

Erfahrungen zum Dämpfungsverhalten impulsartiger, energiereicher Signale an Spannbetonkonstruktionen

Max KÄDING¹, Gregor SCHACHT¹, Steffen MARX²

¹ MKP GmbH, Weimar

² Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden, Dresden

Kontakt E-Mail: max.kaeding@marxkrontal.com

Kurzfassung. Die Schallemissionsanalyse hat sich im Brückenbau als vielversprechendes Messverfahren für die Überwachung spannungsrissskorrosionsgefährdeter Bauwerke zur Detektion einzelner Drahtbrüche etabliert. Geschickt verteilte Sensoren ermöglichen eine gesamtheitliche Überwachung. Die Verteilung der Sensoren am Bauwerk stellt dabei eine zuverlässige Detektion der Ereignisse sicher und ist damit für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg der Messung entscheidend. Hierfür ist es erforderlich, den maximal möglichen Sensorabstand zu bestimmen, welcher von der Charakteristik der Signalquelle, dem Signalübertragungsverhalten des Bauwerks bzw. Materials, sowie den vorherrschenden Nebengeräuschen abhängt.

Der vorliegende Beitrag thematisiert in dieser Kette der Signalübertragung das Ausbreitungsverhalten in großen Spannbetonkonstruktionen. Hierzu werden eigene Experimente vorgestellt, die an zwei Brücken unterschiedlicher Bauweise in-situ und an sechs Brückenträgerelementen von drei Brücken unter laborähnlichen Bedingungen durchgeführt wurden. Letztere wurden bei Rückbauvorhaben gewonnenen. Im Fokus der Untersuchungen stand das frequenzabhängige Dämpfungsverhalten für unterschiedliche Signalquellen. Die üblicherweise praktizierte orthogonale Anregung mit einem Rückprallhammer auf der Betonoberfläche wurde mit der Anregung longitudinal zur Spanngliedachse bzw. durch reale Drahtbrüche verglichen. Die Drahtbrüche wurden an den Brückenträgerelementen künstlich provoziert. Aus dem Vergleich der Ergebnisse an den verschiedenen Objekten wurde die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Messungen mit dem Rückprallhammer auf Drahtbrüche untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Dämpfungskoeffizienten der Drahtbrüche in verschiedenen Frequenzbereichen zwar stärker streuen, im Median jedoch denen von Rückprallhammerschlägen sehr ähneln. Es wurde weiterhin gezeigt, dass die Dämpfung im Frequenzbereich von 0-10 kHz mit ca. 4,9 dB/m nur etwa halb so groß ist, wie im Bereich von 40-50 kHz mit ca. 10,5 dB/m.

1. Einführung und Motivation

Ein signifikanter Anteil der Brücken unserer Verkehrsinfrastruktur ist in Spannbetonbauweise hergestellt. Viele dieser Bauwerke wurden in den 1950er und 1960er Jahren errichtet und stehen aufgrund zunehmender Beanspruchung am Rande ihrer Belastbarkeit. Im besonderen Maße betroffen sind die Spannbetonbrücken, die mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl hergestellt wurden. Bei diesen Bauwerken



ist unter bestimmten Voraussetzungen ein schlagartiger Versagensfall möglich. Um die vorhandenen Defizite kompensieren zu können, ist eine gezielte Überwachung erforderlich. Hierfür hat sich das Schallemissionsmonitoring (SEM) zur Detektion von Drahtbrüchen erfolgreich etabliert [1-4]. Der Erfolg einer messtechnischen Dauerüberwachung hängt jedoch in entscheidendem Maße vom Messkonzept und dem Entwurf der Sensoranordnung ab. Im Fall der Schallemissionsanalyse ist hierfür die Kenntnis des material- und bauwerksspezifischen Ausbreitungsverhaltens eine wesentliche Grundlage. Bestenfalls finden zur objektbezogenen Bestimmung Vormessungen in der Planungsphase statt. Ist dies aufgrund des Projektablaufs oder der geplanten Zeitschiene (z. B. bei besonderer Dringlichkeit) nicht möglich, muss auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.

Das Ausbreitungsverhalten elastischer Wellen im Stahl- und Spannbeton wurde bereits vielfach untersucht. Auf Materialebene wurden bspw. in [5-9] der Einfluss der Betonzusammensetzung (z. B. Zuschlagsart und -größe), von Rissen und von Bewehrung diskutiert. Auf Strukturebene wurden in [10-15] Erfahrungen an Brückenbauwerken dokumentiert und u. a. Dämpfungskoeffizienten exemplarisch für Spanndrahtbrüche und für Rückprallhammerschläge als Referenzquelle bestimmt. Die Analysen erfolgten im Regelfall auf Grundlage der Peak-Amplitude des Zeit-Amplituden-Signals und betragen zwischen 2,6 und 7,0 dB/m.

Eine detaillierte Analyse der frequenzabhängigen Dämpfung wurde bei diesen Untersuchungen bisher nicht thematisiert und ist daher Gegenstand des vorliegenden Beitrags. Außerdem war der Stichprobenumfang bisheriger Untersuchungen nur moderat. Insbesondere für Spanndrahtbrüche war die Anzahl vorhandener Ereignisse gering. Den vorliegenden Auswertungen liegen hingegen mehrere Hundert Ereignisse zugrunde und bilden die statistisch erforderliche Basis. Als Referenzquelle zum Spanndrahtbruch wird häufig der Rückprallhammer verwendet. Durch dieses Prüfinstrument wird ein starker Aufprall auf die Betonoberfläche erzeugt. Der in das Bauwerk eingeleitete Impuls ist sehr energiereich und an nahezu beliebiger Stelle am Bauwerk reproduzierbar. Mit dem Rückprallhammer werden die Signale normalerweise orthogonal zur Spanngliedachse in die Betonoberfläche eingeleitet, wohingegen sich die Drahtbruchsignale longitudinal im Spannglied ausbreiten. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist daher die Vergleichbarkeit des Ausbreitungsverhaltens dieser beiden Signalquellen und die Übertragbarkeit von Messergebnissen, die mit dem Rückprallhammer gewonnen wurden, auf das im Regelfall unbekannte Drahtbruchereignis. Die Rückprallhammerschläge wurden aus diesem Grund auch longitudinal in das Spannglied eingeleitet und mit den orthogonal an der Betonoberfläche erzeugten Signalen und den Drahtbrüchen verglichen.

