
Ultraschallmonitoring mit Codawelleninterferometrie - Praktische Implementation, Integration und Demonstra- tion

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Ultraschallmonitoring mit Codawelleninterferometrie - Praktische Implementation, Integration und Demonstration

von

Ernst Niederleithinger, Niklas Epple, Daniel Barroso
Fachbereich Zerstörungsfreie Prüfmethode für das Bauwesen
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 89.0345
Ultraschallmonitoring mit Codawelleninterferometrie - Praktische Implementation, Integration und
Demonstration

Fachbetreuung:
Eckhard Kempkens

Referat:
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

DOI: <https://doi.org/10.60850/fv-b-89.0345>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht.
Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an verlag@bast.de zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Kurzfassung · Abstract

In einem Laborversuch (BASt FE 89.0312/2015) wurde 2016 nachgewiesen, dass sich die Spannungsverhältnisse in einem Spannbetontträger mit der Ultraschalltechnik visualisieren lassen und eine Korrelation mit dem späteren Rissbild besteht.

Ziel des Nachfolgeprojekts war die Erfassung und Auswertung von Ultraschall-Messdaten mit eingebetteten Sensoren an einem Bauwerk unter Verkehr über mehr als ein Jahr. Dabei sollte die Betriebssicherheit nachgewiesen werden sowie ein Vergleich der Ergebnisse mit einem konventionellen Monitoringsystem (u. a. DMS, Schallemission) erfolgen. Der Versuch wurde an der Gänstorbrücke (Ulm/Neu-Ulm) durchgeführt. Da im Versuchszeitraum anders als zuvor keine Schadensereignisse auftraten, wurde ein Belastungsversuch für einen Funktions- und Sensitivitätsnachweis durchgeführt.

Nach Planung mit der BASt und anderen Partnern wurde im Dezember 2020 ein Längsträger in Feldmitte ohne wesentliche Verkehrseinschränkung mit 20 Transducern instrumentiert. Alle Transducer waren bis zum Berichtszeitpunkt funktional. Auch die für die Datenaufnahme entwickelte „W-Box“ erwies sich als robust und funktional, wurde aber trotzdem zwischenzeitlich durch eine verbesserte Version ersetzt. Die Anlage ist weiterhin in Betrieb. Die verschiedenen Monitoringsysteme stören sich gegenseitig nicht.

Aus den alle ein bis zwei Stunden gemessenen Ultraschalldaten wurden verschiedene Parameter extrahiert und untereinander sowie mit den konventionellen Monitoringdaten verglichen. Im Versuchszeitraum ergab sich bei allen Daten (auch den konventionellen) im Wesentlichen eine Korrelation mit der Temperatur. Hinweise auf Schadensereignisse ergaben sich nicht. In dem Belastungsversuch konnte die Sensitivität, aber auch die räumliche Lokalisierungsfähigkeit des Systems in Bezug auf Spannungsveränderungen und -inhomogenitäten nachgewiesen werden.

Ein Weiterbetrieb des Systems bis zum Rückbau der Brücke wird empfohlen, um die Sensitivität in Bezug auf Schadensereignisse nachweisen zu können.

In 2016, a laboratory test (BASt FE 89.0312/2015) demonstrated that the stress conditions in a prestressed concrete girder can be visualized using ultrasonic technology and that there is a correlation with the subsequent crack pattern.

The objective of the follow-up project was to collect and evaluate ultrasonic measurement data with embedded sensors on a structure under traffic for more than one year. The aim was to demonstrate the operational reliability and to compare the results with a conventional monitoring system (including strain gages, acoustic emission). The test was carried out at the Gänstorbrücke (Ulm/Neu-Ulm). Since, unlike before, no damage events occurred during the test period, a load test was carried out for a verification of functionality and sensitivity.

After planning with BASt and other partners, a longitudinal girder was instrumented mid span with 20 transducers in December 2020 without any significant traffic restriction. All transducers were functional by the reporting date. The "W-Box" developed for data acquisition also proved to be robust and functional but has nevertheless been replaced by an improved version in the meantime. The system is still in operation. The various monitoring systems do not interfere with each other.

Various parameters were extracted from the ultrasound data measured every one to two hours and compared with each other and with the conventional monitoring data. During the test period, all data (including the conventional data) essentially showed a correlation with temperature. There were no indications of damage events. The load test demonstrated the sensitivity, but also the spatial localization capability of the system with respect to stress changes and inhomogeneities.

A further operation of the system until the deconstruction of the bridge is recommended to be able to prove the sensitivity regarding damage events.

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Anlass | 5 |
| 2 | Die Gänstorbrücke | 5 |
| 3 | Methodik | 6 |
| 3.1 | Eingebettete Ultraschalltransducer | 6 |
| 3.2 | Messelektronik | 7 |
| 3.3 | Messparameter | 7 |
| 3.4 | Abbilderverfahren | 8 |
| 4 | Installation der Sensorik | 8 |
| 5 | Belastungsversuch | 9 |
| 6 | Auswertung und Ergebnisse | 10 |
| 6.1 | Dauerüberwachung | 10 |
| 6.2 | Analyse für das gesamte Messjahr für ein ausgewähltes Messpaar | 10 |
| 6.4 | Analyse Juni 2021 | 12 |
| 6.5 | Belastungsversuch | 13 |
| 6.6 | Inversionsrechnung | 14 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 15 |
| 8 | Literatur | 15 |

1 Anlass

Ziel des hier beschriebenen Projekts ist die Erfassung von Ultraschall-Messdaten und Auswertung mittels Codawelleninterferometrie an einem realen Bauwerk unter Verkehr. Während der Installation sollte insbesondere die „Einbaufreundlichkeit“ an einem bestehenden Brückenbauwerk unter Verkehr untersucht werden. Für die über mindestens 1 Jahr lang aufzuzeichnenden Messdaten sollte eine erste qualitative Bewertung der erfassten Spannungszustände unter Aufzeigen von Möglichkeiten zur Sicherstellung der Belastbarkeit durch konventionelle Messtechnik erfolgen. Abschließend sollte ein Ausblick für das weitere Vorgehen zur Erarbeitung von Bewertungsverfahren formuliert werden.

Durch den Einsatz der Technik an einem realen Bauwerk konnten Erfahrungen mit der Anwendung und der Zuverlässigkeit der Ultraschallsensoren („Ultraschalltransducer“) unter Realbedingungen gemacht werden und Potentiale für eine mittelfristige Anwendung für die Eigentümer/Betreiber abgeschätzt werden. Die Arbeiten erfolgten zweckmäßigerweise an einem Bauwerk wie der Gänstorbrücke in Ulm/Neu-Ulm, für das eine vollständige Nachrechnung inklusive eines FE-Modells vorliegt und an dem bereits seit einiger Zeit ein konventionelles Monitoring erfolgt. Eine Kooperation mit dem Baulastträger (hier Städte Ulm und Neu-Ulm) und dem für das Monitoring verantwortlichen Ingenieurbüro (hier IB Schiessl, Gehlen, Sodeikat, München (IBS)) ist dafür Voraussetzung und wurde für das Projekt implementiert.

