

# Detektion der Rissausbreitung in Beton mit eingebetteten Ultraschallsensoren – ein Vergleich mit dem Schallemissionsverfahren

Julia WOLF<sup>1</sup>, Stephan PIRSKAWETZ<sup>1</sup>, Arno ZANG<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

<sup>2</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

**Kurzfassung.** Anspruchsvolle Neubauten und die alternde Infrastruktur steigern die Nachfrage für eine permanente Überwachung von Schäden im Beton. Die Schäden können entweder durch dynamische oder statische Belastung induziert werden. Die heute verfügbaren Technologien haben Schwierigkeiten bei der Erkennung langsam fortschreitender, lokal begrenzter Schäden, insbesondere in schwer zugänglichen Bereichen eines Bauwerkes.

In dieser Studie kommen neue Ultraschall-Sensoren zur Anwendung, die zur Dauerüberwachung von Betonbauteilen, direkt in das Bauteil einbetoniert werden. Durch den durch die Einbettung optimierten Kontakt der Sensoren zum Beton können auch Auswertemethoden angewendet werden, die sonst wegen der fehlenden Langzeitstabilität der üblichen Prüfkopfkopfkopplung, mithilfe von Vaseline oder Glycerin, nicht einsetzbar sind. Dadurch können auch kleinste Signalveränderungen, hervorgerufen durch Änderungen im Material, registriert werden.

Als Testexperiment für die Qualität und Sensitivität der eingebetteten Sensoren wird der Drei-Punkt-Biegeversuch genutzt, um einzuschätzen, ob mit den eingebetteten Ultraschallsensoren entstehende und sich ausbreitende Risse detektiert werden können. Verschiedene Methoden werden hierbei für die Analyse der Ultraschallsignale herangezogen. Zum einen wird die Geschwindigkeit über die Laufzeit bestimmt, zum anderen wird die Entwicklung der maximalen Signalamplitude als Funktion der Belastung ausgewertet. Mit der Bestimmung des Kreuzkorrelationsfaktors zwischen zwei Signalen werden die Veränderungen des gesamten Ultraschallsignals bewertet.

Das Experiment wird zusätzlich mit den zerstörungsfreien Prüfmethode Schallemission und digitale Bildkorrelation begleitet, um die Ergebnisse zu verifizieren. Es wird gezeigt, dass die Ultraschallsignale, die das Volumen zwischen zwei eingebetteten Sensoren durchlaufen, einen Riss detektieren, bevor dieser mit dem bloßen Auge erkennbar ist, auch wenn die Schädigung nicht im direkten Weg der Welle liegt. Eine Lokalisierung des Risses ist jedoch in diesem Experiment durch die wenigen eingebetteten Ultraschallsensoren nur mit dem Schallemissionsverfahren möglich. Ein, durch das Experiment motivierter, Test zeigt, dass die eingebetteten Sensoren auch für Schallemissionsmessungen verwendet werden können.

## **Einführung**

Die Schwächung von Betonbauteilen durch Ermüdung, hervorgerufen durch Lastwechsel, oder durch plötzlichen Stress, verursacht durch seismische Aktivität, ist ein immer wieder auftretendes Problem, welches oft in Rissen resultiert, die auch die Betonoberfläche erreichen. Änderungen in dem Zustand eines Betonbauteils zu überwachen und Mikrorisse zu detektieren bevor sie sich zu Makrorissen entwickeln, könnte, durch rechtzeitig eingeleitete Reparaturmaßnahmen, zu einer längeren Lebensdauer des Bauwerks führen. Langzeitüberwachungen sind erforderlich um die Materialermüdung über einen langen Zeitraum zu erfassen.

Auf dem Gebiet der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, wird das Ultraschallverfahren genutzt, um die Struktur eines Betonbauteils zu überprüfen und mögliche Einbauteile zu lokalisieren. Das Verfahren eignet sich jedoch auch um die Meso- und Makrostruktur von Beton zu untersuchen [1]. In der Regel wird es von der Bauteiloberfläche aus angewandt. Hierbei ist der Kontakt zwischen Bauteil und Ultraschallsensoren, wenn diese, wie üblicherweise mit Vaseline oder Glycerin angekoppelt werden, nicht immer von gleicher, stabiler Qualität.

Ultraschallsensoren in Betonelemente, während oder auch nach der Bauphase, mit ein zu betonieren ermöglicht eine konstante Ankopplung, und damit die Nutzung von Auswertemethoden die geringste Änderungen im Signal, hervorgerufen durch Veränderung im Zustand des Bauteils, evaluieren. Zudem eröffnet die Einbettung die Möglichkeit Gebiete zu überwachen, die herkömmlicherweise von der Bauteiloberfläche aus nicht mehr erreichbar wären.

In diesem Artikel wird die Empfindlichkeit der für die Langzeitüberwachung von Betonbauteilen entwickelten einzubettenden Ultraschallsensoren [2] gegenüber der Entstehung und Ausbreitung von Rissen untersucht. Die Risse werden durch zyklischen Lasteintrag auf einen bewehrten, mit zwei eingebetteten Ultraschallsensoren bestückten, Betonbalken in einer Drei-Punkt-Anordnung verursacht. An den transmittierten Ultraschallsignalen lassen sich die Geschwindigkeit, die Abnahme des Schalldrucks und der Korrelationskoeffizient als Funktion der Belastung bestimmen. Um die Genauigkeit der Rissdetektion mit den eingebetteten Ultraschallsensoren zu evaluieren, wird die Zustandsänderung des Balkens zusätzlich mit den zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) digitale Bildkorrelation und Schallemission überwacht.

Durch die konstante Ankopplung der eingebetteten Ultraschallsensoren an den Beton und der Einbettung in tiefer liegende Bereiche, eignen sich die Sensoren auch für die dauerhafte Untersuchungen von Betonbauwerken mit dem Schallemissionsverfahren. Die gute Ankopplung erhöht die Empfindlichkeit der Sensoren gegenüber weiter entfernt liegenden Events, die Konstanz der Ankopplung ermöglicht die Überwachungen über längere Zeiträume, die Einbettung in tiefer liegende Bereiche eines Bauteils bietet die Gelegenheit Gebiete zu kontrollieren, die von der Oberfläche aus nicht mehr überwachbar sind. Im Anschluss an das Bruchexperiment wird getestet ob sich die eingebetteten Sensoren, bei gleichmäßiger Verteilung in einem Betonprobekörper, in der Tat für die Schallemission eignen.

