

Intelligente Brücke

Reallabor Intelligente Brücke
im Digitalen Testfeld Autobahn

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 178

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are closely spaced and have a slight shadow effect, giving them a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Intelligente Brücke

Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

von

Sarah Windmann

Bundesanstalt für Straßenwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 178

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 2116009

Intelligente Brücke – Koordination und Weiterentwicklung
Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Referat

Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-689-4

Bergisch Gladbach, April 2022

Kurzfassung – Abstract

Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Das Bundesfernstraßennetz ist verschiedenen Herausforderungen wie u.a. das gesteigerte Verkehrsaufkommen und die hohe Altersstruktur der Bauwerke ausgesetzt. Aktuell basiert das Erhaltungsmanagement von Brücken auf regelmäßigen Bauwerksinspektionen, die weitestgehend aus einer visuellen Bewertung bestehen. Um den derzeitigen Herausforderungen adäquat zu begegnen sowie vorausschauend handeln zu können, müssen neue, effektive und effiziente Lösungen gefunden werden. Daher hat die BAST 2011 den Forschungsschwerpunkt „Intelligente Brücke“ ins Leben gerufen. Unter Verwendung digitaler Technologien und Methoden wurde damit eine Grundlage für ein prädiktives Erhaltungsmanagement geschaffen, welches Bauwerkseigentümer bei der Gewährleistung der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ihrer Bauwerke unterstützen soll.

Im Rahmen dieses Berichts wurden die relevanten zumeist konzeptionellen Arbeiten aus den Jahren 2011 bis 2020 zusammengestellt. Der Fokus liegt dabei auf den Aspekten Datenerfassung, -aufbereitung, -analyse und -bewertung, -management sowie Qualitätssicherung. Die erfolgten Arbeiten bilden die Grundlage für die Realisierung verschiedener Reallabore, in denen ausgewählte Entwicklungen und Forschungsansätze an Bauwerken unter realen Bedingungen erprobt, bewertet und weiterentwickelt werden.

Das Reallabor „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ wird in diesem Bericht im Detail vorgestellt und die eingesetzten System hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und Dauerhaftigkeit beurteilt. Bei dem Bauwerk handelt es sich um eine vierfeldrige Spannbeton-Hohlkastenbrücke, die mit den vier Messsystemen „BrückenKennwerte“, „drahtloses Sensornetzwerk“, „instrumentierte Lager“ und „instrumentierter Fahrbahnübergang“ ausgestattet ist. Über einen Zeitraum von 5 Jahren erfolgen an dem Reallabor Forschungsprojekte, mit dem Ziel, die Messsysteme im Zusammenhang zu demonstrieren und Verfahren zur zuverlässigen Erfassung und automatisierten Auswertung sowie eine Webanwendung zur Publikation der Ergebnisse zu entwickeln. Damit stehen Informationen zu Verkehr, Wetter- und Klimaeinflüssen, bauteil- und bauwerksbezogene Kennwerte zur Verfügung. Durch die kontinuierlichen Erkenntnisse zu

Einwirkungen und Status des Bauwerks und der instrumentierten Bauteile kann der Betreiber der Brücke unterstützt werden. Die im Rahmen des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen schaffen eine wichtige Grundlage für die Konzeption weiterer Reallabore.

Anhand von Reallaboren werden kontinuierlich Realdaten generiert, die als Grundlage für weitere Forschung dienen können im Hinblick auf u.a. die Verifizierung von Systemannahmen, Überprüfung und Kalibrierung von Ingenieurmodellen sowie die Weiterentwicklung von datenbasierten Algorithmen. Darüber hinaus bieten Reallabore optimale Bedingungen zur Erprobung und Weiterentwicklung von praxistauglichen und zuverlässigen Innovationen.

Smart Bridge - coordination and further development: Living Lab Smart Bridge in the Digitales Testfeld Autobahn

The federal trunk road network is exposed to various challenges such as the increased traffic volume and the high age structure of the structures. Currently, the maintenance management of bridges is based on regular structural inspections, which largely consist of a visual assessment. In order to adequately meet the current challenges and to be able to act with foresight, new, effective and efficient solutions must be found. For this reason, the Federal Highway Research Institute (BAST) launched the research cluster "Smart Bridge" in 2011. Using digital technologies and methods, this created a basis for predictive maintenance management, which is intended to support structure owners in ensuring the safety, reliability and availability of their structures.

Within the framework of this report, the relevant mostly conceptual work from the years 2011 to 2020 was compiled. The focus is on the aspects of data collection, processing, analysis and evaluation, management and quality assurance. The work carried out forms a basis for the realisation of various living labs, in which selected developments and research approaches are tested, evaluated and further developed on structures under real conditions.

The living lab "Smart Bridge in the Digitales Testfeld Autobahn" is presented in detail in this report and the systems used are assessed in terms of

their practical suitability and durability. The structure is a four-span prestressed concrete box girder bridge equipped with the four measuring systems "bridge characteristics", "wireless sensor network", "instrumented bearings" and "instrumented roadway transition". Over a period of five years, research projects were carried out at the living lab with the aim of demonstrating the measurement systems in context and developing procedures for reliable recording and automated evaluation as well as a web application for publishing the results. This will provide information on traffic, weather and climate influences, component-related and structure-related characteristic values. The operator of the bridge can be supported by the continuous findings on the effects and status of the structure and the instrumented components. The knowledge and experience gained from the living lab "Smart Bridge in the Digitales Testfeld Autobahn" provides an important basis for the design of further living labs.

Real data is continuously generated through living labs, which can serve as a basis for further research with regard to, among other things, the verification of system assumptions, the verification and calibration of engineering models and validation and further development of data-based algorithms. Furthermore, living labs offer optimal conditions for testing and further developing practical and reliable innovations.

Inhalt

1	Einleitung	6	4.4	Beurteilung der Systeme auf Grundlage des 5-jährigen Untersuchungszeitraums	41
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	6	4.4.1	Systembeurteilung.....	41
1.2	Vorgehen	6	4.5	Beurteilung von Bedeutung und Nutzen des Reallabors	44
2	Grundlagen	7	5	Ausblick	46
2.1	Begriffliche Grundlagen	7	5.1	Forschungsthemen.....	46
2.2	Intelligente Brücke.....	10	5.2	Weiterentwicklung zum digitalen Zwilling.....	47
2.2.1	Definition.....	10	5.2.1	Definition	47
2.2.2	Ziel und Nutzen	11	5.2.2	Ziel und Nutzen	47
3	Relevante Arbeiten zur Intelligenen Brücke	13	Literatur	49	
3.1	Wichtige Komponenten der Intelligenen Brücke.....	13	Bilder	52	
3.1.1	Datenerfassung.....	14	Tabellen	53	
3.1.2	Datenaufbereitung und -analyse	17			
3.1.3	Bewertung von Daten und Informationen	21			
3.1.4	Datenmanagement.....	24			
3.2	Qualitätssicherung	24			
3.3	Reallabore	24			
4	Reallabor „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“	26			
4.1	Hintergründe und Zielsetzung des Reallabors.....	26			
4.2	Konzept des Reallabors	27			
4.2.1	Vorbereitende Arbeiten.....	27			
4.2.2	Messtechnische und IT-technische Ausstattung des Bauwerks	28			
4.2.3	Projekte	31			
4.3	Projektergebnisse	33			
4.3.1	FE15.0615: Untersuchungsprogramm	33			
4.3.2	FE 15.0631: Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten.....	34			
4.3.3	FE 15.0632: Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager Instrumentiertes Lager	37			
4.3.4	FE 15.0644: Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen.....	39			

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Bundesfernstraßennetz (BfSt) umfasst gemäß aktueller Brückenstatistik 39.928 Brücken mit einer Brückenfläche von rund 31,08 Mio. m² (Bundesanstalt für Straßenwesen 2020). Ein Großteil der deutschen Brückenbauwerke wurde in den 1960er und 70er Jahren gebaut und weist neben konstruktiven Defiziten verschleißbedingt zunehmend Schäden auf. Neben der Alterung sind auch der Klimawandel, der mit steigenden Temperaturen und extremen Wetterereignisse einhergeht sowie steigende Verkehrslasten als Herausforderung für die Bauwerke zu nennen. Für die kommenden Jahrzehnte wird zusätzlich zu den derzeitig schon hohen Verkehrslasten ein weiterer Anstieg der Verkehrslasten, vor allem des Schwerlastverkehrs, prognostiziert (BMVI 2015). Aktuell basiert das Erhaltungsmanagement von Brücken auf regelmäßigen Bauwerksinspektionen, die weitestgehend aus einer visuellen Bewertung bestehen. Viele Schäden entstehen im Inneren der Brückenkonstruktion und werden erst mit Fortschreiten der Schädigung sichtbar, so dass erst nach Entdecken und Bewertung einer Schädigung entsprechende Erhaltungsmaßnahmen eingeleitet werden. Daher wird das derzeitige Erhaltungsmanagement für Brücken als reaktiv bezeichnet. Um den derzeitigen Herausforderungen adäquat zu begegnen sowie vorausschauend handeln zu können, müssen neue, effektive und effiziente Lösungen gefunden werden. Diesen Schritt geht die BAST seit 2011 mit dem Forschungscluster „Intelligente Brücke“. Unter Verwendung digitaler Technologien und Methoden wurde damit eine Grundlage für ein prädiktives Erhaltungsmanagement geschaffen, welches Bauwerkseigentümer bei der Gewährleistung der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ihrer Bauwerke unterstützen soll.

Die Arbeiten des Forschungsclusters „Intelligente Brücke“ lassen sich in zwei Phasen unterteilen. In der ersten Phase lag der Fokus zunächst auf konzeptionellen Projekten, die sich auf Machbarkeit und Grundlagen für Bewertungsmethoden sowie die Entwicklung instrumentierter Bauteile wie z. B. Fahrbahnübergänge und Brückenlager konzentrierten. Aufbauend darauf wurden seit 2016 ausgewählte Entwicklungen und Forschungsansätze in Form von Reallaboren an realen Bauwerken unter realen Bedingungen erprobt, bewertet und weiterentwickelt. In weiteren Forschungsprojekten wurde noch offenen oder sich ergebenden

Fragestellungen nachgegangen. Ziel des Berichts ist es, die relevanten Arbeiten aus den Jahren 2011 bis 2020 sowie Erfahrungen aus dem Reallabor „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ zusammenzustellen und damit eine Grundlage für die Konzeption weiterer Reallabore zu schaffen.

1.2 Vorgehen

In Kapitel 2 werden Grundlagen zur Intelligenten Brücke und mit dieser in Zusammenhang stehenden Begriffe erläutert. Aufbauend darauf werden in Kapitel 3 die in den letzten Jahren erarbeiteten konzeptionellen Grundlagen zur Intelligenten Brücke zusammengestellt. Reallabore haben eine große Bedeutung für die Erzeugung praxistauglicher Produkte und Anwendungen. In Kapitel 4 werden das Reallabor „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“ und die dabei im Rahmen von Ressortforschungsprojekten erzielten Ergebnisse vorgestellt. Die eingesetzten Messsysteme werden u.a. hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und Dauerhaftigkeit beurteilt. Abschließend werden in Kapitel 5 relevante, zukünftige Forschungsthemen aufgezeigt und ein Ausblick zum Thema Digital Twin gegeben, welcher die Weiterentwicklung der Intelligenten Brücke darstellt.

2 Grundlagen

2.1 Begriffliche Grundlagen

Im Folgenden sind ausgewählte Begriffe und ihre Bedeutung aufgeführt, die für die Thematik Intelligente Brücke relevant sind und in diesem Bericht Erwähnung finden. Die meisten Begriffe sind dem Glossar zur Intelligenten Brücke (Schnellenbach-Heldt et al. 2013) entnommen. Den Begriffen, die nicht aus dem genannten Glossar stammen, sind die zugehörigen Literaturverweise beigefügt. Die im Glossar vorgeschlagene Gliederung der Begriffe wurde hier übernommen und erweitert.

Bauwerkserhaltung

Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit kennzeichnet die Widerstandsfähigkeit des Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile gegenüber Einwirkungen, um eine möglichst lange Nutzungsdauer unter Aufrechterhaltung der Standsicherheit und Verkehrssicherheit bei planmäßiger Nutzung und planmäßiger Bauwerksunterhaltung zu erreichen. Die Dauerhaftigkeit ist gegeben, wenn das Bauteil/Bauwerk keine oder lediglich geringfügige Mängel/Schäden aufweist, die im Rahmen der Bauwerksunterhaltung oder im Zuge von geringfügigen Instandsetzungsmaßnahmen behoben werden können.

Instandsetzung

Bauliche Maßnahmen größeren Umfangs, welche der Wiederherstellung des Sollzustandes oder der vollen Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks oder Bauteils ohne verbessernden Charakter der Eigenschaften dienen. Hierzu gehören z. B. Sanierung, Austausch schadhafter Bauteile oder Bauprodukte und Reparaturen.

Status

Die Erfassung des Status eines Bauwerks erfolgt durch die Erfassung von Messdaten mittels am Bauwerk und seiner Bauteile installierter Sensorik sowie deren Analyse und Bewertung.

Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit, engl. *availability*, einer Betrachtungseinheit ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Betrachtungseinheit alle zugesicherten Eigenschaften bei den beschriebenen Umgebungsbedingungen zum beliebigen Zeitpunkt t einhält oder fehlerfrei funktioniert (BSI 2013).

Zustand

Die Erfassung des Zustands eines Bauwerks erfolgt gemäß der DIN 1076. Nach der RI-EBW-PRÜF ist der Zustand nach den Kriterien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit zu beurteilen. Durch die Zustandsnote ist der Erhaltungszustand des Bauwerks charakterisiert. Die Substanzkennzahl entspricht der Zustandsnote, berücksichtigt jedoch nicht die Verkehrssicherheitsbewertung (BMVBS 2013a). Eine neue zusätzliche Beurteilungsgröße stellt der seit März 2020 eingeführte Traglastindex dar. Der Traglastindex bildet sich aus dem Vergleich der Soll- und Ist-Tragfähigkeit einer Brücke. Neben der Diskrepanz zwischen erforderlicher Brückentragfähigkeit (Ziellastniveau) und tatsächlich vorhandener Tragfähigkeit tragen auch bauart- oder materialbedingte Parameter zur Formulierung des Index bei (UAG Traglastindex, 2020).

Einwirkungen und Widerstand am Bauwerk

Außergewöhnliche Einwirkungen

Einwirkung, die i. d. R. von kurzer Dauer, aber von bedeutender Größenordnung ist, und die während der geplanten Nutzungsdauer des Tragwerks (jedoch mit keiner nennenswerten Wahrscheinlichkeit) auftreten kann.

Einwirkung (Beanspruchung)

- a) Gruppe von Kräften (Lasten), die auf ein Tragwerk wirken (direkte Einwirkung).
- b) Gruppe von aufgezwungenen Verformungen oder Beschleunigungen, die z. B. durch Temperaturänderungen, Feuchtigkeitsänderung, ungleiche Setzung oder Erdbeben hervorgerufen werden (indirekte Einwirkung).

Widerstand

Widerstand eines Tragwerks meint das Entgegenhalten seiner Bauteile gegen Einwirkungen (Dilthey und Brandenburg 2002).

Intelligente Brücke

Siehe Kapitel 2.2.

Lebenszyklusmanagement von Bauwerken

Lebenszyklusmanagement

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus mit den Phasen Planung, Bau, Betrieb und Rückbau einer Einheit (Objekt- und Netzebene) mit dem Ziel einer

lebenszyklusübergreifenden Nutzungs-, Ressourcen- und Informations-Optimierung.“

Reaktives Lebenszyklusmanagement

Es liegen keine Informationen über das Ausfallverhalten des Bauwerks vor. Es wird bis zur Abnutzung eingesetzt und notwendige bauliche Maßnahmen zur Erhaltung erfolgen, sobald Schäden sichtbar sind (in Anlehnung an Hölbfer 2014).

Zustandsorientiertes Lebenszyklusmanagement

Reserven einer Brücke und ihrer Komponenten sollen voll ausgeschöpft und gleichzeitig Ausfälle vermieden werden, um damit eine verbesserte Verfügbarkeit zu gewährleisten. Mittels Zustandsinformationen auf Grundlage von messtechnisch erhobenen Daten können rechtzeitig zielgerichtete Maßnahmen eingeleitet werden. Das zustandsorientierte Lebenszyklusmanagement ermöglicht im Vergleich zum Reaktiven eine verbesserte Planungssicherheit und reduzierte Lebenszykluskosten (in Anlehnung an Hölbfer 2014).

Prädiktives Lebenszyklusmanagement

Die prädiktive Lebenszyklusstrategie beinhaltet die Aspekte der zustandsorientierten Strategie und ist um Zustandsprognosen erweitert. Auf dieser Grundlage können frühzeitig zielgerichtete Maßnahmen eingeleitet werden. Das prädiktive Lebenszyklusmanagement bietet neben einer verbesserten Planungssicherheit und reduzierten Lebenszykluskosten das Potenzial optimierter Erhaltungsmaßnahmen (Schadler et al. 2019).

Modellierung

A-priori-Modell

Vor der Einrichtung eines Überwachungssystems wird die Entwicklung eines physikalischen A-priori-Modells des Bauwerks (z.B. mit der Finite-Elemente-Methode) auf Basis der zuvor zusammengeführten Bauwerksinformationen als Grundlage für den Entwurf eines geeigneten Überwachungskonzeptes empfohlen. Dieses *Modell* dient der Bestimmung des Tragverhaltens des Bauwerks sowie der Identifikation potentieller Schwachstellen (Hot Spots). Die Eigenschaften des A-priori-Modells können im Rahmen eines *Model-Updating* an die Eigenschaften des Bauwerks angepasst werden.

Baseline-Modell

Finite-Elemente-Modell, welches bezüglich der im Rahmen eines *Model-Updating* zu kalibrierenden Eigenschaften parametrisiert wurde.

Modell

Ein Modell dient der Beschreibung eines Systems. Es setzt sich zusammen aus einer Modellstruktur und Modellparametern. Mit Hilfe von Modellen werden Beziehungen zwischen Eingangsgrößen (z. B. Belastung eines Tragwerks) und Ausgangsgrößen (z. B. in Folge einer Belastung hervorgerufene Durchbiegung) abgebildet.

Modell-Updating

Bei einem *Model-Updating* werden die unbekannt Parameter eines Modells des vorliegenden Bauwerks so lange kalibriert, bis das statische oder dynamische Verhalten des Modells dem am tatsächlichen Bauwerk gemessenen Verhalten entspricht. Die Modellkalibrierung findet meist auf der Grundlage dynamischer oder statischer Versuche statt. Häufig kommen dabei die Finite-Elemente-Methode und entsprechende Optimierungsalgorithmen zum Einsatz.

Modul

Verknüpfung von Elementen, die in sich ein unabhängiges Teilsystem darstellen und zu einem System zusammenfügbar sind.

Nicht-physikalisches Modell

Modell, bei dem die Eingangs- und Ausgangsgrößen ohne die Kenntnis physikalischer Zusammenhänge miteinander verknüpft sind, z. B. mit Hilfe von Erfahrungswissen. Nicht-physikalische Modelle können mit Lernmethoden entwickelt werden (Beispiel: künstliche neuronale Netze).

Physikalisches Modell

Modell, bei dem die Eingangs- und Ausgangsgrößen auf Grundlage physikalischer Gesetze miteinander verknüpft sind.

Physikalisches Schädigungsmodell

Modell zur Beschreibung des Prozesses einer Schädigung eines Bauteils bzw. Bauwerks. Die *Schädigungsprozesse* können mechanischer, physikalischer oder chemischer Natur sein. Die Abbildung der Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen physikalischer Schädigungsmodelle erfolgt hierbei auf Grundlage physikalischer Gesetze.

Physikalisches Strukturmodell

Physikalisches Modell zur Beschreibung des Tragverhaltens eines Gesamtsystems bzw. Bauwerks oder eines Teilsystems bzw. Bauteils (Beispiel: FE-Modell).

System

Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Elementen. Ein System besteht

aus einer Menge von Elementen, die Eigenschaften besitzen und die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Es wird durch folgende Eigenschaften beschrieben: seine Grenzen, seine Ein- und Ausgänge, seine Elemente, die Verknüpfungen seiner Elemente, die relevanten Beziehungen zwischen den Elementen, die Mittel, mit denen das System seine Einheit erhält und durch die Aufgabe, die es sinnvoll erscheinen lässt, das System als zusammenhängendes Ganzes zu betrachten.

Systemmodell

Ein Systemmodell ist ein *Modell* zur Zusammenfassung des Verhaltens von Elementen, welche zu einem *System* gehören.

Monitoring

Das Verfahren des Monitorings kann wichtige Grundlagen sowohl für das zustandsorientierte als auch für das prädiktive Lebenszyklusmanagement liefern. Monitoring beschreibt den Gesamtprozess einer systematischen Überwachung von Bauwerksreaktionen und/oder einwirkender Größen mittels eines Messsystems über einen repräsentativen Zeitraum (Kurzzeit-, Langzeit-, Dauermonitoring) (DBV 2018). Je nach Ausbaustufe des Monitorings können unterschiedliche Lebenszyklusstrategien unterstützt werden. Die weitverbreitetste Form des Monitorings ist das Structural Health Monitoring (SHM), bei dem bekannte Schäden oder Defizite überwacht werden.

Überwachung

Unter Überwachung wird dabei die zielgerichtete Durchführung von messtechnischen Beobachtungen verstanden, wobei Daten erfasst und mit Erwartungs- oder Grenzwerten verglichen werden (DBV 2018).

Reallabor

Reallabore sind Testumgebungen, in denen verkehrsinfrastrukturelevante Innovationen unter realen Bedingungen erprobt, bewertet und weiterentwickelt werden können (BMW 2020). Aus Reallaboren gewonnene Erkenntnisse können wichtige Grundlagen für eine nachfolgende schnelle Implementierung neuer und innovativer Ansätze in der Praxis liefern, wobei auch dieser Ansatz eine volle Variation aller in der Praxis vorkommenden Randbedingungen nur eingeschränkt ermöglicht (Darbringhaus et al. 2020a). Darüber hinaus bieten Reallabore die Möglichkeit umfangreiche Messdaten unter Realbedingungen zu erfassen, die für weitergehende Forschung zur Verfügung stehen.

Sensorik und Messdatenerfassung, -analyse

Datenerfassungssystem

Hardwareeinheit, die die Signale der Sensoren zusammenführt und für die weitere Informationsgewinnung aufbereitet. Je nach Sensortechnologie werden unterschiedliche Arten von Datenerfassungssystemen eingesetzt.

Drahtloser Sensorknoten

Drahtlos angebundene Messeinheit. Ein Mote besteht aus einer Stromquelle, einem Rechenkern (Mikroprozessor mit Arbeitsspeicher), geeigneten Signalkonditionierungsmodulen, ggf. A/D-Wandlern, einem Funkmodul zur drahtlosen Datenübertragung sowie einem oder mehreren Sensoren.

