

Ein neues Verfahren zum MEMS-basierten Brückenmonitoring - Zielsetzung und Statusbericht

EVA KEMKES, M.Sc., DIPL.-ING. JÜRGEN RÜFFER, MOHAMMAD OMDALIZARANDI, M.Sc., DMITRI DIENER, M.Sc., DR. JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ & PROF. DR. INGO NEUMANN

Das Thema "Marode Brücken in Deutschland" gerät in (un-)regelmäßigem Abstand immer wieder in den Fokus der deutschen Nachrichten. Als grundlegende Ursache gilt die alternde Bausubstanz sowie der zunehmende Schwerlastverkehr, der bei dem Bau der meisten Brücken nicht einkalkuliert wurde. Mit steigender Aktualität und Dringlichkeit der Thematik nimmt die Bedeutung eines Geomonitorings zur Überwachung von Bewegungen und Deformationen weiter zu. Neben den meist sehr kostenintensiven geodätischen Sensoren wie beispielsweise einem Tachymeter bilden auch sogenannte Low-Cost-Sensoren eine Möglichkeit, Brückenbauwerke zu überwachen. In einem von der ZIM-Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt wird sich dieser Thematik gewidmet. Ziel ist es, mikroelektromechanische Systeme (MEMS) für die Detektion von schädigungsrelevanten Bauwerksparametern auf ihre Tauglichkeit dafür zu prüfen und diese wenn möglich einzusetzen. Angefangen bei der Entwicklung von Sensoren mit einem MEMS-Beschleunigungssensor als Kernstück, über Kalibrierungen und Testmessungen unter Laborbedingungen bis hin zu Messungen an einem realen Brückenbauwerk, wurde ein Mess- und Auswerteverfahren entwickelt und validiert. Derzeit wird es Schritt für Schritt verbessert.

Schlüsselwörter – MEMS, Beschleunigungssensoren, Brückenmonitoring, Low-Cost

1. Motivation

Seit mehr als 10 Jahren bekommen die vorwiegend an Straßenbrücken aus den 60er und 70er Jahren zunehmend festgestellten Schäden in der medialen Öffentlichkeit eine immer größere Aufmerksamkeit. Beginnend mit dem Einsturz des Kölner Stadtarchivs vor nunmehr 10 Jahren beschäftigten sich die Autoren mit dem Geomonitoring von Bauwerken und natürlichen Strukturen. Insbesondere das Monitoring von Brücken mit unterschiedlichen Aufgabenstellungen und ebenso unterschiedlichen Methoden geriet dabei in den Fokus der Aufmerksamkeit. Diese Methoden waren zuerst meist geodätischer Natur, zunehmend gewinnen Fragestellungen interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Geodäten, Bauingenieuren und Geotechnikern größere Bedeutung. In den zitierten 10 Jahren Erfahrung im Umgang mit dem Brückenmonitoring haben die Autoren und vermutlich einige andere sehr unterschiedliche Erfahrungen gemacht. War anfangs insbesondere die Skepsis gegenüber einem permanenten Monitoring mit geodätischen Instrumenten und Verfahren besonders groß, so erhielt diese Methodik eine zunehmende Reputation durch positive Praxisbeispiele an ausgesuchten Brücken und anderen Bauwerken wie beispielsweise Schleusen. Die überzeugend demonstrierten geodätischen Verfahren führten bald zum Einsatz dieser Technik bei umfangreichen Sanierungsmaßnahmen an Brücken im Bestand, insbesondere um eine frühzeitige Stilllegung zu verhindern und im laufenden Betrieb eine ausreichend Sicherheit für Menschen und das Bauwerk selbst zu gewährleisten. Im Zusammenspiel

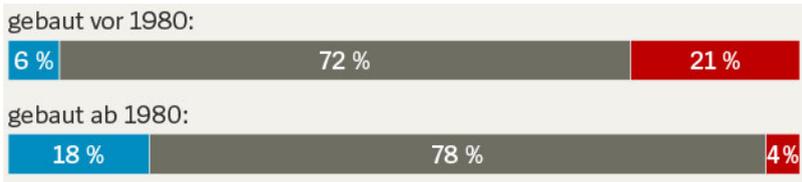


Abbildung 1: Anteil der Brückenflächen in gutem (blau), mittlerem (grau) und schlechtem (rot) Zustand in Abhängigkeit des Baujahres (PAUL UND STOTZ 2018).

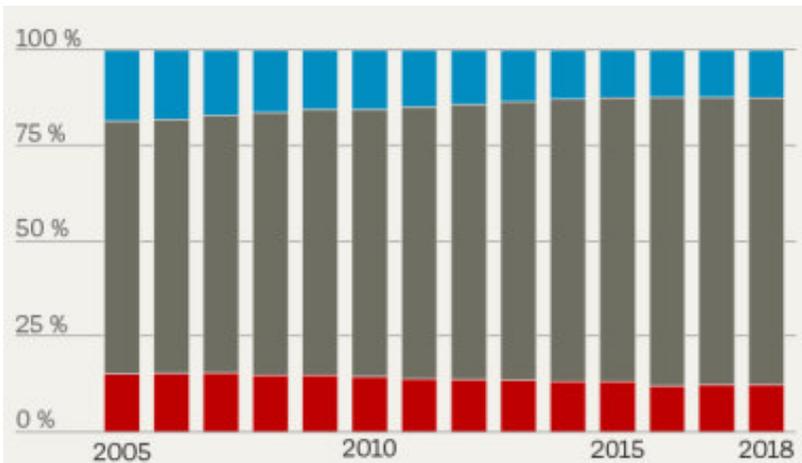


Abbildung 2: Anteil der Brückenflächen in gutem (blau), mittlerem (grau) und schlechtem (rot) Zustand (PAUL UND STOTZ 2018).

mit geotechnischen Monitoringverfahren führt dies zu unbestreitbaren wirtschaftlichen Vorteilen für die Betreiber und für die Gesellschaft.

