

Akustisches SpRK-Monitoring mit SEA und verteilten faseroptischen Sensoren

Dipl.-Ing. Ronghua Xu¹, Dr. Konstantin Hicke², Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Chruscicki², Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx¹

¹ Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

² Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

KURZFASSUNG

Im vorliegenden Bericht wurde untersucht, wie Spanndrahtbrüche in einem Brückenträger sowohl mittels Schallemissionsanalyse (SEA) als auch mit (eingebetteter) verteilter faseroptischer akustischer Sensorik (DAS) zu erkennen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bruchsignale anhand beider Messverfahren detektiert werden können. Die jeweils detektierten Drahtbrüche werden miteinander verglichen. Durch eine Gegenüberstellung werden SEA und DAS detailliert dargestellt.

1 Einleitung

Nachdem Ende des 19. Jahrhunderts in ersten Patenten die Idee einer Vorspannung thematisiert worden war, nahm die Entwicklung der Spannbetonbauweise ab den 1930er Jahren schnell an Fahrt auf. Vor allem die Mitte des 20. Jahrhunderts war geprägt von zahlreichen Innovationen, angefangen beim Material bis hin zu ganz neuen Bauverfahren, z. B. [1]. Ein Augenmerk lag auf der Herstellung verbesserter hochfester Spannstähle, was u. a. durch modifizierte Schmelzezusammensetzungen und Verarbeitungsverfahren gelang. Einige dieser neuartigen Stähle waren allerdings besonders empfindlich gegenüber einer kritischen Schädigungsart, der sogenannten Spannungsrissskorrosion (SpRK), welche zum damaligen Zeitpunkt noch nicht bekannt war. Die betroffenen Spannstähle brachen teilweise bereits bei der Lagerung, beim Einbau, beim ordnungsgemäßen Verpressen und auch beim Spannen plötzlich [2]. Da der Ausfall der Spannstähle in älteren Bestandsbauwerken auch lange nach der Errichtung eintreten und die Tragfähigkeit des gesamten Tragwerks enorm beeinträchtigen kann, sind eine frühzeitige Detektion der Drahtbrüche und anschließende Maßnahmen notwendig.

Als messtechnisches Verfahren hat sich die Schallemissionsanalyse (SEA) seit den 1950er Jahren etabliert [3]. Im Bauwesen wird das Messverfahren u. a. in der Bauwerksüberwachung [2], [4], bei der Detektion und Lokalisierung von Spanndrahtbrüchen [5], [6] und in der Materialforschung [7], [8] angewendet. Zahlreiche Versuche zeigen, dass der Einsatz der SEA unter bestimmten Randbedingungen zielführend ist. Allerdings ist die Schallemissionsmesstechnik kostenintensiv und daher eine optimierte Sensorkonfiguration für eine reale Praxisanwendung immer erforderlich. Eine vergleichsweise neue Alternative zu SEA ist die verteilte faseroptische akustische Sensorik (engl. *distributed acoustic sensing*, DAS), welche seit mehr als zehn Jahren angewandt und weiterentwickelt wurde [9]. Dieser neue dynamische Sensoransatz hat sich aus dem Feld der verteilten faseroptischen Sensorik (engl. *distributed fiber optic sensing*, DFOS) entwickelt, mit denen vormals hauptsächlich (quasi-)statische Messgrößen bestimmt wurden. Die Einsatzmöglichkeiten von DAS und DFOS im Bauwesen sind vielfältig und reichen vom Monitoring von Brücken [10], [11], des Straßenverkehrs [12] bis hin zur Verformungsmessung im Labormaßstab [13] und zur faseroptischen Rissdetektion [14]. Auch Anwendungen von faseroptischen Sensoren zur

akustischen Messung sind bekannt [15], [16]. Diese wurden in Feldversuchen z. B. für die Detektion von Spanndrahtbrüchen eingesetzt [17].

Ein großer Vorteil gegenüber konventionellen Sensoren, die punktuell zu installieren sind, besteht bei den DFOS darin, dass die Sensorfasern im Bauwerk eingebettet werden können, nur ein einzelner Zugang erforderlich ist und eine durchgängige Messstrecke bis zu mehreren Kilometern möglich ist. In Abhängigkeit der gewünschten Auflösung können aber auch sehr kleine lokale Dehnungsveränderungen erfasst werden, wie sie z. B. bei der Kraftumlagerung eines Spanndrahtbruchs stattfinden. Hinsichtlich der Langzeitüberwachung von Infrastrukturbauwerken erfordern DFOS einen relativ niedrigen Instandhaltungsbedarf, was wirtschaftlich vorteilhaft sein kann.

Im vorliegenden Bericht werden beide Messverfahren anhand realer Experimente zur Spanndrahtbruchdetektion vorgestellt. An einem Brückenträger (Typ BTE) wurden Drahtbrüche der eingebauten Spannglieder mit einem Trennschleifer künstlich erzeugt. Das Ziel dieser Untersuchung ist, anhand der verschiedenen Messtechniken SEA und DAS diese Drahtbrüche der Spannglieder im BTE-Träger zu detektieren.

2 Messprinzip

2.1 DAS

DAS-Systeme bestehen aus einem Messgerät zur Sensorabfrage (dem sog. Interrogator) und der Sensorfaser bzw. dem Sensorfaserkabel, welche mit dem Interrogator verbunden ist. Die Faser bzw. das Kabel wird in das zu überwachende Bauteil eingebettet bzw. auf dessen Oberfläche appliziert, so dass eine gute mechanische Ankopplung für akustische Signale oder Vibrationen besteht. Der Interrogator sendet aufeinanderfolgende, hochkohärente optische Pulse definierter Dauer bzw. Länge in die optische Faser, die einstellbare Pulswiederholrate entspricht dabei der akustischen Abtastrate des Sensors. Der optische Puls erzeugt während des Durchlaufens der Sensorfaser ein kontinuierli-

ches optisches Rückstreusignal, dessen Eigenschaften von den jeweiligen lokalen Anordnungen von Dichteschwankungen innerhalb des momentan vom Abfragepuls überdeckten Abschnitts der Faser abhängen [9], [18]. Durch die hohe Kohärenz des Pulses tragen alle Änderungen im vom Puls überdeckten Sensorabschnitt zum lokal erzeugten Rückstreusignal bei. Dies führt zu einer entsprechenden örtlichen Ungenauigkeit lokalisierter akustischer Signale mit der Größenordnung der Länge des Abfragepulses in der optischen Faser. Das Rückstreusignal durchläuft die Faser in umgekehrter Richtung und wird im Interrogator detektiert und dann weiterverarbeitet, so dass eine ortsabhängige optische Phase für jede Messposition entlang des Sensors bestimmt werden kann.

