



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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



31. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPIOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

07. UND 08. JUNI 2022

© 2022 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
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer
Layout: Ulrich van Stipriaan
Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Drackensteiner Hang (1936) – Foto: Martin Hahn, LAD

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

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-709-8



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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

Tagungsband

31. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens der TU Dresden e.V.

TUDIAS GmbH

07. und 08. Juni 2022

Inhalt

Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022!	7
Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung	11
Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig	13
<i>Gero Marzahn, Jörg Kranz, Dietmar Placzek, Thomas Oehler</i>	
Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele	27
<i>Günter Seidl, Victor Schmitt, Wojciech Lorenc</i>	
Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen–Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen	43
<i>Anton Braun</i>	
Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzwerkhängern aus Carbon	57
<i>Lorenz Haspel</i>	
Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben	75
<i>Jürgen Feix, Johannes Lechner</i>	
Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung	89
<i>Oliver Steinbock, Thomas Bösche</i>	
Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge	107
<i>Antti Karjalainen</i>	
Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg	121
<i>Michael Hascher, Sabine Kuban</i>	
smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft	139
<i>Marc Wenner, Steffen Marx, Markus Meyer-Westphal, Martin Herbrand, Christof Ullerich</i>	
Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen	151
<i>Dirk Proske, Herbert Friedl, Jean-Baptiste Payeur, Blaise Girardin</i>	
Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach	163
<i>Bernhard Schäpertöns, Daniel Schäfer, Werner Kuhnlein, Christoph Schultheiß</i>	
Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton	175
<i>Andreas Apitz, Frank Jesse, Mike Schlaich</i>	
Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht ...	191
<i>Frank Bauchspiess</i>	
Chronik des Brückenbaus	207
<i>Zusammengestellt von Sabine Wellner</i>	

smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft

Dr.-Ing. Marc Wenner¹, Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx², Dipl.-Inform. Markus Meyer-Westpha³, Prof. Dr.-Ing. Martin Herbrand⁴, Dipl.-Ing. Christof Ullerich⁵

Vorab: Dieser Artikel wurde bereits in englischsprachiger Fassung beim 27th ITS World Congress in Hamburg (Oktober 2021) veröffentlicht [1].

Kurzfassung

Die Infrastruktur unseres Verkehrsnetzes ist in die Jahre gekommen. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Infrastruktur durch die Verkehrsintensität und die Entwicklung von autonomen und vernetzten Verkehrssystemen. Um die Funktion und die Verfügbarkeit des Verkehrsnetzes zu gewährleisten, nimmt die Bedeutung einer häufigeren und digital gestützten Instandhaltung unserer Bauwerke stetig zu. Um Zeit und Ressourcen zu sparen, wird es zudem notwendig, den Instandhaltungsprozess zu optimieren und vorausschauende Funktionalitäten zu implementieren. Das Konzept des digitalen Zwillings kann der Schlüssel zum Erreichen dieser Transformation sein. In diesem Beitrag soll das Konzept des digitalen Zwillings und seiner Umsetzung an der Köhlbrandbrücke in Hamburg vorgestellt werden.

1 Einleitung

Das Rückgrat einer starken Wirtschaft ist eine funktionierende, verfügbare, effiziente und sichere Infrastruktur. Mit einem alternden Verkehrsnetz und einem stetig steigenden Verkehrsaufkommen auf Straße und Schiene steht Deutschland derzeit vor einer großen Herausforderung: Der Zustand alter Brückenbauwerke muss genau bewertet werden, Instandhaltungsarbeiten müssen fach- und zeitgerecht durchgeführt, bestehende Brücken repariert oder ersetzt und neue Verkehrswege bedarfsgerecht gebaut werden.

In Anbetracht der aktuellen Herausforderungen in unserer Gesellschaft sollte das Ziel einer leistungsfähigen Infrastruktur mit den Anforderungen hinsichtlich finanzieller Beschränkungen, der Einsparung von Personal- und Materialressourcen und der Verringerung unseres ökologischen Fußabdrucks in Einklang gebracht werden. Dies kann erreicht werden, indem die Lebensdauer bestehender Anlagen verlängert und gleichzeitig die hohen Sicherheitsanforderungen an den Betrieb der Infrastruktur und ihre Robustheit in der Gegenwart und in der Zukunft aufrechterhalten werden. Gegenwärtig ist ein großer Teil der bestehenden Infrastruktur in Deutschland mangelhaft. Gründe dafür sind Alter, schlechter Zustand, gestiegene Verkehrsanforderungen oder veraltete konstruktive Gestaltung. Die derzeitigen Instandhaltungsmethoden können mit diesen Entwicklungen oft nicht Schritt halten. Es ist daher notwendig, die derzeitigen Instandhaltungsprozesse für unsere Infrastruktur zu optimieren, indem die strukturelle Bewertung verbessert und der Übergang von der derzeitigen reaktiven zu einer weitgehend digitalen, vorausschauenden Instandhaltung ermöglicht wird.

Die Digitalisierung und ihre Auswirkungen auf das Bauwesen bieten die Möglichkeit, diesen Übergang in der Instandhaltung in Wirklichkeit zu realisieren. Durch die Ausstattung von Infrastrukturanlagen mit gut ausgewählten Sensoren, die mit IoT-Systemen (*Internet of Things*) verbunden sind, durch die Aggregation und Synthese von Messdaten und die Verknüpfung dieser automatisch generierten Daten mit klassischen Inspektionsergebnissen wird es möglich, eine ausreichende Datenhistorie zu generieren, um den aktuellen Zustand präzise zu bewerten und seine Entwicklung vorherzusagen. Die rasante Entwicklung der Technologien,

¹ MKP GmbH, Hannover

² Institut für Massivbau, TU Dresden

³ customQuake GmbH, Hamburg

⁴ WTM Engineers GmbH, Hamburg

⁵ Hamburg Port Authority AöR, Hamburg

gepaart mit dem zunehmenden Interesse und Bewusstsein der Bauherren und Anlagenbetreiber, wird in den nächsten Jahren zu erheblichen Fortschritten in diesem Bereich führen.

