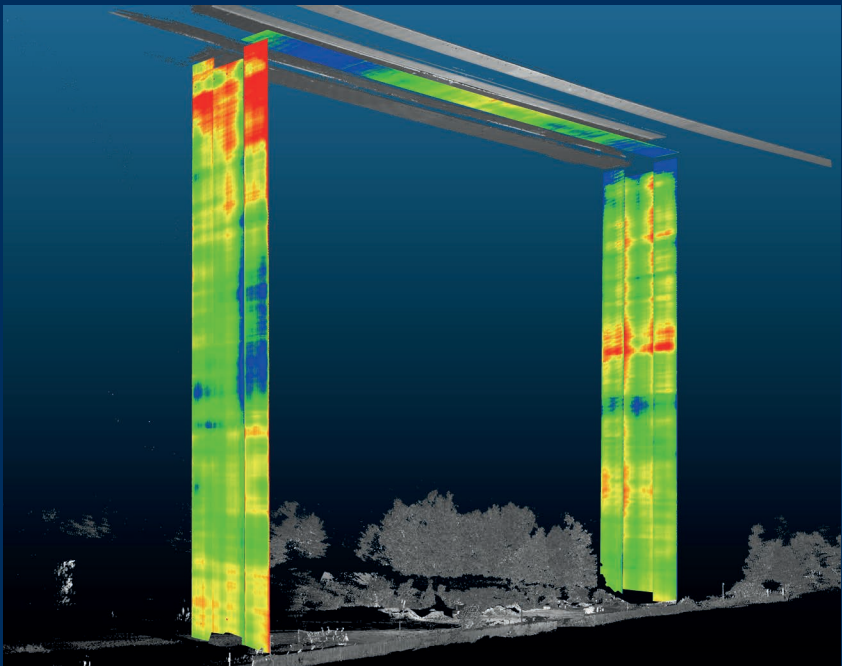




**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 55



Manfred Curbach, Steffen Marx,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

---

Manfred Curbach, Steffen Marx,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 55

**Herausgeber der Reihe:**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx  
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Institut für Massivbau  
Technische Universität Dresden  
D - 01062 Dresden

Tel. +49 351 463-3 65 68  
Fax +49 351 463-3 72 89

© 2021 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind. Für die Inhalte sind die Autor\*innen verantwortlich.

Herausgeber: Manfred Curbach, Steffen Marx, Silke Scheerer, Torsten Hampel  
Redaktion: Silke Scheerer  
Layout: Stefan Gröschel und Silke Scheerer  
Korrekturen: Silke Scheerer, Sabine Wellner und Theresa Fritsche  
Anzeigen: Sabine Wellner  
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel

Titelbild: 3D-Punktwolke des fünften Feldes der Siegtalbrücke; zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitätswerte (Graustufendarstellung) und Ebenheitsabweichungen (Regenbogendarstellung) | © Dr.-Ing. Florian Schill, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt Institut für Geodäsie

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden verfügbar: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb>.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

Veröffentlicht: Dresden, März 2021

ISSN 1613-6934  
ISBN 978-3-86780-665-7

# Inhalt

<b>Grußwort</b> .....	5
Torsten Hampel, Sabine Wellner und Silke Scheerer	
<b>Experimentelle Untersuchung von Balkenreihentragwerken</b> .....	8
Oliver Steinbock, Olaf Mertzsch und Sabine Wellner	
<b>Experimentell gestützte Nachweise von Eisenbahn-Stampfbetonbrücken</b> .....	20
Marc Gutermann und Werner Malgut	
<b>Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite</b> .....	32
Florian Schill und Gregor Schacht	
<b>Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen</b> .....	46
Sebastian Schulze	
<b>Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbetonbrücke zur Analyse von Schädigungsprozessen</b> .....	54
Jens Kühnapfel, Gunter Hahn, Markus Fischer und Stefan Mortag	
<b>Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung</b> .....	66
Ralf Herrmann, Ronald Schneider, Patrick Simon, Falk Hille, Samir Said und Matthias Baeßler	
<b>Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen</b> .....	78
Alois Vorwagner, Maciej Kwapisz, Werner Lienhart, Madeleine Winkler und Urs H. Grunicke	
<b>Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren</b> .....	88
Fritz Binder und Stefan L. Burtscher	
<b>Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring</b> .....	96
Max Käding, Gregor Schacht und Steffen Marx	
<b>Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien</b> .....	106
Ulrich Schneck	
<b>Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke</b> .....	118
Oliver Steinbock, Nina Josiane Giese und Manfred Curbach	
<b>Experimentelle Tragfähigkeitstests des OML in den Jahren 2019 und 2020</b> .....	130
Sabine Wellner, Torsten Hampel und Silke Scheerer	

# Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring

Dipl.-Ing. Max Käding<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Gregor Schacht<sup>1</sup>, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Marx Krontal Partner, Hannover, <sup>2</sup> Institut für Massivbau, TU Dresden

## KURZFASSUNG

*Spannungsrisskorrosionsgefährdete Brücken stellen nach wie vor ein Problem dar und können hinsichtlich ihrer Standsicherheit nur schwer beurteilt werden. Die Schwierigkeit liegt bei diesen Bauwerken darin, einen übermäßigen Ausfall des Spannstahls und damit tragsicherheitsrelevante Zustände frühzeitig zu erkennen. Die hierfür geeignete Schallemissionsanalyse (SEA) erlangt daher zunehmend Aufmerksamkeit.*