2. Experimentelle Untersuchungen an Bauteilen und Messungen an Brücken

2.1 Messungen an Brückenträgern unter Laborbedingungen

Die Messungen an den Brückenträgern wurden alle nach einem ähnlichen Konzept durchgeführt. In ausgewählten Bereichen wurden die Spannglieder bzw. Spanndrähte freigelegt und an diesen die Spanndrähte einzeln getrennt. Die Anordnung der Messstellen erfolgte entlang der Längsachse des jeweiligen Spanngliedes in Bezug auf den Ort des Drahtbruches bzw. der Signaleinleitung mit dem Rückprallhammer. Die Probekörper befanden sich in einem weitestgehend ungeschädigten Zustand und die Signalausbreitung konnte ungehindert entlang des Spannstahls erfolgen. Eine detaillierte Beschreibung der Probekörper und Dokumentation der Versuche ist u. a. in [15, 16] zu finden. Eine überblickende Ausführung sei an dieser Stelle dennoch gegeben:

- Träger einer Hohlkastenbrücke bei Roding:

Beim Rückbau einer Brücke in der Nähe der Stadt Roding wurden zwei Stegsegmente gewonnen (siehe Abbildung 1, links). Das Bauwerk wurde 1965 gebaut. Die untersuchten Probekörper enthielten 21 Spannglieder mit jeweils 42 Drähten. Der Drahtdurchmesser betrug 6 mm. Jedes Element war etwa 7 m lang. Für die Untersuchungen wurden zwei Spannglieder freigelegt und an zwei Stellen jeden Probekörpers geöffnet. An jeder Öffnung wurden die Drähte durchtrennt. Im Bereich der Öffnungen wurden ebenfalls Signale mit dem Rückprallhammer erzeugt (orthogonale Signaleinleitung). Weiterhin wurden mit dem Rückprallhammer an den Stirnseiten der Träger Signale in Längsrichtung in die freien Enden der Spannglieder eingeleitet.

- Typisierte Fertigteilträger (BT500) einer Brücke bei Stolpe:
Die Brücke bei Stolpe überführte einen landwirtschaftlichen Weg über die A24 und wurde 1981 aus Fertigteilen der Typenserie BT500 mit BSG-50 Spanngliedern der ehemaligen DDR hergestellt. Die Länge des Fertigteils betrug 11 m. Jedes Spannglied bestand aus 16 Drähten. Der verbaute ovale Spannstaahl gilt generell als sehr anfällig gegenüber der Spannungsrisskorrosion. Aus diesem Grund wurde das Bauwerk rückgebaut und zwei Träger für die Versuche bereitgestellt. Am ersten Probekörper *a* wurden die Spannglieder an vier Stellen geöffnet. Am zweiten Probekörper *b* wurden acht Trennstellen eingerichtet und Drahtbrüche künstlich erzeugt. Neben den Drahtbrüchen wurden Signale mit dem Rückprallhammer an der Betonoberfläche neben den Öffnungen und an den freien Spanngliedenden in deren Längsrichtung erzeugt.
- Fertigteilträger mit sofortigem Verbund einer Brücke bei Witzenhausen:
Das dritte Paar Probekörper wurde beim Rückbau einer Nebenstraße über eine Eisenbahnstrecke gewonnen. Die Fertigteillemente wurden 1962 im Spannbett mit sofortigem Verbund mit einer Länge von 9 m hergestellt. Jeder Träger enthielt 12 gerippte, ovale Spanndrähte. Im Vergleich zu den Probekörpern der anderen Brücken waren die Trägerelemente der Witzenhausener Brücke mit einem profilierten Querschnitt weniger massiv ausgeführt. Je Probekörper wurden fünf Bauteilöffnungen hergestellt, an denen die Drähte getrennt wurden. Auch in diesem Fall wurden mit dem Rückprallhammer Signale im Bereich der Öffnungen und an den Enden der Spanndrähte in deren Längsrichtung erzeugt.

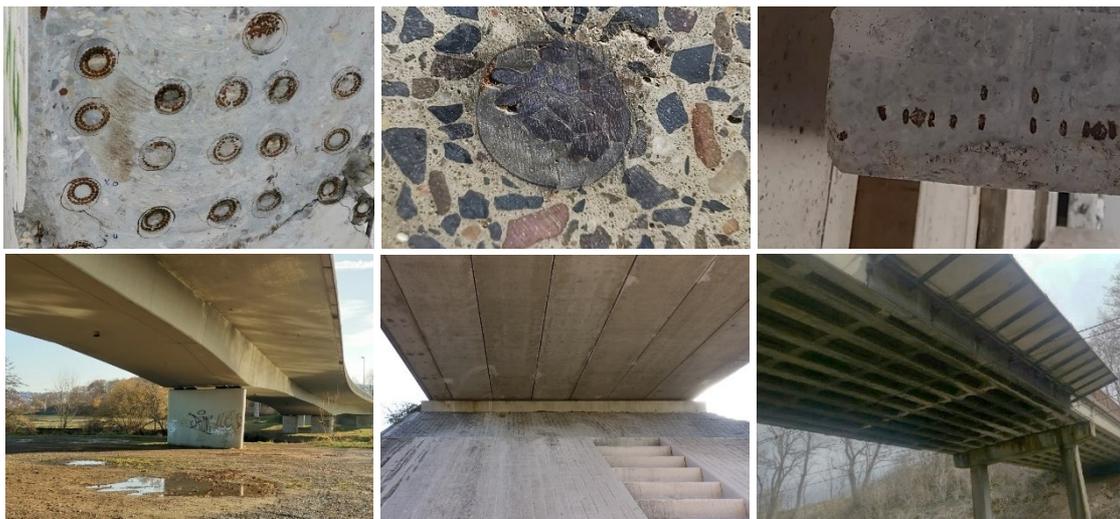


Abb. 1. Die Probekörper wurden beim Rückbau von Bauwerken gewonnen, die nach verschiedenartigen Konstruktionsweisen gefertigt wurden: Hohlkasten mit Spanngliedgruppe (links, Roding), Fertigteil mit Spannglied (Mitte, Stolpe/BT500) und Fertigteil mit Einzeldrähten (rechts, Witzenhausen).

Für die Versuche wurden ein AMSY-6 Messsystem der Firma Vallen Systeme GmbH verwendet. Hauptsächlich wurden Sensoren des Typs VS30 mit einem flachen Frequenzgang

im Bereich von 25 bis 80 kHz eingesetzt. Dieser Sensortyp wurde an allen Messpositionen eingesetzt. Das Datenblatt des Sensortyps ist auf der Homepage des Herstellers zu finden. Der analoge Hochpassfilter des Systems AMSY-6 wurde auf eine Grenzfrequenz von 0,5 kHz eingestellt. Es wurde keine weitere analoge oder digitale Filterung vorgenommen.

Eine Herausforderung bei der Erfassung der Drahtbruch- und Rückprallhammer-signale ist die hohe Ausgangsamplitude beider Quellen. In geringem Abstand zum Quellort wird der Eingangsspiegel am Messgerät leicht überschritten, weshalb die Konfiguration der Messkette entsprechend anzupassen ist und die Signale in angemessenem Maß gedämpft werden müssen. Zu diesem Zweck wurden spezielle Dämpfungsglieder eingesetzt, die effektive Dämpfungen von -20 und -40 dB erreichen.

2.2 Messungen an zwei Brücken in-situ

Die Untersuchungen mit dem Rückprallhammer wurden um Messungen an zwei Bestandsbauwerken ergänzt, um hierdurch die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Brückenträger auf reale Strukturen abzusichern. Die Bauwerke unterscheiden sich durch ihre geometrischen Abmessungen und ihre Vorschädigung.