Drahtloses Sensornetz

Zusammenschluss aus mehreren drahtlosen Sensorknoten.

Ereignisbasierte Datenerfassung

Häufig auch als "intelligente Messdatenerfassung" bezeichnet. Bei Systemen mit ereignisbasierter Datenerfassung wird das Datenerfassungssystem erst bei Eintritt eines definierten Ereignisses (z. B. die Überfahrt eines schweren Fahrzeugs) aktiviert und im Anschluss wieder deaktiviert.

Kontinuierliche Datenerfassung

Das Datenerfassungssystem erfasst kontinuierlich Messdaten mit einer definierten Abtastrate.

Messfehler

Ein Messfehler ist eine Ungenauigkeit eines Messverfahrens, welche durch Ungenauigkeiten des Messsystems und infolge von Fehlbedienung verursacht wird.

Zeitdiskrete Datenerfassung

Bei Systemen mit zeitdiskreter Datenerfassung findet die Datenerfassung in festgelegten Messintervallen statt, wobei ein Zeitsignal den Beginn einer Messung vorgibt. Die Messintervalle sind sorgfältig zu wählen, um den Aufwand für die Messdatenerfassung, -auswertung und -speicherung möglichst gering zu halten.

Sicherheit und Zuverlässigkeit

Grenzzustand

Zustand, bei deren Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt (Beispiele: Grenzzustand der Tragfähigkeit, Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit).

Markov-Ketten

Modell eines stochastischen Prozesses. Durch den Einsatz von Markov-Ketten bei der zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksbewertung ist es möglich, den zukünftigen Zustand eines Bauteils und dessen Wahrscheinlichkeit mit Hilfe von Beobachtungen zu aktualisieren.

Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation ist ein stochastisches Integrationsverfahren, welches bei der Zuverlässigkeitsanalyse zur approximativen Auswertung der *Grenzzustandsfunktion* angewendet werden kann. Dabei werden nicht die stochastischen Variablen selbst in die *Grenzzustandsfunktion* eingesetzt, sondern ihre Realisierungen. Diese werden im Rahmen von vielfach durchgeführten Zufallsexperimenten erzeugt, bei denen die generierten Einwirkungs- und Widerstandsparameter den gegebenen Häufigkeitsverteilungen der *stochastischen Größen* folgen.

Risiko

Das Risiko bezeichnet Wagnis, Gefahr oder Verlustmöglichkeit bei einer unsicheren Unternehmung und ist definiert als das Produkt aus den Konsequenzen eines Versagens (Consequence of Failure, CoF) und der Wahrscheinlichkeit, mit der dieses Versagen eintritt (Probability of Failure, PoF).

Systemanalyse

Ermittlung sämtlicher Komponenten eines Systems und Untersuchung ihres Zusammenwirkens.

Systemversagen

Ein Systemversagen geschieht, wenn sich der *Versagenspfad* bis zum übergeordneten *Strukturelement* des gesamten Systems fortpflanzt.

Zuverlässigkeit

Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils, die festgelegten Anforderungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit wird i. d. R. mit probabilistischen Größen ausgedrückt.

Zuverlässigkeitsindex

Hilfswert zur Berechnung der operativen Versagenswahrscheinlichkeit auf der Grundlage der standardisierten Normalverteilung.

Zielzuverlässigkeit

Eine Zielzuverlässigkeit ist eine *Zuverlässigkeit*, die nicht unterschritten werden soll.

2.2 Intelligente Brücke

2.2.1 Definition

Die Intelligente Brücke stellt die letzte Ausbaustufe des Monitorings dar. Sie bezeichnet ein modulares System zur permanenten Erfassung und Analyse maßgeblicher Messgrößen hinsichtlich Einwirkungen und Bauwerksreaktionen sowie deren ganzheitliche Bewertung, siehe Bild 2.1.

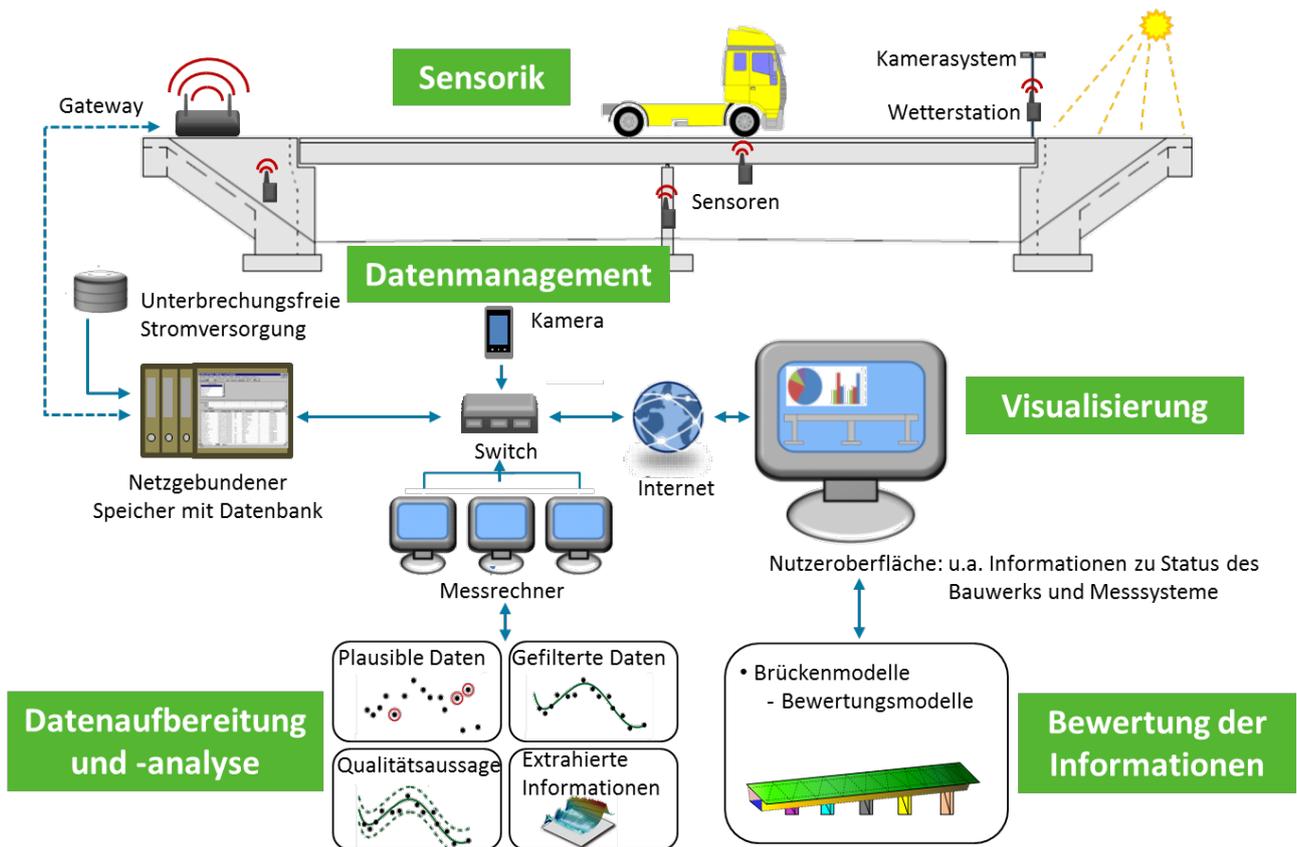


Bild 2.1: Schema der Intelligenten Brücke

Über die gesamte Nutzungsdauer liefert sie kontinuierlich in nahezu Echtzeit Informationen hinsichtlich des Status, der Zuverlässigkeit und Restnutzungsdauer des Bauwerks und seiner Bauteile. Hierbei können sowohl Ingenieurmodelle als auch statistische Verfahren (z.B. Data Mining, Big /Smart Data Analytics) zum Einsatz kommen. Die gewonnenen Informationen dienen dem prädiktiven Lebenszyklusmanagement. Das prädiktive Lebenszyklusmanagement ermöglicht auf Grundlage der Bereitstellung des aktuellen Status und dessen Prognose die Durchführung zielgerichteter sowie vorausschauender Maßnahmen. An einzelnen Bauwerken gewonnene Erkenntnisse können teilweise auf den Teil-/Gesamtbestand übertragen werden. Die Realisierung einer Intelligenten Brücke ist sowohl beim Neubau als auch bei Bestandsbauwerken mit ausreichend hoher Restnutzungsdauer möglich. Hierbei stehen Brückenbauwerke mit großer Bedeutung für das Bundesfernstraßennetz und/oder repräsentative Bauwerke im Vordergrund.

2.2.2 Ziel und Nutzen

Die Intelligente Brücke kann den Bauwerkseigentümer bei der Gewährleistung der Sicherheit,

Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit eines Bauwerks während dessen Nutzungsdauer durch die kontinuierliche Bereitstellung relevanter Informationen hinsichtlich Zustand, Zuverlässigkeit und Restnutzungsdauer eines Bauwerks und seiner Bauteile in nahezu Echtzeit unterstützen. Dazu werden mittels geeigneter Messtechnik sämtliche relevante Einwirkungen und Bauwerksreaktionen erfasst, analysiert und bewertet. Hierbei kommen in der Regel Ingenieurmodelle zum Einsatz. Datengetriebene Ansätze (z.B. Data Mining) gewinnen in technologischen Entwicklungen zunehmend an Bedeutung. Die Intelligente Brücke ermöglicht eine frühzeitige Erkennung von Anomalien in Datenströmen. Anomalien, die in Verhaltensveränderungen des Bauwerks begründet sind, können in der Regel erkannt werden, bevor eine Schädigung visuell erfassbar ist. Zustandsprognosen können auf dieser Grundlage abgeleitet werden. Dem Bauwerkseigentümer stehen durch die Intelligente Brücke neben den Informationen aus der Bauwerksprüfung zusätzliche, objektive Informationen, gewonnen aus Messdaten, zur Verfügung. Diese können als Indikator für eine zuverlässigkeitsorientierte Bauwerksprüfung dienen und deren Effizienz steigern. Die anhand der Intelligenten Brücke bereitgestellten Informationen schaffen die Grundlage für die Entwicklung vom reaktiven zum prädiktiven

Lebenszyklusmanagement. Im Sinne einer prädiktiven Lebenszyklusstrategie sollen die Reserven einer Brücke und ihrer Komponenten voll ausgeschöpft und gleichzeitig Ausfälle vermieden werden, um damit eine bestmögliche Verfügbarkeit zu gewährleisten. Die Informationen aus einer Intelligenten Brücke ermöglichen Kenntniserweiterungen durch die Verifikation von Systemannahmen und Bauteil-/Bauwerksverhalten. Beim Bestandsbauwerk steht im Vergleich zum Neubau stärker das Bauteil- und Bauwerksverhalten im Vordergrund, da tragfähigkeitsrelevante oder verschleißbasierte Veränderungen in der Regel im Laufe der Nutzungsdauer auftreten. Darüber hinaus sind eine Überprüfung bzw. Kalibrierung von Ingenieurmodellen sowie eine Anpassung von Bemessungsnormen möglich. Zusätzlich zu den bereits aufgeführten Nutzenaspekten der Intelligenten Brücke bilden die erfassten Daten und abgeleiteten Informationen eine Grundlage für weitere Forschung. Die Forschung zielt darauf ab, das Bauwerksmonitoring fortwährend zu optimieren und mit den daraus erhaltenen Informationen den Bauwerkseigentümer bestmöglich zu unterstützen. Die Entwicklung von Performance Indicators auf Basis von erfassten Messdaten eines Bauwerks dient der Ableitung von netzweiten Key Performance Indicators z. B. zur Unterstützung eines Asset Managements. Geeignete Datensätze, die u.a. Schädigungsprozesse abbilden, bieten ferner das Potenzial datengetriebene Algorithmen (weiter) zu entwickeln und hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit zu bewerten. Datengetriebene Ansätze können zur Identifikation von z.B. Anomalien und mit konventionellen Methoden nicht erkennbare Korrelationen eingesetzt werden, um damit das Bauwerksmonitoring ziel führend zu optimieren. Im Vergleich zum Monitoring müssen für die Intelligente Brücke höhere Sach- und Personalkosten angesetzt werden, da Messtechnik im größeren Umfang zum Einsatz kommt und dementsprechend größere Datenvolumina mittels dafür geeigneter Ausstattung zu verarbeiten sind. Darüber hinaus erfordert auch die Datenanalyse und -bewertung einen deutlich höheren Aufwand und Expertise. Anders als das Monitoring verfolgt die Intelligente Brücke den Ansatz, kontinuierlich über die gesamte Nutzungsdauer eines Bauwerks maßgebliche Messgrößen hinsichtlich Einwirkungen und Bauwerksreaktionen zu erfassen und zu bewerten. Durch das frühzeitige Erkennen von Verhaltensveränderungen des Bauwerks und seiner Bauteile kann eine zielgerichtete und prädiktive Lebenszyklusplanung erfolgen, die Bauwerkprüfung bestmöglich unterstützt und die Verfügbarkeit eines Bauwerks verbessert werden.

Dies geht mit einer Reduzierung derzeitiger Kosten für den Bauwerkseigentümer/-betreiber und Nutzer einher. Eine flächendeckende Umsetzung der Intelligenten Brücke ist aus heutiger Sicht nicht notwendig, da eine Übertragbarkeit von objektspezifischen Erkenntnissen auf vergleichbare Brückenbauwerke erwartet wird (Dabringhaus et al. 2020b).

3 Relevante Arbeiten zur Intelligenten Brücke

Die BAST initiierte 2011 den Forschungscluster „Intelligente Brücke“ und widmet sich dieser Thematik seither im Rahmen von Eigen-, Auftrags- und Auftragsforschung. Anfangs lag der Schwerpunkt vor allem auf konzeptionellen Projekten, mit dem Ziel den Stand der Technik, die Machbarkeit und Grundlagen aufzuzeigen und zu erarbeiten. Hierbei wurden vor allem die Themen *Messtechnik*, *Datenanalyse* und *Bewertungsverfahren* adressiert. Darauf aufbauend erfolgte die Entwicklung instrumentierter Bauteile wie z.B. Fahrbahnübergänge und Brückenlager und die Demonstration im Rahmen von Reallaboren. Im Rahmen der Workshops „Intelligente Brücke“ (2011) und „Intelligente Brücke – Potentiale und Chancen“ (2014) wurden spezifische Fragestellungen in Fachkreisen diskutiert (Neumann et al. 2015). Ergebnisse wurden sowohl in zahlreichen Veröffentlichungen als auch in den BAST Symposien „Intelligente Brücke – Der Weg in die Praxis“ (2015), „Intelligente Brücke – Neue Entwicklungen“ (2018) Interessierten zugänglich gemacht.

3.1 Wichtige Komponenten der Intelligenten Brücke

Um ein Bauwerk hinsichtlich seines Status ganzheitlich zu bewerten und Vorhersagen abzuleiten,

ist es notwendig alle relevanten Einwirkungen und die daraus resultierende Reaktionen eines Bauwerkes zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten. Erst auf Grundlage der Einwirkungen und Reaktionen eines Bauwerkes sowie typischer Schwachstellen einer Bauart kann ein Datenerfassungskonzept im Sinne der Intelligenten Brücke aufgestellt werden.

Brückenbauwerke sind kontinuierlich Einwirkungen ausgesetzt, die bestimmte Bauteilreaktionen hervorrufen, die wiederum zu Schäden führen können. Der Begriff „Schaden“ wird im Sinne der Bauwerksprüfung nach RI-EBW-PRÜF als Veränderung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes definiert. Dieser kann zu Beeinträchtigungen der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und/oder Dauerhaftigkeit führen (Schnellenbach-Held et al. 2015). Die Standsicherheit eines Bauwerkes ist gegeben, wenn das Bauwerk oder seine einzelnen Bauteile die planmäßigen Belastungen ohne Schaden aufnehmen. Die Verkehrssicherheit ist ein Maß für die Bauwerksausbildung nach anerkannten Regeln der Technik zum jeweiligen Prüfzeitpunkt, welche die Anforderungen an Sicherheit und Ordnung hinsichtlich der gefahrlosen und bestimmungsgemäßen Nutzung des Bauwerkes beinhaltet. Unter der Dauerhaftigkeit wird die Widerstandsfähigkeit eines Bauwerkes und einzelner Bauteile gegenüber Einwirkungen verstanden (BMVBS 2013b). Schäden an Brückenbauwerken lassen sich weitestgehend in Beton-, Bewehrungs- und Bauwerksschäden einteilen, siehe Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Relevante Schäden an Massivbrücken nach (Schnellenbach-Held et al. 2015)

Betonschäden	Bewehrungsschäden	Bauwerksschäden
Risse im Beton	Korrosion der Bewehrung	Lager
Abplatzungen versch. Art	Risse an der Bewehrung	Bauteilverformungen
Zu geringe Betonabdeckung	Schäden am Vorspannsystem	Schäden an der Ausrüstung

Die meisten Schäden eines Brückenbauwerkes treten am Überbau auf. Für die Vorhersage von Schäden und deren Entwicklung ist es notwendig, die Ursache von Schäden zu kennen. Neben Schäden aufgrund von Planungs- und Entwurfsfehlern, Ausführungsfehlern und stofflichen Veränderungen von Baustoffen ist ein Mangel auf der Widerstandsseite oder eine Überbeanspruchung auf der Einwirkungsseite Ursache für Schäden. Die

Ursachenbestimmung von Schäden ist in den wenigsten Fällen trivial, weil sich ein Schaden häufig aus dem Zusammenwirken verschiedener Einwirkungen und den zugehörigen Bauwerks- und Bauteilreaktionen zusammensetzt. Die für ein Brückenbauwerk relevanten Einwirkungen sind in Tabelle 3.2 aufgeführt (Schnellenbach-Held et al. 2015).

Tabelle 3.2: Einwirkungen auf Brückenbauwerke nach (Schnellenbach-Held et al. 2015)

Einwirkungen aus		
Bauwerk	Bauwerksnutzung	Bauwerksumgebung
<ul style="list-style-type: none"> • Eigenlast • Vorspannung • Kriechen, Schwinden 	<ul style="list-style-type: none"> • Ständige Einwirkungen (Lasten aus Einbauten: Fahrbahnbelag, Abdichtungen etc.) • Veränderliche Einwirkungen (z.B.: Verkehrslasten, Einsatz von Tausalz) • Außergewöhnliche Einwirkungen (z.B.: Anpralllasten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Wind- und Schneelasten • Setzungen • Umwelteinflüsse (z.B.: CO₂, UV-Strahlung) • Extremereignisse (z.B.: Erdbeben, Hochwasser)

3.1.1 Datenerfassung

Anhand der Einwirkungen und Bauwerksreaktionen eines Bauwerks können relevante Parameter abgeleitet werden, die zum ganzheitlichen Monitoring eines Bauwerkes erforderlich sind. Tabelle 3.3 zeigt die relevanten Monitoringparameter und die zugehörigen Messintervalle und -genauigkeiten. Eine Messwerterfassung kann allgemein kontinuierlich oder ereignisdiskret durchgeführt werden. Bei der kontinuierlichen Erfassung werden mit einer festgelegten Abtastrate Messwerte erhoben. Die zeitdiskrete Methode ist vor allem für sich

langsam ändernde Parameter geeignet wie z.B.: Temperatur, Korrosion und Feuchte. Bei der ereignisdiskreten Messwerterfassung sind permanent messende Sensoren erforderlich. Diese werden durch ein Triggersignal zum Messen aufgefordert. Eine ereignisdiskrete Messwerterfassung kann sich für temporäre Ereignisse wie z.B.: Verkehrslasten eignen. Für eine optimale Messwerterfassung ist eine definierte Messgenauigkeit in Abhängigkeit von den jeweiligen Parametern erforderlich, um zuverlässige Aussagen über das Bauwerk treffen zu können, vgl. Tabelle 3.3 (Schnellenbach-Held et al. 2015).

Tabelle 3.3: Monitoringparameter mit zugehörigem Messintervall und Messgenauigkeit nach (Schnellenbach-Held et al. 2015)

Parameter		Messintervall	Messgenauigkeit
Verkehrslasten		-	-
Temperatur		0,01 -12 h	0,1 - 0,5 °C
Windgeschwindigkeit		1 – 2,5 Hz	0,1 - 1 m/s
Luftfeuchte		0,01 -12 h	1 - 5 %
Materialfeuchte		Tage bis Monate	1 - 5 %
Chloridgehalt		Tage bis Monate	0,01 - 0,05 mol/l
pH-Wert		Tage bis Monate	0,1 - 0,5
Rissentwicklung/ -öffnung	Infolge Verkehr	> 100 Hz	0,001 - 0,01 mm
	Infolge Temperatur	0,01 -12 h	
Dehnung/ Spannung	Infolge Verkehr	> 100 Hz	0,1 - 1 µm
	Infolge Temperatur	0,01 -12 h	
Verformung/ Verschiebung/ Setzung		Nach Bedarf	0,01 - 1 mm
Neigung	Infolge Verkehr	> 100 Hz	0,01 °
	Infolge Setzung	< 1 Hz	
Beschleunigung		> 100 Hz	0,01 - 0,1 m/s ²

Monitoringsysteme lassen sich allgemein in globale und lokale Systeme einteilen. Lokale Monitoringsysteme werden eingesetzt, um bekannte Schäden in ihrem Verhalten mittels gezielt positionierter Messtechnik zu überwachen. Bei einem globalen Monitoringsystem hingegen müssen die einzelnen Schwachstellen eines Systems nicht bekannt sein, sondern werden aus den Tragwerkreaktionen des gesamten Bauwerkes ermittelt. Daraus folgt, dass ein Bauwerk mit globalem Monitoringsystem nicht vollumfänglich mit Sensorik ausgestattet werden muss und trotzdem der Status eines Bauwerkes ganzheitlich bewertet und prognostiziert werden kann (Freundt et al. 2014). Im Gegensatz zum Neubau, bei dem anhand eines globalen Monitoringsystems alle relevanten Informationen für eine ganzheitliche Bewertung des Bauwerkes erfasst werden, scheint im Hinblick auf die Intelligente Brücke beim Bestandsbauwerk eine Kombination aus einem globalen und lokalen Monitoringsystem zielführend, um die vorhandenen Schwachstellen zusätzlich gezielt zu überwachen.