## **1. Material und Verfahren**

### *1.1 Beton*

Beton ist das am häufigsten verwendete Material für Ingenieurbauwerke, da sein hoher Widerstand gegen uniaxiale Kompression die Konstruktion von hohen Bauwerken

ermöglicht [3]. Der Nachteil ist die hohe Anfälligkeit gegenüber Biegung, Scherung und plötzlicher Zugbeanspruchung, wodurch sich Risse bilden können, die im Schlimmsten Fall zum Versagen der Konstruktion führen.

Beton setzt sich zusammen aus Zement, Wasser und Zuschlägen. Das Verhältnis zwischen diesen Produkten sowie die Konditionen unter denen der Beton hydratisiert, bestimmt die mechanischen Eigenschaften, wie Elastizitäts- und Kompressionsmodul, dieses Baustoffs [4]. Änderungen in den mechanischen Eigenschaften können ein Indiz für Betonschäden sein. und können mit Ultraschallsignalen, die das Material durchlaufen, detektiert werden [5].

### *1.2 Ultraschall mit eingebetteten Sensoren*

Ultraschall wird als ZfP-Verfahren in der Regel für die Strukturuntersuchung von Betonbauteilen genutzt, um beispielsweise die Geometrie eines Bauteils oder die Art und Lage von Einbauteilen zu bestimmen. [1], [6] und [7] zeigen, dass das Ultraschallverfahren empfindlich genug ist, um den, unter Last hervorgerufenen, akustoelastischen Effekt im Beton zu detektieren. Das Verfahren ist zudem auch geeignet kleinste Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften des Materials, wie dem Elastizitätsmodul, aufzufinden ( [8], [9]). Die Entstehung und Ausbreitung von Rissen beispielsweise verursacht Änderungen im Elastizitätsmodul und damit im Ultraschallsignal.

Für die Auswertung von transmittierten Ultraschallsignalen gibt es verschiedene Methoden. Mit der Bestimmung der Ankunftszeit lässt sich die Geschwindigkeit der Ultraschallwelle im Beton errechnen ( [10], [11]), über den Korrelationskoeffizienten wird die Ähnlichkeit eines Signals mit einem Referenzsignal verglichen [12] und über die Amplitude des Schalldrucks, wird die Schwächung des Materials bestimmt ( [13], [14]).

### *1.3 Schallemission*

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. Die Bandbreite der Sensoren bei Untersuchungen von Beton liegt zwischen 20 kHz und 400 kHz. Durch die Auswertung von Signalparametern wie Ankunftszeit, Schalldruck, Dauer und Spektrum lässt sich die Quelle der Schallemission lokalisieren und der Riss klassifizieren ( [15], [16]).

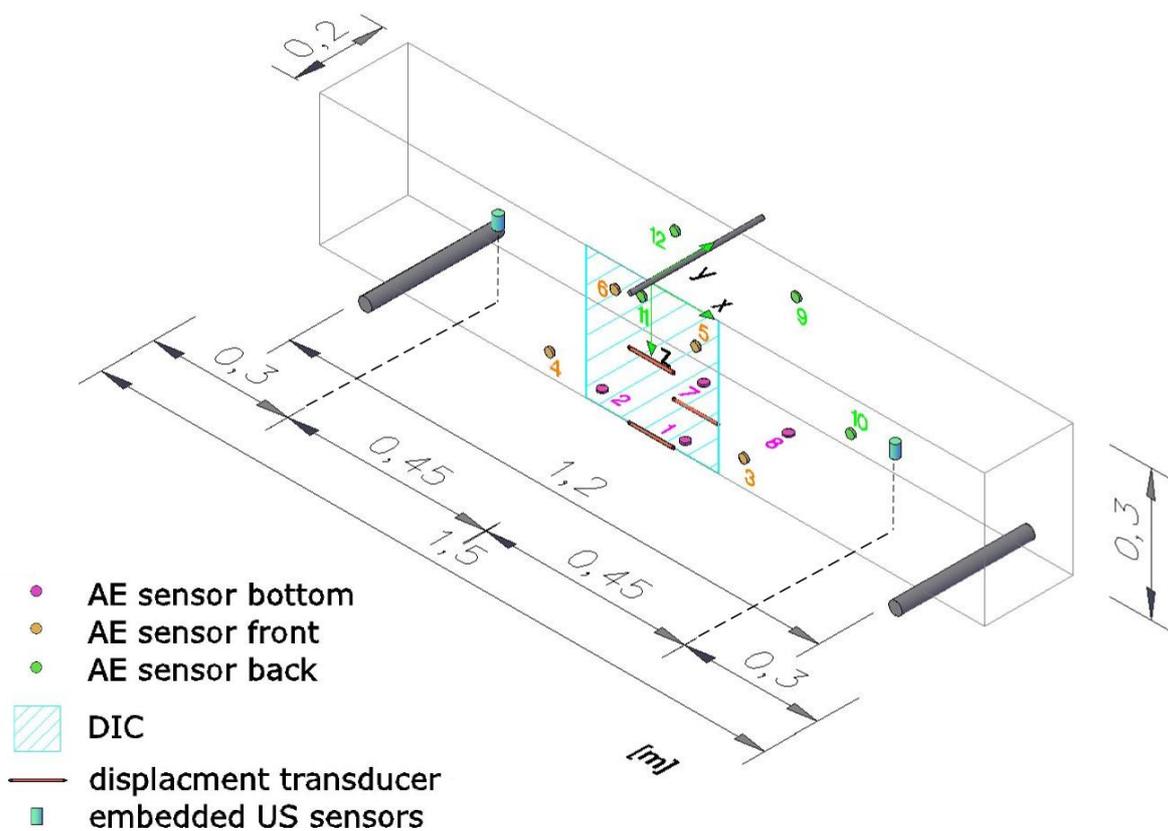
### *1.4 Digitale Bildkorrelation*

Mit der digitalen Bildkorrelation werden durch Stress verursachte kleinste Verformungen an der Oberfläche des Untersuchungsobjektes erkannt. Dafür werden vor, als Referenz, und nach dem Lasteintrag digitale Abbildungen gemacht. Diese Abbildungen werden in gleiche kleine Gebiete unterteilt. Die Verschiebung zwischen Pixeln innerhalb dieser Gebiete, verursacht durch die Verformung der Oberfläche, wird nun bestimmt, um sie einander anzupassen. Für die Anpassung können verschiedene Korrelationsalgorithmen genutzt werden. Fasst man diese kleinen angepassten Gebiete zusammen, erhält man die Verformung der gesamten fotografierten Oberfläche. Abhängig von der genutzten Kamera und dessen Abstand zur Oberfläche kann das Verfahren Verformungen bis in den Mikrometerbereich auflösen ( [17], [18]).

