



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

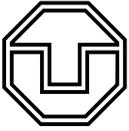
**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 40



Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

## **8. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN**



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

---

Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**8. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 40

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf  
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine  
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller  
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd W. Zastrau

Institut für Massivbau  
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 42 77  
Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer  
Korrekturen: Angela Heller  
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan  
Titelfoto: Kathrin Dietz  
Probebelastung an Fahnenstangen am Goldenen Reiter in Dresden

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf [www.qucosa.de](http://www.qucosa.de)

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz  
Veröffentlicht: Dresden, September 2015

ISSN 1613-6934

## Inhalt

DAfStb-Sachstandbericht <i>Mechanische Kennwerte historischer Betone, Betonstähle und Spannstähle für die Nachrechnung bestehender Bauwerke</i> <i>Jürgen Schnell, Michael Weber</i> .....	5
Dynamik von Stahlbetonbrücken – Messprojekte aus dem Eisenbahn- und Straßenverkehr <i>Lutz Auersch, Samir Said</i> .....	17
Messtechnische Überlegungen bei Fallversuchen <i>Tino Kühn</i> .....	31
Identifikation dynamischer Strukturparameter von Eisenbahnbrücken mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie <i>Jens Schneider, Matthias Becker, Andrei Firus, Jiny Pullamthara, Michael Drass</i> .....	47
Einsatzmöglichkeiten der Schallemissionsanalyse im Bauwesen <i>Stephan Pirskawetz, Julia Wolf, Wolfram Schmidt, Andreas Rogge</i> .....	61
Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens-André Paffenholz, Ulrich Stenz, Ingo Neumann</i> .....	73
Experimentelle Untersuchung zum Systemtragverhalten neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens Piehler, Michael Hansen, Gerd Kapphahn</i> .....	81
Tragfähigkeitsuntersuchungen an historischen Fahnenmasten <i>Silke Scheerer, Sabine Wellner, Torsten Hampel, Bernd Eckoldt</i> .....	93
Pont Lagunaire, Togo – Experimentelle Tragwerksanalyse einer Stahlfachwerkbrücke zum Nachweis der Restnutzungszeit <i>Marc Gutermann, Werner Malgut, Klaus Ammermann</i> .....	103
Experimenteller Nachweis der Tragfähigkeit an der Kettenbrücke im Goethepark in Weimar <i>Erik Meichsner, Phillip Johann Jung, Oliver Hahn, Stefan Finke</i> .....	117
Untersuchungen und Maßnahmen an setzungsauffälligen Pfeilern der Saale-Elster-Talbrücke der Eisenbahnstrecke Erfurt–Leipzig/Halle <i>André Koletzko, Sandra Christein</i> .....	123
Bewertung bestehender Brücken unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung durch Bauwerksmonitoring <i>Nico Steffens, Karsten Geißler, Ronald Stein</i> .....	135

Lagrange-Multiplikator-Test zur Detektierung von zunehmender Strukturschädigung:  
Experimentelle Verifikation  
*Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Werner Daum,  
Detlef Hofmann, Frank Basedau* ..... 147

Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen mithilfe der dynamischen Eigenschaften  
*F. Weisleder, M. Waltering*..... 159

Softwareunterstützte Nachrechnung und Ertüchtigung von Brückenbauwerken  
*Stefan Kimmich, Eckhard Held* ..... 175

## Einsatzmöglichkeiten der Schallemissionsanalyse im Bauwesen

Stephan Pirskawetz<sup>1</sup>, Julia Wolf<sup>2</sup>, Wolfram Schmidt<sup>3</sup>, Andreas Rogge<sup>4</sup>

**Kurzfassung.** Die Schallemissionsanalyse (SEA) ist ein passives zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem Rissbildung, Risswachstum und andere Gefügeveränderungen detektiert und lokalisiert werden können. Anhand von zwei Beispielen aus der Forschung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wird gezeigt, welche Möglichkeiten die SEA beim Bauwerksmonitoring und bei der Untersuchung von Baustoffen bietet. Im ersten Beispiel wird die Ortung von Schallemissionen zur Verfolgung des Risswachstums in Beton eingesetzt. Weiterhin wird mit Zugversuchen an Faserbeton illustriert, dass mit der SEA Versagensmechanismen identifiziert werden können.

**Application possibilities of Acoustic Emission Testing (AET) in Civil Engineering – Abstract.** *Acoustic Emission Testing (AET) is a passive and nondestructive method for detection and localization of crack development, crack growth and other microstructural changes. The potential of AET for Structural Health Monitoring and the testing of building materials are shown by two case studies conducted by the BAM. The first example shows how the localization of acoustic emissions can be used to track crack growth in concrete. The second example demonstrates through tensile testing the ability of AET to identify failure mechanisms in fiber-reinforced concrete.*

### 1 Einleitung

In Anbetracht der alternden Verkehrsinfrastruktur und den Herausforderungen der Energiewende gewinnt die Dauerüberwachung von Bauwerken wie Brücken und Windenergieanlagen an Bedeutung. Mit der Schallemissionsanalyse steht für solche Aufgaben ein potentielleres Werkzeug zur Verfügung, mit dem kritische Belastungszustände und Schäden früh und in Echtzeit erkannt werden können. Bei der Entstehung und dem Wachstum von Rissen wird ein Teil der elastischen Energie eines unter Spannung stehenden Materials in Form von Schallwellen freigesetzt. Auch durch Reibung der Ufer bereits vorhandener Risse oder durch Reibung an Grenzflächen verschiedener Materialien entstehen solche als Schallemissionswellen bezeichneten Wellenpakete. Sie breiten sich von der Quelle ausgehend im Material aus und verursachen an der Oberfläche dynamische Verschiebungen. Diese können mit geeigneten Messsystemen registriert werden. Die Charakteristik der Schallemissionen wird durch den Entstehungsprozess, die Eigenschaften der Materialkomponenten und die elastischen Eigenschaften des Materials bestimmt. Die Aufzeichnung und Analyse von Schallemissionen ist eine passive, zerstörungsfreie Methode zur Untersuchung von Gefügeveränderungen im Moment des Entstehens.