Innovative Sensorsysteme und instrumentierte Bauteile

Ein Sensor ist ein Messgrößenaufnehmer, der als Teil einer Messeinrichtung auf eine Messgröße unmittelbar anspricht, und ist somit das erste Element einer Messkette (DIN 1319-1:1995-01). Es gibt eine große Vielfalt an Sensoren, die bei der Intelligenten Brücke Anwendung finden können. Im Rahmen dieses Berichts wird nicht näher auf die einzelnen Arten und Funktionen sämtlicher Sensoren eingegangen. Eine detaillierte Zusammenstellung geeigneter Sensoren und deren Funktionsweise kann (Fakhouri 2013) entnommen werden. Die Art der Datenerfassungssysteme kann in drahtlose und drahtgebundene Systeme unterteilt werden. Drahtgebundene Übertragungstechniken sind in der Praxis an Brückenbauwerken deutlich weiter erprobt als drahtlose Systeme. Sie sind kostengünstiger aufgrund der Anschaffung und Installation der Datenleitungen und nur in zugänglichen Bereichen installierbar. Drahtlose Sensoren hingegen können auch an schwer zugänglichen Stellen eingesetzt werden, sind jedoch eingeschränkt durch ihre Energiequelle begrenzt (Krueger und Große 2010).

Ein drahtloses Sensornetz besteht aus verschiedenen Sensorknoten (Motes), die drahtlos miteinander über Funk kommunizieren. Diese bestehen wiederum jeweils aus einer Sensoreinheit, also einem Messwertaufnehmer, einer Recheneinheit,

zur Verarbeitung der Daten, einem Transceiver für die Datenübertragung und einer Energiespeichereinheit. Sensorknoten werden auch als intelligente Sensoren bezeichnet, weil sie nicht nur eine Messgröße aufnehmen, sondern in der Lage sind einen Selbstabgleich, eine Selbstüberwachung sowie eine Datenverarbeitung durchzuführen (Dargie und Poellabauer 2010; Sauerer 2013). Die erfassten Daten werden von dort aus an einen Zentralrechner weitergeleitet und können dort weiterverarbeitet werden. Drahtlose Sensornetze werden in datenzentrische und verteilte Systeme unterschieden. Beim datenzentrischen System erfolgt eine Weiterverarbeitung der Daten im Zentralrechner. Dahingegen werden bei verteilten Systemen die erfassten Daten im Sensorknoten selbst oder in einem übergeordneten Knoten verarbeitet und ausgewertet. Für den Datentransfer in Bezug auf ein Brückenbauwerk kommen folgende Netzwerktopologien infrage: Stern- und Multi-hop - Topologie mit und ohne Clustering. Aufgrund des geringeren Stromverbrauchs und eines geeigneten Datentransfers ist die Multi-hop - Topologie mit Clustering vor allem für Bauwerke mit großen Sensornetzen am besten geeignet. Bei der Cluster-Methode werden entweder durch den Betreiber oder durch das System benachbarte Sensorknoten zu Cluster zusammengefasst, so dass eine Daten(vor)analyse in dem jeweiligen Cluster-Knoten erfolgen kann. Als Funkübertragungsstandard eignet sich z.B. ZigBee, welcher für die Übertragung von Daten in Sensornetzen optimiert ist. ZigBee hat geringe Übertragungszeiten, so dass eine Echtzeitanwendung möglich ist (Krüger & Große, 2010). Die Übertragung per Funk erfordert einen hohen Energiebedarf, so dass besonders bei energieautarken Systemen energiesparende innovative Kommunikationsverfahren erforderlich sind. Dazu zählen zum Beispiel dauerhaft eingeschaltete und sehr energiesparsame Empfänger, die ferner als Wake-up-Receiver bezeichnet werden. Im Bedarfsfall wecken diese einzelne Sensorknoten mit geringer Ansprechzeit auf, so dass Daten ohne bedeutende Verzögerung übertragen werden können (Sauerer, 2013).

Im Rahmen eines Antragsforschungsprojekts (Fischer und Boldt 2015) wurde u.a. ein solches Schlaf-Wachrhythmus-System für ein drahtloses Sensornetzwerk entwickelt, bei dem weitestgehend nur beim Datenaustausch Energie verbraucht wird. Dazu wurde ein Low Power Listening Radio-Protokoll (LPLRP) entwickelt, welches dafür sorgt, dass beim Verschicken von Daten zunächst so oft eine Präambel an den inaktiven Sensorknoten

gesendet wird, bis dieser seine Funkschnittstelle einschaltet. Anschließend werden die Daten übertragen und die Funkschnittstelle nach der Datenübertragung ausgeschaltet. Im Rahmen des Projektes wurde ein drahtloses Sensornetzwerk mit verschiedenen Sensoren konzeptioniert und an der Straßenbrücke der Überquerung der B432 über die B206 in Bad Segeberg realisiert. Das einjährige Monitoring zeigte die prinzipielle Machbarkeit des Systems.

Brückenbauwerke werden im Rahmen des Erhaltungsmanagement als eine Gruppierung zusammenwirkender Bauteile betrachtet, da diese unterschiedliche Beanspruchungen erfahren und durch voneinander abweichende Lebensdauern und Erhaltungsbedarfe charakterisiert sind. Zu den maßgeblichen Bauteilen gehören u.a. Überbau, Unterbau, Lager, Fahrbahnübergang, Kappen, Abdichtung und Beläge. In den vergangenen Jahren wurden Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu instrumentierten Bauteilen angestoßen. Anhand instrumentierter Bauteile ist es nicht nur möglich, relevante Informationen hinsichtlich Einwirkungen und Reaktionen des Bauteils zu ermitteln, sondern es lassen sich je nach Anwendung auch Auswirkungen auf das gesamte Bauwerk ableiten (Haardt und Dabringhaus 2018). Im Folgenden werden die im Rahmen des Innovationsprogramms der BAST und weiterer Programm der Antragsforschung entwickelten instrumentierten Bauteile vorgestellt.

- Instrumentierter Kalottenlager

Brückenlager sind bedeutende Bauteile einer Brücke, da sie die Kräfte ihres Tragwerks auf den Unterbau übertragen. Im Rahmen von Antragsforschung (Mangerig et al. 2015) wurde ein instrumentiertes Kalottenlager konzeptioniert. Anhand der Messwerte der eingebauten Drucksensoren können die vertikalen Lagerkräfte abgeleitet werden. Neigungssensoren werden zur Erfassung der Lagerverdrehung eingesetzt. Die Bestimmung des Gleitweges zur Ableitung des Verschleißes des Gleitmaterials sowie die Bestimmung von Steifigkeitsveränderungen, Stützensenkungen und Temperaturbeanspruchungen sind auf Grundlage von Messergebnissen dieses instrumentierten Lagers möglich. Aufbauend auf Kleinteilversuchen wurde ein Pilotprojekt durchgeführt und das instrumentierte Lager an einem Bauwerk erprobt.

- Instrumentierte Schwenktraversendehnfuge

Fahrbahnübergänge gehören zu den stark beanspruchten Bauteilen einer Brücke und sind für eine Dauer von 40 Jahren ausgelegt (Bundesanstalt für Straßenwesen 2005). Im Rahmen eines Antragsforschungsprojekts erfolgten Grundlagenuntersuchungen und aufbauend darauf wurde ein Konzept für eine instrumentierte Schwenktraversendehnfuge erarbeitet. Demnach ist die Dehnfuge mit Dehnmessstreifen (DMS), piezoelektrischen Kraftmessringen und Laserwegsensoren ausgestattet. Anhand der erfassten Messdaten können das Verkehrsaufkommen, die Fahrzeuggeschwindigkeit, -gewichte, der Achsabstand und die Achslast abgeleitet sowie Spaltweiten ermittelt werden. Es erfolgten Kleinteilversuche und Bauteilversuche im Labor sowie Überrollversuche im Außenversuchsstand der Universität der Bundeswehr (Mangerig et al. 2015).

- RTMS-System

Im Rahmen des Projekts zum Road Traffic Management System (RTMS) wurde ein fachtechnisches Konzept und erforderliche technische Equipments für Brücken zur Ermittlung von ausgewählten Einwirkungen, Widerstand und Status in nahezu Echtzeit erarbeitet. Das entwickelte System dient gleichzeitig als Datenlieferant für Verkehrszählungen und Achslastermittlungen. Ebenso wurden Modelle zur Statusentwicklung des Bauwerks abgeleitet und im Rahmen von experimentellen Untersuchungen und ersten Pilotstudien getestet (Freundt 2014).

- SMART DECK

Das System SMART-DECK zielt darauf ab, die Dauerhaftigkeit und Lebensdauer von Brücken durch Kombination verschiedener Funktionen zu erhöhen: Das vollflächige Echtzeit-Monitoringsystem detektiert das Eindringen von Feuchtigkeit in die Fahrbahnplatten der Brücken und mit dem vollflächigen, präventiven kathodischen Korrosionsschutz (pKKS) kann einer Depassivierung der Stahlbewehrung durch die mit der Feuchtigkeit eingetragenen Chloride vorgebeugt werden. Darüber hinaus können Fahrbahnplatten durch SMART-DECK in Querrichtung verstärkt und somit die Tragfähigkeit der Brücken erhöht werden. Das System ist modular aufgebaut, so dass die einzelnen Funktionen nach Bedarf

ausgewählt und bei Instandsetzungs- sowie Neubaumaßnahmen eingesetzt werden können, siehe Bild 3.1.

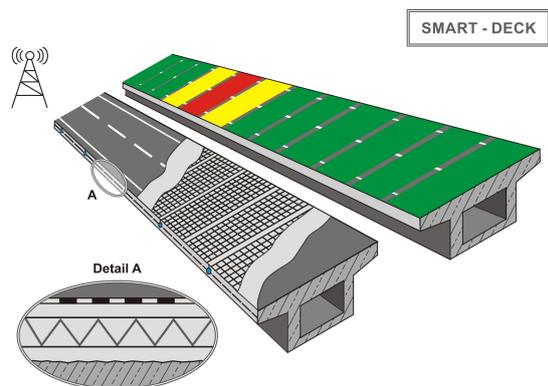


Bild 3.1: Funktionaler Aufbau von SMART-DECK, grün: Abdichtung ok, rot: Eindringen von Feuchtigkeit (Institut für Baustoffforschung, ibac, RWTH Aachen)

SMART-DECK besteht aus einer 35 mm dünnen Schicht aus feuchtesensitivem Mörtel, PCC mit einem Größtkorn von 4 mm, der durch zwei mittels Abstandshalter fixierte, epoxidharzgetränkte Carbondetextilien bewehrt ist. Mit dieser unterhalb der Abdichtung angeordneten Schicht wird sowohl die Verstärkung des Bauwerks in Querrichtung als auch das Monitoring sowie das pKKS realisiert. Im Vergleich zu herkömmlichen Verstärkungen in Querrichtung, z.B. mit eingeschlitzten Bewehrungsstäben, ist die Ausführung von SMART-DECK minimalinvasiv. Die bis zu 20 m² großen Felder der textilen Bewehrung repräsentieren jeweils einen Sensor, der über ein BUS-System in messtechnischer Hinsicht getrennt gemessen und angesteuert wird. Anhand geeigneter Kalibrierkurven wird über die Messung des elektrischen Widerstands zwischen den beiden Carbondetextilgelegen der Widerstandswert des Mörtels ermittelt. Ein Widerstandsabfall deutet auf eine Undichtigkeit in der Abdichtung hin, da geringe Widerstände mit einem hohen Wassersättigungsgehalt des Mörtels einhergehen. Der Betreiber des Bauwerks kann den elektrischen Widerstand in Echtzeit überwachen und Rückschlüsse auf den Zustand des Abdichtungssystems ziehen. Wenn im Schadensfall eine Instandsetzung der Brücke zeitnah nicht möglich ist, können erforderliche Maßnahmen mit der Aktivierung des pKKS in günstigere Perioden verschoben werden. Bei der Aktivierung des pKKS wird zwischen der textilen Carbonbewehrung und der Stahlbewehrung ein elektrisches Feld

aufgebaut, welches die Bewehrung polarisiert und kathodisch schützt und demzufolge eine Depassivierung der Stahlbewehrung verhindert (Dabringhaus et al. 2019).

3.1.2 Datenaufbereitung und -analyse

Die Datenaufbereitung und -analyse sind essenziell für die Intelligente Brücke zur Erzielung des in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Nutzens. Zu den wesentlichen Schritten der Datenaufbereitung und -analyse zählen u.a. die Datenreduktion, die zeitliche Synchronisierung von Messdaten unterschiedlicher Messsysteme zur gemeinsamen Auswertung, die Transformation und Fusion von Messdaten sowie die Datenplausibilisierung.

Die Sensordatenfusion dient dazu Messdaten verschiedener Sensoren so zusammenzuführen, dass eine bauwerks- oder bauteilbezogene Statusbeurteilung möglich ist. Dabei werden relevante Informationen aus störungsbehafteten Messdaten herausgefiltert. Des Weiteren können mittels einer Sensordatenfusion temperaturabhängige Eingangsdaten kompensiert, ungewollte Tagesschwankungen bereinigt und eine Glättung rauschbehafteter Daten vorgenommen werden. Eine Interpolation der Daten ist dann erforderlich, wenn zum Beispiel Sensorsignalfehler, die bei der Plausibilitätsprüfung erfasst werden, unterdrückt werden müssen. Bei einer zeit- und ordiskreten Monitoring können mittels der Interpolation fehlende Daten bestimmt werden. Eine Komponente der intelligenten Datenverarbeitung ist die Ableitung höherwertiger Aussagen (Sawo et al. 2015a).

Um zuverlässige Aussagen über den Status eines Bauwerks treffen zu können, müssen vor allem plausible Daten für die Einbindung in Bewertungsmodellen vorliegen. Ziel einer Plausibilisierung ist es, Anomalien in einem Datenstrom sicher zu erkennen und diesen ggf. geeignet zu bereinigen. Zu den gewöhnlichen Anomalien von Sensordatenströmen zählen u.a. fehlende Daten, Ausreißer und Drifts. Um eine erkannte Anomalie bewerten zu können und ggf. Schlussfolgerungen für das Bauwerk oder das Messsystem ableiten zu können, ist es wichtig, die Ursache der Anomalie zu kennen (Bao et al. 2019).

Ein Sensorsignal wird in der Regel durch Bauwerksreaktionen, welche von Bauwerkseinwirkungen und -widerstand beeinflusst werden, Umwelteinflüssen sowie dem Sensorzustand und -eigenschaften bestimmt. Um Anomalien durch Sensorsignalfehler wie z.B. Sensorausfall, Alterung von Sensoren und Störeinflüsse zu erkennen, werden

in der Regel bei Monitoringanwendungen redundante Messungen durchgeführt (Sawo et al. 2015b). Relevante Bauwerkseinwirkungen wie Verkehr und klimatische Einflüsse werden beim Bauwerksmonitoring u.a. ermittelt, um deren Effekte in Messdaten zu kompensieren und die Messdaten zu glätten. Von besonderer Bedeutung sind die Anomalien in Messdaten, die Veränderungen im Bauwerk repräsentieren. Für die Erkennung von u.a. Anomalien können zwei grundlegend verschiedenen Vorgehensweisen, das modellbasierte sowie das rein datengetriebene und modellfreie Verfahren, unterschieden werden.

Modellbasierte und rein datenbasierte Ansätze

Die konventionelle Herangehensweise ist das modellbasierte Verfahren. Hierbei stehen zur Abbildung eines Prozesses physikalische Zusammenhänge und Eigenschaften im Vordergrund. Der größte Vorteil der modellbasierten Verfahren liegt in der Nachvollziehbarkeit ihrer Ergebnisse, was vor allem für sicherheitsrelevante Bereiche der Bauwerksmonitoring von größter Bedeutung ist. Grundvoraussetzung für diese Herangehensweisen ist jedoch die Verfügbarkeit physikalischer Modelle, die die Realität möglichst genau abbilden. Entsprechende Modellierungen können zum Teil mit sehr hohem Aufwand und teilweise unbekanntem Parametern verbunden sein (Sawo et al. 2015b). Für manche Prozesse existieren derzeit noch keine Modelle, da u.a. noch kein ausreichendes Prozessverständnis zur Beschreibung von Modellen vorliegt (Thöns et al. 2015).

Im Gegensatz zu den modellbasierten Verfahren liegen den rein datengetriebenen Ansätzen keine physikalischen Modelle sondern Datenmodelle zugrunde. Die Datenmodelle werden mittels

Trainingsdaten aufgebaut. Grundlage für die Anwendung dieses Verfahrens ist die Verfügbarkeit großer Datenbestände, um anhand umfangreicher Trainingsdaten Datenmodelle zu erzeugen, die die Wirklichkeit so gut wie möglich abbilden und um die erzeugten Modelle evaluieren zu können. Der Einsatz von datengetriebenen Ansätzen bietet großes Potenzial, wenn sich die physikalischen Gesetzmäßigkeiten eines Bauwerks nicht oder nur mit einem hohem Aufwand modellieren lassen. Datengetriebene Verfahren lassen sich in „überwachte“, „nicht überwachte“ und „semi-überwachte“ Verfahren unterscheiden. Beim „überwachten“ Verfahren werden die Datenmodelle anhand von Trainingsdatensätzen, deren Klassenzugehörigkeit bekannt ist, gelernt. Ein Beispiel hierfür ist die Erkennung von Schäden auf Fotos mittels eines Algorithmus, dessen Datenmodell mit Schadensfotos und den zugehörigen Schadensarten erstellt wurde. Werden Trainingsdaten ohne Label zur Erzeugung von Datenmodellen verwendet, handelt es sich um ein „nicht überwacht“ Verfahren. Durch Mustererkennung können mit diesem Verfahren Anomalien, Defekte innerhalb eines Datenstroms sowie Zusammenhänge zwischen verschiedenen Datenströmen gefunden werden (Smarsly et al. 2016). Beispiele für datengetriebene Ansätze sind z.B. Gauß-Prozesse, statistische Lerntheorien, künstliche neuronale Netze, Data Mining sowie weitere maschinelle Lernalgorithmen. Für die aufgezählten Verfahren ist wenig Prozesswissen erforderlich. Jedoch ist mit diesen Verfahren eine Rückverfolgbarkeit der Ergebnisse nicht möglich. Eine weitere Herausforderung besteht in der geringen Verfügbarkeit von Daten, die einen Schädigungsfall abbilden (Sawo et al. 2015b). Tabelle 3.4 zeigt die geeignetsten Kombinationen aus Analyseverfahren und Datenverarbeitungsschritte.

Tabelle 3.4: Einsatzbereiche verschiedener Analyseverfahren nach (Sawo et al. 2015a)

	Datenplausibilisierung	Datenfusion	Interpolation	Ableitung höherwertiger Informationen	Datenreduktion
Verfahren	datenbasiert	modellbasiert	modellbasiert	datenbasiert	modellbasiert

Simulierte Messdaten einer geschädigten Brücke

Ein wesentliches Ziel des Brückenmonitorings ist die frühzeitige Erkennung relevanter Strukturveränderungen. Aufgrund des wechselnden Betriebszustandes von Brücken, der durch eine komplexe Ausprägung der Messdaten wiedergespiegelt wird, ist die Unterscheidung zwischen planmäßigen und unplanmäßigen Verhalten eine Herausforderung.

Hierfür kann sowohl ein modellbasierter als auch ein rein datengetriebener Ansatz herangezogen werden. Beim modellbasierten Verfahren dienen Sensordaten zur kontinuierlichen Aktualisierung eines Finite-Elementen-Modells und ermöglichen damit eine solide Strukturanalyse. Ferner können sie auch für eine Schadenserkennung herangezogen werden. In Rahmen des mFund-Projekts

„Online Sicherheitsmanagement für Brücken“ (O-SIMAB) wurde u.a. eine Methode zur Modellierung von Litzen- und Spanngliedbrüchen entwickelt, die sich in ein Finite-Elemente-Modell integrieren lässt. Hierbei wurde die Wiederverankerung der Vorspannelemente berücksichtigt (Seiffert und Jansen 2019).

Bei der rein datengetriebenen Vorgehensweise werden keine physikalischen Modelle für die Anomalieerkennung in Datenströmen herangezogen. Allein auf der Grundlage von Sensordaten wird zunächst ein „Normal-Modell“ des ungeschädigten Bauwerkszustands erzeugt und dieses im Laufe der Nutzungsdauer mit aufgezeichneten Sensordaten abgeglichen (Kleinert und Sawo 2020). Bei der Erstellung des „Normal-Modells“ sollten Daten über einen Monitoringzeitraum von mindestens einem Jahr herangezogen werden, um den temperaturbedingten Jahreszyklus abzudecken. Zur Unterscheidung der Ursache einer erkannten Anomalie und zur Überprüfung der Zuverlässigkeit von entwickelten Algorithmen können Daten dienen, die während des Bauwerksbetriebs eine definierte Schädigung beschreiben. Dieser Zustand ist jedoch absichtlich kaum zu erzeugen und steht darüber hinaus im Widerspruch zum Erhalt der Bauwerks- und Verkehrssicherheit. Angesichts fehlender realer Messdaten bei unplanmäßigem Verhalten wurden im Rahmen eines Projektes der BAST, (Freundt 2020), Kenngrößen-Zeitverläufe einer im Betrieb befindlichen Spannbetonbrücke mit einer Finiten Element Simulation erstellt. Diese wurden für den ungeschädigten Zeitraum unter Berücksichtigung der Einwirkungen infolge schwankender Temperaturbeanspruchungen und Verkehrsbeanspruchungen über einen Zeitraum von 1 Jahr simuliert. Darüber hinaus wurden Kenngrößen-Zeitverläufe für folgende Schadensszenarien über einen Zeitraum von 1 Monat simuliert:

- *lokal begrenzte und schleichend zunehmende Schädigung*, z.B. eine chloridinduzierte Korrosion des schlaffen Betonstahls. Dies wurde im Tragwerksmodell durch eine lokal begrenzte Reduzierung des E-Moduls um 30 % realisiert.
- *lokal begrenzte und plötzlich eintretende Schädigung*, z.B. Bruch eines oder mehrerer Spannglieder im Verbund. Dies wurde im Tragwerksmodell durch eine Reduzierung des E-Moduls um 50 % abgebildet.
- *global wirkende und schleichend zunehmende Schädigung*, z.B. Lagerversteifung. Im Modell wurden dazu an zwei in Längsrichtung

benachbarten Lagern Federn mit einer sehr hohen Steifigkeit eingesetzt. (Freundt 2020).

Für die Erzeugung der Messdaten im Schädigungsfall wurden die Einflussflächen bzw. Kennwerte aus Temperaturbeanspruchung unter Anwendung der Szenarien ermittelt. Bild 3.2 zeigt die künstlich Messwertverläufe eines Dehnungsmessstreifens für den ungeschädigten Fall und die drei Schädigungsszenarien. Hier ist eine deutliche Abweichung des Messdatenverlaufs bei Szenario 1 zu erkennen (Freundt 2020).

