C20/25 mit 16 mm Größtkorn verwendet, in die während der Herstellung zwei Ultraschallprüfköpfe vom Typ SO807 einbetoniert wurden. Die Probekörper (PK) werden in ein Wasserbad gelegt und in größer werdenden Abständen entnommen und gewogen, um die Massenzunahme zu bestimmen. Vor dem Wiegen werden an den abgetrockneten Probekörpern mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen die Messungen durchgeführt. Wenn notwendig wird zwischen den Messungen der Wasserstand aufgefüllt, um das kapillare Saugen zu ermöglichen. Am Ende des Experiments haben die Probekörper 108 Tage im Wasserbad gelegen und 3,4 % ihrer Masse an Wasser aufgenommen. Abbildung 5.19 zeigt einen Probekörper im Wasserbad. Die Temperatur der Probekörper und der Messtechnik während der Messungen liegt bei  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ . Die angegebenen Feuchteprozentage sind bezogen auf die Masse der Probekörper nach Lagerung in einer Klimakammer bei  $60^\circ\text{C}$  und 30 % Luftfeuchte, nachdem es zwei Wochen lang zu keiner Veränderung der Masse mehr gekommen war<sup>2</sup>. Auf Grund der individuellen, unterschiedlich ausgeprägten Aufnahme der Feuchtigkeit der jeweiligen PK, kann kein Mittelwert zu einem bestehenden Feuchtigkeitsgehalt gebildet werden. Die Ergebnisse der verschiedenen Auswertemethoden werden daher für jeden PK einzeln dargestellt.

### Ergebnisse und Diskussion

#### *Geschwindigkeit*

Abbildung 5.20 zeigt die Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit über die Massenprozentage an aufgenommenem Wasser. Nach anfänglichem Geschwindigkeitsabfall in den ersten zwei Tagen erhöht sie sich bis zum Beenden des Experiments nach 108 Tagen um 5,4 % für den PK1 und um 4,7 % für den PK2. Wenn der Beton über einen längeren Zeitraum erhöhter Feuchtigkeit ausgesetzt ist, füllen sich die Luftporen der Zementmatrix zunehmend mit Wasser. Dieser Prozess erfolgt unter anderem durch Diffusion und den kapillaren Effekt [Setzer (2002)]. Die durch den Beton laufende P-Welle hat im Wasser eine größere Geschwindigkeit als in der Luft, weshalb sich die P-Wellengeschwindigkeit im Beton mit zunehmender Feuchte erhöht.

---

<sup>2</sup>Eine Darrtrocknung wurde nicht durchgeführt, um die Prüfköpfe und Prüfkopfkabel nicht vor dem Experiment zu beschädigen.



Abbildung 5.19: Betonprobekörper im Wasserbad zur Untersuchung des Feuchteinflusses auf das Ultraschallsignal eingebetteter Prüfköpfe.

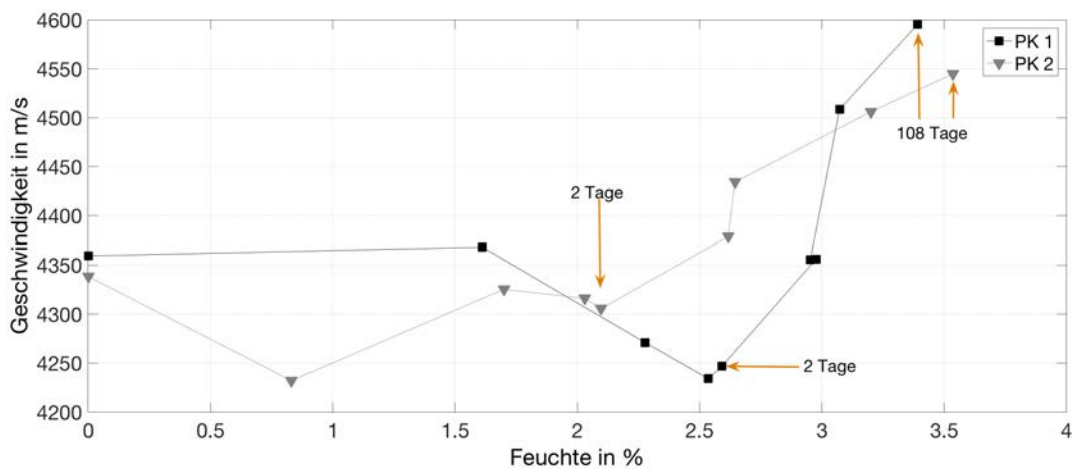


Abbildung 5.20: Ultraschallgeschwindigkeiten über die Feuchtezunahme.

### Spektrum

Abbildungen 5.21 und 5.22 zeigen beispielhaft typische Ultraschallsignale und deren normierte Spektren für zwei Feuchtegehalte (0 %rF und 3,1 %rF). Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Energiegehalte der Signale. Das Signal aus dem trockenen Beton hat stark verringerte Amplituden verglichen mit dem Signal aus dem feuchten Beton. Beide Signale sind aus verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt, mit einem Maximum bei 25 kHz im trockenen Beton und einem Maximum bei 73 kHz im feuchten Beton.

Das Spektrum entlang der Zeitachse ist in Abbildung 5.23 zu sehen. Die Untersuchung der Fre-

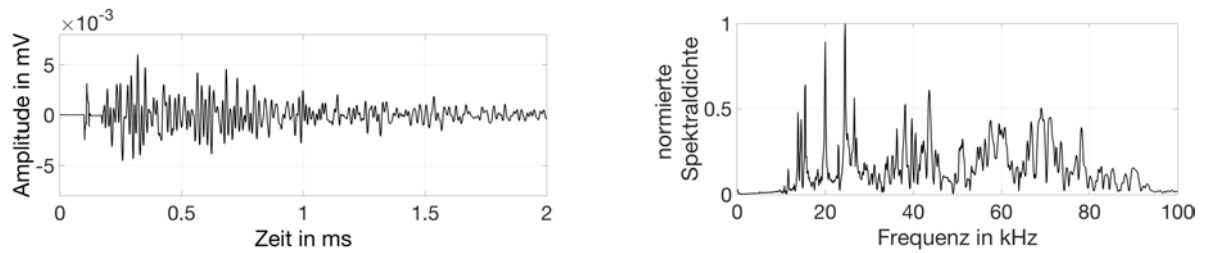


Abbildung 5.21: Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von trockenem Beton.

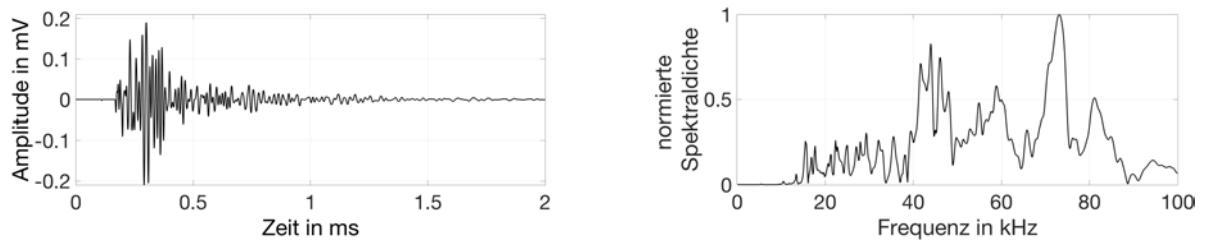


Abbildung 5.22: Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von Beton nach einer Feuchtezunahme von 3,1 %rF.

quenzanteile der Zeitsignale mit der kontinuierlichen Wavelet Transformation zeigt im Signal des trockenen Betons neben einem hochfrequenten Anteil um den Skalierungsfaktor 5, der 70 kHz entspricht, einen dominierenden niederfrequenten Anteil um den Skalierungsfaktor 17, 25 kHz entsprechend. Im Signal des feuchten Betons dominiert der hochfrequente Anteil.

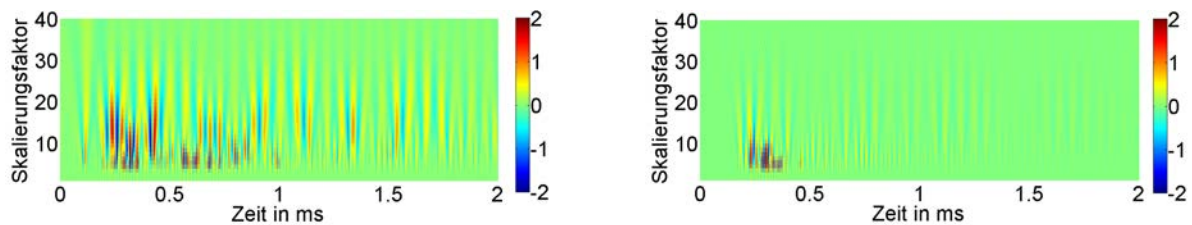


Abbildung 5.23: Vergleich der Skalierungsfaktoren entlang des Zeitsignals aus dem trockenen Zustand (links) und dem feuchten Zustand mit 3,1 %rF (rechts).

Abbildung 5.24 zeigt den Anstieg der Frequenz der maximalen Spektraldichte mit zunehmender Feuchte, bezogen auf das Referenzsignal des trockenen Zustandes. Da der Impedanzunterschied zwischen Zementmatrix und mit Luft gefüllten Poren höher ist als jener zwischen Zementmatrix und mit Wasser gefüllten Poren, werden die Ultraschallsignale im trockenen Beton stärker geschwächt. Daher werden die hohen Frequenzanteile stärker gefiltert und tiefere Frequenzen dominieren das Spektrum.

### *Amplitude*

Die verschiedenen Methoden zur Auswertung der Amplituden der Ultraschallsignale zeigen ähnliche Entwicklungen bei der Zunahme der Feuchte im Beton (siehe Abbildung 5.25). Nach einer

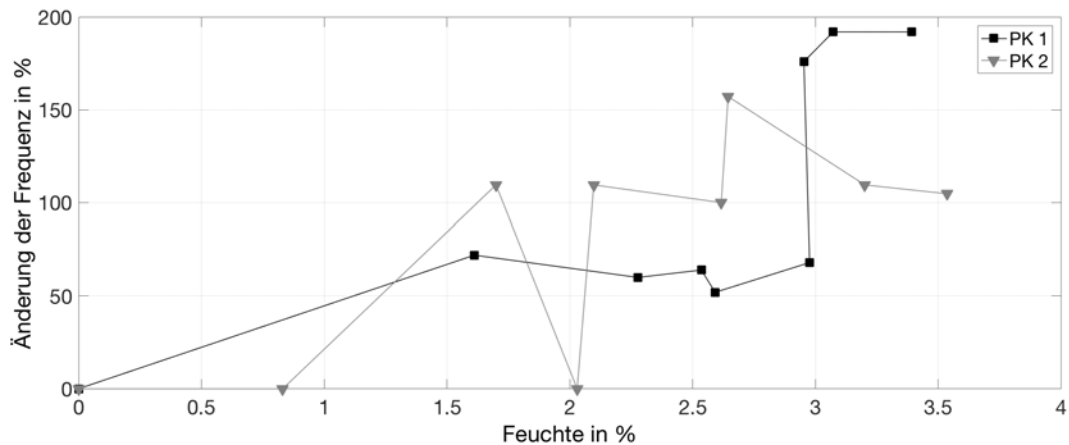


Abbildung 5.24: Entwicklung der Frequenz der maximalen Spektraldichte der Ultraschallsignale, nach Transmission im Beton, über die Feuchte.

anfänglichen Erhöhung fallen die Amplitude des ersten Maximums, die maximale Amplitude und die Gesamtenergie des Signals ab, bevor sie ab einer Feuchte von 3%rF stark ansteigen. Am stärksten wird hierbei die Amplitude des ersten Maximums beeinflusst.

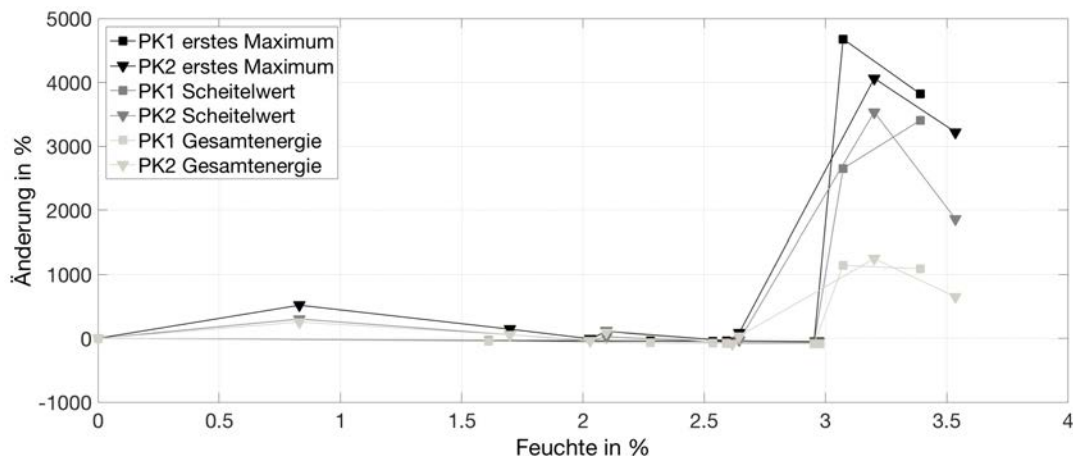


Abbildung 5.25: Entwicklung der ersten Amplitude, des Amplitudenmaximums und der Gesamtenergie der Ultraschallsignale, nach Transmission im Beton, über die Feuchte.

Bei lang einwirkender Feuchte füllen sich die Luftporen der Zementmatrix durch Diffusion und den kapillaren Effekt zunehmend mit Wasser [Setzer (2002)]. Da der Impedanzunterschied zwischen Beton und Wasser geringer ist als der zwischen Beton und Luft, werden die Ultraschallsignale bei der Transmission in feuchtem Beton weniger stark gestreut, was zu einer geringeren Schwächung der Signalamplituden führt. Die Betrachtung der Verschiebung der maximalen Signalamplitude entlang der Zeitachse ist im Anhang (Seite 141, Abbildung A5, links) zu finden, da sie für die Interpretation der Ergebnisse keine zusätzlichen Informationen bringt.



*Kreuzkorrelation und CWI*

Abbildung 5.26 zeigt die Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten und der Geschwindigkeitsänderung, bestimmt mit der CWI-Methode, mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt im Beton. Anfänglich fällt der Kreuzkorrelationskoeffizient stark ab, bevor er sich nur geringfügig verändert und nach 3%rF noch einmal stark abfällt, beim PK1 sogar unter den Wert Null. Der mit der CWI bestimmte Geschwindigkeitsabfall bei 3,5%rF ist bei den über die Laufzeiten bestimmten Geschwindigkeiten nicht zu sehen. Es lässt sich vermuten, dass die Zeitverschiebung zwischen den Ultraschallsignalen zu groß für die fehlerfreie Nutzung des CWI-Algorithmus ist (siehe Kapitel 2.2.4). Aufgrund der geringen Anzahl an Daten ist auch die Bestimmung der Änderungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Signalen nicht aufschlussreicher (siehe Anhang: Seite 141, Abbildung A5, rechts).

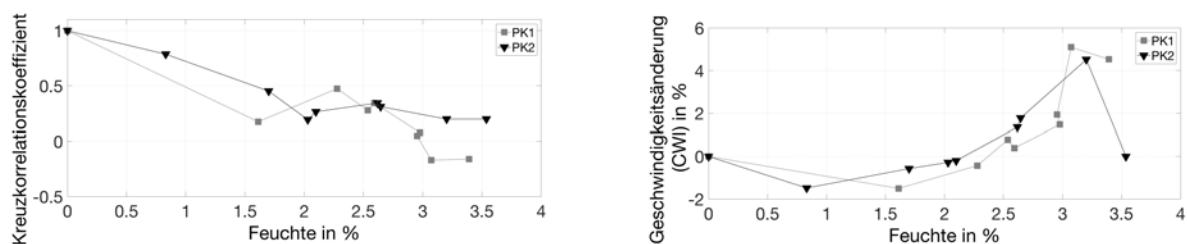


Abbildung 5.26: Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten (links) und die Geschwindigkeitsänderung (rechts), bestimmt mit der CWI-Methode, über die Feuchte.

### Zusammenfassung des Einflusses der Feuchte auf Prüfköpfe im Beton

Der Einfluss der Feuchte auf die Ultraschallsignale ist abhängig von der jeweiligen Installation: von der Einbautiefe der Prüfköpfe, dem Beton des Bauteils und vom Ort des zu überwachenden Objektes (unter der Erde, unter Wasser, überdacht, dem Wetter ausgesetzt) und den Wetterbedingungen vor Ort. Wird der Beton über einen langen Zeitraum externer Feuchte ausgesetzt, ist der Einfluss auf das Ultraschallsignal sehr groß. Mit zunehmender Feuchte erhöht sich die Geschwindigkeit der P-Welle, auch die Signalamplitude nimmt zu. Der Beton muss der zusätzlichen Feuchtequelle jedoch sehr lange ausgesetzt sein, um die Ultraschallwellen zu beeinflussen, die sich im Volumen zwischen den eingebetteten Prüfköpfen ausbreiten. Umgekehrt betrachtet nehmen mit zunehmender Trockenheit des Betons die Frequenz des Maximums der Spektraldichte, die Amplituden und die Ultraschallgeschwindigkeit ab.

## 5.3 Zusammenfassung und Diskussion des Einflusses der Umgebung auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe

Mit Hilfe von Experimenten im Labor wird die Hypothese mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen eine Dauerüberwachung von Betonbauteilen zu realisieren, erprobt. Dieses Kapitel dient der

Beantwortung von Fragen zu den Punkten zwei und drei der Zielstellung der vorliegenden Arbeit (siehe Kapitel 1.2). Es wird in diesem Kapitel gezeigt, dass die eingebetteten Prüfköpfe empfindlich gegenüber Änderungen in den Material unabhängigen Faktoren Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchtigkeit sind. Durch die Anwendung verschiedener Auswertemethoden wird untersucht, welche Signalparameter durch diese Faktoren beeinflusst werden und auf welche Art. Diese Signalparameter können als Funktion der Temperatur und Feuchtigkeit betrachtet werden. Für die Untersuchung der Auswirkungen auf noch nicht eingebettete Prüfköpfe muss zwischen steigenden und fallenden Temperaturen unterschieden werden, da die Vorlaufzeit und die Amplituden der Signale eine Hysterese beschreiben. Die Frequenz hingegen bleibt über den gesamten Temperaturbereich nahezu konstant. Bei Temperaturen über 50°C wird die Mittenfrequenz der Prüfköpfe geschwächt, wodurch andere Frequenzen dominieren. Die Amplituden der Ultraschallsignale fallen bei hohen Temperaturen schneller ab als bei niedrigen.

Sind die Prüfköpfe in Beton eingebettet, ist ebenfalls ein unterschiedliches Abklingverhalten der Signale zu beobachten. Aufgrund der Streuung an den Betonzuschlägen und der Probekörpergeometrie klingen die Ultraschallsignale sowohl bei positiven als auch bei negativen Temperaturen langsamer ab. Bei negativen Temperaturen ist ein starker Anstieg der Geschwindigkeit zu beobachten. Sowohl die Ultraschallgeschwindigkeit als auch die Signalamplituden und deren Spektren weisen eine Hysterese im Temperaturbereich des Frost-Tau-Überganges auf. Die Hysterese entsteht durch den Übergang des Porenwassers zwischen den Zuständen fest und flüssig. Deshalb muss bei der Beurteilung von Signalveränderungen zwischen aufsteigenden und abfallenden Temperaturen unterschieden werden. Dazu sollte bei jeder Dauerüberwachung mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen auch die Betontemperatur in Prüfkopfnähe dokumentiert werden.

Wenn der Beton über einen langen Zeitraum der Feuchte ausgesetzt ist, dringt diese in das Innere des Betons und somit in das Volumen zwischen den eingebetteten Prüfköpfen ein. Dann steigen die P-Wellengeschwindigkeit und die Amplituden der Ultraschallsignale. Andrade *et al.* (1999) beobachtet, dass für den Anstieg der inneren Feuchte bei Regenperioden nicht das Wasservolumen entscheidend ist, sondern die Dauer des Regens. Wie lang der Einfluss der Feuchte sein muss, um eine entsprechende Wirkung auf das Ultraschallsignal zu haben, hängt von der Einbautiefe der Prüfköpfe sowie vom Beton und dessen Zustand ab. Hat der Beton bereits einen hohen  $w/z$ -Wert, transportiert er Feuchte besser. Risse in der Betonoberfläche fördern das Eindringen von Wasser zusätzlich. Neben dem Material beeinflusst die vorherrschende Temperatur den Feuchtetransport im Beton. Bei trockenen Bedingungen geht mit einem Absenken der Temperatur eine Erhöhung der inneren Feuchte einher [Andrade *et al.* (1999)]. Da beide Faktoren ähnliche Veränderungen in den Ultraschallsignalen (Geschwindigkeit, Amplitude) verursachen, müssen sie nicht voneinander getrennt betrachtet werden.

Ist die Verschiebung zwischen Signalen zweier verschiedener Zustände zu groß für die Auswertung mit der CWI-Methode, wird als Referenzsignal das zeitnächste Signal verwendet. Für eine ausreichend gute Interpretation des Verlaufs der Veränderungen lässt sich diese Methode jedoch nur bei dichter Datenfolge anwenden.

## Kapitel 6

# Einfluss von Makrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe

In diesem Kapitel wird die Empfindlichkeit von eingebetteten Ultraschallprüfköpfen [Kapitel 4, Wolf *et al.* (2014b)] für die Langzeitüberwachung von Betonbauteilen gegenüber der Entstehung und Ausbreitung von Rissen untersucht. Die Risse werden durch Lasteintrag auf einen bewehrten, mit zwei eingebetteten Ultraschallprüfköpfen bestückten Betonbalken in einer Drei-Punkt-Anordnung erzeugt. An den transmittierten Ultraschallsignalen lassen sich die Geschwindigkeit, die Abnahme der Schalldruckamplituden, der Korrelationskoeffizient und die Geschwindigkeitsänderung als Funktion der Belastung bestimmen. Um die Genauigkeit der Rissdetektion mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen zu evaluieren, wird die Zustandsänderung des Balkens zusätzlich mit den zerstörungsfreien Prüfverfahren digitale Bildkorrelation (DIC) und Schallemission (SE) überwacht. Das Experiment wird an drei baugleichen Probekörpern durchgeführt, wobei bei jedem Versuch der Ablauf der Belastung und die Lasteinleitung etwas geändert wird. Die Ergebnisse des letzten Versuchs werden hier präsentiert. Die Ergebnisse dieses Experiments sind im Zeitschriftenartikel Wolf *et al.* (2015a) und im Konferenzbeitrag Wolf *et al.* (2015b) veröffentlicht worden.

### 6.1 Beschreibung der Versuchsmethode

Im Folgenden werden zusätzliche ZfP-Verfahren vorgestellt, die die Messungen mit den eingebetteten Prüfköpfen kontrollieren sollen. Es handelt sich hier um das Schallemissionsverfahren (SE), Wegaufnehmer und die digitale Bildkorrelation (DIC). Diese Verfahren werden gewählt, da sie sich besonders dafür eignen, die Rissentstehung und -ausbreitung im Probekörperinneren sowie an dessen Oberfläche zu dokumentieren und die Rissbreite zu bestimmen. Im Anschluss wird die Durchführung des Drei-Punkt-Biegeversuchs mit allen genutzten Verfahren beschrieben. Abbildung 6.1 zeigt ein Foto des gesamten Experimentieraufbaus, mit dem die Empfindlichkeit

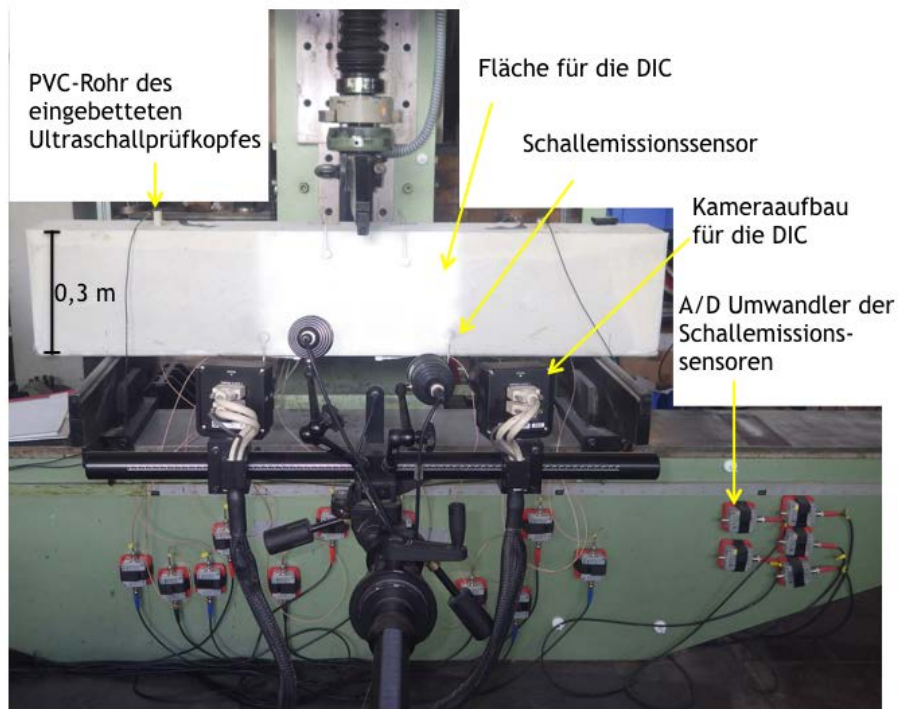


Abbildung 6.1: Aufbau des Experiments zum Bestimmen der Prüfkopfempfindlichkeit bei der Entstehung von Makrorissen.

der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe gegenüber entstehenden Makrorissen getestet wird.

### 6.1.1 Einführung der begleitenden ZfP-Verfahren Schallemission, Wegaufnehmer und Digitale Bildkorrelation

#### *Schallemission (SE)*

Das Schallemissionsverfahren ist ein passives ZfP-Verfahren, um die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen zu detektieren. Risse erzeugen bei ihrer Entstehung elastische Wellen, die sich im Medium ausbreiten und von piezoelektrischen Sensoren in der Regel an der Materialoberfläche aufgenommen werden. Das Spektrum der ausgesendeten Signale bei Untersuchungen von Beton liegt meist zwischen 20 kHz und 400 kHz. Gelegentlich werden auch Signale mit tieferen Frequenzen empfangen. Durch die Auswertung von Signalparametern wie Ankunftszeit, Schalldruck, Dauer und Spektrum lässt sich die Quelle der Schallemission lokalisieren und der Riss klassifizieren [Behina *et al.* (2014), Huang *et al.* (1998)].

Für die Schallemission sind zwölf Sensoren des Typs VS150 MS so auf der Oberfläche des Balkens verteilt, dass sie den Bereich abdecken, in dem eine Rissbildung erwartet wird (Abbildung 6.2). Angekoppelt und befestigt werden sie mit BostikPrestik. Ein AMSY6 System nimmt die Signale auf und filtert sie mit einem Bandpass Filter. Nur Signal innerhalb des Fensters von 20 kHz – 400 kHz werden für die Auswertung herangezogen.

Durchschallungsmessungen mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen werden sowohl im belasteten als auch im entlasteten Zustand durchgeführt. Mit dem Schallemissionsverfahren werden

durchgängig Signale aufgenommen. Das Verfahren wird genutzt, um durchgehend die Rissentstehung und -ausbreitung im Beton zu dokumentieren. Dadurch lassen sich die Ergebnisse der eingebetteten Prüfköpfe mit Bezug zum Ort des Risses diskutieren.

#### *Wegaufnehmer*

Die Verformung des Balkens wird kontinuierlich mit drei Wegaufnehmern aufgenommen. Wie in Abbildung 6.2 zu sehen, sind die Wegaufnehmer parallel zum Balken in der Ebene unter dem Lasteintrag befestigt. Ein Wegaufnehmer befindet sich auf der Unterseite des Balkens und die anderen zwei jeweils auf der Rückseite 0,01 m und 0,15 m von der Unterkante. Die Wegaufnehmer werden eingesetzt, um an verschiedenen Orten am Probekörper die Rissbreite zu bestimmen, was zusätzliche Informationen für die Diskussion der Ergebnisse liefert.

#### *Digitale Bildkorrelation (DIC)*

Mit der digitalen Bildkorrelation werden durch Spannung verursachte kleinste Verformungen an der Oberfläche des Untersuchungsobjektes erkannt. Dafür werden vor, als Referenz, und nach dem Lasteintrag digitale Abbildungen gemacht. Diese Abbildungen lassen sich in gleiche kleine Gebiete unterteilen. Die Verschiebung zwischen Pixeln innerhalb dieser Gebiete, verursacht durch die Verformung der Oberfläche, wird nun bestimmt, um Gebiete einander anzupassen. Fasst man diese kleinen angepassten Gebiete zusammen, erhält man die Verformung der gesamten fotografierten Oberfläche. Abhängig von der genutzten Kamera und deren Abstand zur Oberfläche kann das Verfahren Verformungen bis in den Mikrometerbereich auflösen<sup>1</sup>.

Eine 0,3 m große Fläche wird mittig an der Vorderseite des Balkens für die digitale Bildkorrelation vorbereitet, was in den Abbildungen 6.1 und 6.2 zu sehen ist. Hierfür wird die Oberfläche zunächst abdeckend und gleichmäßig mit weißer Farbe und anschließend ungleichmäßig mit schwarzen Sprenkeln besprüht. Dadurch erhöht sich der Kontrast zwischen den Pixeln, deren Verschiebung später bestimmt wird.

Durchschallungsmessungen mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen werden sowohl im belasteten als auch im entlasteten Zustand durchgeführt. Zu diesen Zeitpunkten werden auch Fotos für die digitale Bildkorrelation gemacht. Dieses ZfP-Verfahren dient der Untersuchung, in welchem Bezug die Ergebnisse der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe mit an der Oberfläche detektierbarem Stress und schließlich an der Oberfläche detektierbaren Rissen stehen.

### **6.1.2 Durchführung des Drei-Punkt-Biegeversuchs**

#### **Angaben zum Betonbalken**

Der für den Drei-Punkt-Biegeversuch verwendete bewehrte Betonbalken hat die Größe 1,5 m x 0,3 m x 0,2 m (Länge, Höhe, Breite). Wie in der Abbildung 6.2 zu sehen, sind mittig zwei Ultraschallprüfköpfe mit einem Abstand von 0,9 m zueinander eingebaut. In der Abbildung sind

---

<sup>1</sup>Für mehr Informationen über die DIC, den Algorithmus, Anwendungsbeispiele und Grenzen des Verfahrens wird die Literatur Hild & Roux (2006) sowie Lin & Labuz (2013) empfohlen.

die vier Längsbewehrungsseisen und die Ringbewehrung (alle 0,14 m) nicht dargestellt. Auch das Thermoelement unterhalb eines eingebetteten Prüfkopfs zur Überwachung der Temperatur im Beton ist nicht skizziert. Der Durchmesser der Bewehrung beträgt 0,008 m. Der Balken besteht aus Normalbeton mit einem w/z-Wert von 0,55 und Zuschlägen mit 16 mm Größtkorn. Die Druckfestigkeit, geprüft an Würfeln 28 Tage nach der Herstellung, beträgt 50 N/mm<sup>2</sup>.

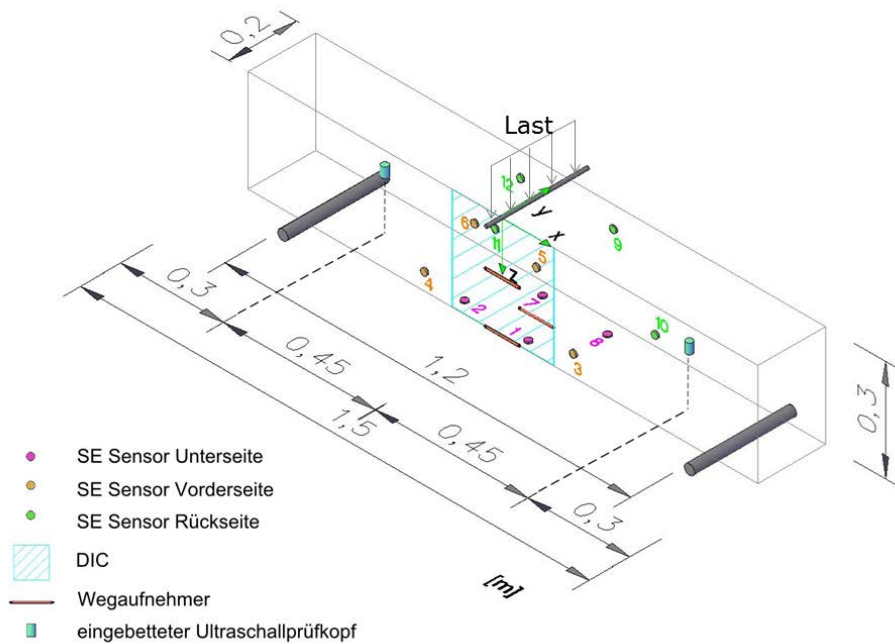


Abbildung 6.2: Skizze des Betonbalkens mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen, den externen Sensoren für die Schallemission (SE), den Wegaufnehmern und der Fläche für die digitale Bildkorrelation (DIC).

