



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau [www.massivbau.tu-dresden.de](http://www.massivbau.tu-dresden.de)



# 29. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG  
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

11./12. MÄRZ 2019

© 2019 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: Beyer, Kurt: Südthailand. Zweibogige Betonbrücke im Bau, 1912/1913  
Foto: SLUB Dresden / Deutsche Fotothek / Kurt Beyer

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

ISSN 1613-1169  
ISBN 978-3-86780-585-8



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

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

---

## **Tagungsband**

# **29. Dresdner Brückenbausymposium**

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

TUDIAS GmbH

11. und 12. März 2019

## Inhalt

<b>Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium .....</b>	<b>9</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen, Rektor der TU Dresden</i>	
<b>Verleihung der Wackerbarth-Medaille .....</b>	<b>13</b>
<b>Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen .....</b>	<b>14</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
<b>Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet .....</b>	<b>17</b>
<i>Dr.-Ing. Silke Scheerer, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
<b>Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau .....</b>	<b>25</b>
<i>TRDir Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn</i>	
<b>Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks – Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas .....</b>	<b>29</b>
<i>Dipl.-Ing. Joern Seitz, Dipl.-Ing. (FH) Martin Pohl</i>	
<b>Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau.....</b>	<b>47</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Dr.-Ing. David Sanio, Dr.-Ing. Steffen Schindler</i>	
<b>Verkehrsinfrastruktur für Hamburg – Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen.....</b>	<b>59</b>
<i>Dr.-Ing. Christoph Vater</i>	
<b>Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung von neuen Verfahren im Brückenbau .....</b>	<b>73</b>
<i>o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser, Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Eichwalder</i>	
<b>Stahlverbund-Großbrücken mit oberliegender Fahrbahn als Querschnitte mit Teilfertigteilen und Schrägstreben bzw. Konsolen .....</b>	<b>85</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, Dipl.-Ing. Gregor Gebert</i>	
<b>Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik .....</b>	<b>101</b>
<i>Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl-Eugen Kurrer</i>	
<b>Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken – Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung? .....</b>	<b>129</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer; Sebastian Gehrlein, M.Sc.; Nicholas Schramm, M.Sc.; Marcel Nowak, M.Sc.</i>	
<b>Was tun, wenn Annahmen und Realität nicht zusammenpassen? .....</b>	<b>149</b>
<i>Dr.-Ing. Hans-Gerd Lindlar, Dr.-Ing. Stefan Franz, Dipl.-Ing. Lars Dietz, Dr.-Ing. Bastian Jung, M. Eng. Tarik Tiyma</i>	
<b>Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken .....</b>	<b>161</b>
<i>Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Anne Rausch, Dr.-Ing., MBA und Eng. Marc Zintel, Dipl.-Ing., MBA Luzern Christian Linden</i>	
<b>Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton .....</b>	<b>173</b>
<i>Dr.-Ing. Frank Jesse, Dipl.-Ing. Andreas Apitz, Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich</i>	
<b>Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen .....</b>	<b>185</b>
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i>	
<b>Chronik des Brückenbaus .....</b>	<b>197</b>
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	
<b>Inserentenverzeichnis .....</b>	<b>207</b>

# Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark<sup>1</sup>, Dr.-Ing. David Sanio<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Steffen Schindler<sup>3</sup>

## 1 Einleitung

Monitoring bezeichnet ein kontinuierliches Überwachen oder Beobachten anhand von Messdaten [1]. Es wird bei Bauwerken häufig eingesetzt, um Tragwerkseigenschaften, die durch übliche Rechenmodelle nicht oder nur mit Unsicherheit zu erfassen sind, realitätsnah zu ermitteln. Typische Messziele liegen daher in relevanten Größen für die Tragfähigkeit oder die Gebrauchstauglichkeit.

Monitoring wird häufig bei Bestandsbauwerken eingesetzt. Motivation dazu liefert die sogenannte konzeptionelle Alterung (*conceptual aging*) der Tragwerke, die durch den stetig vorschreitenden Stand der Technik mehr und mehr (rechnerisch) zurückfallen und entsprechende Defizite in Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit gegenüber dem heutigen Stand an Anforderungen aufweisen können. Ein Ausnutzen von rechnerisch durch Modelle nicht berücksichtigten Reserven bietet sich an. Beispielhaft sei das Messen von Schwingspielen an Spanngliedern zur Abschätzung ausreichender Ermüdungssicherheit genannt. Modelle liefern hier große rechnerische Ungenauigkeiten, die sich durch direktes Messen am sensitiven Bauteil – dem Spannglied selber – umgehen lassen. Dann fließen realistisch (kleinere) Eingangswerte in die Ermüdungsprognosen ein.

Weitere Motivationen für ein Monitoring können sich aus dem Wunsch nach größenübergreifender Geometrieerfassung ergeben, wie bei geodätischer Erfassung einzelner Abmaße, eines gesamten Tragwerks bis hin zu Gruppen von Tragwerken. Vorausschauend wird Monitoring mehr und mehr eingesetzt, um neuralgische Stellen eines Tragwerks von Anfang an zu überwachen und daraus lebensdauerorientiert die Tragwerkserhaltung und -instandsetzung zu konzeptionieren.

Die folgende Auflistung kategorisiert häufig genutzte Monitorings nach dem Ziel einer Messung:

- ❑ (transientes) Aufmaß von Geometrien, z. B. zur Verfolgung von Verformungen oder zur Bestimmung von Querschnitten,
- ❑ Spannungs- oder Dehnungsmessung an sensitiven Bauelementen, wie an Spanngliedern, hoch belasteten Knoten, Kontaktpunkten o. ä.,
- ❑ Ermittlung realistischer Trageigenschaften von Systemen, wie bei Mauerwerksbrücken, vielfach statisch unbestimmten, gebetteten Tragwerken oder nachträglich ergänzten Querschnitten,
- ❑ Messen von relevanten Einwirkungen, wie Temperaturgradienten im Bauwerk oder realen Verkehrsbelastungen,
- ❑ Bestimmung von aktuellen Materialeigenschaften an Proben,
- ❑ Ermittlung des Schwingungsverhaltens von Tragwerken oder Einzelbauteilen (z. B. Hänger),
- ❑ Verfolgen von Schädigungen wie Rissbewegungen oder Chloridmigrationen.

Durch Monitoring entstehen große Mengen an Daten. Sie sind ohne gezielte Aufarbeitung, Auswertung und Interpretation kaum nutzbar. Dies gilt gerade für raum- und zeitabhängige Daten. Visualisierungen durch graphische Aufbereitung (2D, 3D), zeitveränderliche Videoanalysen oder die Umsetzung in *Virtual-Reality*-Umgebungen (VR-Umgebungen) bieten sich an, insbesondere um Interaktionen zwischen einzelnen Parametern zu verdeutlichen.

