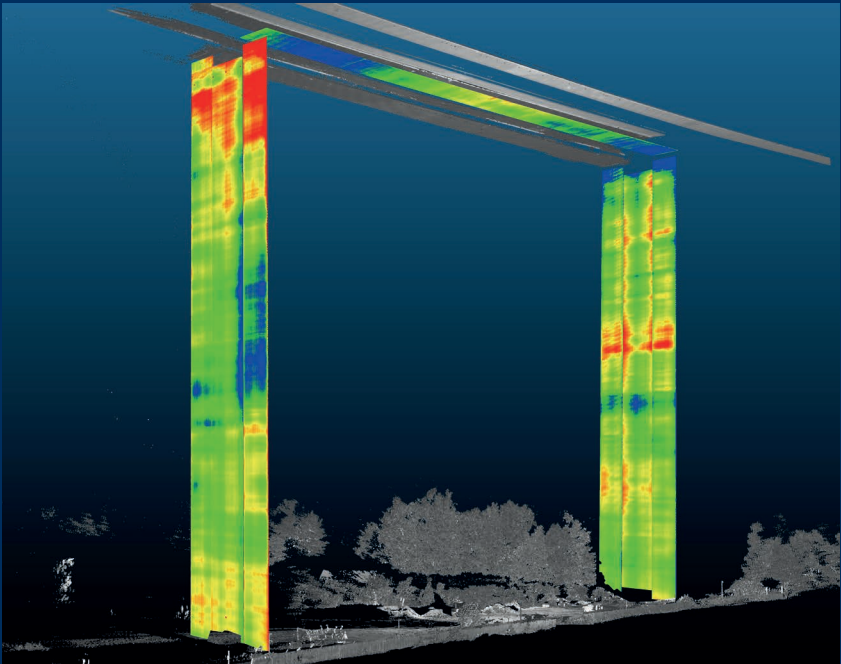




**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55



Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

11. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

08. März 2021



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
D - 01062 Dresden

Tel. +49 351 463-3 65 68
Fax +49 351 463-3 72 89

© 2021 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber. 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. Für die Inhalte sind die Autor*innen verantwortlich.

Herausgeber: Manfred Curbach, Steffen Marx, Silke Scheerer, Torsten Hampel
Redaktion: Silke Scheerer
Layout: Stefan Gröschel und Silke Scheerer
Korrekturen: Silke Scheerer, Sabine Wellner und Theresa Fritsche
Anzeigen: Sabine Wellner
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel

Titelbild: 3D-Punktwolke des fünften Feldes der Siegtalbrücke; zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitätswerte (Graustufendarstellung) und Ebenheitsabweichungen (Regenbogendarstellung) | © Dr.-Ing. Florian Schill, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt Institut für Geodäsie

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden verfügbar: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb>.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

Veröffentlicht: Dresden, März 2021

ISSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-665-7

Inhalt

Grußwort.....	5
Torsten Hampel, Sabine Wellner und Silke Scheerer	
Experimentelle Untersuchung von Balkenreihentragwerken	8
Oliver Steinbock, Olaf Mertzsch und Sabine Wellner	
Experimentell gestützte Nachweise von Eisenbahn-Stampfbetonbrücken.....	20
Marc Gutermann und Werner Malgut	
Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite	32
Florian Schill und Gregor Schacht	
Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen.....	46
Sebastian Schulze	
Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbeton- brücke zur Analyse von Schädigungsprozessen	54
Jens Kühnapfel, Gunter Hahn, Markus Fischer und Stefan Mortag	
Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung.....	66
Ralf Herrmann, Ronald Schneider, Patrick Simon, Falk Hille, Samir Said und Matthias Baeßler	
Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen	78
Alois Vorwagner, Maciej Kwapisz, Werner Lienhart, Madeleine Winkler und Urs H. Grunicke	
Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren	88
Fritz Binder und Stefan L. Burtscher	
Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring.....	96
Max Käding, Gregor Schacht und Steffen Marx	
Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien	106
Ulrich Schneck	
Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke.....	118
Oliver Steinbock, Nina Josiane Giese und Manfred Curbach	
Experimentelle Tragfähigkeitstests des OML in den Jahren 2019 und 2020.....	130
Sabine Wellner, Torsten Hampel und Silke Scheerer	

Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung

Dr.-Ing. Ralf Herrmann, Dr.-Ing. Ronald Schneider, Patrick Simon M.Sc.,
Dr.-Ing. Falk Hille, Dipl.-Ing. Samir Said, Dr.-Ing. Matthias Baeßler
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

KURZFASSUNG

Nach den bisherigen Regeln werden Bauwerksprüfungen von Brücken in starr definierten Intervallen durchgeführt. Diese starre, periodische, zustandsbasierte Instandhaltungsstrategie soll zukünftig durch eine flexible und prädiktive Instandhaltung ersetzt werden. Hierbei sollen Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen unterstützt durch autonome Systeme auf der Grundlage von Monitoringdaten geplant und zusätzlich bei unvorhergesehenen Ereignissen ausgelöst werden. Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts AISTEC wird ein Vorgehen für Großbauwerke und kleinere Regelbauwerke zur Umsetzung eines kombinierten globalen, schwingungsbasierten und quasistatischen Monitorings entworfen. An der Maintalbrücke Gemünden – einer semiintegralen Rahmenbrücke aus Spannbeton auf der Schnellfahrstrecke Hannover–Würzburg – wurde als Demonstrator ein Dauermonitoring realisiert.

1 Einleitung

Eine verfügbare und zuverlässige Verkehrsinfrastruktur ist eine Grundvoraussetzung für wirtschaftliches Wachstum in Deutschland [1]. Brücken sind kritische Bestandteile der Verkehrsnetze, die dauerhaft Schädigungsprozessen und hohen Lasten ausgesetzt sind. Um die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Brücken in deutschen Verkehrsnetzen sicherzustellen, wird derzeit unabhängig vom Bauwerk die gleiche Instandhaltungsstrategie verfolgt [2], [3]. Die Brücken werden im Abstand von sechs Jahren aufwendig durch Bauwerksprüfer handnah visuell inspiziert. Befunde werden Bauteilen zugeordnet und in speziellen Datenbanksystemen (z. B. SAP R/3 Netz bei der Deutschen Bahn) und parallel in herkömmlichen Bauwerksbüchern dokumentiert. Hierbei werden die Position und Art der Befunde allgemein beschrieben und Fotos von den Befunden hinterlegt. Anschließend werden die Bauwerksteile durch die Bauwerksprüfer mit Zustandsnoten bzw. -kategorien bewertet.

Mit Hilfe empirischer Modelle werden die Zustandsnoten für die Bauteile in einer Gesamtzustandsnote für das Bauwerk zusammengefasst [4]. Die Zustandsnoten und die dokumentierten Informationen über die Befunde bilden dann die Basis für Entscheidungen über bauliche und betriebliche Maßnahmen. Hierzu werden beispielsweise bei der Deutschen Bahn Entscheiderkonferenzen bestehend aus Anlagenverantwortlichen, Fachbeauftragten und Leitern der Bereiche Instandhaltung, Planung und Steuerung durchgeführt. Mit dieser größtenteils analogen Herangehensweise managt z. B. die Deutsche Bahn ca. 26.000 Eisenbahnbrücken.