## 2. Experimenteller Aufbau

### 2.1 Betonbalken

Ein Drei-Punkt-Biegeversuch an einem Betonbalken mit eingebetteten Ultraschallsensoren wird durchgeführt, um die Empfindlichkeit dieser Sensoren gegenüber der Entstehung und Ausbreitung von Rissen zu untersuchen. Der bewehrte Betonbalken (Abb. 1) hat die Größe 1,5 m x 0,3 m x 0,2 m (Länge, Höhe, Breite), mittig sind zwei Ultraschallsensoren mit einem Abstand von 0,9 m zueinander mit eingebaut. In der Abbildung nicht dargestellt, sind die vier Längsbewehrungsseisen und die Ringbewehrung alle 0,14 m. Der Durchmesser der Bewehrung ist 0,08 m. Der Balken ist aus einer Standardbetonmischung (C 30/37) mit einem Wasser-Zement Verhältnis von 0,55 und Zuschlägen mit 16 mm Größtkorn hergestellt. Die Druckfestigkeit, geprüft an Würfeln 28 Tage nach der Herstellung, beträgt  $50 \text{ N/mm}^2$ .



**Abb. 1** Skizze des Betonbalkens mit den eingebetteten Ultraschallsensoren, den externen Sensoren für die Schallemission (AE) und der Fläche für die digitale Bildkorrelation (DIC).

### 2.2 Belastung

Die Risse im Balken werden durch den Aufbau eines Drei-Punkt-Biegeversuchs, eigentlich zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit, induziert. Der Balken steht auf zwei Trägern positioniert jeweils 0,15 m von dessen Außenkanten. Die Last wird über einen Kolben in der Balkenmitte direkt über einer Ringbewehrung eingeleitet. Der Kolbenweg vergrößert sich von der Ausgangsposition alle 0,05 mm, wodurch der Balken stufenweise mit einer Zugkraft von bis zu  $0,2 \text{ N/mm}^2$  belastet wird. Nach jeder Belastungsstufe wird der Balken wieder entlastet. Der Versuch endet, wenn aufgrund der Risslänge und -breite nur noch ein Bruchteil der Energie des Referenzsignals empfangen wird.

### *2.3 ZfP-Verfahren*

Die eingebetteten Ultraschallsensoren werden aktiv genutzt. Bei jeder Belastung und Entlastung werden Messungen durchgeführt. Der als Transmitter arbeitende Sensor wird mit einem  $\pm 100$  V Rechteckimpuls, mit einer Frequenz von 60 kHz angeregt. Die transmittierte Welle breitet sich im Beton aus und wird am Empfänger gleicher Bauart 0,9 m entfernt aufgenommen (Abb. 1). Die Abtastfrequenz ist 1 MHz, die Signaldauer 10 ms. Das empfangene Signal wird nicht Vorverstärkt.

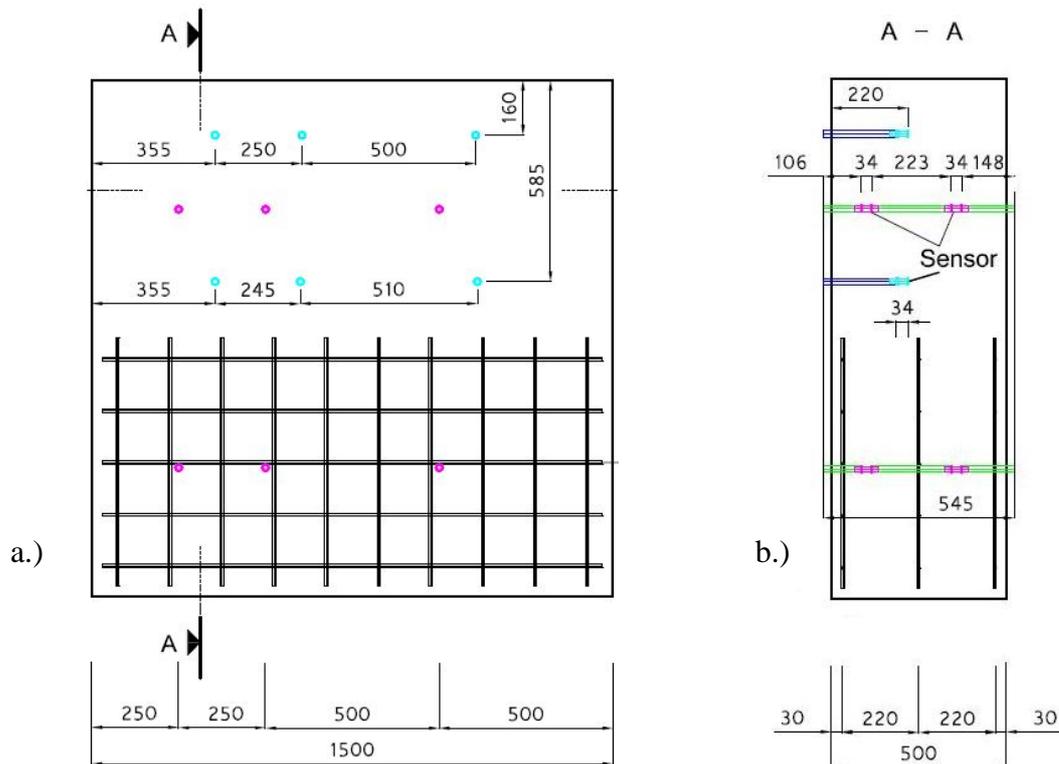
Für die Schallemission sind zwölf Sensoren des Typs VS150 MS so auf der Oberfläche des Balkens verteilt, dass sie den Bereich abdecken in dem eine Rissbildung erwartet wird (Abb. 1). Angekoppelt und befestigt werden sie mit BostikPrestik. Ein AMSY6 System nimmt die Signale auf und filtert sie mit einem Bandpass Filter. Nur Signal innerhalb des Fensters von 20 kHz – 400 kHz werden für die Auswertung hinzugezogen.