Die Stennertbrücke in Hagen-Hohenlimburg überführt die B7 über den Fluss Lenne mit einer Gesamtlänge von 102,70 m (Abbildung 2 links). Der Lastabtrag erfolgt durch drei Hohlkästen, die mit der Fahrbahnplatte verbunden sind. Das Bauwerk wurde 1959 errichtet und der verwendete Spannstahl ist nach [17] als besonders spannungsrissskorrosionsgefährdet eingestuft. Das Bauwerk befindet sich darüber hinaus, dem Alter entsprechend, jedoch in grundsätzlich guten und rissfreien Zustand, so dass eine gezielte Überwachung veranlasst und 2018 u. a. ein SEM-System installiert wurde. Die Sensoren wurden hierfür seitlich an den 50 cm dicken Stegen installiert. Im Zuge der Installation wurden u. a. Messungen zur Bestimmung des Dämpfungsprofils durchgeführt. Im Gegensatz zu den Messungen an den Brückenträgern, bei denen der Ort der Signalemission stationär war, wurden hier die Signale mit dem Rückprallhammer an verschiedenen, variablen Positionen eingeleitet. Die Auswertung erfolgte für einen Sensor und in Bezug auf dessen Position.

Als weiteres Untersuchungsobjekt wurde die Werrabrücke in Walldorf herangezogen (Abbildung 2 rechts). Dieses Bauwerk wurde im Zuge der L2624 in den 1980er Jahren als dreifeldrige Spannbetonkonstruktion mit einer Gesamtlänge von 64,90 m errichtet. Das Bauwerk weist bereits in verschiedenen Bereichen Schäden in Form von Rissbildung auf, die durch eine Treibmineralbildung (Alkali-Kieselsäure-Reaktion) verursacht wurden. Aus diesem Anlass wurden materialtechnische Untersuchungen durchgeführt und weiterhin festgestellt, dass der Überbau mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl hergestellt wurde. Um den laufenden Betrieb des Bauwerks abzusichern, wurde 2021 ein



Abb. 2. Stennertbrücke in Hagen (links) und Werrabrücke in Walldorf (rechts).

SEM-System installiert. Ergänzend hierzu finden regelmäßige Sichtprüfungen statt. Auch bei diesem Bauwerk wurden im Zuge der Inbetriebnahme Messungen zur Bestimmung des Dämpfungsprofils durchgeführt. Die Signale wurden mit einem Rückprallhammer an verschiedenen, variablen Positionen eingeleitet und für zwei Sensoren in Bezug auf ihre jeweilige Position ausgewertet.

Die Bauwerke wurden ebenfalls mit Messsystem der Firma Vallen Systeme GmbH ausgestattet. Es wurden Sensoren des Typs VS30 eingesetzt. Für die Untersuchungen wurde der analoge Hochpassfilter des Systems AMSY-6 auf eine Grenzfrequenz von 0,5 kHz eingestellt und keine weitere analoge oder digitale Filterung vorgenommen.

3. Datenaufbereitung

Die experimentellen Untersuchungen haben eine Datenbank mit einer Vielzahl von Einzelsignalen ergeben. Die Anzahl der gemessenen Signale je Bauteil bzw. Bauwerk und Signalquelle sind in Tabelle 1 dokumentiert.

Tabelle 1. Anzahl der gemessenen Signale je Bauteil bzw. Bauwerk und Quelle für den Sensortyp VS30.

Bauteil / Bauwerk	Signalanzahl je Quelle	
	Drahtbruch	Rückprallhammer
Roding	388	124
Stolpe	454	867
Witzenhausen	250	1105
Werrabrücke	-	356
Stennerbrücke	-	237

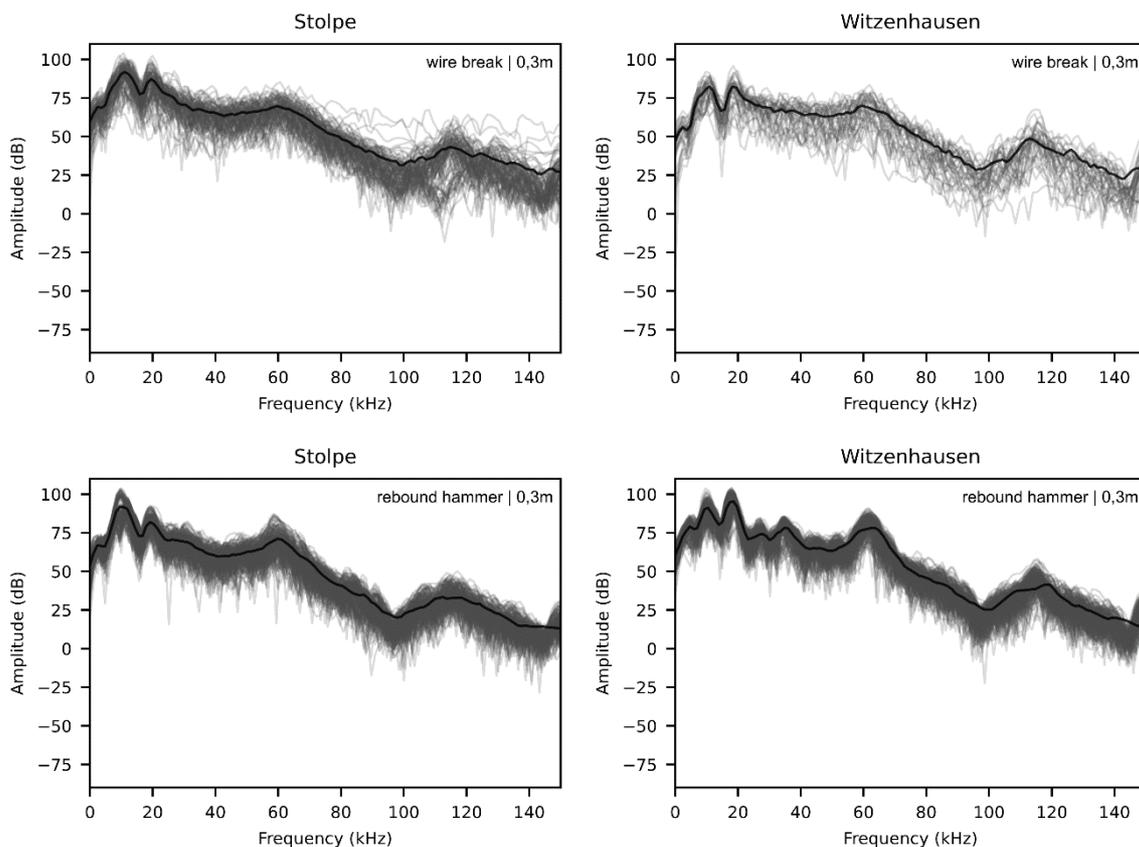


Abb. 3. Frequenzspektren der Drahtbruch- und Rückprallhammersignale (longitudinale Signaleinleitung ins Spannglied) für die Träger *b* der Bauwerke Stolpe und Witzenhausen. Die Signale wurden mit VS30 Sensoren in 0,3 m Abstand zum Quellort gemessen. Die einzelnen Spektren sind überlagert dargestellt. Der Mittelwert ist dunkel hervorgehoben.

