

Neuer Ansatz mit konventionellen und berührungslosen Sensoren Überwachung von Brückeninfrastrukturen

■ ■ ■ von Sina Keller, Chris Michel, Oliver Schneider, Jacob Müller, Matthias Arnold, Andreas Döring, Mareike Hoyer, Stefan Hinz, Hubert B. Keller

Das Durchschnittsalter der ca. 25.700 Bahnbrücken ist 75 Jahre und das der ca. 39.700 Brücken im Bundesfernstraßennetz ca. 40 Jahre. Hinzu kommt, dass knapp die Hälfte der Bahnbrücken älter als 100 Jahre ist. Das zunehmende Brückenalter in Verbindung mit dem vorhandenen massiven Sanierungsrückstau bei gleichzeitig geringeren Haushaltsmitteln für die Unterhaltung der Bauwerke führt unweigerlich zu einer Degradation des Zustands und somit der Sicherheit. Eine reduzierte Standsicherheit ist in einem frühen Stadium schwer zu erkennen und zu quantifizieren. Die Zustandsüberwachung dieser kritischen, jedoch alternden Infrastruktur gewinnt somit zunehmend an Bedeutung. Im vorliegenden Beitrag wird ein neuer Ansatz zur Unterstützung der Zustandsbewertung vorgestellt, der auf einem berührungslosen Messprinzip basiert und mit konventionellen Sensoren verifiziert wird. Während Fahrzeuge das Brückenbauwerk passieren, werden Daten mit berührungslos messenden Sensoren erfasst und zum Vergleich ein Datensatz mit konventionellen Sensoren erhoben. Auf Basis dieser Daten soll später eine verlässliche Bewertung des Brückenzustandes hinsichtlich seines individuellen Lastverformungsverhalten erfolgen. Die verschiedenen Datenaufnahmen werden hier exemplarisch an einer Brücke in Mödlitz, Nordbayern, vorgestellt und erläutert. Weiterhin werden die Messdaten präsentiert und analysiert sowie mit Berechnungsergebnissen von FE-Brückensimulationen verglichen. Schließlich erfolgt ein kurzer Exkurs zur automatischen Fahrzeugerkennung und -klassifikation, basierend auf den berührungslosen Sensordaten.

1 Überwachung von Brückeninfrastruktur

Brückenbauwerke sind neuralgische Infrastrukturbestandteile und systemkritisch für die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit von Gesellschaft und Wirtschaft mit hohen Anforderungen hinsichtlich der Verfügbarkeit für die Logistik und den Individualverkehr. Zudem sind Brückenbauwerke vulnerable Knoten des Straßennetzes, da hier Straßen-, Bahn- oder Talquerungen vorgenommen werden, meist ohne dass direkte Umfahrungsmöglichkeiten bestehen. Temporäre Verbesserungen oder Behelfsbrücken sind lediglich mit erheblichen Kosten und Vorlaufzeiten zu realisieren. Das zunehmende durchschnittliche Bauwerksalter in Verbindung mit massivem Sanierungsrückstau führt unweigerlich zu einer schleichenden Verschlechterung des Zustands und somit zu einer Reduzierung der Sicherheit bei Brückenbauwerken. [1] Vor diesem Hintergrund ist die frühzeitige und zuverlässige Erkennung von Schäden essentiell.

Brücken bestehen aus zahlreichen Bauteilen, welche entsprechend unterschiedlichen Wartungs- und Erhaltungsmaßnahmen unterzogen werden, wie zum Beispiel DIN 1076 und RI-EBW-Prüf. Aktuell werden zur Quantifizierung des Zustands, zur Budgetplanung sowie zur allgemeinen Vorausschau verschiedene Klassifikatoren zur Bewertung von Ingenieurbauwerken angewandt. Unterschieden wird dabei zwischen Standsicherung »S«, Verkehrssicherheit »V« und Dauerhaftigkeit »D«, wobei diese drei Bereiche wiederum mit Zustandsnoten 1–4 bewertet werden. Diese Benotung deckt Zustände von Best- bzw. Neuzustand bis mangelhaft und ungenügend ab. Eine Zustandsnote schlechter als 3 hat in den meisten Fällen eine baldige Sanierung oder gar einen Ersatz zur Folge. Bisher erfolgt eine Bewertung des Bauwerkszustandes aufgrund einer sogenannten handnahen Prüfung. Dabei werden im Rahmen einer In-situ-Inaugenscheinnahme sämtliche sichtbare Teile und Flächen betrachtet und auf offensichtliche Defekte sowie mittels eines Prüfhammers (300 g oder 600 g) auf Hohlstellen oder oberflächlich verborgene Defekte untersucht.

Risse werden aufgenommen, gemessen und auf etwaigen Rissfortschritt hin geprüft. Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Einstufung der Zustandsnoten eines Brückenbauwerks zunächst anhand eines rein äußerlichen Eindrucks abgeleitet wird. Die beschriebene Bewertung birgt allerdings auch Nachteile, wie zum Beispiel eine systemimmanente Unschärfe der Prüfmethodik sowie keine einheitliche Bauwerksprüfung aufgrund unterschiedlichen Aufwandes und Prüfumfanges. In der Vergangenheit wurden daher erforderliche Sanierungs- oder Ersatzmaßnahmen nicht immer konsequent erbracht.