Eine 0,3 m große Fläche wird mittig an der Vorderseite des Balkens für die digitale Bildkorrelation vorbereitet (Abb. 1). 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 Ultraschallsensoren werden sowohl im belasteten als auch im entlasteten Zustand durchgeführt. Zu diesen Zeitpunkten werden auch Fotos für die digitale Bildkorrelation gemacht. Mit dem Schallemissionsverfahren wurden durchgängig Signale aufgenommen.

### *2.4 Eingebettete Sensoren für die Schallemission*

Um zu testen, ob sich die einzubettenden Ultraschallsensoren für das Schallemissionsmessungen eignen, wird das AMSY6 System an zwölf Sensoren angeschlossen, die in einen Betonprobekörper eingebettet sind. Der Probekörper hat die Dimension von 1,5 m x 1,5 m x 0,5 m (Höhe, Breite, Tiefe) und einen Größtkorn von 16 mm, die Sensoren befinden sich in Tiefen zwischen 0,1 m und 0,22 m (Abb. 2). Zuerst wurde jeweils ein eingebetteter Ultraschallsensor als Quelle der akustischen Signale genutzt, welche von den anderen elf Sensoren aufgenommen wurden. Als nächstes wurde ein Mienenbruchversuch mit Bleistift an der Probekörperoberfläche durchgeführt und die so erzeugten akustischen Signale mit den eingebetteten Ultraschallsensoren aufgenommen. Alle Messungen wurden drei Mal wiederholt.



**Abb. 2** Skizze eines Probekörpers mit eingebetteten Ultraschallsensoren Die blauen Punkte repräsentieren eingebettete Sensoren in 0,22 m Tiefe, die roten Punkte 0,1 m tief liegende. a.) ist die Draufsicht auf den Probekörper, b.) die Seitenansicht. Die Maßeinheiten sind in mm.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Ultraschall mit eingebetteten Sensoren

Abb. 3 zeigt die Entwicklung der Ultraschallwellengeschwindigkeit im Betonbalken über die Biegezugfestigkeit, im jeweils belasteten und entlasteten Zustand. Bei einer Biegezugfestigkeit von  $3,8 \text{ N/mm}^2$  fällt die Geschwindigkeit auf unter  $4400 \text{ m/s}$ . Bei dieser Last kreuzt der Riss den direkten Schallweg der eingebetteten Sensoren. Mit zunehmender Last verlängert und weitet sich der Riss, was zu einer stetigen Abnahme der Geschwindigkeit führt. Der stärkere Geschwindigkeitsabfall bei  $5,2 \text{ N/mm}^2$  wird durch die Ausbildung zusätzlicher Risse verursacht. Unter Belastung fällt die Geschwindigkeit stärker als im entlasteten Zustand, was durch das Öffnen des Risses bewirkt wird. Entfernt man die Last, schließt sich der Riss wieder. Die hohen Fehlerbalken entstehen durch ungenaues bestimmen der Ankunftszeit, wenn das Signal-Rausch-Verhältnis zu hoch ist.

Bei einer Biegezugfestigkeit von  $3,2 \text{ N/mm}^2$  fällt der Korrelationsfaktor (Abb. 4) um 20 %, gegenüber dem Referenzzustand vor Beginn des Experiments, auf 0,8 ab. Ein nächster stärkerer Abfall entsteht bei einer Biegezugfestigkeit von  $3,4 \text{ N/mm}^2$ . Ab  $5,2 \text{ N/mm}^2$  verschieben sich die Phasen der Signale im entlasteten Zustand, um über  $180^\circ$ , wodurch der Korrelationsfaktor auf unter null fällt.

Durch die Biegung des Balkens unter Last verlängern sich die Laufwege der Signale und Mikrorisse entstehen im Beton, beides führt zu einer Abnahme des Korrelationsfaktors. Der steile Abfall bei  $3,2 \text{ N/mm}^2$  wird durch die Ausbildung eines Makrorisses verursacht. Dieser Riss führt zu Unterschieden in den Korrelationsfaktoren zwischen dem Belasteten und Entlasteten Zustand einer Laststufe. Diese Unterschiede entstehen durch das Öffnen und Schließen des Risses und die dadurch veränderte Wellenausbreitung, die zu Änderungen in den aufgenommenen Signalen führt.

Der Schalldruck (Abb. 5) fällt bei der Biegezugfestigkeit von  $3,4 \text{ N/mm}^2$  steil um über 20% ab, auch hier wieder gegenüber dem Referenzsignal vor Beginn des Experiments. Nach diesem starken Abfall unterscheidet sich der Schalldruck zwischen dem belasteten und dem entlasteten Zustand, mit größeren Veränderungen, wenn der Balken belastet ist. Die größere Veränderung unter Last entsteht durch das Öffnen des Risses, wodurch der Schalldruck stärker geschwächt wird.

