

Verknüpfung globaler und lokaler Verfahren zur Schädigungsidentifikation am Beispiel einer schrittweisen geschädigten Stahlbetonstruktur

Paul Winkler^{1,2}, Lukas Lippold^{1,3}, Volkmar Zabel², Carsten Könke^{1,3}

¹Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar

²Professur für Baustatik und Baudynamik, Universität Rostock

³Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

Zusammenfassung: In Deutschland gibt es eine große Anzahl von Fernstraßenbrücken, die in den nächsten Jahren ihre geplante Lebensdauer erreichen. Zur Unterstützung von regelmäßigen Inspektionen sollen zukünftig u.a. beginnende Schädigungen mit Hilfe von messtechnischen Bauwerksüberwachungen rechtzeitig erkannt und lokalisiert werden. Dafür sind globale und lokale Methoden der Schadensdetektion und -lokalisierung zu verbessern und zu verknüpfen. In einer experimentellen Studie an einem Stahlbetonfertigteil werden verschiedene strukturdynamische Messsysteme, die Daten in verschiedenen Frequenzbereichen erheben und entsprechend zur Erfassung globalen und lokalen Strukturverhaltens geeignet sind, auf ihre Sensitivität zur Schädigungserkennung hin untersucht und die Ergebnisse verglichen.

1 Einleitung

In Deutschland gibt es über 5.800 Fernstraßenbrücken die aktuell sanierungsbedürftig sind [3] und weitere werden in den nächsten Jahren ihr geplante Lebensdauer erreichen. Es stellt sich die Frage nach der Möglichkeit einer weiteren Nutzung dieser Bauwerke. In einigen Fällen lässt sich die Tragfähigkeit nach den heutigen Regelwerken rechnerisch nicht mehr erfüllen, obwohl der Zustand der Bauwerke gut ist und keine größeren Schädigungen vorliegen, oder diese durch eine Ertüchtigungsmaßnahme bereits behoben wurden. Oft fehlen auch Informationen über das Bauwerk, die dann zu konservativen Annahmen für eine Nachrechnung führen.

Um eine sichere Nutzung des Bauwerks zu gewährleisten und dessen Zustand bewerten zu können, setzen sich Methoden des Structural Health Monitorings (SHM) zur Bauwerksüberwachung durch. Dabei werden die erfassten Daten interpretiert und eine Zustandsbewertung

durch numerische Bauwerksmodelle durchgeführt. Im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 2388 (SPP "100+") [1] der Deutschen Forschungsgesellschaft, beschäftigt sich das Forschungsgesellschaft, beschäftigt sich das Forschungsprojekt DIVING [2] mit der "Digitalen Verknüpfung von Multiskalenanalysen in Modellierung und Monitoring". Auf diese Weise kann ohne Risiko das volle Potential des Bauwerkes genutzt und so die Lebensdauer verlängert werden. Dadurch kann ein wesentlicher Beitrag zur Sicherheit der Infrastruktur und Minimierung des Einsatzes begrenzter Ressourcen geleistet werden.

2 Bauteilversuch

2.1 Versuchsaufbau

An einem Bauteilversuch werden Methoden entwickelt, die später an Bestandsbauwerken Anwendung finden sollen. In Anlehnung an einen Ausschnitt aus einem Kastenquerschnitt eines Stahlbetonbrückenüberbaus wurde dazu ein bewehrtes T-Winkelstütz-Fertigteil (Abb. 1) gewählt.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird das Bauelement durch eine stufenweise gesteigerte, punktförmige statische Belastung kontrolliert geschädigt. Die statische Kraft wird dabei über eine zentrisch angeordnete Lastplatte in den vertikalen Teil des Versuchskörpers eingetragen. Die Belastung erfolgte in 8 Laststufen zu je 20 kN von 0 bis 160 kN. Die Stufen wurden so gewählt, dass keine, kleine und größere Schädigungen bis kurz vor den Versagenszustand der Platte entstehen. Der untere und der obere Rand der vertikalen Platte wurden während der Belastungsphasen durch Traversen gehalten. Zur Kontrolle der Lage und der Verformungen des Versuchskörpers wurden an 6 Stellen die horizontalen und an 3