Im Beitrag wird die Verknüpfung von Monitoring und Visualisierung an zwei Beispielen dargestellt. Zum einen an einer Bestandsbrücke aus Spannbeton – Ziel ist es hier, durch Messungen der Geometrie, Materialproben, Erfassung der Einwirkungen und Probelastungen das Modell des Tragwerks in seiner Idealisierung zu verbessern und dann Prognosen aus

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum

<sup>2</sup> Ingenieurbüro Grassl GmbH, Düsseldorf

<sup>3</sup> Hochtief Engineering GmbH – Consult IKS, Frankfurt am Main

diesem verbesserten Modell Basisrechnungen nach üblichen Vorschriften und direkten Messungen an Spanngliedern gegenüberzustellen. Zum anderen wird das flächendeckende Setzungsmonitoring von Gebäuden oder Brücken aus Satellitenüberflügen vorgestellt. Ziel ist es dabei, großflächige geometrische Veränderungen zu erkennen, wie sie aus Setzungsmulden entstehen können.

## 2 Monitoring an Bestandsbrücken

### 2.1 Verfahren zur Bewertung

Für die Zustandserfassung von Ingenieurbauwerken stehen vielfältige Messverfahren zur Wahl. Sie sind auf die Messaufgabe bzw. die kritische Zielgröße abzustimmen und reichen über singuläre Messungen an einem einzelnen Zeitpunkt, die zur Aktualisierung und Kalibrierung des Berechnungsmodells verwendet werden [2], bis hin zum quasi direkten Monitoring der Zielgröße – wie der Dehnung des Spannstahls unter Ermüdungsbeanspruchung [3]. Zur Kalibrierung des Berechnungsmodells können im Wesentlichen die Geometrie, Materialkennwerte, Vorspannkräfte und Schäden im Tragwerk erfasst werden. Darüber hinaus finden Belastungsversuche unter bekannter Last und die simultane Messung maßgebender Bauwerksreaktionen, wie Verformungen, Verschiebungen und Verdrehungen, vermehrt Anwendung [4].

**Geometrieerfassung.** Mit visuellen Verfahren kann die Geometrie mit hoher Genauigkeit erfasst werden. Ein 3D-Laserscanning erfolgt im Regelfall terrestrisch von festen Standorten aus mit Abweichungen im Submillimeterbereich. Photogrammetrische Verfahren generieren die geometrischen Informationen aus Fotoaufnahmen. Dies ist beispielsweise mit unbemannten Fluggeräten (UAV) oder aus einzelnen Fotoaufnahmen von verschiedenen Standpunkten aus möglich [5]. Geometrieaufmaße sind u. a. bei Nachrechnungen oder dem Rückbau von Brücken sinnvoll, um aus der genaueren Kenntnis der Struktur mit reduzierten Teilsicherheitsbeiwerten für die Eigengewichtslasten zu operieren, vgl. [6].

**Materialparameter und Schädigungen.** Nacherhärtung bei Betonen oder Überfestigkeiten bei Stählen können rechnerisch ungenutzte Tragreserven aktivieren. Derartige Materialkennwerte lassen sich zerstörend anhand von entnommenen Materialproben (Bohrkerne, Stahlproben) oder zerstörungsfrei – etwa mit

dem Rückprallhammer – ermitteln. Zerstörungsfreie Verfahren gehen allerdings mit geringeren Genauigkeiten einher und prüfen nur das elastische Materialverhalten, aus dem Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit gezogen werden. Zudem ist etwa die Rückprallhammermethode nicht uneingeschränkt anwendbar; sie ist nur bei jungem Beton oder geringer Karbonatisierungstiefe zulässig [7].

Im Fokus aktueller Forschungsvorhaben stehen Methoden, die Schädigungen wie Risse oder Änderungen der Materialeigenschaften anhand der Schallemission mittels Impuls-Echo oder Radar detektieren, z. B. [1]. Etabliert sind sie bereits zur Detektion von Lage und Menge der Bewehrung im Beton.

**Verkehrseinwirkungen.** Die genauesten Informationen über die Tragwerksreaktion unter realer Belastung gibt ein direktes Monitoring der Belastungen [8] oder der Bauwerksreaktionen [9]. Dies ist insbesondere bei Straßenbrücken unter transientser Belastung von Vorteil, da Auswertungen u. a. in [3] zeigen, dass reale Beanspruchungen erheblich von den normativen Annahmen abweichen können. Vorrangig in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und der Ermüdung können dadurch deutliche Verbesserungen erzielt werden. In den folgenden Abschnitten sind dazu zwei Verfahren mit Ergebnissen sowie deren Auswertung dargestellt. Die Messungen erfolgten an einem Referenzobjekt, der Hochstraße Pariser Straße in Düsseldorf (vgl. Bild 2 in Abschnitt 2.3), vgl. [9].

### 2.2 Temperaturmonitoring und Verwendung von Klimadaten

Bei statisch unbestimmten Brückentragwerken erzeugen Temperaturänderungen Zwangsspannungen. Der konstante Anteil und zwei lineare Temperaturgradienten um die Querschnittsachsen bilden das nichtlineare Temperaturfeld vereinfachend für die Bemessung ab. Der verbleibende, nichtlineare Anteil wird i. d. R. vernachlässigt. Gemäß den gängigen Regelwerken sind jeweils positive und negative charakteristische Werte anzusetzen. Tatsächlich ist die Temperatureinwirkung jedoch eine transiente Einwirkung, die sich etwa durch eine Häufigkeitsverteilung weitaus realistischer beschreiben lässt.

Durch Messung an mehreren Stellen – gleichmäßig verteilt über den Querschnitt – können das Temperaturfeld bzw. der Gradient mittels Interpolation bestimmt werden. Als Sensoren