In diesem Beitrag soll gezeigt werden, wie das Konzept des digitalen Zwillings uns bei der Erfassung, Analyse und Aggregation verschiedener Datentypen helfen kann, um die Datengrundlage für die Bewertung des aktuellen Zustands eines Bauwerks und die Vorhersage seiner künftigen Entwicklung zu verbessern. Die verschiedenen Schritte auf dem Weg zum digitalen Zwilling einer Infrastrukturanlage werden anhand einer realen Brücke im Rahmen des Pilotprojekts smartBRIDGE Hamburg demonstriert.

2 Status Quo der Instandhaltung von Brücken in Deutschland

Für Brücken ist die manuelle, zyklische Prüfung nach der DIN 1076 [2] seit 1930 Stand der Technik. Seit den 1990er Jahren wird die Prüfung nach der RI-EBW-PRÜF [3] in der Regel elektronisch im Programmsystem SIB-Bauwerke dokumentiert, wobei Struktur und Umfang der Bauwerksinformationen durch die ASB-ING [4] festgelegt sind. Zusammen mit der RPE-ING [5] verfügt Deutschland über ein einheitliches, konzeptionell schlüssiges, bewährtes und akzeptiertes Vorgehen für die Instandhaltung von Ingenieurbauwerken.

Die Prüfung wird von qualifizierten Brückenprüfern durchgeführt, die das Bauwerk anhand von sichtbaren oder hörbaren (durch Hammerschläge) Schäden beurteilen. Alle sechs Jahre ist eine Hauptprüfung erforderlich, bei der auch schwer zugängliche Bereiche des Bauwerks von Hand und gegebenenfalls mit Hilfe von Rüstungen o. ä. untersucht werden. Drei Jahre nach einer Hauptprüfung wird eine einfache Prüfung als intensive, erweiterte Sichtprüfung durchgeführt, in der Regel ohne Zuhilfenahme von Rüstungen.

Ziel dieses zyklischen Verfahrens ist es, Schäden rechtzeitig zu erkennen und zu beheben, bevor schwerwiegendere Folgen auftreten. Dieses Verfahren ermöglicht eine reaktive Instandhaltung der Assets auf der Grundlage vorhandener und eindeutig feststellbarer Schäden. Tritt jedoch ein schwerwiegender Schaden auf, muss zunächst dessen Ursache untersucht werden, bevor Sanierungsmaßnahmen geplant und durchgeführt werden können. In der Zwischenzeit muss das Bauwerk

oft für den Schwerlastverkehr gesperrt oder die Anzahl der Fahrspuren reduziert werden, was über einen längeren Zeitraum zu erheblichen Verkehrsbehinderungen führt. Mit der Verbesserung der Vorhersagbarkeit, Effizienz, Kontrollierbarkeit und Koordination von Instandhaltungsmaßnahmen profitieren Anlagenbesitzer von der Umstellung auf eine vorausschauende Instandhaltung. Die klassische Inspektion muss durch eine kontinuierliche, automatische sensorgestützte Überwachung ergänzt werden, um eine ausreichende Datenbasis zu erhalten für eine anschließende komplexe Analyse des Zustands und einer Zustandsprognose. Dieser Ansatz ist zwar bereits Teil des 2011 gestarteten Forschungsprojekts „Intelligente Brücke“ der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [6], wurde aber bisher noch nicht an einem realen Großbauwerk umgesetzt.

3 Das Konzept des digitalen Zwillings

Das Konzept des digitalen Zwillings hat bereits verschiedene industrielle Anwendungen. Aufgrund der Entwicklung des *Building Information Modeling* (BIM) und des Internets der Dinge (IoT) im Bauwesen und der dadurch entstehenden Datenmengen wird das Konzept des digitalen Zwillings gerade erst im Bauwesen übernommen.

Ähnlich wie BIM sollte der digitale Zwilling nicht als eine Technologie, sondern als ein Prozess verstanden werden. Da „digitaler Zwilling“ ein unspezifischer Begriff ist, hat ihn das *Digital Twin Consortium* wie folgt definiert: „*Ein digitaler Zwilling ist eine virtuelle Darstellung von realen Einheiten und Prozessen, die mit einer bestimmten Frequenz und Genauigkeit synchronisiert werden. Digitale Zwillinge transformieren Unternehmen, indem sie ein ganzheitliches Verständnis, eine optimale Entscheidungsfindung und effektive Maßnahmen beschleunigen. Digitale Zwillinge nutzen Echtzeit- und historische Daten, um die Vergangenheit und Gegenwart darzustellen und die Zukunft zu simulieren. Digitale Zwillinge sind durch Ergebnisse motiviert, auf Anwendungsfälle zugeschnitten, durch Integration angetrieben, auf Daten aufgebaut, durch Domänenwissen geleitet und in IT/OT-Systeme implementiert*“ [7].

Im Hinblick auf die oben genannten Ziele zur Verbesserung der Instandhaltung von Brücken ist der digitale Zwilling ein geeignetes und attraktives Konzept. Das Konzept ist hinreichend flexibel und leistungsfähig, um Informa-