Allerdings sahen sich nun die Infrastrukturbetreiber, insbesondere die Straßenbauverwaltungen in Deutschland, bald der Aufforderung nach einem massiven Ausbau des Geomonitorings von Brücken ausgesetzt und zwar nicht nur im Rahmen umfangreicher Sanierungsmaßnahmen, sondern auch für die präventive Überwachung von Brücken mit Zustandsnoten > 3 lt. DIN 1076. Insbesondere ist ein hoher Prozentsatz von 21 % aller Brücken betroffen, die vor 1980 gebaut wurden (siehe Abbildung 1). Dabei nimmt vorerst der Anteil an Brücken in gutem Zustand rapide ab, wie Statistiken der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zeigen, ohne dass bisher der Anteil an Brücken in schlechtem Zustand in gleicher Weise rapide zunimmt (siehe Abbildung 2) (PAUL UND STOTZ 2018).

Insbesondere die hohen Anfangsinvestitionen beim Dauereinsatz geodätischer Methoden ließen das anfängliche Interesse der Betreiber erheblich sinken, schien doch ein dauerhaftes Monitoring maroder, stark geschädigter oder gefährdeter Brücken wirtschaftlich nicht vertretbar. Und solange nichts Gravierendes passierte, schien die vorhandene Methodik zur Brückenüberwachung doch ausreichend und insbesondere ökonomisch vertretbar zu sein.

“Der Einsturz einer viel befahrenen Autobahnbrücke in Genua ist das schwerste Brückeneunglück in Europa in den vergangenen 15 Jahren“. So titelte der Spiegel am 16. August 2018 (RÖMER 2018). Da war die Angst vor unvorstellbaren Katastrophen durch den zum Teil schlechten Zustand unserer Brücken wieder im Bewusstsein der Autofahrer und das auch auf den deutschen Straßen. So schreibt der Spiegel noch am selben Tag: “Wie stabil sind hiesige Brücken und wie wahrscheinlich ist ein Einsturz? Die Instrumente der Inspekture sind erstaunlich schlicht.“ (KRÖGER 2018).

Aber es muss nicht ein dramatischer Brückeneinsturz wie in Genua vorliegen, um die Brisanz maroder Brückeninfrastruktur zu verdeutlichen. Man betrachte die Leverkusener Rheinbrücke, deren Teilspernung für den Lkw-Verkehr bis hin zu temporären Vollsperrungen zu massiven Verkehrsbeeinträchtigungen und großen Schäden für die Volkswirtschaft führt. Auch im verkehrstechnisch weniger betroffenen Hannover sind die Auswirkungen seit einigen Jahren zunehmend zu spüren, ob auf dem vielbefahrenen Südschnellweg oder anderen großen Aus- und Einfallstraßen wie zum Beispiel der Mittellandkanalbrücke der B65 in Anderten, bei der die Verstärkungsmaßnahmen Ende November 2018 abgeschlossen wurden (NLSTBV 2018).

Die zunehmende Zahl kritischer Brückenbauwerke bei gleichzeitigem Sanierungsstau und fehlenden erfahrenen Experten für die Prüfung und Beurteilung der Brücken legt die Frage nahe, ob es nicht wirkungsvolle und günstige Methoden gibt, die eine Sichtprüfung oder ein präzises geodätisches Monitoring von Brücken erst dann einleitet, wenn verifizierbare Hinweise durch wirksame und kostengünstige Monitoringverfahren vorliegen. Dann könnte die gezielte und detaillierte Überprüfung und Überwachung als kritisch eingestufte Bauwerke nach Bedarf initiiert werden.

Die Autoren dieses Beitrages, die zum einen Praktiker in der kommerziellen Anwendung von GeomonitoringVerfahren (ALLSAT GmbH) und zum anderen Forscher der Leibniz Universität Hannover (LUH) (Geodätisches Institut Hannover (GIH)) mit Unterstützung des Instituts für Massivbau (IfMa) sind, haben sich im Rahmen eines interdisziplinären F+E-Kooperationsprojekts mit dem Titel *Raumzeitliches Monitoring von Brückenbauwerken mittels Low-Cost-Sensorik* dieser Zielsetzung gewidmet. Das Projekt wird gefördert in der ZIM-Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und wissenschaftlich unterstützt und begleitet durch die BAST sowie durch die Bundesanstalt für Materialwesen (BAM). Hierbei kommt insbesondere der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Geodäten und Bauingenieuren besondere Bedeutung zu. Ziel der Autoren ist der autarke Einsatz einer größeren Zahl kostengünstiger und redundant angeordneter Sensoren (hier: MEMS-Technik aus der Automobilindustrie) und die intelligente und kontinuierliche Auswertung von permanent an potentiell kritischen Brückenbauwerken gewonnener Daten mittels Frequenzanalyse-Verfahren.