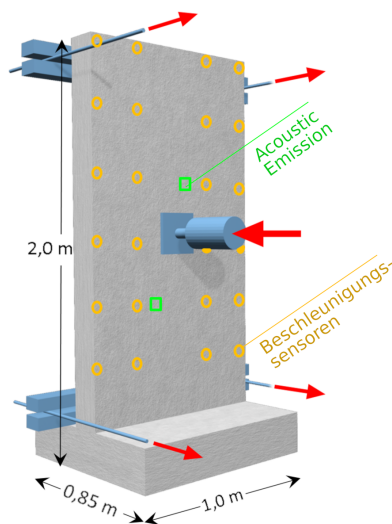


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Sensoren

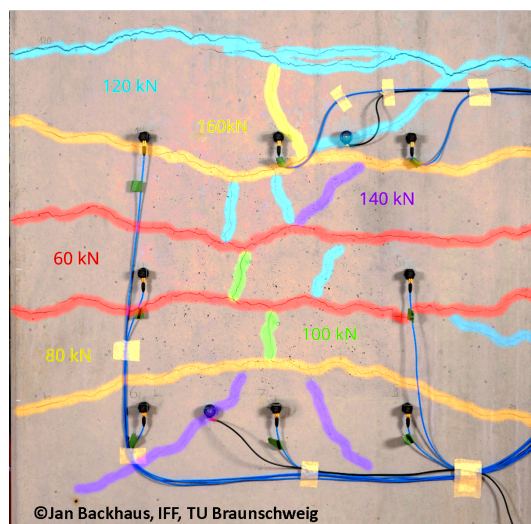


Abbildung 2: Risskartierung

Stellen die vertikalen Verschiebungen des Bauteils erfasst. Parallel dazu wurden ebenfalls optische Verfahren zur Verformungsaufzeichnung und Rissidentifikation eingesetzt. Diese Untersuchungen erfolgten in Kooperation mit den Instituten für Flugführung und für Geodäsie und Photogrammetrie der TU-Braunschweig, die ebenfalls am SPP 100+ beteiligt sind. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf der Identifikation von Änderungen des dynamischen Strukturverhaltens aus Schwingungsversuchen mit 24 im Raster auf der vertikalen Platte angeordneten Beschleunigungsaufnehmern sowie der Auswertung von Körperschallsignalen, die während der Belastungsphasen und gleichzeitiger Rissbildung mit Hilfe von zwei acoustic emission-Sensoren aufgezeichnet wurden.

2.2 Versuchsdurchführung

Während der Laststeigerung wurden neben dem Körperschall auch die Verformungen und Starrkörperverschiebungen des Versuchskörpers mit induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet. Nach dem Erreichen jeder Laststufe wurde die Verformung durch die Einwirkung konstant gehalten (weggesteuerter Versuch) und mit Hilfe photogrammetrischer Aufnahmen mit einer hochauflösenden digitalen Kamera und stereoskopischen Aufnahmen mit einem Streifenlichtscanner erfasst. Anschließend wurden die statische Belastung zurückgefahren und Schwingungsversuche zur Erfassung des dynamischen Verhaltens des entlasteten Versuchskörpers durchgeführt. Um dabei gleichbleibende Randbedingungen zu gewährleisten, wurden dafür die bei statischer Belastung als Widerlager notwendigen Traversen entfernt.

In den Schwingungsversuchen wurde das Bauteil mit einem Impulshammer mehrmals an einer definierten Stelle im oberen Randbereich zu Ausschwingvorgängen angeregt. Für jeden Schädigungszustand wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die ab der 3. Laststufe (60 kN) erkennbaren Risse an der Oberfläche wurden mit einem Rissbreitenlineal vermessen, beschriftet und im Verlauf der Laststeigerung dokumentiert. Ab der 6. Laststufe (120 kN) bildete sich im Endbereich der gestaffelten Bewehrung der oberste Riss, der sich bei der 8. Laststufe (160 kN) auf über zwei Millimeter öffnete und einen Bruch der Platte ankündigte, woraufhin auf eine weitere Laststufe verzichtet wurde (Abb. 2).

3 Modalanalyse

Die mit den 24 im Gitter angeordneten Beschleunigungssensoren und einer Abtastrate von 2048 Hz aufgezeichneten Messwerte wurden mit Hilfe der Methode der Stochastic Subspace Identification eine Reihe von Eigenschwingungen in einem Frequenzbereich bis 1000 Hz mit den zugehörigen modalen Parametern identifiziert. Mehrere der Eigenschwingungen wiesen eng beieinander liegende Eigenfrequenzen auf.