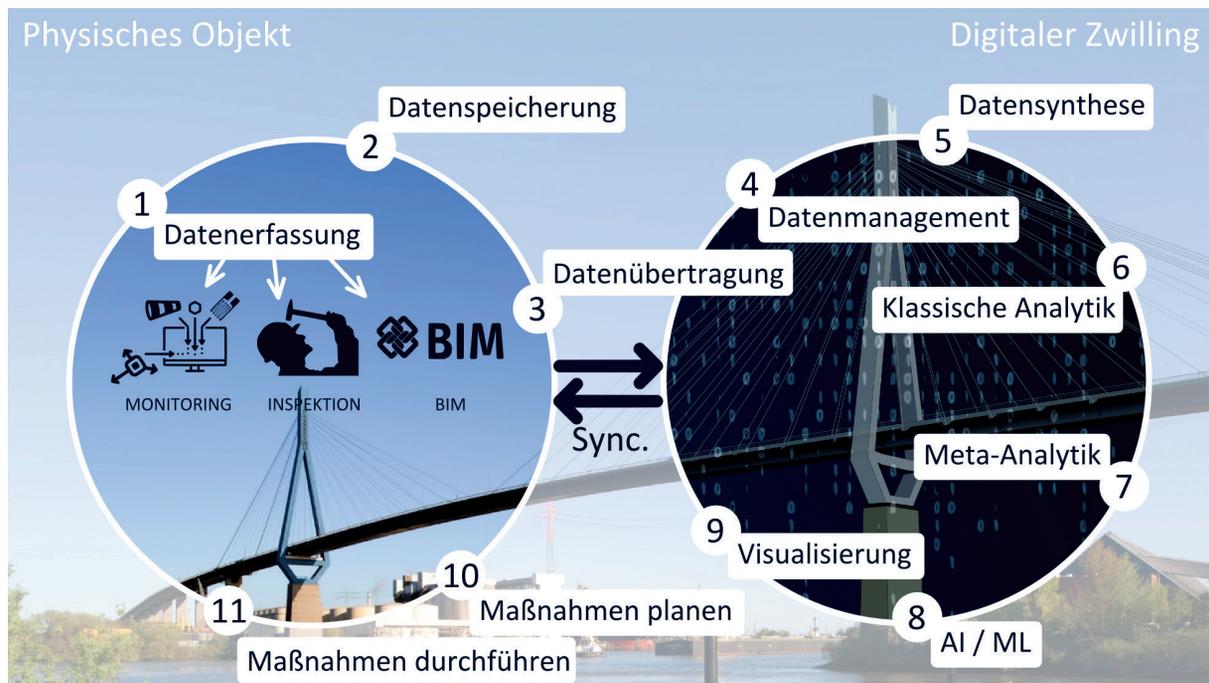


Bild 1 Interaktion zwischen realem und digitalem Zwilling Grafik: MKP GmbH, nachgezeichnet aus [8]

tionen aus der klassischen Inspektion, aus dem Monitoring und aus dem *Building Information Modeling* zu kombinieren und mit Simulationen oder Modellen in einer durchgängigen, effizienten, digitalen Prozesskette zu verarbeiten. Das Konzept kann auch um Finanzdaten aus Investition oder Betrieb erweitert werden, was eine Priorisierung von Instandhaltungsaktivitäten und eine Verbesserung der langfristigen Instandhaltungsstrategie ermöglicht.

Ein digitaler Zwilling kann sich aus mehreren digitalen Zwillingen zusammensetzen und digitale Zwillinge können vernetzt werden. Dies ist ein sehr wichtiges Merkmal für Infrastrukturbetreiber, da sie nicht nur einzelne Objekte analysieren wollen, sondern Netzwerkanalysen und Analysen von Anlagenklassen benötigen, um Gesamtlösungen aus strategischer Sicht zu entwickeln [8], [9]. Darüber hinaus werden im Hinblick auf die Mobilität der Zukunft (Mobilität 4.0) die genauen, aktuellen und vernetzten Infrastrukturinformationen Voraussetzung für das autonome und vernetzte Fahren.

Es sei darauf hingewiesen, dass ein BIM-Modell kein digitaler Zwilling ist, denn ein digitaler Zwilling ist ein dynamisches, vernetzbares Modell eines Assets und hat eine dauerhafte Verbindung zur realen Welt (siehe Bild 1). BIM-Modelle sind statische Modelle, die nicht ohne manuelle Eingriffe geändert werden können und nicht vernetzbar sind. BIM ist nicht für Analysen in Echtzeit ausgelegt, was seine Nutzbarkeit im

Rahmen des Instandhaltungsmanagements einschränkt, aber eine unabdingbare Grundlage für den digitalen Zwilling darstellt. Es werden daher Anstrengungen unternommen, die *BIM capability map* zu erweitern [8].

Damit das Konzept des digitalen Zwillings umgesetzt werden kann, müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein:

- ❑ Die Methoden für die Umsetzung eines optimalen Überwachungskonzepts, für die automatische Datenanalyse, für die Aggregation von Daten zu Indikatoren, für die Integration von Inspektionsergebnisse und für die Ableitung einer Life-Cycle-Management-Strategie müssen entwickelt werden.
- ❑ Die bestehenden Hard- und Softwarelösungen müssen angepasst bzw. neue Lösungen geschaffen werden.
- ❑ Die Akzeptanz des Konzepts durch die Stakeholder muss hergestellt werden.

4 Das Pilotprojekt smartBRIDGE Hamburg

Die Stadt Hamburg und die Hamburg Port Authority (HPA) arbeiten intensiv an der Optimierung ihrer Instandhaltungsstrategie, da der Hafen als multimodales Verkehrsnetz täglich ein erhebliches Verkehrsaufkommen zu be-

wältigen hat, das eine hohe Verfügbarkeit der Infrastruktur erfordert. Inhalt des von der HPA initiierten Projekts smartBRIDGE Hamburg ist die Schaffung eines Großdemonstrators zur Umsetzung und Erprobung des Konzepts des digitalen Zwillings mit dem Ziel einer innovativen Verbesserung der Instandhaltung für Brücken im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf andere Assetklassen.

Die Köhlbrandbrücke in Hamburg (Bild 2) ist eine der wichtigsten Brücken des Hafens und verbindet dessen westlichen Teil und die Autobahn A 7 mit seinem östlichen Teil und der Autobahn A 1. Aufgrund ihrer Größe und der Vielfalt und Komplexität ihrer Struktur ist diese Brücke ein ideales Beispiel für die Erprobung des Konzepts des digitalen Zwillings. Die Köhlbrandbrücke ermöglicht es somit, die Skalierbarkeit des Konzepts zu zeigen und die technischen Möglichkeiten und den Nutzen im Hinblick auf die Brückeninstandhaltung zu demonstrieren.

Aus technischer Sicht konzentriert sich das Projekt auf die Überwachung des Bauwerkszustands durch Sensoren und die Gewinnung aggregierter Kennzahlen. Die sogenannten Zustandsindikatoren werden durch einen komplexen Auswertungsprozess ermittelt und ermöglichen einen schnellen Überblick über den Brückenzustand.