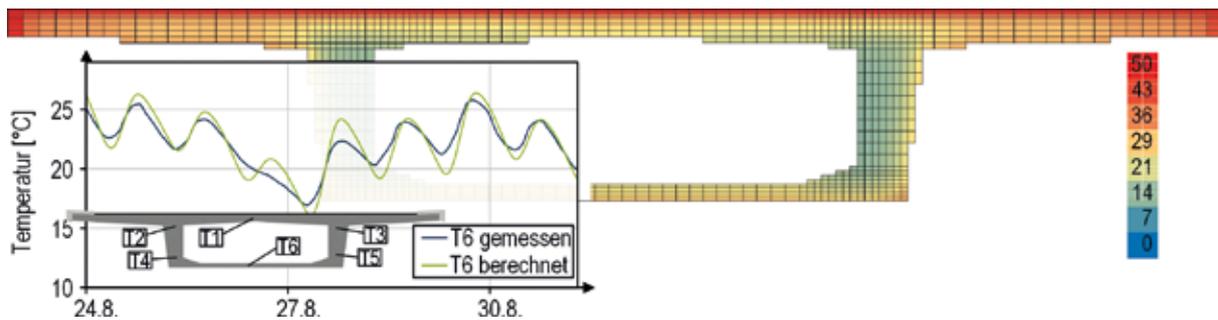


Bild 1 Rechnerische Temperaturverteilung über einen Hohlkastenquerschnitt (oben) und Vergleich errechneter und gemessener Temperaturverläufe an der Bodenplatte (links) Grafik: David Sanio

kommen oft sogenannte Thermolemente zum Einsatz. Diese erfassen eine Temperaturänderung durch eine Kontaktspannung am Thermopaar, zwei miteinander verbundenen, unterschiedlichen Leitern. Typisch sind K-Elemente mit dem Thermopaar Nickel-Chrom/Nickel. Bei Betonbrücken werden sie in Bohrlöcher möglichst mittig in den Querschnittsteil gesetzt und die Bohrlöcher verschlossen. Der Kontakt des Sensors zum Beton ist sicherzustellen. Eine Messrate von einer Messung pro Stunde reicht für den Tagesgang aus. Als Messzeitraum sollte mindestens ein Jahr veranschlagt werden, um saisonale Unterschiede zu erfassen; empfehlenswert sind drei Jahre, um eine statistische Signifikanz zu erzielen.

Für Fälle, in denen der Messzeitraum nicht ausreicht, wurde in [10] ein Verfahren entwickelt, um nichtlineare Temperaturfelder für lange Zeiträume aus frei zugänglichen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes zu errechnen. Die Berechnung berücksichtigt Bewölkungen, Umgebungstemperaturen, Sonnenauf- und -untergang, Querschnittsgeometrie, Materialeigenschaften, Fahrbahnbeläge, Kappen, Abstrahlungen umgebender Bauwerke und weitere Einflüsse, vgl. [10]. Eine zumindest kurzzeitige Messung zum Abgleich von Berechnung und Messung ist dabei zur Kalibrierung sinnvoll. Bild 1 zeigt exemplarisch eine rechnerisch ermittelte, stark nichtlineare Temperaturverteilung über den Querschnitt und einen Vergleich von errechneten zu gemessenen Temperaturverläufen über den Zeitraum einer Woche. Es zeigt sich eine geringe – aber konservative – rechnerische Überschätzung der Temperaturgradienten.

Durch langzeitige Auswertung dieser Temperaturfelder kann die Temperaturhistorie der Brücke ermittelt werden. Zusammengefasst ergibt sich ein Histogramm der Temperaturgradienten, das etwa in den Ermüdungsnachweis integriert werden kann, vgl. [3], [5].

## 2.3 Dehnungsmessung zur Ermüdungsprognose

Tragwerksberechnungen sind mit einer Vielzahl ungenauer Einflüsse behaftet – beginnend bei den Einwirkungen aus Verkehrslasten und den zuvor beschriebenen Temperaturen bis hin zu Materialeigenschaften und Modelleinflüssen. Durch das direkte Monitoring am maßgebenden Tragelement kann die sich fortpflanzende und akkumulierende Unsicherheit in den einzelnen Rechenschritten reduziert werden [11]. Etwa ein direktes Dehnungsmonitoring am Spannstahl umgeht die Einflüsse aus dem Lastmodell, den vereinfachenden Annahmen der Rechenmodelle und des Teilsicherheitskonzepts. Für die genannte Hochstraße konnte die Ermüdungslebensdauer dadurch um mehr als 50 % gegenüber einem umfänglich kalibrierten Rechenmodell verlängert werden – mit signifikant geringerem Aufwand.

Für ein direktes Dehnungsmonitoring kommen i. d. R. widerstandsbasierte Dehnungsmessstreifen (DMS) oder optische Sensoren mit Glasfasern zum Einsatz. Die faseroptischen Sensoren zeichnen sich durch eine geringere Störanfälligkeit aus. Sie sind insbesondere beim Einsatz in urbanen Gebieten mit elektrischen Störquellen oder etwa in der Nähe von Oberleitungen vorteilhaft. Zudem können mehrere Sensoren über eine einzelne Glasfaser erfasst werden. Dies ist dann sinnvoll, wenn die Sensoren in großem Abstand zueinander liegen, weil der Material- und Verkabelungsaufwand reduziert wird; nachteilig ist dann die mangelnde Redundanz bei Beschädigung der Faser.

Zu den optischen Sensoren zählen solche mit punktuellen Messstellen oder kontinuierlicher Messwerterfassung entlang der Faser. Zu den erstgenannten zählen die Faser-Bragg-Gitter (FBG). Die kontinuierliche Dehnungs- und Temperaturmessung ist ein neueres Verfahren im Bauwesen. Sie erfasst die von jeder Stelle der Faser reflektierte Rayleigh-Streuung [12].