Vor diesem Hintergrund gewinnt ein Structural Health Monitoring (SHM) zunehmend an Bedeutung, um beispielsweise etwaige Veränderungen im Verformungsverhalten frühzeitig zu erkennen. Die bisherige äußerliche Betrachtung erlaubt meist eine solche Veränderungsdetektion nicht. Zusätzliche Kenntnisse über den tatsächlichen Zustand, wie etwa frühzeitiges Erkennen von inneren Schädigungen des Brückenbauwerks, können helfen, um die Resilienz der Brücke zu erhöhen und das bisherige Prüfsystem zu ergänzen. Das Verhalten der Brücke wird hierbei unter statischen und dynamischen Belastungen analysiert. Solche Überwachungssysteme für Brücken sind bis auf sehr wenige Beispiele nicht verbreitet. Neben Zweifeln an der Wirksamkeit des Nutzens bei Anwendern sind die Investitionskosten ein Hindernis. Bisher werden Messdaten wie Verschiebungen, Dehnungen und Beschleunigungen primär durch Anbringen konventioneller Sensoren direkt am Bauwerksteil gewonnen. Installation und Unterhalt der Sensorsysteme sind oft mit Einschränkungen des Verkehrs verbunden. Weiterhin sind Messsysteme rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt und unterliegen zudem einer Alterung.

2 Überwachung mit verschiedenen Messprinzipien am ausgewählten Bauwerk

2.1 Allgemeines

Alternativ bzw. ergänzend können zur Brückenüberwachung mobile Messsysteme zum Einsatz kommen. Eine geeignete Methode zur berührungslosen fernerkundlichen Messung sind bodenbasierte interferometrische Radarsensoren: GBR von ground-based interferometric radar. Im interdisziplinären ZEBBRA-Verbundvorhaben werden GBR-Sensoren mit dem Ziel eingesetzt, einen nicht-invasiven, mobilen und innovativen Mess- und Methodenansatz zur Erfassung und Analyse des Brückenzustandes während des alltäglichen Betriebes mit einer anschließenden Bewertung dieses Zustandes zu erarbeiten. Das ZEBBRA-Vorhaben [2] wird im Rahmen der »Zivilen Sicherheit – Verkehrsinfrastrukturen« vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

In dem vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse des ZEBBRA-Ansatzes präsentiert. Auf der einen Seite erfolgt eine Modellierung und Simulation eines exemplarischen Brückenbauwerks zum Verständnis des Tragverhaltens sowie der Rahmenbedingungen dieser Brücke mit konventionellen Sensoren für ein detailliertes SHM. Auf der anderen Seite werden die Herangehensweise und das Messprinzip des berührungslos aufnehmenden GBR an einer Brücke unter realen Bedingungen vorgestellt und die daraus resultierenden GBR-Daten sowie die Datenauswertung diskutiert und gegenüber den konventionellen Sensordaten validiert. Dies beinhaltet insbesondere die Schätzung von Fahrzeugüberfahrten auf der Brücke anhand von GBR-Daten und Schwellwertverfahren sowie Auswertungsverfahren basierend auf Konzepten der künstlichen Intelligenz.

Bei der Zustandserfassung mittels fest installierter Sensorik werden unter anderem Beschleunigungen, Dehnungen und Temperaturen aufgenommen. Diese Daten stellen wichtige Eingangsparameter für die Bewertung der Bauwerkermüdung dar. Zudem können anhand dieser Daten Erkenntnisse über die Verkehrsbelastung der Bauwerke gewonnen werden. Wünschenswert ist der Einsatz berührungsloser Messsysteme aus den naheliegenden Gründen, wie zum Beispiel geringer Investitions-, Montage- und Erhaltungsaufwendungen. Zudem kann ein solches Messsystem mobil an mehreren Brücken eingesetzt werden. Das vorgestellte und eingesetzte berührungslos messende Radar nutzt beispielsweise interferometrische Effekte zur Messung der vertikalen bzw. auch horizontalen Brückenbewegung an definierten Punkten. Berührungslos bedeutet hierbei, dass der Sensor nicht direkt am Bauteil angebracht werden muss. Im Folgenden werden die im ZEBBRA-Projekt eingesetzten Messprinzipien zur Datenaufnahme exemplarisch an einem repräsentativen Brückenbauwerk erläutert.

2.2 Beschreibung der Brücke

Im Verbundvorhaben werden drei verschiedene Brückenbauwerke untersucht. Exemplarisch werden die Daten der Brücke auf der B 303 in Nordbayern dargestellt und analysiert. Das einfeldrige Brückenbauwerk führt über die K-KC bei Mödlitz und wurde im Jahr 2005 errichtet. Es handelt sich um einen längs vorge-spannten zweistegigen Plattenbalkenquerschnitt. Die Brücke ist schiefwinkelig und hat eine Gesamtlänge von ca. 26 m, ihre Breite beträgt ca. 12 m. Der vertikale

Lastabtrag in die Unterbauten erfolgt über ein Elastomerlager. Der Zustand des Bauwerks wird aktuell mit der Zustandsnote 2,0 bewertet. Durch die beschriebenen Charakteristika eignet sich diese Brücke als exemplarisches Bauwerk und ermöglicht einen Transfer des ZEBBRA-Monitoringsystems mit verschiedener Sensorik auf andere Brücken.

2.3 Angewandte Messprinzipien zur Datenaufnahme

Die eingesetzten konventionellen Sensoren erfassen die Bauwerksdehnung und die Beschleunigung an verschiedenen Messstellen unterseitig an der Brücke. Die Sensorik wird hierfür direkt an der Brücke angebracht bzw. in die Brücke eingebracht (Bilder 1, 2). Zudem wird die Temperatur der Luft, des Spannbetonüberbaus und des Asphalts aufgezeichnet. Hierdurch kann der zeitliche Verlauf der Steifigkeit erfasst werden und als mögliche Eingangsgrößen für datengetriebene Verfahren dienen.