Natürlich müssen diese Sensoren – anders als beim BAST-Projekt *Intelligente Brücke*, bei dem verschiedenste Sensoren direkt beim Bau einer Brücke im Brückenkörper verbaut wurden, ohne großen Aufwand nachträglich an einer Brücke installiert werden können. Mit den Sensoren und im Rahmen des Projektes sollen folgende Teilziele erreicht werden:

- Frühe und rechtzeitige Detektion von Variationen der für den Bauwerkszustand relevanten charakteristischen Kenngrößen (z.B. Eigenfrequenzen und -formen)
- Permanente Kontrolle und Langzeitaussagen für Bauwerksdeformationen
- Zuordnung von Deformationen zu den relevanten Einflussgrößen auf die Bauwerksdeformation.

2. Konzeptbeschreibung

Das bereits umgesetzte Messsystem basiert auf der Verwendung von kostengünstigen dreiachsigen MEMS-Beschleunigungssensoren, mit denen schadensrelevante Parameter von Brückenbauwerken aufgenommen bzw. abgeleitet werden können. Das Konzept beinhaltet die Messung von Beschleunigungswerten an markanten Punkten, die durch interdisziplinäre Arbeiten mit Statikern im Vorfeld ermittelt werden müssen. Da die Sensoren die Möglichkeit bieten, die Beschleunigungen in drei Achsen zu

detektieren, wird so die notwendige Sensoranzahl zur Überwachung eines Brückenbauwerks verringert. Die maximale Abtastrate wird auf 100 Hz festgesetzt. Aufgrund der angenommenen maximalen Eigenfrequenzen von 40 Hz werden die Schwingungen unter Berücksichtigung des Nyquist-Theorems abgetastet.

Das System besteht aus einem Masterknoten und bislang 3 Messknoten, auch als Slaves bezeichnet. Die Sensoren kommunizieren zur Zeit via Kabel, wodurch der Master den Messablauf aller Sensoren starten kann. Die Messdaten werden sensorintern in Blöcken gespeichert. Jeder Speicherblock hat einen durch den Master übermittelten Zeitstempel, welcher durch eine kostengünstige GNSS-Antenne zur Verfügung gestellt wird. Sowohl die Slaves als auch der Master beinhalten einen Beschleunigungssensor der Baureihe Bosch BNO055 (vgl. Datenblatt des Herstellers für Details BOSCH (2016)) sowie eine Steuerungs-/Speichereinheit. Die Komponenten sind in ein Aluminiumgehäuse eingebaut, welches durch einen geeigneten Aufbau die Elektronik vor Feuchtigkeit schützt.

Die Schwingungsparameter werden im Post-Processing berechnet, sodass zum aktuellen Stand des Projektes keine Echtzeitdiagnose zur Verfügung steht. Bei Überschreitung von definierten Grenzwerten soll ein Alarmsystem integriert werden, sodass ein definierter Personenkreis über die ermittelten Bewegungen informiert wird.

2.1. Sensorauswahl und Voruntersuchungen

Wie alle technischen Bauteile ist auch die MEMS-Sensorik nicht frei von elektronischen Unsicherheitseinflüssen und Einwirkungen von atmosphärischen Parametern. Die Auswahl eines geeigneten Beschleunigungssensors wurde mithilfe eines erstellten Anforderungsprofils getroffen, wobei es galt die Herstellerangaben einzelner Sensoren zu validieren. Hierbei wurden neben Unsicherheitseinflüssen, wie die Skalierungsfaktoren, das Messrauschen und die Nichtlinearität, auch Sensorparameter wie der Messbereich und die Abtastrate berücksichtigt. Der Kaufpreis des Sensors wurde ebenfalls in das Anforderungsprofil aufgenommen, um ein kostengünstiges Sensorsystem anbieten zu können. Bei Projektbeginn wurden zum Teil verschiedene Beschleunigungssensoren als auch Sensoren desselben Typs in Kombination mit unterschiedlichen Microcontrollerboards getestet. Nach der Durchführung und Bewertung von Messungen von Objekten im statischen und bewegten Zustand sowie Messungen unter Temperatureinfluss wurde der Beschleunigungssensor BNO055 von Bosch als geeigneter Sensor bewertet. Mit diesem wurden die genannten Untersuchungen vertieft durchgeführt, um die genauen Sensorcharakteristiken zu bestimmen.

Bereits die Voruntersuchungen zeigten einen deutlichen Einfluss des untersuchten Temperaturbereichs, weshalb Messungen mit Temperatur- und Luftfeuchtesensoren innerhalb und außerhalb des Sensorgehäuses durchgeführt wurden, um die Relevanz weiterer Untersuchungen einordnen zu können. Die Auswertung zeigte, dass die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse trotz variabler Außenluftfeuchtigkeit konstant gehalten wird, wohingegen sich die Temperatur innerhalb des Gehäuses der Außentemperatur anpasst. Von weiteren Untersuchungen des Luftfeuchteinflusses wurde daher abgesehen.

Die Temperatur beeinflusst nicht nur die Rohdaten, sondern auch die Kalibrierungsparameter, mit denen die Rohdaten korrigiert werden. Um diesen Einfluss definieren zu können, wurden Variationsrechnungen durchgeführt, bei denen die Schwingungsparameter mit dem Zweifachen der Kalibrierungsparameter berechnet wurden. Die Auswirkungen auf die Frequenz sind nahezu nicht existent ($< 0,01$ mHz), auch die Verschiebungsdifferenzen liegen im Mikrometerbereich. Folglich kann zukünftig von einer Kalibrierung bei unterschiedlichen Temperaturen abgesehen werden.