Zusätzlich zum ursprünglichen Leistungsumfang wurde im Dezember 2021 ein Belastungsversuch als Funktions- und Sensitivitätsnachweis durchgeführt. Grund war, dass bis dahin im Untersuchungszeitraum anders als im Jahr davor keine zusätzlichen Schäden an der Brücke auftraten, mit denen ein Vergleich konventionelles Monitoring und Ultraschall-Monitoring möglich gewesen wäre.

2 Die Gänstorbrücke

Die von Ulrich Finsterwalder entworfene Gänstorbrücke (Bild 2.1), eine der ersten nach dem Zweiten Weltkrieg in Deutschland errichteten Spannbetonbrücken, verbindet seit 1950 die Städte Ulm und Neu-Ulm (und damit die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern) über die Donau hinweg. Es handelt sich konstruktiv je Fahrtrichtung um eine Einfeld-Plattenbrücke (2 Fahrspuren und Bürgersteig) mit je zwei Hauptträgern (Länge 96 m, Höhe mittig 1,2 m, am Rand 4,3 m, Breite 0,4 bis 0,7 m, Bild 2.2). Die Brücke ist längs und quer vorgespannt, wobei in den Spanngliedern in früheren Untersuchungen erhebliche, korrosionsbedingte Querschnittsverluste festgestellt wurden. Die Träger ruhen auf lotrechten Druckstützen. Durch diese, die landseits darüber hinausragenden Träger und Riegel sowie eine vorgespannte Zugstütze wird ein Stabdreieck aufgespannt. An den Zugstützen gibt es ebenfalls schon erhebliche Schäden. Daher wurde die Verkehrslast seit 2018 erheblich reduziert (einspuriger Verkehr, max. Gewicht 3,5 t). Für ca. 2023 ist der Rückbau und Ersatz vorgesehen.

Für das hier beschriebenen Projekt wurde als Überwachungsbereich ein Bereich etwa in der Mitte des stromaufwärts (westlich) liegenden Längsträgers gewählt.

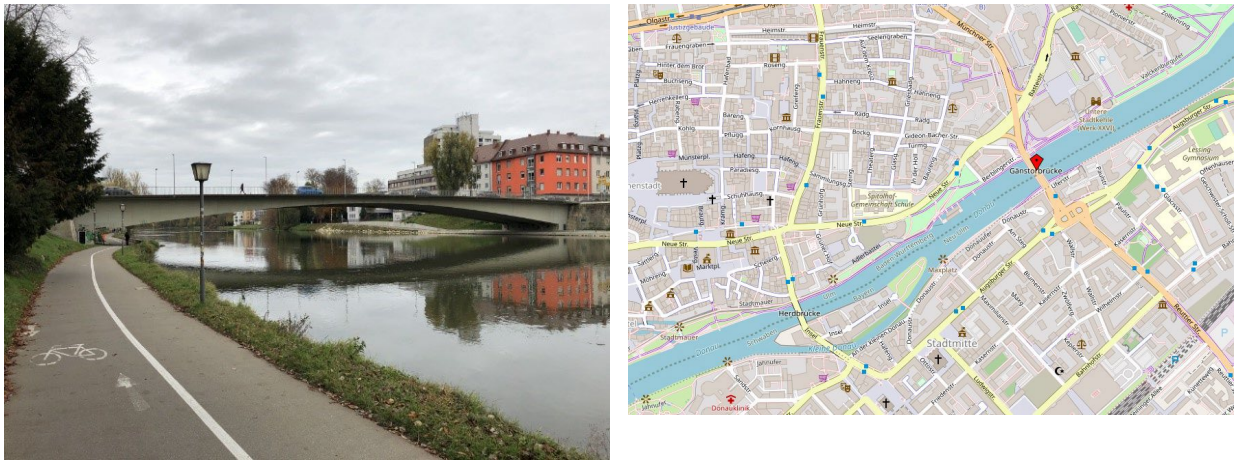


Bild 2.1 Gänstorbrücke. Links: Foto (BAM). Rechts: Lage, Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA, www.openstreetmap.org/copyright

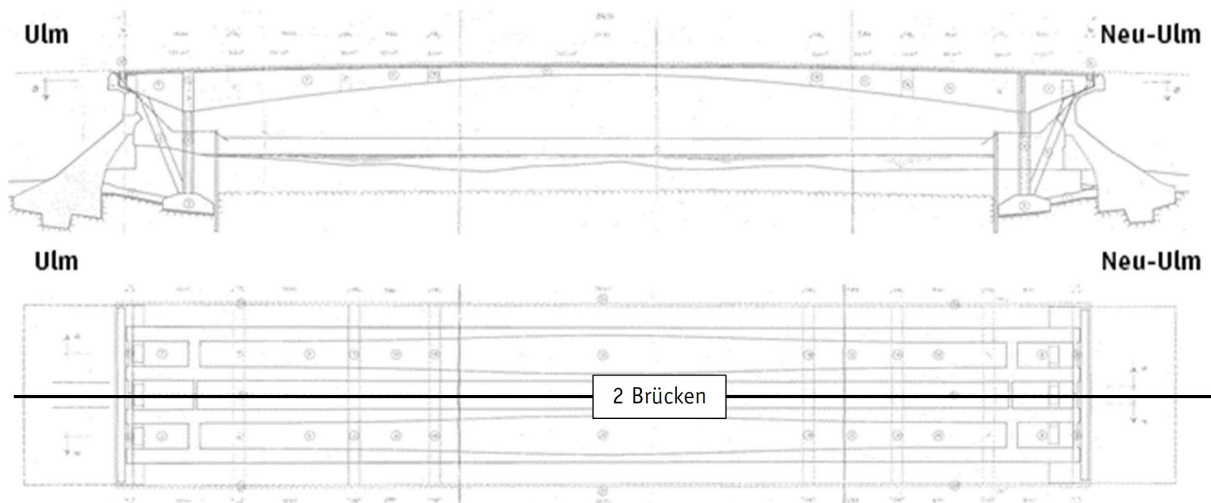


Bild 2.2: Skizze Konstruktion der Gänstorbrücke (Schnitt und Aufsicht, Unterlagen Ingenieurbüro Schiessl)