### Ablauf der Belastung

Die Risse im Balken werden durch einen Drei-Punkt-Biegeversuchs induziert. Der Balken steht auf zwei Trägern, die einen Abstand von 1,2 m haben. Die Last wird über die Bewegung eines Kolbens, gesteuert durch eine servohydraulische Maschine, in der Balkenmitte, direkt über einer Ringbewehrung eingeleitet. Der Kolbenweg vergrößert sich von der Ausgangsposition um je 0,05 mm, wodurch der Balken stufenweise, bis zu einer maximalen Kraft von 70 kN, belastet wird. Jede Belastungsstufe wird nach 10 s erreicht. Nach jeder Belastungsstufe wird der Balken entlastet. Ultraschallmessungen und die Aufnahme der Oberflächenverformung werden im belasteten und entlasteten Zustand durchgeführt. Der Versuch endet, wenn aufgrund der Risslänge und -breite nur noch ein Bruchteil der Energie des Ultraschallreferenzsignals empfangen wird. Abbildung 6.3 stellt den Lastverlauf grafisch dar. In den folgenden Abbildungen werden die Veränderungen verschiedener Signalparameter über die Last für den belasteten und entlasteten Zustand dargestellt. Der entlastete Zustand entspricht einer Last von 0 kN, wird aber, um

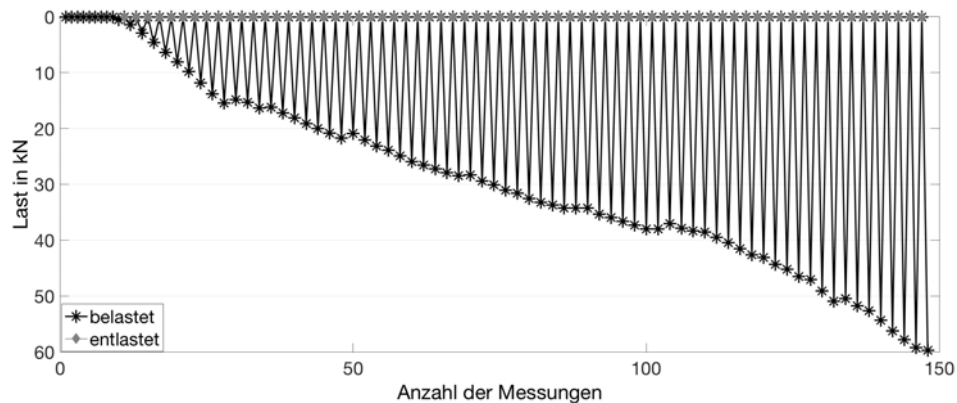


Abbildung 6.3: Lastkurve des Drei-Punkt-Biegeversuchs. Nach jeder Laststufe wird der Balken wieder entlastet. Transmissionsmessungen mit den eingebetteten Prüfköpfen und Aufnahmen für die DIC finden sowohl im belasteten als auch im entlasteten Zustand statt.

die Übersichtlichkeit zu verbessern, in den Abbildungen mit der Last des jeweiligen belasteten Zustandes dargestellt.

### Durchführung der Messungen

Ziel dieses Experimentes ist die Überwachung von entstehenden Einzelrissen mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Der Drei-Punkt-Biegeversuch eröffnet die Möglichkeit, zudem den Einfluss von Belastungen auf die Ultraschallsignale zu beobachten, da Messungen sowohl im belasteten als auch im entlasteten Zustand durchgeführt werden. Der sendende Prüfkopf wird mit einem bipolaren Rechteckimpuls der Amplitude  $U = 100 \text{ V}$  und Frequenz  $f = 60 \text{ kHz}$  angeregt, wodurch er Ultraschallsignale ähnlicher Frequenz emittiert, welche von einem anderen Prüfkopf  $0,9 \text{ m}$  entfernt empfangen werden (Abbildung 6.2). Das empfangene Signal wird mit einer Abtastfrequenz von  $f_{AB} = 1 \text{ MHz}$  und 1000 Abtastpunkten digitalisiert und auf einem Computer gespeichert. Jeweils drei Signale werden im belasteten und entlasteten Zustand ausgesandt und empfangenen.

Zwölf passiv arbeitende Schallemissionssensoren sind auf der Balkenoberfläche befestigt, jeweils vier auf der Vorderseite, Rückseite und Unterseite des Balkens (Abbildung 6.2). Sie sind derartig verteilt, dass sie das Gebiet, in dem die Rissentstehung erwartet wird, abdecken. Die Sensoren nehmen alle Signale über  $35 \text{ dB}$  auf und arbeiten in einem Frequenzbereich zwischen  $20 \text{ kHz}$  und  $400 \text{ kHz}$ . Die Messungen zur Schallemission werden von Herrn Pirskawetz des Fachbereichs „Baustoffe“ der BAM durchgeführt und von der Autorin dieser Arbeit ausgewertet.

Die an der Unterseite und der Rückseite befestigten Wegaufnehmer messen die Veränderung des Weges durchgängig.

Bei der DIC wird nach den Messungen mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen im belasteten und entlasteten Zustand jeweils ein Foto gemacht. Die Kamera wird dabei auf die vorher bearbeitete Oberfläche fokussiert. Nach der Aufnahme eines Referenzabbildes wird die Kamera nicht mehr bewegt. Wenn notwendig, lässt sich die Fläche zusätzlich ausleuchten. Die Messungen

der DIC werden von Herrn Barner des Fachbereiches „Ingenieurbau“ der BAM durchgeführt und von der Autorin dieser Arbeit ausgewertet.

Die Temperatur im Probekörper ist über die gesamte Dauer des Experiments konstant.

## 6.2 Ergebnisse und Diskussion

In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse der Schallemission und der DIC bei den Laststufen von 32 kN (Phase 1), 34 kN (Phase 2) und 38 kN (Phase 3) dargestellt, da bei diesen Laststufen auffällige Veränderungen in den Ultraschallsignalen der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe zu beobachten sind. Die gestrichelten Linien markieren die Einbautiefe der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe. Die Phase 1 entspricht der Entstehung von Mikrorissen im Inneren des Balkens, bei der Phase 2 ist an der Oberfläche am unteren Rand ein Einzelriss zu erkennen, die Verformung im Beton weitet sich nach oben hin aus. In der Phase 3 ist der Riss in der Ebene der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe. In der Phase 4, bei 52 kN, in der Tabelle 6.1 nicht dargestellt, sind zusätzliche Makrorisse entstanden. In den folgenden Abschnitten werden im Detail die Ergebnisse der verschiedenen ZfP-Methoden diskutiert.

### 6.2.1 Eingebettete Ultraschallprüfköpfe

Bei jeder Belastungsstufe werden im belasteten und entlasteten Zustand jeweils drei Wiederholungsmessungen durchgeführt, um eine Fehlerbetrachtung durchzuführen. Aufgrund der gleich bleibenden Position und Ankopplung der Prüfköpfe im Beton verändern sich während dieser Wiederholungsmessungen weder die Amplituden, noch der Verlauf des empfangenen Ultraschallsignals: die Signale sind gleich. Deshalb gibt es bei den Auswertemethoden Geschwindigkeitsbestimmung, Schalldruckamplitude, Kreuzkorrelation und Coda-Wellen-Interferometrie keine Unterschiede zwischen den Wiederholungsmessungen.

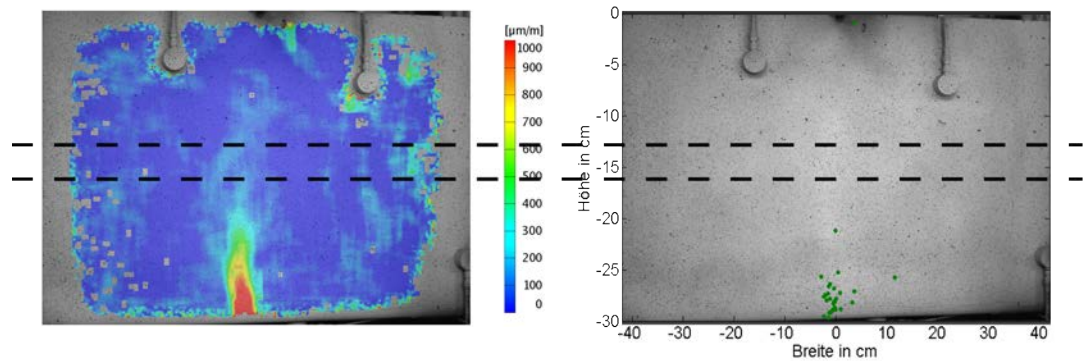
#### *Geschwindigkeit*

Abbildung 6.4 zeigt die Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit im Betonbalken, aufgetragen über der Last, im jeweils belasteten und entlasteten Zustand. Bei einer Last von 38 kN fällt die Geschwindigkeit auf unter 4400 m/s. Bei dieser Last kreuzt der Riss den direkten Schallweg der eingebetteten Prüfköpfe, was in der Tabelle 6.1c.) verdeutlicht und im Folgenden als Phase 3 der Rissausbildung bezeichnet wird. Da der Riss den Wellenweg kreuzt, verlängert sich die Laufzeit und die berechnete Geschwindigkeit nimmt ab. Mit zunehmender Last verlängert und weitet sich der Riss, was zu einer weiteren Abnahme der Geschwindigkeit führt. Der stärkere Geschwindigkeitsabfall bei 52 kN wird durch die Ausbildung zusätzlicher Risse neben dem Hauptriss verursacht. Im Folgenden wird dieser Zustand als Phase 4 bezeichnet. Unter Belastung fällt die Geschwindigkeit stärker als im entlasteten Zustand, was durch das Öffnen des Risses unter Last bewirkt wird. Entfernt man die Last, schließt sich der Riss.

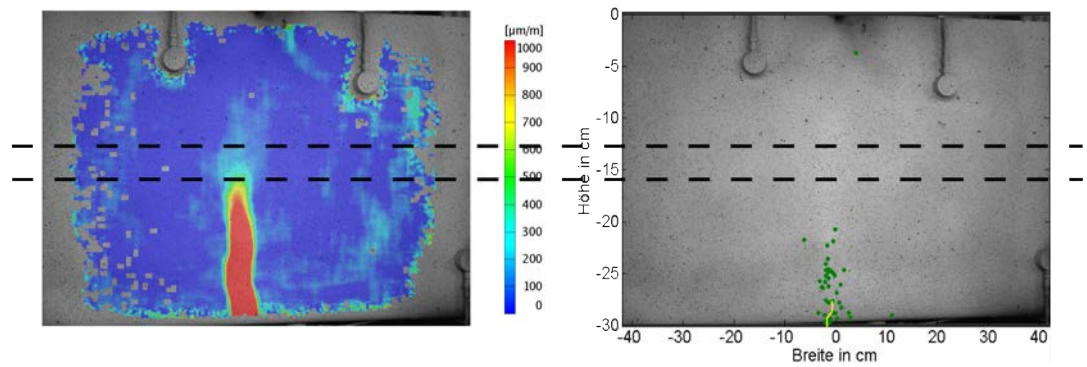
Bei jeder Laststufe werden im belasteten und entlasteten Zustand jeweils drei Messungen durch-



a.)  
32 kN  
Phase 1



b.)  
34 kN  
Phase 2



c.)  
38 kN  
Phase 3

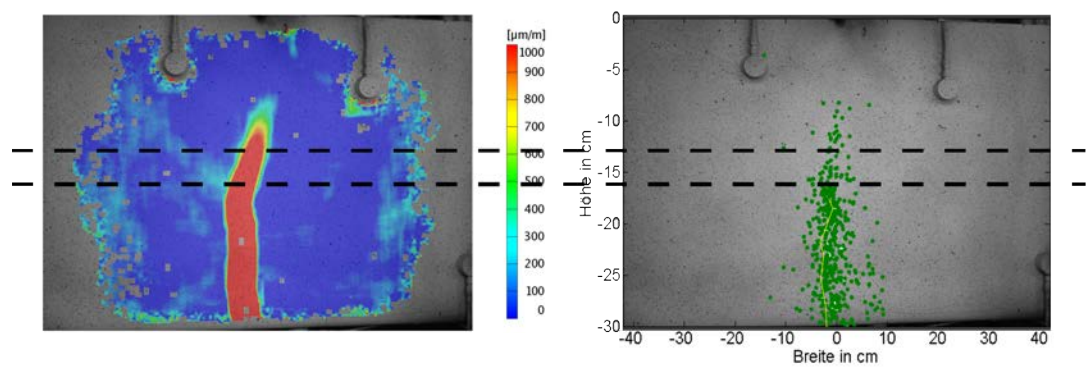


Tabelle 6.1: Links: Mit der digitalen Bildkorrelation bestimmte Verformung der Oberfläche des Betonbalkens und rechts: Die lokalisierten Ereignisse der Schallemission, für die Laststufen 32 kN (a.), 34 kN (b.) und 38 kN (c.). Die gelbe Linie repräsentiert den sich nach oben ausbreitenden Riss, die gestrichelte Linie markiert die Position der eingebetteten Prüfköpfe. Die sichtbaren Sensoren sind die Schallemissionssensoren 5, 6 und 3.

geführt. Die Signale dieser Messungen sind äquivalent. Die Fehlerbalken in der Abbildung 6.4 entstehen durch Ungenauigkeiten bei der manuellen Bestimmung der Ankunftszeiten der Welle bei geringen Signal-zu-Rausch-Verhältnissen. Es wird der Mittelwert aus drei ermittelten Geschwindigkeiten abgebildet.

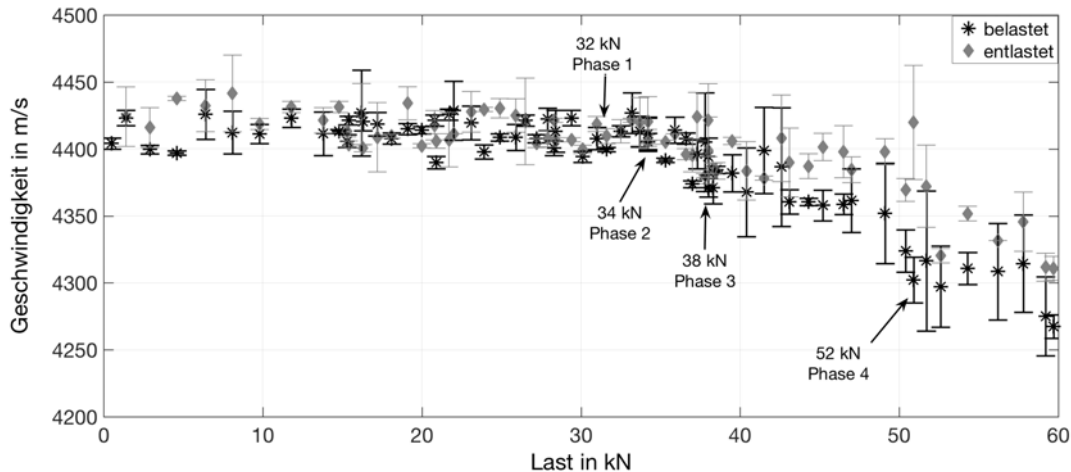


Abbildung 6.4: Entwicklung der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Last, im belasteten und entlasteten Zustand.

### Spektrum

Zur Veranschaulichung der Veränderungen im Ultraschallsignal zeigen die Abbildungen 6.5, 6.6 und 6.7 das Referenzsignal am Beginn des Experiments, das Ultraschallsignal nach der Belastung mit 38 kN (Phase 3) und das Ultraschallsignal nach der Belastung mit 52 kN, der Phase 4 der Rissausbreitung, sowie deren Spektren<sup>2</sup>. Es ist keine eindeutige Änderung der Spektren des geschädigten Zustandes gegenüber dem Referenzsignal erkennbar. Abbildung 6.8 zeigt die Frequenzentwicklung über die Zeit, bestimmt mit der kontinuierlichen Wavelet Transformation. Bei der Phase 4 ist eine zunehmende Dominanz tieferer Frequenzanteile erkennbar. Ursache hierfür ist eine verstärkte Schwächung hochfrequenter Wellenanteile durch die zusätzliche Ausbildung von Mikro- und Makrorissen. Aufgrund des Fehlens eines eindeutig ausgebildeten Maximums gibt es keine eindeutige Tendenz der Entwicklung zu höheren oder niedrigeren Frequenzen. Die Entwicklung der Frequenzen, für welche die Spektraldichte maximal wird, über die Last, ist im Anhang auf der Seite 141 in der Abbildung A6 links zu sehen.

### Amplitude

Wie in Abbildung 6.9 zu sehen, fällt die Amplitude des ersten Maximums bei der Last von 34 kN, in der Phase 2 der Rissentstehung, steil um über 20% gegenüber dem Referenzsignal am Beginn des Experiments ab. Nach diesem starken Abfall unterscheidet sich der Schalldruck zwischen dem belasteten und dem entlasteten Zustand. Größere Veränderungen liegen vor, wenn der Balken be-

<sup>2</sup>Zur Beschreibung der Begriffe Spektrum und Spektraldichte wird auf das Kapitel 2.2.2 verwiesen.

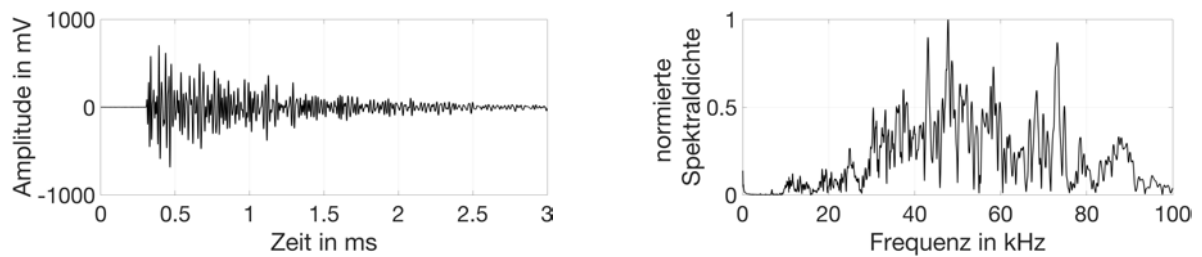


Abbildung 6.5: Referenzultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum.

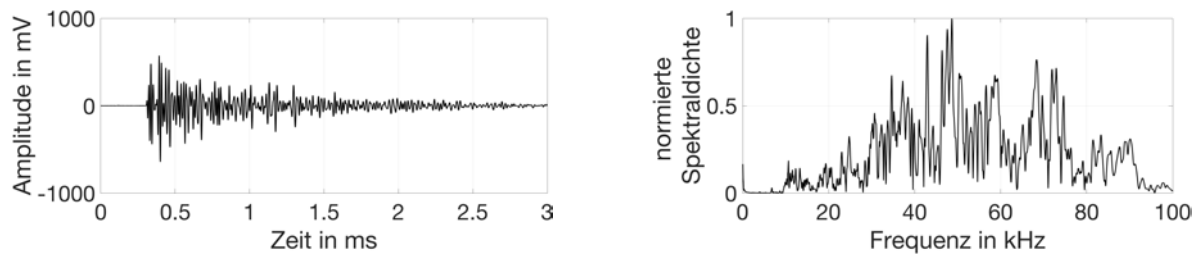


Abbildung 6.6: Ultraschallsignal nach einer Belastung mit 38 kN (Phase 3) und dessen normiertes Spektrum.

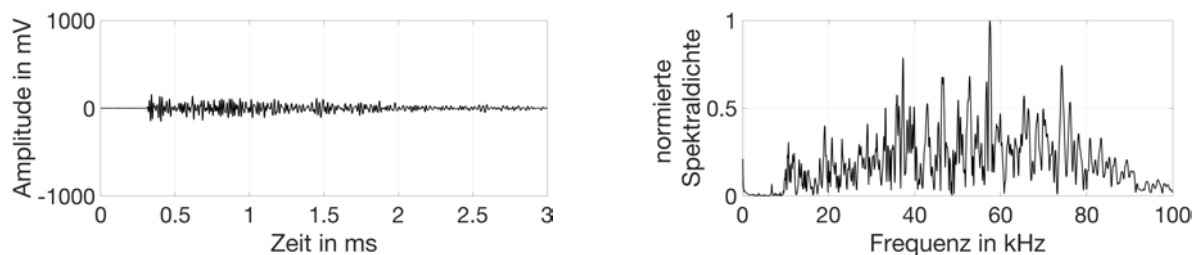


Abbildung 6.7: Ultraschallsignal nach einer Belastung mit 52 kN (Phase 4) und dessen normiertes Spektrum.

lastet ist. Dies ist ein Hinweis auf eine unelastische Materialveränderung in dem vom Ultraschall durchlaufenen Gebiet, die das Signal schwächt. Ein Riss ist entstanden. Die größere Veränderung unter Last entsteht durch das Öffnen des Risses, wodurch der Schalldruck stärker geschwächt wird. Die Gesamtenergie der Signale nimmt ebenfalls bei der Last von 34 kN ab, jedoch nicht in dem Maße wie die Amplitude des ersten Maximums. Die maximale Amplitude (Scheitelwert) nimmt bis zu dieser Laststufe leicht zu, bevor sie bei der Last von 38 kN stark abfällt und sich der entlastete Zustand vom belasteten unterscheidet.

Die Signalparameter Amplitude zeigen, dass die Rissentstehung nichtlineare Veränderungen im Ultraschallsignal verursacht. Die Abbildung A6 im Anhang auf Seite 141 rechts zeigt die Verschiebung des Scheitelwertes entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals. Der Signalparameter hat keine interpretierbare Abhängigkeit von der Belastung und damit der Schädigung.

#### *Kreuzkorrelation und CWI*

Bei einer Belastung mit 32 kN fällt der Kreuzkorrelationskoeffizient auf 0,8, also um 20 % ge-

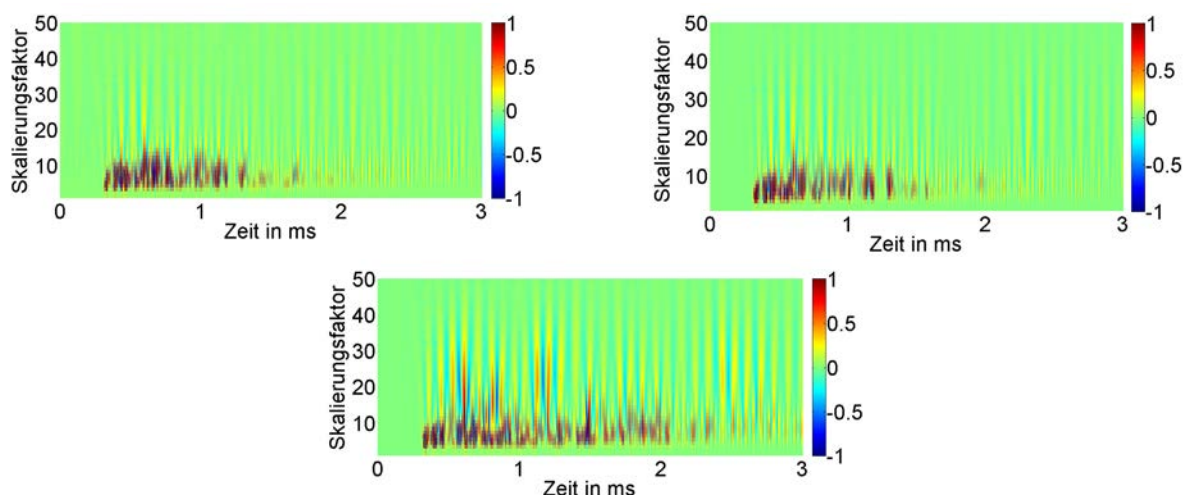


Abbildung 6.8: Vergleich der Skalierungsfaktoren der Ultraschallsignale über die Zeit. Die Signale sind aufgenommen zu Beginn des Experiments (oben links), nach einer Belastung mit 38 kN (oben rechts) und nach einer Belastung mit 52 kN (unten).

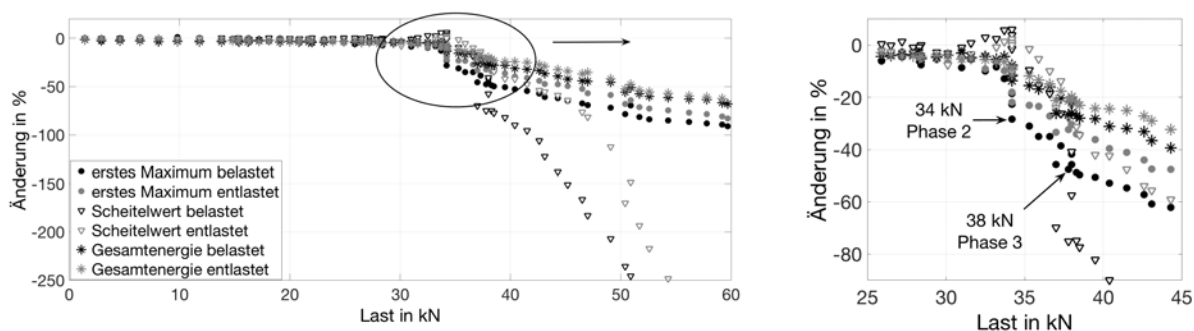


Abbildung 6.9: Entwicklung des ersten Maximums, des Scheitelwertes und der Gesamtenergie, im belasteten und entlasteten Zustand, bei zunehmender Last.

genüber dem Referenzzustand vor Beginn des Experiments ab (siehe Abbildung 6.10). Dieser Punkt wird als Phase 1 der Rissentstehung bezeichnet. Ein nächster stärkerer Abfall ist bei einer Belastung mit 34 kN zu erkennen (Phase 2). Ab 52 kN, Phase 4, verschieben sich die Phasen der Signale im entlasteten Zustand um über  $180^\circ$ , wodurch der Kreuzkorrelationsfaktor auf unter null fällt.

Die Veränderung von 20% wird als Grenzwert eingeführt, um Veränderungen in den Signalparametern, die durch Materialänderungen hervorgerufen werden, von solchen zu unterscheiden, die durch Änderungen in den Umweltbedingungen verursacht werden. Da es bei der Durchführung der Experimente keine Schwankungen in der Temperatur gibt, ist der Grenzwert für die vorliegende Arbeit angemessen. Bei Langzeitüberwachungen von Bauwerken muss dieser Grenzwert auf die Situation vor Ort angepasst werden (siehe dazu Kapitel 8.3).

Durch die elastische Biegung des Balkens unter Last entstehen Mikrorisse im Beton und die Laufwege der gestreuten Wellenanteile, die das geschädigte Gebiet durchlaufen, verlängern sich. Die Ähnlichkeit zwischen den Ultraschallsignalen gegenüber einem ungestörten Referenzsignal

nimmt ab, was zu einer stetigen Abnahme des Kreuzkorrelationskoeffizienten führt. Der steile Abfall bei 34 kN wird durch die Ausbildung eines Makrorisses am unteren Rand des Balkens verursacht (Phase 2). Diese unelastische Veränderung im Beton führt zu Unterschieden in den Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen dem belasteten und entlasteten Zustand einer Laststufe. Diese Unterschiede entstehen durch das Öffnen und Schließen des Risses und die dadurch veränderte Wellenausbreitung, was zu Änderungen in den aufgenommenen Signalen führt. Der Kreuzkorrelationskoeffizient gibt die Ähnlichkeit der Signale wieder, die durch die Änderung der Signalparameter abnimmt. Welche Parameter Ursache einer Abnahme der Kreuzkorrelation sind, muss durch die Kombination mit anderen Auswertungsmethoden untersucht werden.

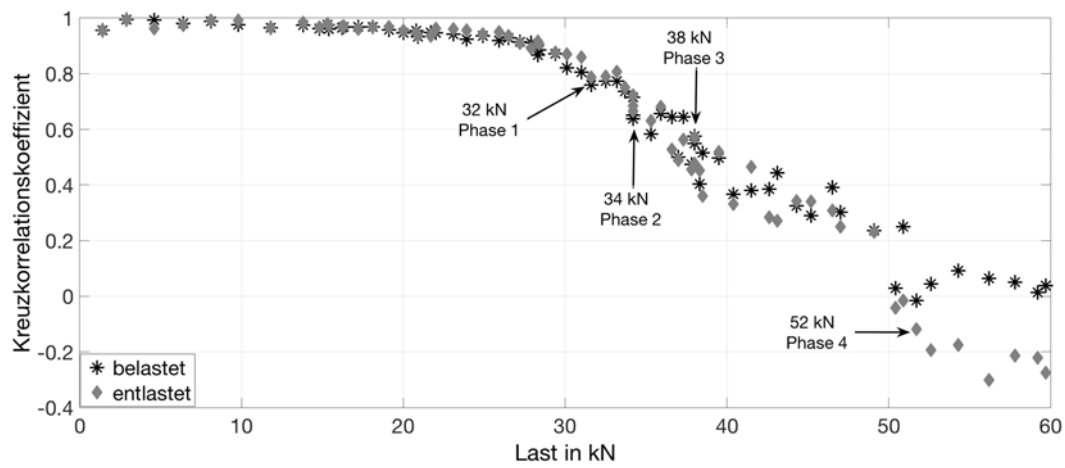


Abbildung 6.10: Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten im belasteten und entlasteten Zustand mit zunehmender Last.

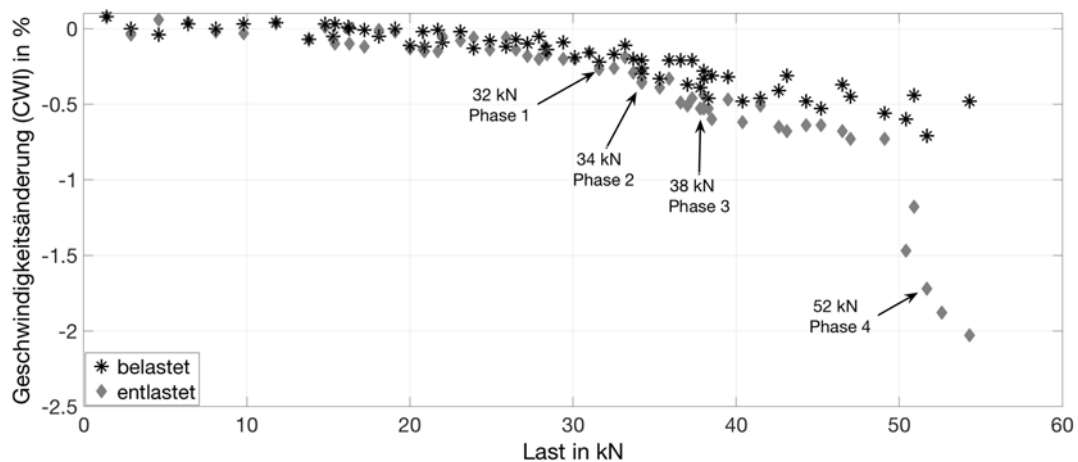


Abbildung 6.11: Entwicklung der Geschwindigkeitsänderungen, bestimmt mit der CWI-Methode, im belasteten und entlasteten Zustand mit zunehmender Last.

Die mit der CWI-Methode bestimmte Geschwindigkeitsänderung nimmt bis zur Belastung mit 49 kN stetig ab und fällt dort auf über 1 % (siehe Abbildung 6.11). Auch hier dient der Zustand zu Beginn des Experiments als Referenz. Ursache für den stetigen Abfall ist die Zunahme an

Mikrorissen, was die Schallausbreitung verlangsamt. Vor dieser Laststufe gibt es keinen eindeutigen Abfall, der eine Änderung in den Materialeigenschaften markiert. Ab der Laststufe 34 kN (Phase 2) gibt es in den Geschwindigkeitsänderungen Unterschiede zwischen dem belasteten und dem entlasteten Zustand was, wie bereits erwähnt, ein Beweis für eine unelastische Änderung im Material ist.

Die CWI-Methode hat ihre Stärke in der Betrachtung der stark gestreuten Wellenanteile, die mehr Informationen liefern als die direkt ankommenden. Bisher wird für die Auswertung mit der CWI-Methode das gesamte Signal betrachtet. Die Untersuchung verschiedener Zeitfenster des Signals gibt zusätzlich Aufschluss über auftretende Veränderungen im Material. Die Abbildungen 6.12 und 6.13 zeigen die Veränderungen des Kreuzkorrelationskoeffizienten und der Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Lasteintrag für drei Zeitbereiche der Ultraschallsignale.

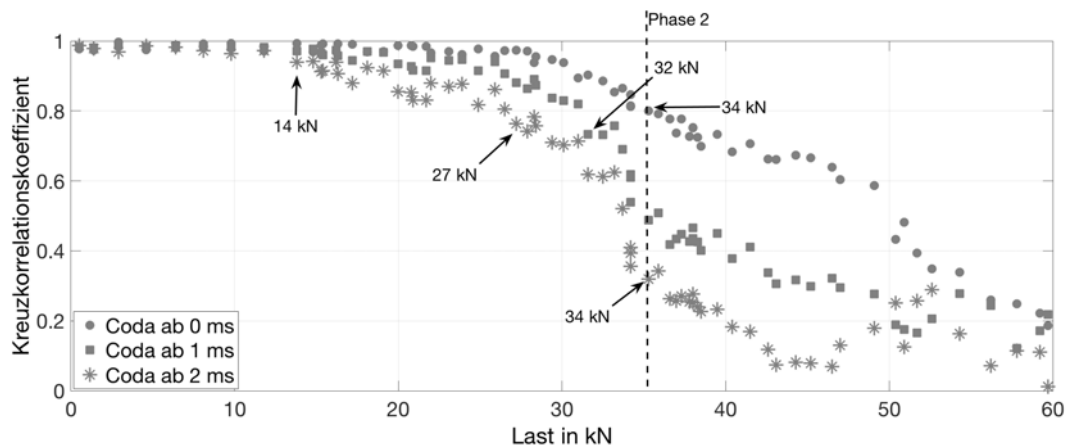


Abbildung 6.12: Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten mit zunehmender Last für verschiedene Zeitbereiche der Signale des entlasteten Zustandes. Die Pfeile markieren auffällige Änderungen sowie, je Fensterung, den Abfall des Korrelationskoeffizienten auf unter 20 %. Der Balken markiert die Phase 2, den Beginn der unelastischen Schädigung.