Ein wichtiger Bestandteil ist die Beobachtung von kontrollierten und reproduzierbaren Schwingungen, die mit einem Shakersystem (Abbildung 3) hochgenau erzeugt werden können. Diese Messungen dienen nicht nur der Überprüfung der Auswertansätze zur Berechnung der Frequenzen und Amplituden sowie der Genauigkeit der Parameter im Vergleich zu einem Referenzsystem, sondern können auch als Validierungssystem der Zeitsynchronisation der Sensoren untereinander verwendet werden. Zur Überprüfung der Zeitsynchronisation wurden die Sensoren je nach Versuchsaufbau und zur Verfügung

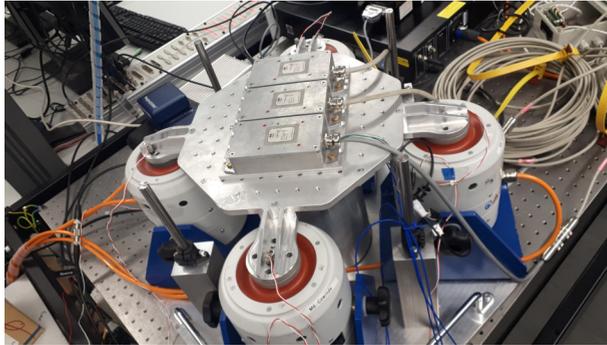


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Überprüfung der gegenseitigen Zeitsynchronisation der drei Messknoten.

stehender Vorrichtung entweder übereinander oder nebeneinander befestigt. Bei diesen Versuchen wurden Differenzen in der Zeitsynchronisation von weniger als 0,05 s festgestellt.

2.2. Eignung der Sensoren zur Detektion von Bauwerksschädigungen

Durch Analysen der Messdaten und einer anschließenden fachlichen Diskussion mit dem IfMa wurde erarbeitet, dass insbesondere die Schwingungsparameter (Frequenzen und Amplituden) von besonderem Interesse für die Beurteilung des Zustandes einer Brücke sind.

Für die Validierung der Messgenauigkeit der MEMS-Sensoren und der Erfassungsgenauigkeit von sinusförmigen Schwingungen wurden die Sensoren mithilfe eines hochgenauen Shakersystems des Instituts für Dynamik und Schwingungen (IDS) der LUH in Schwingungen versetzt (Abbildung 3). Es wurden Messungen bei den Frequenzen von 5 Hz, 10 Hz sowie 20 Hz durchgeführt. Das Shakersystem wurde mit einem Referenzbeschleunigungssensors des IDS mit einer Abtastrate von 1024 Hz während der durchgeführten Messungen überprüft. Die Daten wurden für eine Dauer von 5 min aufgenommen und das Experiment wiederholt durchgeführt. Mit den MEMS-Sensoren wurden die Schwingfrequenzen mit einer Differenz von 0,003 Hz bis zu 0,01 Hz in Bezug auf das Referenzsystem ermittelt. Die Abweichungen zur Sollfrequenz steigen wie erwartet mit höheren Frequenzen.

2.3. Ableitung von Frequenzen und Amplituden aus Beschleunigungsdaten

Die Identifikation/Detektion von Veränderungen des globalen dynamischen Verhaltens von Bauwerken, wie Eigenfrequenz und Eigenformen sowie Dämpfung, erfordert ein entsprechend passendes funktionales Modell. Typischerweise findet hier die diskrete Fourier Transformation (DFT) zur Bestimmung von Frequenzen und Amplituden Anwendung. Die DFT basiert auf dem funktionalen Modell einer ungedämpften Fourierreihe.

Da die Messungen von low-cost Sensoren typischerweise einen deutlichen Anteil von farbigem Messrauschen aufweisen, ist die Anwendung der DFT eine Herausforderung. Dieser begegnen Omidalizarandi et al. (2018) mit einer robusten Schätzung der Frequenzen und Amplituden in einem linearen Regressionsmodell basierend auf einer Summe von Sinuskurven (harmonischen Schwingung) und einem autoregressiven (AR) Modell von farbigem Rauschen. Die Lösung erfolgt mit Hilfe eines generalisierten Generalized-Expectation-Maximization (GEM)-Algorithmus. Auf der einen Seite ist das deterministische Modell nicht umfassend zur Charakterisierung des Dämpfungsverhältniskoeffizienten von oszillierenden Bauwerksstrukturen geeignet. Auf der anderen Seite sind die geschätzten

Amplituden möglicherweise durch die Dämpfungscharakteristik der Bauwerksstruktur beeinflusst. Aus diesem Grund wird das deterministische Modell zu einer gedämpften harmonischen Schwingung nach AMEZQUITA-SANCHEZ UND ADELI (2015) erweitert, sodass eine Schätzung der Frequenzen, Amplituden und Dämpfungsverhältniskoeffizienten möglich ist.