Die gemessenen Signale wurden im Zuge der Datenaufbereitung mit gleichen Bearbeitungsschritten programmatisch verarbeitet. Zunächst erfolgte eine Amplitudenanpassung im Zeitbereich entsprechend der verbauten Dämpfungselemente. Hierdurch wurde sichergestellt, dass sich alle Signale auf ein Vorverstärkungsniveau von 0 dB beziehen. Anschließend wurde ein einheitlicher Schwellwert eingeführt und in Bezug auf die erste Schwellwertüberschreitung ein Signalausschnitt mit einem Pre- und Post-Trigger von 200 μ s und 1000 μ s extrahiert. Der Signalausschnitt wurde durch Resampling (10 MHz) und Fensterung (Hanning) weiterverarbeitet und mittels Fouriertransformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert. Um die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung zu untersuchen, wurde das gewonnene Frequenzspektrum in 10 kHz breite partielle Frequenzbänder im Bereich von 0 bis 100 kHz unterteilt. Die Untersuchungsgrenze wurde bei 100 kHz festgelegt, da die Frequenzspektren der gemessenen Signale für die verschiedenen Signalquellen bereits in unmittelbarer Nähe zum Quellort (Abstand ca. 0,3 m) einen deutlichen Abfall im Bereich von ca. 70 bis 100 kHz aufweisen (siehe Abbildung 3). Für jedes Frequenzband wurde die mittlere spektrale Amplitude bestimmt. Diese Werte bilden die Grundlage für die Erstellung der frequenzabhängigen Dämpfungsprofile. In den Abbildungen wurden die mittleren Amplituden in *Dezibel* über die jeweilige Position der Sensoren aufgetragen. Die Streuung der Einzelmessungen wurden berücksichtigt, in dem für jedes Frequenzband das 95 % Konfidenzintervall mit ausgewertet und dargestellt wird. Für die fünf Frequenzbänder bis 50 kHz wurden aus den Mittelwerten weiterhin die Dämpfungskoeffizienten mittels linearer Regression bestimmt und tabellarisch dokumentiert.

4. Ergebnisse

4.1 Spanndrahtbrüche an Brückenträgern

Die Spanndrahtbrüche wurden an den ausgebauten Trägern der Brücken in Stolpe, Roding und Witzenhausen erzeugt. Je Bauwerk wurden zwei Träger gewonnen. Abbildung 4 zeigt die Amplitudenverläufe über die Entfernung zur Signalquelle und ist in entsprechende Teilbilder nach Bauwerk (siehe Titel) und Trägernummer (Träger a/b: engl. „girder a/b“) aufgeteilt.

Im Allgemeinen weisen die dargestellten Amplitudenverläufe mit wachsender Entfernung zur Signalquelle einen abfallenden Trend auf. Im Bereich der niedrigen Frequenzen ist diese Abnahme erwartungsgemäß am geringsten. Der Zusammenhang ist bei manchen Trägern sogar nahezu linear ausgeprägt. Mit zunehmender Frequenz ist auch eine zunehmende Dämpfung erkennbar. Diese ist im Abstand zur Quelle bis ca. 3 m häufig deutlich stärker ausgeprägt als danach. Der Verlauf der Kurven nähert sich in diesen Fällen einer horizontalen Konstante an, was darauf hindeutet, dass die Frequenzanteile nahezu vollständig herausgefiltert wurden.

Die Ausgangsamplituden an der Position mit geringster Entfernung zur Signalquelle verteilen sich bei allen Trägern in ähnlicher Weise. Die höheren Frequenzen weisen meist deutlich niedrigere Amplitude auf als die niedrigeren Frequenzen. Dies spiegelt die bereits in Abbildung 3 festgestellte Beobachtung wider und zeigt, dass Drahtbrüche vorrangig tiefe Frequenzen anregen [15]. Eine Ausnahme ist für den Träger *a* der Brücke in Stolpe festzustellen. Die Amplitude des Spektrums von 0-10 kHz ist deutlich reduziert. Eine konkrete Erklärung kann nicht gefunden werden.

In Tabelle 2 sind die Dämpfungskoeffizienten im Frequenzbereich bis 50 kHz dokumentiert. Für das niedrigste Frequenzband betragen diese ca. 4,5 dB/m für die Träger der Brücken in Stolpe und Witzenhausen. Für die Träger der Brücke in Roding sind die Werte