Infolge der zunehmenden Schädigungen haben sich insbesondere die Eigenfrequenzen verändert. Da der Grad dieser Verschiebungen für unterschiedliche Eigenfrequenzen verschieden stark war, kam es teilweise zu Änderungen in der Reihenfolge der Eigenschwingungen zwischen einzelnen Schädigungsstufen. Um die Entwicklung der modalen Parameter für die einzelnen Eigenschwingungen mit zunehmender Schädigung verfolgen zu können, ist jeweils die korrekte Zuordnung erforderlich.

Diese Zuordnung lässt sich durch einen Vergleich der identifizierten Eigenformen erzielen.

Zu diesem Zweck wurde hier das Modal Assurance Criterion (MAC) [4] verwendet. Das MAC gibt im Prinzip den Richtungskosinus zwischen zwei jeweils betrachteten Eigenvektoren an. Entsprechend liegen die Werte zwischen 0 und 1 bzw. 0 und 100%. Üblicherweise werden die MAC-Werte in einer Matrix aufgetragen, in der die Zeilen und Spalten mit den beiden jeweils miteinander verglichenen Systemen korrespondieren. Im Fall der Lösungen des Eigenwertproblems für ein ungedämpftes Mehrfreiheitsgradsystem, wenn also zwei identische Lösungen mit zueinander orthogonalen Eigenvektoren miteinander verglichen werden, ergibt sich eine Einheitsmatrix. Vergleicht man die für ein numerisches Modell berechneten Eigenformen mit den aus einem Versuch identifizierten, ist keine perfekte Orthogonalität zu erwarten, die MAC-Matrix sollte dennoch annähernd die Struktur einer Diagonalmatrix haben, deren Werte auf der Hauptdiagonalen nahe 1 bzw. 100% sein sollten.

Eine solche MAC-Matrix ist in Abb. 3 dargestellt. Dort wurden die aus den Versuchen nach zwei unterschiedlichen Laststufen identifizierten Eigenformen miteinander verglichen. Gut zu erkennen ist die Diagonalenstruktur, wobei an einigen Stellen um die Hauptdiagonale Cluster mit ähnlichen Eigenformen bei relativ eng beieinanderliegenden Eigenfrequenzen bestehen.

Nach der korrekten Zuordnung der Eigenformen aus unterschiedlichen Versuchen lassen sich die Entwicklungen der modalen Parameter mit zunehmender Belastung bzw. fortschreitendem Grad der Schädigung graphisch darstellen. Dieser Vergleich ist in Abb. 4 für die zu unterschiedlichen Laststufen identifizierten Eigenfrequenzen aufgetragen. Dort wurden alle Eigenfrequenzen auf den jeweiligen Wert nach der ersten Laststufe skaliert. Diese Normierung ist sinnvoll, da sich insbesondere in Laborversuchen bei einer Erstbelastung die Randbedingungen oft ändern, sodass ein Bezug zum Zustand vor einer Erstbelastung zu Fehlinterpretationen führen kann.

Aus Abb. 4 lässt sich ein allgemeiner Trend abnehmender Eigenfrequenzen mit zunehmender Schädigung ablesen. Dieser Trend korrespondiert sehr gut mit der Annahme, dass mit zunehmender Rissbildung eine zunehmende Steifigkeitsreduzierung verbunden ist. Der Grad der Reduzierung der Eigenfrequenzen ist allerdings unterschiedlich. Dies lässt sich bei näherer Analyse der jeweiligen Eigenformen und der Rissbildung erklären. Als Beispiele seien hier die Eigenformen Nr. 2 und Nr. 11 betrachtet. Eigenform Nr. 2 beschreibt eine Torsion der Platte um die vertikale Achse, während Eigenform Nr. 11 eine Biegeeigenform mit zwei Schwingungsbäuchen ist. In den Abbildungen 5 und 6 sind diese beiden Eigenformen graphisch dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet sind die maßgebenden Risse, die sich infolge der Belastung gebildet haben. Diese horizontalen Risse haben einen geringeren Einfluss auf die für die Eigenform Nr. 2 maßgebende Torsionssteifigkeit, während die Biegesteifigkeit insbesondere in den Bereichen mit hohen modalen Krümmungen, also in den Schwingungsbäuchen, deutlich stärker durch eine Horizontalrissbildung in diesen Zonen beeinflusst wird. Entsprechend kann aus dem Grad der Änderung von modalen Parametern nicht allein auf das Vorhandensein von Schädigungen geschlossen werden. Auch eine Zuordnung auf die Art der Schädigung und die Lokalisierung von Risszonen wird durch einen Vergleich der von einer Änderung ermodalen Parameter mehr oder weniger stark betroffenen Eigenschwingungen ermöglicht.