Die Zuordnung zu einem Ort (d. h. der Entfernung entlang der Faser) erfolgt über die Lichtgeschwindigkeit und die Ankunftszeit des Signals relativ zur Pulsinjektion. Findet nun eine lokale mechanische Störung, also eine Vibration oder ein akustisches Ereignis, entlang des Sensors statt, führt die entstehende dynamische axiale Dehnung der Faser zu einer Änderung der messbaren lokalen Phase. Aus dieser ortsabhängigen Phasenänderung lässt sich die verteilte dynamische Dehnung bzw. die Dehnungsrate und somit das akustische Signal errechnen. DAS kann hierbei in einem großen Frequenzbereich sensitiv sein: sowohl sehr langsame oder transiente Signale mit Änderungen auf der mHz-Skala [19] als auch sehr schnelle Änderungen und hochfrequente Signale mit bis zu einigen 10 kHz Frequenz sind detektierbar [20]. Die Rekonstruierbarkeit hängt dabei wegen des Nyquist-Theorems auch von der Abtastrate, also von der Pulswiederholrate, ab.

Der grundlegende Aufbau eines DAS-Systems und eine Skizze des Funktionsprinzips ist in Bild 1 illustriert.

2.2 SEA

Schallemission (SE) ist definiert als die Emission von elastischen Wellen während der Zustandsveränderung, z. B. einer Rissentstehung, in ei-

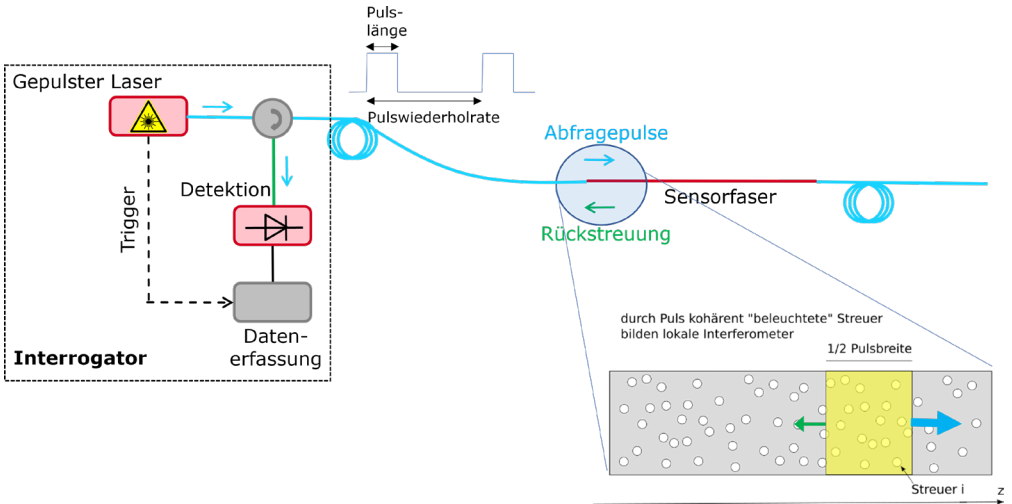


Bild 1: Skizzierter Aufbau eines DAS-Systems mit Funktionsprinzip

nem unter Spannung stehenden Material [7]. Diese Wellen, welche sowohl im menschlich hörbaren als auch unhörbaren Bereich auftreten, breiten sich als Raumwellen durch das Material aus und können von entsprechenden Messsensoren empfangen werden. Für eine Schallemissionsmessung kommen oft piezoelektrische Sensoren zum Einsatz. Durch den piezoelektrischen Effekt werden die an der Sensoroberfläche gemessenen physikalischen Größen, z. B. Dehnung oder Beschleunigung, zu einer elektrischen Spannung umgewandelt. Je nach Signalstärke wird die elektrische Spannung um ein gewisses Niveau verstärkt oder gedämpft, damit sie im Messbereich des Messsystems liegt. Die Sensorspannung (analoges

Signal) wird anschließend durch einen Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert und kann danach im Rechner abgespeichert werden. Bild 2 stellt das Messprinzip der Schallemissionsmessung dar.

Die abgespeicherten Signale beinhalten Informationen zum Quellmechanismus, dem Ausbreitungsweg und der Charakteristik des Messsystems. Unter kontrollierten Randbedingungen können Rückschlüsse auf die Ursache der Zustandsänderung gezogen werden. Bei der Auswertung der Signale wird zwischen der qualitativen und quantitativen Analyse unterschieden. Bei der qualitativen Analyse werden Schallemissionsparameter (SE-Parameter) wie

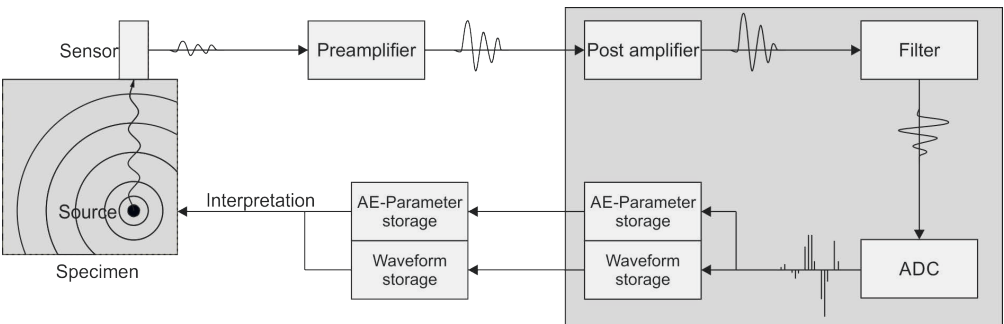


Bild 2: Messprinzip der Schallemissionsmessung, [8]

Peak-Amplitude, Signalenergie etc. extrahiert und statistisch ausgewertet. Die beobachteten Schädigungen können mit einem oder mehreren gemessenen Signalparametern korreliert werden [18]. Eine Anwendung der qualitativen Schallemissionsanalyse kann in [5] gefunden werden. In Bild 3 werden einige typische SE-Parameter veranschaulicht. Erläuterungen der einzelnen Parameter können u. a. [19] und [20] entnommen werden.

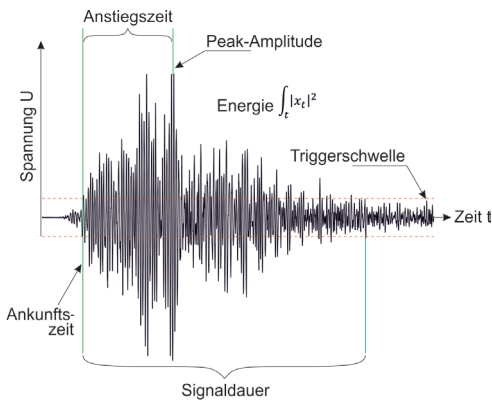


Bild 3: SE-Parameter aus einem Signal, [19]

Demgegenüber wird bei der quantitativen Analyse die gesamte transiente Wellenform des Signals benötigt. Das Signal kann nachträglich mit unterschiedlichen Analyseverfahren wie Spektral- oder Kohärenzanalyse untersucht und in vielfältigen Aspekten ausgewertet werden.