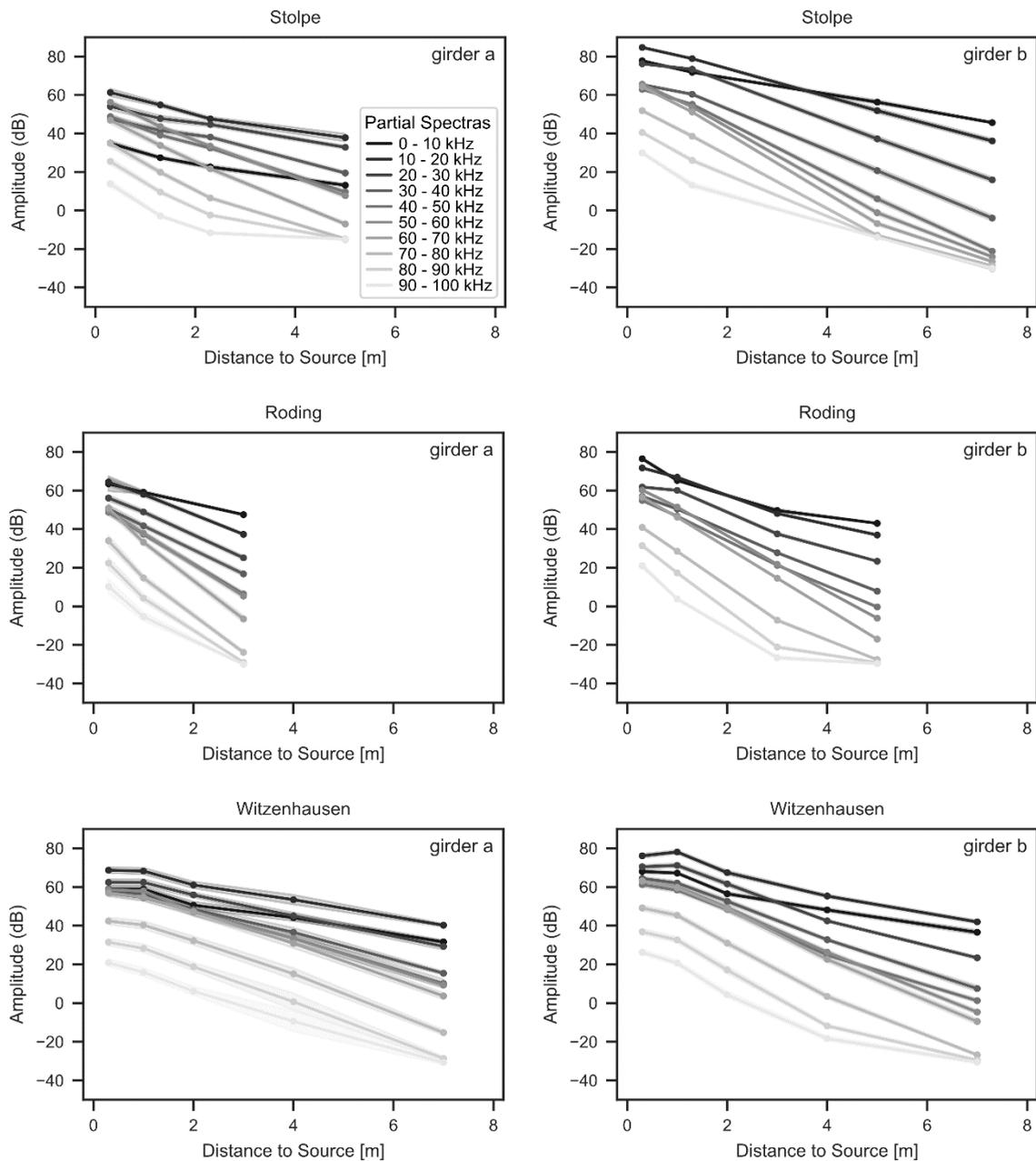


Abb. 4. Frequenzabhängige Dämpfungsprofile der Spanndrahtbrüche für die Träger *a* und *b* der Brücken Stolpe, Roding und Witzenhausen, gemessen mit VS30 Sensoren.

Tabelle 2. Dämpfungskoeffizienten der Brückenträger Stolpe, Roding und Witzenhausen im jeweiligen Frequenzband für den Spanndrahtbruch.

Frequenzband	Stolpe		Roding		Witzenhausen	
	Träger a	Träger b	Träger a	Träger b	Träger a	Träger b
0- 10 kHz	-4,44 dB/m	-4,49 dB/m	-5,90 dB/m	-6,88 dB/m	-4,20 dB/m	-4,84 dB/m
10- 20 kHz	-4,90 dB/m	-7,03 dB/m	-10,10 dB/m	-7,61 dB/m	-4,38 dB/m	-5,53 dB/m
20 - 30 kHz	-4,38 dB/m	-8,94 dB/m	-11,55 dB/m	-8,68 dB/m	-5,18 dB/m	-7,55 dB/m
30 - 40 kHz	-5,96 dB/m	-10,14 dB/m	-12,49 dB/m	-10,58 dB/m	-6,43 dB/m	-8,81 dB/m
40 - 50 kHz	-8,23 dB/m	-12,32 dB/m	-15,67 dB/m	-11,85 dB/m	-7,12 dB/m	-9,37 dB/m

deutlich größer und steigen auch mit zunehmender Frequenz stärker an. Die Querschnittsabmessungen dieser Träger waren am größten und nicht so filigran, wie bspw.

die Witzenhausener Träger. Der massive Querschnitt enthielt außerdem viele Spannglieder, die möglicherweise als Streukörper wirksam waren und daher zu einer stärkeren Dämpfung geführt haben.

4.2 Rückprallhammerschläge an Brückenträgern

Mit dem Rückprallhammer wurden die Signale an jedem Träger sowohl auf der Betonoberfläche orthogonal zur Spanngliedachse als auch an den freien Schnittflächen der Spannglieder bzw. Spanndrähte longitudinal zur Spanngliedachse erzeugt. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse für einen Träger (*b*) je Bauwerk dargestellt. Das linke Teilbild repräsentiert jeweils das Dämpfungsprofil für die longitudinale Signaleinleitung

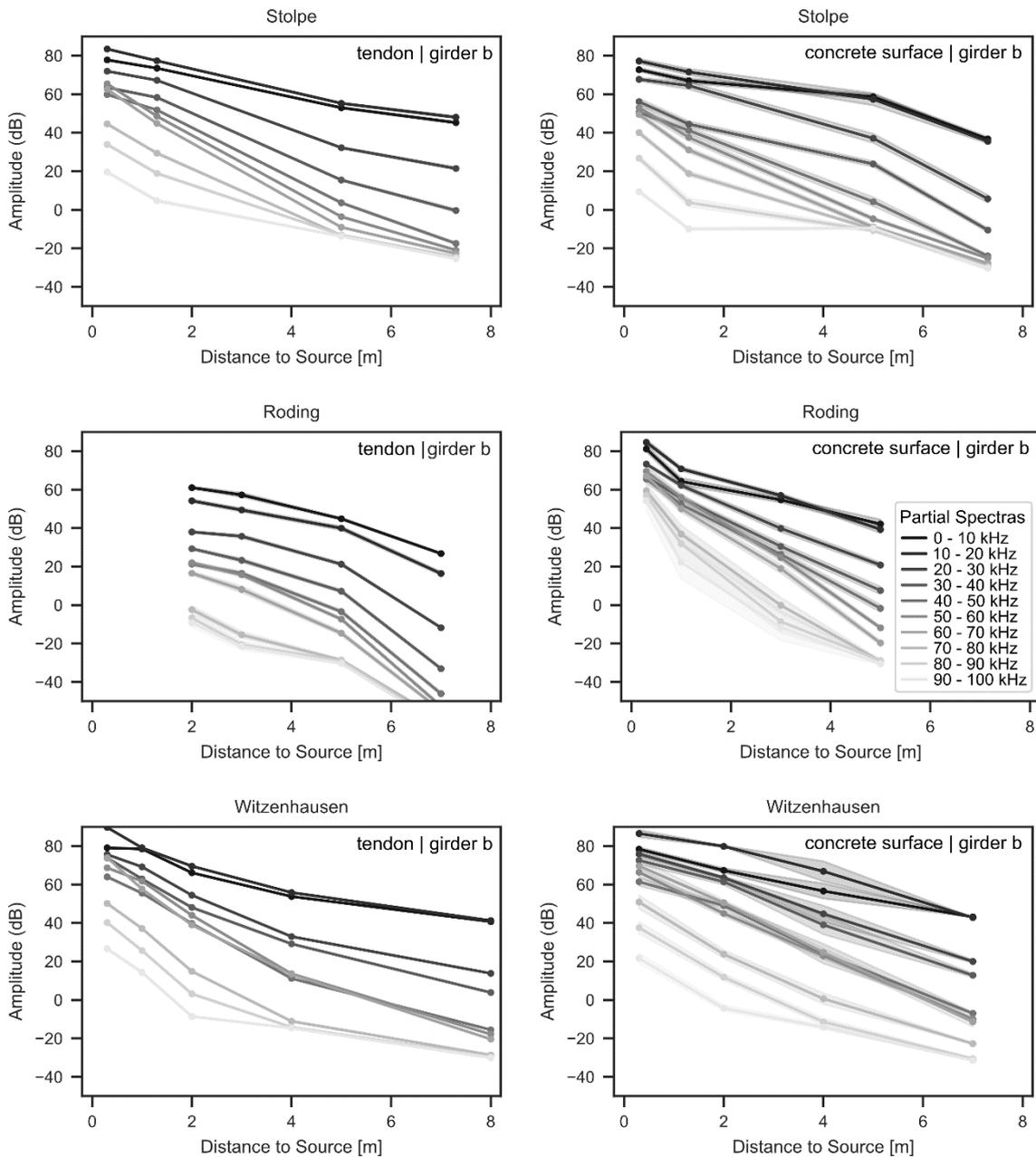


Abb. 5. Frequenzabhängige Dämpfungsprofile der Rückprallhammerschläge für die Träger *b* der Brücken Stolpe, Roding und Witzhausen, gemessen mit VS30 Sensoren. Die Signale wurden longitudinal in Spanngliedachse (Teilbilder links, engl.: *tendon*) und orthogonal zur Betonoberfläche (Teilbilder rechts, engl.: *concrete surface*) eingeleitet.

am Spannglied und das rechte Teilbild die orthogonale Signaleinleitung an der Betonoberfläche.