Die gegebenen Beschleunigungsmessungen ℓ_1, \dots, ℓ_n werden durch eine gedämpfte harmonische Schwingung für den Zeitpunkt (x_t) modelliert. Dieser entspricht einem Ausschnitt der Zeitreihe der Beschleunigungen:

$$\ell_t = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^M [a_j \cos(2\pi f_j \sqrt{1 - \xi_j^2} x_t) + b_j \sin(2\pi f_j \sqrt{1 - \xi_j^2} x_t)] \times \exp(-2\pi \xi_j f_j x_t) + e_t. \quad (1)$$

In Gleichung 1 sind die unbekannt Parameter die Koeffizienten a_0, a_1, \dots, a_M , und b_1, \dots, b_M , die ungedämpften Frequenzen f_1, \dots, f_M , sowie die Dämpfungsverhältniskoeffizienten ξ_1, \dots, ξ_M . Die gedämpften Frequenzen berechnen sich nach $f_{jd} = f_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$. Es ist zu beachten, dass für jeden Ausschnitt der Zeitreihe, die Beschleunigungsmessungen um ihren jeweiligen Mittelwert reduziert werden.

Zur Berücksichtigung des hohen farbigen Rauschens in den Beschleunigungsmessungen wird angenommen, dass die zufälligen Abweichungen (e_t) durch einen Kovarianz-stationären AR Prozess autokorreliert sind:

$$e_t = \alpha_1 e_{t-1} + \dots + \alpha_p e_{t-p} + u_t. \quad (2)$$

In Gleichung 2 werden die Koeffizienten $\alpha^T = [\alpha_1, \dots, \alpha_p]$ ebenfalls als Unbekannte betrachtet. Da zahlreiche Ausreißer unterschiedlicher Größenordnung in den Daten erwartet werden, wird angenommen, dass die Komponente des weißen Rauschens u_1, \dots, u_n der zentrierten, skalierten t-Verteilung $t_\nu(0, \sigma^2)$, mit einem unbekanntem Freiheitsgrad und unbekanntem Skalierungsfaktor σ^2 , unabhängig folgt.

Zur Schätzung der Modellparameter mit dem GEM-Algorithmus sollte die Anzahl der Fourier Frequenzen M sowie die Modellordnung des AR Prozesses p vorab festgelegt werden. Hierzu werden Näherungswerte $f_1^{(0)}, \dots, f_M^{(0)}$ für die unbekannt Fourier Frequenzen aus den maximalen Amplituden einer DFT der Beschleunigungsdaten bestimmt.

3. Feldversuch: Mensa-Brücke an der LUH

Nach einer eingehenden Testphase der MEMS-Sensoren in unterschiedlichsten Laborumgebungen ist das System unter Normalbedingungen an einem realen Objekt getestet worden. Das ausgewählte Objekt sollte für den ersten Feldversuch sowohl eine gute Erreichbarkeit vorweisen als auch den Installationsaufwand möglichst gering halten, um notwendige Anpassungen zügig vornehmen zu können. Für die Validierung der Messwerte wurde im Vorfeld eine Eigenfrequenzuntersuchung mithilfe von mathematischen Modellen und vorliegenden Bauzeichnungen durch das IfMa durchgeführt. Weiterhin wurden bei der Messdurchführung auch Referenzsensoren des IfMa und des GIH verwendet. Der Messaufbau der MEMS-Sensoren als auch der Referenzsensoren wird in Kapitel 3.2. beschrieben.

3.1. Vorstellung des Messobjektes

Das Testobjekt ist eine Fußgängerbrücke, welche den Welfengarten im Osten mit dem 1. Obergeschoss der Hauptmensa der LUH im Westen verbindet (Abbildung 4). Die Brücke überführt die Straße Schneiderberg sowie einen Fußgänger- und Fahrradweg je Straßenseite. Das Bauwerk gehört zu der Kategorie der einfeldrigen Stahlbrücken und weist eine Länge von 27,051 m sowie eine Gesamtbreite von 2,72 m auf. Die westliche Seite (Hauptmensa) verbreitert sich auf 5,806 m. Die Höhe beträgt im Scheitelpunkt 4,63 m. Die 2 Breitflanschträger (IPBL) sowie das 10 mm dicke Deckblech



Abbildung 4: Brückenbauwerk des Feldversuches - die Mensa-Brücke an der LUH (Foto: von Gösseln).

sind mit Querträgern verschweißt, welche der Versteifung der Hauptträger dienen. Das Deckblech ist mit einer 40 mm dicken Gussasphaltschicht überzogen. Die Fußgängerbrücke ist mit acht Rohrbögen überspannt, die jeweils eine Lampe tragen (VON DER HAAR 2017).

Durch Analysen mittels Finite-Elemente-Modellen (FEM) konnten im Vorfeld die Eigenfrequenzen und -formen der Brücke analysiert werden. Es ergaben sich signifikante Frequenzen für eine Längsschwingung f_L , drei vertikale Biegeeigenformen f_B und zwei räumliche Torsionsmoden f_T . Da die Untersuchung auf mathematischen Modellen und nicht auf Messwerten basiert, können die berechneten Frequenzen und Eigenformen nur für eine genäherte Beschreibung des Schwingungsverhaltens genutzt werden. Abbildung 5 zeigt die Eigenformen der fünf Frequenzen in vertikaler Richtung. Hieraus ergeben sich auch unmittelbar die drei Achsen für Positionierung der Sensoren zur Beobachtung der Frequenzen bzw. Amplituden.

3.2. Instrumentierung und Durchführung

Es wurden zwei Versuche an dem beschriebenen Brückenbauwerk durchgeführt. Hierbei wurde sowohl die Anregung als auch die Art der Referenzsensorik variiert. Abbildung 6 zeigt die Sensorposition im Schnitt (oben) und in der Draufsicht (unten) für beide Versuche.