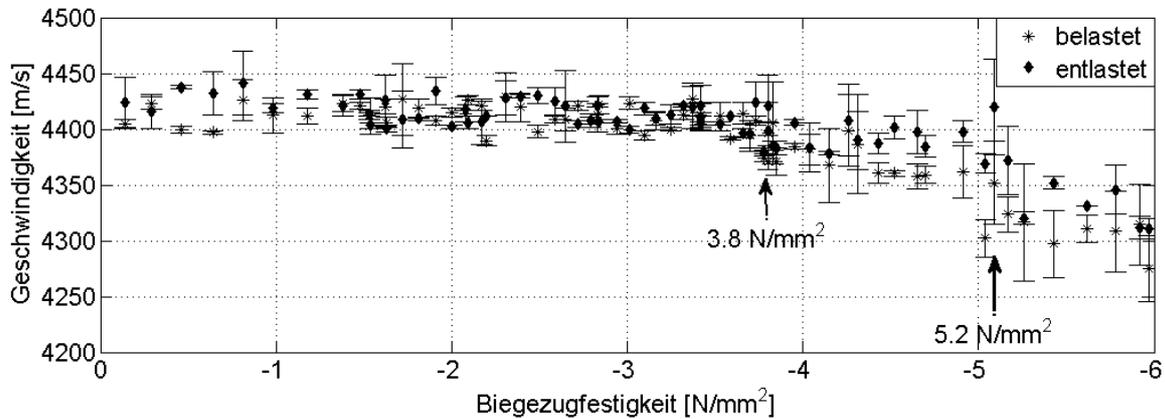


Abb. 3 Entwicklung der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Last, im belasteten und entlasteten Zustand.

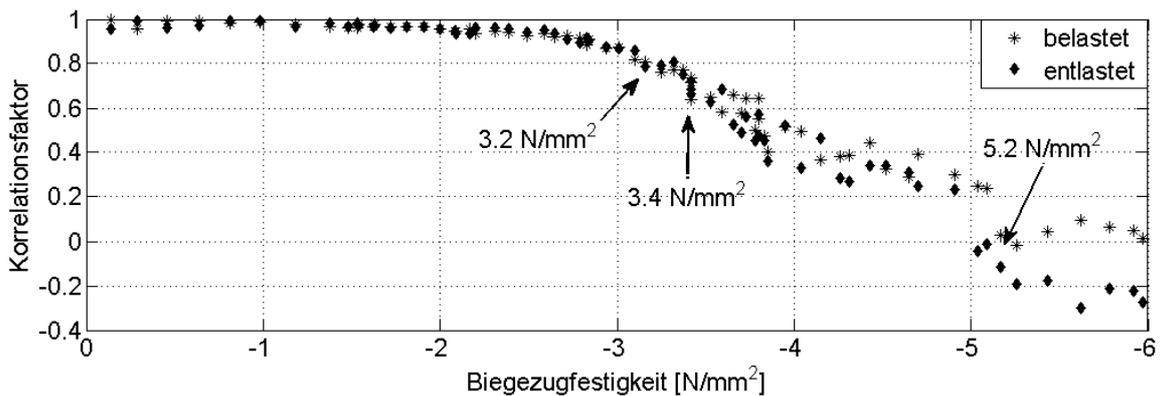


Abb. 4 Entwicklung des Korrelationsfaktors mit zunehmender Last, im belasteten und entlasteten Zustand.

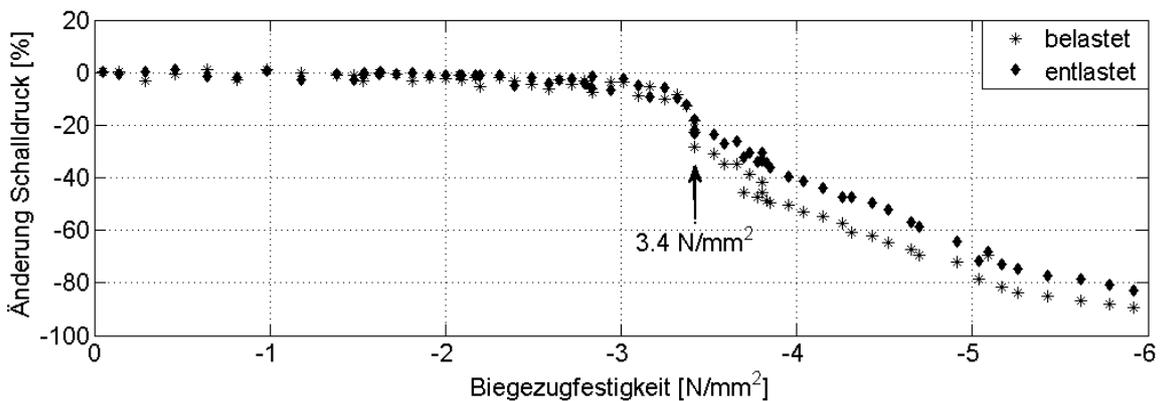


Abb. 5 Entwicklung des Schalldrucks mit zunehmender Last, im belasteten und entlasteten Zustand.

### 3.2 Schallemission

Die Auswertung der Schallemission beinhaltet nur lokalisierte Ereignisse. Abb. 6 zeigt die Aktivität der Schallemission über die angelegte Last. Die Aktivität wird als Anzahl der Hits je Biegezugfestigkeitsintervall von  $0,05 \text{ N/mm}^2$  gemessen. Unterhalb des Lastniveaus von  $2,8 \text{ N/mm}^2$  ist die Aktivität der Schallemission gering. Die lokalisierten Events entstehen

hauptsächlich durch die aktive Durchschallung mit den eingebetteten Ultraschallsensoren. Die ersten Events die auf die Entstehung von Rissen zurückzuführen sind, entstehen mittig, an der unteren Seite des Balkens, bei  $2,8 \text{ N/mm}^2$ . Die Aktivität nimmt danach zu und hat ihr Maximum bei einer Biegezugfestigkeit von  $3,4 \text{ N/mm}^2$ , was einhergeht mit der Ausbreitung des Risses nach oben, in Richtung Lasteintrag (siehe auch Abb. 7a. und b.). Nach moderater Aktivität zwischen  $3,9 \text{ N/mm}^2$  und  $4,8 \text{ N/mm}^2$  steigt sie wieder, durch die Ausbildung von zusätzlichen Rissen, auf ein Maximum von  $5,1 \text{ N/mm}^2$ . In der Abb. 7 sind die Ergebnisse der Lokalisierung bei den Biegezugfestigkeiten von  $3,2 \text{ N/mm}^2$ ,  $3,4 \text{ N/mm}^2$  und  $3,8 \text{ N/mm}^2$  dargestellt, da es bei diesen Laststufen zu Unstetigkeiten in den Ergebnissen der aktiven Durchschallung mit den eingebetteten Ultraschallsensoren kommt.