*Bei der Anwendung der SEA und Verwendung der Ergebnisse zur sicherheitstechnischen Beurteilung des Tragwerkes muss jedoch mit ausreichender Zuverlässigkeit gewährleistet werden, dass durch die Messung alle signifikanten Schadensereignisse detektiert und identifiziert werden können. Aus diesem Anlass wurde eine umfangreiche Datenbasis von Drahtbrüchen experimentell generiert, statistisch ausgewertet und die Detektionswahrscheinlichkeit von Drahtbrüchen diskutiert.*

## 1 Einleitung

Die rechtzeitige und zuverlässige Erfassung von Degradationsprozessen ist ein zentrales Ziel für den Erhalt der Verkehrsinfrastruktur und die Gewährleistung der Tragsicherheit. Messtechnische Methoden gewinnen in diesem Kontext immer mehr an Bedeutung und finden vielfältig Anwendung [1]–[3]. Eine besonders kritisch zu bewertende Schädigungsart ist die Spannungsrisskorrosion. Hierbei kann es unter spezifischen Voraussetzungen zu einem sukzessiven Ausfall des Spannstahls kommen. Dieser ist jedoch nicht ohne weiteres feststellbar, da die Spannglieder in der Regel in der Betonkonstruktion eingebaut liegen und daher schlecht inspizierbar sind. Weisen diese Bauwerke historisch bedingt quantitative und konstruktive Defizite bei der Betonstahlbewehrung auf, kann beim Ausfall des Spannstahls keine ausreichende Robustheit und Resttragsicherheit gewährleistet werden. In diesem Fall ist eine dauerhafte Überwachung des Bauwerks erforderlich, um die Betriebssicherheit absichern zu können. Für diese Anwendung ist die Schallemissionsanalyse (SEA) ein vielversprechendes Messverfahren,

da Drahtbrüche hiermit sehr gut detektiert und lokalisiert werden können.

Zur Anwendung der SEA als Dauerüberwachungsmethode und zur Verwendung der Ergebnisse für eine baukonstruktive und sicherheitstechnische Beurteilung des Tragwerkes muss gewährleistet sein, dass Drahtbrüche mit einer ausreichend hohen Zuverlässigkeit detektiert und in der Gesamtmenge der gemessenen Ereignisse identifiziert werden können. Aus diesem Anlass wurden zerstörende Untersuchungen an zwei Brückenträgern einer tatsächlich gefährdeten Brücke durchgeführt und die Ergebnisse statistisch ausgewertet. Basierend auf einem vorgegebenen Konfidenzniveau wurden grundlegende Entwurfsparameter für das Messkonzept abgeleitet.

## 2 Detektionswahrscheinlichkeit von Schallemissionsquellen

In der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) wird das Konzept der Detektionswahrscheinlichkeit oder auch Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (engl.: *Probability of Detection* oder PoD) angewendet,

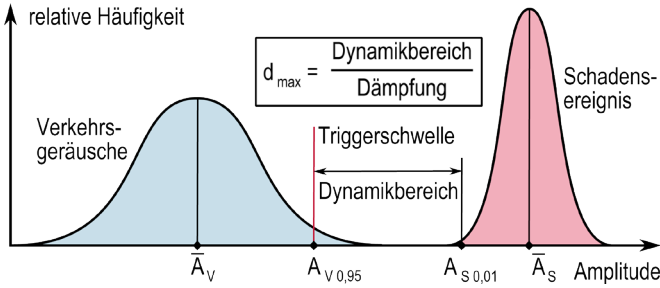
um die Eignung eines spezifischen Prüfsystems bzw. anschließender Analysemethoden zur Detektion bestimmter Fehler zu quantifizieren. Die PoD wird zu diesem Zweck oft in Abhängigkeit der Fehlergröße ermittelt und dargestellt. Für wiederkehrende (aktive) Prüfsysteme, wie bspw. die Ultraschallprüfung, kann dieser Zusammenhang mit Hilfe von Testobjekten weitestgehend eindeutig beschrieben werden. Das Handbuch [4] bietet hierfür eine umfangreiche Anleitung, in der wichtige Grundsätze zur Planung, Durchführung, Analyse und Dokumentation dieser Untersuchungen festgehalten sind. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Bewertung der Prüfverfahren unter ähnlichen Voraussetzungen und Bedingungen erfolgt. Allgemein hin ist die Eignung des angewandten Verfahrens dann gegeben, wenn die maximal zulässige Fehlergröße mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % bei einem Konfidenzniveau von 95 % nachgewiesen werden kann. Maßgebend für die Ermittlung der PoD ist daher nicht der kleinste auffindbare, sondern der größte nicht gefundene Fehler. Die PoD eines Fehlers hängt jedoch nicht ausschließlich von seiner Größe, Form und Orientierung ab. Ebenso haben Variablen wie Sensoren, messtechnisches Setup, Prüfablauf und Personal einen Einfluss und müssen im Zuge der Datenerhebung berücksichtigt werden.