Die in Abbildung 5 dargestellten Kurvenverläufe für die longitudinale und orthogonale Anregung unterscheiden sich zwar qualitativ voneinander und sind offensichtlich nicht identisch, dennoch kann kein allgemeingültiger und signifikanter Unterschied im Dämpfungsverhalten erkannt werden. Für die Witzenhausen Träger sind die Dämpfungskoeffizienten sogar quantitativ nahezu identisch. Aus diesem Grund werden in Tabelle 3 nur die Koeffizienten für die Signaleinleitung auf der Betonoberfläche angegeben, da diese im Hinblick auf praktische Anwendungen relevanter sind. Im Vergleich zu den Spanndrahtbrüchen kann anhand dieser Werte festgestellt werden, dass die Anregung an der Betonoberfläche tendenziell größere Dämpfungen zur Folge hat. Für die niedrigen Frequenzen sind die Abweichungen jedoch grundsätzlich gering. Diese Beobachtung kann auf die Richtungswirkung der Signalemission zurückgeführt werden. Weiterhin findet die Signalausbreitung bei der Entstehung im Spannglied im Stahl statt, welcher grundsätzlich bessere Ausbreitungseigenschaften aufweist als Beton. Es ist denkbar, dass das Spannglied in diesem Fall als Wellenleiter wirkt.

Tabelle 3. Dämpfungskoeffizienten der Brückenträger Stolpe, Roding und Witzenhausen im jeweiligen Frequenzband für den Betonoberfläche.

Frequenzband	Stolpe	Roding		Witzenhausen	
	Träger b	Träger a	Träger b	Träger a	Träger b
0- 10 kHz	-4,61 dB/m	-6,96 dB/m	-7,42 dB/m	-4,62 dB/m	-5,21 dB/m
10- 20 kHz	-5,58 dB/m	-11,70 dB/m	-9,04 dB/m	-5,15 dB/m	-6,64 dB/m
20 - 30 kHz	-8,71 dB/m	-12,59 dB/m	-11,01 dB/m	-6,64 dB/m	-8,45 dB/m
30 - 40 kHz	-8,78 dB/m	-13,48 dB/m	-12,45 dB/m	-7,76 dB/m	-9,16 dB/m
40 - 50 kHz	-10,56 dB/m	-17,64 dB/m	-14,01 dB/m	-9,01 dB/m	-10,47 dB/m

4.3 Rückprallhammerschläge an Brücken

Im Gegensatz zu ganzen Brückenbauwerken haben die unter Absatz 4.2 diskutierten Träger deutlich kleinere Dimensionen. Die bisherigen Betrachtungen wurden daher um Messungen an zwei Brücken erweitert. Die Werrabrücke ist eine ca. 10 m breite Plattenbalkenkonstruktion mit einer massiven Querschnittshöhe von 1,05 m. Die Stennertbrücke besteht aus einem Hohlkastenquerschnitt mit ca. 0,6 m breiten und über die Länge des Bauwerks in ihrer Höhe variablen Stegen, an denen die Sensoren appliziert sind.

In Abbildung 6 sind die frequenzabhängigen Dämpfungsprofile für die beiden Bauwerke abgebildet. An der Werrabrücke wurden zwei Messreihen ausgewertet (Kanal 5 und 6). Die Kurvenverläufe der Werrabrücke sind im Vergleich zur Stennertbrücke deutlich unregelmäßiger. Besonders deutlich wird dies durch den sprunghaften Abfall am Kanal 6 in ca. 3 m Entfernung zur Quelle und das Wiederanstiegen der Amplituden ab ca. 5 m Entfernung zur Quelle für Frequenzen unterhalb von 30 bzw. 40 kHz. Eine mögliche Ursache hierfür kann die Vorschädigung des Betons durch Risse als Folge der Treibmineralbildung (AKR) sein. Risse unterbinden insbesondere die Übertragung hoher Frequenzanteile wodurch zumindest der lokal sehr abrupte Abfall am Kanal 6 zu erklären wäre. Es kann jedoch auch die konstruktive Ausbildung des Tragwerks und die Veränderung der Bewehrungsführung mit zunehmendem Abstand zur Quelle hierfür die Ursache sein und veränderte Signallaufwege zur Folge haben. Die Messstellen befanden sich bei der Werrabrücke in Feldmitte, in einem Bereich, in dem an der Brückenunterseite viel Bewehrung zu erwarten ist. Mit zunehmender Entfernung in Richtung der Pfeiler ist mit einer Reduktion der Bewehrungsmenge zu rechnen. In den Stegen der Stennertbrücke kann hingegen von einer