Zukünftig soll die Zustandserfassung und -bewertung von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken vollständig digitalisiert werden. In diesem Kontext erforschen Wissenschaftler der Bauhaus-Universität Weimar (BUW) und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) zusammen mit der DB Netz AG und dem Ingenieurbüro Leonhardt, Andrä und

Partner (LAP) im Verbundforschungsvorhaben AISTEC Lösungen zur automatischen Zustandserfassung und -bewertung von Infrastrukturbauelementen anhand von Bild- und Sensordaten [5]. Die Forscher der BUW setzen automatisiert fliegende, unbemannte Flugsysteme (UAS) ein, um hochauflösende Bilder aus geringem Abstand zu den Bauwerken aufzunehmen, aus denen anschließend präzise, georeferenzierte 3D-Bauwerksmodelle konstruiert werden [6]. Mit Methoden der *künstlichen Intelligenz* werden sichtbare Bauwerksschäden wie Risse und Rostfahnen automatisiert in den Bildern identifiziert.

Parallel erforschen die Wissenschaftler der BAM globale, sensorbasierte Monitoringverfahren, mit denen komplementär zu den zeitlich diskreten Inspektionen mit UAS der Bauwerkszustand kontinuierlich überwacht wird. Hierbei erfassen fest an den Bauwerken installierte Sensoren Bauwerksdaten, anhand derer mit Methoden des *Structural Health Monitorings* (SHM) potenziell kritische Bauwerksschäden automatisch identifiziert werden [7]–[12]. Falls Schäden durch das kontinuierliche Monitoring entdeckt werden, können automatisch zusätzliche Inspektionen mit UAS ausgelöst werden. Die aus Bildern konstruierten 3D-Bauwerksmodelle werden in einer von Forschern der BUW entwickelten kollaborativen virtuellen Realität (VR) visualisiert [13]. Hier können mehrere Personen das 3D-Modell gleichzeitig auf einer Leinwand sehen bzw. diskutieren und bekommen individuell das perspektivisch korrekte Bild dargestellt. Die aus Bild-, Sensor- und Simulationsdaten ermittelten Zustandsinformationen werden mit dem virtuellen Bauwerk überlagert und können mittels Visualisierungs- und Interaktionstechnologien in der VR-Umgebung begutachtet werden. Hierdurch wird Bauwerks-Experten und anderen Entscheidungsträgern eine Zustandsbewertung aus der Ferne ermöglicht.

Perspektivisch soll die aktuelle starre, zustandsbasierte Instandhaltung von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken durch eine objektbezogene, flexiblere, effizientere und

prädiktive Instandhaltung ersetzt werden. Hierzu werden gekoppelte Schädigungs- und Strukturmodelle der Bauwerke anhand von Bauwerksdaten kalibriert, die am realen Bauwerk erfasst werden, wodurch Vorhersagen des Bauwerkszustands und der Bauwerkszuverlässigkeit aktualisiert werden können [14]–[16]. Diese Prognosen bilden die Grundlage für eine risiko- und kostenoptimierte prädiktive Planung von Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen. In der Offshore-Windindustrie werden diese Ansätze schon konkreter für das Erhaltungsmanagement von Tragstrukturen von Windkraftanlagen umgesetzt [17].

Im Rahmen des AISTEC-Projektes werden die Verfahren zur bild- und sensorbasierten Zustandserfassung und -bewertung an der Maintalbrücke Gemünden angewendet. Die Konzeption und Umsetzung des globalen, sensorbasierten Monitorings der Brücke werden in diesem Beitrag dargestellt.

2 Konzeption eines globalen SHM zur Überwachung der Maintalbrücke Gemünden

Im Lebenszyklus von Brücken bestehen vielfältige Einsatzmöglichkeiten für sensorbasierte Monitoringverfahren. In der Betriebsphase werden solche Verfahren zurzeit hauptsächlich angewendet, nachdem potenziell kritische Schäden bzw. Schädigungsprozesse identifiziert wurden. In diesem Fall werden meistens Struktur- und Schädigungsmodelle zur quantitativen Bewertung und Prognose des Bauwerkszustandes eingesetzt. Die Eingangsgrößen und Parameter der Modelle werden dann häufig auf der Grundlage von zerstörungsfreien Prüfungen und sensorbasiertem Monitoring bestimmt [18]. Die quantitativen Analysen dienen anschließend als Grundlage für Entscheidungen über Reparaturen, Verstärkungen, Nutzungseinschränkungen, Sperrungen oder sogar einen Bauwerksersatz. Teilweise wird die Wirksamkeit von Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen durch ein gezieltes lokales und/oder globales, sensorbasiertes Monitoring überwacht [19]. Falls eine quantitative Model-

lierung der relevanten Schädigungsprozesse nicht möglich ist (wie z. B. im Fall von Spannungsrissskorrosion von Spannstählen), wird der Schädigungsfortschritt häufig durch ein Dauermonitoring überwacht, wodurch kontinuierlich Informationen für eine rechtzeitige Ableitung von notwendigen Maßnahmen bereitgestellt werden [20].

Im Verbundforschungsvorhaben AISTEC werden verschiedene globale Monitoringverfahren, die bisher unter Laborbedingungen oder einzeln an Strukturen getestet wurden, in Kombination miteinander unter realen Bedingungen und in Bezug zur Modellierung von Bauwerken als digitaler Zwilling erprobt. Ziel ist es, in der Betriebsphase von Brücken automatisch potenziell kritische Bauwerksschäden bzw. -veränderungen zu identifizieren und diese, soweit möglich, mittels Drohnenbefliegungen zu validieren. Ein Ansatz basiert auf der Grundidee, dass Schäden die Steifigkeit und somit die Schwingungseigenschaften eines Bauwerks beeinflussen. Änderungen in den Schwingungseigenschaften deuten deswegen gegebenenfalls indirekt auf Bauwerksschäden hin. Für die Schadensdetektion anhand von Vibrationsdaten werden moderne stochastische, unterraumbasierte Verfahren (engl. *stochastic subspace-based damage detection*, SSDD) angepasst [7]–[9]. Des Weiteren werden Bauwerksverformungen (z. B. Neigungen) während definierter Belastungstests gemessen und in Form von Einflusslinien ausgewertet. Änderungen in den gemessenen Einflusslinien ermöglichen die Identifikation von Bauwerksschäden [10].

Über diese beiden rein datenbasierten Ansätze hinaus werden innovative, modellbasierte Verfahren verwendet, die probabilistische physikbasierte Bauwerksmodelle anhand gemessener dynamischer und statischer Monitoringdaten mit Bayes'schen Methoden aktualisieren bzw. kalibrieren und somit eine Systemidentifikation und Identifikation des Schädigungszustandes ermöglichen [11], [12]. Bei der Umsetzung von sensorbasierten Monitoringverfahren muss beachtet werden, dass sowohl das Bauwerksverhalten als auch das Messverhalten von Senso-

ren durch sich ändernde Umweltbedingungen beeinflusst werden. Aus dem an der Maintalbrücke Gemünden umgesetzten Monitoring sollen adaptiv übertragbare, allgemeine Vorgehensweisen abgeleitet werden.

