



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau www.massivbau.tu-dresden.de



30. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

**PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN**

9./10. MÄRZ 2020

© 2020 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Angela Heller

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Fehmarnsundbrücke, Zeichnung von Gerd Lohmer
Broschüre Rotary und die Kunst / Gerd Lohmer
(aus dem Privatarchiv von Bettina Lohmer)

Druck: addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-625-1



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

Tagungsband

30. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

TUDIAS GmbH

9. und 10. März 2020

Inhalt

Grußwort des Rektors	9
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen</i>	
Entwicklung des Instituts für Massivbau – Lehre und Forschung im Brückenbau an der TU Dresden	13
<i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Die neue Erhaltungsstrategie des Bundes – Planung und Bau von Brücken auf den Hauptverkehrsrouten	27
<i>MR Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn</i>	
Brücken aus bewehrtem UHPC (Stahl-UHFB)	33
<i>Prof. Dr. Eugen Brühwiler, dipl. Ing. ETH/SIA, IABSE</i>	
Nutzung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) im ASTRA – Rückblicke und Perspektiven	47
<i>Stéphane Cuennet, Guido Biaggio</i>	
Neufassung der Nachrechnungsrichtlinie für Massivbrücken	57
<i>Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger, Viviane Adam M.Sc., Dr.-Ing. Frederik Teworte, Dr.-Ing. Naceur Kerkeni</i>	
Historische Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz	71
<i>Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, Dipl.-Ing. Markus Köppel, Dipl.-Ing. Jens Müller</i>	
85 Jahre Autobahnbrückenbau – 30 Jahre Dresdner Brückenbausymposium	83
<i>Dipl.-Ing. Werner Buhl</i>	
Gerd Lohmer (1909–1981) Der Brückenarchitekt der Nachkriegszeit	101
<i>Prof. Cengiz Dicleli</i>	
Ersatzneubau der Rheinbrücke Leverkusen – Gesamtplanung des 8-streifigen Ausbaus der A1 zwischen Köln und Leverkusen	123
<i>Dipl.-Ing. (FH) Nicole Ritterbusch, Dr. sc. techn. Hans Grassl, Dominic Reyer, M.Sc.</i>	
Ein neuer Schritt im Großbrückenbau: Querverschub einer Verbundbrücke mit Pfeilern und Gründung bei der Talbrücke Rinsdorf im Zuge der A 45	139
<i>Dipl.-Ing. Roger Istel, Dipl.-Ing. Ralf Schubart</i>	
S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 – erstmaliger Einsatz von interner verbundloser Vorspannung bei der DB AG	149
<i>Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser, Dipl.-Ing. Angelika Schmid, Prof. Dr.-Ing. Christian Sodeikat</i>	
Reduzierte Bauzeit bei Ersatzneubauten von Straßenbrücken durch Carbonbeton	165
<i>Dr.-Ing. Sergej Rempel, Dipl.-Ing. (FH) Eugen Kanschin</i>	
Robust, wirtschaftlich und schön – der Entwurf von integralen Brücken	177
<i>Dipl.-Ing. Andreas Keil</i>	
Neubau der Busbrücke über den Bahnhof in Zwolle	191
<i>Dr.-Ing. Gerhard Setzpfandt, Tristan Wolvekamp MSc, Dipl.-Des. Marion Kresken</i>	
Katastrophen vermeiden: Brückenmonitoring mit einem Netzwerk leistungsstarker dreiachsiger MEMS-Beschleunigungssensoren	207
<i>Dipl.-Ing. Ulrich Dähne</i>	
Brückenvielfalt in Süddeutschland und den Alpen – Bericht zur Brückenexkursion 2019	213
<i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dipl.-Ing. Philipp Riegelmann</i>	
Chronik des Brückenbaus	227
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	

Katastrophen vermeiden: Brückenmonitoring mit einem Netzwerk leistungsstarker dreiachsiger MEMS-Beschleunigungssensoren