4 Körperschallerfassung bei Rissbildung

Die im Versuch aus Kap. 2 entstehenden Risse setzen einen Teil der durch die Verformung im Beton gespeicherten elastischen Energie frei. Diese verteilt sich in Form von P-, S- und Rayleigh-Wellen im gesamten Bauteil, was allgemein als Körperschall oder Acoustic Emission (AE) bezeichnet wird. Da die Rissentwicklung in sehr kurzen Ereignissen und lokal begrenzt stattfindet, kann die Frequenz solcher Signale einige 100 kHz erreichen. Die Messung erfordert daher hohe Abtastraten und erfolgt in den meisten Fällen über piezoelektrische Sensoren. Auf diese Weise kann eine passive Überwachung und Charakterisierung der Entstehung von Schädigungen in Bauteilen technisch realisiert werden, sofern gewährleistet ist, dass die einzelnen Ereignisse korrekt erfasst wurden.

Sämtliche im Versuch eingesetzte AE Messtechnik stammt von der QASS GmbH [5]. Es wurden zwei Piezokeramik-Sensoren mit einer Abtastrate von 1.6 MHz verwendet, welche über M5 Messinggewindedübel mit der Bauteiloberfläche verschraubt wurden. Die Sensoren waren über separate Vorverstärker mit Verstärkungen zwischen 1000 und 3000 an den Messrechner Optimizer4D angeschlossen, welcher durch logische Prozessoren während einer Messung jeweils 1024 Messwerte direkt in ein FFT Frequenzspektrum umwandelt.

Die räumliche Energieverteilung, Streuung an Inhomogenitäten im Beton und vor allem die Materialdämpfung schwächen die AE Signale während ihrer Ausbreitung im Bauteil abhängig von ihrer Frequenz stark ab. Somit wirken sich der Abstand von Signalquelle und Sensor aber auch die frequenzspezifische Antwort der Sensoren und deren Ankopplung auf die Amplitude des gemessenen Signals und somit auf die Detektierbarkeit aus. Es konnten zahlreiche Ereignisse mit Frequenzen bis etwa 500 kHz gemessen werden, was mit der analytischen Abschätzung in [6] zur frequenzabhängigen Detektierbarkeit für die im Versuch auftretenden Abstände übereinstimmt.

Während jeder Laststufe wurden zahlreiche Signale gemessen, die durch Anwendung präparierter Frequenzmasken klar vom Hintergrundrauschen unterschieden werden konnten. Für eine zusammenfassende Visualisierung und späteren Vergleich mit den Ergebnissen aus Kap. 3 wurde aus den gemessenen Frequenzspektrern ein Maß für die Rissenergie abgeleitet. Die Energie des Zeitsignals lässt sich mithilfe des Parsevalschen Satzes für diskrete Zeitreihen