3 Methodik

3.1 Eingebettete Ultraschalltransducer

Für die Dauerüberwachung durch Ultraschall ist eine gleichbleibende Ankopplung der Prüfköpfe (Transducer) an das Medium unerlässlich. Für diesen Zweck werden von der BAM speziell entwickelte Sensoren der Firma ACS Ltd. eingesetzt (Bild 3.1). Durch diese Sensoren können extreme, potenziell ergebnisverzerrende Einflüsse (z.B. Temperatur) reduziert werden und Abkoppelung durch z.B. Vandalismus verhindert werden. Die Sensoren wurden charakterisiert (NIEDERLEITHINGER, 2015) und in Laborversuchen (NIEDERLEITHINGER, 2013, CLAUSS, 2020), großformatigen Testobjekten auf dem Bam Testgelände (EPPEL, 2020) oder der duraBAST Brücke (BAST 89.0312/2015) eingesetzt. Die Mittenfrequenz der Sensoren liegt bei 60 kHz mit bis zu ± 200 V Pulsstärke. Dadurch können Messungen in Distanzen zwischen 30-600 cm problemlos aufgenommen werden. Analog zu Ultraschall Transmissionsmessungen werden immer zwei individuelle ACS Sensoren benötigt. Dabei agiert einer der Sensoren als Sender, der zweite als Empfänger.



Bild 3.1: Transducer ACS S807 (Foto:BAM)

3.2 Messelektronik

Für die Dauerüberwachung mit eingebetteten Sensoren wird ein an der BAM eigens für diesen Zweck entwickeltes Messgerät, die sogenannte W-Box, eingesetzt. Die W-Box – basierend auf einem Raspberry Pi – ist als „all in one tool“ in der Lage, alle notwendigen Schritte von Pulserzeugung über Analog-Digital-Wandlung bis hin zur Datenübermittlung an Datenbanken zu übernehmen (FONTOURA BARROSO, 2021). Optional ist auch eine Aufzeichnung von Temperatur und Feuchte möglich. Während der Versuche an der Gänstorbrücke wurde die Messeinheit einmal gegen eine verbesserte Version ausgetauscht. Für Versuche, die eine höhere Messfrequenz zur Detektion kurzfristiger Veränderungen benötigen, ist die W-Box allerdings ungeeignet. Daher wurde für den im Dez. 2021 durchgeführten Belastungsversuch zusätzlich ein Messsystem analog zum im Vorhaben 89.0312/2015 verwendeten System eingesetzt, um möglichst viele Daten in kurzer Zeit zu gewinnen.

3.3 Messparameter

Bei Ultraschall-Transmissionsmessungen wird der zumeist die Ankunftszeitpunkt der direkten Welle (Ersteinsatz, time of flight) und damit die Geschwindigkeit ebendieser ausgewertet. Wenn sich der direkte Wellenweg durch Materialveränderungen, wie z.B. Risse von hinreichender Größe ändert, kann mit dieser Methodik zuverlässig auf Veränderungen geschlossen werden. Zur Detektion kleinerer Veränderungen muss hingegen auf die Analyse später im Signal ankommenden Coda ausgewichen werden. Diese Wellen haben das veränderte Material mehrmals durchlaufen, wodurch Laufzeitunterschiede besser erkannt werden können. Außerdem kann mittels Codawellen das Material abseits der direkten Verbindung zwischen Sender und Empfänger untersucht werden (SNIEDER, 2002). Die Auswertung der Coda-Signale erfolgt mittels der sogenannten Codawelleninterferometrie (CWI). Diese ursprünglich aus der Seismologie stammende Methodik vergleicht ein Referenzsignal mit darauffolgend aufgenommenen Signalen und bestimmt mittels Kreuzkorrelationsanalyse Veränderungen im Signal. Basierend auf der sogenannten „Doublet Technique“ (POUPINET, 1984, ROBERTS, 1992) wird in der CWI ein relativer Geschwindigkeitsunterschied zwischen Referenz und Signal berechnet (SNIEDER, 2002).

Mit diesen Verfahren lassen sich folglich drei Parameter aus den Daten extrahieren:

1. CC_{RAW} der Korrelationskoeffizient aus dem Vergleich von $u_1(t)$ und $u_2(t)$ auf $[t_1, t_2]$
2. ε_{max} die relative Geschwindigkeitsänderung
3. $CC_{Stretch}$ der der Korrelationskoeffizient aus dem Vergleich von $u_1(t)$ und $u_2(t)$ auf $[t_1, t_2]$ nach Anwendung von ε_{max}

Beim Monitoring mittels Codawelleninterferometrie, also beim Auswerten der Geschwindigkeitsänderung über viele aufeinanderfolgend aufgenommenen Signale gibt es zwei grundlegende Strategien. Wenn man davon ausgehen kann, dass die Veränderung im Signal gering sein wird, die Korrelation zwischen dem Referenzsignal und den anderen Signalen also hinreichend groß ist ($CC > 0,7$), bietet sich eine

festgesetzte Referenz an („fixed-reference“ Methode). Im Fall von langfristiger Überwachung und größeren Signalveränderungen wird auf eine schrittweise Veränderung des Referenzsignals („stepwise“ Methode) ausgewichen, wie bereits im Bericht zu Vorhaben 89.0312/2015 beschrieben. In diesem Bericht werden sowohl die „fixed-reference“ als auch „stepwise“ Methode verwendet. Mit Ersterer lassen sich alle drei erwähnten Parameter auf eine „Baseline“ Messung zum Ursprung zurückverfolgen, während mit „stepwise“ zwar ε (und CC_{RAW}) aber nicht $CC_{Stretch}$ auf die Baseline zurückgeführt werden können.

3.4 Abbildungsverfahren

Eine Aufnahme der Messdaten mit einem flächigen Sensornetzwerk ermöglicht Verfahren zur Lokalisierung von Veränderungen. Dies verbessert die Interpretierbarkeit der Messdaten am Bauwerk und ermöglicht eine bessere Zustandsbeurteilung. Einfache Interpolationsbasierte Verfahren wie der im Vorhaben 89.0312/2015 angewendeten Methode leiden dabei unter dem Nachteil von interpolationsbedingten Artefakten am Messfeldrand, was sich speziell bei geringer Sensoranzahl negativ auf die Ergebnisse auswirken kann. Deshalb werden für diesen Bericht komplexere, inversionsbasierte Lokalisierungsalgorithmen wie in PACHECO (2002) und ROSSETTO (2011) beschrieben verwendet. Abständen durch die sogenannte „Radiative-Transfer“ Methode ersetzt (CHANDRASEKAR, 1960).