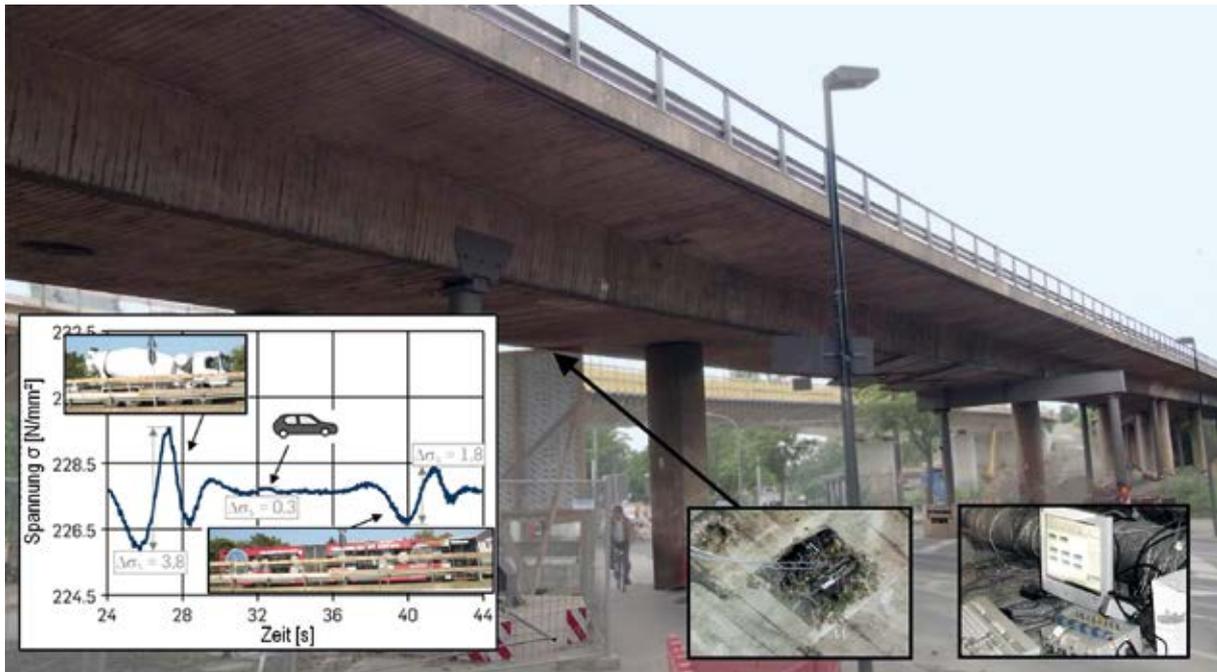


Bild 2 Einrichtung zum Dehnungsmonitoring an einer Hochstraße (rechts) und Änderungen der Spannstahlspannung aus PKW- bzw. LKW-Überfahrt (links) Fotos und Grafik: David Sanio

Durch eine Dehnungsänderung dort verändert sich auch die Rayleigh-Streuung. Auflösung, Abtastfrequenz und Messstrecke bedingen sich. Möglich sind Auflösungen bis in den Millimeterbereich, wodurch das Messen „am Riss“ – also das Auffinden der maßgebenden Stelle mit Spannungsspitze im Spannstahl – deutlich verbessert wird. Das Verfahren befindet sich zurzeit noch in der Entwicklung und ist bislang noch in seiner Abtastrate begrenzt [3].

Ein Auszug des Dehnungsmonitorings mittels DMS an der Hochstraße ist in Bild 2 dargestellt.

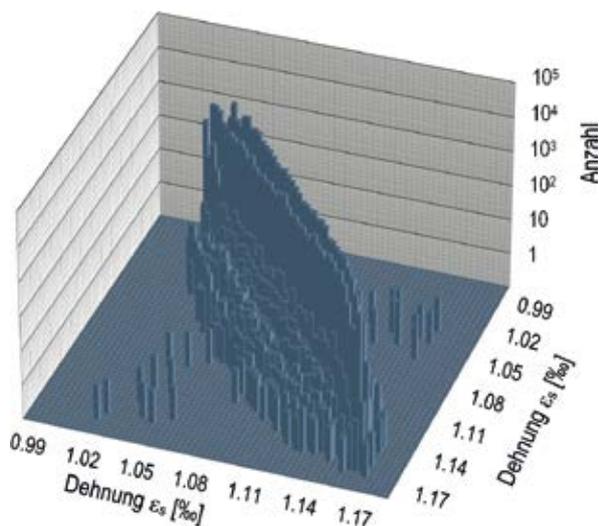


Bild 3 Häufigkeitsverteilung von Dehnungsschwingbreiten im Spannstahl aus einem vierwöchigen Monitoring am Spannstahl unter Verkehr Grafik: David Sanio

Durch den Abgleich mit einer visualisierenden Videoaufnahme kann das Messsignal besser interpretiert werden. Erwartungsgemäß ergeben sich maßgebende Schwingbreiten aus dem Schwerverkehr.

Zur Auswertung mit Klassier- und Zählverfahren sind die Messdaten in eine Folge von Umkehrpunkten zu überführen. Ein kombinierter Algorithmus dazu ist die Rainflow-HCM-Methode [13]. Das Ergebnis der Zählung ist in Bild 3 in Form einer Säulenmatrix dargestellt. Nach oben offene Schwingungstäler sind links der Hauptdiagonale, nach unten offene Schwingungsberge rechts davon aufgeführt. Erwartungsgemäß treten weitgehend kleine Schwingbreiten aus PKW-Verkehr nahe der Diagonalen auf. Die für die Ermüdung maßgebenden Ausschläge mit großem Diagonalenabstand sind weit geringer und entstammen dem LKW-Verkehr.

Der Messzeitraum ist hier auf vier Wochen begrenzt. Daraus wird eine Verteilung der Spannungsschwingbreiten abgeleitet (blaue Säulen August, Bild 4 oben). Die Hochrechnung auf ein Jahr (grüne Säulen) und Jahressumme (graue Säulen) und dann auf die gesamte Nutzungsdauer erfolgte auf Basis von detaillierten Verkehrszählungen. Diese standen für den Messzeitraum und die letzten zwei Jahre von einer automatischen Zählanlage tagesgenau und für die vergangenen 40 Jahre mit hochgerechneten Jahreswerten zur Verfügung. So gelingt die Extrapolation des Belastungsspektrums (Bild 4,

unten). Dargestellt sind die ermittelten Verteilungen von Schwingbreiten über die Bestandsjahre ab 1960 und die Prognose bis ca. 2070.

Einflüsse aus Kriechen und Schwinden verändern dabei die Schwingbreite infolge einer LKW-Überfahrt über die Zeit – trotz gleicher Achslasten. Dieser Einfluss lässt sich über zeitabhängige Skalierungsfaktoren erfassen. Dazu wird die Schwingbreite unter Berücksichtigung jeweils wirksamer zeitabhängiger Verluste ermittelt. Diese veränderliche Schwingbreite wird auf den Referenzwert zum Zeitpunkt des Monitorings skaliert. Mit dem mittleren Verlauf des Skalierungsfaktors kann das gemessene Belastungsspektrum auf die gesamte Bauwerkshistorie und unter Annahme zukünftiger Verkehrsmengen bis zum Erreichen der Lebensdauer prognostiziert werden (Bild 4, unten).