Zur Erkennung der Verkehrssituation auf der Brücke sind zusätzlich Magnetfeldsensoren angebracht, welche geringe Feldstärken mit einer hohen Auflösung messen. Diese sind geschützt vor Witterungseinflüssen in den Ecken an der Unterseite der Brücke installiert. Sie messen durch die 30 cm dicke Betonfahrbahnplatte, wann ein Fahrzeug auf die Brücke auffährt und wann es sie wieder verlässt.



1 Montage eines Beton-Dehnungssensors
© Büro für Strukturmechanik

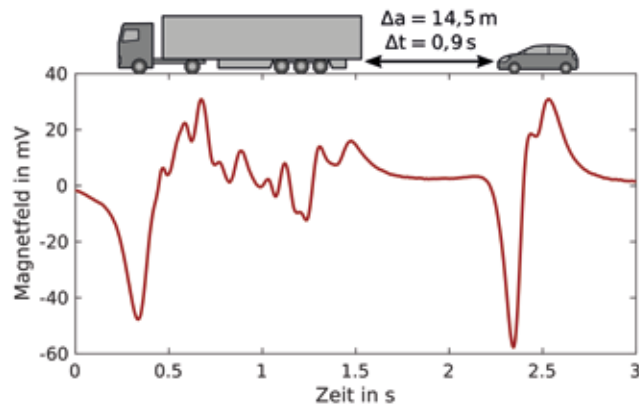


2 Vorbereitete Messstelle für Betondehnungstreifen sowie Radarreflektor zur präzisen GBR-Messung
© Büro für Strukturmechanik

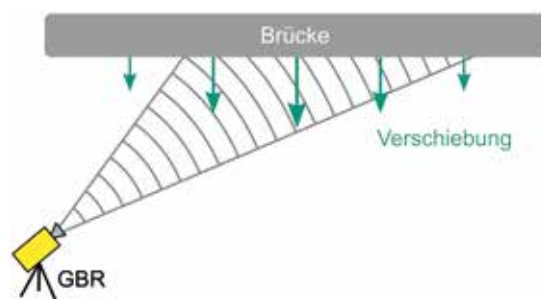
Bild 3 zeigt eine gemessene Überfahrt eines Lkw, gefolgt von einem Pkw. Aus den Sensordaten können Charakteristika wie Fahrzeuglänge, Abstand und Geschwindigkeit berechnet und so unterschiedliche Überfahrten (Events) in den Zeitreihendaten identifiziert werden. [3] [4]

Berührungslos messende Sensoren eignen sich aus den eingangs genannten Gründen zur Überwachung dynamischer Struktureigenschaften. Die bodenbasierte Radarinterferometrie bzw. ground-based interferometric radar (GBR) bietet verschiedene Vorteile gegenüber konventionellen Messsensoren, wie zum Beispiel induktive Wegaufnehmer oder Beschleunigungssensoren. Die durch Fahrzeugüberfahrten verursachten Auslenkungen bzw. Verschiebungen des Brückenbauwerks können an mehreren Punkten mit hoher Genauigkeit und Abtastrate während des laufenden Betriebs gemessen werden. Dies wird erreicht, indem vom GBR ausgestrahlte Mikrowellen an der Brücke reflektiert und wieder empfangen werden (Bild 4). Verschiebungen der Brücke führen zu Phasenänderungen im Signal, die vom Sensor registriert werden. Um eine Genauigkeit im Submillimeterbereich zu erhalten, ist eine ausreichende Signalreflexion an der Brückenstruktur zu gewährleisten. Insbesondere eignen sich hierfür Querträger aufgrund ihrer Größe und die oftmals gegebene Möglichkeit der orthogonalen Ausrichtung des GBR. Für den Einsatz des GBR ist es aus diesen Gründen besonders wichtig, das Brückenbauwerk und die Messsituation vor Ort zu kennen und im Voraus ein entsprechendes Messmodell festzulegen. Da die Brücke in Mödlitz aufgrund ihrer Bauweise keine Elemente besitzt, die das GBR-Signal ausreichend reflektieren, sind einige wenige kleine Radarreflektoren an der Brückenunterseite befestigt worden: siehe Bild 2.

Diese Radarreflektoren dienen zudem zur Evaluation und Validierung des GBR-Messverfahrens, da deren exakte Position geodätisch bestimmbar ist. Eine Eindeutigkeit des Messpunktes wird in guter Näherung dadurch erreicht, dass ein Reflektor den größten Teil des reflektierten Signals ausmacht, so dass Signale von anderen Stellen der Brücke vernachlässigt werden können. Die Reflektoren sind in der Nähe der konventionellen Sensorik positioniert, um einen Vergleich der verschiedenen Messprinzipien zu ermöglichen. Zur Messung der vertikalen Komponente der Brückenverschiebung, welche im Allgemeinen den größten Betrag hat, wird das GBR unter der Brücke in



3 Zeitverlauf eines Magnetfeldsensors zur Überwachung der Fahrzeugüberfahrten © Büro für Strukturmechanik/Karlsruher Institut für Technologie



4 Schematische Darstellung des Messprinzips mit dem GBR an einer Brücke © Karlsruher Institut für Technologie

Längsrichtung positioniert. Bild 5 zeigt eine Messung mit dem GBR-Gerät an der Brücke in Mödlitz. Die Anbringung von zusätzlichen Reflektoren steht dem Ziel einer komplett berührungslosen Messung zunächst entgegen und erfordert eine Weiterentwicklung alternativer Messprinzipien. Diese Weiterentwicklung konnte im Rahmen des ZEBBRA-Verbundvorhabens bereits erfolgen. [5]