2.1 Maintalbrücke Gemünden

Die Maintalbrücke Gemünden ist Teil der 327 km langen Schnellfahrstrecke Hannover–Würzburg, die das Maintal bei der Ortschaft Gemünden am Main in einer Höhe von 27 m überspannt [21]. Sie stellt die Verbindung zwischen dem 1.141 m langen Einmalbergtunnel im Norden und dem 5.528 m langen Mühlbergtunnel im Süden her. Baubeginn für die Brücke war im Jahr 1982, und die Fertigstellung erfolgte innerhalb von 30 Monaten im September 1984. Vor der regulären Inbetriebnahme im Mai 1988 wurden auf der Strecke umfassende Versuchsfahrten [22], wie beispielsweise die ICE-Weltrekordfahrt, und Bauwerksmessungen seitens der DB durchgeführt. Seitdem wird die Brücke durch Personen- und Güterzüge befahren.

Die Maintalbrücke ist eine Spannbetonbrücke und besteht aus mehreren Teilbrücken. Ihre Gesamtlänge ist 793,5 m (ohne Widerlager), siehe Bild 1. Die Vorlandbrücken bestehen auf der Südseite aus einem dreifeldrigen Durchlaufträger und auf der Nordseite aus zwei Durchlaufträgern mit ebenfalls drei Feldern, die im Taktchiebeverfahren über Hilfsstützen von beiden Widerlagerseiten aus hergestellt wurden. Das Hauptbauwerk bildet die den Main überspannende Strombrücke, die als Trapezrahmen mit V-Stützen konstruiert ist. Als semiintegrales Bauwerk besitzt die Brücke ein statisch unbestimmtes Verhalten und eine komplexe Zwangseinwirkung aus Temperatur.

Die beiden Randfelder haben eine Stützweite von 82 m und das Mittelfeld von 135 m, wobei durch die V-förmige Ausbildung der Stützen die effektive Stützweite 108 m beträgt. Die Strombrücke wurde im Freivorbau errichtet. Für die Herstellung der V-Stützen wurden Kletterschalungen verwendet. Sie ruhen auf Betongelenken, welche unter der Geländeoberkante ange-

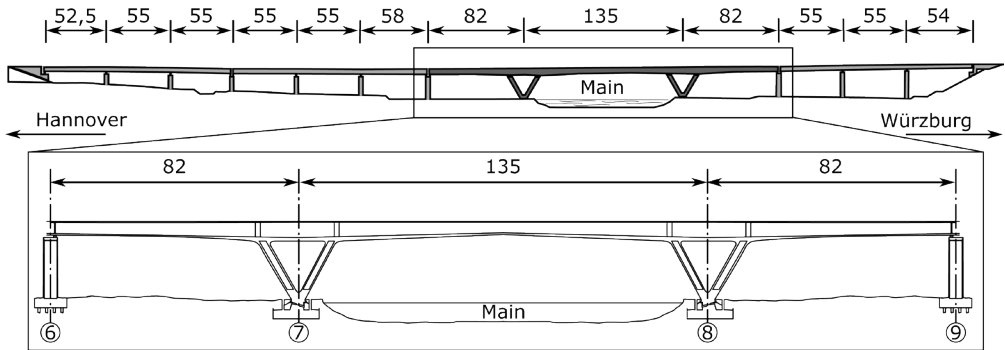


Bild 1: Ansicht der Maintalbrücke Gemünden (oben) und Längsschnitt der Strombrücke (unten)

ordnet sind, um möglichst viel Rahmenhöhe zu gewinnen. Das Bauwerk wurde von LAP geplant, die u. a. die Expertise für die unbewehrten Betongelenke einbrachten, welche hier erstmalig bei einer deutschen Eisenbahnbrücke Anwendung fanden [23]. Neben der Charakteristik des Bauwerks und den vorhandenen Bauwerksmessungen hat auch das organisatorische Zusammenspiel der Projektpartner zur Auswahl des Bauwerks für die Forschungsarbeiten im AISTEC-Projekt beigetragen.

Seit Errichtung der Brücke wurden acht Haupt- und Sonderprüfungen durchgeführt. Die erste erfolgte in den Jahren 1984/85 vor der Bauabnahme. Dabei wurden neben Kiesnestern unkritische Risse und eine zu geringe Betondeckung festgestellt, die instandgesetzt wurden. Die letzte reguläre Brückenhauptprüfung erfolgte im September 2019 mit einem Brückeninspektionsgerät, um alle Bereiche der Brücke inspizieren zu können.

Potenziell kritische Schäden bzw. Veränderungen an der Maintalbrücke Gemünden können unter anderem durch Korrosion an den Spanngliedern und ggf. durch deren korrosionsinitiierte Materialermüdung auftreten, was unter Umständen zum Teilverlust der Vorspannung führen würde. Außerdem können im Falle von Hochwasser durch Schiffsanprall Schäden an der Tragstruktur auftreten. Daneben stellen die beiden Betongelenke bedeutende konstruktive Details dar, deren Schadensfreiheit für die Integrität des Bauwerks existenziell ist. An einer der

beiden Stützenfüße wurde im Rahmen von Begutachtungen eine Rissigkeit des Betons im Bereich des Betongelenks festgestellt, deren Ursache vielfältig sein kann.

2.2 Umgesetzte Monitoringmaßnahmen zur globalen Überwachung

Für die Ableitung konkreter Monitoringmaßnahmen (bzw. Messaufgaben) wurde davon ausgegangen, dass an dem intakten Bauwerk (a) dynamische Bauwerksantworten angeregt durch ambiente und verkehrsbedingte Einflüsse kontinuierlich, (b) statische Bauwerksverformungen kontinuierlich und während definierter Überfahrten mit Belastungszügen und (c) Temperaturen im Beton, Schotterbett und Lufttemperaturen kontinuierlich mit einer begrenzten Anzahl an Sensoren gemessen werden müssen. Zusätzlich werden gezielt Oberflächendehnungen des Betons in bestimmten Messquerschnitten kontinuierlich und während definierter Überfahrten mit Belastungszügen gemessen. Dadurch können u. a. aktuelle Messungen mit Messungen, die vor der Inbetriebnahme der Brücke durchgeführt wurden [22], verglichen werden. Zusammen mit der numerischen Vorbetrachtung wurden für das Bauwerk die in Tabelle 1 angegebenen Monitoringmaßnahmen abgeleitet.