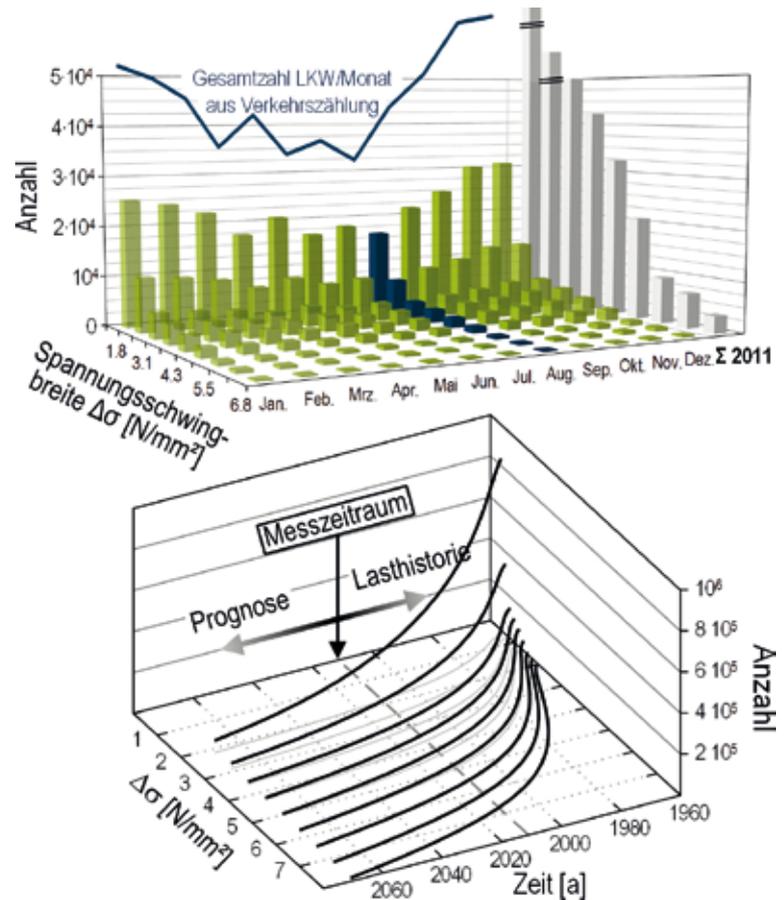


Bild 4 Schwingbreitenhistogramm; oben: gemessen (blaue Säulen), Extrapolation über 12 Monate (grüne Säulen) und Jahressumme (graue Säulen); unten: Extrapolation über die Lebensdauer mit Kriech- und Schwindverlusten

Grafik: aus [3]

Den Nutzen von Messdaten anstelle von Rechenmodellen zeigt exemplarisch Bild 5. Dort ist dem Messverlauf von ca. 7 Minuten (blau) die äquivalente Schwingbreite des Ermüdungslastmodells 3 (ELM 3, grün) nach Eurocode [14] entsprechend ihrer Häufigkeit gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, wie real signifikant weniger Lastereignisse und zudem meist mit geringerer Schwingbreite auftreten. Diesen Unterschied – jenseits der Grenzen gängiger Rechenmodelle – erfasst das Monitoring.

### 3 Satellitengestütztes Setzungsmonitoring

Setzungen aus Bergbau, Tunnelbau oder lokalen Bodenbewegungen können großflächig auftreten und sich durch Zwangswirkungen auf die Bauwerke im Einflussbereich auswirken. Um sie übergreifend zu erfassen, bieten sich Verfahren des Überflugs, insbesondere von Satelliten an. Gegenüber klassischen terrestrischen Verfahren, wie beispielsweise dem Tachymeter, besitzen sie den

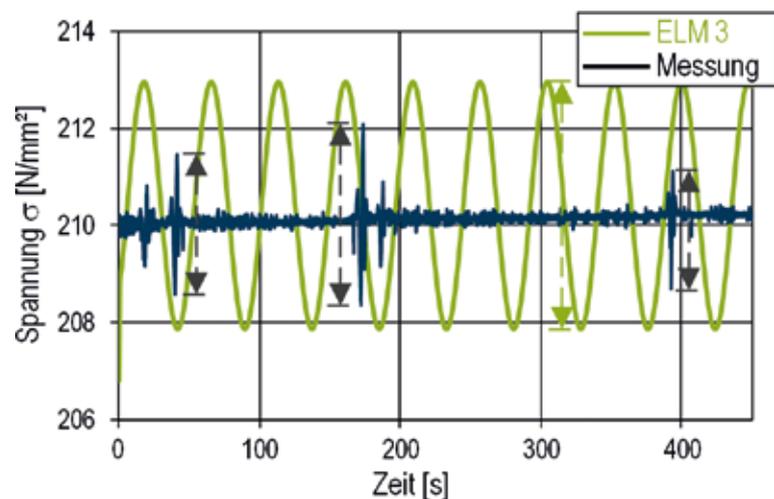


Bild 5 Gemessene Schwingbreiten (blau) vs. aus ELM 3 errechnete Schwingbreiten (grün)

Grafik: aus [5]

Vorteil, dass eine örtliche Präsenz (bis auf Kontrollmessungen) entbehrlich wird und sehr schnell große Flächen aufgemessen werden können. Die Präzision kann bis in den Bereich von Millimetern reichen [15]. Zu beachten ist

die eingeschränkte Wiederholrate, die weit entfernt echtzeitfähiger Überwachungen liegt.

### 3.1 Vereinfachte Kurzeinführung Radarinterferometrie

Spätestens seit Inbetriebnahme des deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X sind auch Fernerkundungssysteme zum Setzungsmonitoring in großflächigen urbanen Bereichen durch verbesserte geometrische Auflösung der Radarsysteme konkurrenzfähig geworden. Installationen vor Ort, z. B. an Bauwerken, sind dabei meist nicht erforderlich. Das Verfahren basiert auf der Aufzeichnung komplexer Rohdatensignale (Amplituden- und Phaseninformationen) von auf der Erd- oder Bauwerkoberfläche reflektierten Radarwellen. Natürliche Radarreflektoren sind beispielsweise metallische Strukturen oder Teile von Bauwerken, wie ein Stahlprofil, die ihre Lage auch über längere Zeiträume nicht verändern. Diese sind im Radarbild, der sogenannten *Synthetic-Aperture-Radar*-Aufnahme (kurz SAR-Aufnahme), als helle Bereiche zu erkennen (Bild 6 a). Wasseroberflächen und vegetative Bereiche wie Wald oder Freiflächen

reflektieren die Radarwellen schlecht oder gar nicht und erscheinen im Radarbild dunkel. Daher ist ein radarinterferometrisches Setzungsmonitoring besonders für urbane Bereiche geeignet [16]. Ist die gewünschte Oberfläche nicht geeignet, Radarwellen zu reflektieren, sind Zusatzmaßnahmen vor Ort wie künstliche Reflektoren nötig. Radaraufnahmen unterscheiden sich grundsätzlich von optischen Aufnahmen, wie in Bild 6 illustriert. So werden im Radarbild Objekte in der zeitlichen Reihenfolge der Reflektion der Radarwelle „pixelweise“ gespeichert, wodurch hohe Bauwerke langgestreckt wiedergegeben werden (ortsverzerrt).