Untersucht werden die Signale in den Zeitfenstern 0 ms bis 3 ms, 1 ms bis 4 ms und 2 ms bis 5 ms. Bei einer Wellengeschwindigkeit im Beton von 4400 m/s sind das Laufwege im Balken von 0,4 m bis zu 22 m. Für die Darstellung werden die Signale des entlasteten Zustandes genutzt, um den Einfluss des Stresses durch die Last auszuschließen und lediglich Materialveränderungen zu berücksichtigen. Treten keine Änderungen auf, so bleiben die Parameter Kreuzkorrelation und Geschwindigkeitsänderung in allen Zeitbereichen des Signals gleich. Geringfügige Änderungen im Material spiegeln sich zuerst in dem Bereich der Welle mit den längsten Laufwegen wieder. Sind die Materialänderungen groß genug, werden sie auch in den Wellenanteilen registriert, die den Bereich weniger häufig durchlaufen. Im Kreuzkorrelationskoeffizienten in der Abbildung 6.12 ist gut zu sehen, dass es bei den ersten verglichenen Signalen kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Zeitbereichen gibt. Ab der Laststufe von 14 kN fällt im späteren Zeitfenster (2 ms bis 5 ms) der Kreuzkorrelationskoeffizient stärker ab als in den früheren, was ein Indiz für einsetzende Veränderungen im Material ist. Der Kreuzkorrelationskoeffizient fällt für dieses

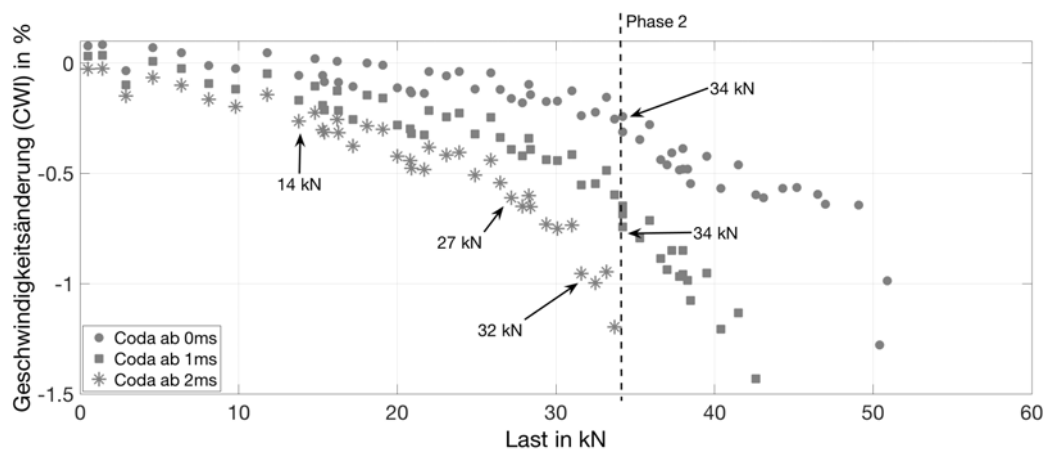


Abbildung 6.13: Entwicklung der Geschwindigkeit mit zunehmender Last für verschiedene Zeitbereiche der Signale des entlasteten Zustandes. Die Pfeile markieren auffällige Änderungen sowie, je Fensterung, den Abfall des Korrelationskoeffizienten auf unter 20 %. Der Balken markiert die Phase 2, den Beginn der unelastischen Schädigung.

Zeitfenster bereits bei einer Belastung mit 27 kN unter den gewählten Grenzwert von 0,8. Beim mittleren Zeitfenster fällt der Kreuzkorrelationskoeffizient bei 32 kN um 20 %, wie auch schon bei der Auswertung des gesamten Signals beobachtet werden konnte. Beim vorderen Zeitfenster ist der Abfall bei 34 kN zu beobachten, was mit dem Abfall der Amplitude des ersten Maximums und des Scheitelwertes einhergeht, die beide in diesem ersten Zeitfenster liegen. Ab welcher Höhe der Abfall des Kreuzkorrelationskoeffizienten ein Indiz für eine Materialveränderung ist, muss für jede Langzeitüberwachung vor Ort festgelegt werden.

Beim Einsatz der CWI-Methode nehmen in den Ergebnissen die Unterschiede zwischen den Zeitfenstern stetig zu. Eine plötzliche Veränderung ist auch bei dieser Methode der Fensterung erst bei höheren Lasteinträgen zu erkennen. In Abbildung 6.13 sind die Punkte markiert, die bei der Betrachtung der Kreuzkorrelation durch den Abfall um 20 % sowie durch einen weiteren stärkeren Abfall, der die unelastische Schädigung des Probekörpers markiert (Phase 2, 34 kN), auffällig sind. Der Abfall des Kreuzkorrelationskoeffizienten um 20 % in Phase 1 korreliert für das mittlere und das späteste Zeitfenster mit einem Abfall der Geschwindigkeitsänderung um jeweils mehr als 0,5 %, beim vordersten Fenster mit einem Abfall um 0,3 %.

Der Vergleich verschiedener Zeitfenster der Signale verbessert die Auflösung von kleinsten Veränderungen im Material. Was diese kleinsten Veränderungen für den Beton und das Bauwerk bedeuten, lässt sich nur durch die Kombination mit anderen Auswertungsmethoden erkennen.

## 6.2.2 Begleitende ZfP-Verfahren Schallemission, Wegaufnehmer und Digitale Bildkorrelation

### Schallemission

Die Auswertung der Schallemission beinhaltet nur lokalisierte Ereignisse. Abbildung 6.14 zeigt die Aktivität der Schallemission über die auf den Betonbalken aufgetragene Last. Die Aktivität wird als Anzahl der Hits je Lastintervall von 0,5 kN gemessen und ist abhängig von der Empfindlichkeit der Sensoren und deren Lage zur Quelle der akustischen Signale. Unterhalb des Lastniveaus von 28 kN ist die Aktivität der Schallemission gering. Die lokalisierten Events entstehen hier hauptsächlich durch die aktive Durchschallung mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Die ersten Events, die auf die Entstehung von Rissen zurückzuführen sind, entstehen mittig, an der unteren Seite des Balkens, bei 28 kN. Die Aktivität nimmt danach zu und hat einen leichten Anstieg bei 32 kN, wo der Kreuzkorrelationskoeffizient unter 0,8 fällt (Phase 1). Ihr Maximum hat die Aktivität bei einer Belastung mit 34 kN, was einhergeht mit der Ausbreitung des Risses nach oben, in Richtung Lasteintrag (siehe auch Tabelle 6.1a. und 6.1b.)). In dieser Phase 2 kommt es auch zu Veränderungen der Schalldruckamplituden der Ultraschallsignale der eingebetteten Prüfköpfe. Nach moderater Aktivität zwischen 39 kN und 48 kN steigt die Aktivität wieder durch die Ausbildung von zusätzlichen Makrorissen auf ein Maximum von 51 kN.

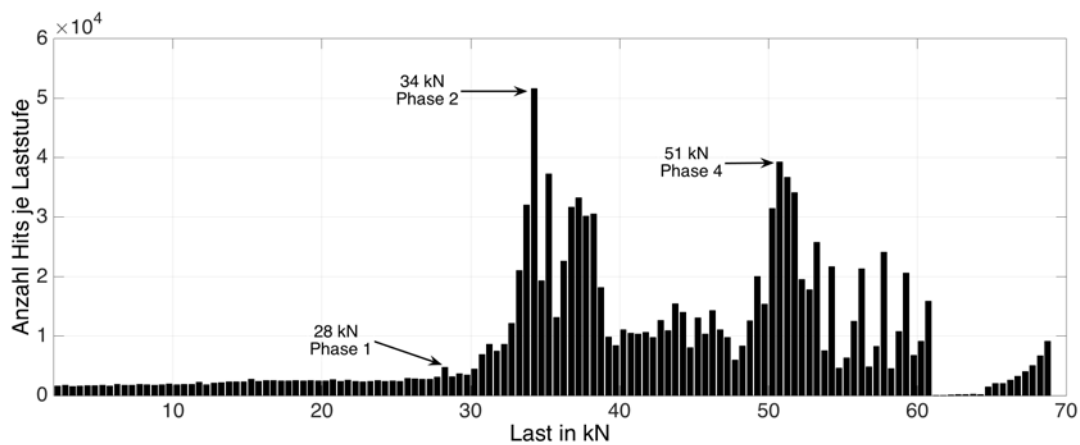


Abbildung 6.14: Entwicklung der Schallemission über die angelegte Last.

### Wegaufnehmer

Abbildung 6.15 zeigt die Ergebnisse der an der Oberfläche befestigten Wegaufnehmer. Ab der Laststufe 13 kN wird mit den Wegaufnehmern eine stetige Zunahme des Weges in Form von Oberflächenverschiebungen bis zu einem Sprung bei 32 kN registriert. Dieser Sprung korreliert mit der Phase 1 der Veränderungen in den Signalparametern der Durchschallung mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen (Tabelle 6.1). Ursache der stetigen Zunahme des Weges ist die elastische Verformung des Balkens bei immer höherer Last. Ein Indiz für eine unelastische Verän-



derung in Form eines Risses, ab 32 kN, ist die zunehmende Abweichung zwischen dem belasteten und entlasteten Zustand, hervorgerufen durch das Öffnen und Schließen des Risses. Bei dieser Laststufe sind mit den eingebetteten Prüfköpfen noch keine Unterschiede zwischen den beiden Zuständen zu detektieren. Bei einer Last von 40 kN wird am Wegaufnehmer auf der Unterseite des Balkens eine Rissbreite von 0,2 mm registriert, was nach Norm DIN EN 1992-1-1 (1992) eine Überschreitung des Grenzwertes der maximalen Rissbreite bedeutet. Bei dieser Last gibt es bereits Auffälligkeiten in den Signalen der eingebetteten Prüfköpfe, obwohl der Riss noch nicht den direkten Laufweg der Ultraschallwelle kreuzt. Bis zum Beenden des Experiments werden auf Höhe der eingebetteten Prüfköpfe keine grenzwertigen Rissbreiten detektiert.

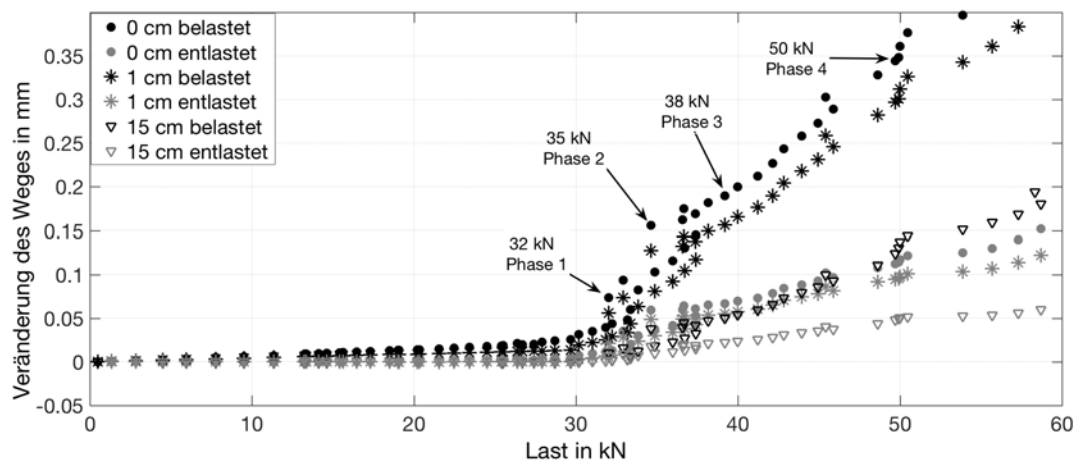


Abbildung 6.15: Verformungen an der Oberfläche im belasteten und entlasteten Zustand. Aufgenommen von Wegaufnehmern auf der Unterseite des Balkens, 0 cm von der Unterkante, und auf der Rückseite, jeweils 1 cm und 15 cm von der Unterkante.

### Digitale Bildkorrelation

Fotos für die digitale Bildkorrelation werden bei jeder Laststufe im belasteten und entlasteten Zustand aufgenommen. Erste Anzeichen einer Deformation gibt es bei einer Belastung mit 28 kN, was mit den Ergebnissen der Schallemission korreliert.

Die Abbildung in Tabelle 6.1a.) (links) zeigt das Ergebnis der digitalen Bildkorrelation bei der Belastung mit 32 kN. Bei diesem Wert sinkt der Kreuzkorrelationsfaktor zwischen den Signalen der Ultraschallprüfköpfe auf 0,8. Bei einfacher Sichtprüfung ist noch kein Riss erkennbar. Mithilfe der digitalen Bildkorrelation wird jedoch die Ausbreitung der Verformungen auf der Oberfläche nach oben in Richtung Lasteintrag eindeutig sichtbar.

Bei 34 kN fällt der Kreuzkorrelationskoeffizient weiter. Zudem nimmt der Schalldruck der empfangenen Ultraschallsignale ab. Ein Riss ist nun sichtbar. Die Abbildung in der Tabelle 6.1b.) (links) zeigt die zunehmende Ausbreitung der Verformung in Richtung Lasteintrag, was gut mit der Lokalisierung der akustischen Quellen korreliert (Tabelle 6.1b.), rechts). Die gestrichelten Linien in der Tabelle markieren die Einbautiefe der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe. Der sich

bildende Riss beeinflusst bereits die Ultraschallsignale, obwohl er noch nicht im direkten Weg der Welle liegt.

Eine Veränderung der Geschwindigkeit der Ultraschallsignale, bestimmt über die Laufzeit, ist ab der Belastung mit 38 kN zu beobachten. Die Verformung der Oberfläche (Tabelle 6.1c.), links) und die Lokalisierung der akustischen Ereignisse (Tabelle 6.1c.), rechts), zeigen eine Ausbreitung des Risses in den direkten Weg der Welle der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe.

Nach Beendigung des Experiments wird die Schädigung des Probekörpers unter dem Mikroskop ermittelt. Abbildung 6.16 zeigt einen Längsschnitt durch die Mitte des Probekörpers. Das Handstück ist 15 cm hoch. Der gerichtete Makroriss wird unter dem Mikroskop breiter dargestellt als er im Verbund mit dem gesamten Probekörper war, da er sich durch die abgenommene Spannung, nach dem sorgfältigen heraus sägen des Handstücks, öffnet. Der Makroriss breitete sich entlang von Gesteinskorngrenzen und über Mikrorisse in bereits vorher geschädigter Gesteinskörnung entlang des Gebietes der größten Zugbeanspruchung aus.

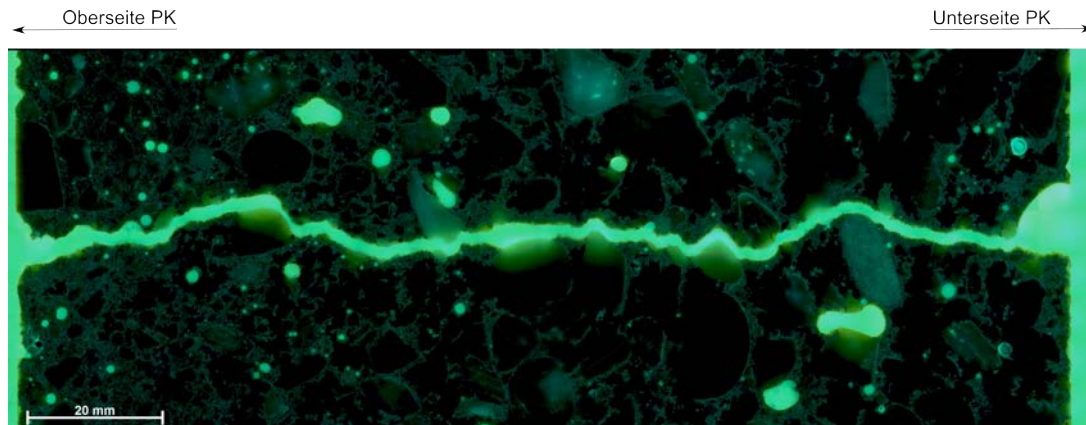


Abbildung 6.16: Längsschnitt durch die Mitte des Probekörpers. Der Makroriss breitete sich entlang von Gesteinskorngrenzen und vorher geschädigter Gesteinskörnung aus.

### 6.3 Zusammenfassung des Einflusses von Makrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe

Mit Hilfe von Experimenten werden die Punkte zwei und drei der Zielstellung aus der Einleitung (Kapitel 1.2) untersucht, um die Dauerüberwachung mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen zu erproben. Im vorliegenden Kapitel wird gezeigt, dass die Entstehung von Schädigungen in Form von Makrorissen durch die Überwachung mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen detektiert wird. Dabei werden die entstehenden Risse bereits registriert, bevor sie an der Oberfläche erkennbar sind und bevor sie nach Norm DIN EN 1992-1-1 (1992) als Gefährdung für das Bauteil betrachtet werden können. Welche Signalparameter sich durch die Makrorissentstehung verändern, wird mit verschiedenen Auswertemethoden untersucht.

Tabelle 6.2 fasst zusammen, bei welchen Belastungen Veränderungen des Betonbalkens mit den

verschiedenen ZfP-Verfahren und ausgewerteten Signalparametern registriert werden. Im Einzelnen werden die Geschwindigkeit, die Kreuzkorrelation, die Geschwindigkeitsänderung und der Schalldruck der Ultraschallmessungen mit eingebetteten Prüfköpfen, die Anzahl der Hits der Schallemission, die Veränderung des Weges zwischen den Wegaufnehmern und als Ergebnis der digitalen Bildkorrelation die Verformungen an der Oberfläche aufgelistet. Die Ereignisse sind hierfür in vier Phasen eingeteilt. Phase 1 repräsentiert den elastischen Zustand in dem bereits Mikrorisse entstehen, an der Oberfläche jedoch noch kein Riss detektierbar ist. In Phase 2 ist die Ausbildung eines Makrorisses im unteren Bereich des Balkens erkennbar. Dieser Riss breitet sich in Phase 3 so weit aus, dass er die Ebene der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe kreuzt. Das letzte Ereignis ist die Ausbildung von zusätzlichen Rissen parallel zum Ersten in Phase 4.

Methode	Last in $kN$			
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
eingebettete Prüfköpfe (Geschwindigkeit)	-	-	38	52
eingebettete Prüfköpfe (Kreuzkorrelation)	32	34	-	52
eingebettete Prüfköpfe (Geschwindigkeitsänderung)	-	34	-	49
eingebettete Prüfköpfe (Schalldruck)	-	34	-	-
Schallemission	28	34	-	51
Wegaufnehmer	32	35	-	50
digitale Bildkorrelation	28	-	-	-

Tabelle 6.2: Auflistung der mit den verschiedenen ZfP-Verfahren identifizierten Veränderungen am Betonbalken. Phase 1: Mikrorissentstehung (keine sichtbaren Risse), Phase 2: Makrorissausbildung (sichtbarer Riss), Phase 3: Makrorissausbreitung in die Ebene der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe und Phase 4: Ausbildung von zusätzlichen Makrorissen.

Für die Detektion von Änderungen im Betonzustand ist die Schallemission das Empfindlichste der hier genutzten ZfP-Verfahren. Mit der Schallemission wird die Entstehung von Mikrorissen im Inneren des Balkens detektiert und lokalisiert. Die digitale Bildkorrelation hingegen erfasst kleinste elastische Verformungen der Oberfläche. Diese Verformung durch die Last auf den Balken lassen sich lokal auch in Form von Wegveränderungen mit den Wegaufnehmern registrieren. Die Empfindlichkeit der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe, die für die dauerhafte Überwachung von Zustandsänderungen tief in einem massiven Betonbauteil entwickelt worden sind, hängt von den untersuchten Signalparametern und damit von der gewählten Signalauswertemethode ab. Die Ankunftszeit des Signals beispielsweise verändert sich, wenn ein Riss den direkten Wellenweg kreuzt, vorher jedoch nicht. Andere Signalparameter sind empfindlicher gegenüber Veränderungen. Mit der Kreuzkorrelation und der CWI werden Veränderungen im gesamten Signal berücksichtigt, auch der gestreute, später eintreffende Anteil. Diese Methoden sowie die veränderte Schwächung des Schalldrucks können zur Analyse hinzugezogen werden, wenn die Ankopplung der Prüfköpfe zum Bauteil konstant gut ist (siehe hierzu auch die Diskussion im Kapitel 4.3). Die Auswertung der Signalschwächung, in Form der Abnahme der ersten Signalamplitude, führt zur frühzeitigen Erfassung eines Risses, bevor dieser den direkten Schallweg kreuzt und bevor dieser breit genug ist, um die Struktur des Bauteils zu gefährden. Unter Verwendung

der Kreuzkorrelations- und CWI-Methode kann die Schädigung sogar detektiert werden, bevor diese an der Oberfläche sichtbar ist. Untersucht man verschiedene Zeitbereiche der Signale, lassen sich Veränderungen im Beton noch früher detektieren. Alle Auswertungsmethoden erfassen klare Unterschiede zwischen dem belasteten und unbelasteten Zustand.

Mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen können also Betonelemente in Bezug auf Rissentstehung und -ausbreitung überwacht werden. Die Einbettung der Prüfköpfe in die Betonelemente ermöglicht, auch unzugängliche oder tiefer liegende Bereiche einer Baustruktur über lange Zeiträume zu beobachten.

Das von den gestreuten Wellenanteilen durchlaufene Volumen und damit die möglichen Abstände zwischen einer Prüfkopfanordnung und der Schädigung sind Gegenstand von aktuellen Untersuchungen [Chinaemerem (2014)]. Die Untersuchung der Empfindlichkeit der Prüfköpfe bei passiver Nutzung, um akustische Ereignisse zu lokalisieren, ist Ziel zukünftiger Experimente.

## Kapitel 7

# Einfluss von durch Frost-Tau-Wechsel induzierten Mikrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe

In diesem Kapitel wird der Einfluss von Mikrorissen auf die Ultraschallsignale der eingebetteten Prüfköpfe betrachtet, um die Hypothese der Schadensdetektion durch eine Dauerüberwachung mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen zu erproben. Untersucht wird, welche Signalparameter durch Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen beeinflusst werden und mit welchen Auswertemethoden sich diese Veränderungen auswerten lassen. Die Erzeugung von Mikrorissen erfolgt in Anlehnung an den Capillary Suction, Internal damage and Freeze thaw (CIF -) Test. Neben dem CIF-Test wird die Versuchsdurchführung beschrieben und werden die Ergebnisse des Experiments diskutiert.

### 7.1 Beschreibung der Versuchsmethode

#### 7.1.1 Einführung in die Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes

Der CIF-Test ist eine Methode, um die innere Schädigung von Beton, die unter natürlichen Bedingungen über Jahre hinweg entsteht, durch wiederholte, zeitlich gesteuerte Frost-Tau-Zyklen im Labor zu simulieren. Durch die Frostbeanspruchung entstehen im Beton Mikrorisse in der Gesteinskörnung, an den Korngrenzen und in der Zementmatrix [Weise *et al.* (2012)]. Die dadurch verursachten Veränderungen des dynamischen Elastizitätsmoduls lassen sich durch Ultraschallmessungen bestimmen. Mit dem Test lässt sich der Widerstand eines Betons gegenüber Frost-Tau-Wechseln feststellen und mit anderen Betonarten vergleichen. Der Test wird in den Prüfvorschriften Setzer *et al.* (1996), Setzer *et al.* (2004), DIN EN 12390-9 (2009) und CEN/TR 15177 (2006) beschrieben, welche die Herstellung und Lagerung der Betonprobekörper sowie die

Durchführung des Testes festlegen. Das Experiment erfolgt nur in Anlehnung an die Prüfvorschrift, da durch die eingebetteten Prüfköpfe die Probekörper, die für diese Arbeit hergestellt werden, andere Dimensionen haben. Bei den Schritten Vorsättigung und Frost-Tau-Belastung wird der Prüfvorschrift gefolgt.

Das CIF-Prüfverfahren ist so konzipiert, dass der Wärme- und Feuchtetransport zeitgerafft nur über eine Achse erfolgt. Der Transport von unten nach oben kommt den Verhältnissen in der Praxis sehr nahe [Setzer (2002)]. Zuerst werden die PK bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $65\text{ }\%$  rF schonend getrocknet, bevor sie in ein Wasserbad gelegt und so einer kapillaren Flüssigkeitsaufnahme unterzogen werden. Die Menge und der Verlauf der Wasseraufnahme ist je nach Betonsorte sehr unterschiedlich. Im Anschluss werden sie, immer noch im Wasserbad, den Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Während der Frost-Tau-Wechsel nimmt die Sättigung weiter zu. Dieses Phänomen erklärt Setzer (2002) mit der Theorie der Mikroislinsenpumpe und dem thermodynamischen Modell.

Selbst bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt ist viel Wasser in den Poren ungefroren. Wenn die Temperaturen auf unter null Grad abfallen, gefrieren Anteile des Porenwassers und bilden Mikroislinsen. Durch diese Eisbildung entsteht ein Unterdruck, der zum einen zur Kontraktion der Betonmatrix (Gefrierschwinden) führt, zum anderen wird Wasser aus noch ungefrorenen Poren herausgesaugt und gefriert an den Mikroislinsen, deren Volumen dadurch zunimmt. Steigt die Temperatur des Betons, wird Wasser von außerhalb des PK in das Porengefüge gesaugt, wodurch sich die Sättigung erhöht. Bei jedem Frost-Tau-Zyklus wiederholt sich dieser Vorgang. Die Sättigung nimmt zu, bis die Schädigungssättigung erreicht ist. Bei dieser ist die Sättigung des Porenraumes so groß, dass die 9%-ige Volumenausdehnung des Wassers beim Gefrieren Wirkung zeigt und der Beton geschädigt wird [Fagerlund (1994), Setzer (2002), Auberg (1999)].

Beim CIF-Test wird die innere Schädigung über die Ultraschalllaufzeit bestimmt. Die Probekörper werden für die Messung aus der Klimatruhe genommen, um die Ultraschallprüfköpfe von außen auf die Oberfläche aufzusetzen und die Ultraschalllaufzeit zu messen. Die Messung erfolgt, wenn der Frost-Tau-Zyklus das positive Temperaturplateau durchläuft, wenn also die Ankopplung über das Wasser Temperaturen von über  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  im PK verursacht. Mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen lässt sich die Laufzeit auch im negativen Temperaturbereich des Frost-Tau-Zyklus in beliebig dichten Zeitabständen überwachen. Durch den dichten Messabstand wird der innere Schädigungsprozess sehr genau verfolgt.

Die Ultraschalllaufzeit verändert sich auf Grund von Mikrorissbildung durch das Schwinden des jungen Betons und durch die Wasserzunahme in den Poren bis zur Schädigungssättigung geringfügig. Erst wenn die Schädigung so groß ist, dass der Feuchteinfluss keine Rolle mehr spielt, lassen sich Schädigungsraten ableiten. Ist die Schädigung groß genug, nimmt das dynamische Elastizitätsmodul schnell ab und die Laufzeit erhöht sich [Setzer (2002)]. Für die Bestimmung der inneren Schädigung wird die relative Änderung der Ultraschalllaufzeit  $\tau_w$  nach folgender

Gleichung berechnet [DIN EN 12390-9 (2009), CEN/TR 15177 (2006)]:

$$\tau_w = \frac{t_{cs}}{t_w} \quad (7.1)$$

$w$  ist die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel,  $t_{cs}$  die Durchschallungszeit nach dem kapillaren Saugen und  $t_w$  die Durchschallungszeit nach  $w$  Frost-Tau-Wechseln. Über

$$R_{u,w} = \tau_w^2 \quad (7.2)$$

lässt sich die Änderung des dynamischen E-Moduls  $R_{u,w}$  bestimmen, welcher für die Abschätzung der inneren Schädigung genutzt wird. Je nach Expositionsklasse des Bauteils und Anwendungsfall liegt das Schädigungskriterium bei  $R_{u,w} \geq 0,75$  [BAW (2012)].

### 7.1.2 Durchführung des Frost-Tau-Wechsel Experiments

#### *Probekörper*

Der Beton wird für die Aufgabe der Detektion von Mikrorissen so konzipiert, dass die Messungen der Gefügeveränderung über den gesamten Versuchszeitraum der Frost-Tau-Belastung möglich sind. Es wird bewusst auf den Einsatz von künstlich erzeugten Luftporen verzichtet. Auch weitere Zusatzmittel und Zusatzstoffe werden nicht verwendet. Der Beton hat die Druckfestigkeitsklasse C25/30 mit Gesteinskörnung aus Ottendorf-Okrilla. Der w/z-Wert beträgt 0,55, die maximale Korngröße ist 16 mm. Um Inhomogenitäten durch die Herstellung zu vermeiden, wird zunächst ein einzelner Probekörper gefertigt, aus dem vor Beginn des Experiments drei quaderförmige Probekörper der Maße 0,4 m x 0,12 m x 0,12 m (Länge, Breite, Höhe) geschnitten werden. Die einzubettenden Ultraschallprüfköpfe werden vor der Betonierung in der Schalung so platziert, dass sie in jedem Probekörper mittig, 0,06 m tief und im Abstand von 0,06 m von den Längskanten liegen. Der horizontale Abstand zwischen ihnen beträgt 0,28 m. In jedem Probekörper wird zusätzlich ein Thermoelement zur Temperaturkontrolle einbetoniert. Damit die Bedingung des einachsigen Feuchtetransports erfüllt ist, werden die Seitenflächen der Probekörper mit Epoxidharz abgedichtet, während die obere und untere Probekörperseite unbehandelt bleibt.

Abbildung 7.1 oben zeigt den PK während der Betonierung. Es sind nur noch die Prüfkopf-kabel und die Thermoelemente zu sehen. In Abbildung 7.1 unten ist der einzelne Probekörper skizziert.

#### *Messablauf*

Jeder Probekörper liegt in einem Bad aus demineralisiertem Wasser auf Auflegern, um eine Unterspülung zu erlauben. Die Flüssigkeitshöhe wird auf 1 cm von der Unterkante der Probekörper gehalten. Zunächst bleibt die Temperatur sieben Tage lang konstant bei 20 °C. In dieser Zeit werden die Probekörper, wie in den Prüfvorschriften [Setzer (2001), DIN EN 12390-9 (2009), CEN/TR 15177 (2006)] gefordert, durch kapillares Saugen vorgesättigt. Anschließend beginnt die Frost-Tau-Belastung in einer Klimatrube. Hierbei werden die Probekörper einer zyklischen Belastung in Form von Temperaturänderungen unterworfen. Die Temperaturänderung je Zyklus

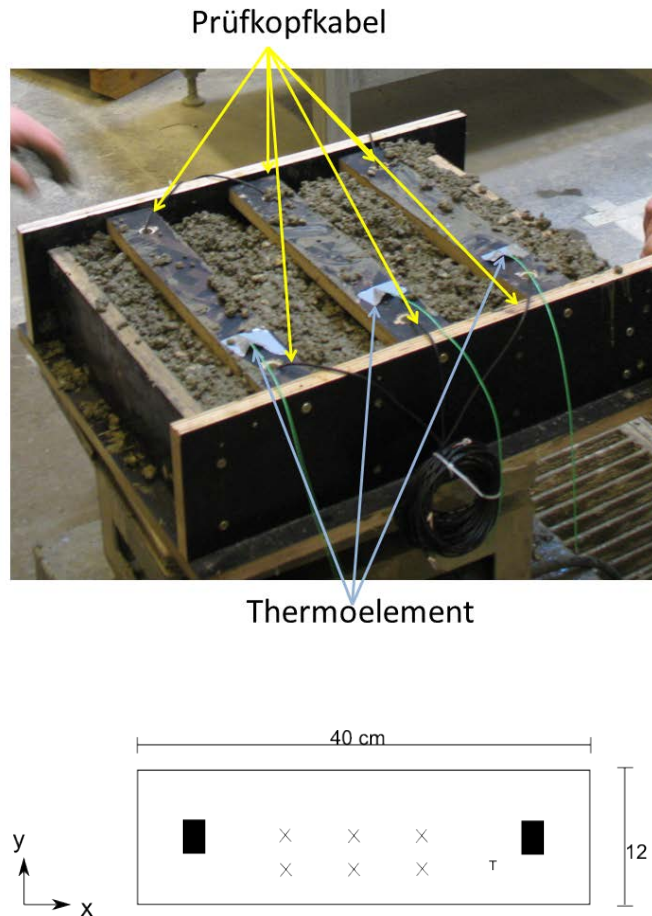
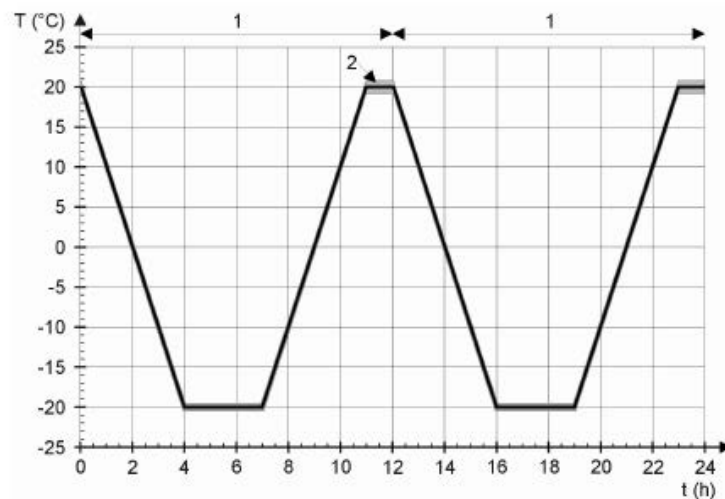


Abbildung 7.1: Foto von dem Probekörper für die Induktion von Mikrorissen während der Betonierung (oben) und Skizze eines einzelnen Probekörpers (unten). Die schwarzen Zylinder markieren die Position der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe, die Kreuze die Position der externen Ultraschallprüfköpfe und das T die des Temperatursensors.

folgt dem in Abbildung 7.2 dargestellten Verlauf.