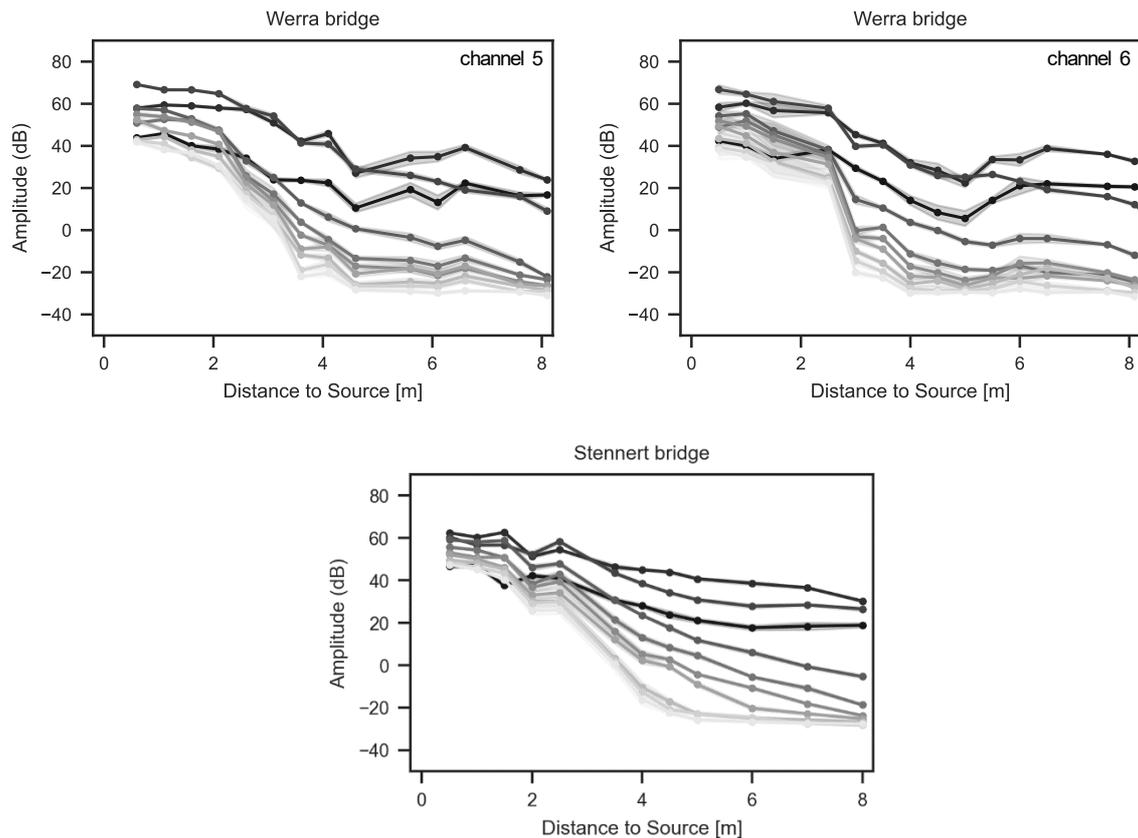


Abb. 6. Frequenzabhängige Dämpfungsprofile der Rückprallhammerschläge an der Werrabrücke für zwei Sensorpositionen und der Stennertbrücke für eine Sensorposition.

vergleichsweise konstanten Bewehrungsführung ausgegangen werden. Beide Erklärungsansätze können jedoch nicht hinreichend verifiziert werden.

Im Vergleich zu den Messungen an den Trägern liegen die Ausgangsamplituden der verschiedenen Frequenzbänder bei den Messungen an den beiden Brücken dicht zusammen. Eine ähnliche Verteilung wurde nur an dem Träger *b* der Brücke Roding beobachtet (siehe Abbildung 5). Die Träger der Brücke Roding haben die größten Abmessungen, sind am stärksten bewehrt (Spannglieder und Bewehrungsstäbe) und ähneln der massiven Struktur der Brücken am meisten. Es wird daher vermutet, dass oberflächennahe Spannglieder und Bewehrungsstäbe für eine verstärkte Rückstreuung der hohen Frequenzanteile sorgen.

In Tabelle 4 sind die mittleren Dämpfungskoeffizienten für beide Bauwerke zusammengetragen. Letztlich unterscheiden sich die Ergebnisse der Werrabrücke für Kanal 5 und der Stennertbrücke nur geringfügig voneinander. Die Ergebnisse für Kanal 6 sind im niedrigen Frequenzbereich deutlich günstiger, was auf die zunehmenden Amplituden ab einer Entfernung von ca. 5 m zurückgeführt werden kann.

Tabelle 4. Dämpfungskoeffizienten von in-situ Messungen an der Werrabrücke und Stennertbrücke.

Frequenzband	Werrabrücke		Stennertbrücke
	CHAN5	CHAN6	
0- 10 kHz	-4,14 dB/m	-2,88 dB/m	-4,44 dB/m
10- 20 kHz	-4,92 dB/m	-3,40 dB/m	-4,30 dB/m
20 - 30 kHz	-8,68 dB/m	-7,78 dB/m	-5,26 dB/m
30 - 40 kHz	-11,25 dB/m	-8,49 dB/m	-9,82 dB/m
40 - 50 kHz	-11,62 dB/m	-9,36 dB/m	-10,88 dB/m

4.4 Zusammenführung der Ergebnisse

Die in Tabelle 2 bis 4 aufgeführten Dämpfungskoeffizienten wurden zur verbesserten Übersichtlichkeit in eine Boxplots überführt und sind in Abbildung 7 jeweils für den Drahtbruch und den Rückprallhammer bei orthogonaler Anregung auf der Betonoberfläche in den Frequenzbändern dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Dämpfungen der Drahtbrüche im Vergleich zum Rückprallhammer deutlich stärker streuen. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Randbedingungen während eines Drahtbruches sehr komplex sind. Die Signale sind folglich kaum reproduzierbar und haben auf natürliche Weise eine hohe Varianz. Demgegenüber unterscheiden sich die Mediane der Dämpfungskoeffizienten für die beiden Signalquellen kaum. Im Frequenzband von 0-10 kHz beträgt dieser ca. 4,9 dB/m und steigt im Frequenzband von 40-50 kHz auf ca. 10,5 dB/m. Die höheren Frequenzen werden demnach durchschnittlich etwa doppelt so stark gedämpft. Im Hinblick auf praktische Anwendungen und zur Gewährleistung möglichst großer Sensorabstände, ist die Fokussierung der Messungen auf den niederfrequenten Bereich aus diesem Grund eindeutig vorzuziehen. Weiterhin ist zu bedenken, dass die Untersuchungen nur den Signalanfang als Ausschnitt der gesamten Transienten berücksichtigen. Es ist möglich, dass im restlichen Teil der Transienten noch größere Amplituden auftreten. Die Auswertung von Zeitbereichs-Features, wie der Peak-Amplitude, kann daher abweichende und ggf. sogar günstigere Dämpfungskoeffizienten ergeben.

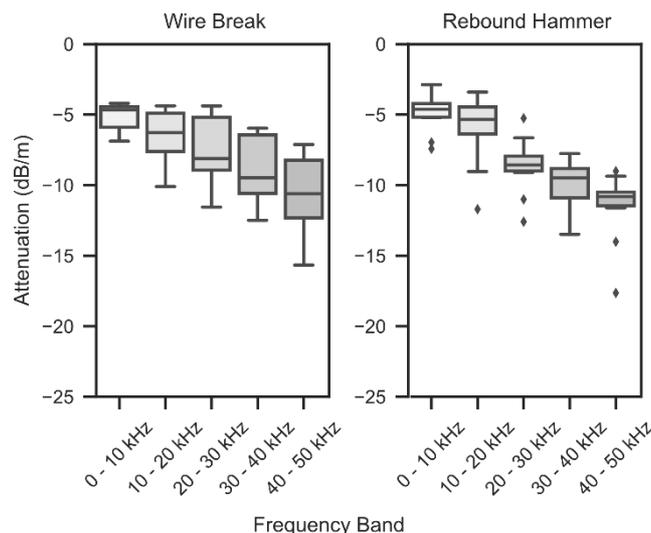


Abb. 7. Dämpfungskoeffizienten für die Signalquellen Drahtbruch und Rückprallhammer (Betonoberfläche) in den jeweiligen Frequenzbändern.

5. Zusammenfassung

Das Schallemissionsmonitoring hat sich zur Überwachung von Spannbetonbrücken zur Detektion von Spanndrahtbrüchen infolge von Spannungsrisskorrosion etabliert und findet vielfach Anwendung. Eine entscheidende Grundlage für den Erfolg solcher Maßnahmen ist eine geeignete, auf das Bauwerk zugeschnittene Sensorverteilung, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit die Erfassung aller relevanten Signale ermöglicht. Das Ausbreitungsverhalten der elastischen Wellen im Bauwerk und insbesondere deren Dämpfung sind hierbei grundlegende Einflussfaktoren. Der vorliegende Beitrag thematisierte aus diesem Grund das Dämpfungsverhalten großer Spannbetonkonstruktionen. Es wurden sechs Brückenträger von drei Brücken zerstörend untersucht. An diesen Trägern wurden Drahtbrüche künstlich erzeugt und zum Vergleich Messungen mit dem Rückprallhammer als Referenzquelle durchgeführt. Mit dem Rückprallhammer wurden die

Signale einerseits longitudinal in das Spannglied, und andererseits orthogonal an der Betonoberfläche eingeleitet. Die Untersuchungen mit dem Rückprallhammer wurden um Messungen an zwei Bestandsbauwerken ergänzt. Die Bauwerke unterscheiden sich durch ihre geometrischen Abmessungen und ihre Vorschädigung. Ein Bauwerk weist Schäden (Risse) infolge von Treibmineralbildung auf, das andere ist ungeschädigt.