4 Installation der Sensorik

Nach Vorbesprechungen mit allen beteiligten Projektpartner*innen wurde unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen der stromaufwärts gelegene Längsträger mit 20 Sensoren ausgerüstet. Die Instrumentierung erfolgte von Feldmitte nach Ulm, um möglichst den Bereich maximaler Durchbiegung durch Verkehrs- und Eigenlast, die Bereiche in denen signifikante Querkräfte auftreten und den Bereich sich aufteilender und ansteigende Spannglieder (siehe Bild 4.1) abzudecken. Durch flächenartige Anordnung der Sensorik in lediglich einem Längsträger können dort großflächige Abbildungsverfahren erforscht werden. Daher wurden die 20 Transducer in einem 10x2 Array angeordnet.

Die Installation selbst erfolgte von einem Brückenuntersichtgerät aus, welches auf dem Bürgersteig platziert wurde. Daher war keine Straßensperrung nötig und die Installation konnte im laufenden Verkehr ohne nennenswerte Beeinflussung des Verkehrsflusses erfolgen. Die Sensorpositionen wurden einzeln mit Radarmessungen freigemessen, um bei den Bohrungen keine Spannglieder oder Bewehrungseisen zu beschädigen. Als Ergebnis konnten die Sensoren nicht regelmäßig angeordnet werden. Die horizontalen Transducerabstände liegen daher zwischen 1,0 m und 1.5 m, die vertikalen Transducerabstände zwischen 0.5 m und 0.8 m.

Die Installation (Bild 4.2) erfolgte durch Bohrungen mit 30mm Durchmesser in circa 20 cm Tiefe. Im Dezember 2020 wurde der Messbetrieb aufgenommen.

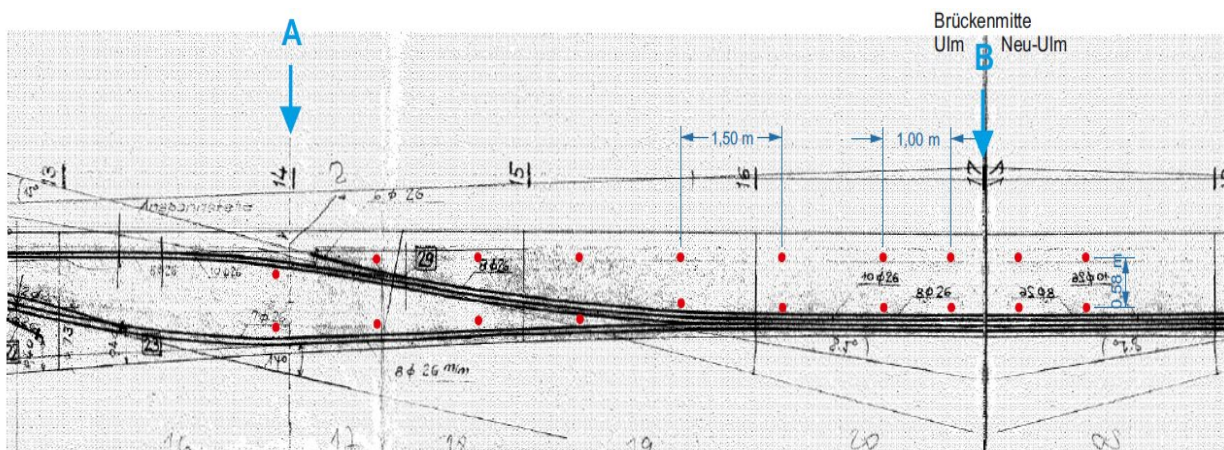


Bild 4.1: Sensorpositionen nach Einbau mit Spannkanalverlauf (Unterlagen Ingenieurbüro Schiessl)



Bild 4.2: Transducermontage: Bohrungen (links), Zustand direkt nach Verpressen (oben Mitte) und nach Entfernen der Manschette und finaler Verkabelung (unten Mitte), Kabelführung ins Wiederlager (oben rechts) zur messenden W-Box (unten rechts) (Fotos BAM).

5 Belastungsversuch

Nach ausbleibendem Schadensfall im Überwachungszeitraum wurde zur Validierung des Systems im Dezember 2021 ein Belastungsversuch durchgeführt. Hierfür wurden ein unbelasteter und ein belasteter Kieslaster (14,85 t bzw. 32 t) an verschiedenen Positionen auf der Brücke platziert (Bild 5.1). Ein schnelleres, industrielles Messsystem hat während des Versuchs unterschiedliche Messpaarkombinationen gemessen. Zusätzlich zu den statischen Versuchen wurde das Messsystem auch auf die Reaktion des Signals während der Überfahrt der LKW bei Schrittgeschwindigkeit und bei 30 km/h geprüft. Die Belastungsversuche sind in dokumentiert. Insgesamt 27 Messzyklen wurden durchgeführt. Bei allen Versuchen war entweder einer der beiden LKW an den 5 verschiedenen Positionen auf der Brücke oder die Brücke wurde in unbelastetem Zustand gemessen.

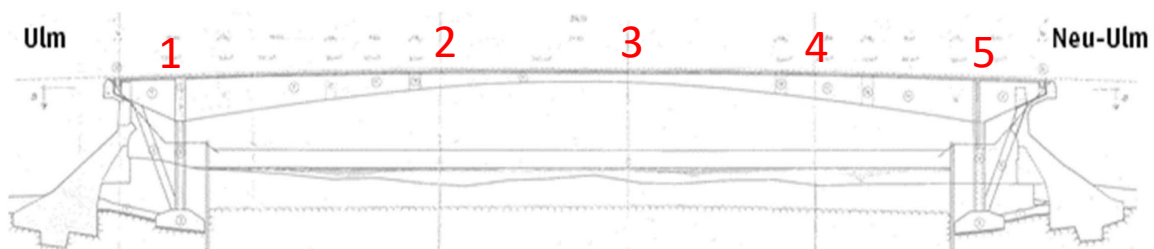


Bild 5.1: Belastungsversuch an der Gänstorbrücke: Lastpositionen.

Bild 4.3: LKW-Positionen auf der Gänstorbrücke. (Zeichnung: Unterlagen Ingenieurbüro Schiessl)

6 Auswertung und Ergebnisse

6.1 Dauerüberwachung

Seit Dezember 2020 finden in regelmäßigen Abständen Einzelmessungen mit den benachbarten Messpaaren statt. Bild 6.1 zeigt den Verlauf von Geschwindigkeitsänderung und Korrelationskoeffizient für alle benachbarten Messpaare im Juni 2021. Alle Sensoren liefern brauchbare Signale, auch wenn bei den Messpaaren mit großem Sender-Empfängerabstand eine erhöhte Anfälligkeit für Messungenauigkeiten ob geringerem Signal Rauschverhältnis kommt (z.B. 21.06.2021). Dies zeigt sich auch im Korrelationskoeffizienten, der für viele Messpaare im Tagesverlauf schon unter 0.7 sinkt und damit starke Signalveränderungen aufzeigt. Da sich der Korrelationskoeffizient jedoch wieder erholt, sind die Veränderungen auf den Einfluss der Temperatur zurückzuführen. Klar erkennbar ist ein Verlauf der Geschwindigkeitsänderungen im Tagesgang. Speziell in den Sommermonaten finden durch steile Temperaturgradienten Ausdehnung und Komprimierungsprozesse im Beton statt wodurch sich die Spannungsverhältnisse im Bauteil ständig verändern.