2.2.1 Numerische Vorbetrachtung

Das statische und dynamische Tragverhalten der intakten Brücke wurde anhand numeri-

Maßnahme	Beschreibung	Zielsetzung
T	Temperaturmessung, Luft, Beton, Schotter	Untersuchung Temperatureinflüsse, Temperaturkompensation der Messungen, probabilistische Systemidentifikation und SHM
V	Vibrationen des Brückenüberbaus	SSDD-Schadensdetektion, deterministische und probabilistische Systemidentifikation und SHM
N	Neigungen des Brückenüberbaus	Einflusslinienvorhaben, probabilistische Systemidentifikation und SHM
TD	Zugdurchfahrtserkennung und Schwellenerschütterung	Positionsschätzung bei Zugüberfahren, Einflusslinienvorhaben, Vergleich mit bestehenden Messungen, probabilistische Systemidentifikation und SHM
D	Oberflächendehnungen von Bodenplatte und Hohlkastendecke	SSDD-Schadensdetektion, Vergleich mit bestehenden Messungen, probabilistische Systemidentifikation und SHM

Tabelle 1: Realisierte Monitoringmaßnahmen mit Zuordnung zu den unterschiedlichen Zielsetzungen des sensorbasierten Monitorings der Maintalbrücke Gemünden

scher Berechnungen auf Basis des kommerziellen FEM-Programmsystems ANSYS bestimmt.

Die Ergebnisse einer numerischen Modalanalyse wurden anhand von vorab durchgeführten Testmessungen mit Beschleunigungssensoren validiert. Weiterhin konnte so abgeschätzt werden, welche höheren vertikalen Moden noch Anregung erfahren und messbar sind. Die Ergebnisse der Testmessung gaben auch Hinweise auf das untere Frequenzlimit der auszuwählenden Sensoren.

Die mit einer numerischen Modalanalyse bestimmten Modalformen wurden anschließend genutzt, um das Messstellenschema der Vibrationssensoren festzulegen. Die ersten longitudinalen, transversalen und torsionalen Modalformen wurden qualitativ für die Platzierung der entsprechenden Sensoren verwendet. Die vertikalen Modalformen wurden als Eingangsparameter für eine quantitative Sensorplatzierung

mit dem *Effective Independence Algorithmus* [24] herangezogen.

Mittels des numerischen Modells und den Berichten von Probelastungen [22] wurden ebenfalls die Messbereiche für die Neigungssensoren und Dehnungsmessstreifen abgeschätzt.

2.2.2 Bauwerkstemperatur – Maßnahme T

Umgebungseinflüsse – allen voran Temperatur – können einen großen Einfluss auf das Tragverhalten und die Monitoringergebnisse haben [25], [26]. Daher wurden an einem Querschnitt über einem Stiel einer der V-Stützen und dem Querschnitt in Feldmitte des Hauptfeldes jeweils sechs Temperatursensoren im Beton angebracht (siehe Bild 2 und Bild 3). Um weder schlaffe Bewehrung noch Vorspannglieder zu beschädigen, wurde vor dem Einbau der Sensoren eine Bewehrungsörtung mit Radarverfahren durchge-

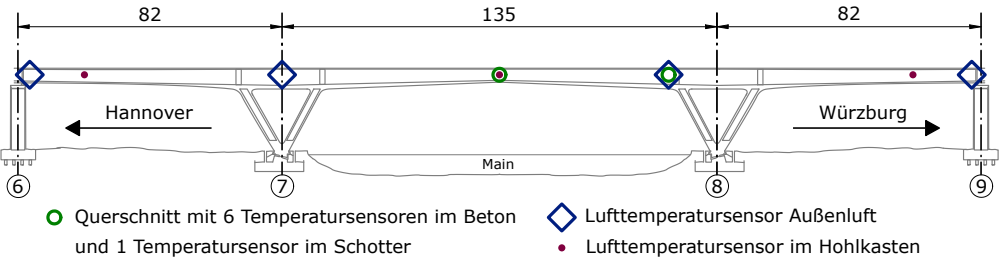


Bild 2: Längsschnitt mit Anordnung der Temperatursensoren

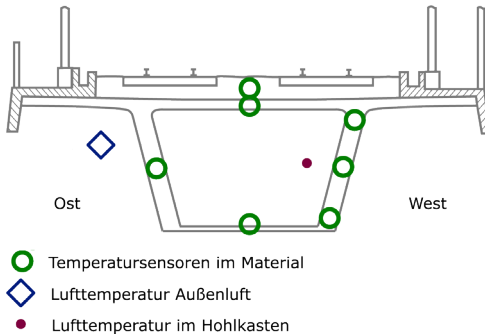


Bild 3: Querschnitt mit Anordnung der Temperatursensoren

führt [27]. Insbesondere bei den Querspann- gliedern der Fahrbahnplatte war dies wichtig, da deren Lage von den Plänen abwich. In diesen Querschnitten wurde auch jeweils mittig ein Temperatursensor im Schotterbett vergraben.

Durch den zeitlichen Verlauf der Temperaturfelder können Prozesse der Temperaturübertragung untersucht werden [28]. Über die im Hohlkasten angeordneten Temperatursensoren können horizontale und vertikale Temperaturgradienten bestimmt und statische sowie dynamische Messungen in Bezug zur Bauwerkstemperatur gesetzt werden. Die Temperatur der Außenluft wird an vier Stellen und die Temperatur der Luft im Hohlkasten wird an drei Stellen gemessen. Für die Temperaturmessungen kommen Pt100 Widerstandsthermometer der Genauigkeitsklasse AA nach DIN EN 60751 [29] zum Einsatz. Zusätzlich wurden alle eingesetzten Sensortypen in Klimakammerversuchen getestet, um den Temperatureinfluss auf die Sensorik abzuschätzen.

2.2.3 Vibrationen des Brückenüberbaus – Maßnahme V

Das Schwingungsverhalten des Überbaus über alle drei Felder hinweg wird durch Geophone in vertikaler, transversaler und longitudinaler Richtung gemessen. Ziel der Maßnahme ist es, die Eingangsdaten für die dynamische Schadensidentifikation bereitzustellen. Dazu wurden entlang der Bodenplatte auf der Ostseite des Querschnitts durchgängig und auf der Westseite vereinzelt in einem optimierten Abstand (siehe Abschnitt 2.2.1) Geophone platziert, vgl. Bild 4. Die Geophone messen Schwinggeschwindigkeiten ab einer unteren Grenzfrequenz von 2 Hz. Zur genauen quantitativen Bestimmung von tieferen Schwingfrequenzen wurden an drei Positionen hochempfindliche Servobeschleunigungssensoren parallel ergänzt. Mit dem Messlayout wird nicht nur die Schadensidentifikation, sondern auch die Bestimmung der modalen Eigenfrequenzen und -formen und der durch Verkehrsanregung induzierten Betriebsschwingungsformen ermöglicht. Die ausgerichteten Sensoren wurden mit einem Zweikomponentenklebstoff auf die Betonflächen geklebt.