Im 1. Versuch wurden hochwertige Beschleunigungssensoren des Herstellers PCB (Typ 393A03) (im folgenden Referenzsensoren) des IfMa neben den MEMS-Sensoren eingesetzt. Die Messfrequenz betrug 2000 Hz. Ziel des 1. Versuchs war, die Ergebnisse der MEMS-Sensoren (Messfrequenz 100 Hz)

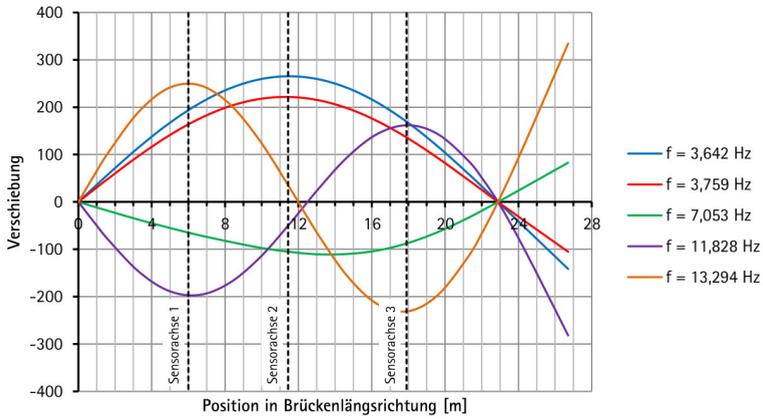


Abbildung 5: Verschiebung der Eigenformen in vertikaler Richtung sowie Sensorachsen zur Beobachtung der Frequenzen und Amplituden (VON DER HAAR 2017).

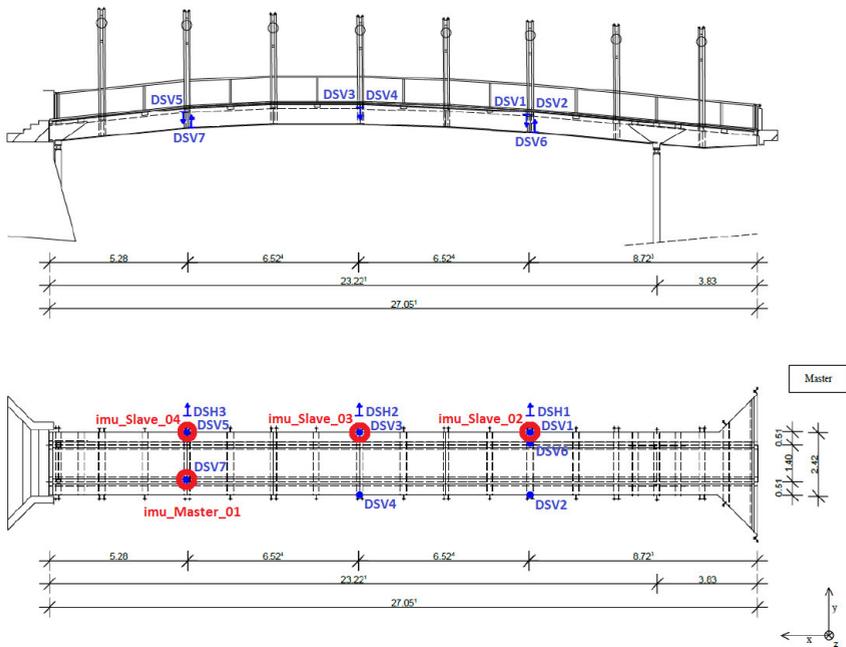


Abbildung 6: Übersicht der Sensorpositionen: In rot die MEMS-Sensoren und in blau die Referenzsensoren des IfMa (nur beim 1. Versuch) (HERRMANN 2018).

mit Ergebnissen der Referenzsensoren zu vergleichen. Die Anregung der Brückenstruktur erfolgte mit einem Modalhammer. Weitere Belastung durch Personen war im ausgewerteten Versuchszeitraum nicht gegeben. Zur Identifikation und Untersuchung aller vertikalen Modellformen der Brückenstruktur wurden drei Referenzsensoren, vgl. Abbildung 6 DSV1, DSV3 und DSV5, in unmittelbarer Nähe zu den MEMS-Sensoren 02, 03 und 04 installiert.

Im 2. Versuch war das Ziel, eine Vibrationsanalyse unter unterschiedlichen Belastungsszenarien durchzuführen. Im Rahmen der Analyse sollte der Einfluss der unterschiedlichen Belastung auf die Eigenfrequenzen, deren Amplituden sowie Modellformen untersucht werden. Die unterschiedlichen Belastungsszenarien ergaben sich durch eine variierende Anzahl von Personen bei der Überquerung der Brücke. Die MEMS-Sensoren sind in den identischen Positionen des 1. Versuchs am Bauwerk appliziert. Die Auswertung der Messdaten des zweiten Versuches wird derzeit vervollständigt.

3.3. Ergebnisse des 1. Versuchs und Potential

Die Analyse der Eigenfrequenzen basiert auf den geschätzten Amplituden, Frequenzen und Phasenverschiebungen. Hierzu werden die Daten aller MEMS-Sensoren bzw. aller Referenzsensoren nach der in Abschnitt 2.3. vorgestellten Methodik ausgewertet. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse für die MEMS-Sensoren. Abbildung 8 zeigt zum Vergleich die Ergebnisse für die Referenzsensoren. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf den rot markierten Ausschnitt von 50 s aus Zeitreihen der Beschleunigungsdaten der MEMS- und Referenzsensoren.