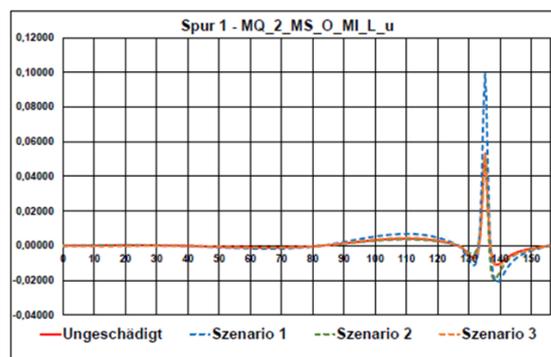


Bild 3.2: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung oben – Spur 1 (Freundt 2020)

Die erzeugten künstlichen Messdaten für das planmäßige und unplanmäßige Verhalten sollen ein Hilfsmittel für weitere Forschung zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung bereits vorhandener datengetriebener Algorithmen sowie zur Validierung bezüglich ihrer Zuverlässigkeit zur Früherkennung von unplanmäßigen Veränderungen im Systemverhalten dienen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die simulierten Daten von der Güte des FE-Modells abhängen und die Realität nicht in Gänze wirklichkeitsgetreu abbilden können.

Konzept für die algorithmisch gestützte Sensordatenanalyse

Mit einer Datenanalyse wird das Ziel verfolgt, relevante Informationen und Wissen aus Sensordaten abzuleiten. Datengetriebene Ansätze bieten ergänzend zu den konventionellen Methoden das Potenzial ohne explizites Vorwissen bisher unbekannt Zusammenhänge in Daten zu erkennen. Im Rahmen des von der BAST beauftragten Projekts „Intelligente Brücke - Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten“ wurde u.a. ein Konzept für die rein algorithmisch gestützte Sensordatenanalyse entwickelt mit dem Ziel, mögliche Zusammenhänge zwischen verschiedenen Datenströmen halbautomatisch zu erkennen ohne

eine explizite Modellierung durch ein physikalisches Modell vorauszusetzen. Hiermit sollen Bauingenieure bei der Datenbewertung komplexer Bauwerksmonitoringsysteme mit großen Datenbeständen zusätzlich zu den konventionellen Methoden unterstützt werden (Kleinert und Sawo 2020). Der schematische Ablauf des erarbeiteten Konzepts für die Analyse einzelner Datenströme ist in Bild 3.3 dargestellt.

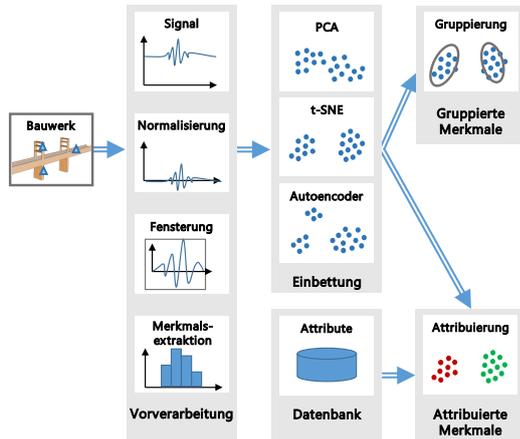


Bild 3.3: Ablauf der algorithmisch unterstützten Sensordatenanalyse (Kleinert und Sawo 2020)

Voraussetzung für das erarbeitete Vorgehen ist die Verfügbarkeit von an einem Bauwerk erhobenen Messdaten, die in zeitlich synchronisierter Form und einem einheitlichen Format vorliegen. In einem ersten Schritt werden die zu untersuchenden Daten vorverarbeitet. Ziel der Vorverarbeitung ist die Extraktion relevanter Merkmale von Ausschnitten eines Datenstroms, die für eine vorliegende Fragestellung relevant sind. Bei dieser Vorgehensweise ist nur ein geringer Speicherbedarf und Rechenleistung erforderlich. Eine Herausforderung dahingegen besteht darin, eine minimale systematische Verzerrung (Bias) zu erzielen, so dass alle relevanten Merkmale erfasst werden. Zunächst werden die Signale einer Medianfilterung unterzogen, um Einflüsse von Prozessen mit zeitlich langsamer Veränderung zu separieren. Die Detektion von Merkmalen erfolgt durch die Bestimmung von lokal-dominanten Maxima im gefilterten Signal. Beim Schritt der Fensterung wird ein Ausschnitt des Signalverlaufs symmetrisch um das lokal-dominante Maximum ausgeschnitten. Die Fenstergröße wird automatisch über eine Skalenraumanalyse ermittelt und anschließend erfolgt eine Merkmalsextraktion. Der Einbettungsschritt beinhaltet eine Dimensionsreduktion und eine Transformation der Merkmalsdeskriptoren, so dass diese von den folgend eingesetzten Gruppierungsmethoden gut erkannt werden und Zusammenhänge in den Daten

sichtbar werden. Vor allem Verfahren wie das „t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding“ (t-SNE) oder das „Autoencoder“ Verfahren können nicht-lineare Zusammenhänge abbilden und sind als Einbettungsverfahren geeignet. Der nächste Schritt beinhaltet die Zusammenfassung von ähnlichen Merkmalen zu Gruppen. Die Anzahl an Gruppen kann auf die Anzahl an unterschiedlich ablaufenden Prozessen hindeuten. Sind keine scharf abgegrenzten Klassen erkennbar, weist dies auf eine geringe Güte der Einbettung hin. Geeignete Verfahren hierfür sind z.B.: „k-means“, „Dirichlet-Process means“ und „Density-based spatial clustering of applications with noise“ (DBSCAN). Der letzte Schritt wird als Attribuierung bezeichnet und beinhaltet die Einfärbung der eingebetteten Merkmale auf Grundlage einer weiteren Datenquelle. In diesem Schritt ist eine ausreichende zeitliche Synchronisation eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Attribuierung. Das vorgestellte Konzept wurde anschließend erweitert, um eine kombinierte Auswertung mehrere Sensorsignale zu realisieren. (Kleinert und Sawo 2020).

Zur Demonstration des erarbeiteten Konzepts zur halbautomatischen Erkennung möglicher Zusammenhänge zwischen verschiedenen Datenströmen ohne eine explizite Modellierung (vgl. Bild 3.3) wurde ein einfaches und offensichtliches Beispiel ausgewählt. Für das Beispiel wurden Messdaten aus der Pilotstudie „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“ herangezogen. Bei dieser Pilotstudie handelt es sich um ein 2016 neuerrichtetes Ersatzbauwerk im Autobahnkreuz Nürnberg, das mit verschiedenen im Rahmen der BAST-Forschung entwickelten Bausteinen zu Demonstrations- und Weiterentwicklungszwecken ausgestattet wurde. An dem Bauwerk wurde ein Bauwerksinformationssystem, ein drahtloses Sensornetzwerk, instrumentierte Lager und Fahrbahnübergang installiert. Eine Besonderheit des instrumentierten Fahrbahnübergangs ist, dass dieser für die zwei Fahrspuren getrennt ist. Im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten werden u.a. Strategien zur Datenauswertung für die verschiedenen Messsysteme entwickelt. Beim instrumentierten Fahrbahnübergang stehen dabei v.a. die Ableitung von Informationen hinsichtlich des Verkehrs sowie dessen Funktionsüberwachung im Fokus. Für die Demonstration wurden Messdaten eines Beschleunigungssensors an einer Lamelle der linken Fahrspur herangezogen und zwei unterschiedliche Gruppierungsverfahren untersucht. Im ersten Fall wurde das t-SNE Verfahren auf vorverarbeitete

Spektren angewendet und die Merkmalsvektoren damit in die Ebene abgebildet. Anschließend wurden die Merkmalsvektoren in Abhängigkeit von der Überfahrt auf der linken oder rechten Fahrspur eingefärbt, siehe Bild 3.4. Die Informationen über die Zuordnung der Fahrspur zur Einfärbung der Merkmalsvektoren wurden aus einem zusätzlichen Datensatz herangezogen. Das Maß an Übereinstimmung einer Einfärbungsfläche und eines Clusters kann auf die Güte des Zusammenhangs zwischen Einfärbungsattribut und durch den Cluster repräsentierten Signalverlauf hinweisen. Im zweiten Fall wurden die entsprechend zum ersten Fall eingebetteten Daten automatisch mittels des DBSCAN Algorithmus gruppiert, siehe Bild 3.5. Der Vergleich von Bild 3.4 und Bild 3.5 zeigt eine gute Übereinstimmung des Gruppierungsergebnisse sowie der gefundenen Fahrzeugüberfahrten auf der rechten und linken Fahrspur mittels des DBSCAN-Algorithmus (Kleinert und Sawo 2020).

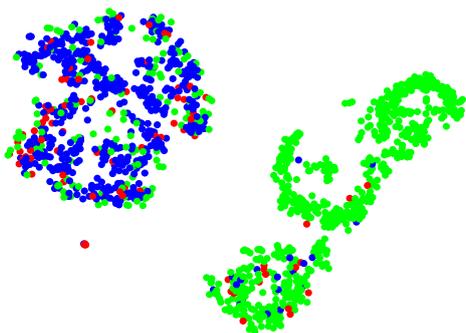


Bild 3.4: Eingebettete Merkmale eingefärbt nach Fahrspur (grün: Überfahrt links, blau: Überfahrt rechts, rot: nicht zugeordnet), (Kleinert und Sawo 2020)

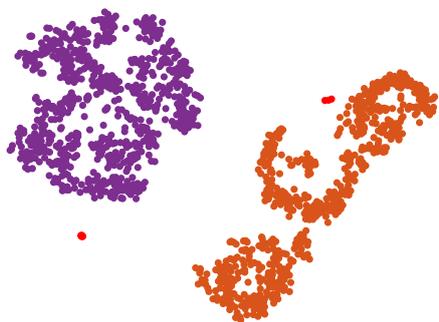


Bild 3.5: Eingebettete Merkmale eingefärbt nach Gruppierung durch den DBSCAN Algorithmus (rot: Ausreißer), (Kleinert und Sawo 2020)

Das Beispiel deutet darauf hin, dass das Beschleunigungssignal des linken Fahrbahnübergangs trotz der Trennung der beiden Fahrbahnübergänge

sowohl von Überfahrten auf der linken als auch auf der rechten Fahrspur beeinflusst wird. Hierbei handelt es sich um einen offensichtlichen Zusammenhang. In der Regel sind die physikalischen Vorgänge in einem Bauwerk sehr komplex. Daher wird eine große Expertise bei der Interpretation von gefundenen möglichen Zusammenhängen und ihrer Evaluierung hinsichtlich der Plausibilität durch einen Ingenieur benötigt (Dabringhaus 2020).

3.1.3 Bewertung von Daten und Informationen

Ein wichtiger Bestandteil des Gesamtsystems „Intelligente Brücke“ zur Bereitstellung relevanter Informationen und ganzheitlichen Bewertung eines Brückenbauwerkes in Echtzeit ist das Bewertungs- und Prognosesystem. Mit dessen Hilfe werden die bereitgestellten Informationen aus den vorverarbeiteten Messdaten strukturiert, verknüpft und zuverlässigkeitsbasiert bewertet. Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Tragwerksystemen müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden: die Schadensursache, statistische und funktionale Abhängigkeiten zwischen Bauteilen, der Einfluss des einzelnen Bauteilversagens auf das Systemversagen, die Redundanz des Systems, die Resttragfähigkeit von Bauteilen und Tragsystemen und das Ausfallverhalten. Anhand der bestimmten Zuverlässigkeit und entwickelter Prognosemodelle können Aussagen über die Resttragfähigkeit von Bauteilen und dem gesamten Bauwerk abgeleitet werden. Grundlegend für eine Bestimmung des Bauwerkszustands ist die Wahl eines geeigneten Brückenmodells. Da es sich bei Brückenbauwerken meist um Unikate handelt, ist ein individuelles Bauwerksmodell erforderlich.

Brückenmodelle zur Systemanalyse

Ein Ansatz ist die Verwendung von Finite Elemente Modellen (FE-Modell) in Kombination mit Stochastik zur Berechnung der Systemversagenswahrscheinlichkeiten. Unter der kontinuierlichen Einspeisung von Messdaten erfolgt ein regelmäßiges Modell-Updating, so dass Veränderungen erkannt und Versagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden können. Nachteilig an diesem Verfahren ist der hohe Modellierungsaufwand für nichtlineare FE-Modelle und hohen Rechenzeiten (Borrmann et al. 2014).

Im Folgenden werden zwei Ansätze zur Erstellung eines Brückenmodells zur Systemanalyse

vorgestellt, die im Rahmen des Forschungsclusters „Intelligente Brücke“ erstellt wurden.

Im Rahmen des Projektes „Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse“ (Schneider, et al., 2015) wurde ein sogenannter Einflussbaum entwickelt, der strukturelle Abhängigkeiten des Bauwerkes sowie Schadensinteraktionen berücksichtigt. Mithilfe von herkömmlichen Methoden wie Zustandsblockdiagramme und Fehlerbäumen können Systeme anhand von logischen Verknüpfungen detailliert modelliert werden. Dabei entwickeln diese ausgehend vom Systemversagen die vorliegende Schadensursache. Eine weitere bedeutende Methode, die Ereignisablaufanalyse, startet von der Ursache aus und ermittelt darüber das Systemversagen. Da die genannten Methoden jeweils einer Bool'schen Struktur unterliegen, lassen sich Zustände nur in binärer Form darstellen. Dies ist für die Modellierung eines Brückenbauwerkes zur ganzheitlichen Bewertung des Brückenzustandes unzureichend, weil sämtliche reale Zwischenzustände nicht aufgezeigt und berücksichtigt werden. Anhand des oben genannten Einflussbaumes ist es möglich, Rückschlüsse auf die Schadensursache, die Relevanz von Schäden und deren Wirkung auf das gesamte Bauwerk zu ziehen. Des Weiteren können bestehende Schädigungen modelliert und Schädigungsabläufe simuliert sowie Hotspots erkannt werden. Grundvoraussetzung dafür ist ein möglichst exaktes Abbild des realen Bauwerkes. Der Einflussbaum ist modular aufgebaut, so dass der Betreiber in der Lage ist, das System individuell für das vorliegende Brückenbauwerk anzupassen. Der Einsatz der Modellierungssprache „Systems Modeling Language“ ermöglicht die Erstellung von Abhängigkeiten und Klassifizierungen von Strukturen sowie das Erstellen und Ausführen von Anweisungen. Der Einflussbaum besteht aus den folgenden drei Ebenen: Struktur-, Schadens- und Parameterebene. Die einzelnen Bauwerkskomponenten werden hierarchisch angeordnet und bilden die Strukturebene. Die Schadensebene ist der Strukturebene unterstellt. Dort werden den untersten Strukturelementen jeweils mögliche Schadensbilder zugewiesen. Den untersten Komponenten der Schadensebene werden Parameter zugewiesen. Die Parameter können sowohl Ursache als auch Voraussetzung für eine Schädigung sein und werden über die Sensorik am Bauwerk und durch die Bauwerksprüfung ermittelt. Die einzelnen Elemente werden über Logikelemente verknüpft. Diesen Logikelementen können Gleichungen oder Vorschriften aus der

Probabilistik oder aus chemischen/physikalischen Modellansätzen zur Beschreibung der Abhängigkeiten von Ursachen, Indizien, Symptomen und Auswirkungen hinterlegt sein. Ein Indiz ist ein Parameter, der keine direkte Schadensursache darstellt, z.B. kann eine Abplatzung von Beton auf eine Volumenvergrößerung im Bauteilinneren und somit auf Korrosion hinweisen. Die Unterscheidung zwischen Ursache und Indiz ist erforderlich, um eine zuverlässigkeitsbasierte Bewertung des Bauwerkes zu gewährleisten zu können (Borrmann et al. 2014).

In dem Forschungsprojekt „Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungssystemen“ (Fischer et al. 2014) wurde ein Ansatz entwickelt, bei dem die Systemzuverlässigkeit in Abhängigkeit der Schädigungszustände auf der Grundlage eines geeigneten Systemmodells bestimmt wird. Die Wahl eines geeigneten Systemmodells hängt von der Komplexität des Tragwerkssystems ab. Einfache Brückenbauwerke können durch ein logisches Seriensystem von Versagensmechanismen modelliert werden. Bedingung dafür ist, dass das Tragwerkssystem versagt, sobald sich ein Kollapsmechanismus ausgebildet hat. Für komplexe Bauwerke sind dementsprechend angemessene Systeme zu entwickeln. Grundsätzlich besteht jedes Systemmodell aus zwei Teilmodellen. Ein Teilmodell umfasst die Analyse des Systemschädigungszustands. Anhand von probabilistischen Modellen werden die Schädigungszustände bestimmt. Im zweiten Teilmodell wird die Systemzuverlässigkeit anhand des Satzes der totalen Wahrscheinlichkeiten berechnet. Es sind Zielzuverlässigkeiten für Tragwerke im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu definieren mit denen die ermittelten Zuverlässigkeiten abgeglichen werden (Schneider, et al., 2015), (Fischer et al. 2014).

Der Vergleich der Modellierungsansätze zeigt folgende Parallelen auf: Das Schädigungsmodell zur Berechnung des Systemzustandes entspricht der Parameter- und Schadensebene des Einflussbaumes. Dem Modell zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit eines Bauwerkes kann die Strukturebene zugeordnet werden.

Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung

Zur Bewertung des Brückenstatus und Ermittlung der Lebensdauerprognose ist es erforderlich, Schädigungsprozesse quantitativ darzustellen. Einige Schädigungsprozesse können mithilfe von

Schädigungsmodellen beschrieben werden und damit der Schadensanalyse dienen. Für folgende Schädigungsprozesse existieren Schädigungsmodelle: Karbonatisierung, Chlorideindringung, Bewehrungskorrosion, Spannungsrisskorrosion, Frost-/Frost-Tausalz-Angriff, Alkali-Kieselsäure-Reaktion und Ermüdung (Schnellenbach-Held et al. 2015).

In der Realität liegen meistens keine deterministischen Werte als Eingangsgrößen vor, so dass Modellparameter nicht mit Sicherheit bestimmt werden können und damit Unsicherheiten unterliegen. Durch den Einsatz probabilistischer Ansätze können diese Unsicherheiten berücksichtigt werden. Probabilistische Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie Zufallsgrößen als Eingangsgrößen verwenden und Unsicherheiten durch Zufallsvariablen abgebildet werden. Der Einsatz von Bayes'schen Netzen unter Einbeziehung von Inspektions- und Monitoringdaten dient der Aktualisierung der Schädigungszustände. Mittels Bayes'schen Netzen unter Zuhilfenahme von Markov-Ketten können Schädigungsprozesse berücksichtigt werden, zu denen es keine Schädigungsmodelle gibt. Zu diesen Schädigungsprozessen zählen Lagerschäden, Schäden an Fugen und Fahrbahnübergängen, Schäden an Abdichtung, Belag, Kappen und Stützensenkungen (Schneider et al. 2015). Markov-Ketten zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine Zustandsprognose ermöglichen, obwohl sie nur einen zeitlichen Zustandsschritt des Prozesses kennen. Die Schädigungswahrscheinlichkeit kann ermittelt werden, indem die Grenzzustandsgleichung bezogen auf das Bauwerk gelöst wird:

$$g(X, t) = R(X, t) - S(X, t)$$

X: Zufallsgröße, t: Zeit, R: Widerstand, S: Einwirkung

Zur Lösung dieser Gleichung stehen u. a. folgende mathematische Verfahren zur Verfügung: First-Order-Reliability, Second-Order-Reliability und Monte-Carlo-Simulation. Der Einsatz von Likelihood, definiert als Wahrscheinlichkeit bei gegebenem Zustand ein bestimmtes Messresultat zu erhalten, ermöglicht es, die Genauigkeit einer Aussage zu quantifizieren. Im Rahmen der zuverlässigkeitsbasierten Bewertung ist es von Bedeutung die Wahrscheinlichkeit eines auftretenden Schadens und Messunsicherheiten zu bestimmen. Mit der Auffindwahrscheinlichkeitsmethode (Probability of Detection (PoD)) wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit welcher ein definierter Schaden entdeckt wird. In der Literatur sind PoD-Kurven für

verschiedene Schädigungsarten vorhanden (Fischer et al. 2014).

Für das Erreichen von Grenzzuständen eines Bauteils oder des gesamten Systems sind Warnungen und Anweisungen zu formulieren, die durch das System eigenständig ausgeführt werden können. Dies kann zum Beispiel das Aktivieren eines Schadenspfades beim Erreichen eines definierten Grenzwertes beinhalten. Unter der Restnutzungsdauer wird die Zeitdauer verstanden, die ein Bauwerk in Hinblick auf die ermittelten Zustandswerte noch genutzt werden kann. Aus den statistisch modellierten Einwirkungen und Widerständen ist die Bauwerkszuverlässigkeit zu ermitteln und die Restnutzungsdauer abzuschätzen. Die bewerteten Bauwerkszustände einzelner Bauteile und Bauteilgruppen sind in Form von Zustandsnoten anzugeben, um diese im objekt- und netzbezogenen Erhaltungsmanagementsystem einzubinden.

In dem Forschungsprojekt „Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung des Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells“ (Schneider et al. 2015) wurde ein Software-Prototyp zur Umsetzung einer geeigneten Systemmodellierung, -bewertung und -prognose für einen Brückenüberbau entwickelt. Dabei wurden die Modellierungsansätze aus (Fischer et al. 2014) zugrunde gelegt. Zur ganzheitlichen Bewertung eines Bauwerkes ist es erforderlich, dass alle Informationen aus Entwurf, Bemessung, Bauwerksprüfung und Monitoringmaßnahmen sowie das Systemmodell zusammengeführt und analysiert werden. Folgender Ablauf ist dafür erforderlich:

1. Erstellung des Zustandsmodell (Eingabe aller relevanter Informationen, Schädigungsprozesse zuordnen und zugehörige Modellparameter definieren)
2. Verknüpfung von Informationen aus ÜMonitoringmaßnahmen und Zustandsmodell
3. Analyse und Prognose des Schädigungszustandes und der Systemzuverlässigkeit
4. Ergebnisvisualisierung
5. Aktualisierung des Systemmodells

Die Software besteht aus einer grafischen Benutzeroberfläche, so dass der Nutzer alle erforderlichen Eingaben und Anpassungen vornehmen kann. Weitere Komponenten sind: Zustandsmodellgenerator, Schnittstelle zur Einspeisung von Monitoringdaten, Analyse und Prognose des

Schädigungszustands und der Systemzuverlässigkeit (Schneider et al. 2015).