Aufgrund der Komplexität des Projekts wurde vom Auftraggeber ein multidisziplinäres Team bestehend aus Marx Krontal Partner, customQuake und WTM Engineers mit der Durchführung des Pilotprojekts beauftragt. In der Projektlaufzeit von rund zwei Jahren mussten die Kompetenzen in den Bereichen Brückenbau, Wartung und Inspektion, Softwarearchitektur, Monitoring, *Data Science* und *Usability* zusammengeführt werden, um die erwartete Innovation zu ermöglichen.

5 Die Schritte auf dem Weg zum digitalen Zwilling einer Brücke

Für die Realisierung des digitalen Zwillings eines Infrastrukturbauwerks wurden sechs entscheidende Schritte identifiziert, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

5.1 Monitoring als eine maßgebliche Datenquelle für die Ermittlung von Zustandsinformationen

Die Überwachung des Bauwerks und seiner Komponenten mit verschiedenen, sinnvoll ausgewählten und optimal platzierten Sensoren ist der Schlüssel zur Generierung der erforderlichen historischen Datenbasis, um den aktuellen Brückenzustand objektiv und präzise in Echtzeit zu bewerten und seine künftige



Bild 2 Blick auf die Köhlbrandbrücke im Hamburger Hafen

Foto: HPA

Entwicklung vorherzusagen. Fest installierte Sensoren ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung, sind aber in der Regel auf einen lokalen Bereich beschränkt. Aus diesem Grund sind Sensoren eine wichtige Ergänzung zur klassischen und integralen Prüfung, können diese aber nicht ersetzen.

Im Hinblick auf die Brückeninstandhaltung lassen sich folgende zusätzliche Anwendungsfälle und Vorteile von Monitoring identifizieren:

- ❑ Die Datenhistorie ermöglicht eine bessere Analyse der Ursache von beobachteten Schäden bei der Inspektion und eine zielgerichtete Festlegung von notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen.
- ❑ Der Einfluss von Nutzungsänderungen oder Sondernutzungen (Schwerlasttransporte, Überlastungen) kann nachvollzogen werden.
- ❑ Die kontinuierliche automatisierte Überwachung in bestimmten Bereichen (z. B. schadhafte oder schwer zugängliche Bereiche) kann eine Inspektion entlasten oder zeitweise ersetzen.
- ❑ Die Wirksamkeit von Ausgleichsmaßnahmen kann überwacht oder optimiert werden.
- ❑ Die Daten können genutzt werden, um zusätzliche Funktionsstörungen, Schäden oder kritische Schadensverläufe zu identifizieren, die bei einer Inspektion bewertet werden müssen.

Um diese Vorteile zu erreichen, muss das Monitoring jedoch sorgfältig geplant und durchgeführt werden. Die Fragen, die in der Konzeptionsphase beantwortet werden müssen, sind:

1. Welche Teile der Struktur müssen überwacht werden, um das Strukturverhalten zu identifizieren und Veränderungen zu erkennen?
2. Welche Sensoren und welche Anordnung sind geeignet, um das Strukturverhalten zu erfassen?
3. Welche Analyseverfahren sind notwendig, um aus den Messdaten die erwarteten Eigenschaften abzuleiten?

Im Projekt smartBRIDGE Hamburg wurde dieser Prozess für die verschiedenen Bau-

werkstypen (Schrägseilbrücke und Spannbetonbrücken) und für die verschiedenen Strukturelemente der Köhlbrandbrücke (Kabel, Lager, Überbau etc.) durchgeführt. Von den drei Fragen ist (1) die komplexeste, aber auch die wichtigste, da die Qualität und Effektivität des Monitorings von dieser Analyse und der Identifizierung der kritischen Teile abhängt. Aber aufgrund der Größe einer Brücke, ihrer Einzigartigkeit, ihrer Lebensdauer von bis zu 100 Jahren und der langsamen Degradationsrate muss eine differenzierte Sensitivitätsanalyse des Bauwerks durchgeführt werden. Die Identifizierung von „Schwachstellen“ basiert auf der folgenden Analyse der Brücke: (a) modellbasierte Analyse, z. B. Nachrechnung, (b) zustandsbasierte Analyse unter Berücksichtigung von Inspektionsergebnissen, (c) entwurfsbasierte Analyse, die den aktuellen Entwurf mit ähnlichen, in der Literatur dokumentierten Entwürfen vergleicht und (d) erfahrungsbasierte Analyse unter Berücksichtigung des Know-hows des Bauwerksprüfers und Asset Managers.

Um eine Priorisierung der Untersuchungsgebiete vorzunehmen, wurden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse nach der FMECA-Methode (*Failure Mode and Effects and Criticality Analysis*) [10] ausgewertet.

5.2 Die Aggregation von Messdaten als Schlüsseletappe zur Generierung konsumierbarer Zustandsindikatoren

Während bei der klassischen Brückenprüfung nach DIN 1076 [1] vorhandene Schäden bewertet werden, dienen Ausführungsstatiken und Nachrechnungen bestehender Bauwerke unter anderem dazu, rechnerische Sicherheitsdefizite und damit potenzielle Schäden zu identifizieren. Sensorgestütztes Monitoring kann sowohl zur Unterstützung der klassischen Brückenprüfung als auch zur numerischen Analyse eingesetzt werden.

Im ersten Fall können Schäden und Schadensszenarien zur Unterstützung der klassischen Inspektion direkt mit Sensoren überwacht werden. Vorhandene Schäden können überwacht werden, um eine Degradation zu erkennen oder einen Zeitpunkt für Instandhaltungsmaßnahmen vorherzusagen (z. B. für Elastomergelager). Rechnerische Defizite, die zu duktilem oder sprödem Versagen führen können, lassen sich überwachen, indem z. B. die Spannungen

gegen vordefinierte Spannungsgrenzwerte geprüft werden oder indem die Versagenswahrscheinlichkeit mittels probabilistischer Analyse berechnet wird. Im zweiten Fall können Sensordaten zur Verifizierung des Strukturmodells oder zur Ableitung eigener Modelle für Einwirkungen, z. B. für Verkehr, Wind oder Temperatur, verwendet werden.