Die geschätzten Amplituden haben immer ein positives Vorzeichen, so dass das entsprechende Vorzeichen aus der geschätzten Phasenverschiebung abgeleitet wird. Am Beispiel der Frequenz von 13,79 Hz in Abbildung 8 zeigt sich, dass die geschätzte Phasenverschiebung für die Daten der Sensoren DSV1 und DSV5 oberhalb von 180° liegt, sodass sich das Vorzeichen der Amplitude entsprechend ändert.

Der Vergleich der abgeleitete Eigenformen aus den Daten der MEMS-Sensoren (Abbildung 7) und den Daten der Referenzsensoren (Abbildung 8) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Für die Frequenzen mit geringen Amplituden liegt diese in der Größenordnung der Unsicherheit der MEMS-Sensordaten. Hier erfolgt keine optimale Schätzung der Phasenverschiebung. Für die Frequenz 3,67 Hz und für den MEMS-Sensor 03 in der Mitte der Brücke zeigen sich signifikante Differenzen zwischen den geschätzten Amplituden der MEMS- und der Referenzsensoren. Diese können auf eine Überlagerung mit höheren Frequenzen im Bereich von 100 Hz bis 200 Hz, hervorgerufen durch den Impuls des Modalhammers, zurückzuführen sein. Frequenzen dieser Größenordnung sind mit den MEMS-Sensoren bei einer Messfrequenz von 100 Hz aufgrund der Nichteinhaltung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems nicht detektierbar, für die infrage kommenden Brücken allerdings auch nicht relevant.

4. Ausblick und nächste Schritte

Die ausgewerteten Beobachtungen der 3D-Beschleunigungssensoren bestätigen den Grundgedanken des Projektes, dass die relevanten Frequenzen und Amplituden einer Stahlbetonbrücke mit kostengünstiger MEMS-Sensorik ermittelt werden können. Im weiteren Verlauf des Projektes und auch über die Förderung hinaus ist es das Ziel, die Installation an weiteren Teststrukturen sowie an realen Brücken durchzuführen. Mit dem Abschluss des geförderten Forschungsprojekts beginnt im Frühjahr 2019 die Phase der Vorbereitung der Vermarktung des beschriebenen Mess- und Auswertverfahrens.

Für die weitergehende Validierung von Messdaten und vor allem für die Überprüfung der Sensortauglichkeit bei der Detektion von Schäden bzw. Veränderungen am Bauwerk ist eine Zusammenarbeit mit der BAM in konkreter Planung und mit der BAST in Vorbereitung. Die bei der BAM zur Verfügung stehende Teststruktur kann mit verschiedenen Lasten strapaziert werden und auch die Vorspannung ist variabel. Für das erste Quartal 2019 sind zwei Messeinsätze mit veränderten Lasten sowie Vorspannungen vorgesehen. Sowohl von der BAM als auch vom GIH bereitgestellte Systeme sollen hier

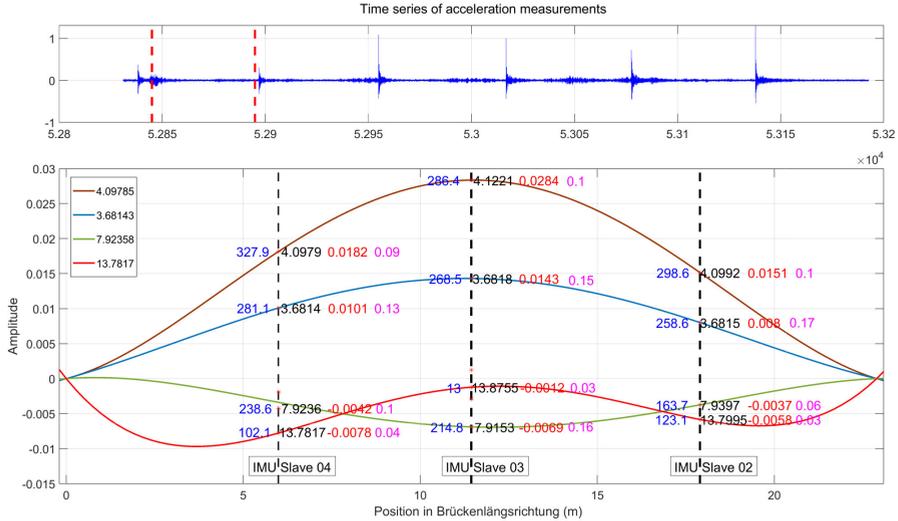


Abbildung 7: MEMS-Sensoren: Zeitreihe der Beschleunigungsdaten (oben) mit dem analysierten Ausschnitt von 50 s zwischen den vertikalen roten Linien. Eigenformen mit den geschätzten Parametern (unten): Phasenverschiebung (blau), Frequenzen (schwarz), Amplituden [m/s^2] (rot) und analysierten Dämpfungsverhältniskoeffizienten (magenta).