---

1 Dipl.-Ing., BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abteilung Bauwerkssicherheit, Berlin

2 Dipl.-Geophys., BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abteilung Bauwerkssicherheit, Berlin

3 Dr. Dipl.-Ing., BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abteilung Bauwerkssicherheit, Berlin

4 Dr.-Ing., BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abteilung Bauwerkssicherheit, Berlin

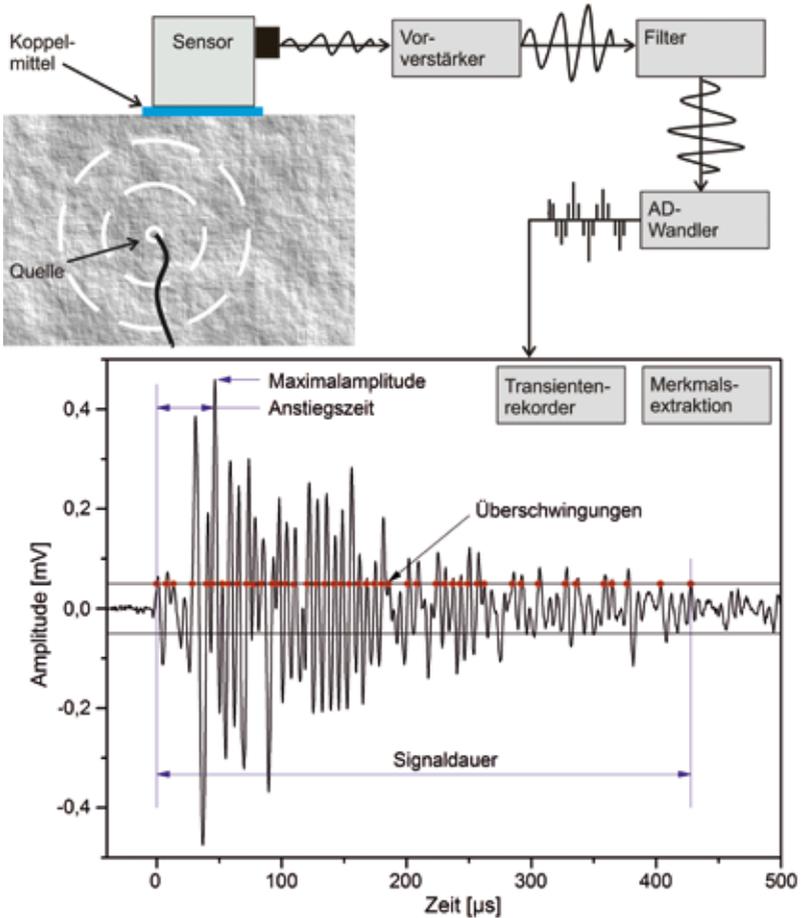


Bild 1 (oben):  
Schallemissionsmesskette und Schallemissionssignal mit Beispielen für extrahierte Signalmerkmale



Bild 2 (links):  
Schallemissionssensor zum Einbetten in Beton

Zur Umwandlung der Oberflächenverschiebungen in elektrische Signale können kapazitive, induktive, optische oder piezoelektrische Sensoren eingesetzt werden. Die mit Abstand breiteste Anwendung finden piezoelektrische Sensoren. Sie sind vergleichsweise preiswert, robust, haben eine hohe Empfindlichkeit und decken in verschiedenen Bauformen ein breites Frequenzspektrum ab. Die piezoelektrischen Sensoren müssen mit geeigneten Koppelmitteln wie Ölen, Fetten, plastischen Dichtmassen oder Klebern akustisch an die Oberflächen der zu prüfenden Objekte angekoppelt und gegebenenfalls mit Haltevorrichtungen fixiert werden. Das Ausgangssignal der Sensoren in Form einer elektrischen Spannung wird verstärkt, digitalisiert und gefiltert. Anschließend werden Signalmerkmale wie die Ankunftszeit am Sensor, Maximalamplitude, Anstiegszeit und Signaldauer extrahiert und, je nach Ausstattung des Messsystems, zusammen mit dem Signalverlauf gespeichert. Bild 1 zeigt eine typische Schallemissionsmesskette sowie ein Schallemissionssignal mit einigen Merkmalen. Weiterführende Informationen zur Schallemissionsprüfung sind z. B. in [1], [2] und [3] zu finden.

Bei der Auswertung von Schallemissionsmessungen wird zwischen der merkmalsbasierten [4] und der signalbasierten [5] Analyse unterschieden. Dies kann durch die Entwicklung der Messtechnik begründet werden. Während heute alle hochwertigen Schallemissionssysteme in der Lage sind, neben den Signalmerkmalen auch die digitalisierten Wellenformen aufzuzeichnen, hieß es noch 1987 in [6]: „Few acoustic emission systems are capable of recording all of the test data.“ Für viele technische und wissenschaftliche Anwendungen genügt aber schon eine merkmalsbasierte Analyse. Sie erlaubt bei ausreichender Anzahl von Sensoren die Lokalisierung von Schallereignissen und in einigen Fällen eine Schadensquantifizierung sowie die Klassifikation von Bruchmechanismen. Mit Zugriff auf die Signalformen bei der signalbasierten Analyse können die Ergebnisse verbessert werden. So ist zum Beispiel durch die Präzisierung der Ankunftszeitbestimmung der Schallemissionen an den Sensoren eine Verbesserung der Ortungsergebnisse möglich [7]. Die Methode der Momententensorinversion (MTI) bietet eine, wenn auch sehr aufwendige, Möglichkeit der Identifikation von Bruchtyp und -orientierung [8].