2.2.4 Verkehrserkennung – Maßnahme TD

Mit der Monitoringmaßnahme TD (*Traffic Detection*) soll die Überfahrt der Personen- und Güterzüge mit Geophonen erkannt werden, die auf Schwellen am Anfang und Ende der Strombrücke auf beiden Gleisen installiert sind, vgl. Bild 4. Geophone zeichnen sich hier durch ihre Robustheit, Störunempfindlichkeit und das passive Messverfahren aus, da auf der Strecke in

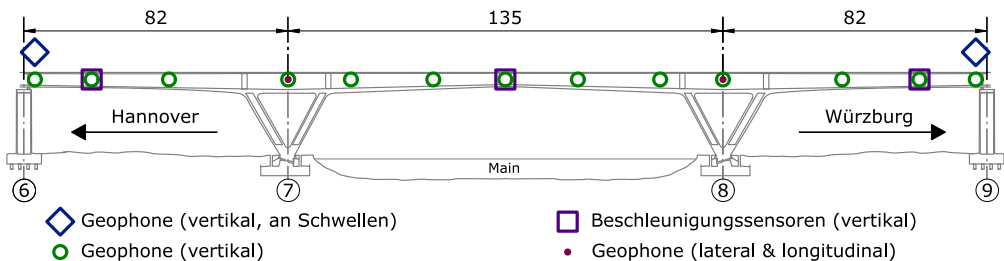


Bild 4: Längsschnitt mit Anordnung der dynamischen Sensoren

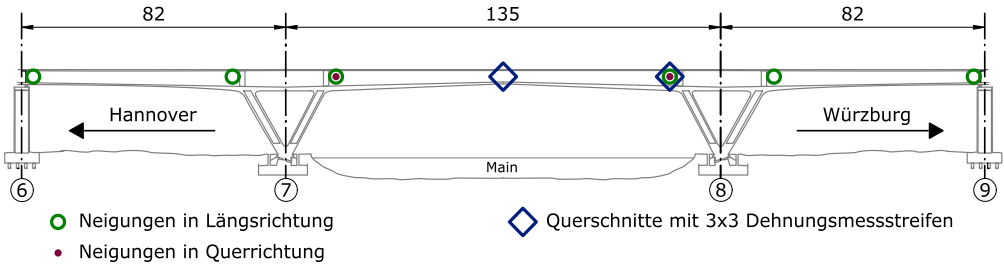


Bild 5: Längsschnitt mit Anordnung der Neigungssensoren und Dehnungsmessstreifen

Gleismitte eine linienförmige Zugbeeinflussung (LZE) installiert ist. Über die vier Geophone kann erkannt werden, ob, in welche Richtung und auf welchem Gleis ein Zug das Bauwerk befährt. Zudem sind auch die statistische Auswertung der Überfahrten sowie die Ermittlung der durchschnittlichen Überfahrtsgeschwindigkeiten von Interesse.

Die Sensoren wurden an der Schwelle an den dafür zugelassenen Bereichen verschraubt und verklebt.

2.2.5 Beanspruchung des Überbaus – Maßnahme D

Die Maßnahme D dient der Spannungsanalyse in den, sowohl aus thermischer Beanspruchung als auch durch die Verkehrseinwirkung, am höchsten beanspruchten Positionen im Hohlkasten. Dazu wird die Oberflächendehnung des Betons durch aus einzelnen Dehnungsmessstreifen (DMS) aufgebauten Dehnungsrosetten gemessen.

Durch die Dehnungsrosette im 45°-Winkel (vgl. Bild 7 in Abschnitt 3) können die reine Längs- und Querdehnung, aber auch die Hauptdehnung bestimmt werden. Aus diesen Messungen sollen die Schnittkräfte in den instrumentierten Querschnitten in der Feldmitte des Hauptfelds und im Anschluss der V Stütze in der Achse 8 rekonstruiert werden, vgl. Bild 5 und Bild 6. Ziel ist es, temperaturbedingte Zwangsdehnungen im Jahresverlauf und verkehrsbedingte Beanspruchungen bei unterschiedlichen Überfahrtsgeschwindigkeiten zu ermitteln und mit den numerischen Ergebnissen zu vergleichen.

Die Dehnungsmessung soll zudem für die statischen und dynamischen Schadensdetektionsverfahren verwendet werden, da DMS sowohl bei den transienten Messungen einer Überfahrt als auch die Überfahrtdynamik hochfrequent messen können.

Um eine langzeitstabile Messung zu realisieren, wurden Drahtdehnungsmessstreifen eingesetzt und die Messstellen mit den üblichen Abdeckmaterialien geschützt, vgl. [30].

2.2.6 Neigungen des Überbaus – Maßnahme N

Die Globalverformung des Überbaus wird mit Hilfe von Neigungssensoren (Inklinometern) an sechs Positionen entlang der Brücke gemessen. Zusätzlich zur Neigung in Längsrichtung wird an zwei Positionen die Neigung in Querrichtung erfasst, um insgesamt das statische Verformungsverhalten an den Stützenanschlüssen und die Endtangentenverdrehung zu erfassen. Hier kommen hoch genaue Servoneigungssensoren mit einer möglichst guten Langzeitstabilität

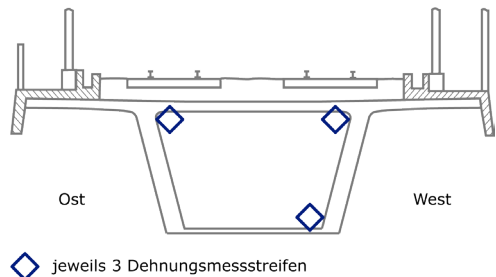


Bild 6: Querschnitt mit Anordnung der Dehnungsmessstreifen, Rosette am Boden im Querschnitt Feldmitte auf der Ostseite und im Anschluss der V-Stütze auf der Westseite

tät und einem Messbereich von $\pm 1^\circ$ (längs) bzw. $\pm 3^\circ$ (quer) zum Einsatz. Der gewählte Sensortyp erreicht eine Grenzfrequenz von 3 Hz und ist damit in der Lage, die untersten Eigenfrequenzen mit zu erfassen, die z. B. bei einer Zugüberfahrt angeregt werden.

Zur Installation wurden die Neigungssensoren mit einer feinjustierbaren Halterung auf festgelegte Neigungen zu Messbeginn ausgerichtet und auf die Betonfläche geklebt.

3 Installation und erste Monitoring-ergebnisse

Das konzipierte Monitoringsystem wurde an der Maintalbrücke im Juli 2020 in zwei Installationseinsätzen im Hohlkasten und im Gleisbereich installiert. Die Stromversorgung wird vom Stellwerk am südlichen Widerlager vom Projektpartner DB bereitgestellt. Das Messsystem ist über fünf dezentrale Messknoten über das 299 m lange Bauwerk verteilt. Der am umfangreichsten instrumentierte Messquerschnitt ist in Bild 7 abgebildet. Die Daten werden permanent über eine LTE-Mobilfunkverbindung an die BAM übertragen.

Die dominierenden Verkehrseinwirkungen sind die Überfahrten der ICE auf der Hochgeschwindigkeitsstecke, die eine reproduzierbare Anregung, mit geringen Unterschieden in den Achslasten bei gleichem Zugtyp darstellen. Messwerte einer typischen Zugüberfahrt sind in Bild 8 und Bild 9 dargestellt. Anhand der Dehnungsmessungen kann die Beanspruchung des Überbaus erkannt werden.