Es stellt sich nun die Frage, wie die Messdaten einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren aggregiert werden können, um verwertbare Informationen zu generieren. Die Aufgabe besteht darin, numerische Daten (Spannungswerte, Auslastung) zu einem semantisch zugänglichen Indikator (z. B. guter Zustand/schlechter Zustand) zu aggregieren. Ein mögliches Versagen eines Bauteils kann in der Regel durch verschiedene Schadensszenarien (z. B. Beulen, Ermüdung) verursacht werden, die in einem ersten Schritt zu identifizieren sind. Die Zustandsbewertung eines Bauteils ist dann ein Ergebnis verschiedener Teilbewertungen für jedes Schadensszenario (z. B. Nachweis gegen Beulen, Nachweis gegen Ermüdung), die in einem zweiten Schritt durchgeführt werden. Jede Teilbewertung wird dann einem Bewertungssystem unterzogen (z. B. Zahlenwert von 1,0 bis 4,0). So werden im dritten Schritt die Teilbewertungen so bewertet, dass diese Zustandsnote den Teilzustand eines Bauteils angibt (*PCI: Partial Condition Indicator*). Diese Teilzustandsindikatoren können direkt mit einer semantisch zugänglichen Bewertung verknüpft werden (z. B. 1,0: sehr guter Zustand bis 4,0: ungenügender Zustand). Im letzten Schritt werden die verschiedenen Teilzustandsindikatoren innerhalb eines Bauteils zu einem einzigen Zustandsindikator (CI) aggregiert.

Bild 3 zeigt eine schematische Übersicht über den Aggregationsprozess von Messdaten zu einem Zustandsindikator. Bei den Messdaten handelt es sich um zeitlich veränderliche, elektrische Signale, die durch physikalische Prozesse aus der Umgebung erzeugt werden. Zur Interpretation dieser Signale wird eine Daten-

bereinigung und Umrechnung in physikalische Werte durchgeführt. Darüber hinaus müssen diese physikalischen Werte in Ergebnisdaten umgewandelt werden (z. B. Dehnung in Spannung), die dann für die Zustandsbewertung benötigt werden. Für eine einheitliche Bewertung von messtechnischen PCIs und von PCIs aus der Inspektion wird die Bewertungsmethode für die messtechnischen PCIs in Anlehnung an die Bewertungsmethode von [2] und [3] gewählt. Jeder PCI besteht aus einer Bewertung bezüglich der drei Klassifizierungen S (Tragsicherheit), V (Verkehrssicherheit) und D (Dauerhaftigkeit).

Insgesamt lässt sich die Aggregation der Rohdaten durch die folgenden drei Aggregationsstufen zusammenfassen (siehe auch Bild 3):

1. Datenaggregation und -auswertung: Die Rohdaten werden verarbeitet und anhand von Versagens- oder Schadensszenarien ausgewertet.
2. Partielle Bewertung: Die Ergebnisse der Schadensbewertung werden bewertet, um einen partiellen Zustandsindikator für jeden potenziellen Schaden zu erhalten.
3. Zustandsaggregation: Die Teilzustandsindikatoren werden zu einem Zustandsindikator aggregiert.

Einer von vielen monitoringbasierten Teilzustandsindikatoren ist zum Beispiel der PCI „Beulen“ des Zustandsindicators CI „Überbau“. Eine genauere Erläuterung zur Methode des monitoringgestützten Beulnachweises findet sich in [11].

Auch wenn eine Bauteilgruppe nicht durch Sensoren überwacht wird, wird der Zustandsindikator einer Bauteilgruppe zumindest durch den PCI der Inspektion bewertet. Damit ist die Methode auf jede Bauteilgruppe eines jeden Bauwerks anwendbar (Abwärtskompatibilität).