56 Frost-Tau-Zyklen werden vor Beendigung des Experiments durchlaufen. Alle zwei bis drei Tage werden die Probekörper aus der Klimatrube genommen, gewogen und die Laufzeit mit externen P-Wellen- und S-Wellenprüfköpfen gemessen. Diese Messungen erfolgen, während der Frost-Tau-Zyklus mindestens  $15^{\circ}\text{C}$  durchläuft. Gemessen wird je Probekörper an sechs Punkten, in zwei Ebenen, mit jeder Wellenart. Die Kreuze in der Abbildung 7.1 markieren die Position dieser Prüfköpfe. Durch die Messungen in zwei Ebenen ist die Ausbreitung zunächst des Feuchtehorizontes und später der inneren Schädigung von der Prüffläche ausgehend, von unten nach oben, zu verfolgen. Bei den Messungen mit den eingebetteten Prüfköpfen kann das Messintervall beliebig gewählt werden. Gemessen wird zunächst alle 30 min, bevor das Messintervall auf alle 10 min verringert wird. Das führte zu einer zeitlich sehr engen Überwachung der PK während der gesamten Frost-Tau-Zyklen. Der sendende Prüfkopf wird mit einem bipolaren Rechteckimpuls mit einer Frequenz von  $f = 60\text{ kHz}$  und der Amplitude  $U = 100\text{ V}$  angeregt. Damit sich auch der gestreute Wellenteil auswerten lässt, werden 5 ms des empfangenen Ultraschallsignals bei





**Legende**  
 1 Frost-Tau-Wechsel  
 2 am Referenzpunkt gemessene Temperatur

Abbildung 7.2: Temperaturverlauf von zwei Frost-Tau-Wechseln [aus DIN EN 12390-9 (2009) und CEN/TR 15177 (2006)].

einer Abtastfrequenz von  $f_{AB} = 2$  MHz aufgenommen.

Abbildung 7.3 zeigt den gesamten Experimentieraufbau, mit dem gezeigt wird, dass die Entstehung von Mikrorissen mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen detektiert werden kann.

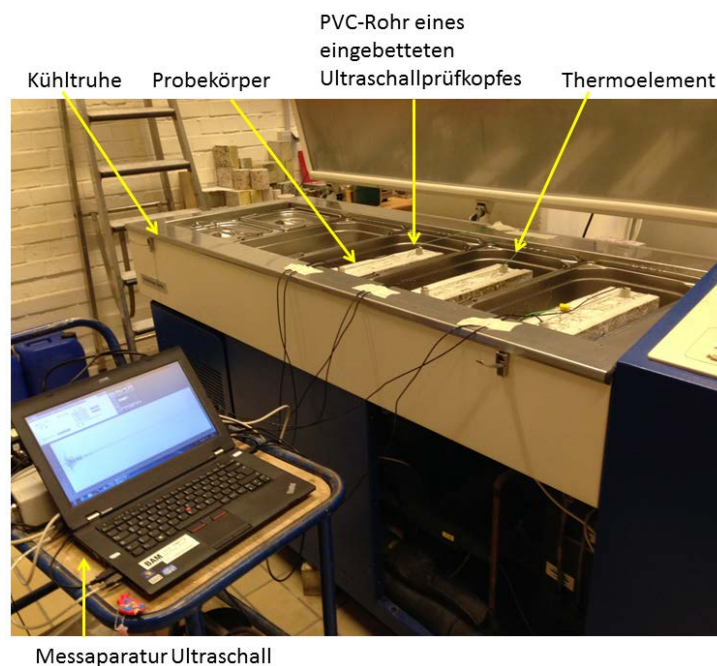


Abbildung 7.3: Aufbau des Experiments zur Untersuchung der Prüfkopfempfindlichkeit bei der Detektion von durch Frost-Tau-Wechseln hervorgerufenen Mikrorissen.

## 7.2 Ergebnisse und Diskussion

Zur Verdeutlichung der Empfindlichkeit der einzelnen Signalparameter gegenüber Veränderungen im Material und der Messbedingungen wird der Zeitraum des kapillaren Saugens ebenfalls zur Auswertung herangezogen. Als Referenz für die Bestimmung der Veränderungen dient somit das zuerst gemessene Ultraschallsignal des Experiments, zu Beginn des kapillaren Saugens.

### *Geschwindigkeit*

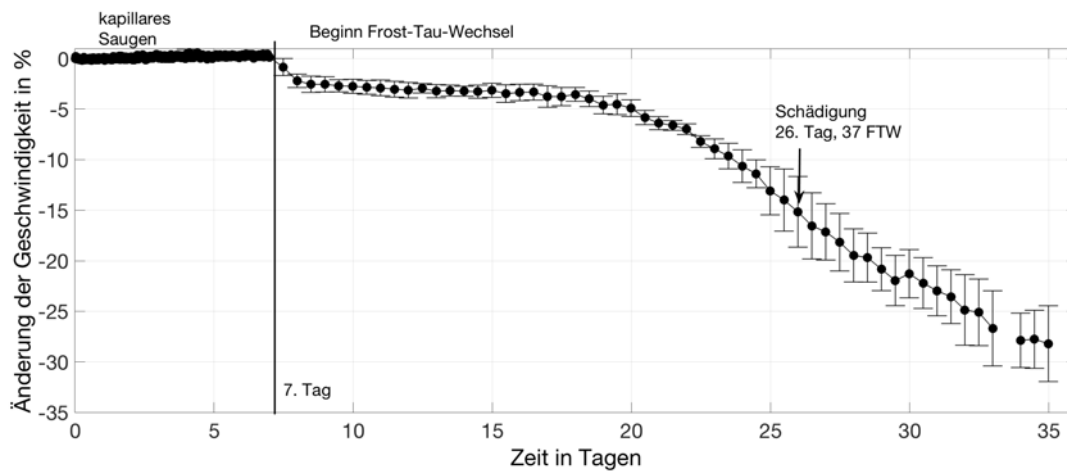


Abbildung 7.4: Entwicklung der Geschwindigkeit, bestimmt mit den eingebetteten Prüfköpfen über die Dauer des Experiments, gemessen bei 17 °C.

Die Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen den eingebetteten Prüfköpfen ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Markiert ist der Punkt an dem nach Berechnung des relativen dynamischen E-Moduls, der Beton als geschädigt gilt. Ausgewertet werden alle Signale bei einer Temperatur von 17 °C. Diese Temperatur erreichen die Probekörper während des einstündigen positiven Plateaus der Frost-Tau-Zyklen. Dargestellt sind die Mittelwerte und ihre Standardabweichungen, gebildet aus den Messergebnissen für alle drei Probekörper.

Während die Probekörper im Wasserbad liegen, um durch das kapillare Saugen vorgesättigt zu werden, verändert sich die Geschwindigkeit nicht. Ein Abfall der Geschwindigkeit ist mit Beginn der Frost-Tau-Wechsel nach sieben Tagen zu beobachten. Grund hierfür ist die Veränderung der Umweltbedingungen durch die Verlagerung der Probekörper aus dem offenen Laborraum

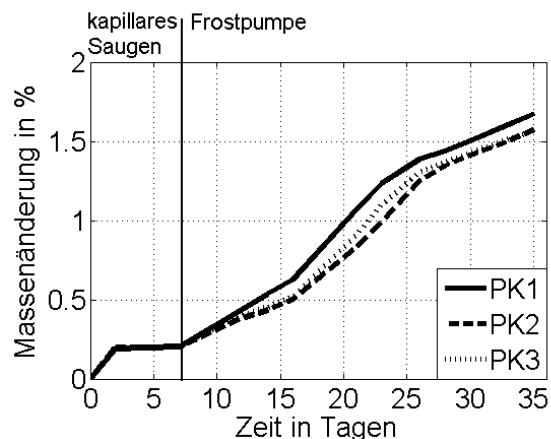


Abbildung 7.5: Massenzunahme der Probekörper durch Wasseraufnahme.

in die geschlossene Klimatruhe. Nach diesem anfänglichen Abfall verändert sich die Geschwindigkeit in den nächsten Tagen geringfügig, bevor sie zunehmend stärker abnimmt.

In diesen ersten Tagen wird durch die Frost-Tau-Wechsel mehr Flüssigkeit in die Probekörper gepumpt. Es überwiegt eine erhöhte Wasseraufnahme bei geringer Längenänderung des PK. Nach Erreichen des kritischen Sättigungsgrades ist der Einfluss der Schädigung größer als der Einfluss der Wasserzunahme, wodurch sich höhere Längenänderungen gegenüber geringerer Wasserzunahme verzeichnen lassen [Auberg (1999)]. Mit der Volumenausdehnung des gefrierenden Wassers setzt die Zerstörung des Betons ein. Die Massenzunahme durch Wasseraufnahme über die Gesamtdauer des Experiments ist in Abbildung 7.5 dargestellt.

Laut Prüfvorschrift für die Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstandes von Beton lässt sich die Zunahme der inneren Schädigung über das relative dynamische E-Modul berechnen. Abbildung 7.6 zeigt die relative Änderung des dynamischen E-Moduls, bestimmt über die Laufzeitänderung der Signale, sowohl zwischen den eingebetteten Prüfköpfen als auch zwischen den P-Wellen-Prüfköpfen, die an der Oberfläche der Prüfkörper positioniert sind. Die Prüfköpfe an der Oberfläche werden im Folgenden als externe Prüfköpfe bezeichnet. Die Messungen mit externen Prüfköpfen in den zwei Ebenen ergeben, dass in der unteren Ebene das dynamische E-Modul zuerst abnimmt. Ursache hierfür ist die Flüssigkeit, die von unten nach oben gesaugt wird, so dass sich ein Schädigungsgradient von unten nach oben ausbildet. Der Verlauf des relativen dynamischen E-Moduls, bestimmt mit den eingebetteten Prüfköpfen, korreliert mit den entsprechenden Messergebnissen der externen Prüfköpfe der oberen Ebene, da sie auf einer Höhe liegen. In Abbildung 7.6 ist das von der Bundesanstalt für Wasserbau [BAW (2012)] festgelegte Schädigungskriterium markiert. Nach 37 Zyklen, am 26. Tag des Experiments, ist das dynamische E-Modul des Betons in der Ebene der eingebetteten Prüfköpfe um 25 % gegenüber dem Referenzzustand zu Beginn der Frost-Tau-Wechsel gefallen. Damit gelten die Probekörper nach Setzer *et al.* (2004) als geschädigt.

Die ersten Frost-Tau-Wechsel des Experiments werden im Kapitel 5.1.2 genutzt, um den Temperatureinfluss auf die Ultraschallsignale zu untersuchen. Abbildung 5.11 zeigt die Veränderung der Geschwindigkeit des Signals in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Geschwindigkeitsänderung im negativen Temperaturbereich ist gravierend, während im positiven Temperaturbereich, bei der Auswertung der Geschwindigkeiten über die Laufzeit der Signale, keine Änderungen zu erkennen sind.

Abbildung 7.7 ist erneut eine Darstellung der Geschwindigkeiten über der Temperatur, jedoch der zwei späteren Frost-Tau-Zyklen 36 und 37. Diese Zyklen entsprechen dem 26. Tag des gesamten Experiments. Wie in Abbildung 7.6 zu sehen, führen die Schädigungen des Betons ab diesem Frost-Tau-Zyklus zu einem Abfall des dynamischen E-Moduls auf unter 75 %. Das Schädigungskriterium von BAW (2012) ist damit erreicht und der Beton gilt als geschädigt. Während im negativen Temperaturbereich keine Änderung durch die Schädigung zu erkennen ist, zeigt sich im positiven Temperaturbereich die Abnahme der Geschwindigkeit deutlich. Innerhalb von

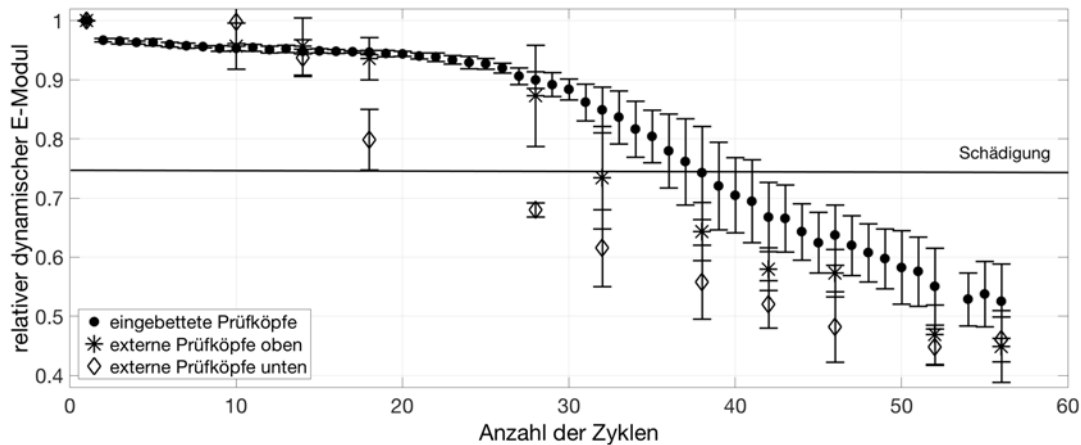


Abbildung 7.6: Änderung des dynamischen E-Moduls mit zunehmender Zahl an Frost-Tau-Zyklen, jeweils bestimmt mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen sowie externen der oberen Messreihe und der unteren.

zwei Frost-Tau-Wechseln gibt es für diesen Beton bei gleichen positiven Temperaturen einen Geschwindigkeitsabfall von bis zu 1 %. Der Einfluss von steigenden und fallenden Temperaturen verursacht sogar Geschwindigkeitsunterschiede von bis zu 4 %. Diese Geschwindigkeitsabfälle werden durch zunehmende Gefügeveränderungen (Mikrorisse, Gefügauflockerung) verursacht, welche die Ursache für Frost-Tau-Wechsel-Schäden sind. Man kann daher zusammenfassen: Über den Vergleich von Ultraschallsignalen aus der Überwachung mit den eingebetteten Prüfköpfen, bei gleichen positiven Temperaturen, sind Gefügeveränderungen detektierbar.

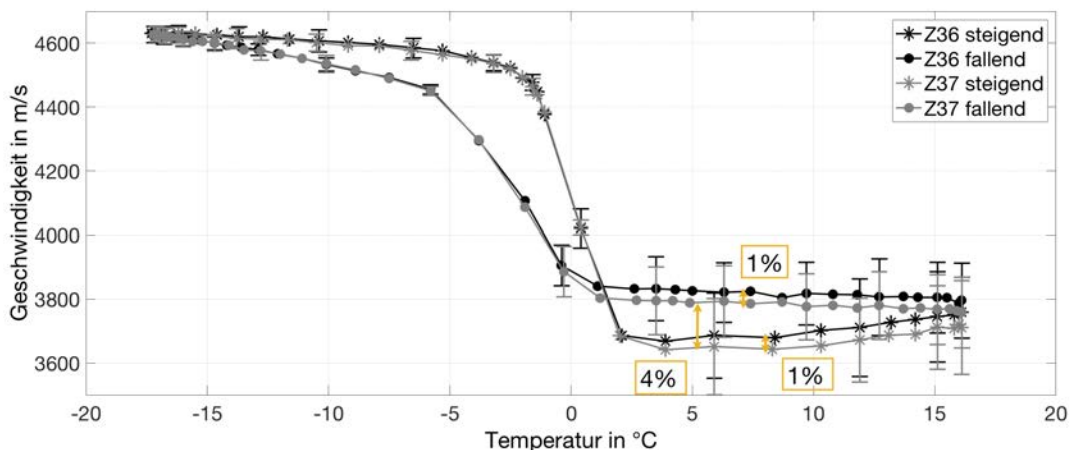


Abbildung 7.7: Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen den eingebetteten Prüfköpfen während der Zyklen 36 und 37, über die Temperatur.

### Spektrum

Um den Einfluss der Schädigung auf das Spektrum des Ultraschallsignals zu untersuchen, wird

in den Abbildungen 7.8 bis 7.11, das Referenzsignal zu Beginn der Vorsättigung mit dem Signal des 37. Zyklus und mit dem letzten Signal des Experiments nach 56 Zyklen verglichen. Nach 37 Zyklen ist das dynamische E-Modul auf 75 % abgefallen. Nach 56 Zyklen wird das Experiment beendet, da das dynamische E-Modul auf unter 60 % (bezogen auf den Referenzwert) gefallen ist. Es kann hierbei davon ausgegangen werden, dass ein hoher Schädigungsgrad vorliegt und weitere Messungen aufgrund der hohen Prüfstreuungen nicht mehr zu empfehlen sind.

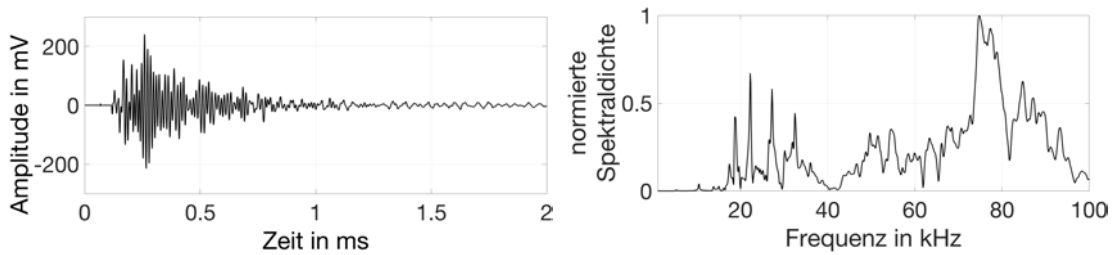


Abbildung 7.8: Referenzultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum.

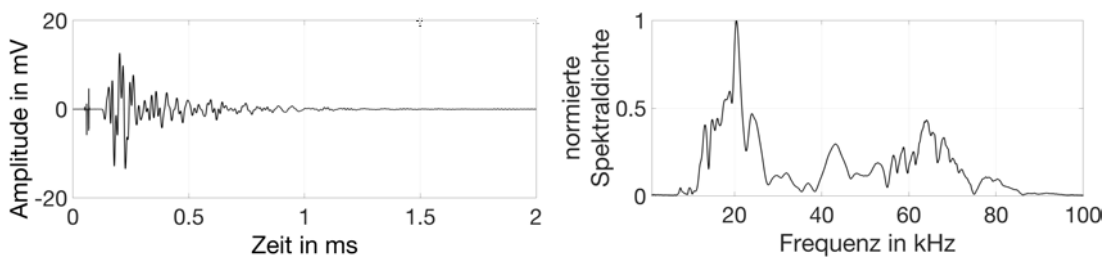


Abbildung 7.9: Ultraschallsignal nach 37 Frost-Tau-Zyklen und dessen normiertes Spektrum.

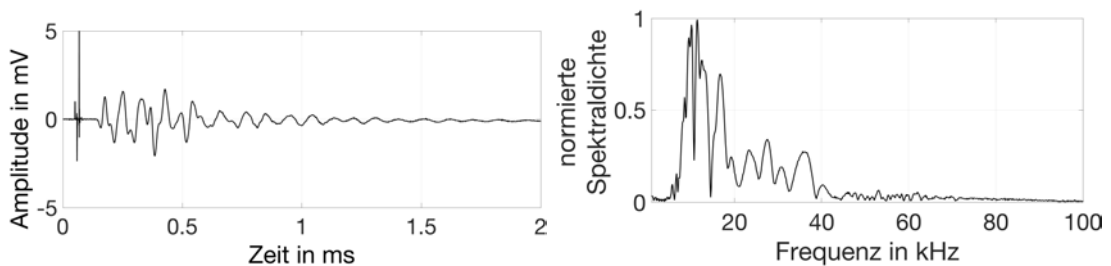


Abbildung 7.10: Ultraschallsignal nach 56 Frost-Tau-Zyklen und dessen normiertes Spektrum.

Die Abbildungen zeigen, dass mit zunehmender Schädigung, das heißt zunehmender Anzahl und Ausbreitung von Mikrorissen, die hohen Frequenzanteile des Ultraschallsignals abnehmen. Wie in Abbildung 7.10 und 7.11 (unten) zu sehen, sind bei vollständiger Schädigung des Betons die hochfrequenten Anteile des ursprünglichen Signals sehr stark gedämpft. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achsen in den Abbildungen des Zeitsignals, die an die jeweilig dargestellten Daten angepasst sind.

Bei welcher Frequenz das Spektrum seine maximale Energie hat und wie sich diese Frequenz über den Verlauf des Experiments ändert ist im Anhang auf Seite 142 in Abbildung A7 gezeigt.

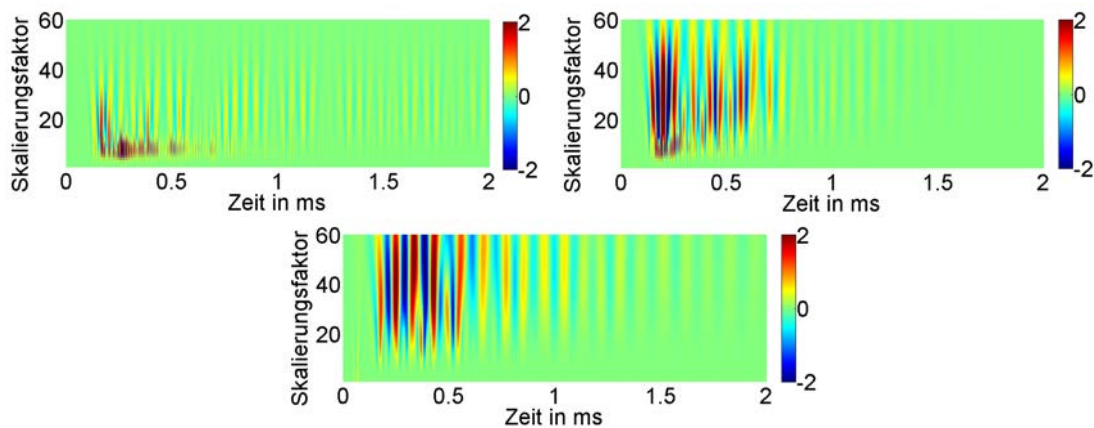


Abbildung 7.11: Vergleich der Skalierungsfaktoren der Ultraschallsignale über die Zeit. Die Signale sind aufgenommen zu Beginn der Frost-Tau-Wechsel (Referenzsignal) (oben links), nach 37 Frost-Tau-Zyklen (oben rechts) und nach 56 Frost-Tau-Zyklen (unten).

Aufgrund des Fehlens eines eindeutig ausgebildeten Maximums bei einsetzender Schädigung gibt es keine eindeutige Tendenz der Entwicklung zu höheren oder niedrigeren Frequenzen mit zunehmenden Frost-Tau-Zyklen. Erst bei einer erheblichen Schädigung des Betons ab Zyklus 37 am Tag 26 des Experiments haben die hohen Frequenzanteile der Ultraschallsignale so stark abgenommen, dass die tieferen Frequenzanteile dominieren (Abbildung 7.10 rechts, Abbildung 7.11 unten).

### *Amplitude*

Auf Grund der individuellen Inhomogenität eines jeden PK wird bei den empfindlichen Auswertemethoden Schalldruckamplitude, Kreuzkorrelationskoeffizient und Coda-Wellen-Interferometrie jeder PK einzeln ausgewertet und dargestellt, weshalb keine Fehlerbetrachtung durch Mittelwertbildung erfolgt.

Die Abbildungen 7.12 und 7.13 zeigen die Entwicklung des ersten Maximums und des Scheitelwertes des Signals im Verlauf des Experiments. Referenzsignal ist auch hier wieder das erste Signal des kapillaren Saugens. Verglichen werden die Signale am Temperaturmaximum eines jeden Frost-Tau-Zyklus.

In den Abbildungen mit Punkt A markiert ist ein plötzlicher Abfall des Scheitelwertes noch während des kapillaren Saugens. Dieser Abfall ist zu beobachten, wenn die Probekörper von ihrem ursprünglichen Ort bewegt werden, um sie zu wiegen. Anschließend werden sie an einem anderen Ort unter einer Klimaanlage bis zum Beginn der Frost-Tau-Wechsel zwischengelagert. Nach Beginn der Frost-Tau-Wechsel fällt das erste Maximum stetig ab. Der Scheitelwert weist nach einem anfänglichen Abfall im weiteren Verlauf des Experiments immer wieder vereinzelt Anstiege auf. Der PK 3 hat anfänglich einen noch nicht geklärten Anstieg sowohl des ersten Maximums als auch des Scheitelwertes, bevor diese dem Verlauf der anderen beiden Probekörper folgen. Ursachen hierfür könnten Inhomogenitäten im Beton sein.

Punkt B markiert den Abfall der Ultraschallparameter Amplitude und Scheitelwert auf 20 % gegenüber dem Beginn der Frost-Tau-Wechsel, als Anzeichen für nicht umkehrbare Veränderun-

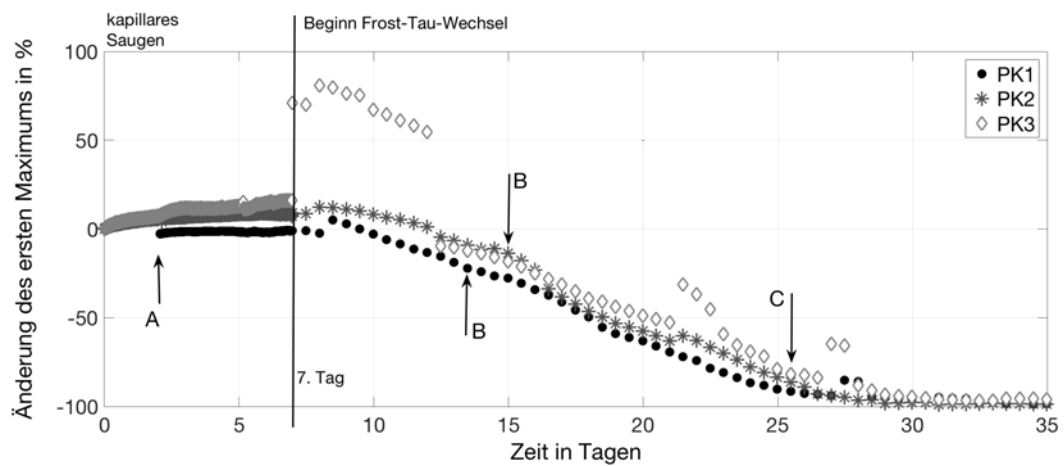


Abbildung 7.12: Entwicklung des ersten Maximums der drei Probekörper während des kapillaren Saugens und der Frost-Tau-Zyklen.

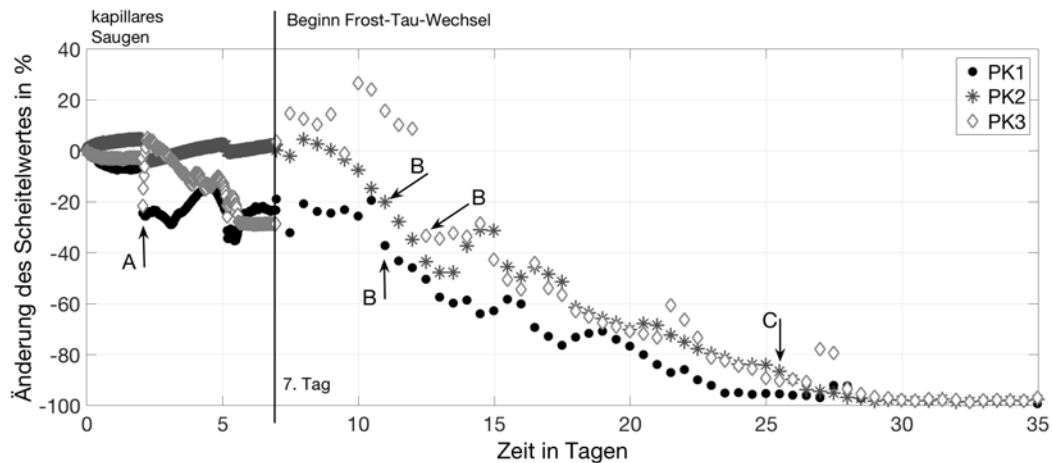


Abbildung 7.13: Entwicklung des Scheitelwertes der drei Probekörper während des kapillaren Saugens und der Frost-Tau-Zyklen.

gen im Beton. Bei der ersten Amplitude ist dieser Grenzwert nach 13 (PK1) und 16 (PK2 und PK3) Frost-Tau-Zyklen erreicht, beim Scheitelwert sogar schon nach 8 Frost-Tau-Wechseln. Der Grenzwert von 20 % Abweichung gegenüber einem Referenzzustand wird aus den Experimenten zu der Makrorissdetektion abgeleitet (vgl. Kapitel 6). Er ist groß genug, um nicht durch geringfügige Änderungen in den Umweltbedingungen verursacht zu werden. Die hohe Empfindlichkeit des Scheitelwertes gegenüber geringfügigen Veränderungen im Material, aber eben auch gegenüber kleinsten Veränderungen in den Messbedingungen, erschwert die Ergründung der Ursachen ihrer Änderung. Wodurch die Nutzung dieses Signalparameters als alleinigen Parameter für die Auswertung von Signalen eines realen Bauwerks nicht zu empfehlen ist.

37 Frost-Tau-Zyklen bzw. Tag 26 sind in den Abbildungen als Punkt C markiert. An dieser Stelle wird über die Änderung der Durchschallungslaufzeit die Abnahme des dynamischen E-Moduls auf 75 % des ursprünglichen Wertes berechnet. Das bedeutet laut Prüfvorschrift eine innere Schä-

digung des Betons. Beide Signalparameter, erstes Maximum und Scheitelwert, sind an diesem Punkt bereits um über 80 % gefallen. Grund hierfür ist die hohe Empfindlichkeit dieser Parameter gegenüber der Ausbildung von Mikrorissen, welche zuerst das Signal schwächen, bevor es langsamer wird.

Im Anhang auf Seite 142 ist in den Abbildungen A8 die Entwicklung der Gesamtenergie und die Verschiebung des Amplitudenmaximums entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals dargestellt. Auf Grund der großen Streuung der Werte lassen sich diese Signalparameter nicht eindeutig interpretieren.

### Kreuzkorrelation und CWI

Wie in der Abbildung 7.14 zu sehen, nimmt der Kreuzkorrelationskoeffizient bereits am Punkt A um über 20 % gegenüber dem Referenzsignal ab. Bis zum Ende der sieben Tage des kapillaren Saugens verändert er sich zyklisch. Durch die Lagerung der Probekörper unter einer Klimaanlage, die sich in regelmäßigen Abständen einschaltet, ändern sich die Messbedingungen, welche wiederum Einfluss auf die Ultraschallsignale haben. Die Abbildung 7.15 zeigt zehn aufeinanderfolgende Ultraschallsignale (US) des PK 1 um den Punkt A. Der Zeitbereich um den Ersteinsatz unterscheidet sich weder in der Laufzeit noch in der Amplitude. Der spätere Zeitbereich weist Unterschiede in den Amplituden und Verschiebungen entlang der Zeitachse auf, was die Ursache für die Abnahme des Kreuzkorrelationskoeffizienten ist. Da die fünf Ultraschallsignale vor und nach der Umlagerung den gleichen Verlauf haben, sind sie in der Abbildung nicht voneinander zu unterscheiden. Das zeigt auch die gute Wiederholbarkeit der Signale wenn keine Veränderungen im Material oder der Umgebung auftreten.

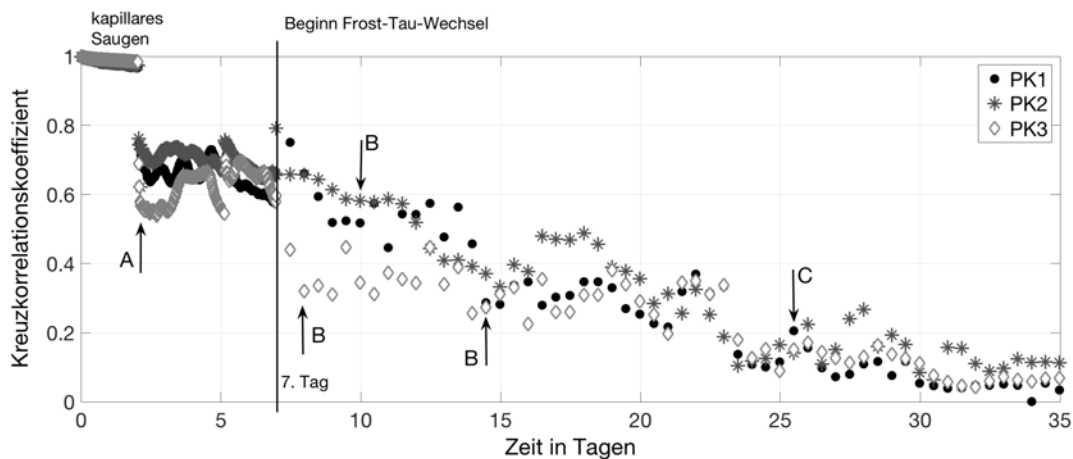


Abbildung 7.14: Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten der drei Probekörper während des kapillaren Saugens und den Frost-Tau-Zyklen.