Die SEA nimmt unter den ZfP-Verfahren eine besondere Stellung ein, da hierbei nicht aktiv mit einem Prüfsignal nach einem Fehler gesucht wird, sondern der Schaden beim Entstehen das Signal emittiert, und sich dieses als elastische Welle im Prüfobjekt ausbreitet, bevor es durch einen Sensor und das Messsystem aufgezeichnet wird. Im Hinblick auf die Einflussfaktoren der PoD ergeben sich hieraus verfahrensspezifische Besonderheiten, die in [7] und [8] diskutiert werden. So muss bspw. die typischerweise angegebene „Fehlergröße“ neu überdacht und mittels akustisch messbarer Größen, wie der freigesetzten Signalenergie bzw. -amplitude, quantitativ ausgedrückt werden. Außerdem spielen die komplexen Effekte der Signaldämpfung und -streuung eine wichtige Rolle, insbesondere dann, wenn die Sensorabstände groß

sind und akustische Diskontinuitäten nicht ausgeschlossen werden können. Aus diesem Grund wird für die SEA die Funktion der PoD natürlicherweise in Abhängigkeit der Position angegeben [7], [9]. Letztlich hat die Wahl der Messinstrumente ebenfalls einen Einfluss, da das Antwortspektrum und die Vorverstärkung der Sensoren sowie die Einstellung der Datenerfassung (Triggerschwellwert, Filter etc.) auf die Charakteristik der Quelle und die materialspezifische Dämpfung abgestimmt sein müssen. Jede Veränderung an den Messinstrumenten, wie bspw. ein veränderter Triggerschwellwert, hat damit ebenfalls Auswirkungen auf die PoD.

Zur Quantifizierung der PoD wird in [8] ein Vorgehen basierend auf experimentellen Daten vorgeschlagen. Hierfür wird zunächst ein Referenzdatenset des untersuchten Schadens mit bekanntem Abstand zwischen Quelle und Sensor aufgezeichnet. Daraufhin wird ein Dämpfungsmodell für das untersuchte Bauteil erstellt. Die Referenzdaten und das Dämpfungsmodell werden anschließend in einem PoD-Modell zusammengeführt und die PoD in Abhängigkeit der Schadensposition in Bezug zu den Sensoren vorhergesagt. Die PoD-Vorhersage wurde in [8] beispielhaft für faserverstärkte Platten und zweidimensionale Sensoranordnungen angewandt.

Für den Anwendungsfall der Spanndrahtbruchdetektion besteht ebenfalls die Motivation darin, die PoD quantitativ zu beurteilen. Allgemein hin wird angenommen, dass Drahtbrüche sehr energiereiche Ereignisse sind und daher sehr große Sensorabstände gewählt werden können. Darauf aufbauend ist eine wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens im Brückenbau überhaupt erst möglich. Dennoch sind umfassende Untersuchungen bezüglich der PoD nicht bekannt. Da das Sensorlayout für jedes Bauwerk individuell entwickelt werden muss, ist vom Grundsatz her auch ein zu [8] inverser Ansatz erforderlich. Ausgehend von einem geforderten Konfidenzniveau muss unter Berücksichtigung der bauwerksspezifischen Besonderheiten der maximal mögliche Sensorabstand ermittelt werden. In [10] wurde hierfür ein Vorgehen vor-



gleichen Messungen kann im nächsten Schritt die Dämpfung berechnet werden. Zwischen den Stützpunkten (Messstellen) wird der Dämpfungskoeffizient linear approximiert. Schlussendlich kann aus den gewonnenen Größen und in Abhängigkeit der Erfassungsschwelle (Triggerschwellwert, siehe Bild 1) der Sensorabstand berechnet werden, bei dem eine Detektion mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für leise Signale noch gegeben ist.

Bild 1: Darstellung der Herleitung des maximalen Sensorabstands  $d_{max}$

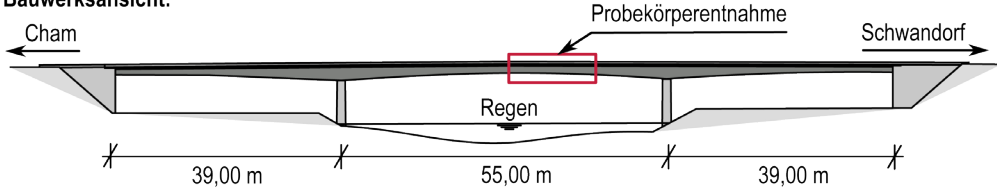
geschlagen, welches aus dem Sicherheitskonzept nach [11] abgeleitet wurde (siehe Bild 1).

Bei diesem Vorgehen muss zunächst ebenfalls das Quellsignal charakterisiert werden, indem die Signalamplitude in bekanntem Abstand zwischen Quelle und Sensor erfasst wird. Die beim Bruch eines Drahtes freigesetzte Energie wird durch die mechanischen Randbedingungen am Bruchort beeinflusst, weshalb die lokalen Verbundbedingungen dokumentiert werden müssen. Die Daten werden anschließend zur Approximation einer Verteilungsfunktion genutzt, auf deren Grundlage wiederum Quantile ermittelt werden. Um ein entsprechend hohes Konfidenzniveau zu gewährleisten, werden das 1%- bzw. das 5%-Quantil berechnet. Aus den

### 3 Experimentelle Untersuchungen

Zur Erweiterung der Referenzdatenbasis wurden zerstörende Untersuchungen an zwei Trägerelementen durchgeführt, die beim Abbruch einer Brücke bei Roding gewonnen wurden. Das Bauwerk überführt die B85 über den Regen im Streckenabschnitt zwischen Schwandorf nach Cham und wurde 1965 als Dreifeldträgerkonstruktion in Spannbetonbauweise mit den Spannweiten 39 m – 55 m – 39 m hergestellt (siehe Bild 2). Der Überbau besteht für jede Fahrriichtung aus einem separaten Spannbetonhohlkasten, welcher im Bereich der Brückenpfeiler gevoutet ist.