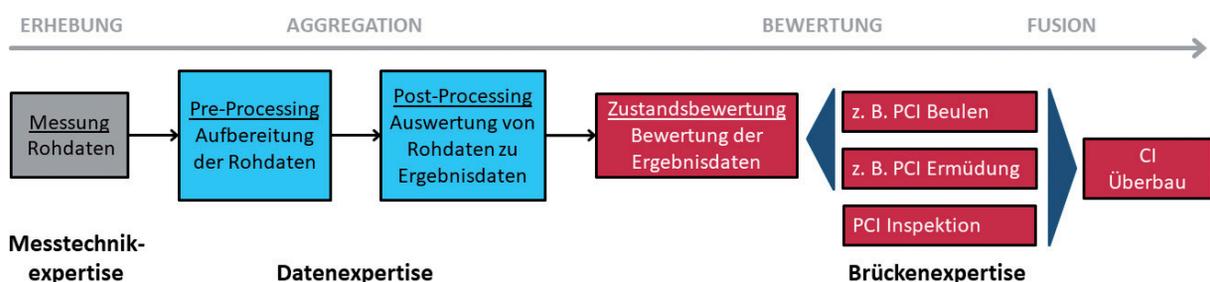


Bild 3 Aggregationsprozess von den Messdaten zu Zustandsindikatoren

Grafik: MKP GmbH

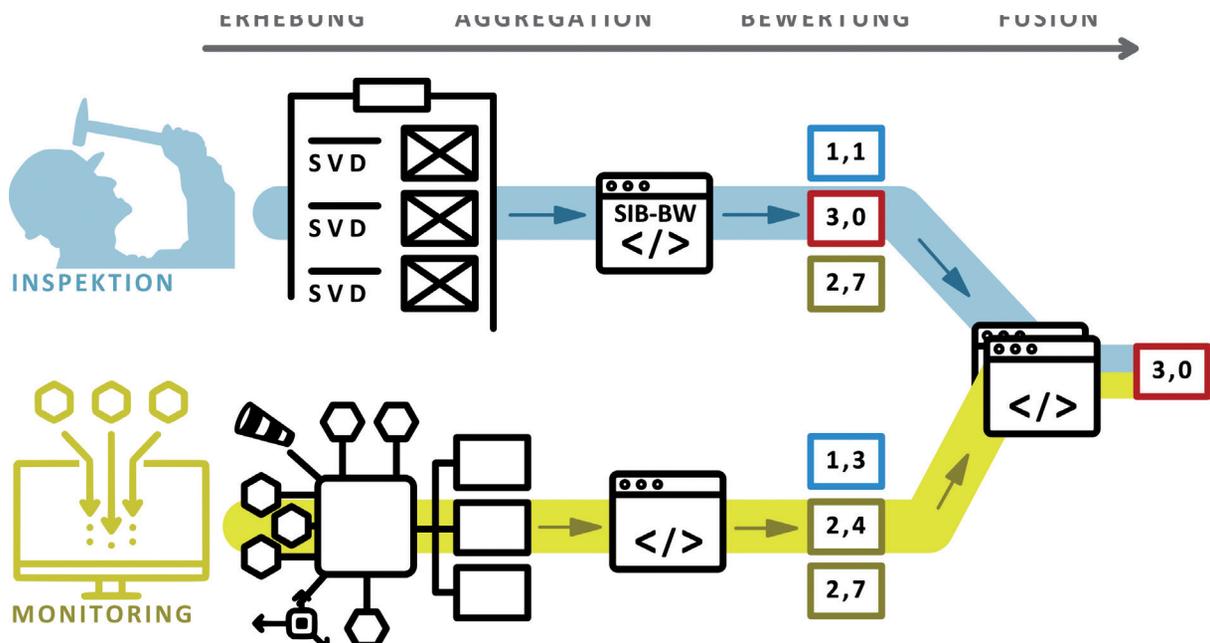


Bild 4 Datenfusion aus der klassischen Bauwerksprüfung und aus Monitoring

Grafik: MKP GmbH

5.3 Die Kombination aus klassischer Inspektion und Monitoring zur integralen Zustandsbewertung

Ein großer Mehrwert dieses Projekts ist die parallele Erhebung von zyklischen Inspektionsdaten (3/6 Jahre) und von Monitoringdaten, die eine objektive, vollständige und Echtzeitbewertung des Brückenzustands ermöglichen. Die Daten sind heterogen: darunter manuell erfasste Schäden, gemessene und analysierte Daten oder Informationen zu den Einwirkungen. Ziel des Projekts ist es, all diese Daten zu verarbeiten und zusammenzuführen, um eine allgemeine und objektive Information über den Zustand der Brücke zu erhalten.

Die Bewertung von Schäden ist derzeit in [3] genormt, in [12] dokumentiert und in der Software SIB-Bauwerke implementiert. Diese Bewertungsmethode führt zu einer einfachen Einstufung der Schäden/Bauteile/Bauteilgruppen/Bauwerk mit Noten zwischen 1,0 (guter Zustand) und 4,0 (unzureichender Zustand). Die Gesamtbewertung erfolgt auf der Grundlage der erfassten Schäden.

Diese von Ingenieuren und Bauherren akzeptierte Bewertungsmethode soll auch bei der Auswertung von Messdaten angewendet werden (Bild 4). Die aus den Messdaten neu abgeleitete Teilzustandsindikatoren (PCI) werden bei der Bewertung wie Schäden behandelt. Anschließend werden diese aus Inspektion (Schäden) und Monitoring stammenden PCIs

zu einem Zustandsindikator (CI) einer Bauteilgruppe zusammengeführt. Jede Bauteilgruppe und jedes Bauwerk erhalten einen Wert zwischen 1,0 und 4,0. Mit dieser Methode ist es möglich, die Bewertung des Brückenzustands zu optimieren, indem ihre Qualität, Objektivität und Aktualität erhöht wird, ohne das bekannte Ausgabeformat zu ändern.

5.4 BIM: das geometrische und semantische Skelett des digitalen Zwillings

Das BIM-Model ist das Skelett des digitalen Zwillings und hat deshalb eine Schlüsselrolle innerhalb des Projekts. Aber wie in Abschnitt 3 erwähnt, ist ein BIM-Model kein digitaler Zwilling, denn ein digitaler Zwilling ist ein dynamisch mit der realen Welt verknüpftes Modell eines Assets mit aktuellen Zustandsdaten. Das *Building Information Model* stellt diese Art von Daten nicht zur Verfügung. Die Stärken von BIM liegen in der Visualisierung von Geometrien und in der Verknüpfung von statischen Informationen mit 3D-Objekten. Daher wird BIM im Rahmen dieses Projekts für genau diese Zwecke entsprechend den folgenden Anwendungsfällen eingesetzt (siehe auch Bild 5):

- Darstellung der Brückengeometrie für die Front-End-Visualisierung,
- Strukturelle Klassifizierung entsprechend ASB-ING [4] zur Front-End-Filterung, Navi-

gation und Hervorhebung einzelner Teile des Bauwerks,

- ❑ Lokalisierung von Schäden aus der Inspektion in Abhängigkeit der Zeit,
- ❑ Lokalisierung von Detailuntersuchungen (Diagnostik),
- ❑ Lokalisierung der Sensoren.

Neben der Front-End-Navigation bietet BIM die Möglichkeit, die generierten Informationen (Zustandsindikatoren, Schäden) in einen zeitlichen und räumlichen Kontext zu stellen.

Heute werden bereits viele neue Infrastrukturbauprojekte mit BIM realisiert. Eine Übertragbarkeit des Konzepts auf andere Projekte/ Bauwerke ist somit gewährleistet und für die Zukunft vielversprechend.

5.5 Datenarchitektur und Datenmanagement: das technische Skelett des digitalen Zwillings

Um den digitalen Zwilling mit allen notwendigen Inhalten zu füttern, müssen Daten aus verschiedenen und heterogenen Datenquellen (Messdaten, Bauwerksdaten, Prüfberichte, IoT-Geräte usw.) zusammengeführt werden.