Dipl.-Ing. Ulrich Dähne

DEWESoft Deutschland GmbH, Unterensingen

1 Einleitung

Am 14. August 2018 stürzte die Morandi-Brücke in Genua während eines Wolkenbruchs plötzlich ein. Dabei stürzten Fahrzeuge und Trümmer ca. 50 m tief in den überspannten Fluss, und es starben 43 Menschen [1]. Die Morandi-Brücke war seit 1967 in Betrieb, und ihr Einsturz hat die Sorge um den Zustand von Brücken und anderen Infrastrukturen in Europa, den USA und anderswo wieder aufleben lassen.

In den USA beispielsweise gibt es fast 600.000 Brücken, die größtenteils nach 1945 gebaut wurden [2]. Das Ende der erwarteten Lebensdauer von rund 70 Jahren ist bei vielen Brücken bald erreicht. Tatsache ist, dass die *American Road and Transportation Builders Association* rund 56.000 Brücken mit täglich insgesamt über 185 Millionen Überquerungen als „strukturell mangelhaft“ einstuft.

2 Betriebsmodalanalyse (OMA) – ein wichtiges Analyseinstrument für die strukturelle Zustandsüberwachung

Statiker verlassen sich bei der Überwachung des Zustands von Brücken auf Tools wie die strukturelle Zustandsüberwachung (*Structural Health Monitoring*, SHM). SHM ist eine Methode für die Analyse des Zustands von Brücken, Gebäuden und anderen Strukturen und die Implementierung eines Programms zur rechtzeitigen Erkennung von Änderungen und soll dazu dienen, mögliche Katastrophen zu vermeiden.

Am Anfang des Prozesses steht eine Charakterisierung der dynamischen Reaktion der Brücke zur Erstellung eines Referenzdatensatzes, der als Grundlage für die anschließende vergleichende Analyse dient. Bei der Charakterisierung werden Methoden der Strukturdynamik verwendet, um die wichtigsten modalen Parameter wie die Eigenfrequenzen, die Schwingungsformen und die Dämpfungsverhältnisse zu erfassen.

Das Sammeln realer Daten ist für die Kalibrierung des theoretischen Modal-Simulationsmodells unerlässlich; das Modell kann aus den primären Entwurfsgleichungen oder nachträglich per 3D-Analyse eines Finite-Elemente-Modells entwickelt worden sein.

Ein elektromechanischer Shaker kann verwendet werden, um kleine Strukturen mit erzwungenen Schwingungen anzuregen und die Daten direkt zu messen. Diese als Experimentelle Modalanalyse (EMA) bekannte Methode, s. z. B. [3] oder [4], ist bei großen Strukturen wie Brücken jedoch nicht wirklich praktikabel. Stattdessen werden, sobald die Brücke in Betrieb ist, mittels einer Betriebsmodalanalyse (OMA) Daten der vom Verkehr verursachten Schwingungen gesammelt und zur Kalibrierung des theoretischen Modells verwendet.

Die Bewertung des Schwingungsverhaltens von Brücken ist eine relativ neue Praxis, und in den meisten Fällen stehen keine experimentellen Daten zur Verfügung. Theoretische Konstruktionsmodelle gibt es nur von sehr wenigen älteren Brücken, und Schwingungsdaten aus dynamischen Tests sind noch seltener verfügbar. Daher muss in solchen Fällen eine statistische Analyse der OMA-Daten verwendet werden, um die modalen Eigenschaften der Brücke zu bestimmen. Nach der anfänglichen Erhebung werden alle paar Jahre Folgeuntersuchungen durchgeführt, um die Stabilität der Modalparameter zu überprüfen und eventuell frühe Hinweise auf die Notwendigkeit einer eingehenderen Analyse zu erhalten.