Nach dem kapillaren Saugen nimmt die Kreuzkorrelation zwischen den Signalen ab. Ein Abfall auf 20 % gegenüber dem Beginn der Frost-Tau-Wechsel, markiert als Punkt B, ist bereits nach 5 und 6 Zyklen bzw. am 9. und 10. Tag des Experiments erkennbar. Er liegt also bereits in dem Bereich, in dem das dynamische E-Modul um weniger als 10 % gefallen ist, was nach Prüfvor-



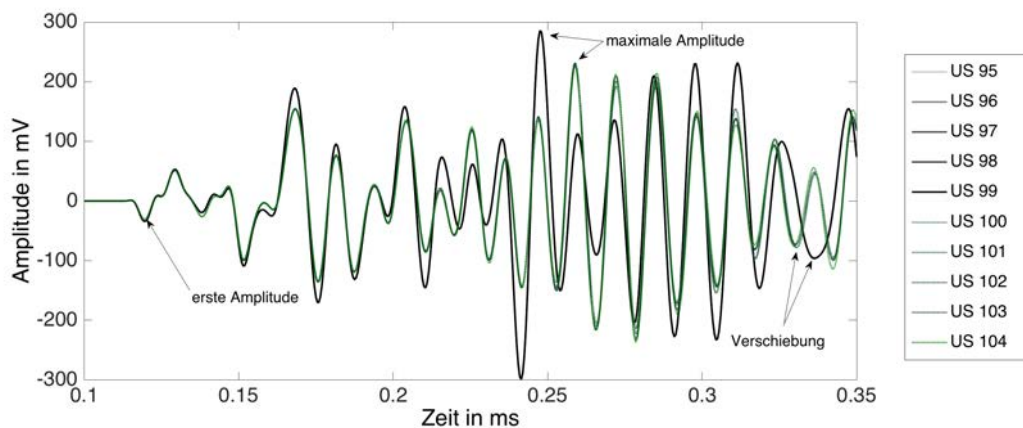


Abbildung 7.15: Beispiel von 10 aufeinanderfolgenden Signalen, aufgenommen um den Punkt A, während des kapillaren Saugens.

schrift [Setzer (2001)] noch als Bereich leichter Schädigung gilt. Beim PK 3 tritt dieser Abfall eher ein, was durch die starke, bisher nicht geklärte Änderung der Amplituden verursacht wird. Markiert als Punkt C ist der 37. Zyklus, in dem das relative dynamische E-Modul auf unter 0,75 fällt. Der Kreuzkorrelationskoeffizient ist hier um über 80 % gefallen.

Mit der Coda-Wellen-Interferometrie werden Verschiebungen entlang der Zeitachse in Geschwindigkeitsänderungen umgerechnet. Diese Geschwindigkeitsänderungen sind in Abbildung 7.16 dargestellt. Der Zeitbereich des kapillaren Saugens wird auf der rechten Seite dieser Abbildung extra dargestellt. Auch hier ist der Sprung erkennbar, der durch die Umlagerung der Probekörper hervorgerufen wird. Erkennbar ist auch ein Geschwindigkeitsanstieg, der durch die Zunahme der Sättigung in den ersten zwei Tagen des kapillaren Saugens entsteht. Im Vergleich mit Abbildung 7.5 ist die Geschwindigkeitsänderung durch die Wasseraufnahme zu erkennen. Ab dem Beginn der Frost-Tau-Zyklen fällt die Geschwindigkeit bei allen drei Probekörpern stetig, bis sie ab Zyklus 14 bzw. am 14. Tag für den PK 3, ab Zyklus 21 bzw. am 17. Tag für den PK 1, ab Zyklus 31 bzw. am 16. Tag für den PK 2 willkürlich steigt und fällt, was mit einer Abnahme des Kreuzkorrelationskoeffizienten um unter 0,3 (PK1 und PK3) bzw. 0,4 (PK2) korreliert. Diese Sprünge spiegeln nicht mehr die tatsächliche Geschwindigkeitsentwicklung im Beton wider. Sie sind vielmehr ein Indiz für eine sehr starke Änderung des Materials gegenüber dem Referenzzustand. Diese Änderungen sind mehr als nur geringfügige Veränderungen der Geschwindigkeiten, weshalb die CWI nicht mehr anwendbar ist [Snieder (2006), Snieder (2002)].

Wie bereits im Kapitel 5.1.2 wird in Abbildung 7.17 als Referenzsignal das Signal der jeweils vorherigen Messung genutzt, um Datensätze mit größeren Geschwindigkeitsänderungen mit der CWI-Methode auszuwerten. Mit B markiert sind die Punkte, bei denen der Kreuzkorrelationskoeffizient der jeweiligen PK auf 0,8 abfällt. Die größten Geschwindigkeitsänderungen treten beim PK 1 zwischen den Frost-Tau-Zyklen 35 bis 37 (um den Tag 25), beim PK 2 zwischen den Frost-Tau-Zyklen 39 bis 42 (Tag 27 bis 28) und beim PK 3 beim Frost-Tau-Zyklus 38 (Tag 26) auf.

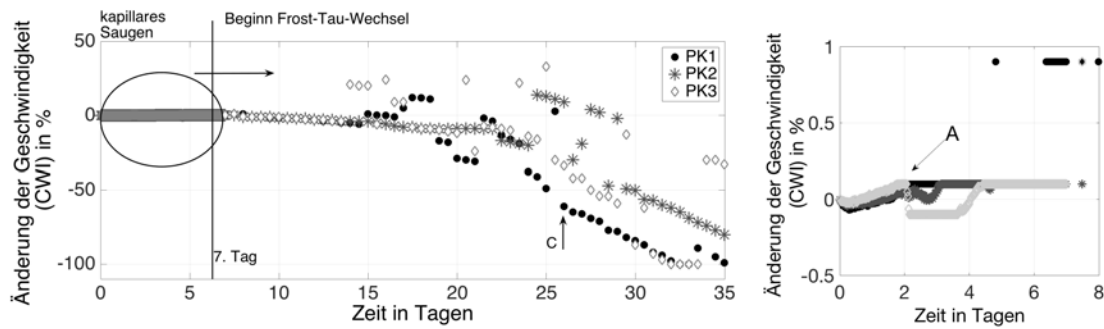


Abbildung 7.16: Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI-Methode, während des kapillaren Saugens, mit zunehmender Zahl an Frost-Tau-Wechseln.

Das liegt im Bereich des relativen dynamischen E-Moduls von weniger als 0,75, der deutliche Schäden im Betongefüge signalisiert, Punkt C in der Abbildung. Bei späteren Frost-Tau-Zyklen ist die Änderung in den Signalen wieder geringer, was ein Indiz dafür ist, dass die Schädigung des Betons weniger stark fortschreitet und die Messungen aufgrund des hohen Schädigungsgrades keine deutliche Trennschärfe mehr erlauben.

Die Ergebnisse der Kreuzkorrelation und der CWI ohne das kapillare Saugen, mit dem Referenzsignal zu Beginn der Frost-Tau-Wechsel bzw. dem jeweils vorherigen, sind im Anhang in den Abbildungen A9 zu sehen. Der Abfall des Kreuzkorrelationskoeffizienten und der Geschwindigkeit bezieht sich bei dieser Darstellung ausschließlich auf einsetzende Schädigungen, ohne den Einfluss des kapillaren Saugens.

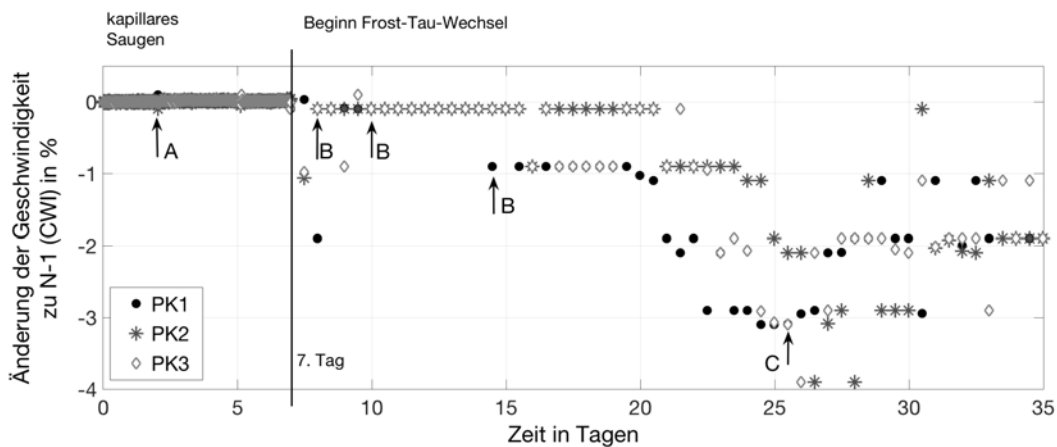


Abbildung 7.17: Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI-Methode, mit zunehmender Zahl an Frost-Tau-Zyklen. Als Referenz dient jeweils die vorherige Messung.

Nach Beendigung des Experiments wird die Schädigung eines Probekörpers in Form einer Rissbreitenbestimmung unter dem Mikroskop ermittelt. Abbildung 7.18 zeigt einen Querschnitt durch den PK 1. Ungerichtete Korngrenzenrisse, intragranulare Risse und wenige transgranulare Risse sind eindeutig erkennbar, sie sind teilweise bis zu  $122 \mu\text{m}$  breit.

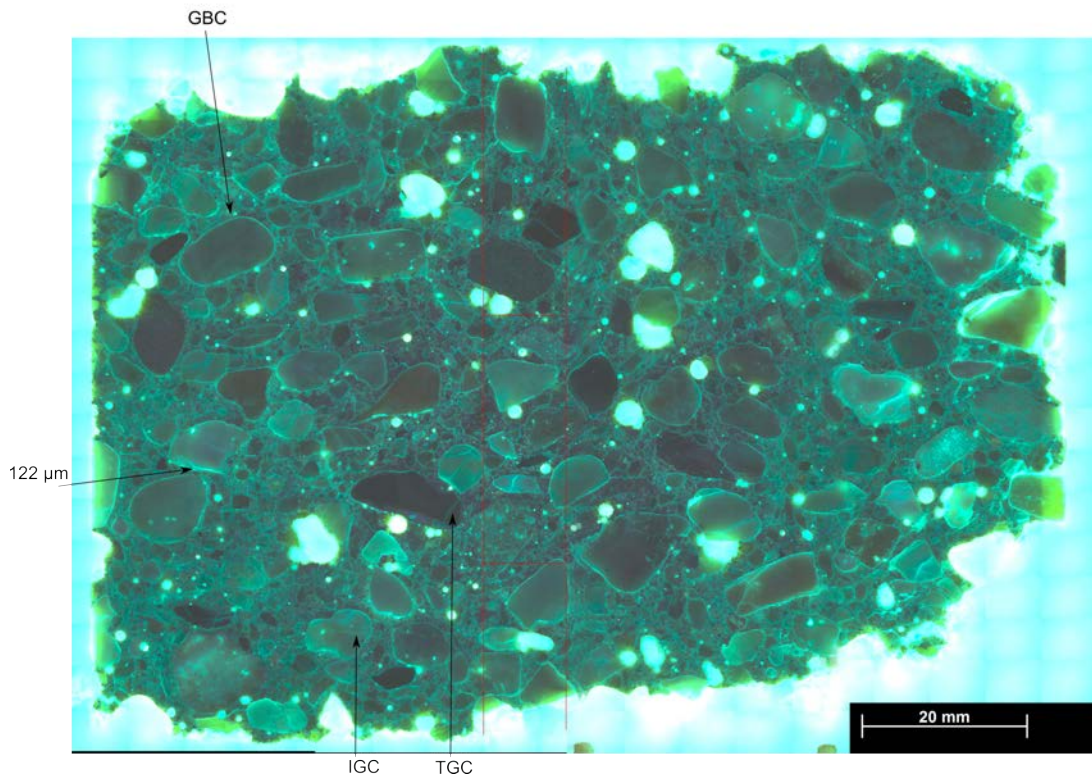


Abbildung 7.18: Querschnitt durch den PK1 unter dem Mikroskop betrachtet. Ungerichtete Korn-grenzenrisse (GBC), intragranulare Risse (IGC) und transgranulare Risse (TGC) sind erkennbar. Der Beton kann als stark beschädigt betrachtet werden.

### 7.3 Zusammenfassung des Einflusses von Mikrorissen auf das Ultraschallsignal der eingebetteten Prüfköpfe

Das Verfahren zur Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes von Beton dient in der vorliegenden Arbeit der Erzeugung von Mikrorissen die über ein größeres Betonvolumen verteilt sind. Durch die dauerhafte Überwachung des Experiments mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen, zusätzlich zu den in der Prüfvorschrift vorgesehenen externen Ultraschallprüfköpfen, wird gezeigt, dass die Entstehung von Mikrorissen mit diesen neuartigen Prüfköpfen detektiert werden können.

Auch dieses Kapitel ist für die Erprobung der Hypothese eine Dauerüberwachung von Betonbauteilen mit eingebetteten Prüfköpfen durchzuführen essentiell. Es werden weitere Fragen der Punkte zwei und drei der Zielvorstellung dieser Arbeit (siehe Kapitel 1.2) beantwortet. Hier wird gezeigt, dass durch regelmäßige Ultraschallmessungen mit den eingebetteten Prüfköpfen die Entstehung von Frost-Tau-Wechsel Schäden überwacht werden kann. Die entstehenden Mikrorisse werden durch die Auswertung verschiedener Signalparameter bereits im frühen Stadium der Schädigung detektiert, weit bevor der Beton, nach den Vorschriften bisheriger Prüfverfahren, als geschädigt gilt. Die Betrachtung der Kreuzkorrelation zwischen den Signalen ist hierbei die empfindlichste Signalanalysemethode. Da sich die Einflüsse der Temperatur nicht von den

Einflüssen der Schädigung trennen lassen, bedarf es für die Interpretation der Ergebnisse zusätzlicher Informationen über die Umweltbedingungen vor Ort.

Die Auswertung orientiert sich zunächst an der Prüfvorschrift für den CIF-Test von Setzer *et al.* (2004), DIN EN 12390-9 (2009) und BAW (2012) und bestimmt das relative dynamische Elastizitätsmodul über die Änderung der Laufzeiten. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der eingebetteten mit denen der externen Prüfköpfe übereinstimmen, dass sich also mit den eingebetteten Prüfköpfen die Abnahme des dynamischen Elastizitätsmoduls überwachen lässt. Das in der Prüfvorschrift genutzte Kriterium von  $R_{u,w} \geq 0,75$  dient der Abschätzung der inneren Schädigung. Ab diesem Wert gilt Beton als Frost-Tau geschädigt. Durch die Betrachtung der zusätzlichen Signalparameter erstes Maximum, Scheitelwert, Kreuzkorrelationskoeffizient und Geschwindigkeitsänderung lassen sich entstehende Schäden weit vor diesem Kriterium detektieren. Durch das Einbetten der Ultraschallprüfköpfe in den Beton können in beliebigen zeitlichen Abständen Ultraschallmessungen durchgeführt werden. So erhält man Daten für alle Temperaturen der Frost-Tau-Zyklen. Damit lässt sich zeigen, dass eine auftretende Schädigung im positiven Temperaturbereich einen größeren Einfluss auf die Ultraschallsignale hat als die Änderung der Temperatur. Das ermöglicht eine Identifizierung von Schäden durch Signalvergleiche, aufgenommen bei positiven Temperaturen. Im Besonderen wird der Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem steigenden und fallenden Temperaturast mit zunehmender Schädigung größer.

Durch die Einbetonierung der Prüfköpfe wird die Ankopplung zwischen Beton und Prüfkopf als nahezu konstant gut angenommen, weshalb sich zusätzlich zur Signallaufzeit andere Signalparameter auswerten lassen. So zeigt sich, dass die hohen Frequenzanteile mit zunehmender Schädigung abnehmen. Bei erheblichen Schäden sind nur noch tiefe Frequenzanteile im Signal nachweisbar. Die Amplituden der Ultraschallwelle fallen mit zunehmender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln stärker als die Geschwindigkeit der Welle. Die Signalschwächung ist ein frühes Indiz für eine Schädigung in Form zunehmender Anzahl von Mikrorissen. Die maximale Amplitude ist dabei zwar empfindlicher als die Amplitude des Ersteinsatzes, birgt aber die Gefahr der falschen Interpretation der Ergebnisse, da dieser Signalparameter auch durch geringe Veränderungen in den Messbedingungen beeinflusst wird. Für den Kreuzkorrelationskoeffizienten lässt sich ein Abfall unter die 80 % Schwelle beobachten, der lediglich durch Umpositionierung der Probekörper entsteht. Bei konstanten Umgebungsbedingungen, in diesem Fall 17°C in einer geschlossenen Klimatrube, fällt der Koeffizient bereits bei leichter Schädigung stark.

Über den Kreuzkorrelationskoeffizienten lässt sich leicht eine Änderung zwischen zwei Signalen feststellen. Mit der CWI-Methode werden aus dieser Änderung Informationen zur Geschwindigkeitsentwicklung gewonnen. Dies ist für den Vergleich mit Ergebnissen bezogen auf Umgebungseinflüsse wie Temperatur und Feuchte relevant. Schäden, die größere Zeitverschiebungen zwischen den Signalen verursachen, bringen die CWI-Methode jedoch schnell an ihre Grenze. Das jeweils vorherige Signal als Referenzsignal zu verwenden, ermöglicht die Auswertung von Signalen, die von stärkeren Veränderungen im Beton beeinflusst sind. Voraussetzung sind hier ausreichend kleine zeitliche Abstände zwischen den Messungen.

## Kapitel 8

# Beispiele für Installationen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Umsetzung der Dauerüberwachung von Betonbauteilen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Dabei dienen die Untersuchungen der vorherigen Kapitel als Grundlage. Eine Dauerüberwachung im Labor wird vorgestellt, die mit der Betonierung des Probekörpers beginnt und mit dessen Zerstörung im Rahmen des Drei-Punkt-Biegeversuchs endet. Beispiele von Signalen aus bereits bestehenden Installationen, mit eingebetteten Prüfköpfen in zwei Brücken und einem Fundament zeigen, dass eine Dauerüberwachung auch an realen Bauteilen umsetzbar ist. Abschließend wird ein Konzept für die Dauerüberwachung von Betonbauteilen, basierend auf den in dieser Arbeit gewonnenen Erfahrungen, bereitgestellt.

### 8.1 Langzeitüberwachung im Labor

Für den Versuch zur Erzeugung eines Makrorisses werden Probekörper hergestellt, die jeweils mit zwei Ultraschallprüfköpfen und einem Thermoelement versehen sind (siehe Kapitel 6). Durch regelmäßige Messungen werden diese Probekörper vom Zeitpunkt der Betonierung bis zur Zerstörung durch die Prüfmaschine überwacht, um eine Dauerüberwachung unter Laborbedingungen zu simulieren. Insbesondere geht es um den Einfluss von Temperaturänderungen im Versuchslabor auf die verschiedenen Signalparameter. Die Frage, wie stark diese Einflüsse im Vergleich zu Änderungen im Beton, wie dessen Hydratation und dessen Schädigung, ist, wird beantwortet.

#### Versuchsdurchführung

Die Prüfköpfe sind im 1,5 m x 0,3 m x 0,2 m großen bewährten PK mittig und 0,9 m voneinander entfernt positioniert (siehe Abbildung 6.2). Das Thermoelement befindet sich 2 cm unterhalb des sendenden Prüfkopfes. Alle 30 min werden automatisch Ultraschallmessungen durchgeführt und die Temperatur ausgelesen. Die Messungen beginnen am ersten Tag nach der Fertigung des Probekörpers. Der als Sender genutzte Prüfkopf wird mit einem bipolaren Rechteckimpuls der

Amplitude  $U = 100 \text{ V}$  und der Mittenfrequenz von  $f_M = 60 \text{ kHz}$  angeregt. Das empfangene Signal wird mit  $f_{AB} = 2 \text{ MHz}$  abgetastet, die Anzahl der Abtastpunkte beträgt  $N = 10000$ . Nach 47 Tagen wird der Probekörper aus der Schalung genommen und in der Prüfmaschine fixiert. Dieser Zeitpunkt wird in der nachfolgenden Präsentation der Ergebnisse als Punkt B markiert. Der Punkt C markiert den Zeitpunkt, an dem der Belastungsversuch beginnt. Ein zufälliger Temperaturabfall um  $4^\circ\text{C}$  im PK während der Messungen wird als Punkt A markiert.

## Ergebnisse und Diskussion

### *Geschwindigkeit*

Die Abbildung 8.1 zeigt, wie sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der P-Welle im Beton im Überwachungszeitraum verändert hat. Um die Geschwindigkeit zu bestimmen, wird nach der Kurvenanpassung automatisch die Amplitude des Ersteinsatzes (erstes Maximum) gepickt. Zunächst steigt die Geschwindigkeit stark, während der Beton hydratisiert, also der Zement erhärtet. Auch nach dem 28. Tag, der in der Norm DIN 1048-5 (1991) als Zeitpunkt festgelegt wird, um das statische Elastizitätsmodul zu bestimmen, steigt die Geschwindigkeit noch weiter an. Das Ultraschallsignal zu diesem Zeitpunkt wird für alle nachfolgenden Auswertemethoden als Referenzsignal genutzt. Am Punkt A, wo es zu einem Abfall der Temperatur kommt, erhöht sich die Geschwindigkeit geringfügig. Die Geschwindigkeit fällt stark ab, nachdem sich während des Drei-Punkt-Biegeversuchs ein Makroriss im Beton ausgebildet hat (siehe Kapitel 6). Die Veränderung der Messbedingungen durch die Ausschalung des Probekörpers (Punkt B) wird in der Geschwindigkeit nicht reflektiert.

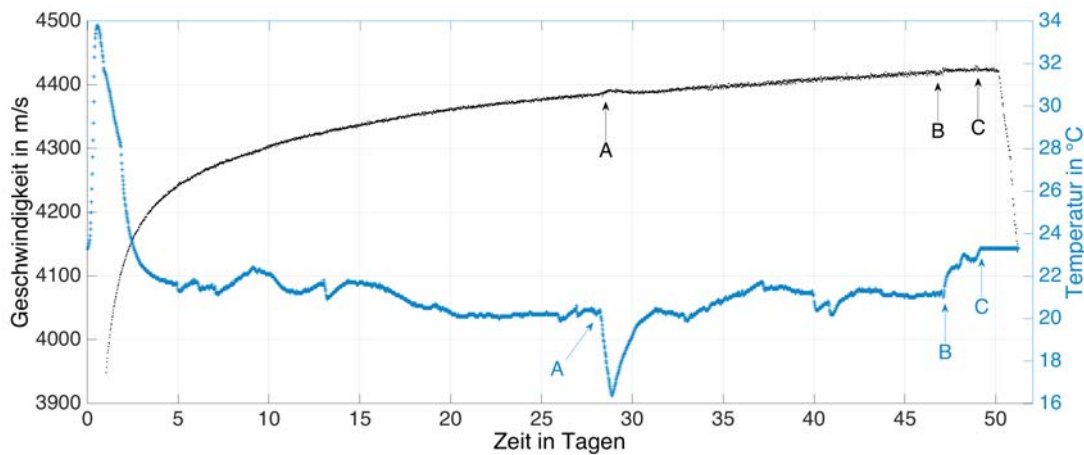


Abbildung 8.1: Entwicklung der Geschwindigkeit über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung.

### *Spektrum*

Analog zum Kapitel 2.2 wird das Spektrum der Signale untersucht. Nach Schwankungen zu Beginn des Hydratationsprozesses zeigt die zeitliche Entwicklung der spektralen Verteilung während des gesamten Überwachungszeitraums keine Änderung der dominanten Frequenzanteile (siehe

Abbildung 8.2). Erst nach der Entfernung der Verschalung und während des Belastungsversuches verändern sie sich. Die Änderung der Temperatur hat keinen Einfluss auf das Spektrum.

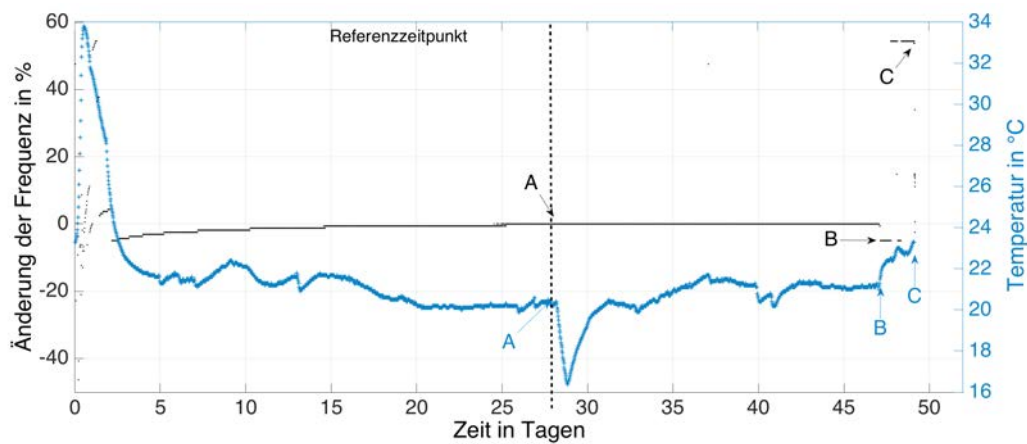


Abbildung 8.2: Entwicklung des Maximums der Spektraldichte über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung.

### Amplitude

Für die Auswertung der Schalldruckamplitude werden in der Abbildung 8.3 die Signalparame-

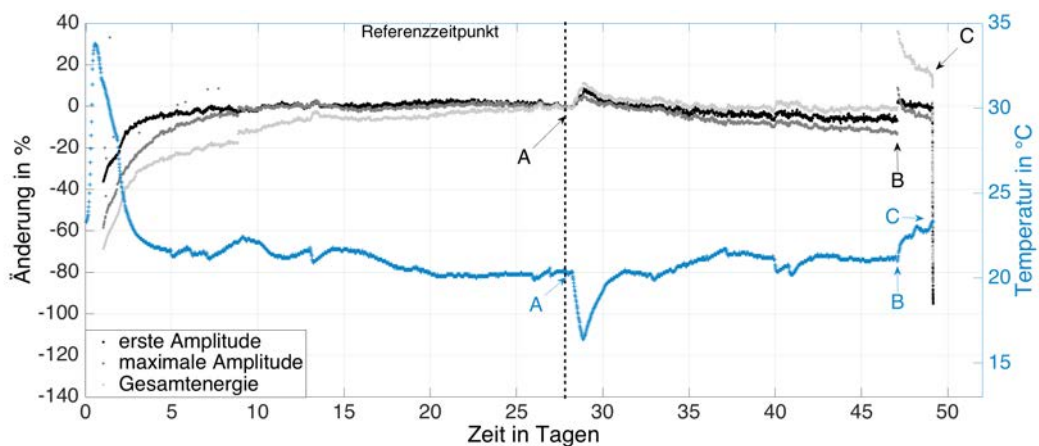


Abbildung 8.3: Entwicklung des Schalldrucks der Ultraschallsignale über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. Als Referenzzeitpunkt dient der 28. Tag nach der Betonierung des Probekörpers.

ter Amplitude am Ersteinsatz (erstes Maximum), Scheitelwert und gesamte Signalenergie der Temperaturentwicklung gegenübergestellt. Zu Beginn der Messungen sind die Schalldruckamplituden der Ultraschallsignale geringer als die des Referenzsignals. Die verschiedenen Amplituden entwickeln sich dabei unterschiedlich stark. Nachdem der Hydratationsprozess einige Tage fortgeschritten ist und weniger stark das Signal beeinflusst, spiegeln sich die Schwankungen der Umgebungstemperatur auch im Schalldruck wider. Die größere Temperaturänderung am Punkt

A beeinflusst ebenfalls die Amplituden. Wie im Kapitel 5 beschrieben, steigen auch hier die Amplituden bei fallenden Temperaturen und umgekehrt. Nach Ausschaltung des Probekörpers und Umlagerung in die Prüfmaschine steigen die Amplituden anfänglich stark, bevor sie mit steigenden Temperaturen fallen. Dieser Zeitpunkt ist in der Abbildung 8.3 als Punkt B markiert. Der Anstieg wird durch eine Veränderung der Messbedingungen verursacht und ist unabhängig von den Betoneigenschaften oder der Temperatur. Es zeigt, dass die Temperatur während einer Dauerüberwachung immer aufgenommen werden muss, um Veränderungen in den Signalen bewerten und Temperatureinflüsse auf das Empfangssignal von anderen Einflüssen unterscheiden zu können.

Der Einfluss der veränderten Messbedingungen wirkt sich am geringsten auf die erste Amplitude und am stärksten auf die Gesamtenergie des Ultraschallsignals aus. Dies zeigt die hohe Empfindlichkeit der Signalenergie gegenüber Veränderungen im Aufbau der Messungen (siehe Kapitel 7). Der starke Amplitudenabfall zum Ende der Überwachung wird durch die Ausbildung von Mikro- und Makrorissen verursacht (siehe Kapitel 6). Der Punkt C markiert den Beginn des Drei-Punkt-Biegeversuches.

#### *Kreuzkorrelation und CWI*

Wie auf Grund der Laboruntersuchungen in den Kapiteln 5, 6 und 7 zu erwarten, verändert sich der Kreuzkorrelationskoeffizient zunächst mit dem Alter des Betons, dann mit der Temperatur des Probekörpers und schließlich mit der Veränderung der Messbedingungen und dem Beginn der Rissentstehung durch den Drei-Punkt-Biegeversuch. In der Abbildung 8.4 sind diese Veränderungen mit den Punkten A, B und C markiert.

Abbildung 8.5 zeigt die Änderung der Geschwindigkeit, bestimmt mit der CWI-Methode, im Verlauf der Überwachung. Bis zum Zeitpunkt B korreliert die mit der CWI-Methode bestimmte Geschwindigkeitsänderung mit der über den Ersteinsatz der Zeitsignale bestimmten Geschwindigkeit. Im Gegensatz zur herkömmlichen Methode registriert die CWI-Methode jedoch auch die veränderten Messbedingungen sowie den Temperaturanstieg nach dem Punkt B.

### **Zusammenfassung**

Das Beispiel einer Dauerüberwachung zeigt, dass mit einer entsprechenden Programmierung der Messtechnik eine lückenlose Überwachung mit beliebig kleinen zeitlichen Abständen zwischen den Messungen möglich ist. Der Einfluss der Temperatur am Probekörper ist vorhanden, wird aber von tatsächlichen Änderungen im Beton, wie dessen Hydratation und dessen Schädigung überdeckt. Um zwischen Schädigung und Temperatureinflüssen unterscheiden zu können, ist es notwendig, die Temperatur im Untersuchungsobjekt im Bereich der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe zu dokumentieren.



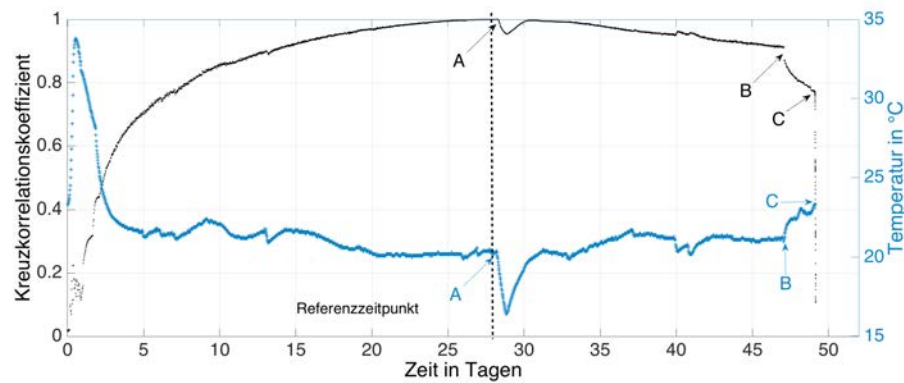


Abbildung 8.4: Kreuzkorrelation zwischen den Ultraschallsignalen über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. Als Referenzzeitpunkt dient der 28. Tag nach der Betonierung des Probekörpers.