Die merkmalsbasierte Analyse bzw. Bewertung von Schallemissionen gehört in der Verfahrenstechnik zu den Standardwerkzeugen zur Prüfung von Druck- und Lagertanks, Rohrleitungen, Ventilen und anderen Anlagenteilen. Einige Anwendungsbeispiele enthält das Compendium AT [9]. Mit der Schallemissionsprüfung können große Strukturen geprüft und Defekte lokalisiert werden, auch wenn Anlagenteile nicht direkt zugänglich sind. Typische Defektanzeigen sind hohe lokale Schallemissionsaktivitäten oder -intensitäten in Abhängigkeit von der Belastung oder der Zeit. Die Bewertung der Schallemissionen erfolgt parallel zur Prüfung, so dass die Gefahr des Versagens der Struktur sehr früh erkannt und die Prüfbelastung abgebrochen werden kann. Im Anschluss an die Prüfung können Empfehlungen zur Wartung, zum Betrieb und zu weiteren Prüfungen der Anlage gegeben werden. Wie effektiv die Schallemissionsanalyse zur frühzeitigen Erkennung von Schäden eingesetzt werden kann zeigt zum Beispiel, dass durch ihre Einführung als wiederkehrende Prüfung für Lagertanks aus faserverstärkten Kunststoffen Anfang der 1980er Jahre die Zahl der schweren Unfälle infolge von Materialversagen deutlich reduziert werden konnte [10]. Eine Auswahl an Normen zur Schallemissionsprüfung ist z. B. in [11] zu finden.

Im Gegensatz zur routinemäßigen Anwendung der Schallemissionsanalyse im Bereich der Verfahrenstechnik tragen die Anwendungen im Bauwesen einen deutlichen Forschungscha-

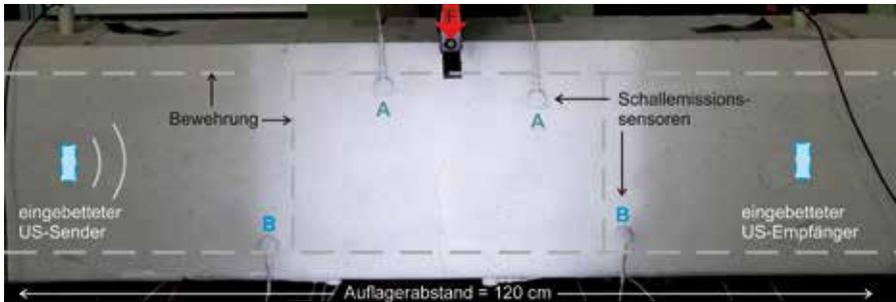


Bild 3: Aufbau des Biegeversuchs an einem bewehrten Betonbalken

rakter. In der Literatur ist eine große Zahl von Berichten über Schallemissionsprüfungen im Bauwesen zu finden.

Ein wichtiges Thema im Bauwesen ist die Zustandsbewertung und Überwachung von Brücken. In einem über 22 Monate angelegten Projekt wurde in Minnesota, USA, die Eignung der Schallemissionsanalyse von kritisch bewerteten Stahlbrücken untersucht [12]. An der gewählten Brücke konnten im Projektzeitraum unter Verkehrslast keine Anzeigen für Rissbildungen detektiert werden. Die Autoren des Berichtes werten dies als positives Ergebnis und empfehlen die Überwachung weiterer Stahlbrücken. In der Schweiz wurden die Spannglieder der Spannbetonbrücke Ponte Moesa in Roveredo über einen Zeitraum von mindestens 12 Monaten überwacht [13]. Mit der Schallemissionsanalyse konnten in dieser Zeit 13 Drahtbrüche detektiert und lokalisiert werden. Die Drahtbrüche konnten durch Öffnung der lokalisierten Bereiche bestätigt werden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden zunächst weitere Untersuchungen veranlasst und schließlich entschieden, die Brücke zu ersetzen. Weitere Beispiele für das Monitoring von Spanngliedern in Brücken kommen aus England [14] und Japan [15]. Die Applikation von Schallemissionssystemen zur Detektion von Rissen im Beton von Brücken und in gemauerten Brücken wird in [16] beschrieben.

## 2 Messungen der BAM

In der Abteilung Bauwerkssicherheit der BAM wird die Schallemissionsanalyse seit 2006 zur Untersuchung von Gefügeveränderungen in zementgebundenen Bauwerkskomponenten genutzt. Die Arbeitsschwerpunkte reichen dabei von Hydratationsvorgängen über Brandverhalten und Alkali-Kieselsäure-Reaktion bis zum Ermüdungsverhalten. Anhand von zwei aktuellen Beispielen wird im Folgenden illustriert, wie die Schallemissionsanalyse zum Verständnis von Schädigungsmechanismen beitragen und zur Entwicklung von Monitoringsystemen eingesetzt werden kann. Die Schallemissionen wurden in beiden Beispielen mit dem Messsystem AMSY 6 der Firma Vallen Systeme GmbH aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgte mit der Software VisualAE dieser Firma.