3 Zeitliche Beschränkung der Überwachung aufgrund teurer Ausrüstung

Derzeit ist eine Betriebsmodalanalyse ein manueller Vorgang, der je nach Komplexität der Brücke und Anzahl der benötigten Aufnehmer durchaus mehrere Tage dauern kann. Die Ausrüstung ist hochwertig und teuer und umfasst rauscharme, hochdynamische Datenerfassungssysteme und robuste, extrem hochemp-



Bild 1 Tägliche Erfassung mit seismischen IEPE-Sensoren mit ständiger Anwesenheit des Bedieners
Fotos: DEWESoft/MonoDAQ

findliche seismische Beschleunigungssensoren – piezoelektrische Sensoren mit eingebauter Impedanzwandler-Elektronik (IEPE) oder kraftkompensierte Beschleunigungssensoren (FBA), Bild 1.

Nach der anfänglichen Analyse sind regelmäßige Folgeuntersuchungen erforderlich, um den Brückenzustand zu überprüfen. Dabei kommt das gleiche Verfahren zur Anwendung wie bei der ursprünglichen OMA, was erhebliche wiederkehrende Kosten bedeutet.

4 Kontinuierliche dauerhafte Überwachung mit kostengünstigen verteilten MEMS-Beschleunigungssensoren

Kostengünstige Netzwerktechnologie kann eine bessere Lösung bieten. Nach der anfäng-

lichen Analyse kann ein fest installiertes, automatisiertes System weiterhin eine dynamische Überwachung der wichtigsten kinematischen Parameter gewährleisten, ohne dass ein Bediener vor Ort erforderlich ist; die Daten können zur detaillierten Modalanalyse in die Cloud übertragen werden.

MonoDAQ (eine Tochterfirma der DEWESoft-Gruppe) hat für diesen Zweck in Zusammenarbeit mit dem italienischen Ingenieurbüro ESSEBI [5] das MonoDAQ-E-gMeter entwickelt. Dieses Modul umfasst einen dreiachsigen MEMS-Beschleunigungssensor, Signalaufbereitungsschaltungen, Analog-Digital-Wandler (ADC) und eine industrielle EtherCAT-Schnittstelle. In Verbindung mit dem Datenerfassungssoftware-Framework von DEWESoft ermöglicht das System eine kontinuierliche Überwachung im großen Maßstab. Dank der umfassenden Erfahrung von ESSEBI genügt der Beschleunigungssensor in Bezug auf die spektrale Rauschdichte höchsten Ansprüchen (Obergrenze von 25 µg/vHz).

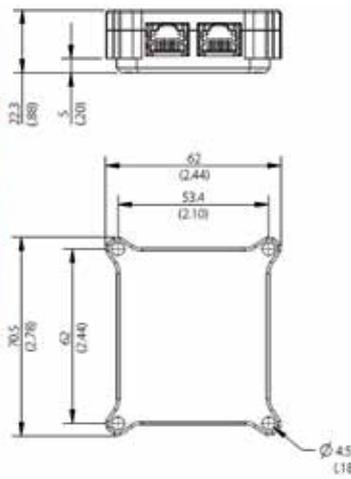


Bild 2 Dreiachsiges MEMS-Beschleunigungssensormodul MonoDAQ-E-gMeter mit A/D-Wandler (direkt an PC anschließbar)

Foto & Zeichnung: DEWESoft/MonoDAQ

Das MonoDAQ-E-gMeter kann Beschleunigungen zwischen $\pm 2 \text{ g}$ und $\pm 8 \text{ g}$ messen und hat eine typische -3 dB -Bandbreite von 1.000 Hz. Mehrere MonoDAQ-E-gMeter-Module können mit geschirmten (SFTP-) Kabeln mit Knoten-zu-Knoten-Abständen von bis zu 50 Metern durchgeschliffen werden. Das EtherCAT-Netzwerk wird mit einem PC verbunden, der die Daten erfasst. Dieser PC kann