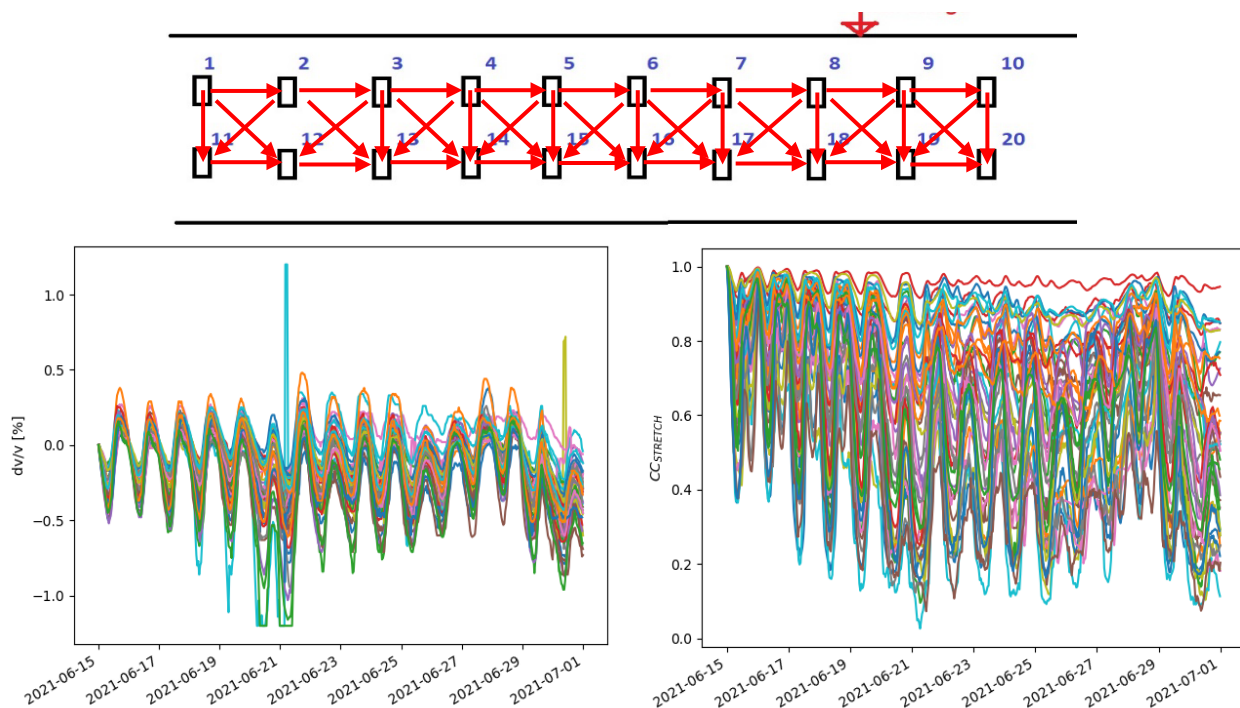


Bild 6.1: Auswertung benachbarter Messpaare im Juni mit Geschwindigkeitsänderung (links) und Korrelationskoeffizient (rechts).

6.2 Analyse für das gesamte Messjahr für ein ausgewähltes Messpaar

Das Messpaar S06-R16 wurde als Beispiel für die Auswertung eines vertikalen Messpaars im Jahresgang ausgewertet. Die Sensoren in der Mitte des Messfeld befinden sich in einem Abstand von 0.56m und haben daher eine gutes Signal Rauschverhältnis. Bild 6.2 zeigt $CC_{Stretch}$ und die relative Geschwindigkeitsänderung aus der CWI mit fester Referenz.

Der Verlauf der Geschwindigkeitsänderung folgt im Jahresgang dem Temperaturverlauf. Dies wird später noch im Detail analysiert. Die Starke Schwankungen im Tagesverlauf und die vereinzelt Ausfälle der Apparatur machen eine Detailanalyse schwierig. Die Geschwindigkeitsänderungen aus Winter 2020-2021

und Winter 2021-2022 sind vergleichbar, der Korrelationskoeffizient ist relativ hoch, woraus sich schließen lässt, dass die CWI mit fester Referenz auch nach einem Jahr noch aussagekräftige Ergebnisse liefern kann.

Da die Schallemissionsanalyse im Messzeitraum keine Schäden detektierte, ist anzunehmen, dass die Geschwindigkeitsänderungen im Messzeitraum allein temperaturbedingt sind. Die relativen Geschwindigkeitsänderungen aus Januar 2021 und Januar 2022 gleichen sich bei ähnlicher Umgebungstemperatur, der Korrelationskoeffizient ist bei Messpaaren mit guter Signalqualität hoch. Die Ursache der Schwankungen in der Maximalamplitude kann wie beschrieben unterschiedliche Ursachen haben, da die CWI Geschwindigkeitsänderung allerdings nach über einem Jahr plausible Ergebnisse liefert, sind diese wohl auch temperaturbedingt und reversibel.