### 2.1 Biegeversuch am bewehrten Betonbalken

Bei der Überwachung von Betonbauwerken mit Ultraschall stellt insbesondere die dauerhafte und zuverlässige Ankopplung der Sensoren eine Herausforderung dar. Um dieses Problem zu

lösen, hat die Firma Acoustic Control Systems, Ltd. (ACS, Moskau, Russland) in Kooperation mit der BAM einen Ultraschallsensor entwickelt, der in den Beton eingebettet werden kann [17], [18] (Bild 2). Je nach Messaufgabe kann damit die Schallgeschwindigkeit zwischen zwei Sensoren oder auch im Volumen zwischen Sensoren in einem ganzen Netzwerk bestimmt werden. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit kann zur Überwachung der Rissbildung dienen, wobei aber beachtet werden muss, dass die Schallgeschwindigkeit auch durch Temperatur und Feuchte beeinflusst wird. Zum Test der Sensoren hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit bei der Detektion von Rissbildungen wurden je zwei Sensoren im Abstand von 90 cm in Balken mit den Abmessungen 120 cm × 20 cm × 30 cm einbetoniert. Um ein spontanes Versagen im Biegezugversuch zu verhindern, wurden vier Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 8 mm als Längsbewehrung eingelegt. Im Abstand von jeweils 15 cm wurden diese durch Bügel umfasst. Die Betondeckung betrug 2 cm. In Dreipunkt-Biegeversuchen wurden definiert Risse in diesen Balken erzeugt und dabei die Schallgeschwindigkeiten gemessen. Bild 3 zeigt einen Ausschnitt eines Versuchsaufbaus. Die Belastung der Balken erfolgte in Wegregelung stufenweise, wobei die Balken nach jeder Laststufe vollständig entlastet wurden. In jedem Belastungszustand und in den jeweils folgenden Entlastungsphasen wurden Ultraschallmessungen mit den eingebetteten Sensoren durchgeführt.

Die Dehnung der Balken und die Rissöffnung wurden mit induktiven Wegaufnehmern sowie digitaler Bildkorrelation erfasst. Die Schallemissionsanalyse wurde als weiteres Verfahren zur Verfolgung der Rissbildung eingesetzt. Dafür wurden jeweils vier Schallemissionssensoren des Typs VS150MS mit Prestik-Klebe pads von Bostik an der Vorder-, Unter- und Rückseite der Balken angekoppelt. Die Sensoren wurden so angeordnet, dass der zu erwartende Hauptriss innerhalb des von den Sensoren aufgespannten Volumens lag.

Bild 4 zeigt am Beispiel eines Balkens die aus der Belastung resultierenden rechnerischen Spannungen an der Balkenunterseite sowie die zugehörigen, über eine Länge von 250 mm inklusive der Rissöffnung gemessenen, Dehnungen. Zusätzlich sind die nach jeder Belastung bzw. Laststufe im entlasteten Zustand gemessenen Dehnungen dargestellt. Ab Laststufe 34 ist ein deutlicher Anstieg der Dehnungen zu verzeichnen. Auch im entlasteten Zustand sind ab hier noch signifikante bleibende Dehnungen vorhanden, die auf eine Rissbildung während der vorherigen Belastung bis 3,0 N/mm<sup>2</sup> schließen lassen.

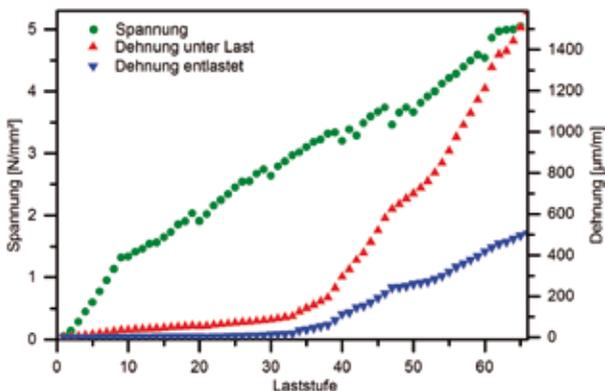
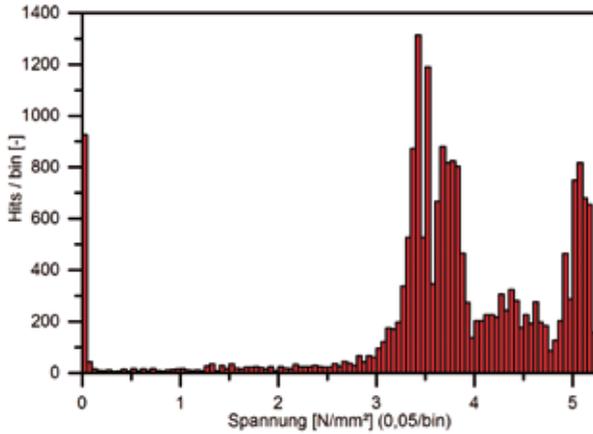


Bild 4:

Aus der stufenweisen Belastung resultierende Spannungen und Dehnungen, aufgenommen mit der Kraftmessdose der Prüfmaschine und einem induktiven Wegaufnehmer über eine Messlänge von 250 mm an der Balkenunterseite



Auch die Schallemissionsaktivität, in Bild 5 dargestellt in Form eines Histogramms durch die Anzahl der aufgezeichneten Ereignisse in einem definierten Spannungsintervall (Intervallgröße 0,05 N/mm<sup>2</sup>) in Abhängigkeit von der Zugspannung, zeigt einen deutlichen Anstieg ab einer Spannung von 3,0 N/mm<sup>2</sup>. Sie erreicht bei 3,4 N/mm<sup>2</sup> (Laststufe 43) ein Maximum und fällt dann bis 4,0 N/mm<sup>2</sup> auf ein relativ stabiles Niveau. Ab 4,9 N/mm<sup>2</sup> (Laststufe 61) ist wieder ein signifikanter Anstieg der Schallemissionsaktivität erkennbar.