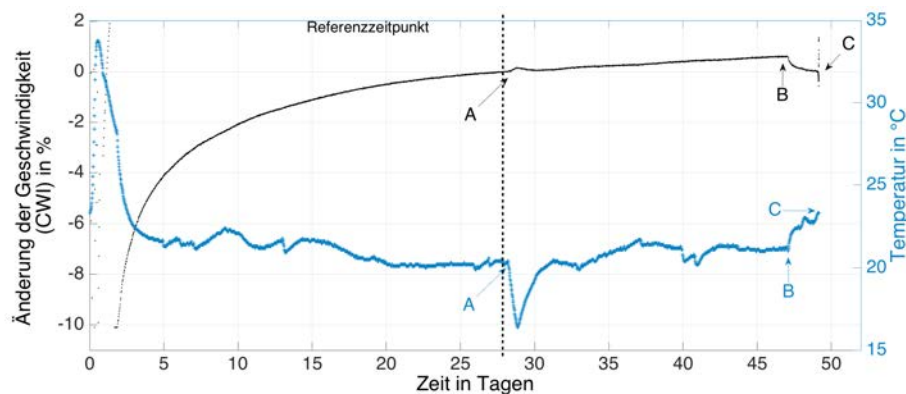


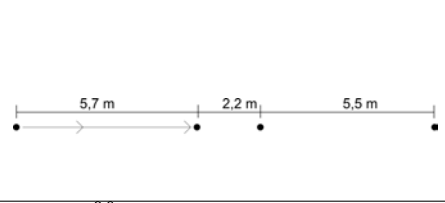
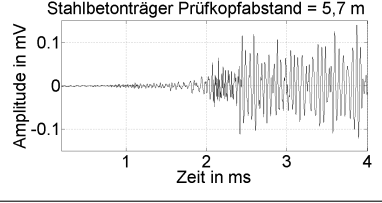
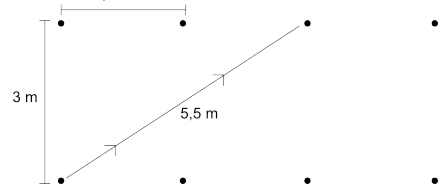
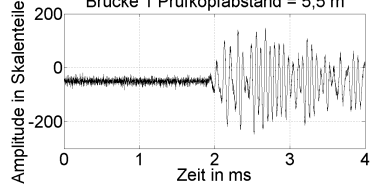
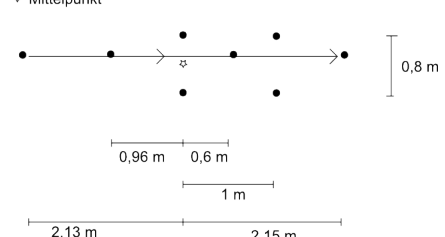
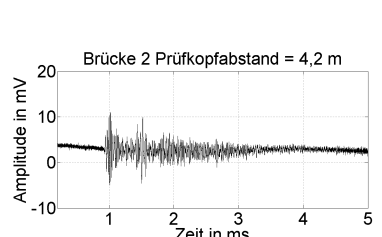
Abbildung 8.5: Geschwindigkeitsänderung zwischen den Ultraschallsignalen, bestimmt mit der CWI-Methode, über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. Als Referenzzeitpunkt dient der 28. Tag nach der Betonierung des Probekörpers.

## 8.2 Installationen in realen Betonbauteilen

Die Motivationen zur Dauerüberwachung sind vielfältig. Eine Dauerüberwachung von wichtigen Brücken in beispielsweise erdbebengefährdeten Gebieten ist denkbar, um nach einem Erdbeben zeitnah Aussagen über deren Zustand treffen zu können. Pfeiler von Brücken, die gelegentlich Fluten ausgesetzt sind, lassen sich dauerhaft auf Integrität überprüfen. Der Zustand von Fundamenten von Windkraftanlagen könnte durch eine dauerhafte Überwachung beurteilt werden, bevor diese wiederverwendet und stärkerer Belastung ausgesetzt werden. Die Zustandsbeurteilung mit den hier vorgestellten eingebetteten Ultraschallprüfköpfen kann auch erfolgen, wenn diese stark bewehrt und massiv sind sowie unter der Erde liegen. Mit einem Structural Health Monitoring werden bereits wichtige Knotenpunkte der Verkehrsinfrastruktur hinsichtlich ihres Zustandes unter anderem in den Vereinigten Staaten von Amerika [Dong & Song (2010), Enckell (2011), Gastineau *et al.* (2009)] und Australien [Chan & Thambiratnam (2011)] überwacht. Im Themengebiet des Structural Health Monitoring können die eingebetteten Ultraschallprüfköpfe

eine wichtige Ergänzung sein.

Die vorliegenden Ergebnisse, basierend auf Untersuchungen unter Laborbedingungen, lassen sich auf die dauerhafte Überwachung von realen Betonelementen übertragen. Zum derzeitigen Zeitpunkt sind in drei Objekten (zwei Brücken und einem Stahlbetonträger) die hier vorgestellten Ultraschallprüfköpfe eingebettet. Die Installation erfolgte bei zwei Objekten nachträglich, bei einem vor der Betonierung. Erste Ergebnisse sind im Zeitschriftenartikel Wolf *et al.* (2014b) und im Konferenzbeitrag Wolf *et al.* (2014a) veröffentlicht. Die Installationen liefern bis zum Fertigstellen dieser Arbeit noch nicht ausreichend viele Daten, um lückenlose Ergebnisse einer längeren Überwachung einer Schadensentwicklung zu präsentieren. Repräsentativ für die Signalqualität der Installationen werden in Tabelle 8.1 Signale der Installationen gezeigt.

Objekt	Skizze	Signal	Verstärkung
Betonträger <sup>[1]</sup>			30 dB
Brücke 1 <sup>[2]</sup>			30 dB
Brücke 2			19 dB

[1] Wolf *et al.* (2014b) [2] Wolf *et al.* (2014a)

Tabelle 8.1: Übersicht über Installationen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Für jedes Objekt ist die Installationsskizze und ein repräsentatives Ultraschallsignal zu sehen. An den ersten beiden Objekten erfolgte die Installation der Prüfköpfe nachträglich, beim letzten vor der Betonierung des Bauteils.

### 8.3 Konzept für eine Dauerüberwachung mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen

Basierend auf den Erfahrungen mit der Installation von Dauerüberwachungssystemen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen in realen Bauwerken und im Labor wird mit diesem Unterkapitel ein Konzept für die Vorgehensweise bei der Planung einer Dauerüberwachung vorgestellt.

Die Installation eines Überwachungssystems mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen ist komplex und hängt vom Untersuchungsziel und -objekt ab. Neben den Abständen zwischen den Prüfköpfen müssen die notwendigen Einbautiefen festgelegt werden. Mit größeren Prüfkopfabständen lassen sich zwar größere Volumina überwachen, die Lokalisierung von Schäden wird dadurch jedoch erschwert. Werden die Prüfköpfe in einem bestehenden Bauteil installiert, müssen Löcher gebohrt werden, ohne andere Einbauteile des Untersuchungsobjektes zu schädigen. Eine Anleitung zur Installation befindet sich im Kapitel 4.2.4 dieser Arbeit. Basierend auf den vorliegenden Untersuchungen wird empfohlen, mit den Ultraschallprüfköpfen auch Thermoelemente einzubetten. Diese lassen sich leicht durch den Hohlkörper der Prüfköpfe leiten und so in Prüfkopfnähe positionieren. Werden die Prüfköpfe oberflächennah installiert und ist die Oberfläche bereits durch Risse vor geschädigt, sollte eine zusätzliche Installation von Feuchtigkeitssensoren erwogen werden.

Je nach den Bedingungen vor Ort sollte die Messtechnik robust und unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen sein. Um Lücken in der Überwachung zu vermeiden, muss die Energieversorgung der Messtechnik sichergestellt sein. Die regelmäßige Übertragung der Daten an einen Server oder das Abrufen der Daten durch diesen muss realisierbar sein.

Ein Programm steuert die Ultraschall-, Temperatur- und, eventuell, Feuchtigkeitsmessungen sowie die Datenübertragung. Hier geht es insbesondere um die Festlegung der Anzahl der Mitteilungen, die Vorverstärkung der Signale, die Signallänge, die Abtastrate, den Messzeitpunkt bzw. das Messintervall sowie um Kriterien für eventuelle Wiederholungsmessungen. Die Auswertungsmethoden Kreuzkorrelation und CWI benötigen einen Codaanteil mit großer Abtastrate, damit sich auch kleinste Veränderungen detektieren lassen. In der Konferenzveröffentlichung Wolf *et al.* (2014a) wird ein Überwachungskonzept vorgestellt und die Umsetzung beschrieben.

Im nächsten Schritt werden Erfahrungen zur jeweiligen Installation gesammelt. Als erstes bestimmt man ein Referenzsignal und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SRV). Hierbei wird abgeschätzt, ob sich der Ersteinsatz bestimmen lässt. Lässt sich der Ersteinsatz nicht bestimmen, können die Auswertemethoden Geschwindigkeitsbestimmung über die Laufzeit und Amplitude des Ersteinsatzes nicht verwendet werden. Die Auswertemethoden Kreuzkorrelation, Coda-Wellen-Interferometrie und Gesamtenergie sind unempfindlicher gegenüber einem hohen Rauschanteil. Verschiedene Gründe für ein erhöhtes Rauschen sind im Folgenden zusammengefasst:

- Hohes Gefügerauschen: Gefügerauschen wird durch Betoneigenschaften hervorgerufen, die eine Schwächung der Signale verursachen (Gesteinskörnung, Luftporengröße und -gehalt).
- Betonschädigung: Ein erhöhtes Rauschen kann durch Schäden verursacht werden, die das gesamte Volumen betreffen, wie beispielsweise Schäden durch Frost-Tau-Wechsel oder Alkali-Kieselsäure-Reaktionen.
- Großer Prüfkopfabstand: Basierend auf Laborexperimenten und Erfahrungen lassen sich Empfehlungen zu den Abständen zwischen den Prüfköpfen geben, welche jedoch nicht für alle Betonbauteile gleichermaßen gelten. Ist der Prüfkopfabstand zu groß, verschwindet der

Ersteinsatz der Welle im Rauschen und ist nicht mehr detektierbar.

- Schlechte Ankopplung: Der nachträgliche Einbau der Ultraschallprüfköpfe in ein Betonelement birgt auch bei sorgfältiger Ausführung die Gefahr einer schlechten Ankopplung des Prüfkopfes an den umgebenden Beton. Eine schlechte Ankopplung verursacht eine starke Signalschwächung und verringert das SRV.
- Äußere Störgrößen: Äußere Störgrößen wie Verkehrsbelastung und Umwelteinflüsse können die Ultraschallsignale beeinflussen und führen zu unregelmäßigen Veränderungen des SRV.

Als nächstes stellt sich die Frage, wie sich die Umgebungstemperatur auf die Ultraschallsignale auswirkt. Hierzu könnte das Messintervall verkürzt werden, um einige Tag-Nacht-Zyklen zu Beginn der Dauerüberwachung zu evaluieren. Der Temperatureinfluss lässt sich durch die Anwendung einer Regressionsgeraden abschätzen [Salvermoser *et al.* (2015)]; auch die Erstellung eines Modells, um die Beziehung zwischen Signalparametern und Temperaturänderungen abzuschätzen, ist denkbar [Peeters & De Roeck (2001)]. Kann man den Temperatureinfluss abschätzen, lassen sich Veränderungen in den Signalparametern, hervorgerufen durch Schäden, leichter von denen unterscheiden, die durch Temperaturschwankungen hervorgerufen werden. Die Experimente zum Einfluss von Makrorissen und Mikrorissen haben gezeigt, dass bei Temperaturen über Null der Einfluss einer plötzlich oder einer langsam fortschreitenden Schädigung größer ist als der Einfluss einer Temperaturänderung. Basierend auf dem derzeitigen Kenntnisstand sollten Signalvergleiche zur Detektion einer auftretenden Schädigung deshalb bei positiven Temperaturen erfolgen.

Kennt man die Einflüsse der verschiedenen äußeren Störgrößen (Verkehr, Temperatur, eventuell Feuchte) auf die einzelnen Signalparameter, lässt sich für jeden Parameter ein Grenzwert festlegen. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Signalparameter sind Geschwindigkeit, Spektrum, Schalldruckamplituden, Geschwindigkeitsänderung und Kreuzkorrelation. Der gewählte Grenzwert für die Kreuzkorrelation und Schalldruckamplitude ist die Abnahme der Parameter von 20 % gegenüber dem Referenzsignal. Bei positiven Temperaturen in Prüfkopfnähe wird der Abfall eines oder mehrerer Parameter unter diesen Grenzwert als Indiz für eine auftretende Schädigung verwendet.

Die automatische Auswertung der Ultraschallsignale erfolgt über die Bestimmung des Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen dem aktuellen Ultraschallsignal und dem Referenzsignal. Man verwendet den Kreuzkorrelationskoeffizienten, da sich dieser mit wenig Rechenleistung bestimmen lässt und empfindlich gegenüber Änderungen der Signalparameter Frequenz, Geschwindigkeit und Schalldruckamplitude ist. Es wird empfohlen, bei einem Abfall unter den Grenzwert zusätzliche Wiederholungsmessungen durchzuführen. Damit wird sichergestellt, dass diese Grenzwertunterschreitung nicht durch einen Abfall des SRV durch beispielsweise Verkehr hervorgerufen wird. Eine grafische Übersicht über die Planung einer Dauerüberwachung zeigt die Abbildung 8.6.

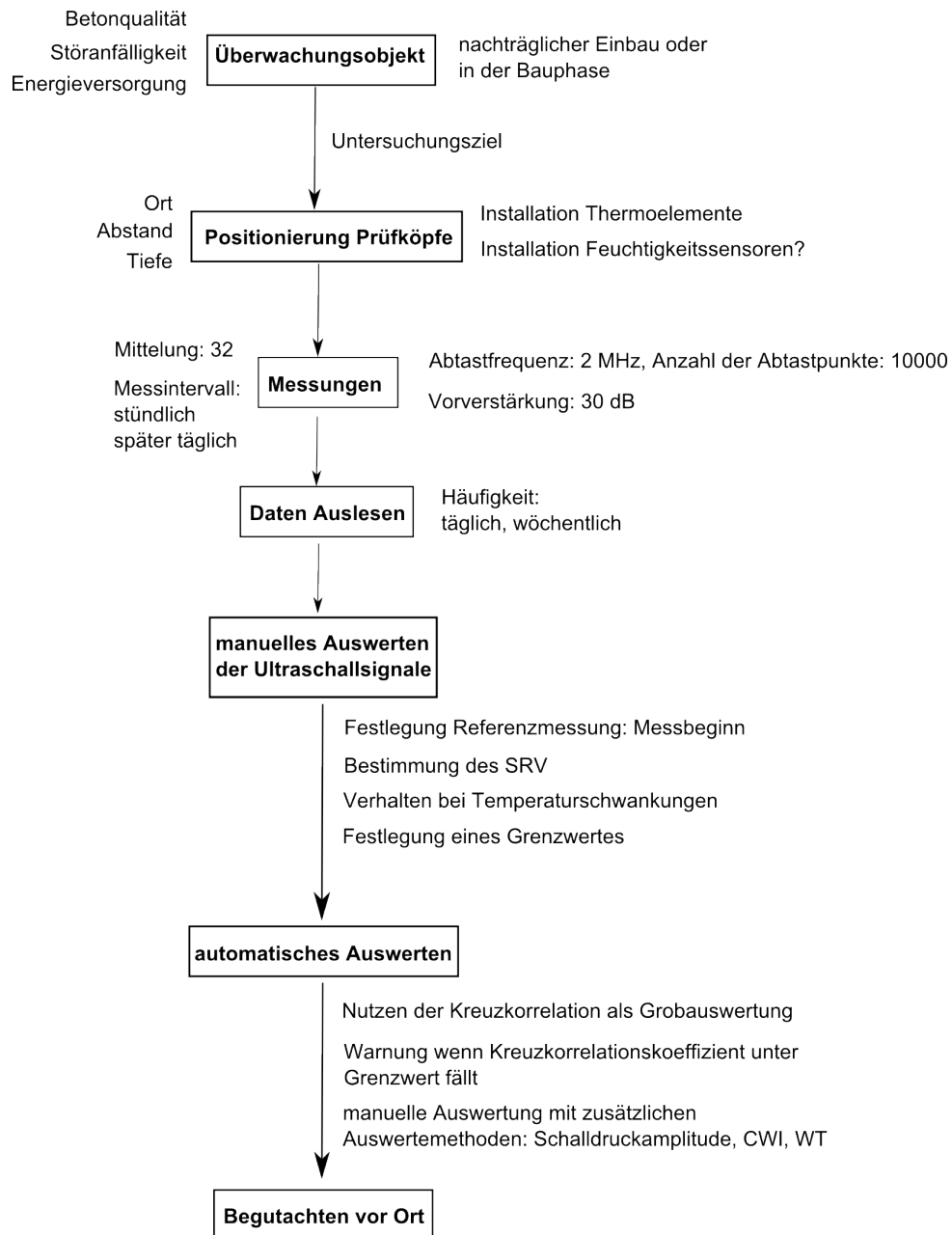


Abbildung 8.6: Ablaufdiagramm zur Planung einer Dauerüberwachung von Betonelementen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Die angegebenen Werte sind Beispiele bestehender Installationen.



## Kapitel 9

# Zusammenfassung, Bedeutung und Ausblick

### Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit konnte die Hypothese bewiesen werden, mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen das Innere eines Betonbauteils dauerhaft überwachen zu können und dadurch sowohl plötzlich auftretende Schäden wie auch stetig entstehende zeitnah zu detektieren.

Die hier genutzten Ultraschallprüfköpfe eignen sich auf Grund ihrer Robustheit und Form gut für die Montage in Betonbauteilen, sowohl vor als auch nach deren Fertigstellung. Aufgrund ihrer Abstrahlcharakteristik lassen sie sich in verschiedenen Tiefenebenen einbauen. Die Einbautiefe ist lediglich bei einer nachträglichen Installation durch die mögliche Bohrlochtiefe begrenzt. Das Spektrum, die Impulsspannung und die Ankopplung der Prüfköpfe im Bauteil ermöglichen Abstände von mehreren Metern. Durch die Einbettung ist die Ankopplung zum umgebenden Material, auch beim nachträglichen Einbau, gut und wird für den vorliegenden Untersuchungszweck als konstant angenommen.

Die konstant gute Ankopplung führt zu einem dauerhaft hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Dadurch lassen sich empfindliche Signalauswertemethoden verwenden, die bei ständig wechselnden Ankopplungsbedingungen nicht genutzt werden könnten. Solche Auswertemethoden sind: die Schalldruckamplitudenauswertung, die Coda-Wellen-Interferometrie (CWI) Methode und die Kreuzkorrelation. Sie ergänzen die gängigen Methoden der Laufzeitbestimmung und der Bewertung des Spektrums. Auf Grund der guten Ankopplung der Prüfköpfe und der Verwendung dieser Auswertemethoden erweisen sich die eingebetteten Ultraschallprüfköpfe als sehr empfindlich gegenüber auftretenden Veränderungen im Beton in Form von Mikro- und Makrorissen. Diese Veränderungen werden detektiert, bevor sie sich derart ausbreiten, dass das Betonbauteil als geschädigt bewertet wird. Auch Veränderungen in den Umgebungsbedingungen werden mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen registriert.

Die Rissentstehung äußert sich zuerst in einem Abfall des Kreuzkorrelationskoeffizienten, anschließend in einem Abfall der ersten Schalldruckamplitude. Im Falle der Makrorissentstehung

fällt die Gesamtenergie, beziehungsweise im Falle der Mikrorissentstehung der Scheitelwert des Ultraschallsignals. Die Rissentstehung äußert sich außerdem in der mit der CWI-Methode bestimmten Geschwindigkeitsänderung. Durchkreuzt der Makroriss den Laufweg der direkten Welle, fällt letztlich die Geschwindigkeit, bestimmt über die Laufzeit, ab.

Gezeigt werden konnte auch, dass sich die verschiedenen untersuchten Signalparameter als Funktion der Temperatur und Feuchtigkeit betrachten lassen. Mit fallenden Betontemperaturen steigen die Geschwindigkeit und die Amplitude des Signals, während die Frequenz nahezu gleich bleibt. Besonders stark verändert sich das Ultraschallsignal im Übergang zwischen den Frost-Tau-Wechseln. Hier kommt es zur Ausbildung einer Hysterese. Wird das zu überwachende Betonelement über längere Zeit veränderten Feuchtebedingungen ausgesetzt oder ist der Beton bereits zur Oberfläche hin vorgeschädigt, beeinflusst auch diese Feuchteänderung das Ultraschallsignal. Nimmt das Volumen zwischen den eingebetteten Prüfköpfen an Feuchte zu, steigt die P-Wellengeschwindigkeit, die Schalldruckamplituden werden größer und die Spektraldichte hat ihr Maximum bei höheren Frequenzen, als im ausgetrockneten Zustand.

Die Tabelle 9.1 fasst die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Umgebung und zum Einfluss von Mikro- und Makrorissen auf die betrachteten Parameter der Ultraschallsignale zusammen. Die angegebenen Werte entsprechen speziell den verwendeten Betonen und Probekörpergeometrien sowie dem jeweiligen Messaufbau (Prüfkopfabstand und Position, Vorverstärkung der Signale, Anregungsimpuls, Messapparatur) und lassen sich daher nicht auf beliebige Installationen übertragen.

Da der Anstieg der Temperatur, die Verringerung der Betonfeuchte und die Entstehung von

Auswertemethoden	Umgebung		Schädigung		
	Temperatur 17°C auf 7°C	Feuchte +3 % rF	Mikroriss $R_{u,w} = 0,75$	Makroriss	
				Phase 2	Phase 3
$v$	+1 %	+3 % bis +4 %	-15 %	—	-1 %
Spektrum	—	+100 % bis 200 %	—	—	—
Amplitude					
1. Maximum	+3 % bis +4 %	> +4000 %	-80 %	-20 %	-33 %
Scheitelwert	—	> +2600 %	-80 %	—	-23 %
Gesamtenergie	+7 % bis +10 %	> +1100 %	—	-10 %	-20 %
Zeitverschiebung	—	—	—	—	—
Kreuzkorrelationskoeffizient	-22 % bis -47 %	-80 % bis -120 %	-80 %	-34 %	-53 %
$\Delta v$ (CWI)	+1 %	+5 %	—	-0,45 %	-0,51 %

Tabelle 9.1: Zusammenfassung der Veränderung der Ultraschallsignalparameter durch die Einflussfaktoren Umgebung und Schädigung. Die Werte können nur bezogen auf die jeweiligen Betone, Probekörpergeometrien und Messaufbauten betrachtet werden.

Schäden auf die gleiche Weise verschiedene Signalparameter beeinflussen, lassen sich diese Einflussfaktoren mit den genutzten Auswertemethoden nicht voneinander unterscheiden. Insbesondere die Detektion sich kontinuierlich entwickelnder Materialveränderungen, hervorgerufen bei



spielsweise durch Frost-Tau-Wechsel, Alkali-Kieselsäure-Reaktionen oder zyklische Belastungen, ist deshalb ohne zusätzliche Informationen über die Umgebungsbedingungen mit dem hier vorgestellten Konzept der Dauerüberwachung nicht möglich. Plötzliche Veränderungen, hervorgerufen beispielsweise durch eine kurze starke Belastung des Bauteils, lassen sich dagegen sicherer detektieren, da die Umgebungsbedingungen des unbeschädigten und des beschädigten Zustandes als unverändert betrachtet werden können. Um dennoch Aussagen auch über entstehende Schäden in einem Bauteil treffen zu können, muss mindestens die Temperatur in der Nähe der eingebetteten Prüfköpfe dokumentiert werden, wenn nötig auch die Feuchtigkeit.

Auf der Basis der durchgeführten Experimente lassen sich einige Aussagen über die genutzten Auswertemethoden treffen. Die Methode, über den Kreuzkorrelationskoeffizienten die Ähnlichkeit zwischen zwei Signalen zu quantifizieren, ist unkompliziert und effektiv und eignet sich daher gut für die erste Betrachtung vieler Daten einer lang andauernden Messung. Eine Möglichkeit, die Empfindlichkeit der Kreuzkorrelationsmethode zu erhöhen, ist die Unterteilung des Ultraschallsignals in unterschiedliche Zeitfenster. Dadurch lassen sich Veränderungen im späten Codabereich des Signals mit Veränderungen in früheren Bereichen vergleichen. Ändert sich das Material nicht, sind die Kreuzkorrelationskoeffizienten für alle Zeitfenster gleich. Sind die Veränderungen zwischen dem Referenzzustand und dem zu bewertenden Signal zu groß, was sich in einem geringen Kreuzkorrelationskoeffizienten widerspiegelt, lässt sich die CWI-Methode nicht mehr fehlerfrei anwenden. Das zeitnächste Signal als Referenzsignal zu nutzen, umgeht dieses Problem. Die Auswertung der maximalen Amplitude spiegelt ebenfalls, wie die Kreuzkorrelation, geringfügige Veränderungen im Signal wider.

Bei dieser großen Empfindlichkeit einiger Auswertemethoden ist zu beachten, dass nicht jede Abweichung vom Referenzsignal durch Materialveränderungen verursacht wird. Abweichungen können auch Änderungen in den Messbedingungen reflektieren. Daher wird empfohlen, zur Verifizierung der Ergebnisse auch weniger empfindliche Auswertemethoden hinzuzuziehen, wie etwa die Wavelet Transformation. Die Wavelet Transformation ist einerseits zu aufwendig, um mit ihr alle Signale einer Dauerüberwachung auszuwerten, andererseits lassen sich Auffälligkeiten in den Ergebnissen anderer Auswertemethoden mit der Wavelet Transformation explizit untersuchen. Die Auswertung der Verschiebung des Amplitudenmaximums entlang der Zeitachse erweist sich als unwirksam für die frühzeitige Detektion von Schäden. Ebenso weist die Frequenz, bei der das Spektrum maximal wird, erst bei fortgeschrittener Materialänderung Auffälligkeiten auf.

Aufgrund der Untersuchungen konnten Konzepte für Dauerüberwachungen mit eingebetteten Prüfköpfen im Labor und an realen Bauteilen entwickelt werden. Im Konzept inbegriffen sind die Abstände zwischen den Prüfköpfen, die Verstärkung der empfangenen Signale, das Messintervall, die Anforderungen an die Messstation und vor allem die zusätzliche Aufnahme der Betontemperatur und eventuell -feuchte in Prüfkopfnähe. Eine Dauerüberwachung im Labor spiegelt die Experimente zur Evaluierung der Empfindlichkeit der eingebetteten Prüfköpfe wider. Insbesondere werden Veränderungen in Umgebungstemperatur und Messbedingungen und daraus folgend Änderungen verschiedener Signalparameter reflektiert. Im positiven Tempera-

turbereich kann der Einfluss von Materialveränderungen im Beton größer sein als der Einfluss wechselnder Umgebungstemperaturen. Kennt man die Veränderungen in den Signalparametern, die durch Schwankungen in den Umgebungsbedingungen bedingt sind, könnten sich eindeutigere Rückschlüsse auf Veränderungen durch Schäden ziehen lassen. Deshalb wird empfohlen, für die Dauerüberwachung eines Betonbauteils, zusätzlich zu den Ultraschallprüfköpfen, Thermoelemente zu installieren, bei beschädigter Bauteiloberfläche und oberflächennaher Prüfkopfinstallation auch Feuchtigkeitssensoren. Eine Multi-Parameter Messstation sollte verwendet werden, die neben der kontinuierlichen Aufnahme von Ultraschallsignalen auch die Aufnahme der Temperatur und Feuchte steuern kann.

Dass die Einbettung der Prüfköpfe in schon bestehende und neu errichtete Bauteile umsetzbar ist, konnte an mehreren Installationen gezeigt werden. Auch die erfolgreiche Aufnahme und Übertragung von Ultraschall- und Temperaturdaten sowie deren Auswertung konnte realisiert werden. Zum derzeitigen Zeitpunkt fehlen jedoch lückenlose Daten einer Installation, in der Schädigungen auftreten, um das Potential der Schadensdetektion auch an realen Bauteilen überprüfen zu können.

## **Bedeutung**

Durch die Einbettung der Prüfköpfe lassen sich Gebiete im Inneren von Bauteilen durchschallen, die von außen nicht mehr erreichbar sind. Dadurch kann der Zustand sowohl unter erdiger Konstruktionen wie Fundamente, als auch massiver, wie Staudämme, überwacht werden. Die Überwachung erfolgt durch regelmäßige Messungen, in beliebig dichten Intervallen über einen langen Zeitraum. Die Steuerung der Messungen und das Auslesen und Auswerten der Daten erfolgt aus der Ferne. Plötzliche Veränderungen am Zustand des Bauteils, hervorgerufen beispielsweise durch Erdbeben oder Fluten, können sich so zeitnah registrieren lassen, um weitere Maßnahmen einzuleiten. Es zeigt sich, dass der Schaden auch außerhalb der Ebenen der eingebetteten Prüfköpfe liegen und detektiert werden kann. Neben den plötzlichen Veränderungen lassen sich durch regelmäßige Messungen auch über Jahre fortschreitende Schäden erfassen. Mikrorisse, hervorgerufen durch zyklische Belastungen wie Lastwechsel, thermische Veränderungen wie Frost-Tau-Wechsel oder chemische Reaktionen wie die Alkali-Kieselsäure-Reaktion, können erfasst werden, bevor diese kritisch sind.

Die Installation eines Netzwerks aus eingebetteten Ultraschallprüfköpfen könnte die normierten regelmäßigen Kontrollen eines Ingenieurbauteils ergänzen. Auch im Bereich des Structural Health Monitoring (SHM) könnten die üblichen Verfahren durch diese Anwendung des Ultraschallverfahrens erweitert werden.

## **Ausblick**

In der Zukunft wäre eine lückenlose Datenaufnahme einer Installation an einem realen Ingenieurbauwerke wünschenswert. Für das Objekt sind der Rauschpegel und der Temperaturein-

fluss abzuschätzen. Anschließend sollte eine Software entwickelt werden, die die Kreuzkorrelation zwischen den Signalen je Sender- und Empfängerkombination nach jeder Messung auswertet und gegebenenfalls Wiederholungsmessungen einleitet. Nach der Abschätzung des Temperatureinflusses wird ein Grenzwert festgelegt, bei dessen Unterschreitung der Anwender automatisch gewarnt wird. Eine individuelle Untersuchung der Ultraschallsignale mit den anderen, hier erfolgreich genutzten, Auswertemethoden sollte anschließend erfolgen.

In der strukturellen Zustandsüberwachung von Ingenieurbauten basierend, auf den Vibrationen einer Struktur, wird die Möglichkeit erforscht, mit Hilfe der künstlichen selbst lernenden Netzwerktechnik (eng.: Artificial Neural Network Technik), optimierten Modellen der zu überwachenden Struktur und bekannter Auswertemethoden die Informationen eines SHM Systems automatisch auszuwerten und zu interpretieren, um eine sofortige Schadensdetektion zu realisieren [Dong & Song (2010), Peeters & De Roeck (2001), Mustapha *et al.* (2015), Nguyen *et al.* (2015)]. Eine Integration der Parameter der Ultraschallsignale in solch ein Netz an Daten würde die automatische Schadensinterpretation verbessern, da auch Veränderungen, die mit der Vibrationsmethode nicht detektiert werden, in den Algorithmus und die Modelle mit einfließen.

Durch die Entwicklung von Modellen zur Ausbreitung der Ultraschallwellen zwischen den eingebetteten Prüfköpfen in verschiedensten Strukturen ließe sich die Sensoranordnung für das jeweilige Untersuchungsziel optimieren. Insbesondere geht es um die Bestimmung der Anzahl der Prüfköpfe, den Abständen zwischen ihnen und ihrer Position innerhalb der Betonstruktur.

Die Lokalisierung der Schäden beschränkt sich bei der aktiven Nutzung der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe lediglich auf den direkten Weg zwischen den jeweiligen Sender- und Empfängerkombinationen. Die Lokalisierung wird demnach desto ungenauer, je größer die Abstände zwischen den Prüfköpfen sind. Die Experimente zeigen zu dem, dass auch Änderungen außerhalb des direkten Schallweges detektiert werden. Über die Größe des vom Ultraschall durchlaufenen Volumens kann derzeit keine Aussage getroffen werden. In der Dissertation von Chinaemerem (2014) und auch in Ansätzen in der Veröffentlichung Wolf *et al.* (2014b) wird versucht, das durch die CWI-Methode abgedeckte Volumen mit Hilfe von Modellrechnungen abzuschätzen. In Niederleithinger *et al.* (2015b) und Wolf *et al.* (2015b) werden die hier vorgestellten eingebetteten Ultraschallprüfköpfe erfolgreich auf die Anwendung als passive Schallemissionsprüfköpfe getestet. Durch die Optimierung der eingebetteten Prüfköpfe für die Schallemission und einer Anpassung des in dieser Arbeit vorgestellten Konzeptes einer Dauerüberwachung würden sich die entstehenden Schäden lokalisieren lassen. Die Lokalisierung der Quelle der akustischen Signale würde wiederum Hinweise auf die Ursache der Schädigung liefern. Zudem lassen sich durch die Lokalisierung Reparaturmaßnahmen effektiver und damit wirtschaftlicher durchführen.



# Abkürzungsverzeichnis

der in dieser Arbeit am häufigsten genutzten Abkürzungen.