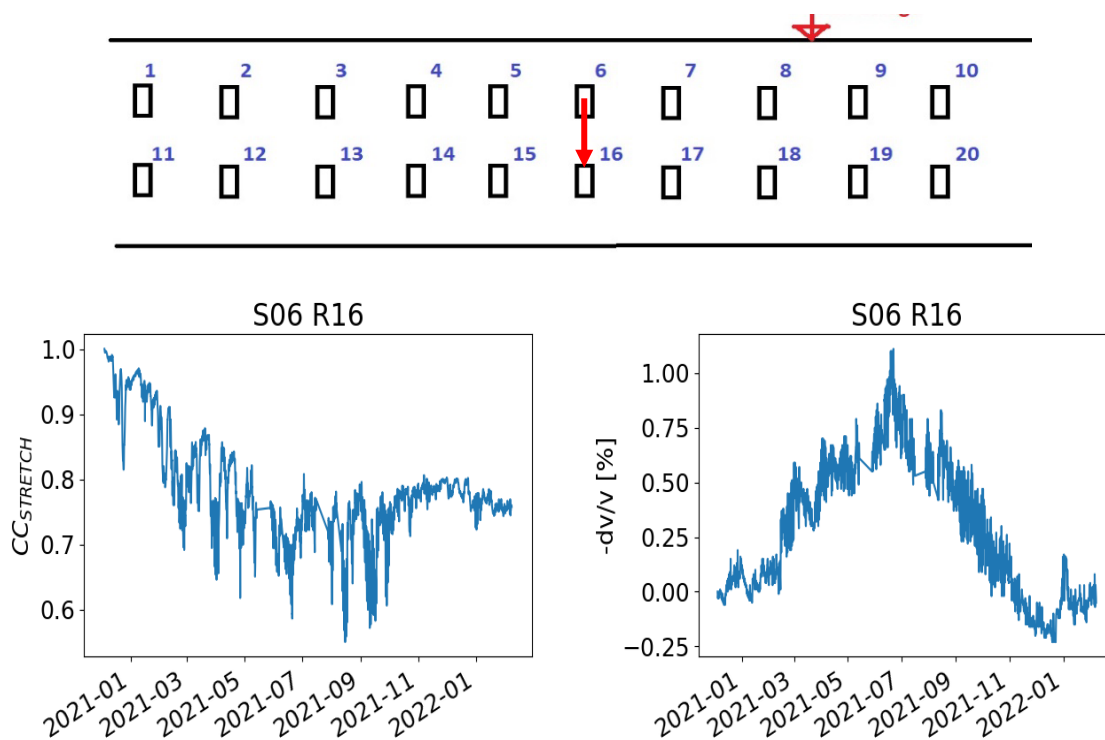


Bild 6.2: Ergebnisse der CWI Analyse für Messpaar 6-16. Dargestellt sind der Korrelationskoeffizient nach stretching (rechts), und die Geschwindigkeitsänderung berechnet mit fester Referenz (links)

6.4 Analyse Juni 2021

Wie aus der Literatur und Vorstudien bekannt ist, hat die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf Dehnung und Spannung im Bauteil und damit durch den akustoelastischen Effekt auch auf die Ultraschallgeschwindigkeit. Im Juni 2020 schwankte die Betontemperatur zwischen 15°C und 37°C. Dadurch ist diese Phase der Dauermessungen gut geeignet, um Temperaturgradienten und Effekte starker Temperaturschwankungen zu erkennen. Im Folgenden werden die Daten vom 15.06.2021 – 01.07.2021 mit der CWI mit fester Referenz ausgewertet und mit den Ergebnissen der Spannungsmessungen von IBS verglichen. Die Analyse erfolgt hier beispielhaft am Sensorpaar S 16R17 (Bild 6.3).

Wie erwartet folgen Spannung und Geschwindigkeitsänderung dem Tagestrend der Temperatur (Abbildung 9). Dieser Zusammenhang ist meist linear, beinhaltet aber bei komplexen Spannungsverhältnissen auch nichtlineare Hysterese, was eine Temperaturkompensation erschwert. Da Spannung und Geschwindigkeitsänderung demselben Verlauf folgen kann davon ausgegangen werden, dass die Ultraschallmessungen auch schadenssensitiv sind. Im Gegensatz zu Spannungsmessungen kann mit der Codawelleninterferometrie mit wenigen Messpaaren auch flächig ausgewertet werden was bei der Analyse des Belastungsversuchs demonstriert wird. Dies stimmt uns zuversichtlich, dass bei weiterem Monitoring schädigende Veränderungen nicht nur erkannt, sondern auch lokalisiert werden können. Leider sind solche im gesamten Messzeitraum nicht aufgetreten, was ein weiteres Monitoring erforderlich macht.

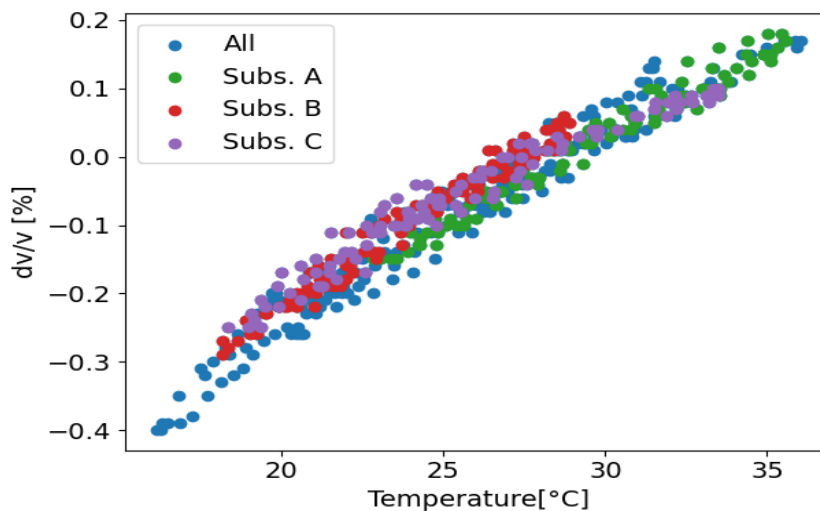


Bild 6.3: Geschwindigkeitsänderung über der gemessenen Temperatur für S16R17. Farblich unterschieden werden hierbei unterschiedliche Phasen im Messzeitraum in denen die Durchschnittstemperatur entweder stieg oder fiel.

6.5 Belastungsversuch

Im Folgenden wird der Belastungsversuch wie in Abschnitt 5 beschrieben durchgeführt. Zunächst wird ein einzelnes repräsentatives Messpaar ausgewertet, um die Antwort des Systems auf unterschiedliche Belastungsszenarien darzustellen. Danach werden die Messungen flächig mittels Inversionsverfahren ausgewertet.

Wie in Abschnitt 5 beschrieben wurden während des Belastungsversuches in den Morgenstunden des 8.12.2022 die Brücke an verschiedenen Stellen mit zwei unterschiedlichen LKW belastet. In Bild 6.4 ist der Verlauf von Korrelationskoeffizienten und Geschwindigkeitsänderung für Messpaar 19-20 in der Zugzone unter dem mittleren Auflastpunkt abgebildet. Die Zeitpunkte und Positionen der Belastung durch die unterschiedlichen LKW sind in der Grafik markiert. Aus Bild 6.4 lassen sich unmittelbar folgende Schlussfolgerungen treffen:

- Das Messsystem ist sensibel für Belastungen mit beiden Gewichten.
- Die größere Last führt zu größeren Veränderungen.
- Auch Lasten nicht unmittelbar über der Sensoranordnung führen zu detektierbaren Veränderungen in Brückenmitte.
- Der Korrelationskoeffizient erholt sich wieder zum Nullpunkt, während eine Geschwindigkeitsänderung (zumindest einige Zeit) im System verbleibt.
- Die Überfahrten 03:40-4:00 Uhr führen zu detektierbaren Veränderungen.
- Bei konstanter Last treten verzögerte nichtlineare Effekte auf, die das System beeinflussen.