Bild 5: Schallemissionsaktivität in Abhängigkeit der Spannung

Die Erklärung für dieses Verhalten liefern die Ortungsdiagramme im Bild 6. Hierin zeigt Diagramm A die Vorderansicht des Balkens mit den georteten Schallemissionsereignissen. In

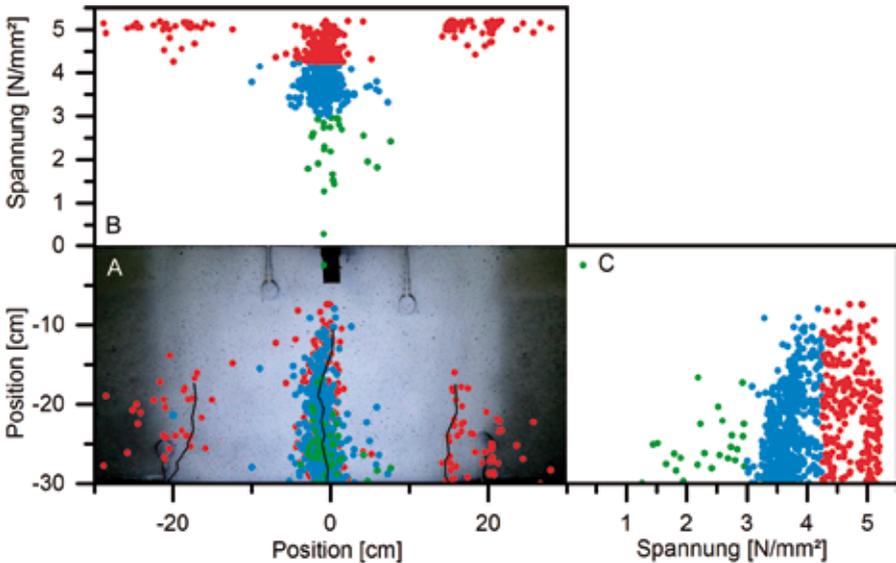


Bild 6: Lokalisierungsergebnisse in Abhängigkeit von der Spannung

Diagramm B ist die Verteilung der Schallereignisse entlang des Balkens und in Diagramm C die Verteilung über die Balkenhöhe in Abhängigkeit von der Spannung dargestellt.

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass schon ab  $1 \text{ N/mm}^2$  Schallemissionen lokalisiert werden können. Das deutet auf eine Mikrorissbildung hin, die sich zunächst mittig von der Unterseite des Balkens ausgehend nach oben ausbreitet.

Die Häufigkeit der ab  $3,0 \text{ N/mm}^2$  lokalisierbaren Ereignisse lässt auf eine Makrorissbildung schließen. Bei einer Spannung von ca.  $3,8 \text{ N/mm}^2$  reicht dieser Primärriss zentrisch von der Balkenunterseite ausgehend über zwei Drittel der Balkenhöhe. In Diagramm C in Bild 6 ist anhand der georteten Schallereignisse gut zu erkennen, dass die Rissbildung mit zunehmender Belastung von unten nach oben fortschreitet. Der Großteil der danach bei weiterer Laststeigerung messbaren Schallemissionsaktivität ist vermutlich nicht mehr auf Risswachstum, sondern auf Reibung zwischen Stahl und Beton bzw. auf Reibung an den vorhandenen Rissufern während der wiederkehrenden Be- und Entlastungen zurückzuführen. Erst ab einer Spannung von ca.  $4,6 \text{ N/mm}^2$  setzt wieder eine signifikante neue Rissbildung ein. Diagramm A in Bild 6 macht deutlich, dass diese Rissbildung  $15 \text{ cm}$  bis  $20 \text{ cm}$  rechts und links neben dem Primärriss beginnt.

In Diagramm A des Bildes 6 sind die nach Abschluss der Belastung an der Balkenoberfläche erkennbaren Rissverläufe nachgezeichnet. Insbesondere die zwischen  $3,4 \text{ N/mm}^2$  und  $4,3 \text{ N/mm}^2$  georteten Schallereignisse liegen eng am Primärriss. Zu beachten ist dabei, dass in der gewählten Darstellung alle im Volumen georteten Ereignisse auf die Oberfläche projiziert werden. Da die Rissfläche im Volumen natürlich nicht genau senkrecht zur Oberfläche verläuft, erscheint die durch die Ortungsergebnisse angezeigte Risszone breiter als der an der Oberfläche sichtbare Riss. Mit dem Risswachstum ist auch eine inhomogene Änderung der Schallgeschwindigkeit im Material verbunden. Dadurch werden die Ortungsergebnisse verfälscht. Bei einer homogenen Schallgeschwindigkeitsänderung wäre eine Korrektur, z. B. in Abhängigkeit von der Lastgeschichte, problemlos möglich. Für inhomogene Schallgeschwindigkeitsverteilungen bietet die Kombination aus Schallemissionsanalyse und Ultraschalltomographie einen Lösungsansatz [19]. Allerdings befindet sich diese Verfahrenskombination noch in der Entwicklungsphase.

Wie stark und ungleichmäßig sich die Schallgeschwindigkeit infolge der Rissbildung ändert, zeigt die zwischen drei Paaren von Schallemissionssensoren in Abhängigkeit von der Belastung bestimmte Schallgeschwindigkeit (Bild 7). Zwei der Sensor-

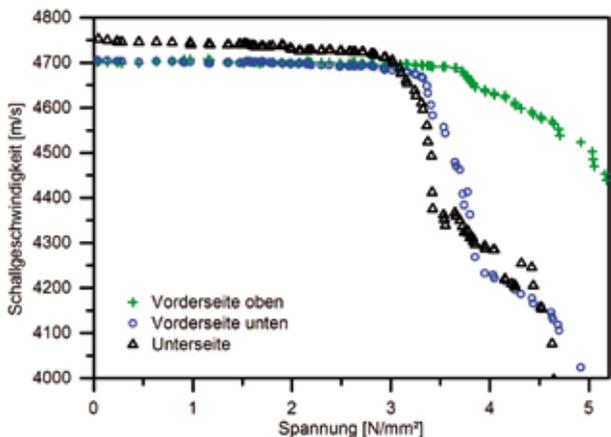


Bild 7: Änderung der Schallgeschwindigkeit infolge der Rissbildung

paare befanden sich auf der Balkenvorderseite und sind in Bild 3 mit A und B markiert. Das dritte Sensorpaar befand sich auf der Balkenunterseite. Gemessen wurden jeweils die Ankunftszeitdifferenzen der vom eingebetteten Ultraschallsender gesendeten Impulse an den Sensoren eines Paares.