3.1.4 Datenmanagement

Ein geeignetes Datenmanagement ist für die Intelligente Brücke von großer Bedeutung, um im laufenden Betrieb eine optimale Nutzung der Daten in Bewertungsmodellen in nahezu Echtzeit zu ermöglichen. Im Rahmen des laufenden Ressortforschungsprojekts FE 15.0671 „Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke“ sollen die methodischen, organisatorischen und technischen Maßnahmen und Verfahren zur Behandlung der Daten der Intelligenten Brücke mit dem Ziel erarbeitet werden, deren Verfügbarkeit, Qualität, Schutz und Sicherheit bestmöglich über die gesamte Nutzungsdauer der Intelligenten Brücke zu gewährleisten. Der Aufbau der Intelligenten Brücke ist individuell und u.a. vom jeweiligen Bauwerk sowie von ggf. zu betrachtenden Fragestellungen abhängig. Daher sollen modulare und skalierbare Konzepte entwickelt werden, die das individuelle Zusammenstellen eines Datenmanagementkonzepts für eine Intelligente Brücke ermöglichen. Dabei sollen sämtliche, möglicherweise auftretende und den Datenlebenszyklus betreffende Rahmenbedingungen hinsichtlich z.B. Datenvolumen (Small/Big Data) und IT-Infrastruktur an der Brücke berücksichtigt werden. Im Rahmen der Konzepte sollen unter Berücksichtigung der Individualität einer Intelligenten Brücke und verschiedener Gegebenheiten an Brückenbauwerken ferner Anforderungen an Hard-, Software und Schnittstellen definiert, Umsetzungsmöglichkeiten aufgezeigt sowie umfassende Kostenabschätzungen (u.a. Anschaffung, Betrieb, Wartung) erstellt werden. Die zu erarbeitenden Datenmanagementkonzepte sollen als Grundlage für zukünftige Systemrealisierungen dienen und den Straßenbaulastträger bei der Erstellung von Ausschreibungsunterlagen hinsichtlich des Datenmanagements einer Intelligenten Brücke unterstützen. Darüber hinaus sollen die erarbeiteten Konzepte sicherstellen, dass an der Intelligenten Brücke erzeugte Daten und Informationen für andere Forschungsvorhaben nutzbar sind.

3.2 Qualitätssicherung

Im Rahmen des Forschungsclusters „Intelligente Brücke“ wurde im Rahmen von Eigenforschung das Projekt F1100.2115003 „Qualitätssicherungskonzept Intelligente Brücke - Betriebssicherheit

des ganzheitlichen lebenszyklusbasierten Bauwerksmonitorings“ bearbeitet. Dabei wurden gesetzliche Vorgaben, relevante Regelungen und Anforderungskategorien für Hard- und Software sowie die Gesamtanlage zusammengestellt und für die Anwendung eingeordnet. Ein Vorgehensmodell wurde auf Grundlage von Regelungen und Entwicklungs- bzw. Entwurfsverfahren zusammen mit einem Einbeziehungskonzept für projektbezogen erforderliche Anforderungen an das System erstellt. Die zu berücksichtigenden Anforderungen an die Lebenszyklusphasen der Anlage lauten: Standardisierung, Regelkonformität, Anforderungskonformität, Betriebssicherheit, Dauerhaftigkeit, Wartbarkeit sowie Wirtschaftlichkeit. Im Bericht wurde ein Vorschlag für Regelwerksdokumentkategorien erarbeitet, die für zukünftige Arbeiten herangezogen werden können (Kempkens 2021).

Das noch auszuschreibende Projekt FE 15.0676/2020/IRB „Vertragliche Grundlagen für die technische Realisierung des Systematik Intelligente Brücke“ soll den Weg der Intelligenten Brücke in die Praxis unterstützen und die Qualität des Prozesses sichern. Auf der Grundlage einer BAST-internen Vorstudie sollen die vertraglichen Grundlagen für die technische Realisierung des Systematik Intelligente Brücke erarbeitet werden. Das beinhaltet sowohl die Festlegung von qualitätssichernden Grundanforderungen an Planungs-, Entwurfs- und Ausführungsprozesse als auch eine funktional abgestufte Festlegung von Mindestanforderungen an die zu verwendenden Betriebsmittel am Bauwerk und beim Anwender.

3.3 Reallabore

Ziel der BAST-Forschung im Hinblick auf Ingenieurbauwerke ist es, praxistaugliche Entwicklungen zur Verfügung zu stellen, die an Bauwerke gestellten Anforderungen wie z.B. Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erfüllen. Innovative Entwicklungen der Intelligenten Brücke werden im Rahmen von Reallaboren erprobt, weiterentwickelt und v.a. hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit bewertet. Reallabore sind Testumgebungen, in denen verkehrsinfrastrukturrelevante Innovationen unter realen Bedingungen erprobt, bewertet und weiterentwickelt werden können (BMW 2020). Aus Reallaboren gewonnene Erkenntnisse können wichtige Grundlagen für eine nachfolgende schnelle Implementierung neuer und innovativer Ansätze in der Praxis liefern, wobei auch dieser Ansatz eine volle Variation aller in der Praxis vorkommenden Randbedingungen nur eingeschränkt ermöglicht (Dabringhaus et al. 2020a).

Darüber hinaus bieten Reallabore die Möglichkeit umfangreiche Messdaten unter Realbedingungen zu erfassen, die für weitergehende Forschung zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Projektes O-SIMAB, siehe Kapitel 3.1.2, wurde das Reallabor „Talbrücke Sachsengraben“ realisiert und die Forschungsansätze erprobt und weiterentwickelt. Auf das Reallabor „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ wird in Kapitel 4 näher eingegangen. Die „Intelligente Brücke-duraBASt“ kann allenfalls als eingeschränktes Reallabor bezeichnet werden, da sie nicht unter Verkehr steht und somit nicht den realen Einflüssen ausgesetzt ist.

4 Reallabor „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“

4.1 Hintergründe und Zielsetzung des Reallabors

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat gemeinsam mit dem Verband der Automobilindustrie e.V., dem Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. sowie dem Freistaat Bayern das Digitale Testfeld Autobahn (DTA) im Jahr 2015 initiiert. Damit soll die Erreichung wichtiger Ziele der Bundesregierung wie die Erhöhung der Verkehrssicherheit und -effizienz sowie die

Verminderung von Emissionen unterstützt werden. Dieses Testfeld befindet sich auf der A9 zwischen Nürnberg und München. Im Rahmen des Testfelds sollen innovative Entwicklungen in einer realen Funktionsumgebung entwickelt und getestet werden, siehe Bild 4.1. Der Fokus dieser Entwicklungen liegt in den Bereichen „automatisiertes Fahren“ und „Intelligente Infrastruktur“. Mit dem digitalen Testfeld Autobahn wird die Möglichkeit geschaffen, Innovationen zu fördern und deren Praxistauglichkeit unter realen Umgebungsbedingungen zu beurteilen sowie Akzeptanz in der Gesellschaft für neue Technologien zu erhöhen (Scharnigg 2021).

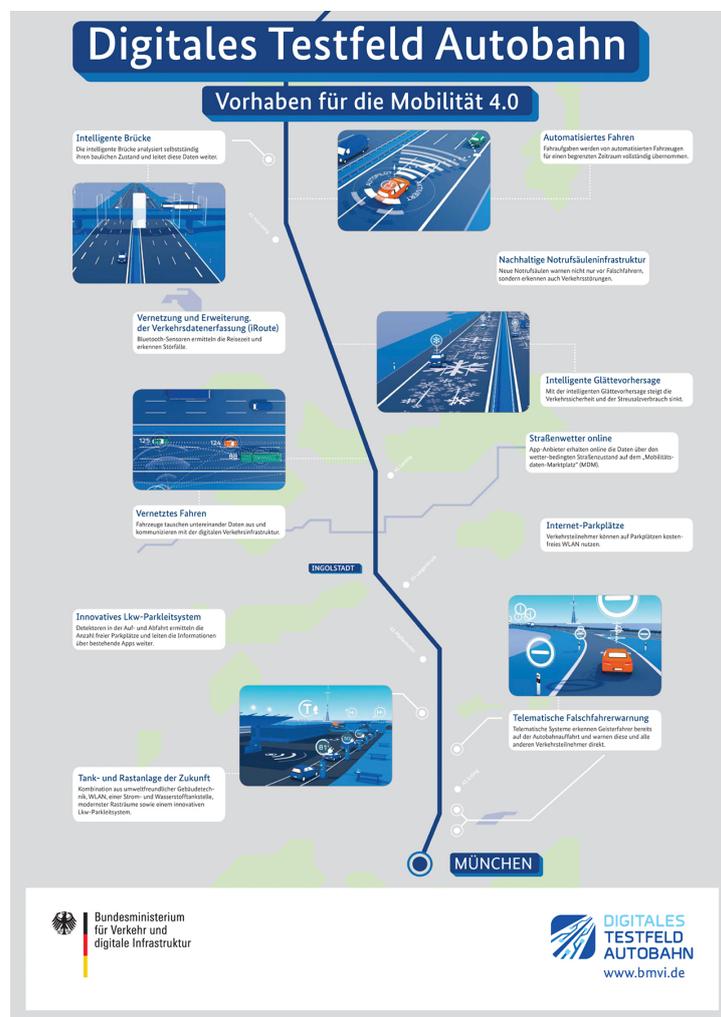


Bild 4.1: Projekte zum Digitalen Testfeld Autobahn (Scharnigg 2021)

Aufgrund seiner Ausrichtung und Zielsetzung kann das Digitale Testfeld Autobahn als ein Zusammenschluss von Reallaboren bezeichnet werden, in dem die Erprobung, Bewertung hinsichtlich

Praxistauglichkeit und Weiterentwicklungen verschiedener Innovationen separat erfolgt. Das zugehörige Reallabor „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“ gehört zu dem Schwerpunkt

„Intelligente Infrastrukturen“ des Testfeldes. Hierbei wurde das Ersatzneubauwerk BW402e im Autobahnkreuz Nürnberg mit relevanten Bausteinen des Systems der Intelligenten Brücke ausgestattet. Bei dem 2015/16 neuerrichteten Bauwerk handelt es sich um eine 4-feldrige 155,75 m lange Spannbetonbrücke, die das aus dem Jahre 1970 stammende Bauwerk ersetzt. Grund für den Ersatz war, das Vorliegen einer Vorspannung mit einem für Materialermüdung anfälligem Sigma-Oval-Spannstahl, der kein Ankündungsverhalten im Falle eines Spannstahlschadens zeigt (Haardt et al. 2017).

Ziel des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ ist es, ausgewählte Entwicklungen aus dem nationalen Innovationsprogramm „Straße im 21. Jahrhundert“ des BMVI an einem unter Verkehr stehenden Neubau unter Realbedingungen zu demonstrieren und hinsichtlich einer zuverlässigkeitsorientierten Bewertung des Status Bauwerks weiterzuentwickeln. Darüber hinaus sollen ausgewählte noch nicht im Detail betrachtete Aspekte bezüglich der Thematik Intelligente Brücke wie z.B. Datenmanagement, Zeitsynchronisation sowie Ergebnispublikation in Form einer Webanwendung konzipiert und umgesetzt werden. Die Entwicklungen sollen durch die Demonstration an einem realen Objekt bundesweit zugänglich gemacht werden. Über einen 5-jährigen Untersuchungszeitraum sollen diese im Hinblick auf ihre Funktionstüchtigkeit und Praxistauglichkeit untersucht und nach Möglichkeit in Iterationsstufen optimiert werden. An der Maßnahme sind neben der BASt folgende Einrichtungen beteiligt: BMVI, Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr und Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nordbayern sowie als Forschungsstellen das Ingenieurbüro Prof. Freundt, die Fa. MAURER Engineering GmbH sowie das Institut für Telematik der Universität zu Lübeck.

Gesammelte Erfahrungen hinsichtlich der Praxistauglichkeit von u.a. Messtechnik unter realen Witterungs- und Verkehrsbedingungen und Datenmanagementlösungen sind Erkenntnisse, die eine wichtige Grundlage für die Realisierung zukünftiger Reallabore bilden. Von großer Bedeutung sind die am Bauwerk erfassten Messdaten und die daraus ableitbaren Informationen hinsichtlich Einwirkungen und Reaktionen des Bauwerks und seiner Bauteile. Diese dienen zum einen zusätzlich zur Bauwerkprüfung zur Ermittlung des Bauwerksstatus und können damit den Bauwerkseigentümer bei der Gewährleistung der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Bauwerks

unterstützen. Zum anderen stehen hiermit umfangreiche Datensätze eines unter Verkehr stehenden instrumentierten Bauwerks zur Verfügung, die für dieses Bauwerk einen Mehrwert hinsichtlich der Möglichkeit der Verifizierung von Systemannahmen und Überprüfung sowie Kalibrierung von Ingenieurmodellen ermöglicht. Des Weiteren können die am Neubau gesammelten Informationen auch für Forschungszwecke wie der Entwicklung sowie Optimierung von datenbasierten Algorithmen herangezogen werden. Die wichtigsten Ziele und Nutzenaspekte des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ sind in Bild 4.2 dargestellt.

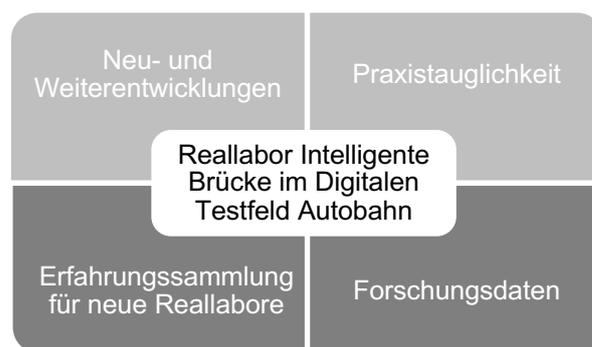


Bild 4.2: Ziele und Nutzen des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“

4.2 Konzept des Reallabors

4.2.1 Vorbereitende Arbeiten

Zu Beginn wurde ein Grobkonzept für die Realisierung des Reallabors durch die BASt erarbeitet und mit dem BMVI sowie der Autobahndirektion Nordbayern, abgestimmt. In diesem wurde das Ziel, das geplante Vorgehen, die Laufzeit sowie der angesetzte Kostenrahmen für das Vorhaben skizziert. Im Rahmen einer aus Baumitteln finanzierten Feinkonzeption durch das Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt wurde eine fachtechnische Feinkonzeption erarbeitet. Darüber hinaus wurde eine datentechnische Feinkonzeption erstellt und die Ausführungsplanung aufgestellt.

- Fachtechnische Feinkonzeption

Im Rahmen des fachtechnischen Feinkonzepts wurden zunächst die vorgesehenen technischen Komponenten funktional beschrieben. Die Elemente der Datenerfassung, -verarbeitung und -übertragung sowie Auswertung und Ergebnisdarstellung im Rahmen des beabsichtigten Informationssystems wurden spezifiziert.

Ein weiterer Aspekt ist die fachtechnische Zusammenführung der Elemente „Einwirkungsmonitoring“, „Instrumentierter Fahrbahnübergang“ sowie „Drahtloses Sensornetz“ im Hinblick auf die o. g. Zielstellung. Des Weiteren wurden ein Integrationsplan zur Beschreibung der konzeptionellen Rahmenbedingungen für den Zusammenbau des Systems aus technischer Sicht sowie die Anforderungen an Hardware und Software erarbeitet.

- **Datentechnische Feinkonzeption**

Die datentechnische Konzeption beinhaltet eine umfassende Systemarchitektur zur Beschreibung von Datenerfassung, Datenverarbeitung, Datenübertragung und Auswertung inklusive Datenformate, Konzept zur Datenspeicherung und Historisierung sowie Plausibilitätsprüfung, Schnittstellenübersicht und Beschreibung sowie weitere datentechnische Umsetzungshinweise. Darüber hinaus zählen die Beschreibung der Ergebnisdarstellung und grafischen Visualisierung (Zielgruppe: Straßenbauverwaltung, AdB), z. B. Echtzeit-Messergebnisse, Max./Min.-Werte für Schwellwertüberwachung, Funktionsstatus, Fehlerprotokolle usw., Auswertungen mit Standardsoftware zum datentechnischen Feinkonzept.

- **Ausführungsplanung**

Im Rahmen der Ausführungsplanung wurde eine Zusammenstellung der erforderlichen Einzelbestandteile des Gesamtsystems und ihrer Anbindung an das Brückenbauwerk sowie für die Datenübertragung und Auswertung erstellt. Des Weiteren beinhaltet sie eine Spezifikation der Einzelkomponenten, eine Beschreibung des zeitlichen Ablaufes der Installation und weitere Umsetzungshinweise sowie eine Beschreibung eines QS-Konzepts zur Installation. Eine Beschreibung der Funktionstests in Verbindung mit Kalibrierfahrten, Umsetzungshinweise für die anschließende Praxisanwendung der durchzuführenden Untersuchungen im geplanten mehrjährigen Untersuchungsprogramm wurden ebenfalls erarbeitet. Die Beschreibung der Verfahren zur Analyse der Funktionstüchtigkeit der Anlage sowie eines Wartungskonzepts runden die Ausführungsplanung ab.

Der Ersatzbau wurde seit Mai 2015 in Anlehnung an den Bestand als Spannbeton-Hohlkastenbrücke über vier Felder aufgrund der bauzeitlichen Verkehrsführung neben dem bestehenden Bauwerk erstellt. Der Überbau wurde – rund ein halbes Jahr nach Baubeginn – bis Dezember 2015 mittels

Taktschiebeverfahren vollständig eingeschoben. Die Installation von Sensorik im und am Überbau sowie der Einbau instrumentierter Bauteile wurden in den regulären Bauablauf integriert. Bis September 2016 wurden die Arbeiten am Brückenüberbau sowie der Streckenanschlüsse abgeschlossen, so dass der Verkehr im Oktober 2016 auf die neue Brücke umgelegt werden konnte. Der Abbau des alten Bauwerks erfolgte durch Sprengung der Pfeiler und massiven Stützquerschnitte am 12. November 2016 (Haardt et al. 2017).

4.2.2 Messtechnische und IT-technische Ausstattung des Bauwerks

Das Bauwerk 402e ist mit vier Messsystemen ausgestattet, die im Rahmen des nationalen Innovationskonzepts „Straße im 21. Jahrhundert“ und des Innovationsprogramms der BAST konzeptioniert und entwickelt und für dieses Reallabor „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“ teilweise modifiziert wurden. Bei den eingesetzten Systemen handelt es sich um das System Brückenwerte, ein drahtloses Sensornetz, einen instrumentierten Fahrbahnübergang sowie instrumentierte Lager, siehe Kapitel 3.1. Darüber hinaus kommen an diesem Bauwerk umfassende Hard- und Softwarekomponenten zum Einsatz, mit denen ein geeignetes Datenmanagement realisiert wird. Im Folgenden werden die einzelnen eingesetzten Systeme kurz vorgestellt:

System Brückenwerte

Das entwickelte System basiert auf dem Road Traffic Management System, siehe Kapitel 3.1. Anhand eines Tragwerkmodells wurde das an die Brücke angepasste Messkonzept entwickelt und anhand Voruntersuchungen mit temporären Sensoren am Bauwerk BW 402e verifiziert. Das Messkonzept, siehe Bild 4.3, zielt auf die Erfassung von Kenngrößen der Brücke zur Statuserkennung des Bauwerks sowie zur Ableitung von Verkehrsdaten mit hinreichender Genauigkeit ab. Es besteht aus 24 Dehnmessstreifen (DMS), vier induktiven Wegaufnehmern (IWT), zwei Temperatursensoren (PT 100) und vier Beschleunigungssensoren (PBC). Ein Großteil der DMS und IWT sind im Inneren des Brückenüberbaus an der Unterseite der Fahrbahnplatte in den Messachsen A - D installiert. Weitere sechs DMS befinden sich an der Unterseite der Quertraverse des Fahrbahnübergangs (Messachse E). Am Lager A40/Nord wurden vier IWT installiert zur Erfassung von Längsänderungen in Brückenrichtung sowie Verdrehungen des Lagers. Die Temperatursensoren befinden sich im

Betonquerschnitt in Messachse B. Die externen Spanngliedern des Bauwerks wurden mit vier Beschleunigungsaufnehmern ausgestattet, um den Spannkraftverlauf über die Zeit zu erfassen. Sämtliche Sensoren wurden nach Fertigstellung der Bauphase installiert mit Ausnahme von vier DMS, die an Bewehrungsstäben appliziert sowie zwei Temperatursensoren, die ebenfalls in den Betonquerschnitt integriert wurden. Ergänzend zu dem vorgestellten System wurde ein Kamerasystem im letzten Feld der Brücke eingerichtet. Mit den beiden auf Kippmasten befestigten Kameras werden die von der Brücke abfahrenden Fahrzeuge erfasst. Die wetterfesten Kameras sind so ausgelegt, dass der Fahrzeugtyp und die Anzahl der Achsen erkannt werden können, nicht jedoch Personen oder Kfz-Kennzeichen. Die Aufnahmen dienen zu

Referenzzwecken, um die Messergebnisse mit der Realität abgleichen zu können. Sämtliche Hardware für das System ist in zwei Schaltschränken untergebracht. Dazu zählen u.a. Messverstärker, Netzwerktechnik und ein Messrechner.

Im September 2016 wurden Kalibrierfahrten mit einem 3-Achs-Lkw und einem 5-Achs-Lkw durchgeführt. Bei den Fahrten wurden sowohl Geschwindigkeit, Fahrspur als auch Anzahl der parallel fahrenden Fahrzeuge variiert. Anhand der dabei erfassten Messdaten werden die Modelle des oben dargestellten Systems sowie des instrumentierten Fahrbahnübergangs und der Lager überprüft und ggf. kalibriert (Freundt et al. 2017).