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
CWI	Coda-Wellen-Interferometrie
DIC	Digital Image Correlation
FT	Fouriertransformation
FTW	Frost-Tau-Wechsel
GBC	Korngrenzenrisse
IGC	intragranulare Risse
NDT	Non-Destructive-Testing
PK	Probekörper
SHM	Structural Health Monitoring
SRV	Signal-zu-Rausch-Verhältnis
TGC	transgranulare Risse
US	Ultraschall
VV	Vorverstärkung
WT	Wavelet Transformation
ZfP	Zerstörungsfreies Prüfen



# Größen und Einheiten

$a$	Abstand	$m$
$A$	Schalldruckamplitude des Zeitsignals	$mV$
$A_0$	Schalldruckamplitude an der Quelle	$mV$
$A_e$	Schalldruckamplitude am Ende	$mV$
$\alpha_T$	Wärmedehnungszahl	$10^{-6}(1/K)$
$b$	Translationsfaktor	
$\beta$	Winkel	$rad$
$D$	Durchmesser eines Streuers	$m$
$d$	Plattendicke	$m$
$E$	Elastizitätsmodul	$kN/mm^2$
$\epsilon$	Dehnung	$m$
$\epsilon_T$	Temperaturdehnung	$10^{-6}(1/K)$
$F(\omega)$	Fouriertransformierte	
$f$	Frequenz	$1/s$
$f_0$	Eigenfrequenz	$1/s$
$f_{AB}$	Abtastfrequenz	$1/s$
$f_M$	Mittenfrequenz	$1/s$
$f(t)$	Zeitfunktion	
$f_{CK}$	Druckfestigkeit	$N/mm^2$
$f_{CT}$	Biegezugfestigkeit	$N/mm^2$
$G$	Schubmodul	$N/mm^2$
$K$	Kompressionsmodul	$kN/mm^2$
$k$	Kreuzkorrelationskoeffizient	
$\lambda$	Wellenlänge	$m$
$L$	Laufweg	$m$
$\nu$	Poisson-Zahl	
$N$	Anzahl der Abtastpunkte	
$n$	Anzahl der Messungen	
$\rho$	Dichte	$10^3(kg/m^3)$

$r$	Laufweg der Welle	$m$
$r_0$	Beginn des Laufwegs der Welle	$m$
$r_e$	Ende des Laufwegs der Welle	$m$
$R$	zeitversetzter Korrelationskoeffizient	
$R_{u,w}$	relatives dynamisches E-Modul	
$\sigma$	Spannung	$N/m^2$
$s$	Skalierungsfaktor	
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$
$T_C$	Curie-Temperatur	$^{\circ}C$
$t$	Zeit	$s$
$t_{cs}$	Laufzeit nach kapillarem Saugen	$s$
$t_w$	Laufzeit nach FTW	$s$
$t_S$	Zeitverschiebung	
$\tau_w$	Änderung der Ultraschalllaufzeit	
$U$	Spannung	$V$
$U_R$	Rauschspannung	$V$
$u$	Wellenfeld	
$v$	Ultraschallgeschwindigkeit	$m/s$
$v_P$	P-Wellengeschwindigkeit	$m/s$
$v_S$	S-Wellengeschwindigkeit	$m/s$
$w$	Anzahl der FTW	
$\omega$	Kreisfrequenz	$rad$
$\xi$	Auslenkung der Teilchen	$m$
$\Psi$	Mother Wavelet	
$\Psi_{s,b}$	Wavelet	
$Z$	Schallimpedanz	$10^6 kg/m^2s$



# Literaturverzeichnis

- Andrade, C., Sarría, J., & Alonso, C. (1999). Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. *Cement and Concrete Research*, 29, 1249 – 1259. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884699001234>.
- Antonaci, P., Bruno, C. L. E., Scalerandi, M., & Tondolo, F. (2013). Effects of corrosion on linear and nonlinear elastic properties of reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 51, 96 – 103.
- Anugonda, P., Wiehn, J. S., & Turner, J. A. (2001). Diffusion of ultrasound in concrete. *Ultrasonics*, 39, 429 – 435.
- Atkinson, B. K. (1987). *Fracture Mechanics of Rock*. ISBN: 978-0-12-066266-1: Academic Press.
- Auberg, R. (1999). *Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem CDF- und dem CIF-Test*. ISBN-10: 3826547160: Shaker Verlag.
- BAW (2012). Frostprüfung von Beton (MFB).
- Behina, A., Chai, H. K., & Shiotani, T. (2014). Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Construction and building materials*, 282 – 302.
- Bronstein, K. A., I. N.; Semendjajew (1987). *Taschenbuch der Mathematik*. ISBN 3-322-00259-4: Verlag Nauka, Moskau.
- Cardini, A. J. & DeWolf, J. T. (2009). Long-term Structural Health Monitoring of a Multi-girder Steel Composite Bridge Using Strain Data. *Structural Health Monitoring*, 8(1), 47 – 58.
- CEN/TR 15177 (2006). CEN/TR 15177: Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton - Innere Gefügestörung.
- Chan, T. H. T. & Thambiratnam, D. P. (Eds.) (2011). *Structural Health Monitoring in Australia*. ISBN: 978-1-61728-860-9: Nova Science.
- Chinaemerem, K. (2014). *Time - lapse monitoring of localized changes within heterogeneous media with scattered waves*. Ph.D. thesis, Colorado School of Mines.

- Crawford, G. I. (1997). Guide to Nondestructive Testing of Concrete. Tech. Rep. FHWA-SA-97-105, Federal Highway Administration, Washington, USA. URL <http://ntl.bts.gov/lib/20000/20300/20340/PB98122864.pdf>.
- CT-13, A. (2013). ACI Concrete Terminology, ACI CT-13.
- Daubechies, I. (1990). The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, 36(5), 961 – 1005.
- Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. ISBN 0898712742: Rutgers University and AT&T Bell Laboratories.
- Demtröder (2006). *Experimentalphysik 1*. ISBN 978-3-540-79295-6: Springer, 4 ed.
- DIN 1048-5 (1991). DIN 1048-5: Teil 5: Prüfverfahren für Beton: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper.
- DIN 1076 (1999). DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Strassen und Wegen -Überwachung und Prüfung.
- DIN EN 12390-3 (2009). DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12390-5 (2009). DIN EN 12390-5: Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12390-9 (2009). DIN EN 12390-9: Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung.
- DIN EN 12504-4 (2004). DIN EN 12504-4: Prüfung von Beton in Bauwerken–Teil 4: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit; Deutsche Fassung EN 12504-4: 2004.
- DIN EN 1992-1-1 (1992). Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- DIN EN 206-1 (2001). DIN EN 206-1: Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- Dong, Y. & Song, R. (2010). *Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection - Synthesis of Knowledge and Technology*. Ph.D. thesis, Alaska University Transportation Center. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.304.5022&rep=rep1&type=pdf>.
- Enckell, M. (2011). *Lessons Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology*. Ph.D. thesis, KTH Architecture and the Built Environment. URL <urn:nbn:se:kth:diva-48131>.

- Engelmann, L. (Ed.) (1994). *Formeln und Tabellen*. ISBN 3-89517-252-9: Paetec.
- Fagerlund, G. (1994). Influence of environmental factors on the frost resistance of concrete : a contribution to the BRITE/EURAM project BREU-CT92-0591 „The Residual Service Life of Concrete Structures“. Report TVBM 3059, Div of Building Materials LTH, Lund university. URL <http://lup.lub.lu.se/record/1291975>.
- Fertig, J. (2005). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten - Band 3: Geophysik*. ISBN 978-3-540-26606-8: Springer- Verlag Berlin Heidelberg.
- Foufoula-Georgiou, E. & Kumar, P. (Eds.) (1994). *Wavelets in Geophysics*. Academic Press.
- Gastineau, A., Johnson, T., & Schultz, A. (2009). Bridge Health Monitoring and Inspections - A Survey of Methods. MnDOT 2009-29, Minnesota Department of Transportation. URL <http://purl.umn.edu/150962>.
- Große, C. U. (1996). Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall. URL <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1064/>.
- Große, C. U. & Schumacher, T. (2013). Anwendung der Schallemissionsanalyse an Betonbauwerken. *Bautechnik*, 90(11), 721 – 731.
- Hedenblad, G. (1993). Moisture permeability of some porous materials. *Report TVBM (Intern 7000-rapport)*. URL <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1653173&fileId=1653174>.
- Hild, F. & Roux, S. (2006). Digital Image Correlation: from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties - a Review. *Strain*, 42(2), 69 – 80.
- Huang, M., Jiang, L., Liaw, P. K., Brooks, C. R., Seelev, R., & Klarstrom, D. L. (1998). Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. *Member Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. URL <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/9811/huang/huang-9811.html?r=1&l=ri&fst=0>.
- Jaeger, J. C. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*, vol. 4. ISBN: 978-0-632-05759-7: Blackwell Publishing.
- Kaiser, G. (1994). *A Friendly Guide to Wavelets*. ISBN-10: 0817681108: Birkhäuser.
- Kee, S.-H. & Zhu, J. (2013). Using piezoelectric sensors for ultrasonic pulse velocity measurements in concrete. *Smart Materials and Structures*, 22(11). URL <http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=11/a=115016>.
- Khan, I., Francois, R., & Castel, A. (2014). Experimental and analytical study of corroded shear-critical reinforced concrete beams. *Materials and Structures*, 47(9), 1467 – 1481.

- Kim, H. & Melhem, H. (2004). Damage detection of structures by wavelet analysis. *Engineering Structures*, 26(3), 347 – 362.
- Kohlrausch, F. (1960). *Praktische Physik Band 1: Allgemeines, Mechanik, Akustik, Wärme, Optik*. Teubner, 21 ed.
- Komlos, K., Popovics, S., Nürnbergerová, T., Babál, B., & Popovics, J. (1996). Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. *Cement and Concrete Composites*, 18, 357 – 364. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946596000261>.
- Krause, M., Millmann, B., Mielentz, F., Streicher, D., Redmer, B., Mayer, K., Langenberg, K.-J., & Schickert, M. (2008). Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial Grouting Faults and Its Verification. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 27(1 - 3), 66 – 82.
- Krautkrämer, J. & Krautkrämer, H. (1986). *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. ISBN-10: 3540157549: Springer-Verlag.
- Lencis, U., Udriș, A., & Korjakins, A. (2013). Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature. *Construction Science*, 14, 71 – 78.
- Lin, Q. & Labuz, J. F. (2013). Fracture of sandstone characterized by digital image correlation. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 60, 235 – 245.
- Martin, C. & Eiblmaier, M. (2003). *Lexikon der Geowissenschaften*. ISBN-10: 3827404207: Spektrum Verlag.
- Meyers, S. D., Kelly, B. G., & O'Brien, J. J. (1993). An Introduction to Wavelet Analysis in Oceanography and Meteorology: With Application to the Dispersion of Yanai Waves. *Monthly Weather Review*, 121(10), 2858 – 2866.
- Müller, G. (2005). *Theorie elastischer Wellen*. Universität Kiel.
- Mustapha, S., Hu, Y., Nguyen, K., Alamdari, M. M., & Dackermann, U. (2015). Pattern recognition based on time series analysis using vibration data for structural health monitoring in civil structures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 106 – 115.
- Mutlib, N. K., Baharom, S. B., El-Shafie, A., & Nuawi, M. Z. (2016). Ultrasonic health monitoring in structural engineering: buildings and bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 23, 409 – 422.
- Nair, A. & Cai, C. S. (2010). Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies. *Engineering Structures*, 32, 1704 – 1714.

- Nguyen, V., Dackermann, U., Alamdari, M., & Mustapha, S. (2015). Damage Identification of a Concrete Arch Beam Based on Frequency Response Functions and Artificial Neural Networks. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 75 – 84.
- Niederleithinger, E., Krompholz, R., Müller, S., Lautenschläger, R., & Kittler, J. (2015a). 36 Jahre Talsperre Eibenstock - 36 Jahre Überwachung des Betons durch Ultraschall. In 38. *Dresdner Wasserkolloquium 2015*.
- Niederleithinger, E., Mielentz, J. W. W., Wiggenhauser, H., & Pirskawetz, S. (2015b). Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passiv Concrete Monitoring. *Sensors*, 15(5), 9756 – 9772.
- Niederleithinger, E. & Wunderlich, C. (2013). Influence of small temperature variations on the ultrasonic velocity in concrete. In *REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION: VOLUME 32*. American Institute of Physics, 390 – 397. URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.4789074>.
- Nilsson, L.-O. (2002). Long-term moisture transport in high performance concrete. *Materials and Structures*, 35(10), 641 – 649. URL <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02480357>.
- Ohdaira, E. & Masuzawa, N. (2000). Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete - the possibility of NDE. *Ultrasonics*, 38(1 - 8), 546 – 552. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X99001584>.
- Payan, C., Quiviger, A., Garnier, V., & Chaix, J.-F. (2013). Applying diffuse ultrasound under dynamic loading to improve closed crack characterization in concrete. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(2).
- Peeters, B. & De Roeck, G. (2001). One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 149 – 171.
- Polikar, R. (1996). *The Engineer's Ultimate Guide to Wavelet Analysis - The Wavelet Tutorial*. <http://web.iitd.ac.in/sumeet/WaveletTutorial.pdf>.
- Popovics, S. (2005). Effects of uneven moisture distribution on the strength of and wave velocity in concrete. *Ultrasonics*, 43(6), 429 – 434. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X04002689>.
- Popovics, S., Komlos, K., & Popovics, J. (1995). Comparison of DIN/ISO 8047 (Entwurf) to several standards on determination of ultrasonic pulse velocity in concrete. In *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin*. URL <http://www.ndt.net/article/civil497/iso8047/iso8047.htm>.

- Quiviger, A., Payan, P., Chaix, J.-F., Garnier, V., & Salin, J. (2012). Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. *NDT & E International*, 45(1), 128 – 132.
- Raju, N. K. (1970). Small Concrete Specimens Under Repeated Compressive Loads by Pulse Velocity Technique. *Journal of Materials*, 5(2), 262 – 272. URL <http://trid.trb.org/view.aspx?id=102236>.
- Ramamoorthy, S. K., Kane, Y., & Turner, J. A. (2004). Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete. *Journal of Acoustic Society of America*, 115(2), 523 – 529.
- Reinhardt, H.-W. (2007). *Betonkalender 2007*, K. Bergmeister; J.-D. Wörner, chap. 4. 355 – 478.
- Saint-Pierre, F., Rivard, P., & Ballivy, G. (2007). Measurement of alkali-silica reaction progression by ultrasonic waves attenuation. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 948 – 956. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000671>.
- Salvermoser, J., C., H., & Ster, S. (2015). Structural monitoring of a highway bridge using passiv noise recordings from street traffic. *Journal of the Acoustical Society of America*, 138(6), 3864 – 3872. URL <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/138/6/10.1121/1.4937765>.
- Sayers, C. (1988). Stress-induced ultrasonic wave velocity anisotropy in fractured rock. *Ultrasonics*, 26(6), 311 – 317. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X88900285>.
- Schneider, K.-J. (Ed.) (2008). *Bautabellen für Ingenieure*. ISBN-10: 3804152368: Werner, 18 ed.
- Schubert, P. (1999). *Mauerwerkskalender 1999*, Ernst & Sohn Berlin, chap. Eigenschaften von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauermörtel. 89 – 106.
- Sens-Schönfelder, C. & Wegler, U. (2006). Passiv image interferometry and seasonal variations of seismic velocity at Merapi Volcano, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 33(21).
- Setzer, M. J. (2001). CIF-Test - Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw Test Reference method and alternative methods A and B, RILEM Recommendation TC 176-IDC: Test methods of frost resistance of concrete. *Materials and Structures*, 34(9), 515 – 525.
- Setzer, M. J. (2002). Frostschaaden Grundlagen und Prüfung. *Beton- und Stahlbetonbau*, 97(7), 350 – 359.
- Setzer, M. J., Heine, P., Kasperek, S., Palecki, S., Auberg, R., Feldrappe, V., & Siebel, E. (2004). Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test - Capillary suction, internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B, RILEM

- Recommendation TC 176-IDC: Internal damage of concrete due to frost action. *Materials and Structures*, 37(10), 743 – 753.
- Setzer, M. L., Fagerlund, G., & Janssen, D. J. (1996). CDF Test - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF), RILEM Recommendation TC 117-FDC: Freeze-thaw and deicing resistance of concrete. *Materials and Structures*, 29(9), 523 – 528.
- Shokouhi, P., Wolf, J., & Wiggenhauser, H. (2014). Detection of Delamination in Concrete Bridge Decks by Joint Amplitude and Phase Analysis of Ultrasonic Array Measurements. *Journal of Bridge Engineering*, 19(3). URL [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000513](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000513).
- Shokouhi, P., Zoëga, A., Wiggenhauser, H., & Fischer, G. (2012). Surface Wave Velocity-Stress Relationship in Uniaxially Loaded Concrete. *ACI Materials Journal*, 141 – 148. URL [http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:111744/datastreams/file\\_8064151/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:111744/datastreams/file_8064151/content).
- Sinvhal, A. S. H. (1992). *Seismic Modelling and Pattern Recognition in Oil Exploration*. ISBN 978-94-011-2570-3: Kluwer Academic Publishers.
- Snieder, R. (2002). Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media. *PHYSICAL REVIEW E*, 66, 046615–1 – 8.
- Snieder, R. (2006). The Theory of Coda Wave Interferometry. *Pure and Applied Geophysics*, 163(2 - 3), 455 – 473.
- Snieder, R., Grêt, A., Douma, H., & Scales, J. (2002). Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity. *Science*, 295(5563), 2253 – 2255.
- Song, G., Gu, H., Mo, Y. L., Hsu, T. T. C., & Dhonde, H. (2007). Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers. *Smart Materials and Structures*, 16(4), 959 – 968. URL <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=4/a=003>.
- Stähler, S. C., Sens-Schönfelder, C., & Niederleithinger, E. (2011). Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(4), 1945 – 1952. URL <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/129/4/10.1121/1.3553226>.
- Suaris, W. & Fernando, V. (1987). Ultrasonic Pulse attenuation as a Measure of Damage Growth during Cyclic Loading of Concrete. *ACI Materials Journal*, 84(3), 185 – 193.
- Taha, M. M. R., Noureldin, A., Lucero, J. L., & Baca, T. J. (2006). Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features. *Structural Health Monitoring*, 5(3), 267 – 295.

- Torrence, C. & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61 – 78.
- Tronicke, J. (2007). The Influence of High Frequency Uncorrelated Noise on First-Break Arrival Time and Crosshole Traveltime Tomography. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12(2), 173 – 184.
- Unbehauen, R. (Ed.) (2002). *Systemtheorie 1*. ISBN-10: 3486259997: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Weise, F., Maier, B., & Ehrig, K. (2012). Analyse der durch Frost- und Frost-Tausalz-Wechsel induzierten Schädigungsprozesse in Beton. *Beton- und Stahlbetonbau*, 107(2), 816 – 823. URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/best.201200056/pdf>.
- Wolf, J. (2011). *Fehleruntersuchung von Betonkonstruktionen mit dem SASW Verfahren*. Master's thesis, Universitötsdam.
- Wolf, J., Mielentz, F., Milmann, B., Helmerich, R., Köpp, C., & Wiggenhauser, H. (2014a). An Ultrasound Monitoring System For Concrete Structures. In *Istanbul Bridge Conference Proceedings*.
- Wolf, J., Niederleithinger, E., Mielentz, F., Grothe, S., & Wiggenhauser, H. (2014b). Überwachung von Betonkonstruktionen mit eingebetteten Ultraschallsensoren. *Bautechnik*, 91(11), 783 – 796.
- Wolf, J., Pirskawetz, S., & Zang, A. (2015a). Detection of crack propagation in concrete with embedded ultrasonic sensors. *Engineering Fracture Mechanics*, 146, 161 – 171.
- Wolf, J., Pirskawetz, S., & Zang, A. (2015b). Detektion der Rissausbreitung in Beton mit eingebetteten Ultraschallsensoren - ein Vergleich mit dem Schallemissionsverfahren. In *20. Kolloquium Schallemission*.
- Wu, T. T. (1998). The Stress Effect on the Ultrasonic Velocity Variations of Concrete under Repeated Loading. *ACI Materials Journal*, 95(5), 519 – 524. URL <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=394>.
- Wüstenberg, H. (2004). *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*. TU Berlin, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, Institut für Werkstofftechnik, Zerstörungsfreie Prüfung.
- Yeih, W. & Huang, R. (1998). Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing. *Cement and Concrete Research*, 28(7), 1071 – 1083.
- Zang, A. (1991). *Theoretische Aspekte der Mikrorißbildung in Gesteinen*. ISBN 3-922540-38-4: Fachbereich Geowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt.



- Zang, A. & Berckhemer, H. (1993). Classification of Crystalline Drill Cores from the KTB Deep Well Based on Strain, Velocity and Fracture Measurements. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(4), 331 – 342.
- Zang, A. & Stephansson, O. (2010). *Stress Field of the Earth's Crust*. ISBN 978-1-4020-8444-7: Springer.
- Zement, D. (2012). Technische Daten Einpressmörtel CEM I 42,5 R (ep) rheoment. Tech. rep., Dornburger Zement.
- Zhang, H., Thurber, C., & Rowe, C. (2003). Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5), 1904 – 1912.
- Zhang, Y., Abraham, O., Tournat, V., Duff, A. L., Lascoup, B., Loukili, A., Grondin, F., & Durand, O. (2013). Validation of a thermal bias control technique for Coda Wave Interferometry (CWI). *Ultrasonics*, 53(3), 658 – 664. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X12001564>.
- Zoëga, A. (2011). *Spannungsabhängigkeit elastischer Wellen in Beton*. Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung (BAM). URL <http://opus4.kobv.de>.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Vereinfachte Darstellung von Ultraschallmessungen an einem Material. . . . .	14
2.2	Zeitsignale bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz. . . . .	17
2.3	Spektren der Zeitsignale bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz. . . . .	17
2.4	Wavelet Transformation von Zeitsignalen mit dem realen Mexican Hat Wavelet, bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz. . . . .	18
2.5	Verdeutlichung der Auswertung des Schalldrucks der Ultraschallwelle, über die Amplitude der ersten Schwingung a.), über die maximale Amplitude b.), über die zeitliche Verschiebung der maximalen Amplitude c.) und über die Gesamtenergie des Ultraschallsignals d.). . . . .	20
2.6	Vergleich von zwei Signalen des Experiments zum Einfluss der Feuchtesättigung des Betons auf die P-Wellengeschwindigkeit, aus dem Kapitel 5.2. . . . .	21
3.1	Links: Darstellung von Mikrorissen in der Nähe einer Störung oder Verbindungsstelle. Rechts: Am häufigsten entstehen Risse senkrecht zu der maximalen Zugspannung. Abbildungen aus Atkinson (1987) . . . . .	26
4.1	Ultraschallprüfkopf S0807 der Firma ACSYS zum Einbetten in Beton. . . . .	34
4.2	Aufbauskizze der einzubettenden Ultraschallprüfköpfe [Fa. ACSYS]. . . . .	34
4.3	Illustration des Messaufbaus für die Bestimmung der Mittenfrequenz. . . . .	35
4.4	Der genäherte Dirac-Impuls als Anregung, die Impulsantwort aufgenommen am 48 cm entfernten Empfänger und das Spektrum des Signals. Die maximale Spektraldichte dieser Impulsantwort liegt bei 62 kHz. . . . .	35
4.5	Schalung des Probekörpers vor der Betonierung. Der Prüfkopf, siehe Pfeil, ist waagrecht zur Messebene positioniert. . . . .	36
4.6	Anordnung des Prüfkopfs waagrecht zur Messebene und Aufpunktlinie für die Modellierung im Beton [Universität Kassel]. . . . .	36
4.7	Darstellung der Beziehung zwischen der normierten relativen Schallschnelle und dem Abstrahlwinkel in Grad, für die waagerechte (links) und senkrechte (rechts) Ausrichtung der Prüfköpfe gegenüber der Messebene. . . . .	37

4.8	Darstellung der modellierten Abstrahlung für die waagerechte Ausrichtung der Prüfköpfe gegenüber der Messebene im Wasserbad (links) und im Beton (rechts) [Universität Kassel]. Die Achsen entsprechen den Geometrien der jeweiligen Experimente. . . . .	37
4.9	Illustration des Messaufbaus für die Bestimmung der Schallschwächung in Beton.	38
4.10	Restamplitude nach einem Laufweg von 0,5 m in Abhängigkeit von der Betonzuschlagsgröße und der Art des Sensoreinbaus. * steht für den nachträglichen Einbau der Prüfköpfe. Die Signale der nachträglich eingebetteten Prüfköpfe werden am wenigsten geschwächt. . . . .	39
4.11	Abnahme der Signalamplitude am Empfänger mit zunehmender Entfernung zum Sender, für die zwei untersuchten Betonzuschlagsgrößen. * steht für den nachträglichen Einbau der Prüfköpfe. Die Detektionsgrenze ist zwei mal der Rauschspannung des Messsystems. . . . .	40
4.12	Das Montieren der Ultraschallprüfköpfe an die Verschalung (links) und an die Bewehrung (rechts). . . . .	41
4.13	Skizze der nachträglichen Installation der Prüfköpfe. . . . .	41
5.1	Temperaturverlauf im Klimaschrank über die Zeit. . . . .	46
5.2	Die Änderung der Vorlaufzeit der Prüfköpfe mit der Temperatur. . . . .	47
5.3	Impulsantwort des Prüfkopfes und dessen normiertes Spektrum, bei $-20^{\circ}C$ . . . . .	47
5.4	Impulsantwort des Prüfkopfes und dessen normiertes Spektrum, bei $20^{\circ}C$ . . . . .	47
5.5	Impulsantwort des Prüfkopfes und dessen normiertes Spektrum, bei $60^{\circ}C$ . . . . .	48
5.6	Entwicklung des Maximums des Spektrums mit der Temperatur der Prüfköpfe. . . . .	48
5.7	Vergleich der Frequenzentwicklung entlang der Zeitachse für verschiedene Temperaturen, oben links das Spektrum bei $-20^{\circ}C$ , oben rechts bei $20^{\circ}C$ , unten mittig bei $60^{\circ}C$ . Die dominante Frequenz um den Skalierungsfaktor 5 ist bei allen Temperaturen gleich. . . . .	48
5.8	Änderung der Amplituden des ersten Maximums (oben links), des Scheitelwertes (oben rechts) und der Gesamtenergie (unten mittig) der Impulsantwort mit der Temperatur. . . . .	49
5.9	Experimentieraufbau zur Bestimmung des Einflusses von Frost-Tau-Zyklen auf das Verhalten des Ultraschallsignals. . . . .	50
5.10	Probekörper für die Untersuchung des Verhaltens des Ultraschallsignals auf Temperaturänderungen im Beton. Die Quader repräsentieren die eingebetteten Prüfköpfe, das Kreuz das eingebettete Thermoelement. . . . .	50
5.11	Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit mit der Temperatur, ausgewertet nach zwei Frost-Tau-Zyklen. . . . .	51
5.12	Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von Beton, bei $-17^{\circ}C$ . . . . .	52

5.13	Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von Beton, bei $17^{\circ}\text{C}$ . . . . .	52
5.14	Vergleich der Skalierungsfaktoren entlang der Zeitachse bei $-17^{\circ}\text{C}$ (links) und bei $17^{\circ}\text{C}$ (rechts). . . . .	52
5.15	Entwicklung der ersten Signalamplitude (links) und der Gesamtenergie (rechts) des Ultraschallsignals, nach Transmission im Beton, über die Temperatur. . . . .	53
5.16	Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen Ultraschallsignalen bei unterschiedlichen Betontemperaturen, für alle drei Probekörper. . . . .	54
5.17	Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI, zwischen Ultraschallsignalen unterschiedlicher Temperaturzustände, für alle drei Probekörper. Als Referenz dient das Signal bei $17^{\circ}\text{C}$ . . . . .	54
5.18	Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI, zwischen Ultraschallsignalen unterschiedlicher Temperaturzustände, für alle drei Probekörper. Als Referenzsignal diente der jeweils vorherige, kältere Zustand. . . . .	55
5.19	Betonprobekörper im Wasserbad zur Untersuchung des Feuchteinflusses auf das Ultraschallsignal eingebetteter Prüfköpfe. . . . .	58
5.20	Ultraschallgeschwindigkeiten über die Feuchtezunahme. . . . .	58
5.21	Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von trockenem Beton. . . . .	59
5.22	Ultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum nach dem Durchlaufen von Beton nach einer Feuchtezunahme von $3,1\ \%\text{rF}$ . . . . .	59
5.23	Vergleich der Skalierungsfaktoren entlang des Zeitsignals aus dem trockenen Zustand (links) und dem feuchten Zustand mit $3,1\ \%\text{rF}$ (rechts). . . . .	59
5.24	Entwicklung der Frequenz der maximalen Spektraldichte der Ultraschallsignale, nach Transmission im Beton, über die Feuchte. . . . .	60
5.25	Entwicklung der ersten Amplitude, des Amplitudenmaximums und der Gesamtenergie der Ultraschallsignale, nach Transmission im Beton, über die Feuchte. . . . .	60
5.26	Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten (links) und die Geschwindigkeitsänderung (rechts), bestimmt mit der CWI-Methode, über die Feuchte. . . . .	61
6.1	Aufbau des Experiments zum Bestimmen der Prüfkopfempfindlichkeit bei der Entstehung von Makrorissen. . . . .	64
6.2	Skizze des Betonbalkens mit den eingebetteten Ultraschallprüfköpfen, den externen Sensoren für die Schallemission (SE), den Wegaufnehmern und der Fläche für die digitale Bildkorrelation (DIC). . . . .	66
6.3	Lastkurve des Drei-Punkt-Biegeversuchs. Nach jeder Laststufe wird der Balken wieder entlastet. Transmissionsmessungen mit den eingebetteten Prüfköpfen und Aufnahmen für die DIC finden sowohl im belasteten als auch im entlasteten Zustand statt. . . . .	67

6.4	Entwicklung der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Last, im belasteten und entlasteten Zustand. . . . .	70
6.5	Referenzultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum. . . . .	71
6.6	Ultraschallsignal nach einer Belastung mit 38 kN (Phase 3) und dessen normiertes Spektrum. . . . .	71
6.7	Ultraschallsignal nach einer Belastung mit 52 kN (Phase 4) und dessen normiertes Spektrum. . . . .	71
6.8	Vergleich der Skalierungsfaktoren der Ultraschallsignale über die Zeit. Die Signale sind aufgenommen zu Beginn des Experiments (oben links), nach einer Belastung mit 38 kN (oben rechts) und nach einer Belastung mit 52 kN (unten). . . . .	72
6.9	Entwicklung des ersten Maximums, des Scheitelwertes und der Gesamtenergie, im belasteten und entlasteten Zustand, bei zunehmender Last. . . . .	72
6.10	Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten im belasteten und entlasteten Zustand mit zunehmender Last. . . . .	73
6.11	Entwicklung der Geschwindigkeitsänderungen, bestimmt mit der CWI-Methode, im belasteten und entlasteten Zustand mit zunehmender Last. . . . .	73
6.12	Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten mit zunehmender Last für verschiedene Zeitbereiche der Signale des entlasteten Zustandes. Die Pfeile markieren auffällige Änderungen sowie, je Fensterung, den Abfall des Korrelationskoeffizienten auf unter 20 %. Der Balken markiert die Phase 2, den Beginn der unelastischen Schädigung. . . . .	74
6.13	Entwicklung der Geschwindigkeit mit zunehmender Last für verschiedene Zeitbereiche der Signale des entlasteten Zustandes. Die Pfeile markieren auffällige Änderungen sowie, je Fensterung, den Abfall des Korrelationskoeffizienten auf unter 20 %. Der Balken markiert die Phase 2, den Beginn der unelastischen Schädigung. . . . .	75
6.14	Entwicklung der Schallemission über die angelegte Last. . . . .	76
6.15	Verformungen an der Oberfläche im belasteten und entlasteten Zustand. Aufgenommen von Wegaufnehmern auf der Unterseite des Balkens, 0 cm von der Unterkante, und auf der Rückseite, jeweils 1 cm und 15 cm von der Unterkante. . . . .	77
6.16	Längsschnitt durch die Mitte des Probekörpers. Der Makroriss breitete sich entlang von Gesteinskorngrenzen und vorher geschädigter Gesteinskörnung aus. . . . .	78
7.1	Foto von dem Probekörper für die Induktion von Mikrorissen während der Betonierung (oben) und Skizze eines einzelnen Probekörpers (unten). Die schwarzen Zylinder markieren die Position der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe, die Kreuze die Position der externen Ultraschallprüfköpfe und das T die des Temperatursensors. . . . .	84
7.2	Temperaturverlauf von zwei Frost-Tau-Wechseln [aus DIN EN 12390-9 (2009) und CEN/TR 15177 (2006)]. . . . .	85
7.3	Aufbau des Experiments zur Untersuchung der Prüfkopfempfindlichkeit bei der Detektion von durch Frost-Tau-Wechseln hervorgerufenen Mikrorissen. . . . .	85

7.4	Entwicklung der Geschwindigkeit, bestimmt mit den eingebetteten Prüfköpfen über die Dauer des Experiments, gemessen bei 17°C. . . . .	86
7.5	Massenzunahme der Probekörper durch Wasseraufnahme. . . . .	86
7.6	Änderung des dynamischen E-Moduls mit zunehmender Zahl an Frost-Tau-Zyklen, jeweils bestimmt mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen sowie externen der oberen Messreihe und der unteren. . . . .	87
7.7	Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen den eingebetteten Prüfköpfen während der Zyklen 36 und 37, über die Temperatur. . . . .	88
7.8	Referenzultraschallsignal und dessen normiertes Spektrum. . . . .	89
7.9	Ultraschallsignal nach 37 Frost-Tau-Zyklen und dessen normiertes Spektrum. . .	89
7.10	Ultraschallsignal nach 56 Frost-Tau-Zyklen und dessen normiertes Spektrum. . .	89
7.11	Vergleich der Skalierungsfaktoren der Ultraschallsignale über die Zeit. Die Signale sind aufgenommen zu Beginn der Frost-Tau-Wechsel (Referenzsignal) (oben links), nach 37 Frost-Tau-Zyklen (oben rechts) und nach 56 Frost-Tau-Zyklen (unten). . .	89
7.12	Entwicklung des ersten Maximums der drei Probekörper während des kapillaren Saugens und der Frost-Tau-Zyklen. . . . .	90
7.13	Entwicklung des Scheitelwertes der drei Probekörper während des kapillaren Saugens und der Frost-Tau-Zyklen. . . . .	91
7.14	Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten der drei Probekörper während des kapillaren Saugens und den Frost-Tau-Zyklen. . . . .	92
7.15	Beispiel von 10 aufeinanderfolgenden Signalen, aufgenommen um den Punkt A, während des kapillaren Saugens. . . . .	93
7.16	Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI-Methode, während des kapillaren Saugens, mit zunehmender Zahl an Frost-Tau-Wechseln. . . . .	93
7.17	Entwicklung der Geschwindigkeiten, bestimmt mit der CWI-Methode, mit zunehmender Zahl an Frost-Tau-Zyklen. Als Referenz dient jeweils die vorherige Messung.	94
7.18	Querschnitt durch den PK1 unter dem Mikroskop betrachtet. Ungerichtete Korngrenzenrisse (GBC), intragranulare Risse (IGC) und transgranulare Risse (TGC) sind erkennbar. Der Beton kann als stark beschädigt betrachtet werden. . . . .	95
8.1	Entwicklung der Geschwindigkeit über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. . . . .	98
8.2	Entwicklung des Maximums der Spektraldichte über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. . . . .	99
8.3	Entwicklung des Schalldrucks der Ultraschallsignale über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. Als Referenzzeitpunkt dient der 28. Tag nach der Betonierung des Probekörpers. . . . .	99
8.4	Kreuzkorrelation zwischen den Ultraschallsignalen über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. Als Referenzzeitpunkt dient der 28. Tag nach der Betonierung des Probekörpers. . . . .	100