Das mittels eines Gauß-Filters geglättete Signal der Längsneigung des Oberbaus an einem landseitigen Stiel der V-Stütze zeigt die statische Verformung einer Zugüberfahrt. Die Dynamik der Neigungssensoren ist begrenzt durch die niedrige Grenzfrequenz, zeigt aber das An- und Nachschwingverhalten der ersten Eigenfrequenzen, was auch im Zeitverlauf des vertikalen Geophons in Stromfeldmitte zu sehen ist. Durch die Geophone werden auch höhere Frequenzen bei der Anregung durch Zugüberfahrt aufgenommen.

Bei der Betrachtung von Daten über einen Zeitraum von zweieinhalb Monaten (siehe Bild 10) lassen sich sowohl tägliche als auch saisonale Variationen feststellen. Die Betontemperatur in der Hohlkastendecke zeigt ein trägeres Ver-

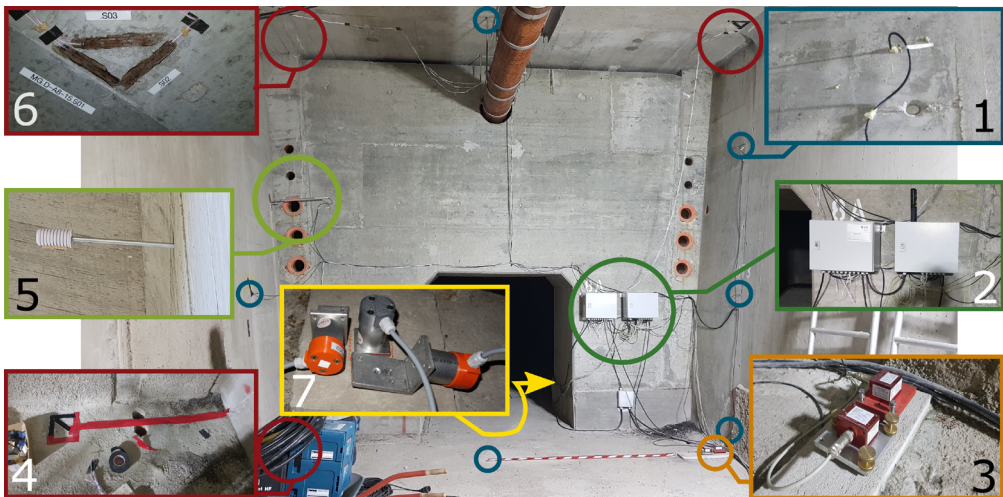


Bild 7: Messquerschnitt im Anschluss der V-Stütze ans Hauptfeld, Achse 8, stromseitig: (1) Temperatursensor im Beton (T), (2) dezentraler Knoten des Messsystems, (3) Neigungssensoren (N), (4) Dehnungsmessstreifen mit Abdeckung (D), (5) Lufttemperatursensor außen (T), (6) Dehnungsmessstreifen vor Abdeckung (D), (7) Geophone 3-achsrig (V)

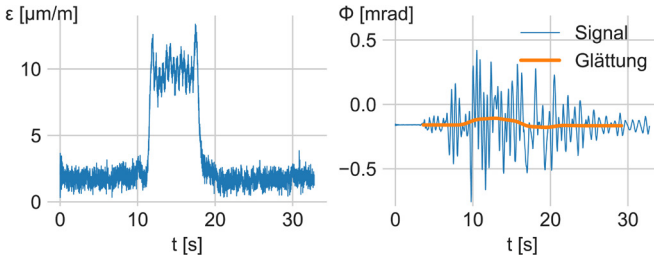


Bild 8: Zeitverlauf einer Zugüberfahrt; links: Längsdehnungen in Feldmitte des Hauptfelds auf der Bodenplatte des Hohlkastens, rechts: Längsneigungen des Überbaus am landseitigen Stiel der V-Stütze

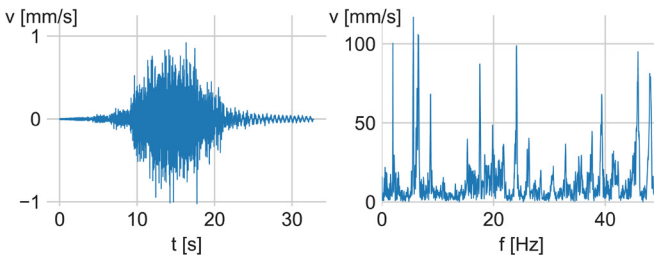


Bild 9: Geophonmessungen; links: Zeitverlauf eines vertikalen Geophons in Feldmitte des Hauptfelds bei einer Zugüberfahrt, rechts: zugehöriges Amplitudenspektrum

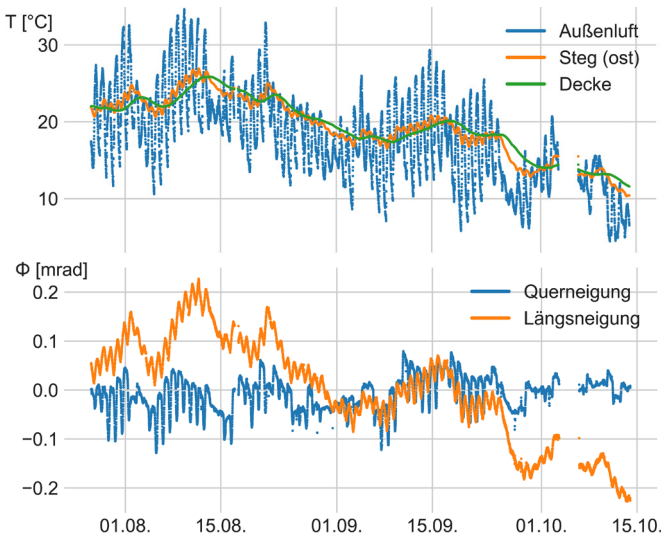


Bild 10: Messdatenverlauf über zweieinhalb Monate; oben: ausgewählte Temperaturen und unten ambiante Neigungen (1 Datenpunkt pro 10 Minuten)

4 Ausblick

Als Teil des Forschungsprojektes AISTEC wurde ein globales, sensorbasiertes Monitoring der Maintalbrücke Gemünden konzipiert und umgesetzt, mit dem während des Betriebes der Brücke potenziell kritische Tragwerksschäden bzw. -veränderungen automatisch identifiziert werden sollen. Als nächster Schritt werden kombinierte bild- und sensorbasierte Messungen der Verformungen der Brücke bei definierten Überfahrten mit Belastungszügen durchgeführt. Während der Überfahrten werden ebenfalls (wie schon vor der Inbetriebnahme der Brücke) die Verdrehungen eines Betongelenkes mit temporär im Gelenk installierten Wegsensoren gemessen.

Die kontinuierlich und während der Überfahrten mit Belastzügen erfassten Daten werden dann verwendet, um deterministische und probabilistische Tragwerksmodelle der Brücke anzupassen bzw. zu kalibrieren.