Die Datenaufnahme mit den vorgestellten Messprinzipien findet während des laufenden Verkehrs auf der Brücke statt. Zur Validierung, welche Fahrzeuge sich während der Messungen auf der Brücke befinden, wird ein unbemanntes Luftfahrzeug bzw., in Englisch, unmanned aerial vehicle (UAV), oftmals als Drohne bezeichnet, eingesetzt. Im ZEBBRA-Projekt kommt hierzu eine Inspire 2 von DJI kombiniert



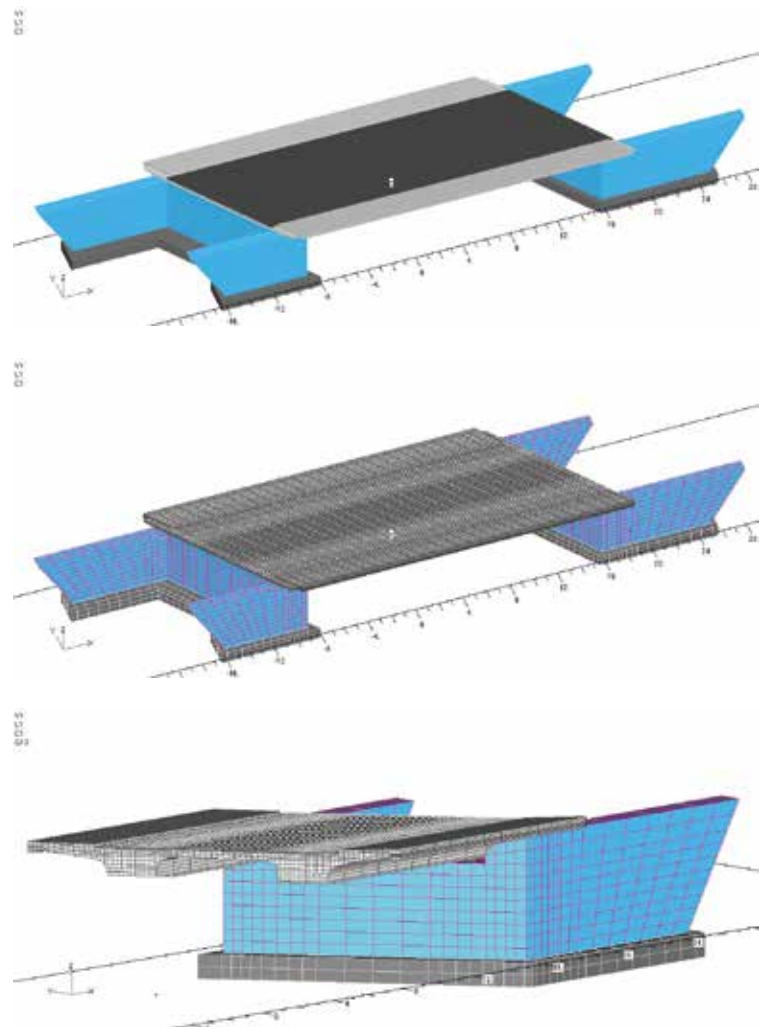
5 GBR-Messung an der Brücke in Mödlitz © Büro für Strukturmechanik

mit einer Zenmuse-X5S-Gimbal-Kamera zum Einsatz, um mit 25 Hz 4-K-Bilder von der Brückenoberfläche aus der Vogelperspektive aufzunehmen. In diesen Bilddaten werden die Fahrzeuge auf der Brücke aufgezeichnet und mit Hilfe eines selbst entwickelten Werkzeuges automatisiert analysiert und in Fahrzeugklassen kategorisiert. Neben dem Fahrzeugtyp werden auch weitere Parameter wie Start- und Endzeit einer Überfahrt extrahiert.

In einem nachfolgenden Schritt können die UAV-Bilddaten samt den daraus extrahierten Informationen als Referenz verwendet werden, um mit Verfahren der künstlichen Intelligenz und basierend auf den GBR-Daten Fahrzeuge auf der Brücke zu erkennen und zu klassifizieren. Erste Verfahren konnten bereits erfolgreich implementiert werden. [6]

3 Simulationsdaten mit dynamischen Lasten

Zum Verständnis der Rahmenbedingungen und um dezidierte Referenzdaten zu generieren, erfolgt eine Simulation der Brücke anhand eines mathematisch-physikalischen Modells. Mit diesem Modell können Dehnungen und Verformungen des Bauwerks berechnet werden. Simuliert werden hiermit möglichst realitätsnah die Überfahrten von Fahrzeugen mit variierenden Abmessungen, Gewichten, Geschwindigkeiten und Positionen. Für die dynamischen Berechnungen wird die Finite-Elemente-(FE-)Methode eingesetzt. Bild 6 zeigt das erstellte 3-D-FE-Element des Brückenbauwerks Mödlitz. Das hier eingesetzte Berechnungsmodell umfasst einen deutlich höheren Detaillierungsgrad als im Kontext der Bemessung von Brückenbauwerken üblich. Im Gegensatz zu den für die übliche Bemessung verwendeten statischen Ansätzen werden ausschließlich nichtlineare dynamische Berechnungen durchgeführt. Um die erforderlichen wirklichkeitsnahen Simulationsdatensätze generieren zu können, müssen Masse, Steifigkeit und Dämpfungsverhalten mit hinreichender Genauigkeit, aber auch Effekte der Fahrzeug-Bauwerk-Interaktion berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass beispielsweise neben dem Überbau ebenso die temperaturabhängige Steifigkeit des Asphalt



6 7 8 FEM-Modell zur Simulation der Überfahrten und Bauwerksschäden
© Büro für Strukturmechanik

nebst Übergangskonstruktion, Drehfedersteifigkeiten der Lager, die Kappen und Feder-Dämpfer von Fahrzeugen etc. einbezogen werden. Weiterhin wurde das Berechnungsmodell so erstellt, dass damit verschiedene Schadensszenarien am Bauwerk simuliert werden können, wie zum Beispiel Rissbildung sowie Schäden an den Brückenlagern oder der Gründungsbauteile. Anhand der in verschiedenen realen Messkampagnen gewonnenen Daten erfolgte eine Feinkalibrierung des Modells.