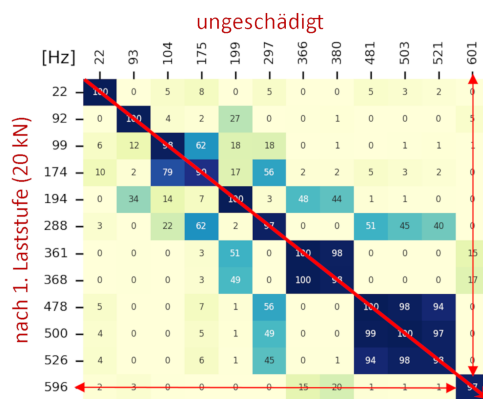


Abbildung 3: MAC-Ergebnis-Matrix

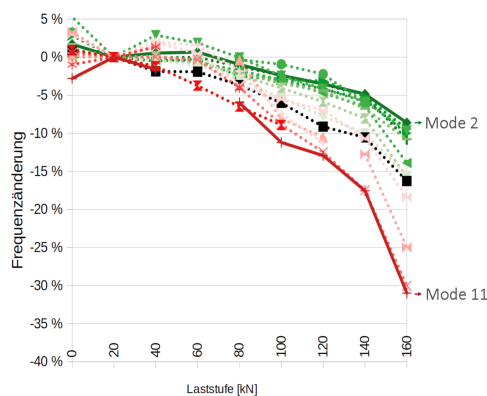


Abbildung 4: Änderung der Eigenfrequenzen

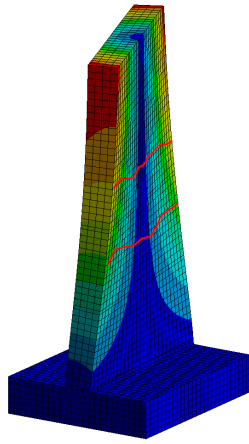


Abbildung 5: Eigenschwingung 2 - Torsion

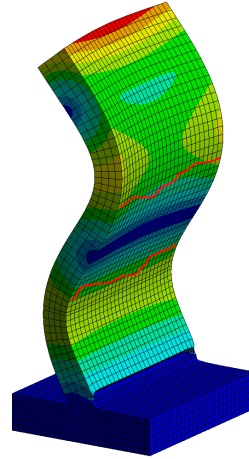


Abbildung 6: Eigenschwingung 11 - Biegung

aus der Energie im Frequenzspektrum berechnen. Für N Amplitudenwerte $x(t)$ und die entsprechenden Werte der diskreten Fouriertransformation $X(f)$ gilt

$$\sum_{n=0}^{N-1} [x(t_n)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [X(f_k)]^2. \quad (1)$$

In Übereinstimmung mit der Risskartierung in Abb. 2 waren die ersten deutlichen AE Signale ab der dritten Laststufe messbar. Diese traten zunächst eher vereinzelt auf. Ab der fünften Laststufe (100 kN), als auch erste vertikale Risse erkennbar waren, nahmen die zeitlichen Abstände zwischen hochfrequenten Signalen deutlich ab. Für diese Laststufe sind in Abb. 7 der Verlauf der aufgebrachtten Last und der kumulativen Rissenergie gegenübergestellt. Die hohe Dichte der Rissereignisse äußert sich in dem fast kontinuierlichen Anstieg der Rissenergie

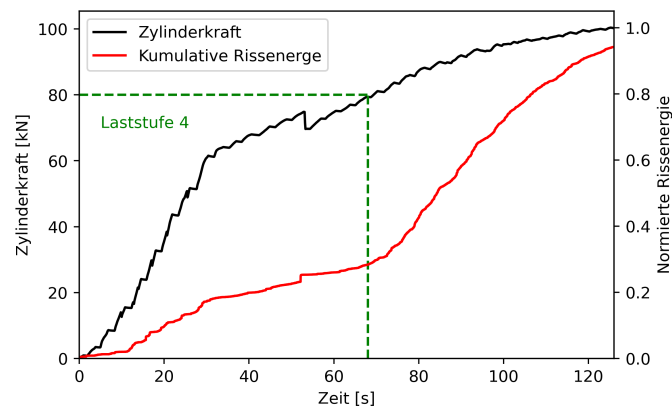


Abbildung 7: Zeitkurven der Zylinderkraft und AE-Energie für Laststufe 5 (100 kN).

nachdem die Maximallast aus der vorherigen vierten Stufe (80 kN) überschritten wurde. Die Belastung scheint bereits vorher groß genug gewesen zu sein, um entsprechend dem Felicity Effekt einen deutlichen Energieanstieg auf etwa ein Viertel der Gesamtenergie des Prozesses zu verursachen. Es ist nicht auszuschließen, dass ein Teil dieser Energie durch Störsignale, wie einer sprunghaften Verrückung des Bauteils bei $t \approx 54$ s, hervorgerufen wurde.

5 Verknüpfung

Zuletzt wurde untersucht inwieweit sich mit der Modalanalyse und Körperschallmessungen ähnliche Erkenntnisse über die Entwicklung der Schädigung des Bauteils ableiten lassen und ob Änderungen der modalen Parameter, insbesondere der Eigenfrequenzen, in dieser Studie als Indikator für den Grad des Schadens geeignet sind. Dazu ist in Abb. 8 dargestellt, wie sich die Anteile der Verschiebung der Eigenfrequenzen (gemittelt über alle vollständig identifizierten Eigenformen) einerseits und die Anteile der aus den Körperschallmessungen errechneten Rissenergie (summiert über alle Laststufen) andererseits über die einzelnen Laststufen verteilen. Weiterhin war von Interesse ob sich ein Energiemaß, das sich auf die hohen Frequenzanteile beschränkt, auch als Indikator geeignet ist, da diese Anteile sich in einer realistischen Anwendungsumgebung besser von Umgebungsgeräuschen unterscheiden lassen könnten. Deshalb wurde die Rissenergie auf drei disjunkte Frequenzintervalle aufgeteilt, welche sich an häufig in den Messungen auftretenden Frequenzen orientieren.