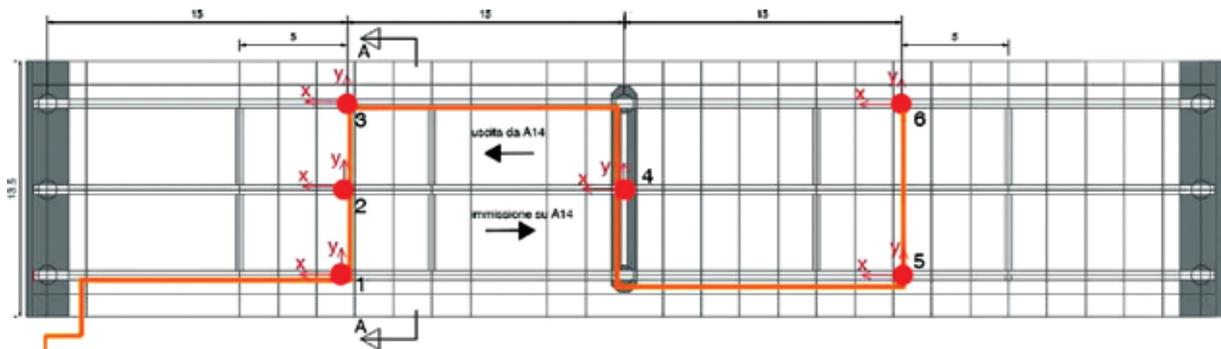


Bild 3 Verteilung der Messpunkte

Skizze: DEWESoft/MonoDAQ

dann die Datenanalyse durchführen oder die Informationen an eine Cloud-Infrastruktur übermitteln.

5 Vergleich der anfänglichen OMA mit der permanent überwachenden OMA

Zu Beginn des Prozesses wurde zunächst eine Referenz-OMA an der Brücke mit der oben beschriebenen Technik durchgeführt. Für diese OMA wurden sechzehn Sensoren an Messpunkten auf der Fahrbahnplattform, entlang der seitlichen Träger und in der Nähe der Spurbegrenzungslinien platziert. Die Messsignalkette bestand aus hochempfindlichen, leistungsfähigen IEPE-Beschleunigungssensoren mit rauscharmen Datenerfassungssystemen, 24-Bit-A/D-Wandlung und einem Dynamikbereich von über 150 dB.

Das Permanentüberwachungssystem, so wie in Bild 3 zu sehen, verfügt über sechs Messpunkte, die sich nur im Mittelabschnitt beider Fahrbahnen befinden. Konkret ist das erste Feld mit einem dreiachsigen Beschleunigungssensor für jeden der drei Hauptfahrbahnträger ausgestattet, während das andere Feld nur mit einem dreiachsigen Beschleunigungssensor an jedem der beiden Seitenträger ausgestattet ist.

Beim Permanentüberwachungssystem werden die Sensoren direkt auf den unteren Plattformen der Hauptfahrbahnträger und oben auf dem Mittelpfeiler installiert. Nach der Installation des Permanentensystems wurde eine OMA durchgeführt, indem eine Stunde lang Daten von allen Kanälen erfasst wurden.

Die Bilder 4 und 5 vergleichen die Kreuzleistungsspektren in z-Richtung (vertikal) der Referenz-OMA und der OMA auf Grundlage der einstündigen Datenerhebung mit dem Perma-

nentüberwachungssystem. Das Permanentüberwachungssystem ist einfacher und viel kostengünstiger und seine Leistung entsprechend geringer. Dennoch weisen beide Abbildungen eine ausgezeichnete Korrelation bei Amplitude und Frequenz auf und lassen erkennen, wie wertvoll es ist, jederzeit und ohne Vor-Ort-Einsatz eine On-Demand-OMA durchführen zu können. Darüber hinaus bestätigen sie, dass die vom Permanentüberwachungssystem erfassten Daten zuverlässig sind.