An der Entwicklung der Schallgeschwindigkeiten lässt sich das Risswachstum abschätzen. So ist ein deutlicher Einfluss der Rissbildung auf die Schallgeschwindigkeit an der Balkenunterseite schon ab einer Belastung von ca.  $2,9 \text{ N/mm}^2$  erkennbar. Zwischen dem unteren Sensorpaar auf der Balkenvorderseite beeinflusst die mit zunehmender Belastung fortschreitende Rissbildung die Schallgeschwindigkeit erst ab einer Spannung von ca.  $3,2 \text{ N/mm}^2$ . Die sichtbare Spitze des Primärrisses erreicht zwar nicht die Verbindungslinie zwischen dem Sensorpaar A, trotzdem fällt auch zwischen diesen Sensoren ab einer Belastung von  $3,7 \text{ N/mm}^2$  die Schallgeschwindigkeit deutlich ab. Ein Teil der ab dieser Spannung georteten Schallereignisse befindet sich über der sichtbaren Risspitze. Das deutet auf eine Mikrorissbildung in der Rissprozesszone hin und erklärt die Verringerung der Schallgeschwindigkeit.

### **2.2 Zugversuch an hochduktilen Beton**

Das Verhalten hochduktiler Betone wird wesentlich durch das Zusammenspiel zwischen Fasern und Matrix bestimmt. Die dicht und gleichmäßig in der Matrix verteilten Fasern überbrücken die unter Zugbeanspruchung zunächst entstehenden Mikrorisse. Sie nehmen die Zugspannungen auf und stoppen lokal das Risswachstum. Die Mikrorisse werden dadurch fein in der Matrix verteilt. Ab der sogenannten Erstrissspannung kann der hochduktile Beton bei nahezu gleichbleibenden oder steigenden Spannungen wachsende Dehnungen aufnehmen, anstatt wie konventioneller Beton spontan zu versagen. Erst wenn die Mikrorissdichte zu groß wird, übersteigen die Spannungen die Zugfestigkeit der Fasern bzw. deren Verbundfestigkeit mit der Matrix. Die Fasern reißen dann oder werden aus der Matrix ausgezogen. Es kommt zur Bündelung lokaler Makrorisse in der Matrix und schließlich zur Entfestigung.

Beim Test solcher Betone in Hinblick auf die Optimierung der Mischungen ist die Identifikation der Schadensmechanismen und deren Zuordnung zum jeweiligen Spannungs-Dehnungs-Zustand von großem Interesse. In einer Studie der BAM wurde untersucht, ob die Schallemissionsanalyse geeignet ist, die beschriebenen Schadensmechanismen zu identifizieren.

Im Rahmen der Studie wurden Zugversuche an knochenförmigen Proben verschiedener Rezepturen und mit unterschiedlichen Faserarten durchgeführt. Die Probenform und die wichtigsten Abmessungen zeigt Bild 9. Den Mischungsentwurf für die Probe des hier stellvertretend vorgestellten Zugversuchs enthält Tabelle 1. Beim Zement handelt es sich um einen CEM I 42,5 und bei der Gesteinskörnung um einen Quarzsand mit einer maximalen Korngröße von  $0,3 \text{ mm}$ . Die PVA-Fasern (Polyvinylalkohol) mit einer Länge von  $12 \text{ mm}$ , einem Durchmesser von  $40 \text{ }\mu\text{m}$  und einer nominellen Zugfestigkeit von  $1800 \text{ MPa}$  wurden von der Kuraray Co. Ltd., Japan, bezogen.

Tabelle 1: Mischungsentwurf

Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	Flugasche [kg/m <sup>3</sup> ]	Sand [kg/m <sup>3</sup> ]	Fasern [M.-%]	Fließmittel [kg/m <sup>3</sup> ]	Stabilisierer [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftporenbildner [kg/m <sup>3</sup> ]
359	359	616	506	2,5	2,15	0,04	0,54

Nach der Betonage wurden die Proben zunächst 24 Stunden in den abgedeckten Silikonformen belassen. Nach dem Ausschalen wurden sie bis zwei Tage vor der Prüfung unter Wasser und die letzten 48 Stunden bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte gelagert. Während der Zeit der Wasserlagerung wurden die Einfüllseiten der Proben nass geschliffen. Die Prüfung erfolgte 28 Tage nach der Herstellung.

Belastet wurden die Proben in weggeregelten einaxialen Zugversuchen mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/s. Die Endstücke der Proben wurden jeweils über eine Länge von 35 mm zwischen zwei Stahlplatten geklemmt, welche gelenkig mit der Zugvorrichtung einer servohydraulischen Prüfmaschine verbunden waren. Die Dehnungsmessung erfolgte mit einem Wegaufnehmer über die Länge des schlanken Querschnitts der Probe.