Anschließend werden anhand der kalibrierten Tragwerksmodelle durch Simulation von Bauwerksschäden und Simulation von entsprechenden Messdaten die Leistungsfähigkeit der im Projekt verwendeten Verfahren zur Schadensidentifikation untersucht und verglichen sowie weiterfüh-

halten als die im Hohlkastensteg. Sowohl Längs- als auch Querneigung variieren täglich, allerdings besitzt nur die Längsneigung ein ausgeprägtes saisonales Verhalten.

rend eine Optimierung des Messaufbaus durchgeführt. Des Weiteren werden die Konzepte und Methoden zur Integration von Monitoringdaten in eine prädiktive Planung von Inspektionen

und Instandhaltungsmaßnahmen auf große Spannbetonbrücken übertragen.

5 Danksagung

Das Teilvorhaben *Anwendung von kontinuierlichen sensorbasierten Monitoringverfahren zur Bewertung von Infrastrukturbauwerken des Verbundprojektes Bewertung alternder Infrastrukturbauwerke mit digitalen Technologien (AISTEC)* wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen 13N14658). Wir danken dem BMBF, dem Projektträger VDI Technologiezentrum, dem koordinierenden Projektpartner BUW und den weiteren Projektpartnern DB Netz AG und LAP für die Unterstützung und Zusammenarbeit im Projekt.

Des Weiteren danken wir unseren Kolleginnen und Kollegen Deborah Nerger, Eva Viefhues, Ives Alich, Fred Ziegler und Jens Wöstmann für die Unterstützung bei der Konzipierung und Umsetzung des Monitorings der Maintalbrücke Gemünden.

Literatur

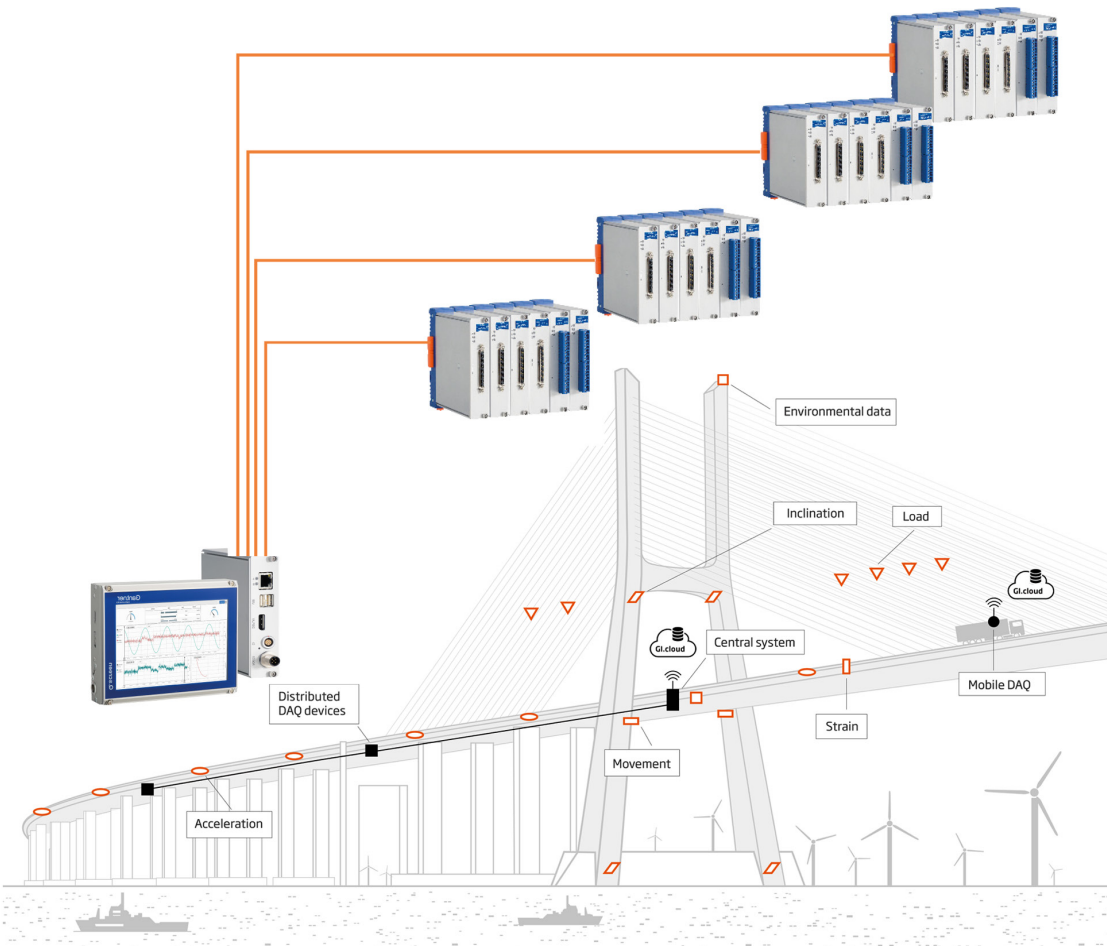
- [1] Möller, J.; Zierer, M.: Autobahns and jobs: A regional study using historical instrumental variables. *Journal of Urban Economics* 103 (2018), S. 18–33
- [2] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung.
- [3] DB Netz AG (Hrsg.): Richtlinie 804.8001: Inspektion von Ingenieurbauwerken; Allgemeine Grundsätze. Version 1.0, 2011
- [4] Haardt, P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. Erschienen in: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)*, Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 22, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 1999
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): AISTEC: Moderne Technologien für die Erhaltung von Infrastrukturbauwerken. erschienen in: Informationsbrief zur zivilen Sicherheitsforschung 06/20, 2020
- [6] Morgenthal, G.; Hallermann, N.; Kersten, J.; Taraben, J.; Debus, P.; Helmrach, M.; Rodehorst, V.: Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges. *Automation in Construction* 97 (2019), S. 77–95
- [7] Hille, F.: Subspace-basierte Detektion von Ermüdungsschäden an Jacket-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen. Diss., TU Berlin, 2018
- [8] Viefhues, E.; Döhler, M.; Hille, F.; Mevel, L.: Asymptotic analysis of subspace-based data-driven residual for fault detection with uncertain reference. *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018) 24, S. 414–419
- [9] Viefhues, E.; Döhler, M.; Zhang, Q.; Hille, F.; Mevel, L.: Subspace-based damage detection with rejection of the temperature effect and uncertainty in the reference. In: Amador, S. D. R.; Brincker, R.; Katsanos, E. I.; Aenlle, M. L.; Fernández, P. (Hrsg.): *Proc. of 8th Operational Modal Analysis Conf. (IOMAC'19)*, 12.–14.05.2019 in Kopenhagen (Dänemark), 2019, S. 229–240
- [10] Rücker, W.; Said, S.; Schmid, W.; Rohrmann, R.: Zustandsüberwachung der Gärtnerplatzbrücke in Kassel unter Verwendung gemessener Einflusslinien. In: *VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): Tagungsband zur 3. VDI Fachtagung Baudynamik*, 14./15.05.2009 in Kassel, Düsseldorf, 2009, S. 81–92
- [11] Simon, P.; Schneider, R.; Viefhues, E.; Said, S.; Herrmann, R.; Baeßler, M.: Vibration-based Structural Health Monitoring of a reinforced concrete beam subject to varying ambient temperatures using Bayesian Methods. In: Papadrakakis, M.; Fragiadakis, M.; Papadimitriou, C. (Hrsg.): *Proc. of the XIth Int. Conf. on Structural Dynamics (EURODYN 2020)*, 23.–26.11.2020 in Athen (Griechenland), Athen, 2020, S. 1254–1271
- [12] Simon, P.; Schneider, R.; Baeßler, M.: Bayesian system identification of a reinforced concrete beam subject to temperature variations based on static response data. In: Yokota, H.; Frangopol, D. M. (Hrsg.): *Proc. of the 10th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2020)*, Beitrag angenommen, Veranstaltung in Sapporo (Japan) auf 11.–15.04.2021 verlegt
- [13] Kulik, A.; Kunert, A.; Beck, S.; Reichel, R.; Blach, R.; Zink, A.; Froehlich, B.: C1x6: a stereoscopic six-user display for co-located collaboration in shared virtual environments. In: *Association for Computing Machinery (Hrsg.): Proc. of the 2011 SIGGRAPH Asia Conf. (SA'11)*, 12.–15.12.2011 in Hong Kong (China), New York, 2011, S. 188:1–188:11
- [14] Fischer, J.; Straub, D.; Schneider, R.; Thöns, S.; Rücker, W.: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen. Erschienen in: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)*, Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 99, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 2014
- [15] Schneider, R.; Fischer, J.; Bügler, M.; Nowak, M.; Thöns, S.; Borrmann, A.; Straub, D.: Assessing and updating the reliability of concrete bridges subjected to spatial deterioration – principles and software implementation. *Structural Concrete* 16 (2015) 3, S. 356–365