#### Bauwerksansicht:



#### Querschnitt im Entnahmebereich:

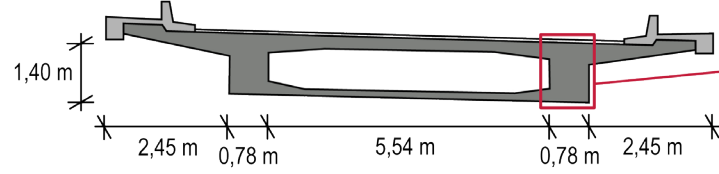


Bild 2: Bauwerksansicht und Querschnitt des Überbaus, Entnahmestellen der Trägerelemente am nördlichen Steg des nördlichen Überbaus

Das Bauwerk wurde sowohl in Längs- als auch in Querrichtung vorgespannt. In den Längsträgern kam das BBRV-Suspa-Verfahren zur Anwendung. Je Hauptträger wurden bis zu 24 Spannglieder mit je 42 runden Einzeldrähten von 6 mm Durchmesser verbaut. Der Abstand zwischen den einzelnen Spanngliedachsen betrug in vertikaler und horizontaler Richtung etwa 12 bis 15 cm. Gemäß der Spannvorschrift wurde das Bauwerk auf ca. 66 % beschränkt vorgespannt. Die Spannkraft betrug je Spannglied ca. 1160 kN, was einer Vorspannung von ca. 980 N/mm<sup>2</sup> entspricht. Der Spannstaahl wurde vom Hersteller Felten & Guilleaume geliefert und ist damit als stark spannungsrissskorrosionsgefährdet einzustufen [12].

In 2019 wurde in gleicher Lage ein Ersatzneubau als Verbundkonstruktion errichtet. Im Zuge dieser Maßnahme wurden nach Außerbetriebnahme des nördlichen Brückenteils unter Leitung des Instituts für Massivbau der Universität der Bundeswehr München eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen in situ durchgeführt [13]. Beim Abbruch des Bauwerks wurden zwei Trägerelemente mit je ca. 7 m Länge entnommen und für weitere Experimente nach München

transportiert. Dort wurden jeweils an zwei Stellen zwei Spannglieder freigelegt und für die Spanndrahttrennung zugänglich gemacht.

Im Zuge der Versuchsdurchführung wurden am Träger 1 insgesamt 38 Drahtbrüche erzeugt. Aufgrund der im Vergleich zum Träger 2 schlechteren Datenqualität wurden diese Signale nicht bei der parameterbasierten Auswertung berücksichtigt. Die gemessenen Signale waren im Durchschnitt 15 bis 20 dB leiser. Dies wird auf eine deutlich schlechtere Kopplung der Sensoren sowie die starke Schädigung des Bauteils durch einen Längsrisss im Bereich der Spannglieder und damit einhergehender Verbundlösung zwischen dem Hüllrohr und dem Konstruktionsbeton zurückgeführt (siehe Bild 3). Der Längsrisss ist im Zuge der Trägerentnahme am Bauwerk aufgetreten.

Am Träger 2 wurden 75 Drahtbrüche provoziert, je Spannglied und Öffnung 17 bis 21 Stück. In Bild 4 sind das Trägerelement und eine Öffnung mit der repräsentativen Sensoranordnung abgebildet. Die Sensoren wurden in Achse des oberen Spanngliedes angeordnet. Das untere Spannglied weist demzufolge einen Versatz von ca. 12 cm zur Sensorachse auf.



Bild 3: Trägerelement 1, Längsrisss im Bereich der Spannglieder





Bild 4: Trägerelement 2 (links) und Öffnung 1 an diesem mit angeklebten Sensoren (rechts)

Die Trennung der Drähte erfolgte bei beiden Trägerelementen mit einem Dremel. Etwa 7 % der Drahtbrüche sind beim zwischenzeitlichen Absetzen des Dremels spontan gebrochen. Der Großteil der Daten ist daher durch die Trennräume überlagert. Die freigesetzte Energie ist beim Drahtbruch im Vergleich zum Dremel jedoch derart hoch, dass eine Verzerrung der Ergebnisse mit Hinblick auf die angestellten Analysen zur Charakterisierung des Ausgangssignals vernachlässigt wird.

An der Öffnung 1 des Trägerelements 2 wurde am Ende des Versuchs noch ein direkter Trennschnitt mit einem großen Trennschleifer durchgeführt. Durch dieses Gerät wurden deutlich stärkere Emissionen freigesetzt. Für diese Drahtbrüche kann jedoch unterstellt werden, dass die lokalen Verbundbedingungen am besten und damit die freigesetzte Energie am geringsten sind. Für die Auswertung liefert diese Konstellation wichtige Hinweise zur „leisesten“ Drahtbruchamplitude.