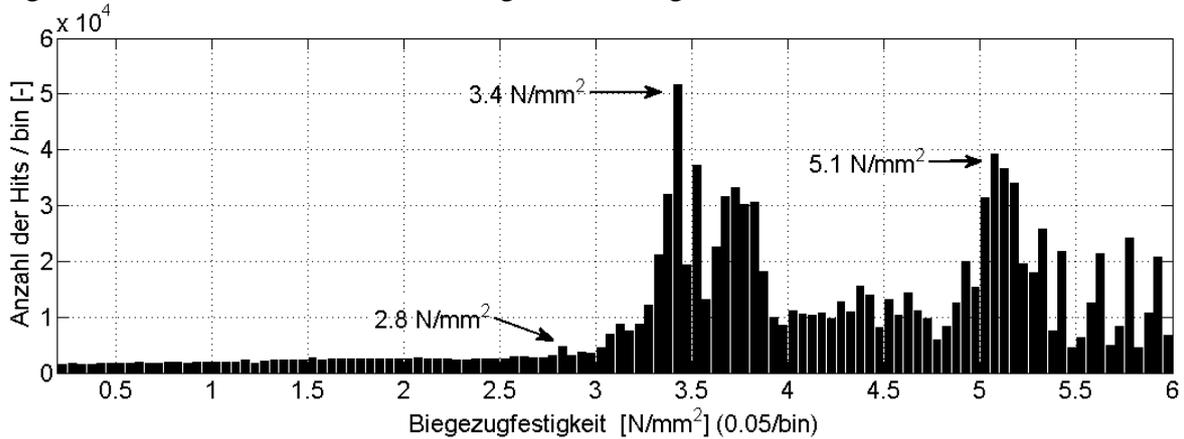


Abb. 6 Entwicklung der Schallemission über die angelegte Last.

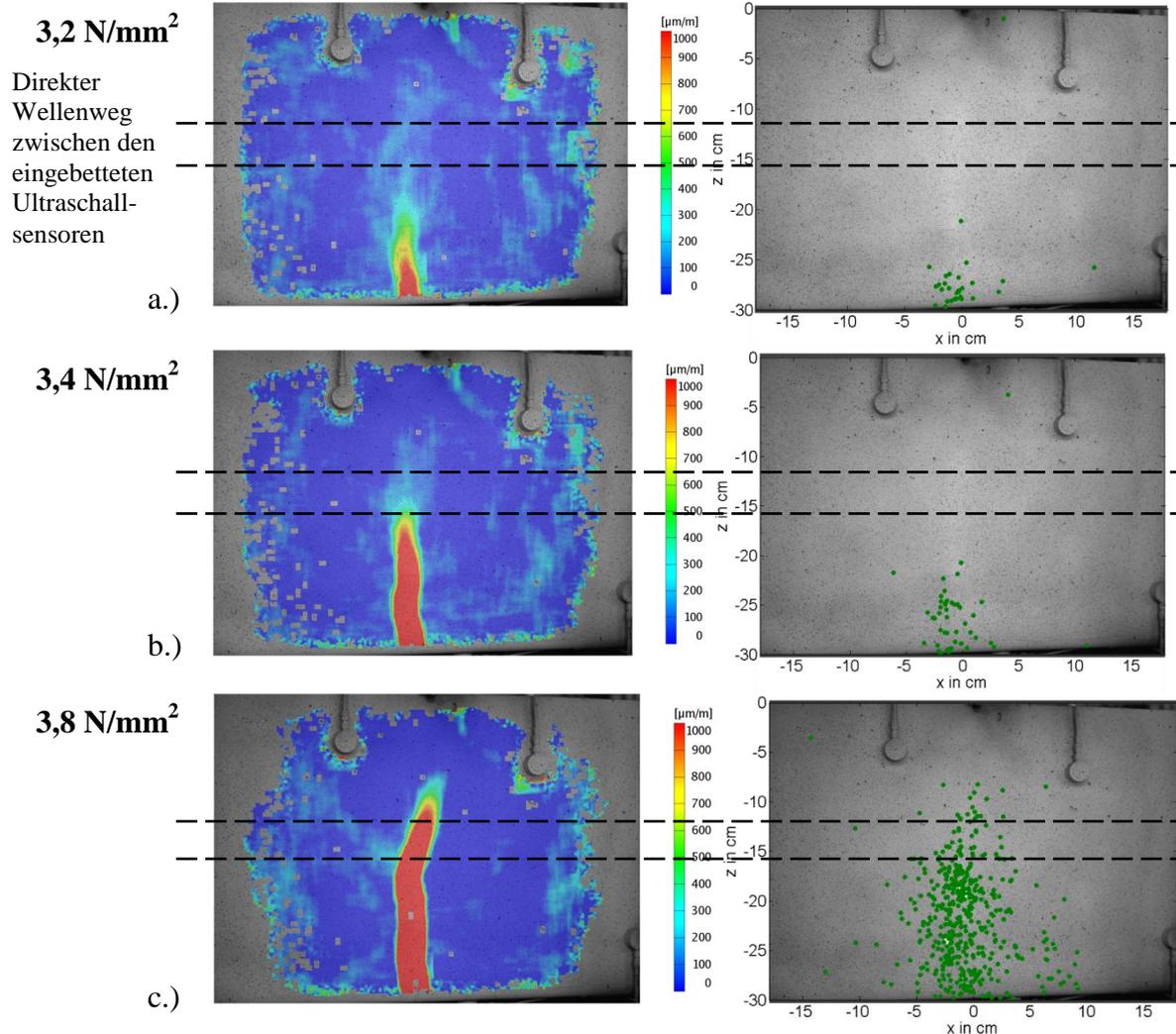
### 3.3 Digitale Bildkorrelation

Fotos für die digitale Bildkorrelation werden bei jeder Laststufe im belasteten und entlasteten Zustand genommen. Erste Anzeichen einer Deformation gibt sich bei einer Biegezugfestigkeit von  $2,8 \text{ N/mm}^2$ , was mit den Ergebnissen der Schallemission korreliert.