Die Veränderungen werden je nach Sensorlage unterschiedlich stark detektiert, jedoch zeigt sich in allen Fällen eindrücklich die Sensitivität der Messmethodik. Ein Vergleich mit den Dehnungsdaten von IBS zeigt, dass das Coda Messsystem speziell die indirekten Lasten deutlich besser erkennt. Ein quantitativer Vergleich beider Messmethoden ist leider nicht möglich, da in den Daten von IBS ein unbekannter Fehler im Zeitstempel einen Vergleich verhindert.

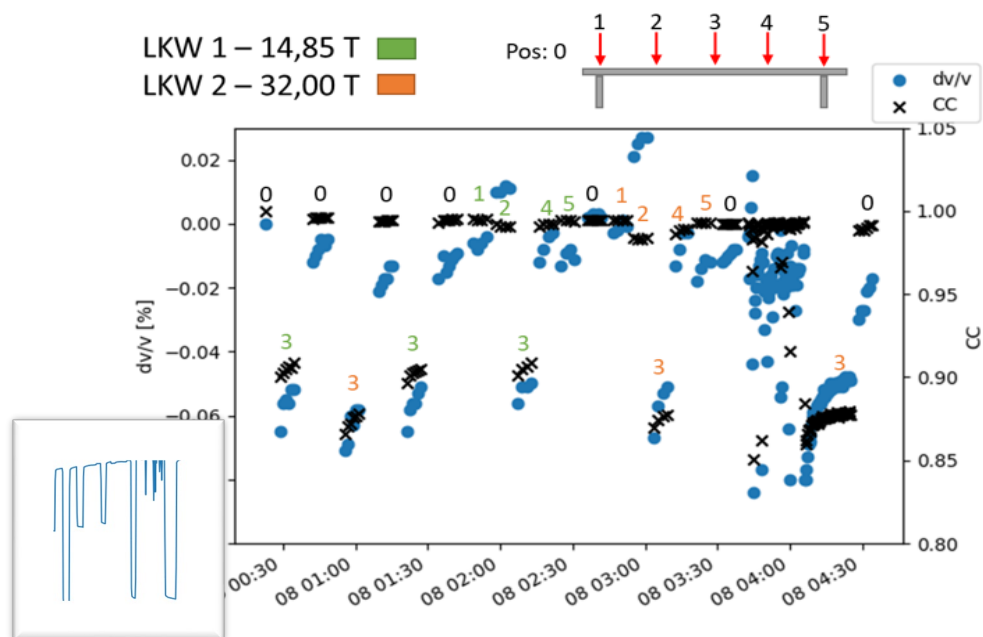


Bild 6.4: Geschwindigkeitsänderung und Korrelationskoeffizient für den Belastungsversuch am 8.12.2021 für das zentral gelegene Messpaar S19R20. Die LKW-Positionen sind farblich und mit Zahlen markiert. Links unten Dehnung gemessen von IBS, wegen Zeitversatz nicht eindeutig referenzierbar.

6.6 Inversionsrechnung

Für eine flächige Analyse des Spannungszustands bei Belastung wurde eine Inversionsrechnung durchgeführt. Als Datenquelle für die Inversionsrechnung wurde die Belastung mit dem schwereren LKW 2 an Position 3 um 1:00 Uhr mit den Messungen im unbelasteten Zustand unmittelbar zuvor verglichen. Da die Messkombinationen jeweils mehrfach aufgenommen wurden, wurden die Signale vor Auswertung mittels CWI gemittelt.

Die Ergebnisse der Inversionsrechnungen sind in Bild 6.5 dargestellt. Iterativ wird mit angepassten Diffusionskerns die Veränderung der sogenannten „scattering cross-section“ und der Geschwindigkeitsänderung berechnet. Die scattering cross-section wird mit einer „Nicht-Negativitätsbedingung“ invertiert, da alle zu lokalisierten Schädigungen eine Vergrößerung dieser bewirken. Dadurch konvergiert die Inversion nur nach genauem Anpassen der Inversionsparameter zur Glättung der Ergebnisse. Die Geschwindigkeitsänderung zeigt an der Unterseite des Trägers negative Werte, an der Oberseite positive. Da die Belastung von oben kommend zu einer Kompression an der Oberseite und einer Querdehnung an der Unterseite führt ist dies das erwartete Ergebnis. In beiden Darstellungen können drei Anomalien identifiziert werden:

- (A) Bei der Sensorinstallation wurde ein langer Längsriss an der Oberfläche zwischen Sensoren 4,5 und 14,15 entdeckt. Dieser Bereich der Brücke scheint durch die Belastung durch den LKW stärker beeinflusst zu werden, was sowohl zu einer stärkeren Veränderung der scattering cross-section als auch zu einer stärkeren Geschwindigkeitsabnahme in diesem Bereich führt.
- (B) Im Bereich der Brücke, in dem sich die Spannglieder aufteilen, verlagert sich die Separation von negativer und positiver Geschwindigkeitsänderung von horizontal zu vertikal. Ein ähnliches Verhalten kann auch in der scattering cross-section beobachtet werden. Hier verlagern sich die Spannungszustände über die Spannglieder. Dies hat Auswirkung auf die Geschwindigkeit.
- (C) Der Bereiche größter Durchbiegung direkt unter dem LKW ist der Bereich größter Veränderung in beiden Inversionsergebnissen. Hier kommt es zu den größten Einflüssen durch Querspannungen und Last.