#### 4 Dokumentation der mechanischen Randbedingungen

Das Trennen eines Spanndrahtes setzt die anliegende Vorspannkraft frei und bewirkt eine elastische Rückdehnung. In Abhängigkeit der vorherrschenden Verbundqualität zwischen Spanndraht und Verpressmörtel stellt sich ein Schlupf des Drahtes ein, welcher in Bezug zur Ausgangsposition des Trennschnittes bestimmt werden kann. Am Einzeldraht sind solche Messungen mit Genauigkeitsanforderungen im Be-

reich eines Zehntelmillimeters schwer umzusetzen, so dass auf eine globale Messung am Spannglied am Trennschnitt des Trägerelements zurückgegriffen wurde. Hier wurde der Schlupf als Abstand zwischen der Durchtrennungseben des Querschnitts und der Ebene der zurückgezogenen, abgeschnittenen Spanndrähte quantitativ ermittelt. Die Schnittkanten eines Trägers wurden hierzu an der Universität der Bundeswehr München mit dem Lichtschnittverfahren [14] als 3D-Scantechnik zwecks einer zukünftigen genaueren Untersuchung detailliert erfasst [13]. Mit diesem Verfahren besteht die Möglichkeit einer vollflächigen Erfassung der Oberflächen auf der Basis von Punktwolken (siehe Bild 5, links), in die beliebig Referenz- und Messebenen eingefügt und relevante Datenbereiche mittels Best-Fit-Methodik extrahiert werden können.

In Bild 5 sind die Schlupfmaße aus den Untersuchungen von 20 Spanngliedern abgebildet. Eine zunehmende Häufung ist im Bereich von 3 bis 4 mm festzustellen. Unter Berücksichtigung der im Abschnitt 3 angegebenen Vorspannung kann hierfür die erforderliche Verbundspannung über die Verankerungslänge des Einzeldrahtes rechnerisch abgeschätzt werden. Der Berechnung wurde eine gleichmäßige, lineare Lasteinleitung zugrunde gelegt. Es ergibt sich dafür eine Spannung von 8,5 bis 11 N/mm<sup>2</sup>. Diese Werte sind vergleichsweise hoch und spiegeln damit sowohl eine hohe Qualität des Verpressmörtels bzw. der Verpressung wider als auch, dass eine radiale Umschnürung und Zwangswirkung durch das Hüllrohr auf die Drähte wirkt.

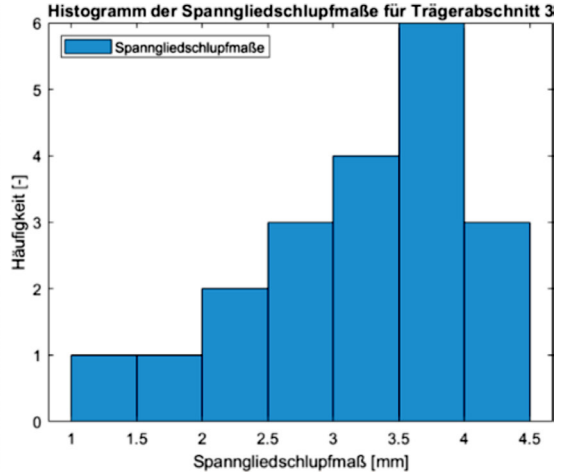


Bild 5: Generiertes Netz der Schnittkante (links) und Auswertung der Spanngliederschlupfmaße für den Trägerabschnitt 3 (rechts)

## 5 Quantifizierung der Detektionswahrscheinlichkeit

### 5.1 Referenzdaten des Drahtbruchs

Das Schadensereignis „Drahtbruch“ wurde auf Grundlage der Referenzdaten des Trägerelements 2 charakterisiert. Die Messsignale wurden hinsichtlich ihrer maximalen Amplitude ausgewertet und in Abhängigkeit des Abstands zwischen Quelle und Sensor und der Lage des

Spanngliedes in der Öffnung zusammengefasst. Die relative Häufigkeitsverteilung wurde als Histogramm dargestellt, über welche die Verteilungsfunktion mittels Gauß'scher Kurvenanpassung angenähert wurde. Hierfür wurden letztlich die statistischen Parameter ermittelt. In Bild 6 sind die einzelnen Verteilungen jeweils für die obere bzw. untere Spanngliedlage angegeben. In Tabelle 1 sind die statistischen Parameter zusammengefasst.

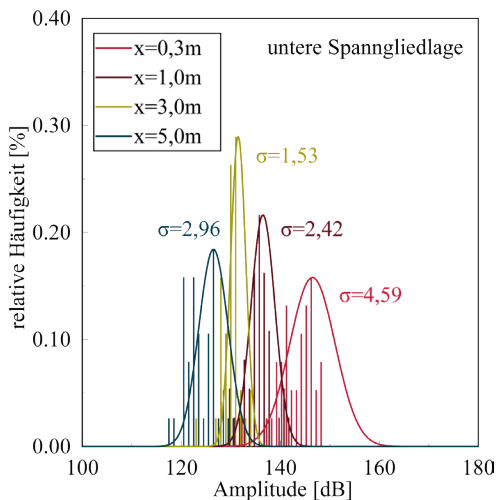
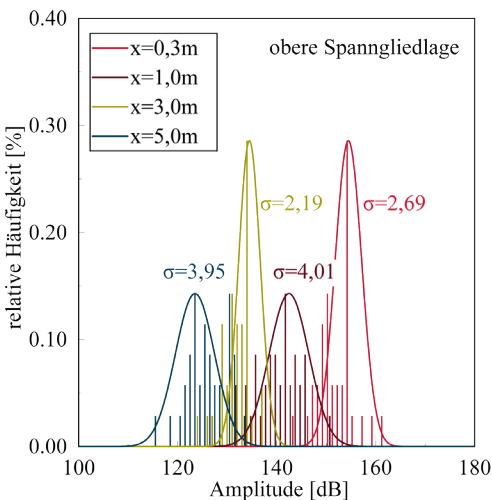