Die Abb. 7a.) zeigt das Ergebnis der digitalen Bildkorrelation bei der Biegezugfestigkeit von  $3,2 \text{ N/mm}^2$ , wo der Korrelationsfaktor zwischen den Signalen, gesendet und empfangen mit den eingebetteten Ultraschallsensoren, auf 0,8 sinkt. Mit dem einfachen Auge ist noch kein Riss erkennbar. Durch die digitale Bildkorrelation ist jedoch die Ausbreitung der Verformungen nach oben in Richtung Lasteintrag eindeutig sichtbar. Die gestrichelten Linien in der Abb. 7 markieren die Einbautiefe der eingebetteten Ultraschallsensoren. Daraus wird sichtbar, dass der sich bildende Riss bereits die Ultraschallsignale beeinflusst, obwohl dieser nicht im direkten Weg der Welle liegt. Das erklärt sich mit den gestreuten Wellenanteilen, die das geschädigte Gebiet durchlaufen und das empfangene Signal, gegenüber einem ungestörten Referenzsignal, verändern. Die Ähnlichkeit zwischen den Ultraschallsignalen nimmt ab, der Korrelationsfaktor fällt.

Bei  $3,4 \text{ N/mm}^2$  fällt der Korrelationsfaktor weiter, zudem nimmt der Schalldruck der Ultraschallsignale ab. Der Riss ist nun mit dem einfachen Auge erkennbar. (Abb. 7b. links) zeigt die zunehmende Ausbreitung der Verformung in Richtung Lasteintrag, was gut mit der Lokalisierung der akustischen Quellen korreliert (Abb. 7b. rechts).

Eine Veränderung der Geschwindigkeit der Ultraschallsignale ist ab der Biegezugfestigkeit von  $3,8 \text{ N/mm}^2$  (Abb. 7c.) zu beobachten. Die Verformung der Oberfläche und Lokalisierung der akustischen Ereignisse, zeigen eine Ausbreitung des Risses in den direkten Weg der Welle, die zwischen den eingebetteten Ultraschallsensoren verläuft. Da der Riss den Wellenweg kreuzt, verlängert sich die Laufzeit der Welle und die berechnete Geschwindigkeit nimmt ab.

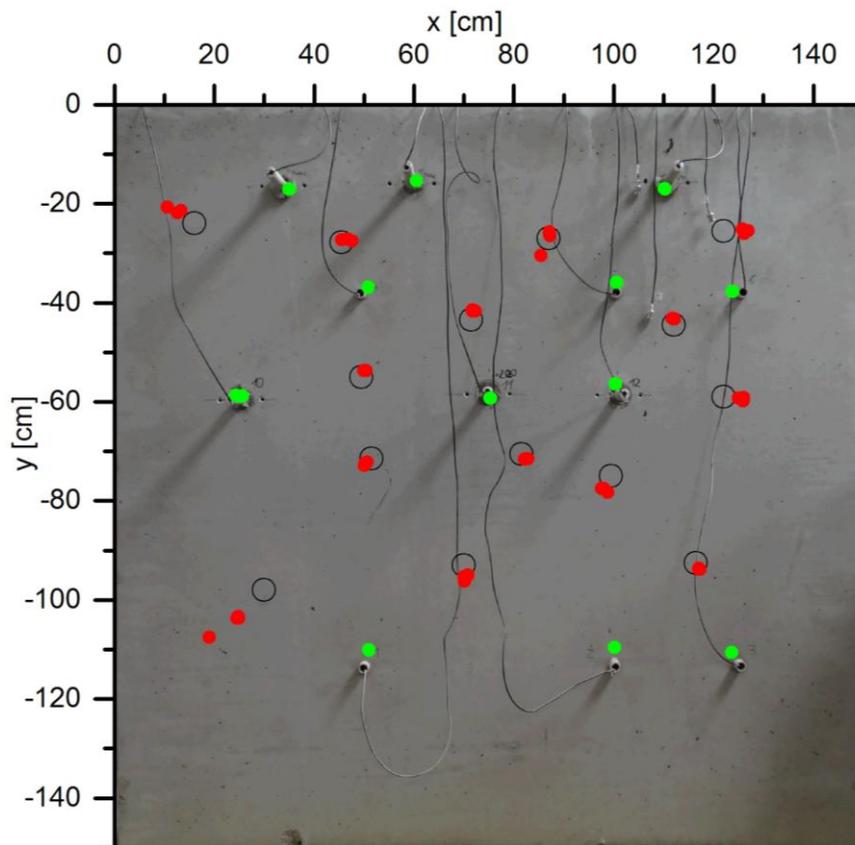


**Abb. 7** Links: Mit der digitalen Bildkorrelation bestimmte Verformung der Oberfläche des Betonbalkens. Rechts: Die lokalisierten Ereignisse der Schallemission. Für die Biegezugfestigkeiten 3,2 N/mm<sup>2</sup> (a.), 3,4 N/mm<sup>2</sup> (b.) und 3,8 N/mm<sup>2</sup> (c.).

### 3.4 Eingebettete Sensoren für die Schallemission

Die Abb. 8 zeigt die Ergebnisse der Lokalisierung der akustischen Ereignisse aus dem Inneren (grüne Punkte) und auf der Oberfläche (rote Punkte) vom Probekörper (Abb. 2). Die lokalisierten Messungen aus dem Inneren des Probekörpers, mit den eingebetteten Ultraschallsensoren als Quelle, stimmen mit der Sensorposition überein. Die Lokalisierung der durch einen Bleistiftmientest erzeugten Quellen an der Probekörperoberfläche, liegt innerhalb von  $\pm 3$  cm um die markierte Positionen (Kreise in Abb. 8), wenn die Sensorabdeckung ausreichend gut ist. Die Ereignisse außerhalb des Sensornetzwerkes konnten nicht korrekt lokalisiert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die eingebetteten Ultraschallsensoren [2], neben ihrer aktiven Nutzung für die Durchschallung, auch für die passive Nutzung in der Schallemission eignen. Ihre dauerhafte konstante Ankopplung und ihre Einbettung in tiefer liegende Bereiche eines Bauteils, ermöglichen die langzeitige Überwachung von Gebieten, die von der Oberfläche aus nicht mehr erreichbar wären. Ob durch die Nutzung dieser Sensoren auch die Entfernung zwischen Empfänger und der Quellen der akustischen Emission erhöht werden kann, wird Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.