Die gemessenen Einzelsignale wurden zu frequenzabhängigen Dämpfungsprofilen verarbeitet. Es wurde ein Untersuchungsbereich von 0 bis 100 kHz definiert, in zehn Frequenzbänder unterteilt und die jeweiligen Amplituden über die Entfernung zwischen Signalquelle und Sensor aufgetragen. Für die Kurven von 0 bis 50 kHz wurden weiterhin die linearen Dämpfungskoeffizienten bestimmt. Im Ergebnis können folgende Aspekte festgehalten werden:

- In Brücken und brückenähnlichen Strukturen sind frequenzabhängige Effekte deutlich erkennbar. Frequenzen oberhalb von 50 kHz werden bis zu einer Entfernung von ca. 3 m zur Quelle stark gedämpft. In größeren Entfernungen flacht der Kurvenverlauf ab und weist auf eine Auslöschung dieser Frequenzanteile hin. Frequenzen unterhalb von 50 kHz tendieren für die untersuchten Entfernungen von bis zu 8 m zu linearen Profilen.
- Die Dämpfungskoeffizienten streuen in den untersuchten Frequenzbändern für Spanndrahtbrüche deutlich stärker als für Rückprallhammerschläge. Es wird vermutet, dass die komplexen Randbedingungen bei einem Spanndrahtbruch auf „natürliche Weise“ eine hohe Varianz zur Folge haben. Die Mediane sind für die beiden Signalquellen betragsmäßig jedoch sehr ähnlich. Im Frequenzband von 0-10 kHz betragen diese ca. 4,9 dB/m und steigen im Frequenzband von 40-50 kHz auf ca. 10,5 dB/m. Frequenzen im Bereich von 40-50 kHz werden demnach durchschnittlich etwa doppelt so stark gedämpft wie im Bereich von 0-10 kHz.
- Die gute Vergleichbarkeit des Dämpfungsverhaltens des Spanndrahtbruchs und des Rückprallhammers sowohl bei longitudinaler als auch bei orthogonaler Signaleinleitung legt nahe, dass die Ergebnisse von Rückprallhammermessung gut auf Spanndrahtbrüche übertragen werden können und auch für diese Signalquelle Gültigkeit besitzen.
- In geringer Entfernung zum Quellort liegen die Amplituden der verschiedenen Frequenzbänder bei den Messungen mit Rückprallhammerschlägen an den beiden Brücken dicht zusammen. Eine vergleichbare Verteilung ist bei den äquivalenten Messungen (orthogonale Signaleinleitung an der Betonoberfläche) nur an dem Träger *b* der Brücke Roding zu beobachten. Für alle anderen Messungen an den Brückenträgern (Spanndrahtbrüche, Rückprallhammerschläge mit longitudinaler Signaleinleitung ins Spannglied oder orthogonaler Signaleinleitung an der Betonoberfläche) wurde eine stärkere Streuung der Ausgangsamplituden festgestellt. In diesen Fällen wurden hohe Frequenzen im Vergleich zu niedrigen Frequenzen weniger intensiv angeregt. Die Träger der Brücke Roding haben die größten Abmessungen, sind am stärksten bewehrt (Spannglieder und Bewehrungsstäbe) und ähneln der massiven Struktur der Brücken am meisten. Es wird daher vermutet, dass oberflächennahe Spannglieder und Bewehrungsstäbe für eine verstärkte Rückstreuung der hohen Frequenzanteile sorgen.

Referenzen

- [1] Schacht G, Käding M, Bolle G, Marx S. Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr. Beton- und Stahlbetonbau 2019;114(2):85–94.
- [2] Brandenburg LS. B1 Brücke Altstädter Bahnhof, Bauwerksuntersuchungen vor dem Rückbau. Hoppegarten; 2021.

- [3] Sodeikat C, Groschup R, Knab F, Obermeier P. Acoustic Emission in der Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen. *Beton- und Stahlbetonbau* 2019;114(10):707–23.
- [4] Löhr M, Saloga K. Überwachung auf Spanndrahtbrüche an der Elsenbrücke in Berlin mittels der Schallemissionsanalyse (AT). *ZfP-Zeitung* 2022;178: 30-34.
- [5] Landis E, Shah S. The influence of microcracking on the mechanical behavior of cement based materials. *Advanced Cement Based Materials* 1995;2: 105–118.
- [6] Köppel S. Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken (Ph.D. thesis), 2002.
- [7] Schechinger B. Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Schädigung von Stahlbeton (Ph.D. thesis), Zürich: vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH; 2006.
- [8] Lovejoy SC. Development of acoustic emissions testing procedures applicable to conventionally reinforced concrete deck girder bridges subjected to diagonal tension cracking. Dissertation: Oregon State University, Corvallis, Oregon, 2006.
- [9] Wu X, Yan Q, Hedayat A, Wang X. The influence law of concrete aggregate particle size on acoustic emission wave attenuation. *Scientific Reports* 2021; 11(1): 1–14 — ISBN 0123456789.
- [10] 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. *Constr Build Mater* 2007;21(3):491–500, Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-4).
- [11] Cullington D, MacNeil D, Paulson P, Elliott J. Continuous acoustic monitoring of grouted post-tensioned concrete bridges. *NDT E Int* 2001;34(2):95–105.
- [12] Fricker S. Schallemissionsanalyse zur Erfassung von Spanndrahtbrüchen bei Stahlbetonbrücken (Ph.D. thesis), Zürich: ETH; 2009, <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-006027529>.
- [13] Pirskawetz S., Schmidt S, Steinbock O. Rückbau der Brücke Altstädter Bahnhof, Brandenburg/Havel – Detektion von Spanndrahtbrüchen mit Schallemissionsanalyse. In: Krieger, Jürgen and Isecke, B. (Hrsg.): 5. Brückenkolloquium - Fachtagung über Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken. Esslingen: Technische Akademie Esslingen, 2022, 549-553.
- [14] Oh T, Min K, Min K, Lee J, Kim H, Kim M. Experimental Investigation on Effective Distances of Acoustic Emission in Concrete Structures. *Applied Sciences* 2020;10: 6051.
- [15] Käding M, Schacht G, Marx S. Acoustic Emission analysis of a comprehensive database of wire breaks in prestressed concrete girders. *Engineering Structures* 2022; 270: 114846.
- [16] Käding M, Schacht G, Marx S. Schallemissionsmonitoring zur Spanndrahtbruchdetektion. In: Bergmeister, K. ; Fingerloos, F. ; Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2023* : Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, 2022 — ISBN 978-3-433-03376-0, 978.
- [17] BmVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion), 2011.