Die im Radarsensor aufgezeichneten Signale müssen räumlich und zeitlich stabil sein, um die Überlagerung (Interferenz) von zwei Wellensignalen (kohärente Radarsignale) zu ermöglichen. Durch den Vergleich zweier aus leicht verschiedenen Satellitenpositionen (SAR1 und SAR2) aufgenommenen Phasenlagen  $\varphi$  an der identischen Position der Objekt-oberfläche kann die interferometrische Phase  $\varphi$  berechnet werden (Phasenverschiebung), vgl. Bild 7. Die Phasenverschiebung selbst besteht, neben der reinen Verschiebungskompo-



Bild 6 Vergleich von Radarbild (SAR-Aufnahme) und optischen Aufnahmen für einen Hochbau

Grafik: aus [16]

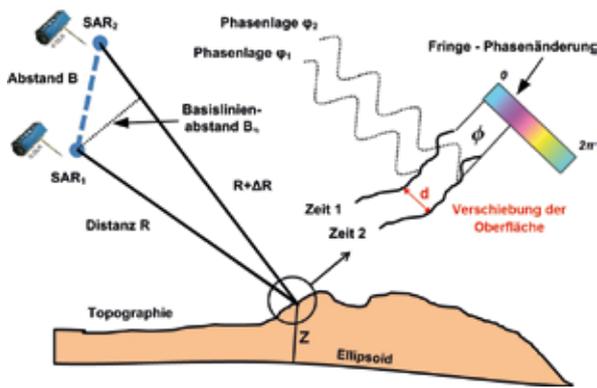


Bild 7 Prinzip der satellitengestützten Radarinterferometrie (vereinfachte Darstellung) aus zwei Positionen mit Phasenverschiebungen Grafik: aus [17]

nente, zunächst aus mehreren Anteilen. Erst in einem nachgelagerten Prozess kann über den zugeordneten Phasenanteil auf die eigentliche Verschiebung eines Radarreflektors geschlossen werden. Die Verschiebung ist aus der geeigneten „Sichtrichtung“ des Satelliten (*line of sight*) in die gesuchten Komponenten der vertikalen bzw. horizontalen Verschiebung umzurechnen. Bei der Auswertung sind spezifische Randbedingungen einzuhalten, wie die Langzeitstabilität des natürlichen oder künstlichen Radarreflektors zur Minimierung von Dekorrelationseffekten. Für die Auswertung von Setzungen ist die eindeutige Identifizierung von

dauerhaften Reflektoren (*persistent scatterer*, PS) in den SAR-Aufnahmen erforderlich, also derjenigen Punkte, die die Radarwellen besonders gut reflektieren.

Weitere Grundlagen zur verwendeten Technik und den Verfahren (D-InSAR, PS-InSAR) zur punktuellen Auswertung der Radaraufnahmen werden z. B. in [15], [18] ausführlich beschrieben.

### 3.2 Praxistauglichkeit, Genauigkeit und Einsatzgebiete im Infrastrukturbau

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens in der Praxis zeigt das Tunnelbauprojekt Wehrhahnlinie in Düsseldorf [15]. Begleitend zum ca. 3,4 km langen maschinellen Schildvortrieb wurden für das radarinterferometrische Setzungsmonitoring insgesamt 24 Datensätze als TerraSAR-X SAR-Aufnahme zur wissenschaftlichen Nutzung ausgewertet. Diese wurden als Rohdaten im Zeitraum von Januar bis Dezember 2011 im *descending mode* aufgenommen. Sie erreichen eine Bodenauflösung bis zu  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ . Nach den vorgestellten Ansätzen wurden aus diesen Datenstapeln der Aufnahmen zunächst die *persistent scatterer* (PS) identifiziert. Im Untersuchungsgebiet sind dies ca. 16.000 (Bild 8). Hochgerechnet entspricht das



Bild 8 Farbliche Visualisierung punktwieser Setzungsmessungen an 16.000 Einzelpunkten

Grafik: aus [15]

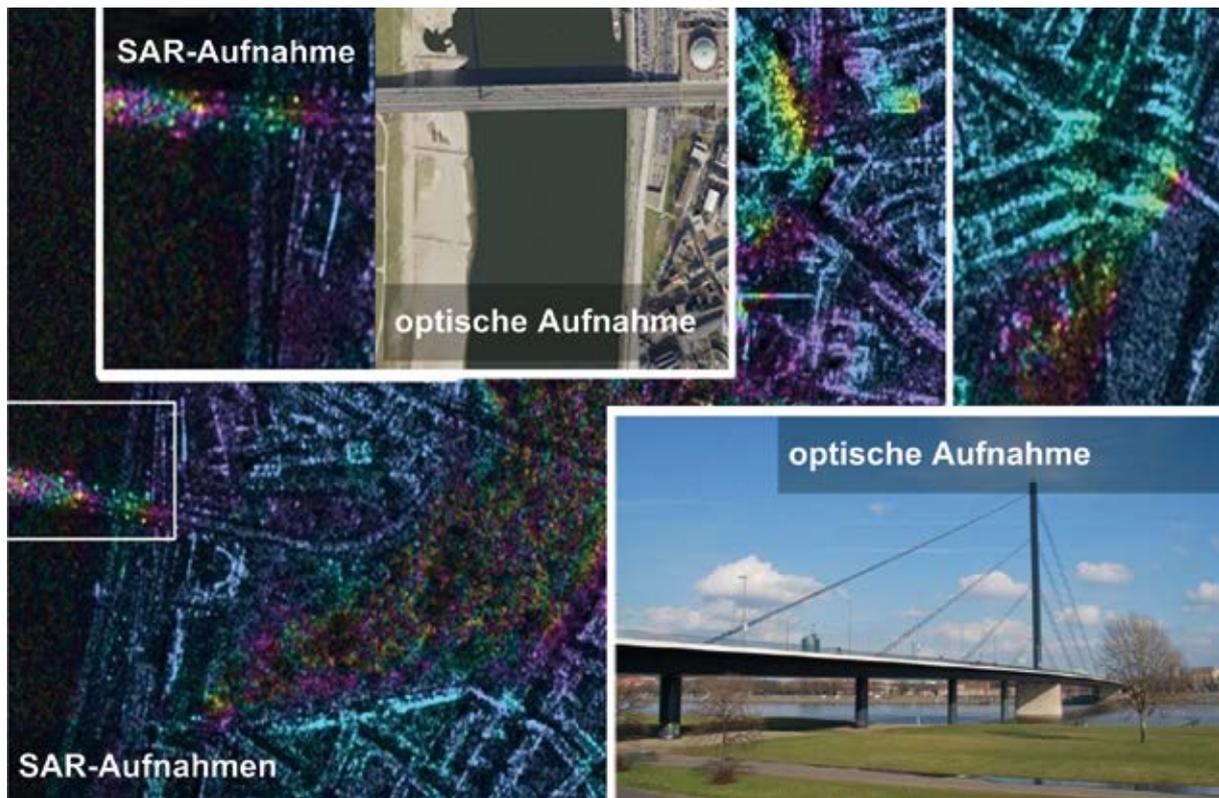


Bild 9 Vergleiche von interferometrischen Radarbildern und fotografischen Aufnahmen einer Rheinbrücke; PS erscheinen als farbige Punkte  
Fotos und Grafik: Peter Mark

einer Dichte von ca. 26.000 PS/km<sup>2</sup> bei innerstädtischer Lage mit geringer Vegetation. Detaillierte Ergebnisse dazu sind in [15] zusammengestellt.