In den hier vorgestellten Untersuchungen werden die Messdaten mittels der qualitativen Analyse ausgewertet.

3 Experimentelle Untersuchungen an einem Brückenträger

3.1 Messobjekt

2019 wurde eine gegenüber SpRK gefährdete Eisenbahnbrücke aus Spannbetonfertigteilen zurückgebaut, welche

über die Schienenverkehrsstrecke von Dresden nach Leipzig führte [21]. Insgesamt sieben der abgebauten Brückenträgerelemente vom Typ BTE wurden dem Institut für Massivbau der TU Dresden für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt.

An einem dieser BTE-Träger wurden Messungen sowohl mit Hilfe von DAS als auch SEA durchgeführt (Bild 4). Der für die Experimente verwendete BTE-Träger wurde im Jahr 1970 mit zehn Bündelspanngliedern (BSG) vorgespannt und mit den Maßen von 12 m × 2 m × 0,8 m hergestellt. Solche BTE-Träger sind Fertigteilelemente, die in der ehemaligen DDR serienmäßig für Brücken hergestellt und verbaut wurden. Jedes BSG besteht aus 24 vergüteten Hennigsdorfer Spannstählen St 140/160 mit einem Nennquerschnitt von jeweils 50 mm². Sechs von den insgesamt zehn Spanngliedern waren vor der Untersuchung bereits durch Seilsägen zerschnitten worden.

Bei den Experimenten wurden zwei der vier verbliebenen Spannglieder durchtrennt, während der BTE-Träger mit vier Einzellasten von jeweils 100 kN belastet wurde. Um die Zugänglichkeit der Spannglieder während der Experimente zu sichern, wurde der BTE-Träger vor der Untersuchung an vorgesehenen Sägeschnitten geöffnet.



Bild 4: Der BTE-Träger für Messungen mit DAS und SEA

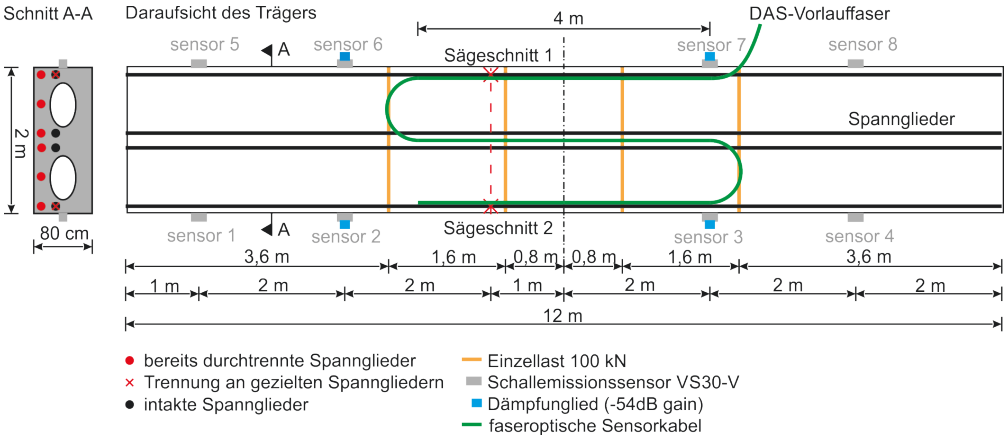


Bild 5: Messaufbau für SEA und DAS an dem Brückenträger

3.2 Messaufbau

Für die Schallemissionsmessung wurden insgesamt acht piezoelektrische Sensoren VS30-V von Vallen Systeme GmbH am BTE-Träger installiert. Die Sensoranordnung kann Bild 5 entnommen werden.

Die Sensoren 2, 3, 6 und 7 wurden jeweils mit einem Dämpfungsglied angeschlossen, während die anderen Sensoren keine Vorverstärkung bzw. Dämpfung aufwiesen. Als Messgerät kam ein Modell AMSY6 der Vallen Systeme GmbH mit acht Messkanälen zum Einsatz. Für die verteilte faseroptische akustische Sensorik wurde ein ca. 14 m langes Sensorkabel (EpsilonSensor von Nerve Sensors) in dreifacher Mäanderform auf der Unterseite des Trägers appliziert (siehe ebenfalls Bild 5). Dieser Sensor wurde mit einem kommerziellen DAS-Interrogator FEBUS A1-R von FEBUS Optics verbunden. Als Puls-wiederholrate und somit effektive Abtastrate wurde eine Frequenz von 100 kHz gesetzt. Die Pulslänge entsprach bei den Messungen 1,0 m. Die örtliche Abtastung, d. h. der Abstand benachbarter Messpunkte entlang der Faser, lag bei 0,4 m.

Die Drahtbrüche wurden künstlich mittels Trennschleifer an den beiden nah zum Außenrand liegenden Spanngliedern erzeugt (Bild 6). Die akustischen Signale während der Untersu-



Bild 6: Durchtrennung der Spannglieder mittels Trennschleifer an Sägeschnitten

chung wurden vom jeweiligen Messsystem aufgezeichnet und bezüglich der Drahtbruchdetektion analysiert.

4 Ergebnisse

4.1 DAS

4.1.1 Charakteristika DAS-Messergebnisse

Das Orts-Zeit-Diagramm in Bild 7 zeigt ein beispielhaftes DAS-Ergebnis an einem anderen Träger mit eingebettetem Sensorkabel, jedoch mit jeweils 8 m langen Schleifen (Mäander). Die

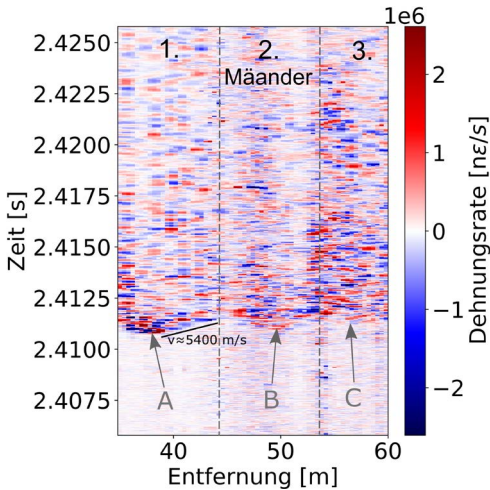


Bild 7: Beispielhaftes DAS-Messergebnis: orts- und zeitaufgelöste Dehnungsrate bei Spanndrahtbruch an einem mit einem faseroptischen Sensor instrumentierten Träger mit 8 m Mäanderlänge; die Pfeile markieren die Orte und Zeitpunkte des Auftreffens der akustischen Signale auf die drei Mäander des eingebetteten Sensorkabels