Generell ist aus Abb. 8 eine gute Korrelation zwischen den hier verwendeten Indikatoren zu beobachten, insbesondere ab der vierten Laststufe, als im Versuch eine deutliche Zunahme der Anzahl der Rissereignisse zu verzeichnen war. Die Übereinstimmung ist am höchsten für das niedrigste Frequenzband, welches etwa 90% der Gesamtenergie ausmacht und somit den Schädigungsgrad am besten widerspiegelt. Die starken Abweichungen in den niedrigen Laststufen ist wahrscheinlich auf Störsignale zurückzuführen, welche durch Unebenheiten an der Stelle der Lasteinleitung und Verrückungen des gesamten Bauteils verursacht wurden.

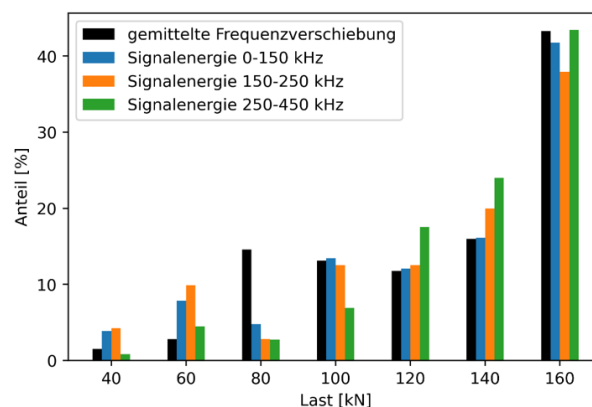


Abbildung 8: Anteile der gemittelten Eigenfrequenzverschiebungen und der kumulativen Rissenergien über die Lastgeschichte.

6 Diskussion

Am Beispiel von Laborversuchen wurden für ein Betonbauteil, das zunehmend durch eine statische Belastung geschädigt wurde, die Änderung von identifizierten modalen Parametern sowie die Detektion des Rissfortschritts durch Körperschallmessungen auf ihre Eignung als Indikatoren für eine Schädigungserkennung untersucht. Während die modale Identifikation das globale Strukturverhalten betrifft, kann die Messung von Körperschallsignalen infolge fortschreitender Rissbildung als lokale Methode eingeordnet werden. Dabei konnte eine gute Vergleichbarkeit der mit beiden Vorgehensweisen erzielten Ergebnisse festgestellt werden.

Allerdings wurde auch deutlich, dass die Schädigungserkennung auf Basis der modalen Parameteränderungen von der Einbeziehung mehr oder weniger sensitiver Eigenformen beeinflusst werden kann. Die Auswahl der entsprechenden Eigenformen in Bezug zu ausgewählten Schädigungsformen ergibt sich somit als fortführende Forschungsfrage. In ähnlicher Weise sind auch weiterführende Betrachtungen hinsichtlich der Sensitivität einzelner Frequenzbänder in den hochfrequenten Körperschallsignalen auf unterschiedliche Schädigungsereignisse erforderlich, um diese Detektionsmethode weiterzuentwickeln.

Aufbauend auf der vorliegenden Datenbasis werden in der fortführenden Arbeit weitere Verfahren zur Schädigungserkennung auf ihre Eignung untersucht und vergleichend gegenübergestellt. Darüber hinaus ist zukünftig auch die Anwendung der hier vorgestellten und weiterer Methoden an großen Strukturen bzw. bestehenden Bauwerken im Betriebszustand geplant. Dabei sind weitere Einflüsse aus Umgebungseinflüssen und Betriebsbedingungen zu berücksichtigen sowie die Frage nach der jeweils erforderlichen Sensordichte zu betrachten.

Literatur

- [1] *DFG Schwerpunktsprogramm "Hundert plus"*. <https://www.spp100plus.de/>
- [2] *Projekt DIVING*. <https://www.uni-weimar.de/de/bauingenieurwesen/institute/ism/forschung/laufende-projekte/diving/>
- [3] *Brücken an Bundesfernstraßen: Bilanz und Ausblick*. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/bruecken-an-bundesfernstrassen-bilanz-und-ausblick.pdf?__blob=publicationFile. Version: 2022
- [4] ALLEMANG, R. J. ; BROWN, D. L.: A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis
- [5] GMBH, Q. : *Optimizer4D*. <https://business.qass.net/optimizer4d>
- [6] OHTSU, M. : The history and development of Acoustic Emission in concrete engineering. In: *Concrete Library of JSCE No. 25 (1994)*