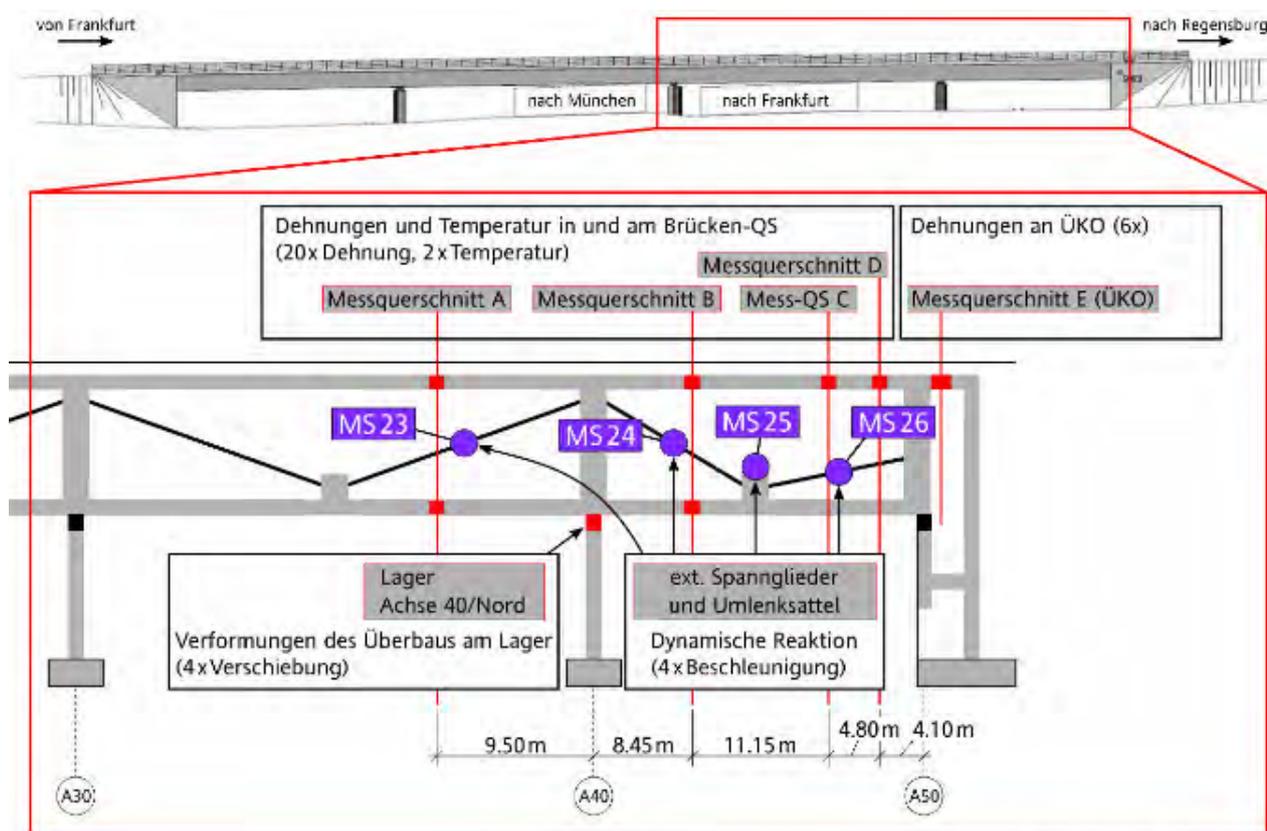


Bild 4.3: Prinzipskizze zur Lage der Sensoren (Freundt et al. 2017)

Drahtloses Sensornetz

Das an der Universität zu Lübeck entwickelte drahtlose Sensornetz, vgl. Kapitel 3.1, wurde zwischen Achse 40 und Achse 50 sowohl im Hohlkörper der Brücke als auch an einigen Stellen am Unterbau sowie am Kameramast zur Südseite installiert. Es beinhaltet 13 Sensorknoten, wovon 3

Sensorknoten systemunterstützend wirken. Lediglich ein Knoten ist an die örtliche Stromversorgung angebunden und fungiert als Gateway. Das Gateway nimmt sämtliche Daten aller Sensorknoten an und ist mit dem Network Attached Storage (NAS) direkt verbunden, auf dem sämtliche Daten abgelegt werden. Zwei weitere Sensorknoten werden als Repeater eingesetzt, um die Signale bei längeren Distanzen zu verstärken. Die 10 übrigen

Knoten, enthalten ein oder mehrere Sensoren zur Erfassung von ausgewählten Umwelteinflüssen

und Bauwerksreaktionen. Die eingesetzten Sensoren sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tabelle 4.1: Knoten des Sensornetzes (Fischer et al. 2017)

Typ (Anzahl)	Was wird erfasst	Ort
Wetterstation	Lufttemperatur, -feuchte, Windgeschwindigkeit, -richtung und Regenmenge	Am Mast
Temperatursensor (2)	Oberflächentemperatur	Im Hohlkasten
Feuchte- und Temperatursensor	Oberflächentemperatur, Luftfeuchte	Außen am Hohlkasten
Potentiometrische Weggeber (4)	Rissaufweitungen	Im Hohlkasten
Ausdehnungssensor		Im Hohlkasten
Neigungssensor		Im Hohlkasten

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Sensorknoten erfolgt über das Multi-Hop-Verfahren, vgl. Kapitel 3.1 (Fischer et al. 2017).



Bild 4.4: Gateway des Sensornetzes neben dem Schaltschrank der Universität zu Lübeck (Fischer et al. 2017)

Instrumentierter Fahrbahnübergang

Der an Achse 50 des Bauwerks 402e eingesetzte Fahrbahnübergang ist eine modifizierte Schwenktraverse Typ DS320GO der Firma MAURER Engineering GmbH mit einem maximalen Fugenspalt von 260 mm. Es handelt sich um eine Konstruktion, bei der die Lamellen in den jeweiligen Fahrspuren voneinander getrennt sind, um eine gegenseitige Beeinflussung der Messsignale zu minimieren. Aufgrund der vorgesehenen Detailausbildungen war eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) einzuholen, da nach den Technischen Lieferbedingungen und Technischen Prüfvorschriften für Fahrbahnübergänge (TL/TP FÜ) Abweichungen gegenüber der Regelprüfung vorlagen. Der eingesetzte Fahrbahnübergang ist mit 24 piezo-elektrischen Kraftsensoren, einer DMS-basierten Kraftmessdose, 5 Seilzugsensoren und 4 Beschleunigungssensoren ausgestattet. Die Kraftsensoren befinden sich in

den Elastomerlagern der Traversen, siehe Bild 4.5. Die Beschleunigungssensoren befinden sich auf der ersten und dritten Lamelle in Fahrtrichtung rechts von den Traversenlagern. Mit den Seilzugsensoren werden der Abstand vom Rand zur ersten und zur dritten Lamelle erfasst. Die Messungen werden alle 10 Minuten für ca. 10 Sekunden unterbrochen und ein Reset der Kraftsensoren durch die Ladungsverstärker vorgenommen. Damit soll eine Verfälschung der Messergebnisse durch Sensordrift vermieden werden.

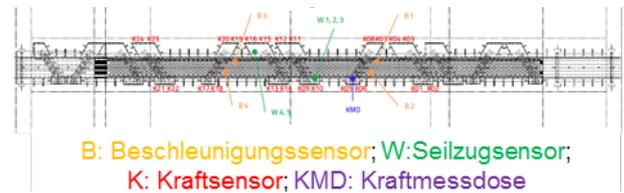


Bild 4.5: Sensoranordnung am Fahrbahnübergang (Rill 2017)

Neben der Sensorik befinden sich im Hohlkasten des Bauwerks ein Schaltschrank für die Systeme „Instrumentierter Fahrbahnübergang“ und „Instrumentierte Lager“. Dieser beinhaltet Verstärkereinheiten, Spannungsumwandler, ein Messdatenerfassungssystem, eine unterbrechungsfreie Stromversorgung sowie einen Messrechner (Rill 2017).

Instrumentierte Lager

In der Achse 40 des Bauwerks sind zwei Kalotten-gleitlager des Typs KGA 18436 kN der Firma MAURER Engineering GmbH mit integrierter Messtechnik verbaut. Das Lager A40/Süd ist mit drei auf DMS-Vollbrücken basierenden Drucksensoren zur Bestimmung der Auflasten ausgestattet. Darüber hinaus sind zwei Abstandssensoren in Längsrichtung zur Erfassung von Verdrehungen und einem Wegsensor zur Ermittlung der Lagerposition und -

weg in Richtung der Brückenlängsachse installiert, siehe Bild 4.6. Das Lager A40/Nord ist ausschließlich mit drei Drucksensoren ausgestattet. Diese befinden sich an den gleichen Stellen wie bei Lager A40/Süd. Unter der Gleitpaarung MSM® wurde je Lager eine gekammerte Elastomerfolie eingebaut, um mittels punktueller Drucksensoren die Lagerbelastungen zu erfassen. (Butz 2017).



Bild 4.6: Anordnung der Drucksensoren (DS), Abstandssensoren (AS) und Wegsensoren (WA) am Lager A40/Süd (links), eingebautes Lager A40/Süd (rechts) (Butz 2017)

IT-Infrastruktur

Wichtige Komponenten, die die zentrale Datenspeicherung an der Brücke ermöglichen sowie deren Zusammenwirken, sind in Bild 4.7 dargestellt. Über den Switch ist ein Router eingebunden, der die Verbindung zwischen dem Brücken-internen Netz und dem Internet darstellt. Der Internetzugang wurde eigens für diese Maßnahme an der Brücke geschaffen. Damit ist ein Fernzugriff z.B. auf die Messrechner und weitere Komponenten möglich.

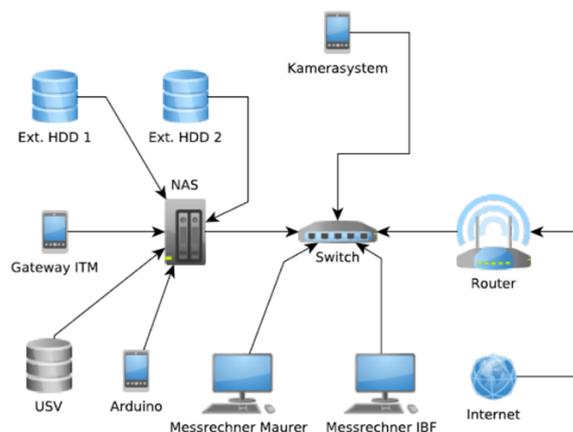


Bild 4.7: IT-Infrastruktur an der Brücke (Fischer et al. 2017)

Über den Switch sind Messrechner der Systeme und das Network Attached Storage (NAS) angebunden. Das NAS dient zur Langzeitspeicherung der Daten aller Messsysteme und ermöglicht per Fernzugriff jederzeit Zugriff auf die Daten. Es ist mit 40 TB für den Untersuchungszeitraum von 5 Jahren ausgelegt. Mit dem NAS sind externe Festplatten verknüpft, die die Abholung und Nachnutzung von Rohdaten außerhalb der Brücke ermöglichen. Die IT-Infrastruktur ist derzeit so ausgelegt, dass der Transfer von Rohdaten ausschließlich per externer Festplatten erfolgen kann. Das NAS ist mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung verbunden, so dass im Falle eines Stromausfalls das NAS kontrolliert heruntergefahren und gestartet wird. Das Arduino erfasst im Schaltschrank Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Das drahtlose Sensornetz ist durch das Gateway mit dem NAS verbunden (Fischer et al. 2017). Über eine REST-Schnittstelle können die aggregierten Daten aller Systeme in die SQL-Datenbank geschrieben werden, die während des Untersuchungszeitraum auf einem Entwicklungsserver der Universität zu Lübeck gehostet wird (Freundt et al. 2020a).

4.2.3 Projekte

Im Rahmen der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ wurden vier Projekte initiiert, deren Laufzeiten in Tabelle 4.2 aufgezeigt sind.

Tabelle 4.2: Projekte im Rahmen des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“

Projektnummer	Projekttitel	Projektstart	Projektende
FE 15.0615/2015/ARB	Untersuchungsprogramm	01.01.2017	31.12.2021
FE 15.0631/2016/LRB	Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten	01.01.2017	31.12.2020
FE 15.0632/2016/LRB	Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager	01.01.2017	30.09.2019
FE 15.0644/2017/LRB	Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen	01.01.2018	30.09.2020

Die Ziele der einzelnen Projekte sind im Folgenden dargestellt:

FE 15.0615/2015/ARB: Untersuchungsprogramm

Das Projekt „Untersuchungsprogramm“ bildet eine Klammer um die genannten Projekte des Reallabors. Ziel des fünfjährigen Untersuchungsprogramms ist es, die Funktionsfähigkeit und Anwendbarkeit der im Rahmen des BAST-Forschungsclusters „Intelligente Brücke“ entstandenen Entwicklungen zu demonstrieren und sicherzustellen. Es erfolgt eine jährliche Wartung und ggf. Instandsetzung der einzelnen Messsysteme. Die Entwicklung eines auf das Gesamtsystem abgestimmte Datenmanagements erfolgt, welches den gesamten Datenlebenszyklus abdeckt. Die in den zugehörigen Projekten erarbeiteten Ergebnisse der einzelnen Messsysteme werden geeignet aufbereitet und die Ergebnisdaten in einer Webanwendung angezeigt.

Das Projekt wird in Zusammenarbeit des Ingenieurbüros Prof. Dr. U. Freundt, der Fa. MAURER Engineering GmbH, und des Instituts für Telematik der Universität zu Lübeck bearbeitet.

FE 15.0631/2016/LRB: Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Die Messfrequenzen der einzelnen Sensoren an der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ variieren zwischen 1 Hz und 2.500 Hz. Daten mit unterschiedlichen Messfrequenzen sind miteinander zu verarbeiten, so dass eine Zeitsynchronisation der Systeme erforderlich ist. Ziel des Projektes ist es, geeignete Zeitsynchronisationsverfahren zu entwickeln und in der Systemumgebung zu realisieren. Darüber hinaus sollen Datenauswertestrategien zur Ermittlung von Informationen hinsichtlich des aktuellen Verkehrs, des Auslastungsgrads infolge statischer Verkehrslast, der

Ermüdungsbeanspruchung, des globalen, zeitlichen Steifigkeitsverlaufs der Brücke und das Monitoring des Spannkraftverlaufs der externen Spannlieder entwickelt werden. Das drahtlose Sensornetz soll in der Realumgebung erprobt und dessen Einsatzmöglichkeiten und -grenzen aufgezeigt werden. Darüber hinaus soll ein Sensorknoten für die Erfassung der Neigung des Brückenüberbaus entwickelt werden. Ferner soll ein Konzept zur visuellen Darstellung der Ergebnisdaten sämtlicher Systeme des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ in einer Webanwendung erarbeitet und realisiert werden.

Das Projekt wurde vom Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Telematik der Universität zu Lübeck bearbeitet.

FE 15.0632/2016/LRB: Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager

Ziel des Projekts ist es, Strategien für die Datenerfassung und die automatisierte Verarbeitung für die instrumentierten Lager zu entwickeln, um die Lagerreaktionen in Hinblick auf Umwelteinflüsse und dynamische Eigenschaften der Brücke auszuwerten sowie die Genauigkeit der Kenngröße in Bezug auf den Standort zu ermitteln, zu bewerten und in quasi-stationäre, klimatische und verkehrsinduzierte Anteile aufzuteilen. Die erfassten und automatisiert analysierten Daten sollen so aufbereitet werden, dass sie in Brückenmodelle einbezogen werden können. Grenzwerte für erfasste oder abgeleitete Parameter sollen in diesem Projekt festgelegt werden. Ferner soll ein Austausch von den am Lager erhobenen Daten des Systems Brückenwerte und dem Messsystem „instrumentiertes Lager“ zur Verbesserung der Datenqualität erfolgen. Darüber hinaus soll ein Konzept zur Qualitätssicherung entwickelt werden.

Das Projekt wurde von der Fa. MAURER Engineering GmbH bearbeitet.

FE 15.0644/2017/LRB: Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Strategien für die Erfassung und automatisierte Verarbeitung der Messdaten des instrumentierten Fahrbahnübergangs. Zunächst sollen kontrollierte Überfahrten verschiedener Lkw-Typen unter Berücksichtigung von stochastischen Radlastschwankungen durchgeführt und diese hinsichtlich gemessener dynamischer und statischer Achslasten ausgewertet. Darüber hinaus sollen automatisierte Auswertelgorithmen zur Erfassung der Verkehrslast sowie des Status des Fahrbahnübergangs entwickelt werden. Dabei sollen die Messdaten im Hinblick auf Umwelteinflüsse ausgewertet werden und diese hinsichtlich der Genauigkeit der ermittelten Verkehrsdaten quantifiziert werden. Die erfassten und automatisiert analysierten Daten sollen so aufbereitet werden, dass sie über eine Datenbank in Brückenmodelle einbezogen werden können.

Das Projekt wurde von der Fa. MAURER Engineering GmbH bearbeitet.

4.3 Projektergebnisse

Im Rahmen des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ wurden erstmals die vorgestellten Entwicklungen an einem neuen Bauwerk realisiert. Mit den eingesetzten Systemen werden Einwirkungen wie Verkehrslasten und Wiedereinflüsse erfasst, die Funktionstüchtigkeit der Bauteile Spannglied, Fahrbahnübergang und Lager sowie das gesamte Bauwerk hinsichtlich seines Steifigkeitsverlaufs, Auslastungsgrads infolge statischer Verkehrslast und der Ermüdungsbeanspruchung überwacht. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus den oben aufgeführten Projekten vorgestellt. Weitergehende Informationen sind den jeweiligen Schlussberichten zu den oben aufgeführten Projekten zu entnehmen (Butz 2021), (Freundt et al. 2020) und (Rill 2020).

4.3.1 FE15.0615: Untersuchungsprogramm

Im Rahmen dieses Kapitels werden übergreifende Aspekte betrachtet, die für die einzelnen Systeme jedoch elementar sind. Dazu zählen die Themen Datenmanagement, Verfügbarkeit von Strom und

Internet und die Webanwendung. Jährliche Wartungen werden im Rahmen dieses Projekts ebenfalls durchgeführt und im Zusammenhang mit der Praxistauglichkeit und Dauerhaftigkeit der einzelnen Systeme im Kapitel 4.4 diskutiert.

Datenmanagement

Das NAS ist mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung verbunden und damit gegen einen Datenverlust durch Stromausfälle abgesichert. Die Rohdaten sämtlicher Systeme werden auf dem NAS in entsprechenden Verzeichnissen der Systembetreuer hinterlegt. Anhand von zwei externen Festplatten kann eine manuelle Datenabholung der Daten von den Systemen des IBF und MAURER GmbH erfolgen. Für die Weiterverarbeitung der Daten, einen Quervergleich zwischen verschiedenen Systemen und der Darstellung der Daten auf einer Webseite wurde ein einheitliches Datenformat festgelegt, welches auch für die Verwaltung mehrerer Brücken eingesetzt werden kann. Aspekte der Datensicherheit wurden ebenfalls berücksichtigt (Freundt et al. 2020a).

Strom- und Internetverfügbarkeit

Abgesehen vom drahtlosen Sensornetzwerk sind sämtliche installierte Systeme inklusive der Komponenten zum Datenmanagement von einer zuverlässigen Netzstromversorgung abhängig. Dies umfasst die Schritte von der Datenerfassung und -verarbeitung sowie sämtliche Verfahren im Hinblick auf das Datenmanagement. Empfindliche Komponenten sind durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung geschützt. Im Untersuchungszeitraum kam es hin und wieder zu kurzen Ausfällen der Strom- und Internetversorgung. Ein längerer Ausfall der Stromversorgung über knapp 10 Tage erfolgte 2019 aufgrund der Errichtung eines Gartentores. Im Falle eines Stromausfalls ist der Fernzugriff auf das Gesamtsystem eingeschränkt. Ein längerer Internetausfall von mehr als einem Monat ist in einer Änderungsmaßnahme der Internetanbindung begründet (Freundt et al. 2020a).

Webanwendung

Die im Rahmen des Projektes FE15.0631 entwickelte webbasierte Ergebnis-Publikation enthält wesentliche Ergebnisse, die in diesem und den anderen zum Reallabor „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“ zugehörigen Projekten (FE 15.0615, FE 15.0632, FE 15.0644) erzielt wurden. Dazu gehören u.a. kontinuierlich aktualisierte

Kennwert-Verläufe zu statischer Auslastung, Auslastung durch Ermüdung, Bauwerkssteifigkeit und Vorspannkraft sowie von instrumentierten Bauteilen. Im Rahmen dieses Projektes soll die Webanwendung über die Projektlaufzeit von 5 Jahren mit Daten gespeist, wobei Messausfälle zu berücksichtigen sind (Freundt et al. 2020a).

4.3.2 FE 15.0631: Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Zeitsynchronisation

Im Rahmen des Projektes wurde eine grundsätzlich praktikable Zeitsynchronisationslösung entwickelt, die sicherstellt, dass die durch verschiedene, heterogene Messsysteme erhobenen Daten zeitlich synchronisiert werden. Damit werden gemeinsame Auswertungen von Daten unterschiedlicher Messsysteme möglich. Jedoch zeigt sich bei Ausfall der Internetanbindung ein ungewolltes Systemverhalten, welches im Rahmen dieses Projektes nicht zuverlässig behoben werden konnte. Dies hat zur Folge, dass im Fall einer nicht stabilen Internetanbindung die Zeitsynchronisation nicht zuverlässig erfolgen kann (Freundt et al. 2020a). Im Rahmen des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ wurden solche Auswertungen ausschließlich zu Referenzzwecken durchgeführt.

Webbasierte Ergebnis-Publikation

Im Rahmen dieses Reallabors wurde eine Nutzeroberfläche, im nachfolgenden auch als „Webanwendung“ bezeichnet, erarbeitet. In einem ersten Schritt erfolgte eine Anforderungsanalyse und anschließend die Konzeption und Umsetzung der Webanwendung. Die Webanwendung dient zur Visualisierung der erfassten und aufbereiteten Daten der einzelnen Messsysteme. Anhand dieser kann sich der Bauwerkseigentümer jederzeit einen Überblick über den auf messtechnischen Informationen beruhenden Status des Bauwerks und der Bauteile verschaffen. Sobald Kennwerte einen Schwellwert überschreiten, kann eine E-Mail-Benachrichtigung sowohl an den Systembetreuer als auch den Bauwerkseigentümer erfolgen. Die Webanwendung ist nur für autorisierte Nutzer zugänglich. Sie kann von unterschiedlichen Endgeräten wie Laptop, Tablet oder Smartphone aufgerufen werden. Kern der Webanwendung ist die Übersichtsseite. Dort werden die wichtigsten Kennwerte

zur Einschätzung des Bauwerks- und Bauteilstatus auf Grundlage von Messdaten sowie Informationen zu Klima, Wetter, Verkehr und dem Status der einzelnen Messsysteme angezeigt, siehe Bild 4.8.

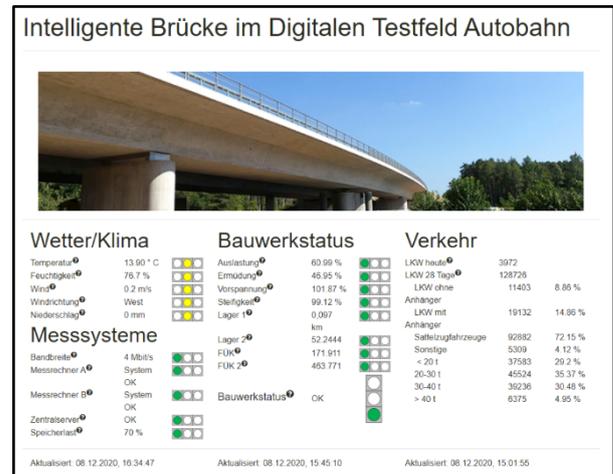


Bild 4.8: Übersichtsseite der Webanwendung (Freundt et al. 2020a)

Der jeweilige Status der einzelnen Systeme wird in Form von Ampelmethaphern gekennzeichnet. Der Gesamtstatus wird durch eine logische UND-Verknüpfung der Subsysteme gebildet. Auf den Subseiten der Webanwendung sind die einzelnen Messsysteme beschrieben und Messdatenverläufe, deren Aufbereitung sowie weitere Detailinformationen können über eine Navigationsstruktur aufgerufen werden (Freundt et al. 2020a).