Sensorkabelschleifen sind hier in linearer Art als Entfernung entlang des Kabels dargestellt. Das Bruchereignis ist problemlos zu detektieren. Im Diagramm ist es daran zu erkennen, dass nach dem anfänglichen Intervall relativ geringer Dehnung, ca. zur Zeit $t = 2,411$ s, im ersten Sensorkabelabschnitt (1. Mäander) abrupt ein signifikantes Dehnungssignal einsetzt (Punkt A), das sich räumlich entlang des 1. Mäanders des eingebetteten Sensorkabels in V-Form ausgehend von A ausbreitet. Nach sehr kurzer Zeit hat das akustische Signal den Träger bis zum 2. eingebetteten Mäander durchdrungen und erzeugt nun auch dort, ausgehend vom Punkt B (auf einer Linie mit dem Sägeschnitt und A im 1. Mäander) ein messbares und sich auch entlang des 2. Mäanders ausbreitendes Dehnungssignal. Dies wiederholt sich am 3. Mäander des Sensorkabels mit dem Ausgangspunkt C. Die Scheitelpunkte A-C entsprechen somit den Orten und Zeiten des jeweiligen (aufeinanderfolgenden) ersten Auftreffens der durch den Bruch induzierten mechanischen Welle auf die drei Mäander der Sensorfaser. Bei ausreichend genauer Kalibrierung bzw. Einmessen von eingebetteten Sensoren kann anhand der Scheitelpunkte der Ursprung des mechani-

schen Signals, in diesem Fall des Spanndrahtbruchs, bestimmt werden. Der Anstieg des Signals bzw. die Steigung der V-Form ausgehend von den Auftreffpunkten entspricht der Ausbreitungsgeschwindigkeit des akustischen Signals im Träger. Die hier ungefähr bestimmte Geschwindigkeit von ca. 5.400 m/s entspricht der Größenordnung der Schallgeschwindigkeit in Stahl. Die messbaren Dehnungssignale halten pro Bruchereignis für ca. 20–30 ms an, bevor die Dynamik und damit die Vibration im Inneren des Trägers abgeklungen ist.

4.1.2 Automatisierte Bruchdetektion und -lokalisierung

Zur automatisierten Detektion der Spanndrahtbrüche in den DAS-Messdaten und zur Lokalisierung entlang des BTE-Trägers (Messobjekt, siehe Abschnitt 3.1) wurde der folgende Algorithmus verwendet: Ausgehend von den bestimmten orts- und zeitaufgelösten Dehnungsraten (Bild 8, links) wurden zuerst deren Absolutwerte berechnet und diese mittels eines zweidimensionalen rechteckigen Mittelungsfilters der Dimensionen (Ort, Zeit) = (0,5 ms, 1,6 m) geglättet (Bild 8, Mitte). Für jede Messposition entlang des betrachteten Sensorabschnittes wurde nun der Zeitpunkt des ersten Überschreitens eines vorher festgelegten relativen Grenzwertes und damit der Detektionszeitpunkt bestimmt. Dieser Grenzwert wurde für alle Messungen auf die 12-fache Standardabweichung der gemessenen Dehnungsverläufe festgelegt. Die ortsabhängigen Detektionszeitpunkte sind in (Bild 8, rechts) als rote Punkte markiert. Der Ort mit der frühesten Detektionszeit entspricht daher dem der Signalquelle am nächsten liegenden Abschnitt des Sensors und kann zur Lokalisierung herangezogen werden.

Es wird angemerkt, dass der oben beschriebene Algorithmus ein vergleichsweise simpler ist. Auf ggf. auftretende Besonderheiten der gemessenen Signale wie periodisch auftretende signifikante Hintergrundgeräusche ist der Algorithmus nicht ausgerichtet, was zu Fehlklassifikationen führen kann. Nichtsdesto-

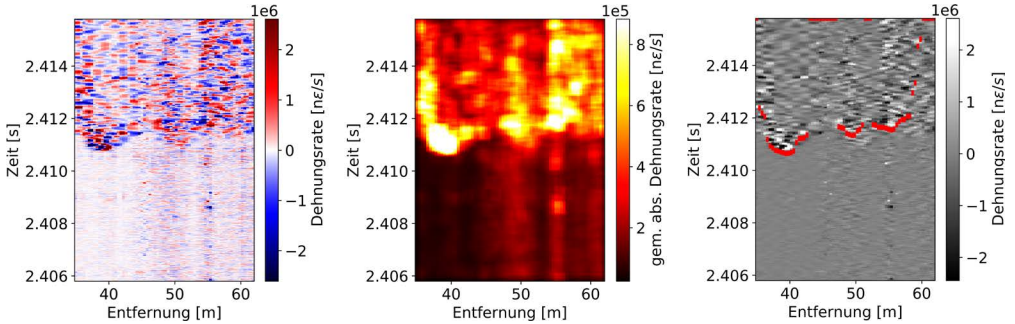


Bild 8: Illustration des Algorithmus zur automatisierten Detektion und Lokalisierung von Spanndrahtbrüchen mittels DAS: verteilte Dehnungsrate im Zeitverlauf (links) und nach Glättung der Absolutwerte (Mitte) sowie Dehnungsdynamik mit für jede Messposition in Rot eingezeichnetem Zeitpunkt der erstmaligen Überschreitung des gesetzten Signalstärke-Grenzwertes (rechts)

trotz konnten mit Hilfe des für alle Messreihen einheitlichen relativen Grenzwertes fast alle Spanndrahtbrüche korrekt detektiert werden.

4.1.3 Messergebnisse Detektion Spanndrahtbrüche mit DAS

Beim Sägeschnitt 1 wurden während der Durchtrennung der Spannglieder die akustischen Ereignisse jeweils pro erzeugtem Spanndrahtbruch einzeln mit dem verwendeten DAS-System aufgezeichnet. Eine beispielhafte Messung wird in Bild 9, links gezeigt. Bild 9 rechts stellt den ortsaufgelösten Frequenzgehalt dieses Sig-

nals dar, der mittels *fast Fourier transform* (FFT) der im linken Bild gezeigten Dynamik jeweils für alle Messpositionen berechnet wurde.