Alle für die Verarbeitung und Visualisierung notwendigen Informationen werden aus einer einheitlichen Datenbank, in diesem Fall einem *OGC-Sensorthings-Server*, geladen. Über mehrere spezifische Schnittstellen zu diesem Sensorthings-Server können IoT-Geräte Daten direkt in das System schreiben. Derzeit wird eine MQTT- oder http-Verbindung für die Datenübertragung von IoT-Geräten verwendet. Die redundante Speicherung von Messdaten kann so für viele Messaufgaben entfallen. Die Verarbeitung erfolgt durch eine *Processing En-*

gine, die sich infrastrukturell an einem *Extract-Transform-Load (ETL) Framework* orientiert. Die einzelnen Datenverarbeitungsschritte werden über die Engine gesteuert und ausgeführt und bestehen aus *Microservices*, die jeweils einen kleinen Teil der gekapselten Fachlogik enthalten. Durch Verkettung dieser *Microservices* können Verarbeitungspipelines erstellt werden. Wenn derselbe Berechnungs- oder Aufbereitungsprozess auf unterschiedliche Daten angewendet werden kann, können diese Pipelines mit den zugehörigen Konfigurationsparametern und Eingabedaten mehrfach parallel genutzt werden.

Alle notwendigen Prozessschritte von der Aggregation bis zur Fusion können über diese Verarbeitungsstruktur abgebildet werden. Darüber hinaus benötigt jede in das System importierte Datenquelle einen speziellen Adapter, um die heterogene Datenstruktur in eine einheitliche und smartBRIDGE-konforme Struktur zu bringen. Nach der Datenvereinheitlichung folgen weitere Verarbeitungsschritte zur Prozessierung der Daten. Ziel dieser Verarbeitung ist die Berechnung des PCI und des CI (siehe Abschnitt 5.2). Die bei der Berechnung entstehenden Zwischen- und Endergebnisse werden ebenfalls auf dem Sensorthings-Server gespeichert. Um jederzeit die gewünschten Daten in der Visualisierung zu finden, können die konfigurierten Prozessketten zur Verarbeitung der Daten über ereignisbasierte, zeitbasierte oder manuelle Trigger ausgeführt werden.

Der Zugriff auf jede Datenaggregationsebene wird über zwei verschiedene *Human Machine Interfaces* gewährleistet, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

5.6 Das Human Machine Interface: Schlüssel zum Erfolg und zur Akzeptanz des digitalen Zwillings

Um konsumierbar zu sein, müssen alle Informationen des digitalen Zwillings, die Verknüpfung der Daten untereinander sowie deren Bezug zu Zeit und Raum zu den handelnden und entscheidenden Personen transportiert werden. Daher wurde ein mehrstufiges *Human Machine Interface (HMI)* entworfen, das die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Nutzergruppen berücksichtigt. Die Hauptaufgabe bei der Entwicklung des HMI bestand darin, die Benutzeroberfläche trotz der Komplexität der zugrundeliegenden Daten und Prozesse intuitiv konsumierbar zu machen

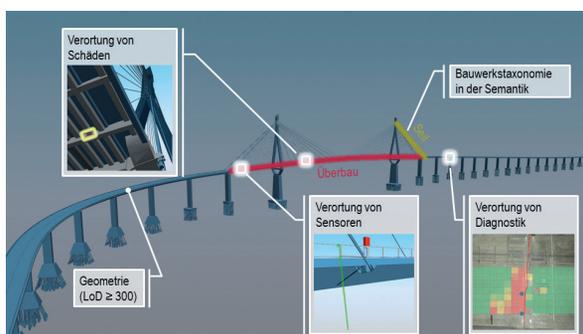


Bild 5 Anwendungsfälle von BIM im Konzept des digitalen Zwillings Grafik: MKP GmbH

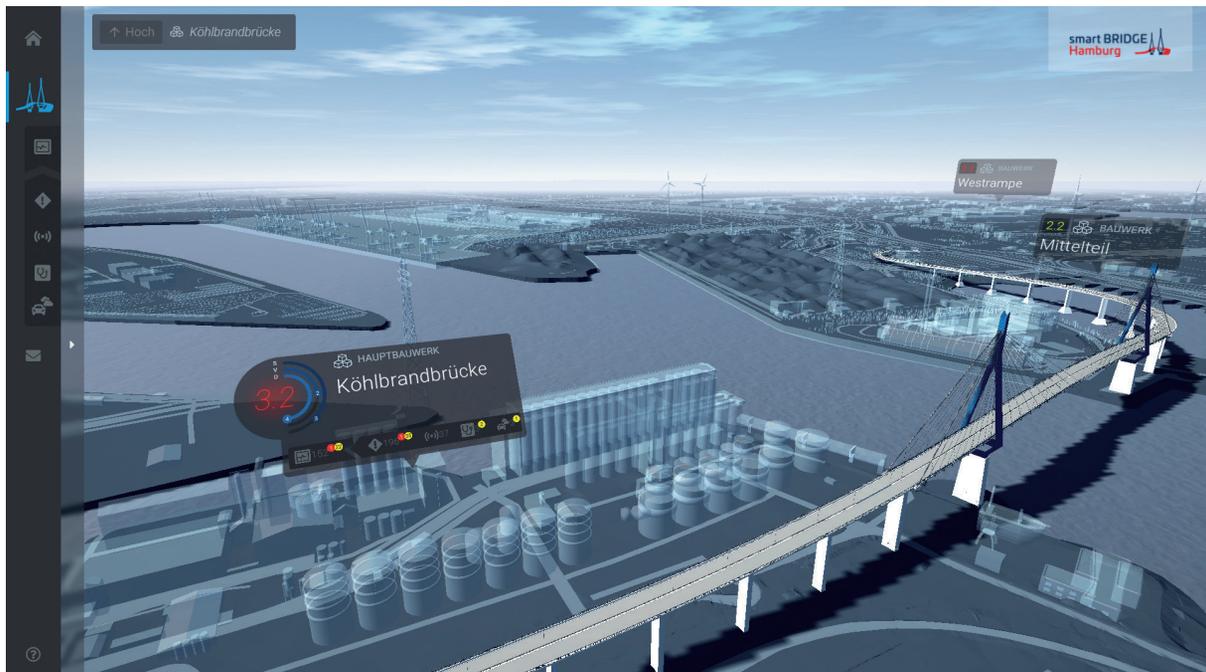


Bild 6 Web-Interface conditionCONTROL

Grafik: Projektkonsortium smartBRIDGE Hamburg

und gleichzeitig an jeder Stelle in die Tiefe der Daten eintauchen zu können.