Bild 6: Verteilungsfunktionen für die Drahtbrüche am Trägerelement 2 aufgeteilt nach Spanngliedlage

Abstand x zur Bruchstelle [m]	Spanngliedlage	Signalanzahl	Anteil ohne Sättigung [%]	$\mu = \bar{A}$	$\sigma$
0,3	oben	35	74,4	154,5	2,69
	unten	38	100	146,5	4,59
1,0	oben	35	100	142,5	4,01
	unten	37	100	136,5	2,42
3,0	oben	35	80	134,5	2,19
	unten	38	94,7	131,5	1,53
5,0	oben	35	100	123,5	3,95
	unten	38	100	126,5	2,96

Tabelle 1: Zusammenfassung statistischen Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  der Verteilungsfunktionen

Auffällig ist, dass die Standardabweichungen in Abhängigkeit des Abstands zwischen Quelle und Sensor stark variieren. Besonders in 3,0 m Entfernung streuen die Amplituden kaum, wohingegen an der Messposition in 5,0 m Entfernung, wo mit der gleichen Vorverstärkung gemessen wurde, deutlich größere Streuungen festzustellen sind. Eine Erklärung kann hierfür sein, dass die Drahtbruchsignale der zweiten Öffnung im Abschnitt zwischen 3 und 5 m das bereits um ca. 50 % geschädigte Spannglied der ersten Öffnung durchlaufen mussten (siehe Abschnitt 5.2). Eine messtechnische Ursache wird ausgeschlossen.

Die statistische Betrachtung soll maßgeblich genutzt werden, um das untere Quantil der Verteilungsfunktion abzuschätzen. Daher müssen die Ergebnisse aus dem direkten Trennschnitt ebenfalls betrachtet werden. Bei ca. 0,5 m Abstand zwischen Quelle und Sensor ergeben sich für diese Daten die Parameter zu  $\mu = 135,3$  dB und  $\sigma = 6,10$ . Die Streuung ist in diesem Fall höher als in den zuvor durchgeführten Betrachtungen und wird daher maßgebend. Durch Berücksichtigung der höchsten Streuung soll dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Referenzdatenbasis für Drahtbrüche aus statistischer Sicht immer nur einen vergleichsweise begrenzten Umfang aufweisen wird. Im Fall des direkten Trennschnitts wurden bspw. 45 Drähte durchtrennt, in den Daten wurden jedoch nur 21 Drähte zuverlässig identifiziert. Die anderen Drahtbrüche wurden durch die Geräusche des Trennschleifers oder Meißels überlagert. Eine größere Streuung kann daher nicht mit Gewiss-

heit ausgeschlossen werden. Die Quantile ergeben sich zu  $A_{0,05} = 125,3$  dB und  $A_{0,01} = 121,1$  dB.

### 5.2 Dämpfungseigenschaften

Die Dämpfungsprofile wurden für jeden Träger, jede Öffnung und jedes Spannglied separat ermittelt. Hierzu wurden die Amplituden der Drahtbrüche in Abhängigkeit des Abstands zwischen Quelle und Sensor als Boxplot aufbereitet (siehe Bild 7). Die Stützpunkte wurden anschließend linear angenähert, um mit dem Anstieg der Geraden das Dämpfungsmaß zu ermitteln. Da nicht durchgehend der gleiche Messaufbau gewählt wurde, weichen die Stützstellen für die Trägerelemente und Öffnungen jeweils etwas ab. Durch die Regressionsgeraden wurde ein bilinearer Verlauf angenähert, da die Dämpfung in geringem Abstand zur Quelle deutlich stärker als in größerer Entfernung ist. Dieser Effekt kann auf die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung zurückgeführt werden und muss bei der Berechnung der Sensorabstände Berücksichtigung finden. Ebenso ist festzustellen, dass die Exzentrizität zwischen der Sensorachse und der unteren Spanngliedlage bereits eine deutlich messbare Dämpfung zur Folge hat. Selbst in größerer Entfernung zur Quelle sind die Signale des unteren Spanngliedes 3 bis 5 dB leiser im Vergleich zum oberen.