Eine ähnliche, vergleichsweise breitbandige spektrale Zusammensetzung mit maximaler Energie um eine Frequenz von ca. 4 kHz wurde für die meisten gemessenen Spanndrahtbrüche bestimmt. Zu jedem mit DAS aufgenommenen Spanndrahtbruch konnte ein akustisches Ereignis detektiert werden. Aus Gründen des Versuchsablaufs wurden jedoch während zweier Spanndrahtbrüche keine DAS-Messdaten aufgezeichnet. Insgesamt wurden also von 24 er-

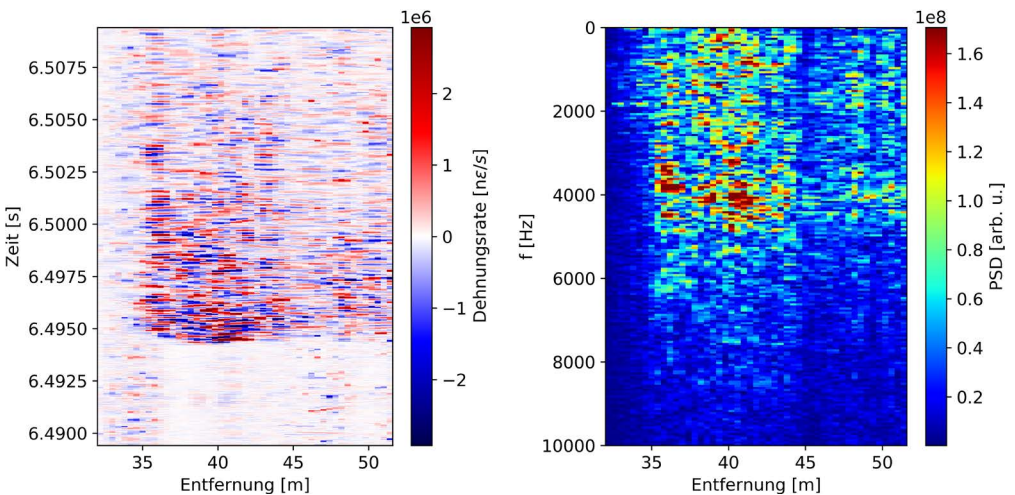


Bild 9: Beispielhaftes DAS-Messergebnis: orts- und zeitaufgelöste Dehnungsrate bei Spanndrahtbruch (links) und entsprechende mittels FFT berechnete verteilte Spektren (rechts)

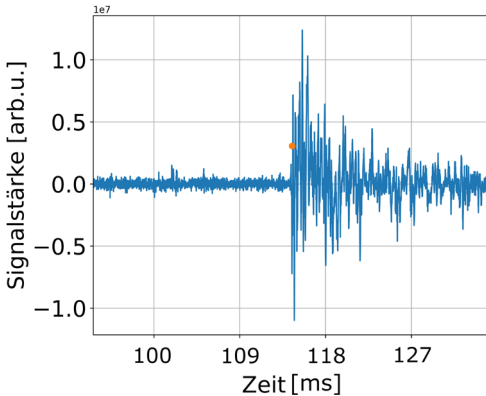


Bild 10: Zeitreihe der Signalstärke an einem einzelnen Sensorabschnitt bei Spanndrahtbruch, die sich aus Mittelung vierer benachbarter Messpositionen ergibt; die Markierung zeigt den Zeitpunkt der Überschreitung des Detektionsgrenzwertes

folgten Brüchen 22 gemessen. Nichtsdestotrotz kann die Detektionswahrscheinlichkeit mit nahezu 100 % angegeben werden. Durch die pulsartige Charakteristik der von den Spanndrahtbrüchen erzeugten Signale konnten diese bei der Messreihe am Sägeschnitt 1 eindeutig als solche klassifiziert werden.

Bild 10 zeigt die Signalstärke an einem Messabschnitt als Zeitserie, die sich aus der Mittelung der Signale an vier benachbarten Messpositionen ergibt. Die Markierung zeigt den Zeitpunkt der Überschreitung des für die Bruchdetektion gesetzten Grenzwertes (s. o.). Eine ähnliche Signalstärke ergab sich für alle mit DAS gemessenen Spanndrahtbrüche.

Bei der Lokalisierung ergab sich das folgende Bild. Bis auf ein Ereignis wurden die Ursprünge der Signale innerhalb von $\pm 1,5$ m um den Ort des Sägeschnittes (bei einer Sensorentfernung von $\sim 38,0$ m) herum lokalisiert. Die beobachtete Fluktuation der bestimmten Orte war dabei wegen der dem Verfahren geschuldeten Ortsgenauigkeit von ca. 1,0–1,5 m zu erwarten. In Tabelle 1 sind die bestimmten Zeitpunkte und Orte der detektierten Spanndrahtbrüche bei Sägeschnitt 1 dargestellt. Bei Sägeschnitt 2 wurden zudem teilweise Hammer und Meißel zur Brucherzeugung verwendet. Durch diese ebenfalls pulsartigen Ereignisse konnte ohne eine detailliertere Analyse nicht immer eine eindeutige Zuordnung zu einem Bruch oder einem Hammerschlag gemacht werden, da der oben beschriebene Detektionsalgorithmus teils auch andere akustische Ereignisse als Brüche erkannte. Zudem wurden etliche Brüche bei dieser Messreihe nicht aufgezeichnet. Auf eine aufgeschlüsselte Darstellung wird daher verzichtet.

4.2 SEA

Während der Durchtrennung der Spannglieder wurden Schallereignisse an den acht installierten Sensoren gemessen. Die Sensoren 2, 3, 6 und 7 wurden bei den Versuchen zu stark gedämpft und konnten nur Signale mit einem relativ niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) aufzeichnen. Diese vier Sensoren sind deshalb bei der Auswertung nicht einbezogen. Bild 11 zeigt die maximale Amplitude jedes Schallereignisses.

| Nr. | Uhrzeit | Position [m] | Nr. | Uhrzeit | Position [m] | Nr. | Uhrzeit | Position [m] |
|-----|----------|--------------|-----|----------|--------------|-----|----------|--------------|
| 1 | 13:59:17 | 38,4 | 9 | 14:27:26 | 38,4 | 17 | 14:53:59 | 38,4 |
| 2 | 13:59:57 | 41,6 | 10 | 14:30:54 | 38,4 | 18 | 14:55:48 | 38,0 |
| 3 | 14:00:43 | 38,0 | 11 | 14:36:30 | 37,6 | 19 | 14:56:04 | 38,8 |
| 4 | 14:01:48 | 38,0 | 12 | 14:38:06 | 39,6 | 20 | 14:56:39 | 37,6 |
| 5 | 14:03:49 | 38,0 | 13 | 14:41:52 | 39,2 | 21 | 15:03:05 | 37,2 |
| 6 | 14:17:35 | 38,4 | 14 | 14:44:23 | 40,0 | 22 | 15:03:38 | 37,6 |
| 7 | 14:18:08 | 38,4 | 15 | 14:45:43 | 36,8 | | | |
| 8 | 14:26:06 | 39,6 | 16 | 14:50:47 | 37,6 | | | |

Tabelle 1: Zeitpunkte und Positionen der mittels DAS detektierten Spanndrahtbrüche bei Sägeschnitt 1