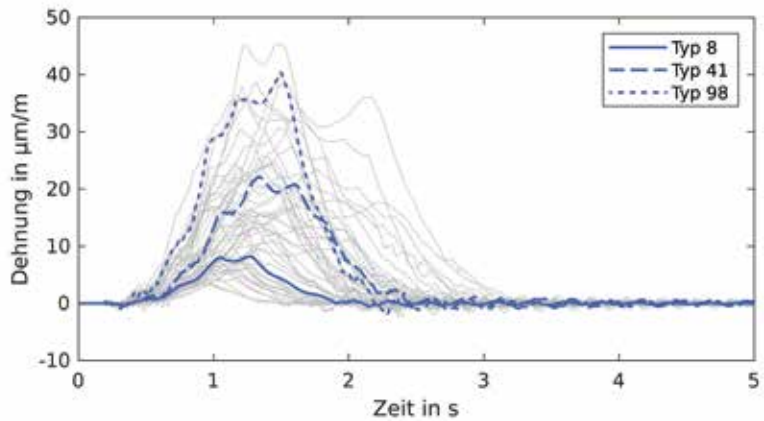
Zur Simulation der Belastungssituation durch Fahrzeugüberfahrten werden statistische Daten herangezogen, aus denen zufällig Fahrzeuge generiert werden. Neben offensichtlichen Parametern wie Gesamtgewicht und Anzahl an Achsen gehen zusätzliche Parameter wie Geschwindigkeit, Achsfedersteifigkeiten oder Dämpfung ein. In Summe werden je nach Fahrzeugtyp bis zu 25 randomisierte Parameter mit dementsprechend hinterlegten Verteilungsfunktionen angewandt.

Neben Pkws stellen Lkws des Fahrzeugtyps 8, 41, 97 und 98 [7] [8] die maßgebliche Verkehrsbelastung auf der Brücke in Mödlitz dar. Allerdings erzeugt der Verkehr aus Fahrzeugen $\leq 3,50$ t Gewicht eine geringe ermüdungsrelevante Belastung. Bild 9 zeigt Beispiele von Dehnungszeitverläufen für 100 simulierte Überfahrten von Fahrzeugen mit einem Gewicht $\geq 3,50$ t an der Unterseite eines Stegs in Feldmitte. Diese Simulationsdaten am intakten Bauwerk stellen den Referenzzustand dar. In einem nächsten Schritt werden Überfahrten mit verschiedenen Bauwerksschäden und einem variierenden Schweregrad simuliert. Alle simulierten Überfahrten am intakten wie am geschädigten Bauwerk dienen später als Datengrundlage für das Training der Verfahren der künstlichen Intelligenz im Kontext der Eventerkennung und Schädigungsdetektion. Mit Hilfe solcher Verfahren soll die Bewertung des Bauwerkszustandes datengetrieben unter verschiedenen Belastungsszenarien erfolgen.

4 Ergebnisse der verschiedenen Messprinzipien an der Brücke in Mödlitz

4.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Datenaufnahme mit den verschiedenen Messprinzipien an der Brücke in Mödlitz präsentiert. Exemplarisch ist eine Analyse der Dehnungs- und Beschleunigungsdaten sowie der GBR-Daten aufgeführt. Darüber hinaus wird eine Klassifikation der Fahrzeugüberfahrten rein aus den GBR-Daten vorgestellt. Hierdurch können sogenannte Events auf der Brücke datenbasiert detektiert und zugeordnet werden.



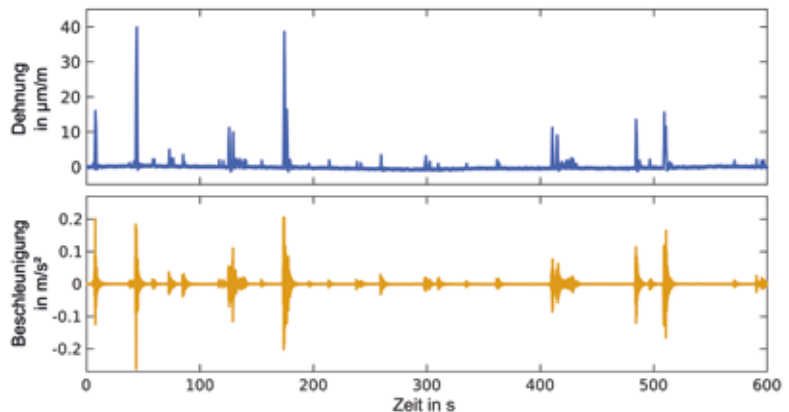
9 Beispiele für Dehnungszeitverläufe an der Unterseite eines Stegs in Feldmitte der Brücke Mödlitz von 100 simulierten Überfahrten von Fahrzeugen $\geq 3,5$ t; ausgewählte Lkw-Fahrzeugtypen in Blau © Büro für Strukturmechanik/Karlsruher Institut für Technologie