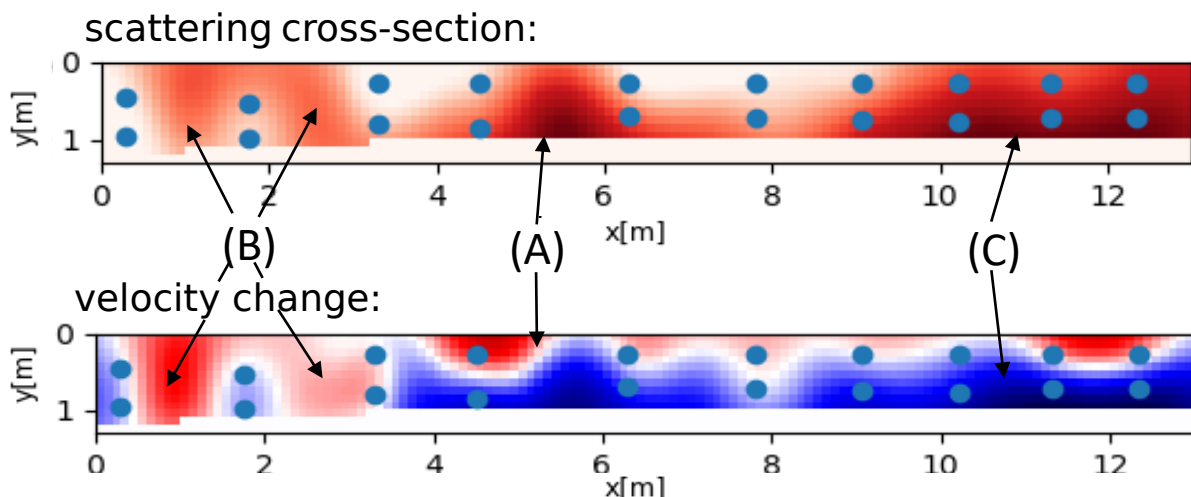


Bild 6.5: Ergebnisse der Inversionsrechnung bei Belastung mit dem 32 t-Lkw in Brückenmitte. Dargestellt sind „scattering cross-section“ und Geschwindigkeitsänderung (blau negativ, rot positiv), sowie die möglichen Ursachen für die lokalisierten Anomalien. (A) Ein großer Horizontaler Riss, der sich bei Belastung gegebenenfalls öffnet/verschiebt. (B) Aufteilung der Spannglieder. (C) LKW

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie im Projektantrag beschrieben gliederten sich die Arbeiten im Projekt in 6 Teilpakete. Nach intensiver **Planung** mit BAST und DFG FOR Coda ist unter Berücksichtigung von FE Nachrechnungen, Messzielen und Machbarkeitsaspekten ein Längsträger mit 20 Sensoren (statt ursprünglich geplanten 10) **instrumentiert** worden. Zur **Datenaufnahme** wurde eine von der BAM speziell fürs Projekt gebaute W-Box eingesetzt, die in der Projektlaufzeit durch eine neuere Version ersetzt wurde. Die **Auswertung** der Messungen erfolgte mit verschiedenen Auswertemethoden, dabei wurden Laufzeit, Maximalamplitude, und Korrelationsanalysen zur Bestimmung von Korrelationskoeffizienten und Geschwindigkeitsänderung entweder für Einzelmesspaare oder mittels Inversionsanalyse flächig analysiert. Um die Messungen besser **interpretieren** zu können wurden Temperatur und Spannungsdaten von IBS zum Vergleich herangezogen. Für die **Bewertung** der Verfahren hinsichtlich der Sensitivität für Schädigung wäre ein von IBS mittels Schallemissionsanalyse ermittelter Schadensfall im Versuchszeitraum vonnöten gewesen. Dennoch zeigt der Vergleich der Daten, dass die CWI mit fester Referenz über den Messzeitraum von einem Jahr plausible Ergebnisse liefert. Eine Analyse kürzerer Zeiträume zeigt, dass die Methodik, genau wie die Spannungsmessungen von IBS die temperaturbedingten Änderungen in der Brücke detektieren kann. Speziell Auswertungen kürzerer Zeiträume zeigen sich hochsensibel und stabil und bieten Potential zur Erkennung von schädigenden Veränderungen. Dies wurde in einem Lastexperiment im Dezember 2021 überprüft, bei der die Praktikabilität der Methode und vor allem die Möglichkeiten der Abbildungsverfahren dargestellt und bewiesen wurden.

Trotz des grundsätzlichen Erfolgs der Dauerüberwachung und des Belastungsversuchs fehlt der Nachweis eines echten Schadensereignisses. Daher wird vorgeschlagen, die Messanlage im Rahmen des Forschungsvorhabens DFG FOR 2825 CoDA, für das ohnehin am Objekt Untersuchungen vorgenommen werden, weiter zu betreiben. Dies bietet die Möglichkeit die Messverfahren ggf. an zukünftig auftretenden Schädigungen zu validieren. Auch wurde uns durch die zuständigen Behörden eine Möglichkeit zum Monitoring des Rückbaus der Brücke zugesichert.

8 Literatur

BAST (2018): Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken-Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren. Schlussbericht. BAST-Forschungsvorhaben 89.0312/2015 (durchgeführt von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung).

CHANDRASEKHAR, S. (1960): Radiative Transfer, DOVER PUBLN INC

CLAUSS, F., EPPLE, N., AHRENS, M. A., NIEDERLEITHINGER, E., MARK, P. (2020): Comparison of experimentally determined two-dimensional strain fields and mapped ultrasonic data processed by coda wave interferometry, *Sensors*, Bd. 20, p. 4023

EPPLE, N., FONTOURA BARROSO, D., NIEDERLEITHINGER, E. (2020): Towards Monitoring of Concrete Structures with Embedded Ultrasound Sensors and Coda Waves - First Results of DFG for CoDA, in *European Workshop on Structural Health Monitoring, Palermo, Springer*, pp. 266-275

FONTOURA BARROSO, D., EPPLE, N., NIEDERLEITHINGER, E. (2021): A portable low-cost ultrasound measurement device for concrete monitoring, *Inventions*, p. 36

NIEDERLEITHINGER, E., WOLF, J., MIELENTZ, F., WIGGENHAUSER, H., PIRSKAWETZ, S. (2015): Embedded ultrasonic transducers for active and passive concrete monitoring, *Sensors (Switzerland)*, pp. 9756-9772

NIEDERLEITHINGER, E., WUNDERLICH, C. (2013): Influence of small temperature variations on the ultrasonic velocity in concrete, *AIP Conference Proceedings*, pp. 390-397

PACHECO, C., SNIEDER, R. (2005): Time-lapse travel time change of multiply scattered acoustic waves, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 118, pp. 1300-1310

POUPINET, G., ELLSWORTH, W. L., FRECHET, J. (1984): Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89 (B7), 5719-5731

ROBERTS, P. M., PHILLIPS, W. S., FEHLER, M. C. (1992): Development of the active doublet method for measuring small velocity and attenuation changes in solids, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 91, Nr. 6, pp. 3291 - 9902

ROSSETO, V., MARGERIN, L., PLAÑES, T., LAROSE, É. (2011): Locating a weak change using diffuse waves: Theoretical approach and inversion procedure, *Journal of Applied Physics*, Bd. 109, Nr. 3

SNIEDER, R., GRÊT, A., DOUMA, H., SCALES, J. (2002): Coda wave interferometry for estimating non-linear behavior in seismic velocity, *Science*, Bd. 295, Nr. 5563, pp. 2253-2255