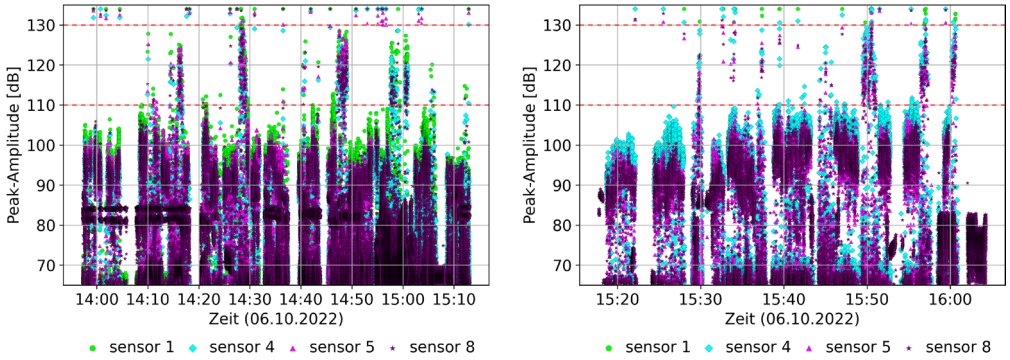
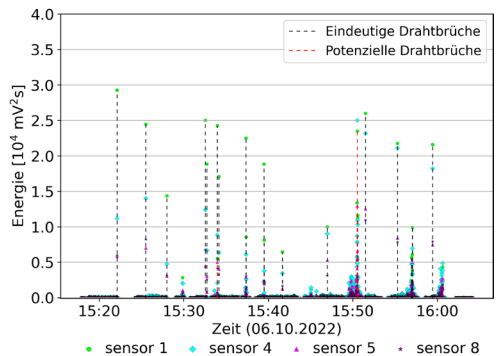
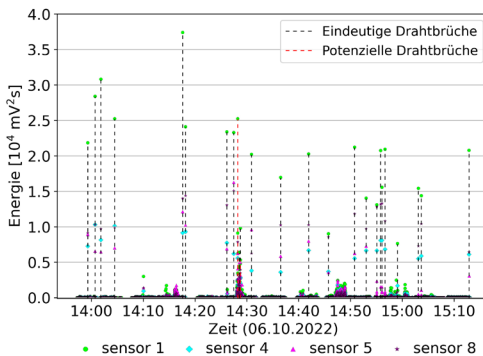


Bild 11: Maximale Amplitude der Schallereignisse während der Spanngliedtrennung an den Sägeschnitten 1 (links) und 2 (rechts)

nisses über die Zeit. Unterhalb von ca. 110 dB befinden sich zahlreiche Signale, die dicht nacheinander aufgetreten sind. Diese Signale werden als Hintergrundrauschen betrachtet. Allerdings beträgt das Hintergrundrauschen auch manchmal deutlich über 110 dB, was auf den Trennprozess zurückgeführt wird. Die Abläufe waren nicht immer gleichmäßig, sondern teilweise auch mit ruckartigen Bewegungen durch Verkantung der Trennscheibe verbunden. Die hiermit einhergehende erhöhte Reibung hatte auch eine entsprechende Geräuschentwicklung zur Folge. Die Signale, deren Amplituden über 130 dB liegen, resultieren aus energievollen

Bruchprozessen und werden hier als Bruchsignale der Spannglieder interpretiert.

Das kann durch einen Vergleich der Signalenergien in Bild 12 bestätigt werden. Die Signale, deren Amplituden weit über dem Hintergrundrauschen stehen (> 130 dB), haben auch eine viel größere Energie im Vergleich zu den Rauschsignalen, welche sehr geringe Energiewerte aufweisen. Diese sich vom Hintergrundrauschen gut unterscheidenden Signale sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Drahtbrüche der Spannglieder und können eindeutig als solche klassifiziert werden. Nach Betrachtung aller Signale wurde



| Uhrzeit erkannter Drahtbrüche (Referenz: Sensor 1) | | | | |
|--|------------|------------|------------|----------|
| Eindeutige Drahtbrüche | 13:59:18 | 14:00:43 | 14:01:48 | 14:04:28 |
| | 14:17:36 | 14:18:08 | 14:26:07 | 14:27:26 |
| | 14:28:31 | 14:28:43 | 14:30:54 | 14:36:30 |
| | 14:41:53 | 14:45:43 | 14:50:46 | 14:52:59 |
| | 14:55:04 | 14:55:48 | 14:56:04 | 14:56:39 |
| | 14:59:02 | 15:03:05 | 15:03:38 | 15:12:52 |
| Potenzielle Drahtbrüche | 14:28:14,7 | 14:28:15,6 | 14:28:44,1 | |

| Uhrzeit erkannter Drahtbrüche (Referenz: Sensor 1) | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Eindeutige Drahtbrüche | 15:22:06 | 15:25:29 | 15:27:59 | 15:32:33 |
| | 15:32:43 | 15:33:58 | 15:34:09 | 15:37:20 |
| | 15:37:22 | 15:39:28 | 15:39:30 | 15:41:40 |
| | 15:46:59 | 15:51:29 | 15:55:17 | 15:56:55 |
| | 15:57:01 | 15:57:03 | 15:59:26 | |
| | 15:59:02 | 15:59:03 | 15:59:26 | |
| Potenzielle Drahtbrüche | 15:33:58,4 | 15:50:29,6 | 15:50:30,3 | 15:50:31,0 |
| | 15:50:31,7 | 15:50:32,5 | 15:50:33,4 | 15:50:34,3 |

Bild 12: Energien aller Schallereignisse und Uhrzeiten der detektierten Drahtbruchsignale an den Sägeschnitten 1 (links) und 2 (rechts)

eine Energiestufe von $5.000 \text{ mV}^2\text{s}$ als die Untergrenze möglicher Bruchsignale am Sensor 1 festgelegt. Bei der Auswertung werden die Signale am Sensor 1, deren Energie diese Untergrenze überschreitet und die Differenz ihrer Auftrittszeiten $> 1 \text{ s}$ ist, als eindeutige Bruchsignale klassifiziert und in Bild 12 in Form von gestrichelten schwarzen Linien hervorgehoben.