System Brückenkenwerte

Im Rahmen dieses Projektes wurde für die Erkennung von überfahrenden Fahrzeugen auf vorhergehenden Untersuchungen zurückgegriffen (u.a. RTMS). Für erkannte Fahrzeuge werden Angaben hinsichtlich der Fahrspur, Achszahl, Achsabstand, Fahrzeugtyp, Fahrzeugabstand sowie Fahrzeuggesamtgewicht ermittelt. Die einzelnen Verfahren zur Ermittlung der Angaben sind (Freundt et al. 2020a) zu entnehmen. Eine wichtige Grundlage für die Auswertung bilden die Erkenntnisse aus den durchgeführten Kalibrierfahrten vor Verkehrsfreigabe der Brücke im Herbst 2016. In Bild 4.9 ist das über 3,5 Jahre erfasste Schwerverkehrsaufkommen seit Messbeginn im Februar 2017 dargestellt. Der Jahresgang ist erkennbar sowie die Auswirkungen der Eindämmungsmaßnahmen im Zuge der SARS-COV-2 Pandemie im Februar/März 2020. Das für die Erkennung von LKW ausgelegte System ermöglicht eine zuverlässige Erkennung von Fahrzeugen. Die Bestimmung der Gesamtgewichte ist durch gewisse Abweichungen charakterisiert, die durchgehend im einstelligen

Prozentbereich bleiben. Bei Parallelfahrten erfolgt keine zuverlässige Bestimmung von Gesamtgewichten, dieser Fall tritt jedoch selten auf (Freundt et al. 2020a).

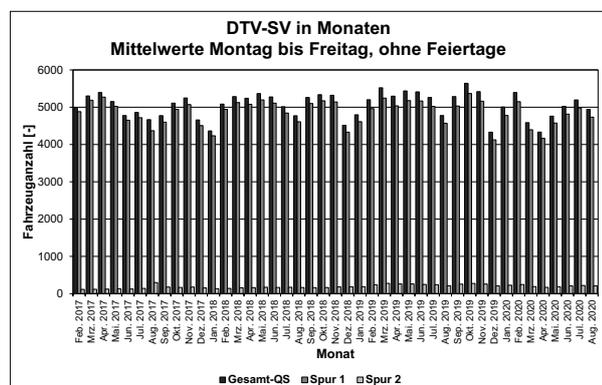


Bild 4.9: Mittleres tägliches Schwerverkehrsaufkommen, Montag bis Freitag (02/2017 - 08/2020) (Freundt et al. 2020a)

Darüber hinaus konnten im Rahmen der Projektbearbeitung vorhandene Algorithmen und Methoden angewendet sowie weiterentwickelt werden, um aus den Messdaten Kennwerte abzuleiten, die eine Beurteilung des Bauwerksstatus ermöglichen. Dabei wurde ausgehend von einer manuellen Auswertung im Labor eine automatisierte Datenauswertung sowie Datenaufbereitung an der Brücke realisiert (Freundt et al. 2020a).

Statische Beanspruchung des Bauwerks

Der Kennwert „Statische Beanspruchung des Bauwerks“ ist als Verhältnis von ermittelten statischen Beanspruchungswerten aus Verkehr zu Werten aus dem Ansatz des für die Tragwerksbemessung verwendeten Lastmodells, LM 1, definiert. Durch statistische Auswertung der Zeitverläufe an ausgewählten Messstellen werden Kennwerte der statischen Beanspruchung des Bauwerks infolge Verkehrs ermittelt. In Bild 3 ist exemplarisch das Ergebnis für eine Messstelle als Verhältniszum zum Vergleichswert aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 aufgetragen. Zwei Niveauschwellen wurden bei einem Wert von 0,80 (Gelb) und 0,90 (Rot) festgelegt. Bei Überschreiten der Niveauschwellen erfolgt eine Benachrichtigung (Freundt et al. 2020a).



Bild 4.10: Kennwertverlauf „Auslastung statisch“ (02/2017 – 10/2020)

Auslastung Ermüdung

Der Kennwert „Auslastung Ermüdung“ wird auf Grundlage von Messdaten der Dehnungsmessungen an der Bewehrung im unteren Bereich des Hohlkastens ermittelt. Dazu werden die temperaturkompensierten Messdaten einer Rainflow-Auszählung unterzogen und die erhaltenen Dehnungsschwingbreiten in Spannungsschwingspiele umgerechnet. Anschließend erfolgt eine Berechnung von Schädigungen und Schädigungssummen anhand der Wöhler-Linie für den Bewehrungsstahl sowie eine Umrechnung zu schädigungsrelevanten Schwingbreiten. Diese werden zu entsprechenden Werten aus dem Ermüdungsnachweis für die jeweilige am Tragwerk betrachtete Stelle ins Verhältnis gesetzt, siehe Bild 4.11. Betrachtungszeiträume wie die gesamte Messzeit, die letzten 52, 12 und 1 Wochen werden dargestellt. Bei kürzeren Betrachtungsräumen kommen saisonale Effekte stärker zum Tragen. Wie in Bild 4.11 zu sehen ist, liegt der errechnete Wert derzeit bei 0,45. Es wird davon ausgegangen, dass sich der errechnete Wert, bei unveränderter Charakteristik der bislang ermittelten schädigungsrelevanten Schwingspiele aus Verkehr, nicht wesentlich ändert. Die Niveauschwellen liegen bei einem Wert von 0,80 und 0,90 (Freundt et al. 2020a).

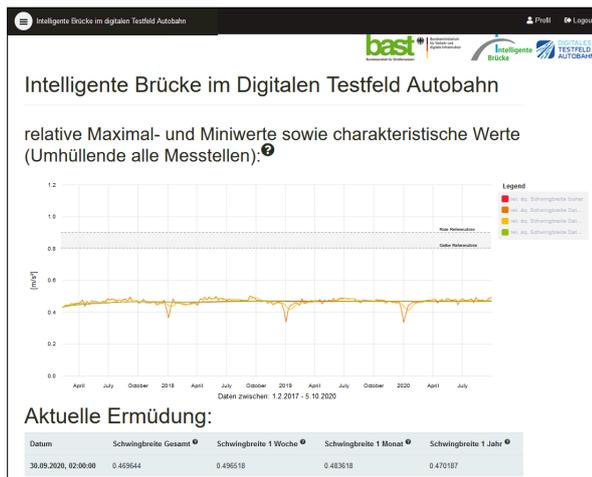


Bild 4.11: Kennwertverlauf „Auslastung Ermüdung“, (02/2017 – 10/2020)

Auf Grundlage der Messdaten der installierten Beschleunigungssensoren erfolgt die Ableitung der Statuskennwerte des Widerstandes des Bauwerks. Dazu werden die Eigenfrequenzen automatisiert über eine Fast-Fourier-Transformation auf dem Messrechner im Brückenhohlkasten ermittelt. Im Rahmen des Projekts FE 15.0631 „Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten“ wurde eine Methodik zur Kompensation von lang-, mittel- und kurzfristigen Effekten in den Messdaten entwickelt auf Basis vorhandener Messdaten und unter der Annahme, dass bisher keine Schädigungen am Bauwerk eingetreten sind (Freundt et al. 2020a). Im Folgenden werden die Statuswerte für die externe Vorspannung und die Bauwerkssteifigkeit vorgestellt.

Statuskennwert „Vorspannung“

Der entwickelte Statuskennwert „Vorspannung“ ermöglicht die Detektion einer Veränderung der Vorspannkraft, z.B. durch den Bruch einzelner Litzen im Spannglied, anhand der erfassten Messdaten. Zur Ermittlung dieses Statuskennwerts werden die Eigenfrequenzen aus den Beschleunigungsmessungen an externen Spanngliedern herangezogen, da diese mit der Vorspannkraft im Spannglied korrespondieren. Ein Statuswert von 1,00 entspricht dem derzeitigen Stand der kompensierten externen Vorspannung. Dabei wurde definiert, dass ein Statuswert von 0,00 den theoretischen Ausfall von 20 der 60 Litzen repräsentieren soll. In Bild 4.12 ist der Verlauf des Statuswertes „Vorspannung“ über die Projektlaufzeit dargestellt. Die eingezeichneten Niveaulinien bei 0,95 und 0,9 zeigen die rechnerisch ermittelte Abweichung der normalisierten

Eigenfrequenz bei Ausfall einer bzw. zweier Litzen (Freundt et al. 2020a).

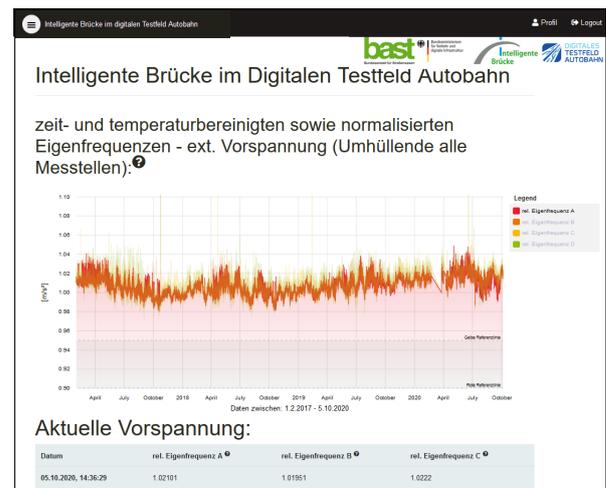


Bild 4.12: Kennwertverlauf „Vorspannung“, (02/2017 – 10/2020)

Status „Bauwerkssteifigkeit“

Der entwickelte Statuskennwert „Bauwerkssteifigkeit“ ermöglicht die Detektion von Veränderungen der Bauwerkssteifigkeit anhand der erfassten Messdaten. Zur Ermittlung des Statuskennwerts werden die Eigenfrequenzen der Brücke herangezogen, die aus der Beschleunigungsmessung am Umlenksattel des externen Spanngliedes abgeleitet werden. Die Eigenfrequenzen der Brücke korrespondieren mit der Steifigkeit des Bauwerks. Im Gegensatz zur Vorspannung ist der Zusammenhang zwischen der Änderung der Eigenfrequenz und der Bauwerkssteifigkeit zahlenmäßig nicht hinterlegt, so dass eine qualitative Kontrolle der Eigenfrequenzen erfolgt. Auf Grundlage der bisher erfassten Messdaten werden Werte von 0,00 zu einem Statuswert von 1,00 und ein in vorherigen Analysen berechneter Mittelwert von 3,234 zu einem Statuswert von 0,00 gesetzt. Bild 4.13 zeigt den Verlauf der Bauwerkssteifigkeit über die Projektlaufzeit. Signifikante Abweichungen können auf eine Änderung der Bauwerkssteifigkeit hindeuten (Freundt et al. 2020a).

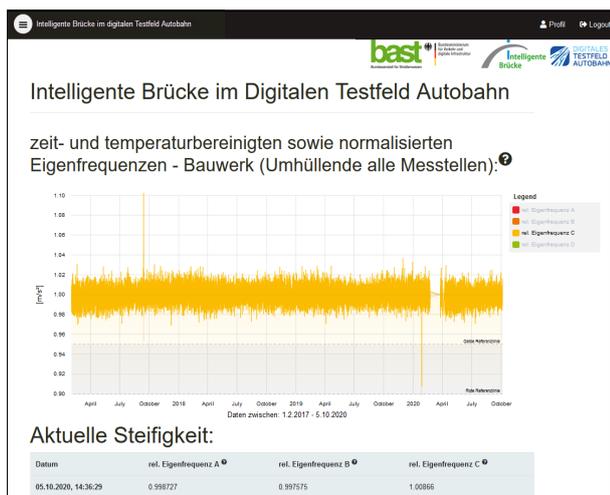


Bild 4.13: Kennwertverlauf „Bauwerkssteifigkeit“, (02/2017 – 10/2020)

Drahtloses Sensornetz

Im Rahmen des Projektes FE 15.0631 wurde die Praxistauglichkeit des drahtlosen Sensornetzwerkes erprobt und Anforderungen für einen drahtlosen Sensorknoten zur Erfassung von Neigungen des Bauwerküberbaus hinsichtlich der Messgenauigkeit und des temperaturbedingten Einsatzbereichs erarbeitet. Auf dieser Grundlage wurde der an der Brücke installierte Neigungssensor konzipiert. Der Neigungssensor KB-5DB der Fa. Preusser Messtechnik besteht aus den Komponenten Energieversorgung, Hauptplatine, Erweiterungsplatine sowie Sensorhardware und weicht nicht vom Aufbau der anderen eingesetzten Sensorknoten ab. Im Rahmen des Projektes wurde gezeigt, dass die verwendeten Batterien im Sensorknoten eine hochfrequente Messdatenerfassung mittels drahtloses Sensornetz nicht ermöglichen. Dies ist erforderlich, wenn Neigungen infolge des Verkehrs erfasst werden sollen.

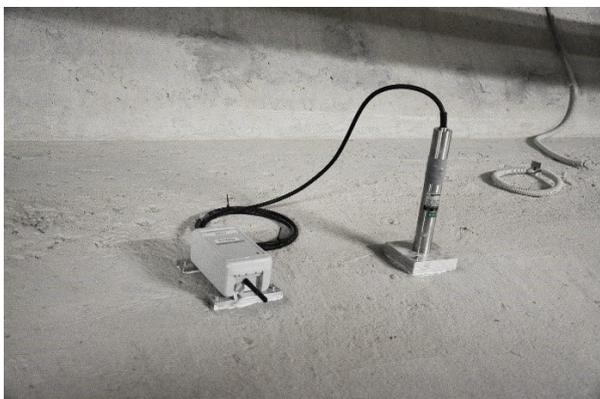


Bild 4.14: Neigungssensor an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn (Freundt et al. 2020a)

99 % des Batterieverbrauchs eines drahtlosen Sensorknotens ist für die Datenübertragung erforderlich. Mit steigender Abtastrate nimmt die zu übertragende Datenmenge zu. Der Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken eignet sich bei derzeit verfügbaren Batteriekapazitäten und ohne Datenreduktion auf dem Sensorknoten ausschließlich für Messungen mit sehr niedrigen Abtastraten, wie sie für z.B. Temperatur- und Rissweiten-/längenmessungen erforderlich sind. Darüber hinaus wurde die tatsächliche Batterieleistung erprobt, in dem zunächst eine hohe Abtastrate von 1/60 Hz für das Sensornetz gewählt wurde. Mit dieser Abtastrate konnte das drahtlose Sensornetz ca. 1,5 Jahre betrieben werden. Nach Austausch der Batterien wurde die Abtastrate auf 1/300 Hz herabgesetzt, so dass ein weiterer Austausch der Batterien in der Laufzeit des Reallabors nicht erforderlich ist. Mit Ausnahme des Sensorknotens „Wetterstation“ wurden die mit den übrigen Sensorknoten zuverlässig Messdaten über den Untersuchungszeitraum erfasst. Die Ursache für die Ausfälle der Wetterstation konnte nicht abschließend geklärt werden. Die Messdaten aus der nahegelegenen Wetterstation „Nürnberg Flughafen“ des Deutschen Wetterdienstes korrelieren mit denen aus dem drahtlosen Sensornetz und können für Analysen herangezogen werden (Freundt et al. 2020a)

4.3.3 FE 15.0632: Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kaltengleitlager Instrumentiertes Lager

Im Rahmen des Forschungsprojektes FE 15.0632 wurden plausible Datenauswertestrategien für die erfassten Messdaten an den instrumentierten Kaltengleitlagern und Algorithmen für eine automatisierte Auswertung entwickelt. Zur Erfassung und Bewertung Lagerfunktionalität und des Lagerstatus werden Tagesextremwerte der Verschiebung in der ebenen Gleitfläche, der Verdrehung und des Drucks sowie akkumulierte Gleitwege und der Gleitspalt kontinuierlich ausgegeben. Ausgewählte Ergebnisse über die Projektlaufzeit zwischen Januar 2017 und Dezember 2018 sind in Bild 4.15, Bild 4.16 und Bild 4.17 dargestellt. Die Brückenmonitoring auf Grundlage der instrumentierten Lager erfolgt durch die Ermittlung der ersten beiden Eigenfrequenzen gewonnen aus Messungen der Abstandssensoren sowie die Lagerkraft infolge ständiger Einwirkungen. Die automatisch ermittelten Kennwerte werden mit üblichen bzw. sinnvollen Werten für das Lager abgeglichen und ermöglichen eine Beurteilung, ob das Messsystem bzw. das Lager fehlerlosen Zustand sind (Butz 2021).

Das erarbeitete Qualitätssicherungskonzept für die Drucksignale zielt auf eine zuverlässige Verkehrserfassung ab. Es sieht gezielte Überfahrten mit Lkws bekannten Gewichts und Geometrie alle zwei Jahre vor. Damit können Zustandsänderungen im Lager aufgrund von Setzungen erkannt werden, die zu lokalen Druckunterschieden führen.

um eine zuverlässige Verkehrserfassung zu gewährleisten. Für die Qualitätssicherung der Messungen des Eigengewichts wird die teilweise Entlastung mit Pressen von unten empfohlen (Butz 2021).

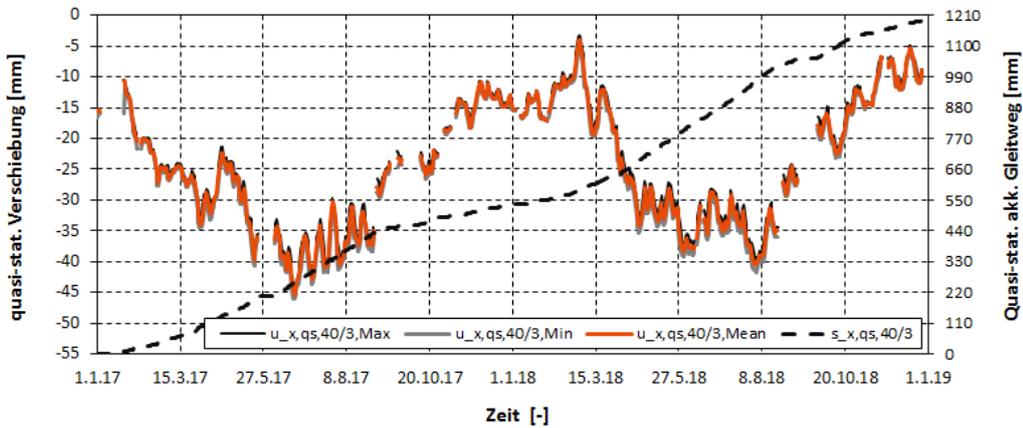


Bild 4.15: Horizontale Lagerverschiebung und akkumulierten Gleitweg (Butz 2021)

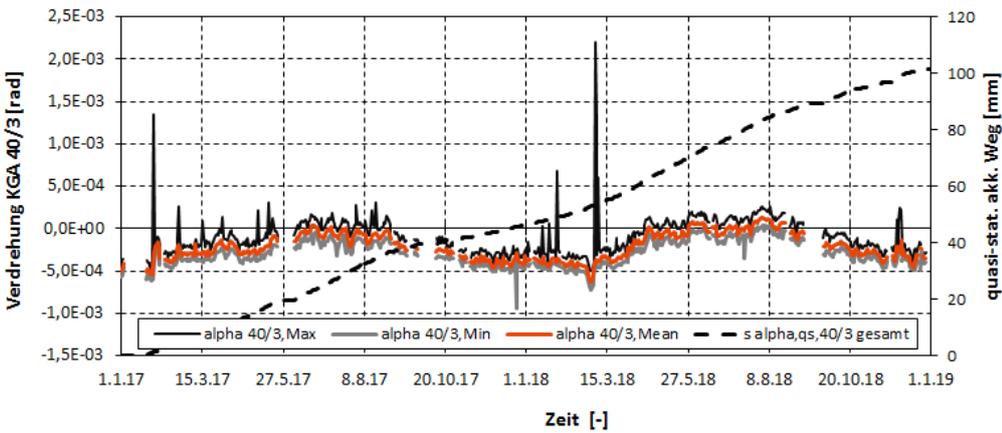


Bild 4.16: Quasi-statische Lagerverdrehung sowie Maxima und Minima (Butz 2021)

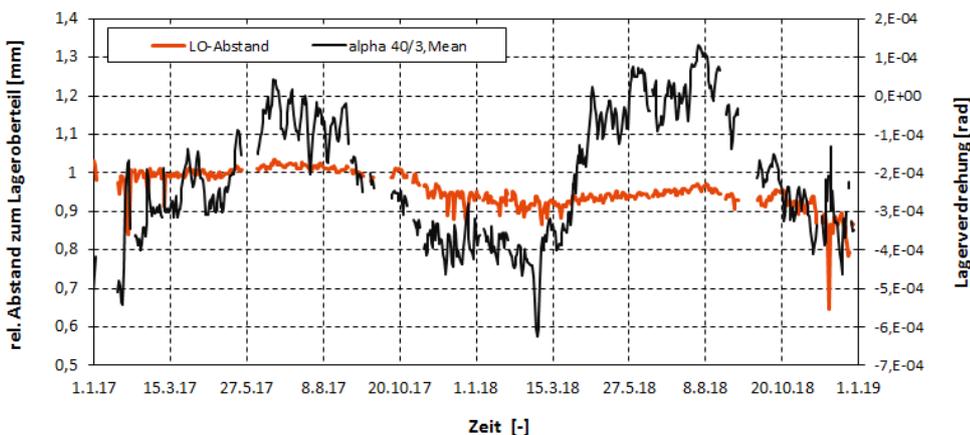


Bild 4.17: Quasi-stationäre Lagerverdrehung und relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte (Butz 2021)

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden im Zuge der Erarbeitung von Datenauswertestrategien folgende Hinweise für ein zukünftiges Lagermonitoring herausgearbeitet (Butz 2021):

- Zur Ermittlung von Effekten wie Schwinden und Kriechen auf Lagerverschiebung und -verdrehung sollten Bauwerkstemperaturen und Lagerwege unmittelbar nach Lagereinbau erfasst werden,
- Lagerkraftmessungen sollten unmittelbar nach Lagereinbau erfolgen, um auch die Bauwerksveränderungen, die zu Beginn eintreten, zu erfassen,
- Alle erforderlichen Bezugsgrößen (z.B. Gleitspalt) sollten bereits bei der Bauwerksabnahme ermittelt werden, um Referenzwerte des "Null-Zustand" zu erhalten.
- Das erarbeitete Qualitätssicherungskonzept für Drucksensoren stellt sicher, dass lokale Druckunterschiede im Lager, die durch Setzungen im Material, im Bauwerk oder im Untergrund begründet sind, durch eine regelmäßige Kalibrierung berücksichtigt werden.
- Ferner sollte zukünftig für instrumentierte Kalottenlager eine Kalibrierung der Lager mit einer Genauigkeit von $\leq \pm 1$ bzw. $\pm 0,5$ N/mm²

für eine optimale Genauigkeit der Auflastmessung erfolgen.