Diese Effekte gelten für die Höhen- genauso wie für die Tiefenlage der Spannglieder, was verdeutlicht, dass die Lage der Sensoren gut auf den Spanngliedverlauf abzustimmen ist und

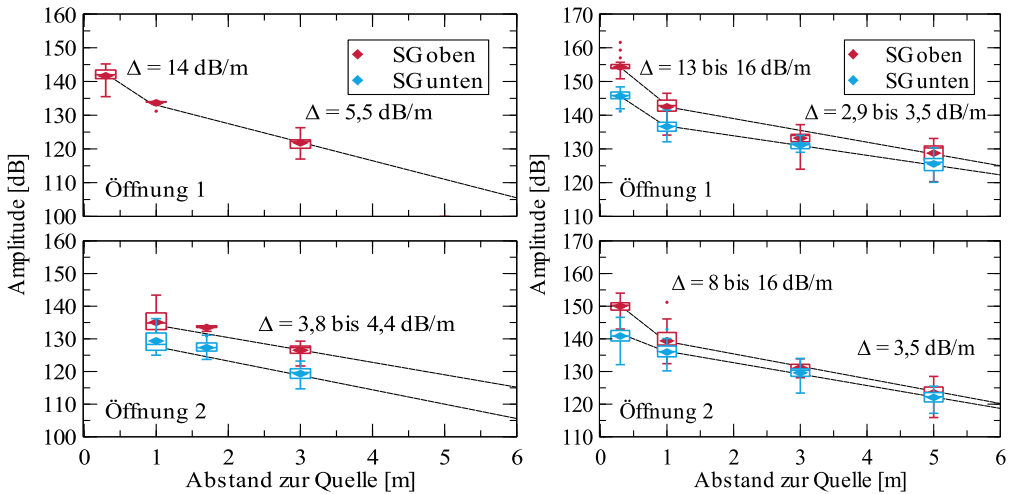


Bild 7: Dämpfungseigenschaften der Trägerelemente 1 (links) und 2 (rechts), Aufteilung der Dämpfungskurven für jedes Spannfeld (obere/untere Lage)

dass diesem Umstand auch in der Berechnung der Sensorabstände Rechnung getragen werden sollte (siehe Abschnitt 5.3).

### 5.3 Diskussion am Beispiel der Brücke in Roding

Im Ergebnis der angestellten Auswertungen konnten eine Amplitude der Quelle von  $A_{0,05} = 125,3$  dB bzw.  $A_{0,01} = 121,1$  dB in 0,5 m Abstand und eine bilineare Dämpfungskurve mit 16 dB/m für  $d \leq 1$  m und 3,5 dB/m für  $d > 1$  m ermittelt werden. Im Weiteren wird angenommen, dass der Schwellwert für eine triggergesteuerte Signalerfassung bei 90 dB eingestellt wird. Dies entspricht einem typischen Schwellwert, wie er etwa bei einer Sensorkonfiguration ohne Vorverstärkung gewählt wird. Der verfügbare Dynamikbereich beträgt damit für ein entsprechend hohes Konfidenzniveau von ca. 30 bis 35 dB. Hieraus kann der zugehörige Sensorabstand für das Bauwerk berechnet werden, welcher dann 6,3 bis 7,7 m beträgt. Je Hauptträgersteg sind damit 18 bis 22 Sensoren vorzusehen.

Typischerweise werden die Sensoren auf einer Seite des Stegs appliziert. Das hinterste Spannfeld liegt hierauf bezogen in der 6. Lage und ca. 70 cm tief im Beton. Trifft man die Annahme,

dass der Sensor in vertikaler Ebene zentrisch zum Schwerpunkt der Spannlieder angeordnet ist und diese damit optimal abdeckt, so muss man für die hintersten Spannlieder trotzdem mit einer erheblichen Reduktion des Konfidenzniveaus rechnen (siehe Abschnitt 5.2). Um diesem Umstand entgegenzusteuern, können weitere Parameter des Signals, auch Features genannt, oder anspruchsvollere Analysemethoden herangezogen werden. Mit zunehmender Dimensionalität der Bewertungskriterien wird die Aufgabe zu einem Problem der Signalklassifizierung und damit klassischerweise der Mustererkennung zugeordnet. Hierdurch entsteht jedoch die Möglichkeit, die Detektionswahrscheinlichkeit in Summe zu steigern und Redundanzen über mehrere Kriterien aufzubauen.

## 6 Zusammenfassung

Die Schallemissionsanalyse gewinnt zur Dauerüberwachung von Infrastrukturbauwerken zunehmend an Aufmerksamkeit. Ein vielversprechender Anwendungsfall hierfür sind spannungsrissskorrosionsgefährdete Spannbetonbrücken. Zum einen ist bei betroffenen Bauwerken eine Beurteilung der Gefährdung durch den Schädigungsprozesses mittels klassischer Methoden der Bauwerksdiagnostik oder

Bauwerksprüfung nur bedingt möglich. Zum anderen bietet die SEA die Möglichkeit, den Schaden direkt zu detektieren und zu lokalisieren. Dennoch liegen nur begrenzt Kenntnisse zur signaltechnischen Charakteristik von Drahtbrüchen vor, welche eine wichtige Grundlage für die Entwicklung zuverlässiger Sensorlayouts sind. Aus diesem Anlass wurden an zwei Probekörpern eines real gefährdeten Bauwerks 113 Spanndrähte durchtrennt. Die Amplituden der Ereignisse wurden statistisch aufbereitet und das Dämpfungsverhalten durch eine bilineare Regression angenähert. Unter Gewährleistung einer Detektionswahrscheinlichkeit von 95 % bzw. 99 % wurden über ein Modell die maximal möglichen Sensorabstände beispielhaft für das Bauwerk ermittelt.