Zwei Schallemissionssensoren vom Typ VS150MS wurden mit Prestik-Klebe pads (Bostik) im Abstand von 210 mm zueinander auf den breiten Enden der Probe angekoppelt. Die Qualität der Ankopplung wurde getestet, indem entsprechend ASTM E976 [20] an verschiedenen Punkten auf der Probenoberfläche Bleistiftminen mit einem Durchmesser von 0,3 mm und einer Härte 2H gebrochen wurden. Die so künstlich erzeugten Schallemissionen, nach den Entwicklern der Methode Hsu-Nielsen-Quelle genannt, wurden zudem zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in der Probe verwendet. Da die Position der Quellen genau bekannt war, konnte die im Ortungsalgorithmus verwendete Schallgeschwindigkeit so angepasst werden, dass die berechneten Quellpositionen mit den tatsächlichen übereinstimmten. Die so ermittelte Schallgeschwindigkeit erwies sich mit 3000 m/s als vergleichsweise gering. Wie Vergleichsmessungen an Proben ähnlicher Rezeptur ohne Fasern zeigten, lag dies am hohen w/z-Wert der Mischung und nicht am hohen Faseranteil.

In Bild 8 sind die Amplituden der registrierten Schallereignisse über der Dehnung der Probe und in Korrelation zur gemess-

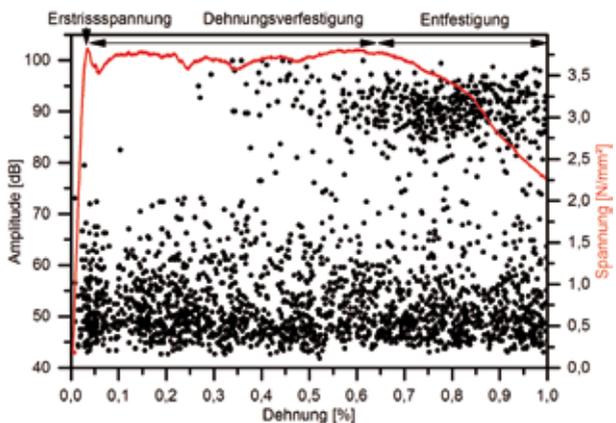


Bild 8: Amplituden der Schallereignisse in Korrelation zum Spannungs-Dehnungs-Diagramm

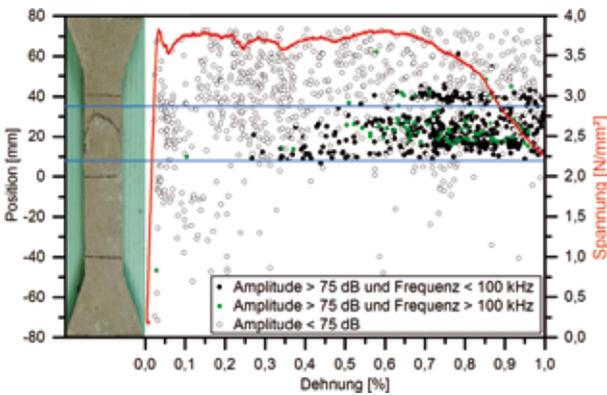


Bild 9: Lineare Ortung der Schallemissionsereignisse im Verlauf der Belastung

senen Spannung dargestellt. Bis zum Erreichen der Erstrissspannung von  $3,7 \text{ N/mm}^2$  bei einer Dehnung von  $0,03 \%$  ist die Anzahl der Schallemissionen zwar klein, ihr Auftreten lässt aber auch in dieser Phase schon auf die Bildung von Mikrorissen schließen. Mit weiterer Dehnung nimmt die Schallemissionsaktivität dann signifikant zu, die Amplituden der Ereignisse bleiben bis zu einer Dehnung von  $0,25 \%$  kleiner als  $75 \text{ dB}$ .

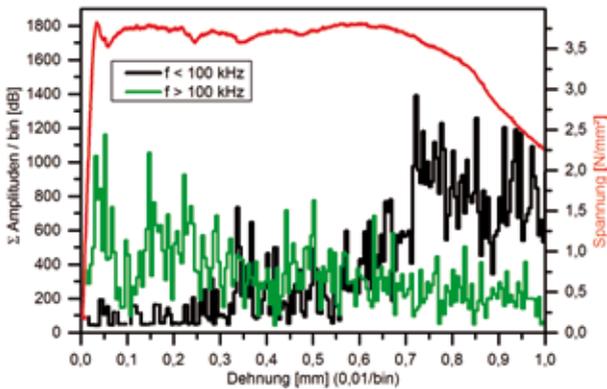


Bild 10: Entwicklung der Frequenzen der Schallemissionssignale

Die Ortungsergebnisse (Bild 9) zeigen anfänglich eine gleichmäßige Verteilung der Quellen über die Länge der Probe. In dieser Phase deuten die Ergebnisse auf eine gut verteilte Mikrorissbildung in der Matrix hin. Ab  $0,25 \%$  Dehnung sind zunehmend Ereignisse mit Amplituden über  $75 \text{ dB}$  erkennbar. Wenn auch im Spannungs-Dehnungs-Verlauf nicht sichtbar, treten ab hier neben der Mikrorissbildung in der Matrix weitere Schadensmechanismen auf. Die jetzt einsetzende

Konzentration von Schallemissionsquellen mit Amplituden über  $75 \text{ dB}$  in einer schmalen Zone zeigt die Bildung eines Makrorisses an.

Um die Schallemissionen weiter differenzieren zu können, wurde eine Frequenzanalyse der gespeicherten Wellenformen durchgeführt. Anhand der Frequenzen können zwei klar abgegrenzte Gruppen von Signalen unterschieden werden. Wie Bild 10 zeigt, treten Signale mit Frequenzen über  $100 \text{ kHz}$  vorwiegend bis zu einer Dehnung von  $0,25 \%$  auf. Diese Signale mit Amplituden unter  $75 \text{ dB}$  können, wie Versuche an Proben ohne Fasern gezeigt haben, den Matrixrissen zugeordnet werden. Versuche, einzelne Fasern aus der Matrix zu ziehen, haben ergeben, dass beim Reißen der Fasern Schallemissionen mit hohen Amplituden und ebenfalls

mit Frequenzen über 100 kHz entstehen. Die Ereignisse mit Frequenzen kleiner als 100 kHz, deren Häufigkeit ab 0,25 % Dehnung deutlich zunimmt und die die dehnungsentfestigende Phase dominieren, sind wahrscheinlich dem Herausziehen von Fasern aus der Matrix zuzuordnen. Dies muss allerdings noch durch weitere Versuche validiert werden.