Eine zweifelsfreie Zuordnung ist jedoch nicht immer gegeben. In den Zeitfenstern von 14:25 bis 14:30 Uhr und von 14:45 bis 14:50 Uhr in Bild 12 links fallen beispielsweise dicht beieinanderliegende Energieeinträge auf. Diese repräsentieren den Amplitudenbereich von 110–130 dB in Bild 11 in der gleichen Zeit. Eine genaue Interpretation dieser Signale ist nur schwer möglich, weil aufgrund der äußerst hohen Ereignisrate keine eindeutige Beziehung zwischen den Arbeiten am Spannglied und den Signalen hergestellt und ein „lautes“ Rauschsignal mit einer hohen Amplitude daher nicht ohne Weiteres ausgeschlossen werden kann. Auf der anderen Seite sind die Energien solcher Signale jedoch viel höher als die typischen Rauschsignale. Die Wellenformen solcher Signale weisen auch nach visueller Betrachtung eine gewisse Ähnlichkeit zu den eindeutigen Bruchsignalen auf, was der Charakteristik der Drahtbruchs signale entspricht. Da ein Zweifel hinsichtlich der Interpretation dieser Signale besteht, werden sie als potenzielle Drahtbrüche der Spannglieder klassiert. Bei der Auswertung werden die Signale am Sensor 1, deren Energie $> 5.000 \text{ mV}^2\text{s}$ und bei denen die Differenz ihrer Auftrittszeiten $\leq 1 \text{ s}$ sind, als potenzielle Drahtbrüche in Bild 12 in Form von gestrichelten grauen Linien hervorgehoben. Die Uhrzeiten der detektierten Spanndrahtbruchsignale werden in Bild 12 tabellarisch angegeben. Die Ergebnisse der SEA-Analyse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Es können jeweils 24 und 19 Signale für die Sägeschnitte 1 und 2 eindeutig einem Drahtbruch als Quelle zugeordnet werden. Zudem wurden noch jeweils 3 bzw. 8 Signale gemessen, die auf Grundlage der beiden untersuchten Signal-features nicht zweifelsfrei zugeordnet werden können und daher als potenzielle Drahtbrüche klassiert werden. Für beide Sägeschnitte liegen somit Falsch-positiv-Ereignisse vor. Auffällig ist, dass deutlich mehr Bruchereignisse am Sägeschnitt 2 als am Sägeschnitt 1 den potenziellen Bruchereignissen zuzuordnen sind. Das kann dadurch begründet werden, dass in der späteren Phase der Arbeiten am Sägeschnitt 2 die Spanndrähte nicht einzeln, sondern zeitgleich durchtrennt wurden und sich daher überlagert haben. Die Signale treten um 15:50 Uhr kurz nacheinander auf und können wegen dem vorab erläuterten Grund schwer dem Rauschen oder Bruchsignalen zugeordnet werden.

4.3 Vergleich der Ergebnisse von SEA und DAS

Für den Sägeschnitt 1 konnten die meisten mit SEA und DAS detektierten Spanndrahtbruchereignisse einander zugeordnet werden. Trotzdem gab es Ereignisse, die jeweils nur mit einem Verfahren als Spanndrahtbruch detektiert wurden. Zu beachten ist dabei, dass mit SEA dauerhaft gemessen wurde, DAS-Messungen hingegen nur um zu erwartende Brüche herum aufgenommen wurden. Es ist daher nicht auszuschließen, dass dadurch einige Brüche mit DAS nicht aufgezeichnet wurden. Nichtsdestotrotz wurden 22 als Spanndrahtbrüche identifizierte Ereignisse mit DAS gemessen, während mit SEA 24 Ereignisse als Spanndrahtbrüche identifiziert wurden. In Bild 13 wird der zeitliche Ablauf der mit beiden Verfahren detektierten Brüche als Vergleich dargestellt. Die mittels DAS und SEA bestimmten Zeitpunkte korrespondie-

| Pos. | Anzahl der detektierten Drahtbrüche | | Anzahl der realen Drahtbrüche |
|---------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| | Eindeutige Ereignisse | Potenzielle Ereignisse | |
| Sägeschnitt 1 | 24 | 3 | 24 |
| Sägeschnitt 2 | 19 | 8 | 24 |

Tabelle 2: Zusammenfassung der mittels parameterbasierter SEA detektierten Spanndrahtbrüche

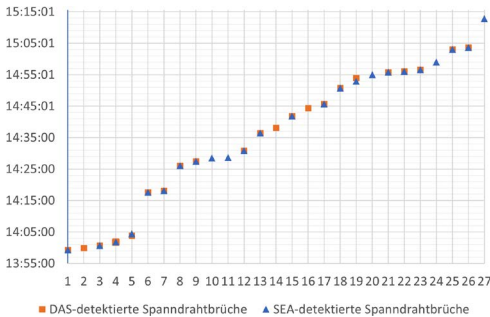


Bild 13: Zeitpunkte der mit SEA und DAS detektierten Spanndrahtbrüche beim Sägeschnitt 1 im Vergleich

render Ereignisse stimmen hierbei bei maximal 1 s Abweichung (außer Bruch 19) miteinander überein. Es ist bei diesen Ereignissen mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass es sich um reale Brüche handelt.

4.4 Diskussion

Der Beitrag untersuchte die Signalklassifizierung von Drahtbrüchen mit Hilfe der Schallemissionsanalyse anhand weniger Parameter wie Peak-Amplitude und Signalenergie. Es wurde gezeigt, dass Drahtbrüche bei niedrigem Hintergrundrauschen problemlos detektiert werden können. Liegt ein hohes Hintergrundrauschen vor, wie es z. B. bei lärmintensiven Arbeiten mit einem Trennschleifer der Fall ist, ist eine parameterbasierte Schallemissionsanalyse zur Drahtbruchdetektion nur beschränkt zielführend. Zusätzlich zu den erzeugten Drahtbrüchen wurden weitere Ereignisse detektiert, die nicht zweifelsfrei als Hintergrundrauschen klassifiziert werden konnten und somit als potenzielle Drahtbrüche eingestuft wurden. In diesen Fällen sind genauere Analysen der Bruchsignale erforderlich. Geeignete Werkzeuge hierzu werden am Institut für Massivbau der TU Dresden erforscht und basieren z. B. auf künstlicher Intelligenz [22].

Bei den DAS-Messungen ergab sich Ähnliches: Es ließ sich jeder aufgenommene Spanndrahtbruch detektieren, bei pulsartigen Störsignalen wie Hammerschlägen auf die Spannglieder kam es jedoch durch den simplen Auswertalgorithmus bei der Messreihe zum Sägeschnitt 2 teils

zu falsch-positiven Klassifikationen. Mit detaillierterer Signalanalyse bzw. mittels geeigneter, z. B. auf maschinellem Lernen basierenden Methoden [12] ist davon auszugehen, dass die korrekte Zuordnung von akustischen Signalen zu realen Spanndrahtbrüchen auch bei signifikanten Störgeräuschen in nahezu allen Fällen möglich ist. Die Lokalisierung der Signalquelle mittels DAS war im Rahmen der Möglichkeiten sehr erfolgreich; die Abweichung vom tatsächlichen Ort des jeweiligen Bruchs lag in den meisten Fällen im Bereich der sich aus der optischen Pulslänge ergebenden Unschärfe. Bei genauerer Einmessung der Sensorfaser und größerer Länge der eingebetteten Faser ist eine genauere Lokalisierung nicht nur linear entlang des eingebetteten Sensors, sondern grundsätzlich auch projiziert auf die Bauteilgeometrie insgesamt möglich.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde untersucht, inwieweit Spanndrahtbrüche in Brückenträgern mittels Schallemissionsanalyse (SEA) als auch mit (eingebetteter) verteilter faseroptischer akustischer Sensorik (DAS) detektiert werden können. Dafür wurden solche Brüche künstlich an einem BTE-Träger erzeugt und die Signale mit beiden genannten Systemen gemessen. Es zeigte sich, dass in Situationen ohne starke Hintergrundstörgeräusche beide Ansätze die übergroße Mehrheit der erzeugten Brüche zuverlässig und zeitgleich als solche detektierten. Bei starken Hintergrundgeräuschen bestand eine nicht zu vernachlässigende Falsch-positiv-Rate. Bei dieser spielte bei SEA hauptsächlich der Geräuschpegel und bei DAS die pulsartige Charakteristik der Störgeräusche eine Rolle. Mittels DAS konnten die Orte der Spanndrahtbrüche, und damit die akustischen Signalquellen, zudem mit einer Genauigkeit von 1,5 m lokalisiert werden.