Weiter verbessern lässt sich die Korrelation durch die Erfassung der On-Demand-OMA-Daten über einen längeren Zeitraum und die damit einhergehende progressive Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Es ist deutlich, dass das Permanentüberwachungssystem sehr nützlich ist, um mit längeren oder kürzeren Intervallen Datensätze zu extrahieren, um eine OMA durchzuführen, wann immer Bedarf besteht.

6 Algorithmus auf Basis der Verkehrsanregung

Neben den Vorteilen, die sich aus der kontinuierlichen Verfolgung einer vorgegebenen Frequenz (z. B. die erste Verbiegung auf vertikaler Ebene) ergeben, kann eine eingehendere Analyse der Daten kinematische Größen ergeben, die wertvolle Hinweise auf ein Schadenspotenzial liefern.

Die durch Fahrzeugverkehr induzierte Partikelschwinggeschwindigkeit ist eine solche Größe. Aufgrund der großen Variabilität in der Größe der induzierten Anregung definieren viele Normen wie ISO 4866 [6], DIN 4150 [7], UNI 9916 [8] und SN640312a [9] maximal zulässige Schwinggeschwindigkeiten, die unter bestimmten Bedingungen gelten.

Obwohl sich diese Vorschriften im Allgemeinen auf Gebäude und die Messung von auf horizon-