4.2 Darstellung der aufgenommenen Sensordaten

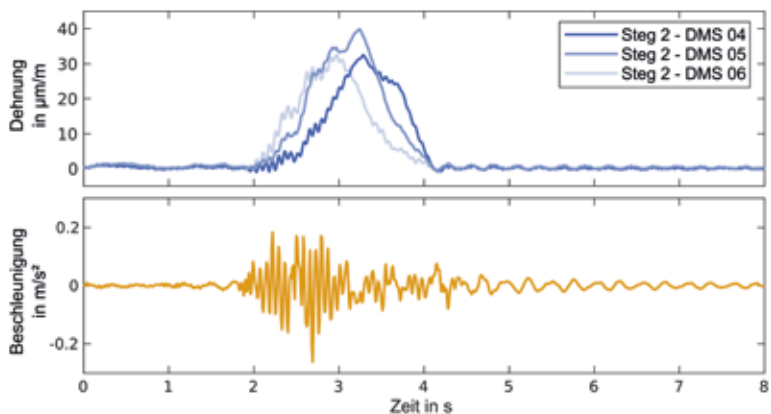
Exemplarische Zeitverläufe aus den Dehnungs- und Beschleunigungsdaten an der Brücke in Mödlitz werden in Bild 10 gezeigt.

Ein Beispiel für die auftretende Dehnung und Beschleunigung in einem Zeitraum von 8 s, welche durch eine Lkw-Überfahrt induziert wird, ist in Bild 11 dargestellt.

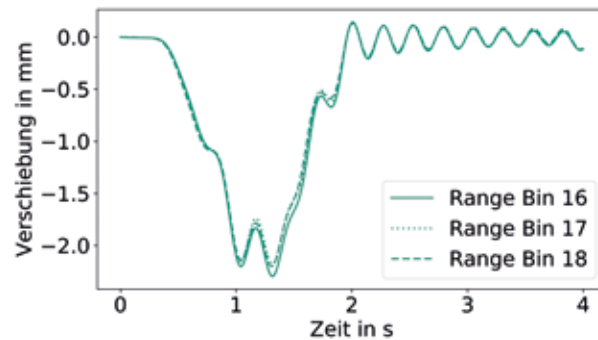
Der Lkw des Typs 98 überfährt hierbei die Position der Dehnungssensoren in der Reihenfolge DMS06, DMS05 und DMS04. Nach dem Verlassen der Brücke setzt der Ausschwingvorgang ein, im vorliegenden Fall 13 s dauernd.



10 Beispiel eines Dehnungs- und eines Beschleunigungssensors an der Brücke in Mödlitz: Sensorposition in Feldmitte an Stegunterseite © Büro für Strukturmechanik/Karlsruher Institut für Technologie



11 Beispiel eines Dehnungs- und Beschleunigungszeitverlaufs während einer Lkw-Überfahrt des Typs 98: Sensorposition in Feldmitte an Stegunterseite © Büro für Strukturmechanik/Karlsruher Institut für Technologie

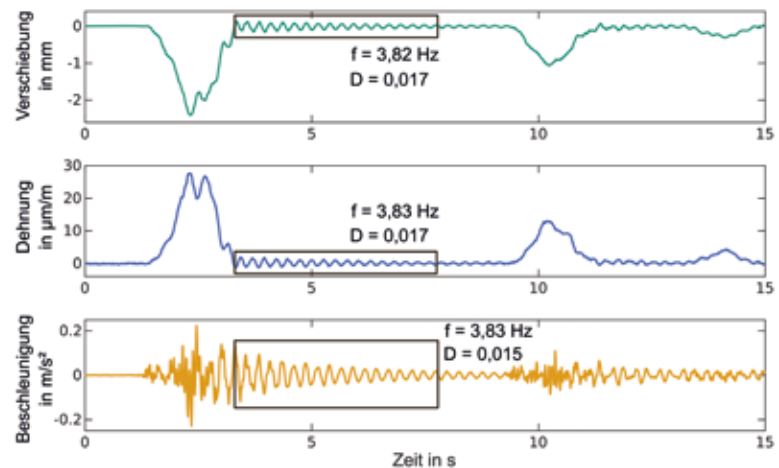


12 13 Beispiel einer Lkw-Überfahrt (UAV-Daten) und die korrespondierenden GBR-Daten an unterschiedlichen Bins
© ci-Tec GmbH

Die Bilder 12 und 13 zeigen als Beispiel die Überfahrt eines Lkws und die zugehörigen Zeitverläufe der GBR-Daten an verschiedenen Reflektoren, hier als »Bins« bezeichnet. Je höher die Bin-Nummer ist, desto weiter entfernt befindet sich der Reflektor bei der Messung von dem GBR. Aufgrund der maximalen Verschiebung lässt sich auf die Fahrseite des Fahrzeugs schließen. Die Geschwindigkeit kann näherungsweise aus der Dauer der Überfahrt berechnet werden.