## Danksagung

Die Autoren danken herzlich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml, Herrn M.Sc. Matthias Haslbeck und Herrn M.Sc. Christian Merkl des Instituts und Labors für konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München, dass Sie die Durchführung der Messungen ermöglicht und bei der Erstellung des Beitrags fachlich unterstützt haben.

## Literatur

- [1] Bolle, G.; Mertzsch, O.; Marx, S.: Messtechnische Dauerüberwachung zur Absicherung der Restnutzungsdauer eines spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brückenbauwerks. Beton- und Stahlbetonbau 122 (2017) 2, S. 75–84 – DOI: 10.1002/best.201600067
- [2] Wenner, M.; Käding, M.; Marx, S.: Messtechnische Überwachung bei Brückenbaumaßnahmen. Bau-technik 95 (2018) 1, S. 44–52 – DOI: 10.1002/bate.201700101
- [3] Marx, S.; Wenner, M.; Käding, M.; Wedel, F.: Vom Rechnen und Wissen – Monitoring an den Talbrücken der Neubaustrecke Erfurt–Halle/Leipzig. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 28. Dresdner Brückenbausymposium am 12./13.03.2018 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2018, S. 41–56
- [4] 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
- [5] Marx, S.; Grünberg, J.; Schacht, G.: Methoden zur Bewertung experimenteller Ergebnisse bei kleinem Stichprobenumfang. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 1, S. 2–13 – DOI: 10.1002/best.201800080
- [6] MIL-HDBK 1823A: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment. Department of Defense, 2009
- [7] Pollock, A.: Probability of detection for acoustic emission. Journal of Acoustic Emission 25 (2007), S. 167–172
- [8] Sause, M. G. R.; Linscheid, F. F.; Wiehler, M.: An Experimentally Accessible Probability of Detection Model for Acoustic Emission Measurements. Journal of Nondestructive Evaluation 37 (2018) 17 – <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0474-4>
- [9] Tschöke, K.; Gaul, T.; Schubert, L.; Mueller, I.: Rechnergestützte POD-Bestimmung für SHM-Verfahren basierend auf geführten Wellen im Automobilbereich. In: Erhard, A. (Hrsg.): Tagungsband zur DGZfP DACH-Jahrestagung 2019 – Zerstörungsfreie Materialprüfung, 27.–29.05.2019 in Friedrichshafen, 2019, 10 S. (digital)
- [10] Käding, M.; Schacht, G.; Marx, S.: Schallemissionsmonitoring im Spannbetonbrückenbau – Herausforderungen und Möglichkeiten. In: Isecke, B.; Kriege, J. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Brückenkolloquium, 08./09.09.2020 in Esslingen, 2020, S. 549–560
- [11] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [12] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.): Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion). Ausgabe 2011
- [13] Haslbeck, M.; Merkl, C.; Braml, T.: Daten als Grundlage für KI-Anwendungen – Beispielprojekt Brücke Roding. In: Isecke, B.; Kriege, J. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Brückenkolloquium, 08./09.09.2020 in Esslingen, 2020, S. 205–214
- [14] Schuth, M.; Buerakov, W.: Handbuch Optische Messtechnik. München: Hanser Verlag, 2017

## Bildquellen

Bild 1: Max Käding, aus [10]  
 Bilder 2–4, 6, 7: Max Käding  
 Bild 5: Bild aus [12], Grafik: Christian Merkl

# Schleibinger Geräte

Messen statt schätzen

## Baustoffprüfgeräte

### Dauerhaftigkeit

- Bestimmung des Frost-Tau-Widerstandes von Baustoffen und Böden
- Nachweis des Alkalireaktivitätspotentials in Baustoffen (AKR)



### Schwinden

- Erfassung des Schwindverhaltens der Baustoffe im plastischen und festen Zustand
- Bestimmung des Schüsselverhaltens und des behinderten Schwindens



### Verarbeitbarkeit

- rheologische Messungen an Mörtel und Frischbeton
- Testen der Pumpbarkeit von Mörtel und Beton



[www.schleibinger.com](http://www.schleibinger.com)

# Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 55

---

Das 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ (SEUB) fand am 08. März 2021 als digitale Veranstaltung an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

In der Keynote Lecture wurde über Versuche an einem Brückenbauwerk sowohl in situ als auch im Prüflabor berichtet – eine Verifizierung, die nur selten vorkommt. Danach spannte sich der thematische Bogen über die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken, berührungslose Messverfahren im Praxistest, über Monitoring und schwingungsbasierte Messungen an Bauwerken hin zu faseroptischen Messsystemen und ihren Einsatzmöglichkeiten bei der Risserfassung. In weiteren Beiträgen wurde eine neue Methode zur verbesserten Bestimmung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt, über ein Verfahren zur Spanndrahtbruchdetektion mittels Schallemission und über das Potential des kathodischen Korrosionsschutzes berichtet. Mit einem Bericht über eine erfolgreiche Probelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke endete die Tagung.

Das 12. SEUB ist für März 2023 geplant.

Der vorliegende Tagungsband ist als digitale Version Open Access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden abrufbar.

ISSN: 1613-6934

ISBN: 978-3-86780-665-7