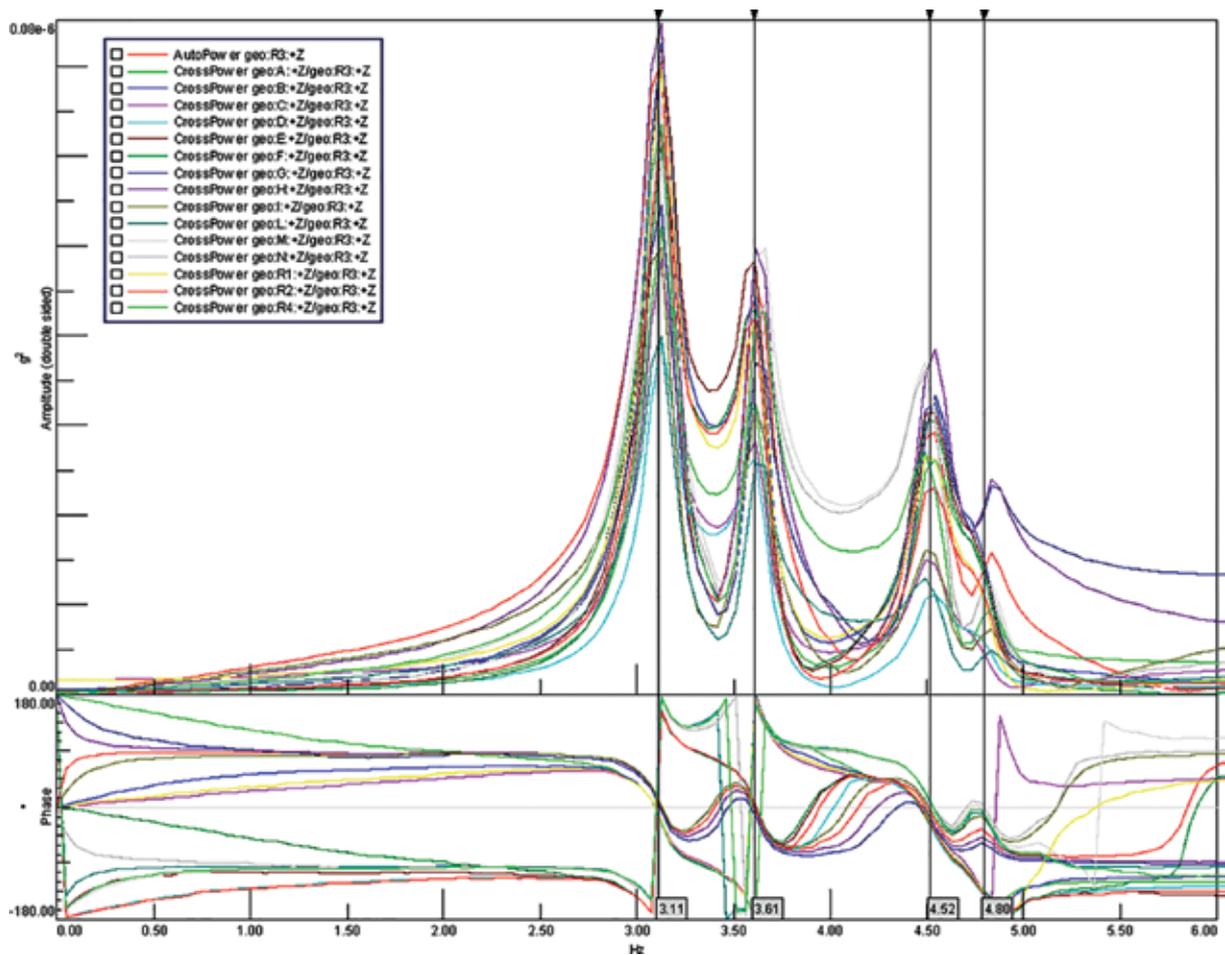


Bild 4 Kreuzleistungsspektren in z-Richtung der anfänglichen OMA mit seismischen IEPE-Beschleunigungssensoren
 Grafik: DEWESoft/MonoDAQ