conditionCONTROL ist die Visualisierung, die auf dem 3D-Modell des Assets basiert und geolokalisierte Kennzahlen und kontextuell hinzugefügte Daten zeigt, die eine schnelle Erfassung und einen vollständigen Überblick über den aktuellen Zustand auf einem hohen Aggregationsniveau ermöglichen, um schnelle Entscheidungen zu treffen (Bild 6). Die Navigation kann explorativ sein, indem man sich im 3D-Kontext bewegt (*Explore-Mode*) oder geführt sein, indem man die Menüs benutzt (*Tour-Mode*). Beide Modi sind miteinander verknüpft und ermöglichen einen *Drill-Down* von der Asset-Ebene bis zur Detailkomponente oder der Schadensebene. Die zugehörige Software-Architektur ist so konzipiert, dass sie sowohl die klassische browserbasierte Darstellung als auch *Augmented Reality* (AR) oder *Virtual Reality* (VR) *Displays* ermöglichen.

expertCONTROL ist die Visualisierung für die detaillierten Daten mit Zugriff auf die verschiedenen Aggregationsstufen von den ersten Messdaten bis zu den aggregierten Informationen. Damit ist die Entwicklung der berechneten Daten nachvollziehbar.

Auf diese Weise schafft das HMI einen einzigen Zugangspunkt zum digitalen Zwilling. Durch die Priorisierung der Benutzerfreundlichkeit der Schnittstelle kann die Methodik der Da-

tenaggregation und -fusion den verschiedenen Benutzergruppen leicht vermittelt werden. Dadurch wird die Akzeptanz des Konzepts des digitalen Zwillings erhöht und sein Erfolg bei der Evolution der Instandhaltung von Brücken gewährleistet.

6 Zusammenfassung

Um die Instandhaltung von Brücken zu optimieren, ist es notwendig, die Arbeit der Brückenprüfer bei der Erkennung von Anomalien und Schäden und der Analyse des Brückenzustands durch die Überwachung des Bauwerks mit Sensoren zu unterstützen. Dies ermöglicht die Erfassung von Daten in Echtzeit. Die gesammelte Datenhistorie ist die Grundlage für eine vorausschauende Instandhaltung. Das Konzept des digitalen Zwillings ist eine innovative Entwicklung zur Optimierung der Instandhaltung. Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept weist die folgenden Hauptmerkmale auf:

- Fusion von Daten aus der klassischen Inspektion und aus Monitoring,
- Aggregation heterogener Datenquellen zu Zustandsindikatoren mit einheitlicher Auswertungsmethode,
- Technologische Konvergenz von BIM, Monitoring und IoT zu einem leistungsfähigen Konzept,

- Hohe Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit der Navigation.

Bei dem in diesem Beitrag vorgestellten Projekt handelt es sich um eine erste Umsetzung des Konzepts, das an einer Brücke demonstriert wurde. Das Konzept ist jedoch leistungsfähig genug, um auf andere Assets ausgeweitet zu werden und die Integration weiterer Innovationen zu unterstützen, z. B. die automatische Erstellung eines 3D-Modells mit Photogrammetrie oder LIDAR-Technologie, die automatische datenbasierte Erkennung von Anomalien (Selbstinspektion), die Anwendung künstlicher Intelligenz zur Analyse von Messdaten und Erstellung von Prognosen. Diese Entwicklung ist notwendig, um die Anforderungen an das Verkehrsnetz der Zukunft zu erfüllen.

Literatur

- [1] Wenner, M.; Meyer-Westphal, M.; Herbrand, M.; Ullerich, C.: The Concept of the Digital Twin to Revolutionise the Infrastructure Maintenance: the Pilot Project smartBRIDGE Hamburg. In: Proc. of 27th ITS World Congress 11.–15.10.2021 in Hamburg
- [2] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung.
- [3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING) – Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, RI-EBW-PRÜF. 2017
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau (Hrsg.): Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten, ASB-ING. 2013
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken, RPE-ING. (Entwurf) 2019
- [6] Schnellenbach-Held, M.; Karczewski, B.; Kühn, O.: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke. Erschienen in: BAST Bericht B105, 2014
- [7] Olcott, S.; Mullen, C.: Digital Twin Consortium Defines Digital Twin. 2020, <https://blog.digitaltwinconsortium.org/2020/12/digital-twin-consortium-defines-digital-twin.html> (Zugriff am 04.01.2021)
- [8] Ullerich, C.; Grabe, M.; Wenner, M.; Herbrand, M.: smartBRIDGE Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings. Bautechnik 97 (2020) 2, S. 118–125
- [9] Marzahn, G.: Die neue Erhaltungsstrategie des Bundes – Planung und Bau von Brücken auf den Hauptverkehrsrouten. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 09./10.03.2020 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021, S. 27–31
- [10] Werdich, M.: FMEA – Einführung und Moderation – Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld). Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011
- [11] Herbrand, M.; Wenner, M.; Ullerich, C.; Rauert, T.; Zehetmaier, G.; Marx, S.: Beurteilung der Bauwerkszuverlässigkeit durch Bauwerksmonitoring – Probabilistischer Beulnachweis der Hamburger Köhlbrandbrücke. Bautechnik 98 (2021) 2, S. 93–104
- [12] Haardt, P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. Erschienen in: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B22, 1999

- 7 Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022
- 11 Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung
- 13 Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig
- 27 Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele
- 43 Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen–Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen
- 57 Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzhängern aus Carbon
- 75 Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben
- 89 Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung
- 107 Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge
- 121 Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg
- 139 smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft
- 151 Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen
- 163 Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach
- 175 Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton
- 191 Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht
- 207 Chronik des Brückenbaus