4.3 Vergleich der Sensordaten

Im Hinblick auf eine Brückenüberwachung durch das berührungslose GBR-Messprinzip sind ein elementarer Schritt der Vergleich und die Validierung der GBR-Daten mit den gleichzeitig eingesetzten konventionellen Sensoren wie Dehnungs- oder Beschleunigungssensoren. Zu beachten gilt, dass in den jeweiligen Messprinzipien unterschiedliche physikalische Größen gemessen werden und somit ein direkter Vergleich der drei Messprinzipien ohne Transformation nicht erfolgen kann. Es ist daher notwendig, sich zunächst auf die Extraktion von modalen Parametern der Brücke zu beschränken, die bei allen Sensoren direkt vergleichbar sind. Solche modalen Parameter sind zum Beispiel die Eigenfrequenz f oder das Dämpfungsmaß D des Ausschwingvorgangs nach einer Fahrzeugüberfahrt. Bild 14 zeigt den zeitlichen Verlauf der Verschiebungsmessung in den GBR-Daten, der Dehnung und der Beschleunigung für eine solche Fahrzeugüberfahrt auf der Brücke in Mödlitz im Vergleich. Aus diesen drei verschiedenen Zeitverläufen lassen sich die Eigenfrequenz f und die Dämpfung D im Rahmen des Ausschwingvorgangs gleichwertig bestimmen.



14 Vergleich der Verschiebung, berechnet aus den GBR-Daten, der Dehnung und der Beschleunigung
© Karlsruher Institut für Technologie

4.4 Eventerkennung

Um eine Analyse der dynamischen Belastungen von Brücken zu ermöglichen, müssen in einem ersten Schritt die Fahrzeugüberfahrten erkannt und extrahiert werden. Events stellen hierbei Überfahrten von Fahrzeugen über die Brücke dar. Diese Eventerkennung wird auf Basis der Dehnungsdaten und der GBR-Daten mit datenbasierten maschinellen Lernverfahren als Teilbereich der künstlichen Intelligenz durchgeführt. Die Eventerkennung mittels Schwellwertverfahren erfordert die Vorverarbeitung der Daten, um Störungen in den Signalen zu eliminieren,

erlaubt aber bereits eine zuverlässige Erkennung der Events. Die Klassifikation, welcher Fahrzeugtyp sich während der Datenaufnahme auf der Brücke befindet, erfolgt durch sukzessives Anpassen der Schwellwerte.

Mit maschinellen Lernverfahren lassen sich Events in den Dehnungs- und GBR-Eingangsdaten ohne eine intensive Datenvorverarbeitung detektieren. Anhand der Merkmale, die zum Beispiel aus den GBR-Daten extrahiert werden, ist eine Eventerkennung und -klassifikation unabhängig von Umwelteinflüssen möglich.

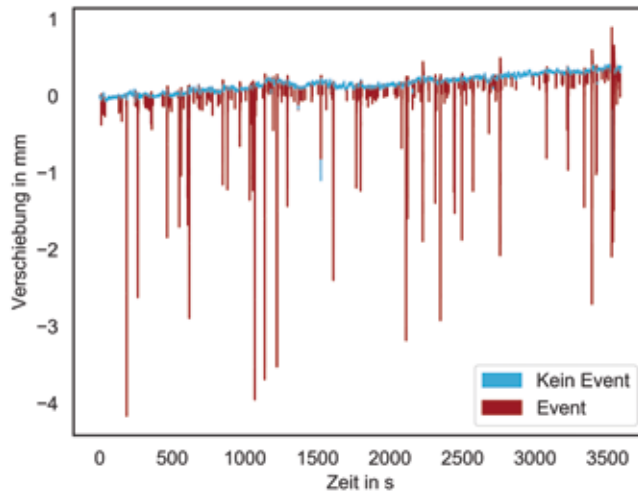
So zeigt Bild 15 beispielsweise eine für das maschinelle Lernverfahren unbekannte Zeitreihe der Verschiebung, extrahiert aus den GBR-Daten, und klassifiziert diese erfolgreich im Sinne Event bzw. kein Event mit einer Genauigkeit von 93,70 %. Diese Klassifikation ist unabhängig von potentiellen Datendrifts. Ein entscheidender Vorteil der datengetriebenen maschinellen Lernverfahren in dem Kontext ist, dass ein solches Verfahren mit nur wenig Rechenaufwand Events detektieren kann. Hierdurch lassen sich insbesondere zuverlässig, schnell und flexibel Start- und Endzeitpunkt eines Events bestimmen.

4.5 Erster Vergleich der aufgenommenen Sensordaten mit den Simulationsdaten

Im Kontext der Brückenüberwachung und im Hinblick auf das Ziel einer Brückenzustandsbewertung anhand des berührungslosen GBR-Messprinzips spielen die dynamischen Lasten auf der Brücke (Events) eine zentrale Rolle. Die Bilder 16 und 17 zeigen eine exemplarische Lkw-Überfahrt in der Verschiebungszeitreihe und der Dehnungszeitreihe. Die Verschiebungszeitreihe wird aus den GBR-Daten extrahiert. Durch Überfahrten verschiedener Fahrzeugtypen ergeben sich diverse Anregungen. Daher eröffnet sich zunächst die Möglichkeit, die aus den verschiedenen Sensordaten und den simulierten Daten gewonnenen Informationen über die Brücke zu vergleichen. So stimmen in Bezug auf die Eigenfrequenz die gemessenen und simulierten Daten sehr gut überein. Beispielsweise liegen die aus den simulierten Daten errechneten Parameter der Eigenfrequenz mit 3,86 Hz und der Dämpfung mit $D = 0,0163$ nahe den gemessenen Parametern.