Umfangreiche Genauigkeitsanalysen in [19] belegen, dass bei ausreichend großer Stichprobe Genauigkeiten von unter 1,5 mm Standardabweichung möglich sind. Dazu wurden in [19] die Ergebnisse des radarinterferometrischen Setzungsmonitorings mit präzisen terrestrischen Messungen verglichen, die zeitlich und räumlich dicht beieinander lagen.

Bei dem beschriebenen Radarsatelliten TerraSAR-X beträgt die Wiederholungsrate, d. h. der zeitliche Abstand zwischen möglichen Setzungsbestimmungen, elf Tage. Ein Echtzeit-Setzungsmonitoring, wie beispielsweise beim maschinellen Schildvortrieb erforderlich, ist deshalb derzeit noch nicht möglich. Bei zukünftigen Satellitenmissionen ist durch die Kombination mehrerer Satelliten eine Verringerung der Wiederholungsrate auf bis zu vier Tage vorgesehen. Da diese Satelliten, wie auch der Tandem-X, laufend Daten aufzeichnen, ist grundsätzlich auch eine retropektive Auswertung möglich. Dies kann zum Beispiel zur Beweissicherung im Rahmen von Bauprojekten hilfreich sein.

Sollen Bauwerke über längere Zeiträume überwacht werden, spielt die Wiederholrate eine untergeordnete Rolle. Zu solchen Bauwerken gehören auch Brücken. Die Auswertung von SAR-Aufnahmen einer Rheinbrücke zeigt, dass abhängig von der Tragstruktur geeignete natürliche Radarreflektoren vorhanden sind (helle Punkte in SAR-Aufnahme, Bild 9). Langzeitveränderungen im Tragwerksverhalten wie Stützensenkungen sind so ohne teure und aufwendige Installationen vor Ort grundsätzlich detektierbar. So bietet die Radarinterferometrie Potential für ein übergreifendes Monitoring im Rahmen turnusgemäßer Überwachungsmessungen an Bestandsbrücken. Die Auswertung der SAR-Aufnahmen ist jedoch, anders als im innerstädtischen Bereich, komplexer, da u. a. Radarwellen zuerst von der Wasseroberfläche reflektiert und erst dann über die Brückenoberfläche zurück zum Satelliten verlaufen können. Genaue und in ausreichender Zahl abgeleitete Setzungsinformationen sind daher aktuell für einen praxistauglichen Einsatz noch nicht gegeben, was sich mit neuen Satellitenmissionen ändern könnte [1].

### 3.3 Visualisierung von Setzungsinformationen

Bei den großen Datenmengen über Raum und Zeit kommt der Visualisierung eine besondere Bedeutung zu. Im genannten Beispiel der Wehrhahn-Linie mussten ca. 400.000 Setzungswerte verarbeitet und analysiert werden [16], wozu übliche Aufbereitungsarten wie Tabellenformen oder einfache Graphiken ausscheiden. Zusammenhänge und Ursachen von Setzungen, aber auch die Betrachtung von Interaktionen mit anderen Aspekten des Bauwerks oder des Tunnelbaus sind in diesen Formaten nur mühselig zu analysieren bzw. zu interpretieren. Viele Phänomene und Zusammenhänge bleiben aufgrund der zeitlichen Diversität der Messungen unerkannt.

Eine zeit- und raumbezogene Visualisierung mit entsprechender Datenaufbereitung unterstützt die Analyse und Bewertung. Abhängigkeiten zwischen z. B. maschinellem Schildvortrieb, Setzungsereignis und Bebauung können dann leichter erkannt und interpretiert werden. Die Visualisierung unterstützt durch verschiedene Perspektiven das Ein- bzw. Ausblenden von Informationen und/oder Zoomfunktionen zur Detailbetrachtung. Zeitbezogene Daten wie Setzungen können durch Animationen aufbereitet werden, sodass eine große Interoperabilität gegeben ist

[19]. Zusätzlich unterstützt eine dreidimensionale Aufbereitung der Ergebnisse in einer *Virtual-Reality-Umgebung* die genannten Analysemöglichkeiten (Bild 10).

*Virtual reality* (VR) beschreibt die Möglichkeit, ein computergeneriertes dreidimensionales und dynamisches Abbild der Realität zu schaffen. Die Generierung erfolgt in Echtzeit und kann auf den Blickwinkel des Nutzers umgerechnet werden. Zur Wahrnehmung des 3D-Effekts sind Hilfsmittel wie Shutterbrillen erforderlich. Ein sogenannter *flystick* ermöglicht die Navigation in der VR-Umgebung. Beide Komponenten können *getrackt* werden, um so die aktuelle Position und Blickrichtung des Nutzers in der Berechnung des Bildaufbaus zu berücksichtigen. Bild 10 zeigt Aufnahmen aus dem VR-Labor am Lehrstuhl für Bauinformatik der Ruhr-Universität Bochum [16] mit einem 3D-City-Modell (links), einer farblichen Visualisierung der Setzungsmulde (rechts oben) und dem virtuellen Gang durch die Tunnelbohrmaschine (rechts unten).

## 4 Schlussfolgerungen

Monitoring bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Infrastrukturbau. Häufig wird es gerade bei Bestandsbauwerken eingesetzt, um vulnerable Bauteile wie etwa



Bild 10 Aufnahmen aus dem Virtual-Reality-Labor (VR-Lab) an der Ruhr-Universität Bochum, 3D-Citymodell (links), farbliche Hinterlegung von Setzungen (rechts oben) und Positionierung von Tübbings in der Tunnelbohrmaschine (rechts unten) Grafik: aus [16]

Spannglieder oder konzentrierte Lasteinleitungen zu überwachen. Wesentlich ist eine auf die gewünschte Überwachung abgestimmte Messkampagne. Das betrifft zum einen die eigentliche Messung am Bauteil wie etwa eine Dehnungsbestimmung, zum anderen nötige Zusatzinformationen wie einzubeziehende Temperaturdaten und geeignete Zeiträume für abgesicherte Prognosen. Zielgerichtet eingesetzt, lassen sich bei rechnerisch schwer erfassbaren Trageigenschaften wesentliche Genauigkeitsgewinne aus Monitorings erzielen – bei gleichzeitig geringem Eigenaufwand.