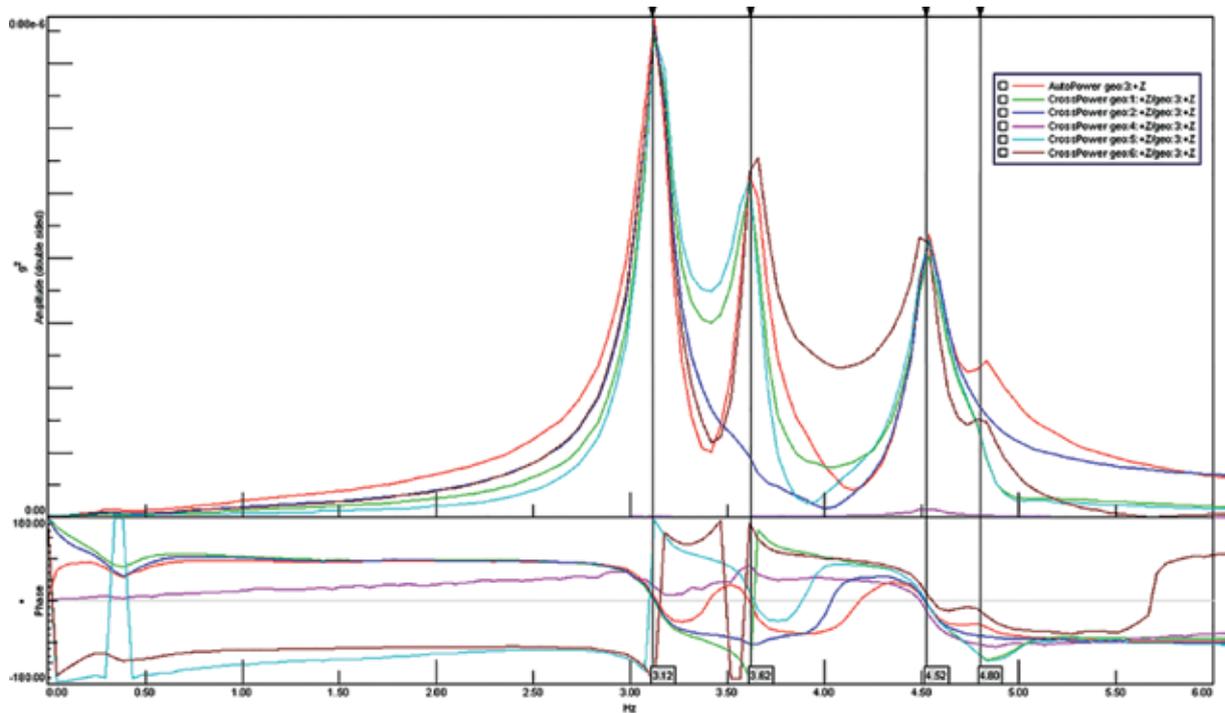


Bild 5 Kreuzleistungsspektren in z-Richtung der OMA auf Grundlage der mit dem Permanentüberwachungssystem (MonoDAQ-E-gMeter) erfassten Daten
 Grafik: DEWESoft/MonoDAQ

talen Ebenen induzierten Schwingungen beziehen, zeigt eine Brückenfahrbahn ein vergleichbares Ansprechverhalten. Brücken gehören, zumindest was die lokalen (italienischen) Bauvorschriften angeht, in diese Kategorie. Eine Brücke vibriert aufgrund der variablen und zufälligen Einwirkung der sie überquerenden Fahrzeuge dauernd, und die Größe der durch diese Vibrationen induzierten Schwinggeschwindigkeit ist ein hochsensitiver Indikator für das Verhalten der Brücke. ESSEBI hat dieses Prinzip zur Entwicklung eines Algorithmus genutzt, der unabhängig von der Ursache der Schwingung universelle und allgemeine Geschwindigkeitsschwellen generiert. Die DEWESoft-Softwareumgebung ermöglicht eine einfache Implementierung dieser Algorithmen und liefert Echtzeitergebnisse während des Messvorgangs.

7 Fazit, weiterführende Informationen und Dank

Die breite Annahme der OMA-basierten Überwachung mit diesen Techniken wird das Risiko weiterer Brückenkatastrophen minimieren, und kostengünstige Hardware macht permanent installierte automatisierte Anlagen schon in naher Zukunft zu einer echten Alternative. Kontaktieren Sie MonoDAQ für weitere Informationen über die verwendeten Verfahren, Algorithmen und Komponenten. Detaillierte Spezifikationen und Informationen zur Systemintegration des MonoDAQ-E-gMeter finden Sie bei [10], [11]. Das System kann über die DEWESoft-Niederlassungen bezogen werden.

MonoDAQ dankt ESSEBI für die kompetente Beratung und Applikationsunterstützung bei der Entwicklung der MonoDAQ-E-gMeter-Lösung.

Literatur

- [1] Daten zum Polcevera-Viadukt: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polcevera-Viadukt>
 [2] Daten zum Brückenbestand USA: <https://www.webuildvalue.com/en/>

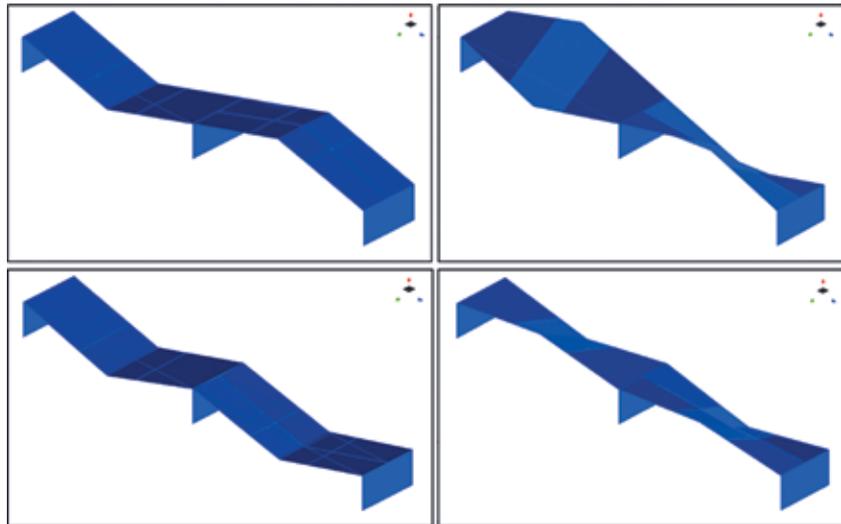


Bild 6 Die ersten vier bei permanenter Überwachung durch eine *On-Demand-OMA* ermittelten Modalformen