5 Zusammenfassung und kurzer Ausblick

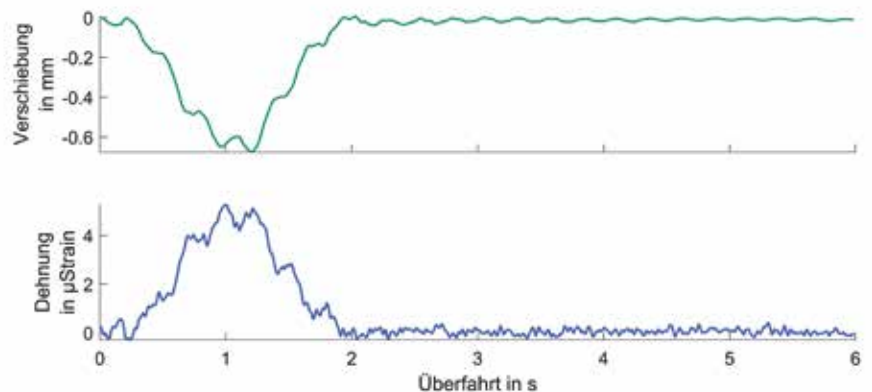
Das interdisziplinäre ZEBBRA-Forschungsprojekt entwickelt, vergleicht und validiert innovative Ansätze für ein sensorgestütztes SHM von Brücken, die komplementär zu deren regelmäßig stattfindender standardmäßiger manueller und handnaher Überprüfung Informationen über den baulichen Zustand und gegebenenfalls frühzeitig über dessen Verschlechterung liefern. Im Rahmen des Projektes wird dazu die berührungslose, bodenbasierte Radarinterferometrie als innovatives Messsystem erforscht und praktisch erprobt. Anhand der konventionellen Dehnungs- und Beschleunigungs-



15 Klassifizierte Zeitreihe mit »Drift« in den GBR-Daten für eine weitere Brücke, verändert [6] © ci-Tec GmbH

sensoren erfolgen ein Vergleich der Ergebnisse und die Validierung. Mit der mobilen GBR-Messung lässt sich die dynamische Antwort der Brücke auf Fahrzeugüberfahrten durch Berechnung der vertikalen Verschiebung analog zur konventionellen Sensorik untersuchen. Die Anwendung von Schwellwertverfahren und Verfahren der künstlichen Intelligenz ermöglicht die Auswertung der Sensordaten ohne brückenspezifische Vorverarbeitungsschritte. Zusätzlich liefert die detaillierte Simulation der Brücken inklul-

sive der Modellierung von Überfahrten mit einer breiten Auswahl an Fahrzeugtypen umfangreiche Daten. Diese können zum einen für den Vergleich mit den verschiedenen Sensordaten herangezogen und darüber hinaus durch gezielte Modellierung bestimmter Schädigungen auch Veränderungen der Sensordaten in Anwesenheit von Schädigungen untersucht werden. Der Nachweis des ZEBBRA-Monitoringsystems erfolgt an ausgewählten Brückenbauwerken, wie unter anderem an der vorgestellten Brücke in Mödlitz.



16 17 Visualisierung einer Lkw-Überfahrt in einer Verschiebungszeitreihe, extrahiert aus den GBR-Daten, und zum Vergleich die Überfahrt in einer Dehnungszeitreihe © Karlsruher Institut für Technologie

Zukünftig werden weitere umfangreiche Messungen an Brücken durchgeführt, um die Datenbasis zu verbreitern. Die einzelnen Verfahren wie Eventerkennung und maschinelle Klassifikation des Brückenzustands werden weiter ausgearbeitet und anhand der konventionellen Daten und der Simulation validiert. Ziel ist es, ein mobiles, berührungsloses und intelligentes Überwachungssystem zu realisieren, das es den späteren Anwendern erlaubt, schnell und umfassend eine Brückenanalyse vorzunehmen.

Autoren:

Dr. rer. nat. Sina Keller

M.Sc. Chris Michel

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dipl.-Ing. (FH) Oliver Schneider

Dr. Jacob Müller

Büro für Strukturmechanik GmbH

M.Sc. Matthias Arnold

ci-Tec GmbH

M.Sc. Andreas Döring

Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI)

Karlsruher Institut für Technologie

Dr. rer. nat. Mareike Hoyer

ci-Tec GmbH

Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr.-Ing. Hubert B. Keller

Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI)

Karlsruher Institut für Technologie

Referenzen

- [1] Berg M., Bombach L., Khunkham K., Merz F., Mucha V., Nagel L.-M., Nguyen R. V. K., Pauly M., Setzer J., Ullersperger T., Wilhelm F.: Wettlauf gegen den Verfall. 2016. URL: <http://www.welt.de/politik/interaktiv/bruecken-wettlauf-gegen-den-verfall.html>, zugegriffen am 3. Mai 2020.
- [2] https://www.sifo.de/files/Projektumriss_ZEBBRA.pdf, zugegriffen am 3. Mai 2020.
- [3] Müller, J.: Structural Optimization applying neural networks. Dissertation, 2013, Karlsruhe Institute of Technology.
- [4] Schneider, O.; Müller, J.; Tsai, J.: Brückentag! in: Sensor.Kosmos. Ausgabe 15, 2015.
- [5] Michel, C.; Keller, S.: Introducing a non-invasive monitoring approach for bridge infrastructure with ground-based interferometric radar; in: Proceedings der 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar, erscheint 2021.
- [6] Arnold, M.; Keller, S.: Detection and classification of bridge crossing events with ground-based interferometric radar data and machine learning approaches; in: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIV ISPRS Congress, Nice, France, 4-10 July 2021, Publikation erscheint 2020.
- [7] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2002), Ausgabe 2002, hrsg.v. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- [8] Uhlig, W.: Grundlagen für Lastannahmen zur Dimensionierung von Straßenbefestigungen. Dissertation, 2019, Technische Universität Dresden.

BPR

Dr. Schäpertöns Consult

SRP

Schneider + Partner

www.bpr-consult.com

www.srp-consult.de

polis Award 2018
mit Atelier Loidl

Foto: Leonard Grosch