Mit der Datenmenge steigt der Bedarf an geeigneter Visualisierung. Dies gilt besonders für räumliche verteilte Messkampagnen mit hoher Abtastrate über die Zeit. Visualisierungen als Grafiken, zeitanimierte Videosequenzen oder eine interaktive VR-Umgebung eröffnen dabei die Möglichkeit, Zusammenhänge zu identifizieren und auch komplexe Interaktionen zu erkennen. Der Bedarf an kombinierten Monitorings mit Visualisierungstechniken wird daher weiter anwachsen.

## Literatur

- [1] Bergmeister, K.; Mark, P.; Österreicher, M.; Sanio, D.; Heek, P.; Krawtschuk, A.; Strauss, A.; Ahrens, M. A.: Innovative Monitoringstrategien für Bestandsbauwerke. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2015, Bd. 1, Berlin: Ernst & Sohn, S. 315–459
- [2] Krawtschuk, A.; Strauß, A.; Haider, K.; Zimmermann, T.; Bergmeister, K.: Ermittlung von Modellunsicherheiten bei Stahlbetonstrukturen. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 12, S. 824–835 – DOI: 10.1002/best.201200053
- [3] Sanio, D.: Genauigkeit monitoringbasierter Lebensdauerprognosen von Betonbrücken bei Spannstahlermüdung. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 2017
- [4] Marx, S.; Wenner, M.; Käding, M.; Wedel, F.: Vom Rechnen und Wissen – Monitoring an den Talbrücken der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 28. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 12./13.3.2018 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2018, S. 41–58
- [5] Sanio, D.; Löschmann, J.; Mark, P.; Ahrens, M. A.: Bauwerksmessungen versus Rechenkonzepte zur Beurteilung von Spannstahlermüdung in Betonbrücken. Bautechnik 98 (2018) 2, S. 99–110 – DOI: 10.1002/bate.201700092
- [6] Löschmann, J.; Ahrens, M. A.; Dankmeyer, U.; Ziem, E.; Mark, P.: Methoden zur Reduktion des Teilsicherheitsbeiwertes für Eigenlasten bei Bestandsbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017) 8, S. 506–516 – DOI: 10.1002/best.201700027
- [7] Merkel, M.; Breit, W.: Zerstörungsfrei zur Bauwerksfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018) 9, S. 640–646 – DOI: 10.1002/best.201800005
- [8] Marx, S.; von der Haar, C.; Liebig, J. P.; Grünberg, J.: Bestimmung der Verkehrseinwirkung auf Brückentragwerke aus Messungen an Fahrbahnübergangskonstruktionen. Bautechnik 90 (2013) 8, S. 466–474 – DOI: 10.1002/bate.201300015
- [9] Sanio, D.; Ahrens, M. A.; Rode, S.; Mark, P.: Untersuchung einer 50 Jahre alten Spannbetonbrücke zur Genauigkeitssteigerung von Lebensdauerprognosen. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014) 2, S. 128–137 – DOI: 10.1002/best.201300079
- [10] Sanio, D.; Mark, P.; Ahrens, M. A.: Temperaturfeldberechnung von Brücken – Umsetzung mit Tabellenkalkulationen. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017) 2, S. 85–95 – DOI: 10.1002/best.201600068
- [11] Ahrens, M. A.; Mark, P.: Lebensdauersimulation von Betontragwerken. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011) 4, S. 220–230 – DOI: 10.1002/best.201000092
- [12] Samiec, D.: Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung. Photonik 6 (2011), S. 34–37
- [13] Clormann, U. H.; Seeger, T.: Rainflow-HCM. Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage. Stahlbau 55 (1986) 3, S. 65–71
- [14] DIN EN 1991-2 (2010) Eurocode 1 – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Berlin: Beuth
- [15] Mark, P.; Niemeier, W.; Schindler, S.; Blome, A.; Heek, P.; Krivenko, A.; Ziem, E.: Radarinterferometrie zum Setzungsmonitoring beim Tunnelbau – Anwendung am Beispiel der Wehrhahn-Linie in Düsseldorf. Bautechnik 89 (2012) 11, S. 764–776
- [16] Schindler, S.: Monitoringbasierte strukturelle Schadensanalyse von Bauwerken beim Tunnelbau. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 2014-4

- [17] Neugebauer, P.; Schindler, S.; Pähler, I.; Blome, A.; Mark, P.: Präventives Schädigungsmanagement im Tunnelbau: Schutz der oberirdischen Bebauung. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau, Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. 318-361
- [18] Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F.: Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39 (2001) 1, S. 8-20
- [19] Schindler, S.; Hegemann, F.; Koch, C.; König, M.; Mark, P.: Radar interferometry based settlement monitoring in tunneling: Visualization and accuracy analyses. Visualization in Engineering 4 (2016) 7, S. 1-16 - DOI 10.1186/s40327-016-0034-x

**BERD**<sup>®</sup>  
ONE BRIDGE, ONE SOLUTION

**INNOVATIVE  
UND NACHHALTIGE  
LÖSUNGEN FÜR  
DEN BRÜCKENBAU**

**MEHR KONTROLLE,  
SICHERHEIT UND QUALITÄT**

A6 West - Neckarbrücke

SCHLÜSSELFERTIGE ANGEBOTE:  
MASCHINE + FACHARBEITER ... WENIGER RISIKO UND MEHR EFFIZIENZ

Bridge Engineering Research & Design  
info@berd.eu | www.berd.eu

**NORTE 2020** PORTUGAL 2020  
PROGRAMA OPERACIONAL REGIONAL DO NORTE

UNIAO EUROPEIA  
Fundo Europeu  
de Desenvolvimento Regional

- 
- 9 Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium
  - 13 Verleihung der Wackerbarth-Medaille
  - 14 Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass  
der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen
  - 17 Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet
  - 25 Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau
  - 29 Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks –  
Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas
  - 47 Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau
  - 59 Verkehrsinfrastruktur für Hamburg –  
Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen
  - 73 Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung  
von neuen Verfahren im Brückenbau
  - 85 Stahlverbund-Großbrücken mit oberliegender Fahrbahn  
als Querschnitte mit Teilfertigteilen und Schrägstreben bzw. Konsolen
  - 101 Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik
  - 129 Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken –  
Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?
  - 149 Was tun, wenn Annahmen und Wirklichkeit nicht übereinstimmen?
  - 161 Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile  
von Brücken- und Tunnelbauwerken
  - 173 Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken  
mit Halffertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton
  - 185 Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen
  - 197 Chronik des Brückenbaus
  - 209 Inserentenverzeichnis