### **3 Zusammenfassung**

Mit der Schallemissionsanalyse steht ein passives, zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Verfügung, mit dem Schädigungsprozesse in Echtzeit detektiert werden können. Die große und stetig wachsende Anzahl von Publikationen zeigt, dass die Schallemissionsanalyse und die Kombination mit weiteren Verfahren zur Untersuchung des Verhaltens von Baustoffen unter verschiedenartigen Belastungen zielführend eingesetzt werden kann. Insbesondere die Möglichkeit, Schädigungszonen auch in eingeschränkt zugänglichen Strukturen orten zu können, macht den Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Bauwerken, wie zum Beispiel von Brücken unter Verkehrslast oder auch von Windenergieanlagen, interessant. Obwohl schon Pilotprojekte existieren, ist die Schallemissionsanalyse noch von einer routinemäßigen Anwendung im Bauwerksmonitoring entfernt. Hierfür müssen die Sensoren weiterentwickelt und den Anforderungen des Bauwesens hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften und ihrer Dauerhaftigkeit angepasst werden. Auch die Identifizierung von Störeinflüssen, die entsprechende Filterung und Übertragung der Daten sowie die automatische Erkennung schädigungsrelevanter Ereignisse stellen zurzeit noch eine Herausforderung dar. Mit der Lösung dieser Fragestellungen wird mit der Schallemissionsanalyse ein Werkzeug zur Verfügung stehen, mit dem bestehende und künftige Bauwerke zuverlässig überwacht und so deren Sicherheit und Lebensdauer erhöht werden können.

### **Literatur**

- [1] Grosse, C. U.; Ohtsu, M. (Hrsg.): *Acoustic Emission Testing*, Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [2] Miller, R. K.; Kill, E. V. K.; Moore, P. O.; Hill, E. V. (Ed.): *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing*. Vol. 6, 3rd Ed., American Society For Nondestructive Testing, 2005.
- [3] Vallen, H.: *Die Schallemissionsprüfung*. Wuppertal: Castell, 2003.
- [4] Shiotani, T.: Parameter Analysis. In: Grosse, C. U.; Ohtsu, M. (Hrsg.): *Acoustic Emission Testing*, Berlin Heidelberg: Springer, 2008, S. 41–51.
- [5] Grosse, C. U.; Linzer, L. M.: Signal-Based AE Analysis. In: Grosse, C. U.; Ohtsu, M. (Hrsg.): *Acoustic Emission Testing*, Berlin Heidelberg: Springer, 2008, S. 53–99.
- [6] McIntire, P.; Miller, R. K. (Ed.): *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing*. Vol. 5, 2nd Ed., American Society For Nondestructive Testing, 1987.
- [7] Schechinger, B.: *Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Schädigung von Stahlbeton*. Diss., ETH Zürich, 2005.
- [8] Ohtsu, M.: Source kinematics of acoustic emission based on a moment tensor. *NDT International* 22 (1989) 1, S. 14–20.
- [9] DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren: *Kompodium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT) Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung*,

Version 11/2011, <http://www.dgzfp.de/Portals/24/PDFs/FA/KompendiumAT.pdf> (Download: 1.7.2015).

- [10] Fowler, T.: The Origin of CARP and the Term "Felicity Effect". Festschrift zur 31. Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), Dresden, 2014.
- [11] DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren (FA SEP, Hrsg.): Richtlinie SE 02: Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor. Berlin, 2014.
- [12] Schultz, A. E.; Morton, D. L.; Tillmann, A. S.; Campos, J. E.; Thompson, D. J.; Lee-Norris, A. J.; Ballard, R. M.: Acoustic Emission Monitoring of a Fracture-Critical Bridge. Minnesota Department of Transportation, Research Services & Library, Final Report MN/RC 2014-15.
- [13] Fricker, S.; Vogel, T.: Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 3, S. 501–510.
- [14] Löhr, M.: Einsatz der Schallemissionsanalyse als Dienstleistung an Brückenbauwerken. 20. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 18./19.6.2015 in Garmisch-Partenkirchen, DGZfP-Berichtsband BB 153.
- [15] Yuyama, S.; Yokoyama, K.; Niitani, K.; Ohtsu, M.; Uomoto T.: Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission. *Construction and Building Materials* 21 (2007), S. 491–500.
- [16] Shigeishi, M.; Colombo, S.; Broughton, K. J.; Rutledge, H.; Batchelor, A. J.; Forde, M. C.: Acoustic emission to assess and monitor the integrity of bridges. *Construction and Building Materials* 15 (2001) 1, S. 35–49.
- [17] Wolf, J.; Niederleithinger, E.; Mielentz, F.; Grothe, S.; Wiggerhauser, H.: Überwachung von Betonkonstruktionen mit eingebetteten Ultraschallsensoren. *Bautechnik* 91 (2014) 11, S. 783–796 | DOI: 10.1002 / bate.201400073.
- [18] Niederleithinger, E.; Wolf, J.; Mielentz, F.; Wiggerhauser, H.; Pirskawetz, S.: Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring. *Sensors* 15 (2015), S. 9756–9772 | DOI: 10.3390/s150509756.
- [19] Behnia, A.; Chai, H.K.; Yorikawa, M.; Momoki, S.; Terazawa, M.; Shiotani, T.: Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography. *Construction and Building Materials* 67 (2014) Part B, S. 202–215.
- [20] ASTM E976: Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.