8.5	Geschwindigkeitsänderung zwischen den Ultraschallsignalen, bestimmt mit der CWI-Methode, über die gesamte Lebensdauer des Probekörpers, im Vergleich zur Temperaturentwicklung. Als Referenzzeitpunkt dient der 28. Tag nach der Betonierung des Probekörpers. . . . .	101
8.6	Ablaufdiagramm zur Planung einer Dauerüberwachung von Betonelementen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Die angegebenen Werte sind Beispiele bestehender Installationen. . . . .	105
A1	Wavelet Transformation von Zeitsignalen mit dem komplexen Morlet Wavelet, bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz. . . . .	136
A2	Verschiebung der Position des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion $R_{max}^{(t,T)}$ um $t_s$ durch die mittlere Störung der Laufzeiten $\langle \tau \rangle_{(t,T)}$ . . . . .	140
A3	Änderung des Maximums der Spektraldichte über die Temperatur, bei der Signalausbreitung im Beton. . . . .	140
A4	Änderung der maximalen Amplitude der Ultraschallsignale (links) über die Temperatur und die Verschiebung der maximalen Amplitude entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals (rechts) über die Temperatur. Jeweils bei der Signalausbreitung im Beton. . . . .	141
A5	Verschiebung der maximalen Amplitude entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals (links) über die Betonfeuchte und die Veränderung der Geschwindigkeit (rechts) mit zunehmender Feuchte, bestimmt mit der CWI-Methode mit dem jeweils vorherigen Signal als Referenz. . . . .	141
A6	Darstellung der Entwicklung der Frequenz der maximalen Energie des Spektrums (links) und der Verschiebung der maximalen Amplitude entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals (rechts), jeweils über die Biegezugfestigkeit. . . . .	141
A7	Entwicklung der Frequenzen der maximalen Energie des Spektrums während des gesamten FTW-Experiments. . . . .	142
A8	Entwicklung der Gesamtenergie der drei Probekörper (links) und Verschiebung des Maximums entlang des Ultraschallsignals (rechts), während des kapillaren Saugen und der FTW. Als Referenz dient das erste Signal des Experiments. . . . .	142
A9	Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten der drei Probekörper während der Frost-Tau-Zyklen (links), als Referenz dient das erste Signal der FTW. Entwicklung der Geschwindigkeit der drei Probekörper während der Frost-Tau-Zyklen (rechts), als Referenzsignal dient das jeweils vorherige. . . . .	142



# Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung physikalischer Eigenschaften einiger Materialien. . . . .	13
3.1	Übersicht über die Bestandteile eines Systems für die strukturelle Zustandsüberwachung, zusammengestellt aus: Dong & Song (2010), Enckell (2011), Peeters & De Roeck (2001) und Mustapha <i>et al.</i> (2015). . . . .	29
6.1	Links: Mit der digitalen Bildkorrelation bestimmte Verformung der Oberfläche des Betonbalkens und rechts: Die lokalisierten Ereignisse der Schallemission, für die Laststufen 32 kN (a.), 34 kN (b.) und 38 kN (c.). Die gelbe Linie repräsentiert den sich nach oben ausbreitenden Riss, die gestrichelte Linie markiert die Position der eingebetteten Prüfköpfe. Die sichtbaren Sensoren sind die Schallemissionssensoren 5, 6 und 3. . . . .	69
6.2	Auflistung der mit den verschiedenen ZfP-Verfahren identifizierten Veränderungen am Betonbalken. Phase 1: Mikrorissentstehung (keine sichtbaren Risse), Phase 2: Makrorissausbildung (sichtbarer Riss), Phase 3: Makrorissausbreitung in die Ebene der eingebetteten Ultraschallprüfköpfe und Phase 4: Ausbildung von zusätzlichen Makrorissen. . . . .	79
8.1	Übersicht über Installationen mit eingebetteten Ultraschallprüfköpfen. Für jedes Objekt ist die Installationsskizze und ein repräsentatives Ultraschallsignal zu sehen. An den ersten beiden Objekten erfolgte die Installation der Prüfköpfe nachträglich, beim letzten vor der Betonierung des Bauteils. . . . .	102
9.1	Zusammenfassung der Veränderung der Ultraschallsignalparameter durch die Einflussfaktoren Umgebung und Schädigung. Die Werte können nur bezogen auf die jeweiligen Betone, Probekörpergeometrien und Messaufbauten betrachtet werden.	108
A1	Das komplexe und reale Wavelet Morlet und Mexican Hat im Zeit- und Frequenzraum, mit verschiedenen Skalierungen. . . . .	137



# Anhang

## Theorie der Wavelet Transformation

Im Folgenden wird die Theorie der Wavelet Transformation (WT) und der verschiedenen Mother Wavelets beschrieben. Es wird zudem erklärt, wie sich der Skalierungsfaktor in reale Frequenzen übertragen ließen.

Die Wavelet Transformation wird genutzt, um Zeitsignale zu analysieren die zeitabhängige Charakteristiken haben. Die Breite des Zeitfensters wird bei gleichbleibender Anzahl von Oszillationen verändert um verschiedene Frequenzen gut aufzulösen [Unbehauen (2002)]. Dieser gleichbleibende Wellenzug im Fenster wird als Wavelet  $\Psi^{s,b}$  bezeichnet. Nach Daubechies (1992) gilt:

$$\Psi^{s,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-b}{s}\right) \quad (\text{A1})$$

$\Psi$  wird als Mother Wavelet bezeichnet,  $s$  beschreibt die Skalierung des Mother Wavelets und  $b$  dessen Translation entlang des Zeitsignals. Bei einer Vergrößerung des Fensters wird das Wavelet gestreckt, bei einer Verkleinerung gestaucht, die Form bleibt dabei erhalten. Dieses Strecken ( $s > 1$ ) und Stauchen ( $s < 1$ ) des Wavelets wird als Skalierung bezeichnet. Der Skalierungsfaktor  $s$  ist umgekehrt proportional zur Frequenz: Erhöht er sich, wird das Wavelet breiter und dessen Frequenz nimmt ab [Polikar (1996), Foufoula-Georgiou & Kumar (1994), Kim & Melhem (2004)]. Die kontinuierliche Wavelet Transformation eines Zeitsignals  $f(t)$  ist definiert als das Produkt des Wavelets  $\Psi^{s,n}$  und der Zeitfunktion  $f(t)$  [Daubechies (1992)] (wenn die WT im Zeitbereich durchgeführt wird):

$$F_w(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{s}\right) dt \quad s > 0 \quad (\text{A2})$$

$F_w(s, b)$  ist der Koeffizient der kontinuierlichen Wavelet Transformation. Die Wavelet Transformation ist kontinuierlich, da  $s$  und  $b$  kontinuierlich variiert werden können [Meyers *et al.* (1993)]. Mit den Parametern  $s$  und  $b$  lässt sich das Mother Wavelet den verschiedenen Signalanteilen anpassen. Die Ähnlichkeit wird dabei durch den Koeffizienten  $F_w(s, b)$  reflektiert. Verschiebt man ein skaliertes Wavelet entlang des Zeitsignals, bekommt man je Position einen Wert für den Koeffizienten. In der Folge wird das Wavelet gestaucht oder gedehnt und erneut entlang des

Signals verschoben. Je größer  $|F_w(s, b)|$ , desto ähnlicher sind sich das Mother Wavelet mit der Skalierung  $s$  und das Zeitsignal um den Zeitpunkt  $b$ . Auf diese Art und Weise erhält man das Bild eines so genannten Energiespektrums des Zeitsignals [Torrence & Compo (1998)], bei dem die Koeffizienten über den genutzten Skalierungsfaktor aufgetragen sind und sich mit der Zeit verändern (Abbildungen A1). Wie bei der Fourier-Transformation kann mit den Koeffizienten das Ausgangssignal rekonstruiert werden.

Die Effektivität der Transformation ist vor allem vom gewählten Mother Wavelet abhängig [Torrence & Compo (1998)], welches besondere Eigenschaften besitzen muss, um sowohl die räumliche Auflösung der WT zu garantieren als auch die Umkehrung der Transformation zurück in das Zeitsignal (siehe hierzu Foufoula-Georgiou & Kumar (1994), Meyers *et al.* (1993) und Kim & Melhem (2004)). Neben orthogonalen und nicht orthogonalen Mother Wavelets gibt es reale und komplexe, mit unterschiedlichen Breiten. Wavelets sollten den Besonderheiten des Zeitsignals so gut wie möglich ähneln. So gibt es Wavelets, die periodische, oszillierende Veränderungen besonders gut reflektieren, und andere, die eher kontinuierliche Änderungen reflektieren. Wieder andere eignen sich besonders aufgrund ihrer Ähnlichkeit zu bestimmten Spitzen und Diskontinuitäten im Zeitsignal. Das Morlet beispielsweise ist ein nicht orthogonales komplexes Wavelet, Mexican Hat ein nicht orthogonales reales. In der Tabelle A1 sind die Wavelets Morlet und Mexican Hat im Zeit- und Frequenzraum mit zwei Skalierungen dargestellt<sup>1</sup>.

Die Breite eines Wavelets bestimmt dessen Auflösung im Zeitraum und im Frequenzraum und muss individuell abgewogen werden. Ein im Zeitraum schmales Wavelet führt zu scharfen Spitzen entlang der Zeitachse im Energiespektrum. Die Auflösung im Zeitraum ist damit gut. Das Wavelet ist im Frequenzraum jedoch breit, was zu langgezogenen Bereichen entlang der Frequenzachse des Energiespektrums führt. Die Auflösung der Frequenzen ist damit schlecht. Eine gute Frequenzauflösung erhält man bei tiefer frequenzen, also breiten Wavelets, wodurch jedoch die Zeitauflösung reduziert wird.

Die Wavelet Transformation erzeugt eine Zeit-Frequenz-Darstellung der Energie der Signale. Um die Vorteile der Wavelet Transformation zu verdeutlichen, werden sie auf die Zeitsignale aus den Abbildungen 2.2a und 2.2b angewandt. Um die Unterschiede zwischen den Wavelets zu zeigen, wird das Morlet Wavelet (Abbildung A1a und A1b) und das Mexican Hat Wavelet (Abbildung 2.4a und 2.4b) verwendet. Um die Skalierungsfaktoren auf reale Frequenzen zu übertragen, muss die Wavelet Transformation auf eine Sinus- oder Kosinusfunktion bekannter Frequenz, auf eine Art Referenzfunktion angewandt werden [Torrence & Compo (1998)]. Der Skalierungsfaktor, bei dem das Energiespektrum maximal wird, ist das Äquivalent zur Frequenz. Somit lässt sich die Beziehung zwischen Skalierungsfaktoren und Frequenzen bestimmen. Da in den Untersuchungen dieser Arbeit mit relativen Veränderungen der Frequenz gearbeitet wird, erfolgt diese Anpassung der Achse an äquivalente Frequenzen nicht<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Detaillierte Informationen über verschiedene Wavelets liefern Foufoula-Georgiou & Kumar (1994)

<sup>2</sup>Detailliertere Informationen zur kontinuierlichen Wavelet Transformation und ihrer Erweiterung durch die Diskretisierung der Parameter  $s$  und  $b$  finden sich bei Foufoula-Georgiou & Kumar (1994), Kaiser (1994), Daubechies (1992) und Taha *et al.* (2006).

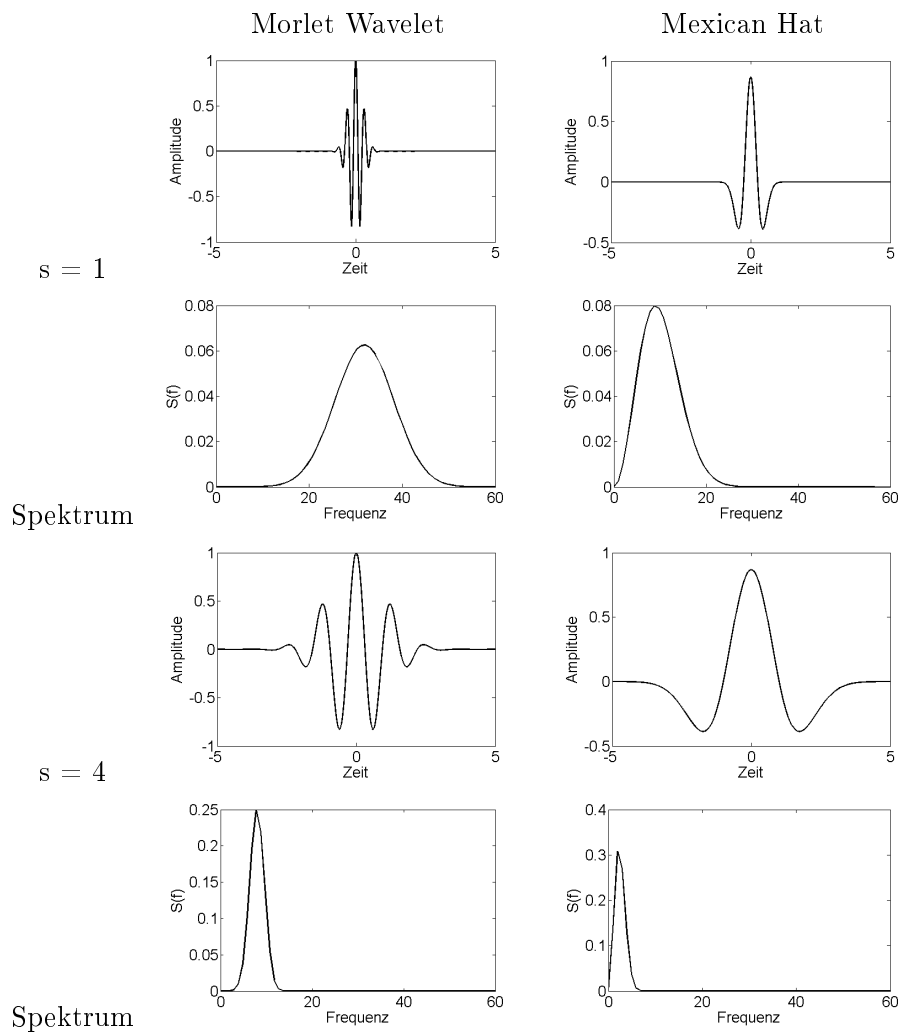
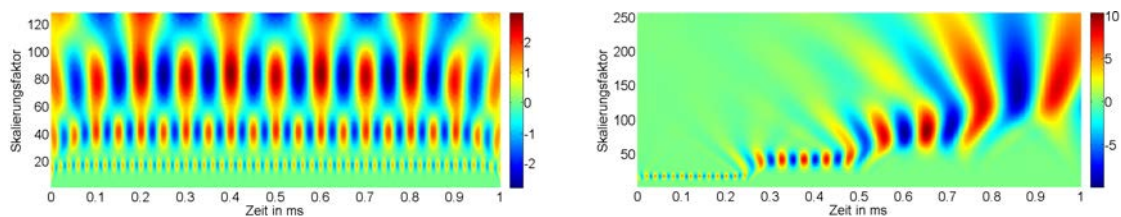


Tabelle A1: Das komplexe und reale Wavelet Morlet und Mexican Hat im Zeit- und Frequenzraum, mit verschiedenen Skalierungen.



(a) Das Zeitsignal besteht aus aufaddierten Kosinusfunktionen.

(b) Das Zeitsignal besteht aus hintereinander ausgeführten Kosinusfunktionen.

Abbildung A1: Wavelet Transformation von Zeitsignalen mit dem komplexen Morlet Wavelet, bestehend aus Kosinusfunktionen der Frequenz 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz und 50 kHz.

## Theorie der Coda Wellen Interferometry

Wie stark die Wellen gestört werden, wird über die Kreuzkorrelation der mehrfach gestreuten Wellenanteile mit denen einer ungestörten Welle bestimmt [Snieder *et al.* (2002)]. Die in der

Praxis relevanten Ursachen von Störungen der gestreuten Wellenanteile werden in Snieder *et al.* (2002) und Snieder (2006) durch drei Modelle beschrieben:

- willkürliche Veränderung der Position der Streuer
- Veränderung der Wellengeschwindigkeit
- Veränderung der Position der Quelle der Welle (z.B. Senderposition)

Die Theorie der CWI basiert auf der Aufsummierung aller Laufwege  $L$  der Welle zwischen Quelle und Empfänger<sup>3</sup>. Ein ungestörtes Wellenfeld  $u$  wird wie folgt beschrieben:

$$u(t) = \sum_L A_L \Phi(t - t_L) \quad (\text{A3})$$

Hierbei ist  $t_L$  die Laufzeit entlang des Weges  $L$  und  $A_L$  die zugehörige Wellenamplitude.  $\Phi(t)$  repräsentiert das Wavelet an der Quelle. In einem stark streuenden Medium sind die Laufwege bestimmt durch alle möglichen Abfolgen der Streuer.

Eine Störung des Mediums verursacht eine Störung des Wellenfeldes. Wenn diese Störung wesentlich kleiner als der mittlere Abstand zwischen den Streuern ist, sind deren Auswirkungen auf die geometrische Ausbreitung und die Amplitude der Welle so gering, dass sie vernachlässigt werden können. Die Störung hat dann den größten Einfluss auf die Veränderung der Laufzeit  $\tau_L$  einer Welle entlang eines bestimmten Laufweges  $L$ , wenn sie gleich oder größer als der mittlere Abstand zwischen den Streuern ist. Für das gestörte Wellenfeld  $u_g$  ergibt sich somit:

$$u_g(t) = \sum_L A_L \Phi(t - t_L - \tau_L) \quad (\text{A4})$$

Die ungestörten und gestörten Wellen lassen sich mit dem zeitverschobenen Kreuzkorrelationskoeffizienten vergleichen:

$$R^{(t,T)}(t_s) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u(t') u_g(t' + t_s) dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T} u^2(t') dt \int_{t-T}^{t+T} u_g^2(t') dt}} \quad (\text{A5})$$

Die Kreuzkorrelation wird innerhalb eines Zeitfensters mit einem Mittelpunkt bei  $t$ , einer Dauer von  $2T$  und mit einer Zeitverschiebung  $t_s$  zwischen dem ungestörten und dem gestörten Signal berechnet. Setzt man die Gleichungen A3 und A4 in A5 ein, entfernt unkorrelierte Laufwege, führt eine Autokorrelation der Sendesignale durch und nutzt zusätzliche Approximationen, erhält man für die zeitverschobene Kreuzkorrelation:

$$R^{(t,T)}(t_s) = 1 - \frac{1}{2} \bar{\omega}^2 \langle (\tau - t_s)^2 \rangle_{(t,T)} \quad (\text{A6})$$

---

<sup>3</sup>Nachfolgende Erläuterungen zur Theorie der CWI finden sich in den Veröffentlichungen von Snieder *et al.* (2002) und Snieder (2006).

Diese Gleichung gilt nur, wenn die Zeitverschiebungen  $t_s$  wesentlich kleiner als die dominante Periode der Welle ist.  $\langle(\tau - t_s)^2\rangle_{(t,T)}$  repräsentiert den Mittelwert aller Laufwege mit Ankunftszeiten innerhalb des Zeitfensters  $(t - T, t + T)$ .  $\bar{\omega}^2$  ist die mittlere quadratische Frequenz der mehrfach gestreuten Wellen.<sup>4 5</sup>

Die zeitverschobene Kreuzkorrelationsfunktion  $R^{(t,T)}(t_s)$  hat für die zeitliche Verschiebung  $t_s = \langle\tau\rangle_{(t,T)}$  ihr Maximum, wenn  $\langle\tau\rangle_{(t,T)}$  die mittlere Störung der Laufzeiten aller im Zeitfenster ankommenden Laufwege ist. Der Wert des Maximums der Kreuzkorrelation errechnet sich mit:

$$R_{max}^{(t,T)} = 1 - \frac{1}{2}\bar{\omega}^2 r_\tau^2 \quad (\text{A7})$$

wobei  $r_\tau^2$  die Varianz der Störung der Laufzeiten wiedergibt.

Der zeitverschobene Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen einem ungestörten und gestörten Wellenfeld lässt sich für alle Zeitfenster (mit Mittelpunkt  $t$  und Dauer  $2T$ ) aus A5 berechnen. Dieser wird maximal, wenn nach 9 die zeitliche Verschiebung der Funktion gleich der mittleren Störung der Laufzeiten ist. Aus den aufgenommenen Signalen vor und nach der Störung des Mediums können mit A7 das Mittel und die Varianz der Störung der Laufzeiten aller Laufwege, die in einem bestimmten Zeitfenster ankommen, berechnet werden.

Mit der Berechnung des Maximums der zeitverschobenen Kreuzkorrelationsfunktion und dem Mittel sowie der Varianz der Störung der Laufzeiten kann man Rückschlüsse auf die oben aufgelisteten Ursachen der Störung des Wellenfeldes ziehen. Da in dieser Arbeit die Sender- und Empfängerpositionen als konstant gelten und das Modell der Verschiebung aller Streuer im Medium nicht zutrifft, wird im Folgenden nur das Modell der veränderten Wellengeschwindigkeit weiter ausgeführt.<sup>6</sup>

Verändert sich die Wellengeschwindigkeit im Medium um  $\delta v$ , bei konstanter Position der Streuer und der Quelle, ergibt sich für die mittlere Störung der Laufzeit  $\langle\tau\rangle_{(t,T)} = -(\delta v/v)t$  und für die Varianz  $r_\tau^2 = 0$ , wenn  $T \ll t$ . Daraus folgt für die relative Geschwindigkeitsänderung:

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{\langle\tau\rangle_{(t,T)}}{t} \quad (\text{A8})$$

Hierbei ist  $\langle\tau\rangle_{(t,T)}$  die mittlere Störung der Laufzeiten aller im Zeitfenster ankommenden Laufwege, für die die Kreuzkorrelationsfunktion  $R_{max}^{(t,T)}$  (A6) maximal wird. Eine Veränderung in der Wellengeschwindigkeit ist also an der Verschiebung der Position des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion erkennbar (vergleiche Abbildung A2). Die Verschiebung des Maximums nimmt linear mit dem Mittelpunkt  $t$  des Zeitfensters zu.

Die hier vorgestellte Theorie setzt das Vorhandensein nur einer Wellenart voraus. In einem elastischen Medium wie Beton breiten sich jedoch verschiedene Arten elastischer Wellen aus. Snieder

<sup>4</sup>für detailliertere Erläuterungen wird auf die Veröffentlichungen von Snieder *et al.* (2002) und Snieder (2006) verwiesen

<sup>5</sup>Die Zwischenschritte und Approximationen finden sich bei Snieder *et al.* (2002) und Snieder (2006).

<sup>6</sup>Detaillierte mathematische Erklärungen, auch für die anderen Ursachen, werden von Snieder *et al.* (2002) und Snieder (2006) ausgeführt.

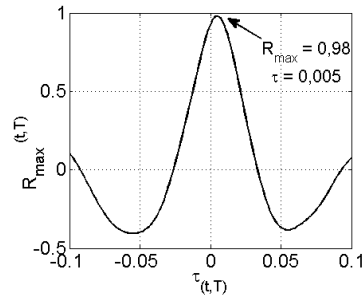


Abbildung A2: Verschiebung der Position des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion  $R_{max}^{(t,T)}$  um  $t_s$  durch die mittlere Störung der Laufzeiten  $\langle \tau \rangle_{(t,T)}$ .

(2002) erweitert die Theorie der CWI auf die Ausbreitung von zwei Wellenarten, der P- und S-Welle, mit zwei Wellengeschwindigkeiten. Bei der Streuung können sich die Wellenarten ineinander umwandeln. Die Summe aller Laufwege beinhaltet also auch die Laufwege der P- und S-Welle nach jeder möglichen Wellenumwandlung. An Hand eines Modells zeigt Snieder (2002), dass der Anteil der S-Wellen wesentlich größer ist als der Anteil der P-Wellen. Die effektive Wellengeschwindigkeit im Medium  $v_{eff}$ , also der Mittelwert aller Geschwindigkeiten der P- und S-Welle ( $v_P$  und  $v_S$ ), ist damit annähernd die S-Wellengeschwindigkeit:

$$v_{eff} \approx 1,064v_s \tag{A9}$$

Für die Veränderung der effektiven Wellengeschwindigkeit  $\delta v_{eff}$  als Störung eines Mediums ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der Störung der P- und S-Wellengeschwindigkeit:

$$\delta v_{eff} \approx 0,09 \frac{\delta v_P}{v_P} + 0,91 \frac{\delta v_S}{v_S} \tag{A10}$$

Die CWI für elastische Wellen wird also stärker von der Ausbreitung und Streuung der S-Wellenanteile als der P-Wellenanteile beeinflusst. Auf Grund der Dominanz der S-Welle im Co-dateil des Wellenfeldes nach mehrfacher Streuung sind die Gleichungen für die zeitverschobene Kreuzkorrelationsfunktion für mehrfach gestreute elastische Wellen gleich denen der mehrfach gestreuten einzelnen Wellenarten.

### Umwelteinflüsse

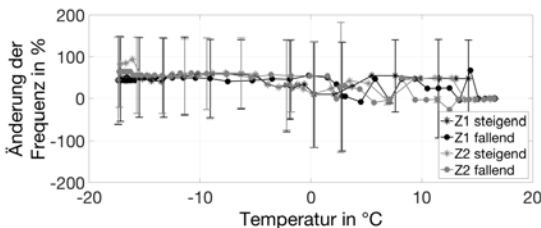


Abbildung A3: Änderung des Maximums der Spektraldichte über die Temperatur, bei der Signalausbreitung im Beton.



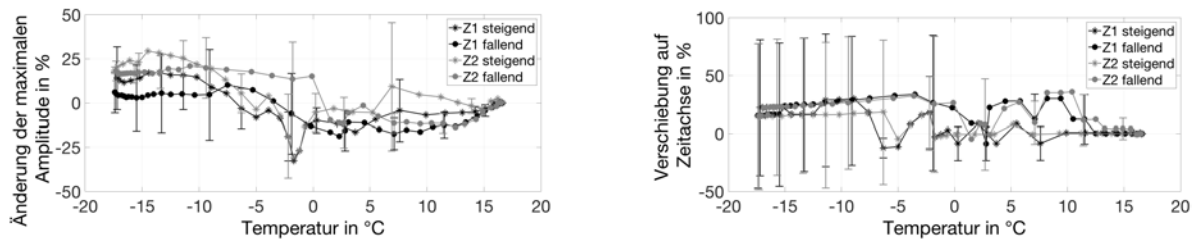


Abbildung A4: Änderung der maximalen Amplitude der Ultraschallsignale (links) über die Temperatur und die Verschiebung der maximalen Amplitude entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals (rechts) über die Temperatur. Jeweils bei der Signalausbreitung im Beton.

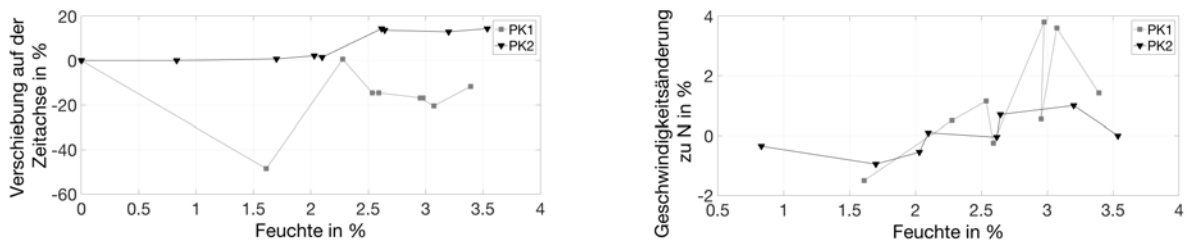


Abbildung A5: Verschiebung der maximalen Amplitude entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals (links) über die Betonfeuchte und die Veränderung der Geschwindigkeit (rechts) mit zunehmender Feuchte, bestimmt mit der CWI-Methode mit dem jeweils vorherigen Signal als Referenz.

## Makroriss

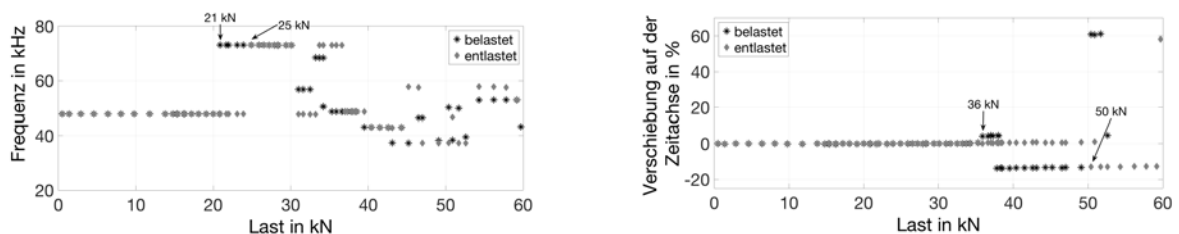


Abbildung A6: Darstellung der Entwicklung der Frequenz der maximalen Energie des Spektrums (links) und der Verschiebung der maximalen Amplitude entlang der Zeitachse des Ultraschallsignals (rechts), jeweils über die Biegezugfestigkeit.

## Mikroriss

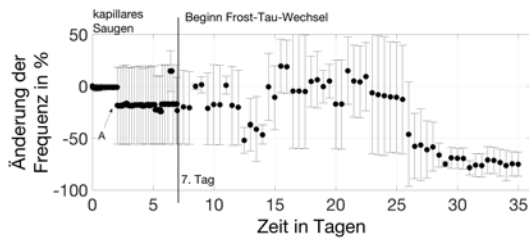


Abbildung A7: Entwicklung der Frequenzen der maximalen Energie des Spektrums während des gesamten FTW-Experiments.

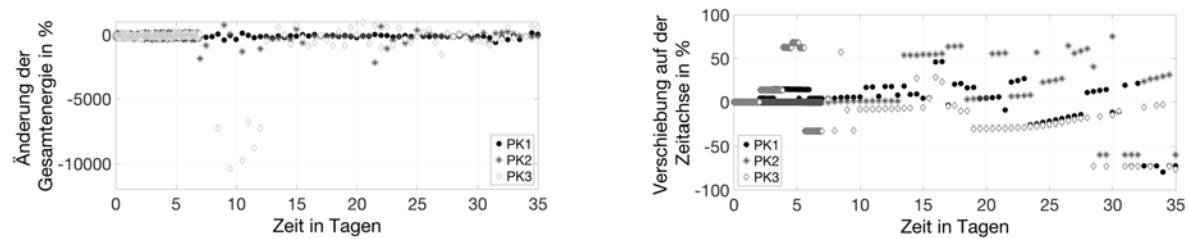


Abbildung A8: Entwicklung der Gesamtenergie der drei Probekörper (links) und Verschiebung des Maximums entlang des Ultraschallsignals (rechts), während des kapillaren Saugens und der FTW. Als Referenz dient das erste Signal des Experiments.

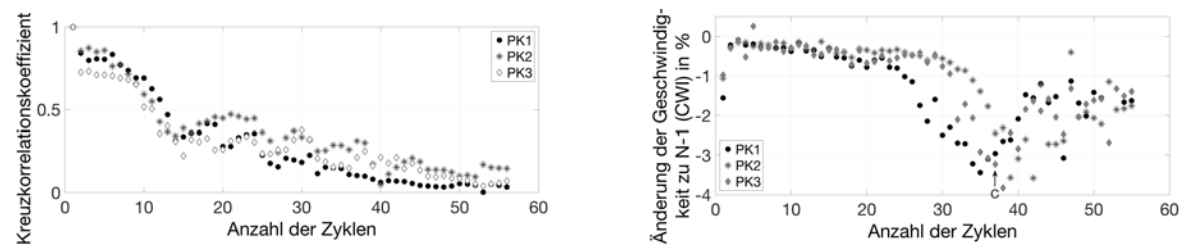


Abbildung A9: Entwicklung des Kreuzkorrelationskoeffizienten der drei Probekörper während der Frost-Tau-Zyklen (links), als Referenz dient das erste Signal der FTW. Entwicklung der Geschwindigkeit der drei Probekörper während der Frost-Tau-Zyklen (rechts), als Referenzsignal dient das jeweils vorherige.