Dank

Die hier präsentierten Schallemissionsmessungen wurden vom Verbundvorhaben KISWind unterstützt, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

(FKZ: 03EE2025A). Wir danken der Hentschke Bau GmbH, Bautzen für die Bereitstellung der Versuchskörper und die Versuchunterstützung im Rahmen von IDA-KI (FKZ: 19FS2013C).

Literatur

- [1] Haegermann, G.; Huberti, G.; Möll, H.: Vom Caementum zum Spannbeton. Beiträge zur Geschichte des Betons. Band 1. Teil C: Der Spannbeton. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1964.
- [2] Schacht, G.; Käding, M.; Bolle, G.; Marx, S.: Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrissskorrosionsgefahr. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 2, S. 85–94 – DOI: 10.1002/best.201800087
- [3] Ohtsu, M.: The history and development of acoustic emission in concrete engineering. Magazine of Concrete Research 48 (1996) 177, S. 321–330.
- [4] Schumacher, T.; Higgins, C.; Lovejoy, S. C.: Acoustic Emission Monitoring of Conventionally Reinforced Concrete Highway Bridges Under Service Conditions. In: Büyükoztürk, O.; Taşdemir, M. A.; Güneş, O.; Akkaya, Y. (Hrsg.): Proc. of Symp. Nondestructive Testing of Materials and Structures, 15.–18.05.2011 in Istanbul (Turkey), RILEM Bookseries no. 6, Dordrecht: Springer, 2013, S. 847–853.
- [5] Käding, M.; Schacht, G.; Marx, S.: Acoustic Emission analysis of a comprehensive database of wire breaks in prestressed concrete girders. Engineering Structures 270 (2022), S. 1–14 – DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114846
- [6] Fricker, S.: Schallemissionsanalyse zur Erfassung von Spanndrahtbrüchen bei Stahlbetonbrücken. Bericht, ETH Zürich, 2010.
- [7] Große, C.: Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall. Diss., Universität Stuttgart, 1996.
- [8] Stefan, K.: Schallemissionsmessungen bei Versuchen an Stahlbeton. Diss., ETH Zürich, 2000.
- [9] Hartog, A. H.: An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors, Fiber Optic Sensors. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [10] Wosniok, A.; Jansen, R.; Cheng, L.; Toet, P.; Doppenberg, E.; Jong, W.; Chruscicki, S.: Static load monitoring of a concrete bridge using a high-precision distributed optic sensor system. In: Open access portal of nondestructive testing (Hrsg.): Proc. of 5th Int. Conf. on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 08/2019 in Potsdam, erschienen in: e-Journal of Nondestructive Testing 25 (2020) 1, 8 S.
- [11] Glišić, B.; Posenato, D.; Inaudi, D.: Integrity monitoring of old steel bridge using fiber optic distributed sensors based on Brillouin scattering. In: Wu, H. F.; Diaz, A. A.; Shull, P. J. (Hrsg.): Proc. SPIE 6531, Non-destructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2007, 65310P, 19.04.2007 in San Diego (USA), 2007, 8 S. – DOI: 10.1117/12.716055
- [12] Karapanagiotis, C.; Hicke, K.; Krebber, K.: A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring. tm – Technisches Messen 90 (2023) 3, S. 1–19 – DOI: 10.1515/teme-2022-0098
- [13] Speck, K.; Vogdt, F.; Curbach, M.; Petryna, Y.; Marx, S.: Dehnungsmessung bei mehraxialen Druckversuchen an Beton mittels faseroptischer Sensoren. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 3, S. 212–221 – DOI: 10.1002/best.202000095
- [14] Hüsen, G.; Pirsakawetz, S.; Hofmann, D.; Basedau, F.; Gründer, K.; Kadoke, D.: The load-bearing behaviour of a reinforced concrete beam investigated by optical measuring techniques. Materials and structures 54 (2021) 102, 11 S. – DOI: 10.1617/s11527-021-01699-6
- [15] Willberry, J. O.; Papaalias, M.: Structural Health Monitoring Using Fibre Optic Acoustic Emission Sensors. Sensors (Basel, Switzerland) 20 (2020) 21 – DOI: 10.3390/s20216369
- [16] Liao, C.-M.; Hicke, K.; Bernauer, F.; Igel, H.; Hadziioannou C.; Niederleithinger E.: Multi-Sensor measurements on a large-scale bridge model. In: Isecke, B.; Krieger J. (Hrsg.): Tagungshandbuch zum 5. Brückenkolloquium, 06./07.09.2022 in Ostfildern, 2022, S. 223–230.
- [17] Lu, X.; Chruscicki, S.; Schukar, M.; Münzenberger, S.; Krebber, K.: Application of Intensity-Based Coherent Optical Time Domain Reflectometry to Bridge Monitoring. Sensors (Basel, Switzerland) 22 (2022) 9 – DOI: 10.3390/s22093434
- [18] Große, C.; Schumacher, T.: Anwendungen der Schallemissionsanalyse an Betonbauwerken. Bautechnik 90 (2013) 11, S. 721– 731 – DOI: 10.1002/bate.201300074
- [19] Brunner, A. J.; Baensch, F.; Bohse, J.; Lackner, G.; Sause, M. G. R.: Kompendium Schallemissionsprüfung – Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung. Ausgabe März 2022.
- [20] DIN EN 1330-9:2017-10: Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung.
- [21] Giese, N. J.: Untersuchung an spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannbetonfertigteilträgern. Projektarbeit, Technische Universität Dresden, 2020.
- [22] Projekthomepage: Schallemission zur Schadenserkenkung. <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/Ingenieurbau/WEA/SE-Monitoring> (abgerufen am 01.04.2023).

Bildquellen

Bilder 1, 7–10, 13: BAM

Bild 2: [8]

Bild 3: [19]

Bilder 4–6, 11, 12: Ronghua Xu