**Abb. 8** Die lokalisierten akustischen Ereignisse am Probekörper aus Abb. 2. Grüne Kreise markieren die Ereignisse aus dem Inneren des Probekörpers (mit eingebetteten Sensoren als Quelle), rote Kreise markieren die Ereignisse auf der Oberfläche des Probekörpers (mit dem Brechen von Bleistiftmienen als Quelle). (aus [19]).

#### 4. Zusammenfassung

Für die Detektion von Änderungen im Betonzustand ist die Schallemission das Empfindlichste der für diesen Artikel genutzten ZiF-Verfahren. Mit der Schallemission wird die Entstehung von Mikrorissen im Inneren des Balkens detektiert und lokalisiert. Die digitale Bildkorrelation hingegen erfasst kleinste Verformungen der Oberfläche, die durch das Durchbiegen des Balkens verursacht werden.

Die Empfindlichkeit der eingebetteten Ultraschallsensoren, die für die dauerhafte Überwachung von Zustandsänderungen tief in einem massiven Betonbauteil entwickelt sind, hängt von den untersuchten Signalparametern und damit von der gewählten Signalanalysemethode ab. Die Ankunftszeit des Signals beispielsweise verändert sich, wenn ein Riss den direkten Wellenweg kreuzt. Andere Signalparameter sind empfindlicher gegenüber Veränderungen. Mit der Kreuzkorrelation werden Veränderungen im gesamten Signal berücksichtigt, auch der gestreute, später eintreffende Anteil. Die veränderte Schwächung des Schalldrucks kann zur Analyse hinzugezogen werden, da die Ankopplung konstant ist. Die Auswertung der Signalschwächung führt zur frühzeitigen Erfassung eines Risses, bevor dieser den direkten Schallweg kreuzt. Unter Verwendung der Korrelationsmethode konnte die Schädigung sogar detektiert werden, bevor diese die Oberfläche erreicht. Beide Auswertemethoden erfassen klare Unterschiede zwischen dem belasteten und unbelasteten Zustand.

Mit den einzubettenden Ultraschallsensoren können Betonelemente in Bezug auf Rissentstehung und -ausbreitung über längere Zeiträume überwacht werden. Die Sensoren werden in die Betonelemente mit eingebettet, was es ermöglicht auch unzugängliche oder

tiefer liegende Bereiche einer Baustruktur zu beobachten. Da sich die Sensoren gut für die passive Überwachung mit der Schallemission eignen, ist auch die Lokalisierung von Ereignissen in bisher schlecht erreichbaren Gebieten denkbar.

Das von den gestreuten Wellenanteilen durchlaufende Volumen und damit die möglichen Abstände zwischen einer Sensoranordnung und der Schädigung, ist Gegenstand von aktuellen Untersuchungen [20]. Die Empfindlichkeit der Sensoren, bei passiver Nutzung, akustische Ereignisse auch bei größerem Sensorabstand zu detektieren, ist ebenfalls Ziel zukünftiger Experimente.

## Referenzen

- [1] A. Zoega, Spannungsabhängigkeit elastischer Wellen in Beton, Berlin: BAM, 2011.
- [2] J. Wolf, E. Niederleithinger, F. Mielentz, S. Grothe und H. Wiggenhauser, „Überwachung von Betonkonstruktionen mit eingebetteten Ultraschallsensoren,“ *Bautechnik*, November 2014.
- [3] M. Collepardi, The new concrete, Mario Collepardi, 2006.
- [4] Reinhardt, „Beton,“ in *BetonKalender 2007*, Ernst & Sohn, 2007, pp. 355 - 389.
- [5] Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer, 1986.
- [6] J.-F. Chaix und I. Lillamand, „Study of acoustoelasticity behaviour of concrete material under uniaxial compression,“ in *155th Meeting Acoustical Society of America*, Paris, France, 2008.
- [7] P. Shokouhi und A. Zoega, „Surface Wave Velocity-Stress Relationship in Uniaxially Loaded Concrete,“ *ACI Materials Journal*, pp. 141 - 148, 2012.
- [8] A. Quiviger, P. Payan, J.-F. Chaix und V. & S. J. Garnier, „Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete,“ *NDT & E International*, pp. 128 - 132, 2012.
- [9] S. K. Ramamoorthy, Y. Kane und J. A. Turner, „Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete,“ *Journal of Acoustic Society of America*, pp. 523 - 529, 2004.
- [10] E. DIN, *12504-4: Prüfung von Beton in Bauwerken--Teil 4: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit; Deutsche Fassung EN 12504-4: 2004*, 2004.
- [11] R. Jones und I. Facaoaru, „Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method,“ *Materiaux Et Construction*, 1969.
- [12] I. Bronstein und K. A. Semendjajew, Taschenbuch der Mathematik, Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 1979.
- [13] P. Anugonda, J. S. Wiehn und J. A. Turner, „Diffusion of ultrasound in concrete,“ *Ultrasonics*, pp. 429 - 435, 2001.
- [14] C. U. Große, Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall, Stuttgart: Universität Stuttgart, 1996.
- [15] A. Behnia, H. K. Chai und T. Shiotani, „Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission,“ *Construction and building materials*, pp. 282 - 302, August 2014.
- [16] M. Huang, L. Jiang, P. K. Liaw, C. R. Brooks, R. Seelev und D. L. Klarstrom, „Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research,“ *Member Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, November 1998.
- [17] F. Hild und S. Roux, „Digital Image Correlation: from Displacement Measurement to

- Identification of Elastic Properties - a Review," *Strain*, pp. 69 - 80, 2006.
- [18] Q. Lin und J. F. Labuz, „Fracture of sandstone characterized by digital image correlation," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, pp. 235 - 245, 2013.
- [19] E. Niederleithinger, J. Wolf, F. Mielentz, H. Wiggerhauser und S. Pirskawetz, „Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring," *sensors*, pp. 9756 - 9772, April 2015.
- [20] K. Chinaemerem, „Time - lapse monitoring of localized changes within heterogeneous media with scattered waves," Colorado School of Mines, Colorado, USA, 2014.