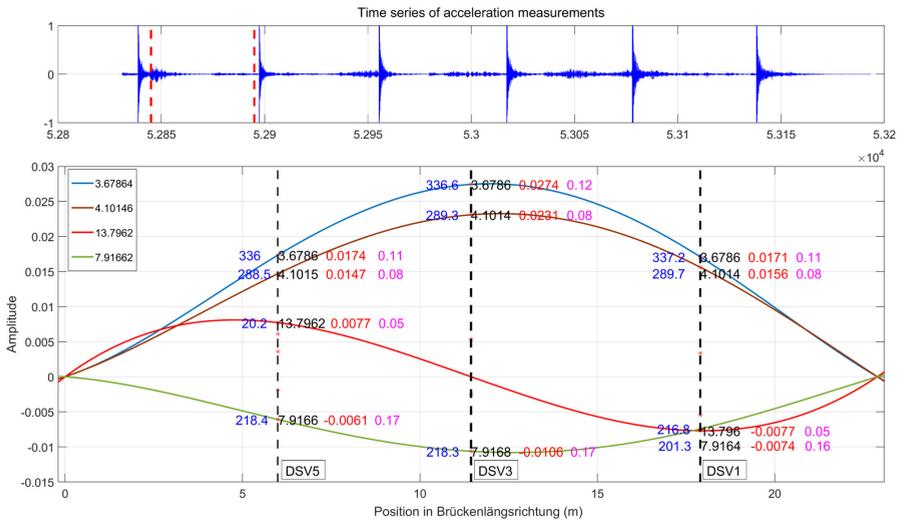


Abbildung 8: Referenz-Sensoren: Zeitreihe der Beschleunigungsdaten (oben) mit dem analysierten Ausschnitt von 50 s zwischen den vertikalen roten Linien. Eigenformen mit den geschätzten Parametern (unten): Phasenverschiebung (blau), Frequenzen (schwarz), Amplituden [m/s^2] (rot) und analysierten Dämpfungsverhältniskoeffizienten (magenta).

als Referenzsysteme genutzt werden. Das Ziel ist es auch hier, die Schwingungsparameter unter kontrollierten Bedingungen zu ermitteln. Schon für den zweiten Messeinsatz bei der BAM sollen zwei weitere Sensoren produziert und genutzt werden.

Als nächster Schritt steht die Beobachtung an einer durch die Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr (NLStbV) bereitgestellte Brücke auf dem Plan der Autoren, um eine praxistaugliche Anordnung zu definieren und sowohl die Sensoren als auch die Auswertung für den kommerziellen Einsatz von erfahrenen Experten dieser Verwaltung sowie von der BAST beurteilen zu lassen. Bereits in dieser Phase wird die Messdatenauswertung hin zu einer vollautomatisierten und webbasierten Bereitstellung verfeinert und ausgehend von den Prototyp-Sensoren werden die Sensoren der ersten Generation gefertigt und für den Einsatz bereitgestellt.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten des Kooperationsprojektes "Raum-zeitliches Monitoring von Brückenbauwerken mittels Low-Cost-Sensorik" wurden von der ZIM-Initiative (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen ZF4081-803DB6 gefördert.

Weiterhin möchten wir uns bei dem Institut für Massivbau (IfMa) sowie dem Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) der Leibniz Universität Hannover für die Unterstützung und Bereitstellung von Referenzsystemen bedanken.

Der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) sprechen wir unseren Dank für die Möglichkeit sowie die Mithilfe bei der Durchführung der Messungen an der Teststruktur aus.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Literatur

- AMEZQUITA-SANCHEZ, J. P., & ADELI, H. (2015): A new music-empirical wavelet transform methodology for time-frequency analysis of noisy nonlinear and non-stationary signals. *Digital Signal Processing*, 45, pp. 55–68.
- BOSCH (2016): Data sheet BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor. Document revision 1.4. https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BN0055-DS000.pdf am 10.01.2019.
- HERRMANN, R. (2018): Dataset, Reference Vibration Measurement of Mensa Bridge Hannover. <https://doi.org/10.25835/0081614> am 07.11.2018.
- KRÖGER, M. (2018): Sicherheit - So werden in Deutschland Brücken getestet. Spiegel Online (16.08.2018). <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/genua-wie-ingenieure-in-deutschland-fuer-die-sicherheit-von-bruecken-sorgen-a-1223347.html> am 11.01.2019.

NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBEHÖRDE FÜR STRASSENBAU UND VERKEHR (2018): B65/K62: Verstärkung der Mittellandkanal-Brücke bei Hannover-Anderten.

<https://www.strassenbau.niedersachsen.de/projekte/bundesstrassen/b-65-k-62-verstaerkung-der-mittellandkanal-bruecken-bei-hannover-anderten-155080.html> am 09.01.2019.

OMIDALIZARANDI, M., KARGOLL, B., PAFFENHOLZ, J.-A., & NEUMANN, I. (2018): Accurate vision-based displacement and vibration analysis of bridge structures by means of an image-assisted total station. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6), 1687814018780052. <https://doi.org/10.1177/1687814018780052> am 08.01.2019.

PAULY, M., STOTZ, P. (2018): Autobahnen und Bundesstraßen - In diesem Zustand sind Deutschlands Brücken. *Spiegel Online* (18.07.2018). <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/deutschland-so-ist-es-um-die-bruecken-bestellt-a-1215558.html> am 11.01.2019.

RÖMER, J. (2018): Sensortechnik - Diese Brücken melden sich bei Problemen. *Spiegel Online* (16.08.2018). <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/intelligente-bruecke-meldet-probleme-von-selbst-a-1223185.html> am 11.01.2019.

VON DER HAAR, C. (2017): Eigenfrequenzuntersuchungen an der Fußgängerbrücke am Schneiderberg. Bericht Nr. 1721 vom 20.09.2017. Leibniz Universität Hannover - Institut für Massivbau.