- [16] Schneider, R.: Time-variant reliability of deteriorating structural systems conditional on inspection and monitoring data. Diss., TU München, 2019
- [17] Schneider, R.: Effect of repair models on risk-based optimal inspection strategies for support structures of offshore wind turbines. In: Helmerich, R.; Ilki, A.; Motavalli, M. (Hrsg.): Proc. of the 5th Conf. on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2019), 27.–29.08.2019 in Potsdam, 2019, Beitrag Th.2.A.4, 8 S. – <https://www.ndt.net/article/smar2019/papers/Th.2.A.4.pdf>
- [18] Wenner, M.: Messtechnische Validierung der Modelle zum Langzeitverhalten der Gleis-Tragwerks-Interaktion. Diss., Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2019
- [19] Herrmann, R.; Hille, F.; Said, S.; Sterthaus, J.; Müller, K.; Quercetti, T.; Wille, F.; Paffenholz, J.-A. und Baeßler, M.: Implementing a Structural Health Monitoring system using digital models of the BAM large drop test facility in Horstwalde. In: Papadarakis, M.; Fragiadakis, M.; Papadimitriou, C. (Hrsg.): Proc. of the XIth Int. Conf. on Structural Dynamics (EURODYN 2020), 23.–26.11.2020 in Athen (Griechenland), Athen, 2020, S. 1293–1304
- [20] Schacht, G.; Käding, M.; Bolle, G.; Marx, S.: Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 2, S. 85–94 – DOI: 10.1002/best.201800087
- [21] Leonhardt, F.: Mainbrücke Gemünden – Eisenbahnbrücke aus Spannbeton mit 135 m Spannweite. Beton- und Stahlbetonbau 81 (1986) 1, S. 1–8
- [22] Deutsche Bundesbahn Versuchsanstalt München: Messungen zur statischen Probelastung der Maintalbrücke bei Gemünden in km 291,411 der NBS Hannover – Würzburg unter einem Versuchszug und unter einem Schotterzug, technischer Bericht, 1987 (unveröffentlicht)
- [23] Schacht, G.; Marx, S.: Unbewehrte Betongelenke – 100 Jahre Erfahrung im Brückenbau. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010) 9, S. 599–607 – DOI: 10.1002/best.201000030
- [24] Kammer, D. C.: Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 14 (1991) 2, S. 251–259 – DOI: 10.2514/3.20635
- [25] Rohrmann, R.; Baeßler, M.; Said, S.; Schmid, W.; Rücker, W. F.: Structural causes of temperature affected modal data of civil structures obtained by long time monitoring. In: Wicks, A. L.; DeMichele, D. J. (Hrsg.): Proc. of the IMAC-XVIII: A Conf. on Structural Dynamics, 07.–10.02.2000 in San Antonio (Texas, USA), Bethel (Connecticut, USA), 2000, 7 S.
- [26] Baeßler, M.; Hille, F.: A study on diverse strategies for discriminating environmental from damage based variations in monitoring data. In: Powers, N.; Frangopol, D. M.; Al-Mahaidi, R.; Caprani, C. (Hrsg.): Proc. of the 9th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2018), 09.–13.07.2018 in Melbourne (Australien), London, 2018, S. 1557–1564
- [27] Kind, T.; Kurz, J. H.; Taffe, A.; Wöstmann, J.: Ortung und Unterscheidung von Querspanngliedern hinter schlaffer Bewehrung mit dem Radarverfahren in einer Fahrbahnplatte. In: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP, Hrsg.): Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2013, 06.–08.05.2013 in Dresden, 2013, Beitrag Mi.1.B.3, 8 S. – <https://www.ndt.net/article/dgzfp2013/papers/mi1b3.pdf>
- [28] Fouad, N. A.: Rechnerische Simulation der klimatisch bedingten Temperaturbeanspruchungen von Bauwerken. Diss., TU Berlin, 1998
- [29] DIN EN 60751:2009-05: Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC 60751:2008); Deutsche Fassung EN 60751:2008
- [30] Herrmann, R.; Stockmann, M.; Marx, S.: Untersuchungsstrategie zur Bewertung der Langzeitstabilität von Dehnungsmessstreifen. Bautechnik 92 (2015) 7, S. 451–460 – DOI: 10.1002/bate.201500018

Bildquellen

Bild 1: Ronald Schneider
 Bilder 2–6, 8–10: Patrick Simon
 Bild 7: Ralf Herrmann

Distributed I/O-Modules and Cloud Solutions for Structural Health Monitoring



Das 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ (SEUB) fand am 08. März 2021 als digitale Veranstaltung an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

In der Keynote Lecture wurde über Versuche an einem Brückenbauwerk sowohl in situ als auch im Prüflabor berichtet – eine Verifizierung, die nur selten vorkommt. Danach spannte sich der thematische Bogen über die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken, berührungslose Messverfahren im Praxistest, über Monitoring und schwingungsbasierte Messungen an Bauwerken hin zu faseroptischen Messsystemen und ihren Einsatzmöglichkeiten bei der Risserfassung. In weiteren Beiträgen wurde eine neue Methode zur verbesserten Bestimmung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt, über ein Verfahren zur Spanndrahtbruchdetektion mittels Schallemission und über das Potential des kathodischen Korrosionsschutzes berichtet. Mit einem Bericht über eine erfolgreiche Probelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke endete die Tagung.

Das 12. SEUB ist für März 2023 geplant.

Der vorliegende Tagungsband ist als digitale Version Open Access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden abrufbar.