Grafik: DEWESoft/MonoDAQ

- infrastructures/u-s-bridges-the-emergency-in-numbers.html
- [3] Allgemeine Informationen zu EMA: https://www.mikrocontroller.net/attachment/285364/Informationen_zur_Experimentellen_Modalanalyse.pdf
- [4] Kollmann, F. G.; Schösser, T. F.; Angert, R.: Meß- und Auswerteverfahren. Kap. 11 in: Praktische Maschinenakustik, VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, S. 241–305 – https://doi.org/10.1007/3-540-30975-6_11
- [5] Homepage ESSEBI: <https://essebiweb.it/>
- [6] ISO 4866:2010-03: Mechanische Schwingungen und Stöße – Schwingungen von Bauwerken – Leitfaden für die Messung von Schwingungen und die Bewertung ihrer Auswirkungen auf Bauwerke.
- [7] DIN 4150-1:2001-06: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen.
- [8] UNI 9916:2014: Kriterien zur Messung von Vibrationen und deren Auswirkungen auf Bauwerke.
- [9] SN 640312a:1992-04: Erschütterungen; Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke.
- [10] Spezifikationen und Preise des MonoDAQ-E-gMeter-Systems für die Permanentüberwachung: <https://www.monodaq.com/ethercat/triaxial-accelerometer-daq/>
- [11] DEWESoft Software und SIRIUS System zur Qualifizierung und regelmäßigen Modalanalyse: <https://dewesoft.com/de/applikationen/strukturelle-dynamik/brueckenmonitoring>

Alle Webquellen wurden am 2.1.2020 geprüft.

-
- 9 Grußwort des Rektors
 - 13 Entwicklung des Instituts für Massivbau –
Lehre und Forschung im Brückenbau an der TU Dresden
 - 27 Die neue Erhaltungsstrategie des Bundes –
Planung und Bau von Brücken auf den Hauptverkehrsrouten
 - 33 Brücken aus bewehrtem UHPC (Stahl-UHFB)
 - 47 Nutzung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) im ASTRA –
Rückblicke und Perspektiven
 - 57 Neufassung der Nachrechnungsrichtlinie für Massivbrücken
 - 71 Historische Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz
 - 83 85 Jahre Autobahnbrückenbau – 30 Jahre Dresdner Brückenbausymposium
 - 101 Gerd Lohmer (1909–1981) – Der Brückenarchitekt der Nachkriegszeit
 - 123 Ersatzneubau der Rheinbrücke Leverkusen – Gesamtplanung
des 8-streifigen Ausbaus der A1 zwischen Köln und Leverkusen
 - 139 Ein neuer Schritt im Großbrückenbau: Querverschub einer Verbundbrücke mit Pfeilern
und Gründung bei der Talbrücke Rinsdorf im Zuge der A 45
 - 149 S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 –
erstmaliger Einsatz von interner verbundloser Vorspannung bei der DB AG
 - 165 Reduzierte Bauzeit bei Ersatzneubauten von Straßenbrücken durch Carbonbeton
 - 177 Robust, wirtschaftlich und schön – der Entwurf von integralen Brücken
 - 191 Neubau der Busbrücke über den Bahnhof in Zwolle
 - 207 Katastrophen vermeiden: Brückenmonitoring mit einem Netzwerk
leistungsstarker dreiachsiger MEMS-Beschleunigungssensoren
 - 213 Brückenvielfalt in Süddeutschland und den Alpen – Bericht zur Brückenexkursion 2019
 - 227 Chronik des Brückenbaus