- Ein zukünftiges Sensorkonzept für instrumentierte Kalottengleitlager sollte einen zusätzlichen Wegsensor zur Erfassung von verkehrsinduzierten Lagerverschiebungen in der ebenen Gleitfläche beinhalten.

4.3.4 FE 15.0644: Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Mit dem Reallabor „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ wurde erstmalig in Deutschland eine vollautomatisierte Verkehrslasterfassung und Erfassung und Bewertung des Status eines Fahrbahnübergangs unter Realbedingungen realisiert. Auf Grundlage von Kalibrierfahrten und Simulationsuntersuchungen zur Funktionskontrolle und Bestimmung dynamischer Einflussfaktoren wurde im Rahmen dieses Projektes eine vollautomatisierte Auswertung der Messdaten des instrumentierten Fahrbahnübergangs entwickelt. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Im betrachteten Erfassungszeitraum April 2018 bis Juni 2020 wurden 6.187.885 Fahrzeuge bestimmt. Diese teilen sich, wie in Bild 4.18 gezeigt, auf die einzelnen Fahrzeugklassen auf (Rill 2020).

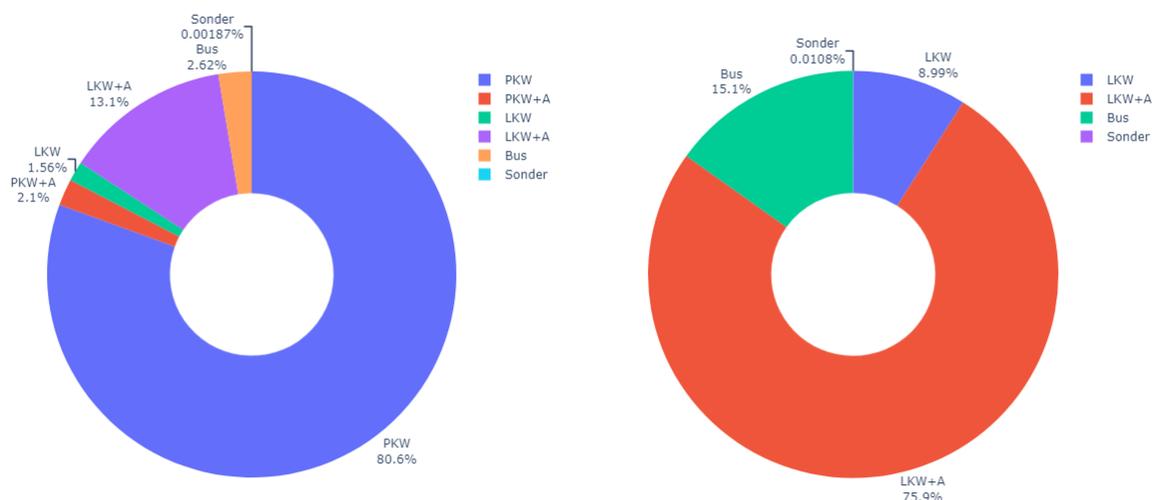


Bild 4.18: Verkehrszusammensetzung im Zeitraum 04/2018 und 06/2020 (Rill 2020)

Die Messdaten wurden zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit und möglichen Schädigung des Fahrbahnüberganges ausgewertet. Dazu wurden die Eigenfrequenzen, Lagerlasten, Gesamtbelastung

in Form von Einzelachslasten sowie die Spaltweite ermittelt. Bei den Eigenfrequenzen gilt, dass eine nicht temperaturbedingt erklärbare Veränderung der Eigenfrequenzen auf beginnende Schäden

hindeuten kann. Dies kann z.B. Vorspannkraftverluste an den Gleitfedern umfassen. Für die Bewertung der ermittelten Lagerlast, Gesamtbelastung und Spaltweite werden die konstruktiven Auslegungswerte des Fahrbahnübergangs als Grenz- bzw. Erwartungswert herangezogen. Bild 4.19 zeigt den Verlauf der Lagerlasten im Zeitraum April 2018 bis Juni 2020. Zu keiner Zeit wurde der Grenzwert von 140 kN erreicht. Überschreitungen von Einzelachslasten über 210 kN können zu Ermüdungserscheinungen führen. Es ist kein Versagen unterhalb von 10^4 Wiederholungen dieses

Belastungsniveaus zu erwarten. Bild 4.20 zeigt den Verlauf der maximalen Einzelachslast über die oben genannte Laufzeit. Die Belastungsgrenze wurde innerhalb dieses Zeitraums nicht erreicht bzw. überschritten. Bild 4.21 zeigt den Verlauf der Fugenspaltweite. Der untere Grenzwert mit 190 mm und obere Grenzwert mit 320 mm ergeben sich aus den maximalen Lamellenabständen von 80 mm und der Anforderung, dass die Lamellen nicht aneinanderstoßen dürfen. Im Messzeitraum bewegte sich der Fugenspalt innerhalb der Grenzen (Rill 2020).

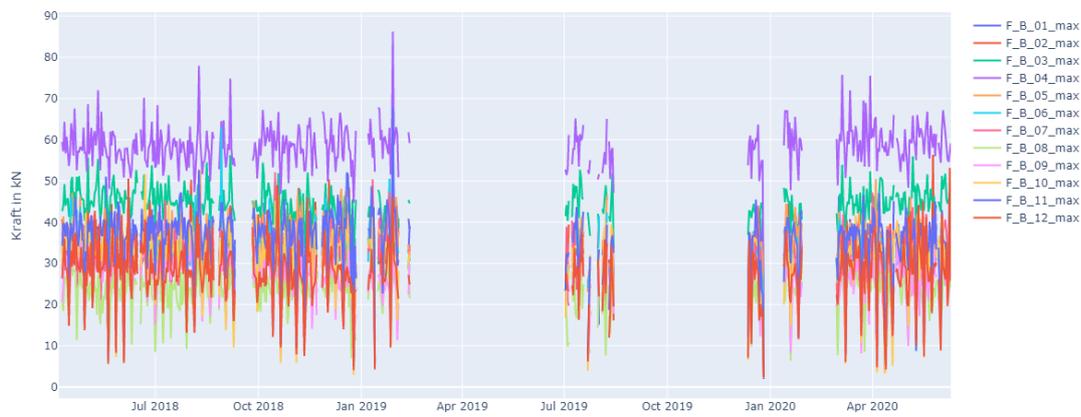


Bild 4.19: Tagesmaxima der Lagerlasten über die Zeit (zulässiger Maximalwert: 140 kN), (Rill 2020)



Bild 4.20: Verlauf der maximal gemessenen Einzelachslasten (zulässiger Maximalwert 210 kN), (Rill 2020)



Bild 4.21: Fugenspaltweiten im Vergleich zur Temperatur (Zulässige Werte zwischen 190 und 320 mm), (Rill 2020)

In Anlehnung an die gezeigten Ergebnisse und der Tatsache, dass es sich um eine 5 Jahre alte Fahr-
bahnübergangskonstruktion handelt, kann davon
ausgegangen werden, dass keine durch die instal-
lierte Messtechnik ableitbaren Schädigungen vor-
liegen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass
das vorliegende Monitoring keines Falls die Bau-
werksprüfung ersetzen, sondern allenfalls unter-
stützen kann.

4.4 Beurteilung der Systeme auf Grundlage des 5-jährigen Untersuchungszeitraums

4.4.1 Systembeurteilung

In diesem Kapitel werden die einzelnen Systeme
im Rahmen des Reallabors „Intelligente Brücke im
Digitalen Testfeld Autobahn“ nach einer 4,5-jähri-
gen Laufzeit hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit
beurteilt. Dabei werden die Systeme hinsichtlich
Dauerhaftigkeit, Verfügbarkeit, Mehrwert sowie
Optimierungsbedarf beurteilt. Die Begriffe sind, so-
weit erforderlich, in Kapitel 2.1 definiert.

4.4.1.1 System Brückenkennwerte

Dauerhaftigkeit

Im Erprobungszeitraum wurden sämtliche Kompo-
nenten des Systems jährlich gewartet. Bis heute
haben sich die Komponenten als robust erwiesen.
Lediglich ein induktiver Wegaufnehmer am instru-
mentierten Lager musste ersetzt werden. Bei den
Wegsensoren am Lager zeigen sich Anfälligkeiten
für Korrosion der Taststifte. Die Taststifte an den
Wegsensoren am Lager müssen für eine uneinge-
schränkte Funktionalität jährlich gereinigt werden.
(Freundt et al. 2020a).

Verfügbarkeit

Das Messsystem lief bisher stabil und liefert bis
heute nahezu ohne Ausfälle zuverlässig Daten.

Mehrwert

Ausgehend von den analysierten Messdaten wer-
den mit dem weiterentwickelten System kontinuier-
lich Brückenkennwerte ermittelt. Anhand dieser
Kennwerte ist eine Statusbeurteilung der Brücke
und ausgewählter Bauteile möglich, die als Unter-
stützung für den Bauwerksbetreiber zusätzlich zur
Bauwerksprüfung dienen kann. Dazu zählen u.a.
der objektspezifische Auslastungsgrad infolge sta-
tischer Verkehrslast, die Ermüdungsbeanspru-
chung, Bauwerkssteifigkeit und Vorspannkraft der
externen Spannglieder. Des Weiteren werden In-
formationen zum tatsächlichen Verkehr und Wetter
ermittelt.

Optimierungsbedarf

Bei einem zukünftigen Einsatz des Systems Brü-
ckenkennwerte sollte die Verwendung der bisher
eingesetzten induktiven Wegaufnehmern am La-
ger überdacht werden. Ggf. sollte ein weniger kor-
rosionsanfälliges Messverfahren eingesetzt oder
ein geeigneterer Schutz der Sensoren vor Umwelt-
einflüssen ermöglicht werden. Untersuchungen
zum Zuverlässigkeitsindex könnten auf Grundlage
der Informationen aus dem System Brückenkenn-
werte sowie ggf. weiterer Informationsquellen zu-
künftig verfolgt werden. Eine Anpassung der Kom-
pensationsparameter in den Auswertelgorithmen
könnten durchgeführt werden, wenn z.B. Kriech-
und Schwindprozesse abgeklungen sind. Die erar-
beiteten Kennwerte könnten weiterentwickelt so-
wie Zusätzliche entwickelt werden. Ferner könnte
zukünftige Forschung mit dem Ziel der Weiterent-
wicklung der webbasierten Ergebnis-Publikation
erfolgen, in Form von automatisiert angezeigten
praktischen Schlussfolgerungen für den

Bauwerkseigentümer. Darüber hinaus könnten Kennwerte für ein Warnsystem für Tragwerke weiterentwickelt werden.

4.4.1.2 Drahtloses Sensornetzwerk

Dauerhaftigkeit

Im Allgemeinen zeichnet sich das drahtlose Sensornetzwerk durch seine Dauerhaftigkeit aus. Im gesamten Zeitraum konnten keine Auffälligkeiten an den Klebstellen der Sensoren und Sensorknoten festgestellt werden, die auf eine Materialermüdung hinweisen (Freundt et al. 2020a). In Bezug auf die Sensorik wird auf den Abschnitt *Verfügbarkeit* verwiesen.

Verfügbarkeit

Die Messungen mittels des drahtlosen Sensornetzes begannen Mitte Juni 2017. Seither erfolgten geplante Messausfälle aufgrund von erforderlichen Systemanpassungen sowie Messausfälle, die durch Strom- oder Internetausfälle sowie Ausfälle des NAS begründet waren. Darüber hinaus traten beim Sensorknoten Wetterstation vermehrt Ausfälle auf, deren Ursache nicht gefunden und behoben werden konnte. Mittlerweile ist die Wetterstation nicht mehr aktiv. Entsprechende Daten werden von der nächstgelegenen Station des Deutschen Wetterdienstes bezogen (Freundt et al. 2020a).

Mehrwert

Prinzipiell besitzen drahtlose Sensornetzwerke gegenüber geläufigen Lösungen bedeutende Vorteile wie Erreichbarkeit unzugänglicher Bereiche, verringerter Installationsaufwand und damit geringere Kosten. Im Rahmen dieses Projekts konnte die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des drahtlosen Sensornetzes in realer Umgebung gezeigt werden. Es wurde jedoch auch deutlich, dass erheblicher Entwicklungsbedarf besteht bzw. derzeit verfügbare Technologien erprobt werden sollten.

Optimierungsbedarf

Bei der Rissbreitenmessung wird lediglich der Sensorausschlag erfasst. Rückschlüsse auf tatsächliche Rissbreiten sind mit der verwendeten Technik nicht möglich, da die Rissbreiten außerhalb des Messbereiches des Sensors liegen (Freundt et al. 2020a). Im Rahmen dieses Projektes stand primär die Erprobung der Funktionstüchtigkeit des

drahtlosen Sensornetzwerkes im Fokus. Sollte das drahtlose Sensornetz zu Monitoringzwecken eingesetzt werden, ist ein Sensor mit geeignetem Messbereich zwingend erforderlich.

Zukünftig sollte untersucht werden, wie Daten bereits im Sensorknoten geeignet reduziert werden können, um den Batterieverbrauch zu optimieren und dabei keine wichtigen Informationen zu verlieren. Damit wären dann ggf. auch höhere Abstrakten möglich, die beim Brückenmonitoring vielfach zumeist erforderlich sind.

Der Austausch von Batterien ist ohne größeren Aufwand möglich, sofern diese im Hohlkasten angebracht sind. Da einige Sensorknoten nur mit einer Arbeitsbühne erreichbar sind, sollte ein Austausch von Batterien zukünftig zeitgleich mit der Bauwerksprüfung angestrebt werden.

Die für das Reallabor gewählte Hard- und Software besteht im Wesentlichen aus Eigenbau-Lösungen. Seit der Konzeption des Reallabors vor 6 Jahren ist die technologische Entwicklung vor allem im Hinblick auf Aspekte des Datenmanagements weiter fortgeschritten. Bei zukünftigen Reallaboren sollte auf kommerzielle Lösungen wie z.B. Smart City Lösungen FIWARE zurückgegriffen werden. Dies gilt ebenfalls für die eingesetzten Sensorknoten der nicht mehr existierenden Firma coalsense. Wie bereits erwähnt, stellt die Batteriekapazität einen gewissen Flaschenhals da. Im Bereich der Batterietechnik gab es in den letzten 5 Jahren für diese Anwendung keine nennenswerte Entwicklung, so dass die Verwendete somit immer noch den Stand der Technik darstellt.

4.4.1.3 Instrumentierter Fahrbahnübergang

Dauerhaftigkeit

Während der Projektlaufzeit hat sich sowohl die Sensorausstattung des Fahrbahnübergangs als auch der Fahrbahnübergang selbst als robust und zuverlässig erwiesen. Verschleiß- und Alterungerscheinungen wurden bei der jährlichen Wartung nicht erkannt (Rill 2020). Es ist jedoch auch hierfür zu berücksichtigen, dass der instrumentierte Fahrbahnübergang erst seit Oktober 2016 verkehrlichen und klimatischen Einflüssen ausgesetzt ist. Dies entspricht nur einem kleinen Anteil an der Lebensdauer eines Fahrbahnübergangs. Erst ein deutlich über die Laufzeit des Reallabors (2021) hinausgehender Weiterbetrieb des Messsystems könnte Aufschluss über die tatsächliche

Lebensdauer der eingesetzten Sensorik an diesem Fahrbahnübergang geben.

Verfügbarkeit

Neben den erzielten Ergebnissen ist zu beachten, dass das Mess- und Auswertesystems von häufigen Ausfällen während der Projektlaufzeit betroffen war. Die Verfügbarkeit des Mess- und Auswertesystems beläuft sich auf ca. 50 %. Neben kleineren Ausfällen, deren Ursache zeitnah behoben und das System daraufhin optimiert werden konnten, folgten längerfristige Ausfälle im Jahr 2019, die u.a. durch einen werkseitigen Defekt am Messrechner verursacht wurden (Rill 2020). Seit zahlreicher Maßnahmen läuft das Messsystem bis heute deutlich stabiler.

Mehrwert

Der instrumentierte Fahrbahnübergang liefert umfassende Informationen zum Verkehr, der diesen überrollt. Damit ist die tatsächliche Belastung dieses Fahrbahnübergangs quantifizierbar und bildet neben weiteren Informationen aus Messgrößen die Grundlage für Kenntniserweiterungen durch die Verifikation von Systemannahmen und Verhalten des Fahrbahnübergangs. Gezielte Informationen zu Verhaltensveränderungen am Fahrbahnübergang können den Bauwerksprüfer unterstützen und eine optimierte Lebenszyklusplanung ermöglichen.

Optimierungsbedarf

Im Allgemeinen ist für den Einsatz des instrumentierten Fahrbahnübergangs in der Praxis eine weitere Optimierung des Systems erforderlich, so dass automatisierte Neustarts zuverlässig und fehlerfrei erfolgen und damit fehlende Messdatenverläufe minimiert und eine deutlich höhere Verfügbarkeit erzeugt werden.

Für zukünftige instrumentierte Fahrbahnübergänge könnte der Messaufbau vereinfacht werden. Es ist davon auszugehen, dass in den meisten Fällen die Ausstattung der rechten Fahrspur ausreicht, um die wesentlichen Ereignisse zu erfassen. Darüber hinaus könnte die Erfassung von relevanten Messwerten sowie deren Auswertung optimiert werden (Rill 2020). Grundsätzlich sollten im Vergleich zu der eingesetzten konventionellen Messtechnik auch andere Verfahren der Datenerfassung, die eine Kosteneinsparung und vereinfachten Einsatz erzielen, auf ihre Eignung für einen instrumentierten Fahrbahnübergang geprüft und

erprobt werden. Dazu sollten auch neuartige Technologien und Verfahren wie Deep Learning-Algorithmen untersucht und evaluiert werden. Ferner sind Prognosen zum Status der Fahrbahnübergangskonstruktion unter Angabe der Restlebensdauer von besonderer Bedeutung für ein optimiertes Lebenszyklusmanagement.

Eine Übertragung der Systematik auf andere Fahrbahnübergangstypen könnte zukünftig evaluiert werden. Der instrumentierte Fahrbahnübergang ist in der derzeitigen Ausführung nicht wirtschaftlich. Im Rahmen weiterer Forschung könnte der Aufbau des instrumentierten Fahrbahnübergangs näher an Standardkonstruktionen herangeführt werden, indem zum Beispiel auf die mechanische Trennung der Fahrspuren verzichtet wird (Rill 2020).

4.4.1.4 Instrumentiertes Lager

Dauerhaftigkeit

Bis zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind fünf von sechs Drucksensoren ausgefallen. Der Ausfall mehrerer Drucksensoren in einem relativ kurzen Zeitraum sowie die Tatsache, dass ein Schaden am Sensorkabel ausgeschlossen werden konnte, deutet darauf hin, dass entweder die Drucksensoren aus einer fehlerhaften Charge stammen oder es sich um - für diese Belastungsart - nicht geeignete Drucksensoren handelt. Die übrige Sensorausstattung am Lager sowie das Lager selbst zeigen keine Verschleiß- und Alterungserscheinungen (Freundt et al. 2020b).

Verfügbarkeit

Bzgl. der Verfügbarkeit des instrumentierten Lagers wird auf den Abschnitt zum Fahrbahnübergang, 4.4.1.3, verwiesen.

Mehrwert

Ebenso wie Fahrbahnübergänge gehören Lager zu den Verschleißteilen einer Brücke. Der Austausch eines Brückenlagers ist mit hohen Kosten aufgrund eines enormen Aufwands verbunden. Frühzeitige Informationen hinsichtlich Verhaltensveränderungen eines Brückenlagers sind daher von großer Bedeutung. Mit den instrumentierten Lagern an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn wird dies möglich. Gezielte Informationen zu Verhaltensveränderungen am Lager können den Bauwerksprüfer unterstützen und eine optimierte Lebenszyklusplanung ermöglichen.

Optimierungsbedarf

Aufgrund der Ausfälle der Drucksensoren sollte der Ursache für die Ausfälle weiterhin nachgegangen werden und das Sensorkonzept ggf. entsprechend modifiziert werden. Ein Austausch von defekten Drucksensoren ist derzeit mit dem Austausch des Lagers und den sich daraus ergebenden Verkehrsbeeinträchtigungen verbunden. Daher sollten zukünftig Konzepte und Methoden entwickelt werden, die einen Austausch des Lagers bei Instandsetzung oder Ersatz eines Sensors nicht erfordern. Nichtsdestotrotz bedarf es Drucksensoren, die die Lebensdauer eines Lagers überdauern.

Darüber hinaus sollte für zukünftig instrumentierte Kalottenlager das Sensorkonzept durch einen zusätzlichen Wegsensor zur Erfassung von verkehrsinduzierten Lagerverschiebungen in der ebenen Gleitfläche erweitert werden (Butz 2021).

Für zukünftige Reallabore, bei denen instrumentierte Lager zum Einsatz kommen, sollte Folgendes berücksichtigt werden:

- *Erfassung von Bauwerkstemperaturen und Lagerwege unmittelbar nach Lagereinbau* zur Ermittlung von Effekten wie Schwinden und Kriechen auf Lagerverschiebung und -verdrehung,
- *Lagerkraftmessungen unmittelbar nach Lagereinbau* zur Erfassung von Bauwerksveränderungen, die zu Beginn eintreten,
- *Ermittlung aller erforderlichen Bezugsgrößen (z.B. Gleitspalt) bereits bei der Bauwerksabnahme*, um Referenzwerte des "Null-Zustand" zu erhalten (Butz 2021).

4.5 Beurteilung von Bedeutung und Nutzen des Reallabors

Beim Reallabor „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“ handelt es sich um ein Bauwerk, welches seit seiner Errichtung umfangreich mit Sensorik ausgestattet wurde. Dies ist in Deutschland bislang ein Einzelfall. Mit diesem Reallabor liegen folglich Nullmessungen für das Bauwerk vor, welche für die Analyse und Bewertung des Systemverhaltens über die gesamte Nutzungsdauer des Bauwerks von großer Bedeutung sind. Erkenntnisse daraus können auch für Untersuchungen am Bestandsbauwerk herangezogen werden. Im Gegensatz zu einem neuen Bauwerk, ist für die messtechnische Erfassung und Bewertung des Status des Bestandsbauwerks vorab eine

umfassende Zustandsbestimmung notwendig, die die Einbeziehung von Abnutzungen und Vorschädigungen sowie vorhandener grundsätzlicher konstruktiver und baustofflicher Defizite beinhaltet. Zusätzlich zu einer aktuellen Hauptprüfung sind ggf. weitere Identifikationsuntersuchungen erforderlich (bzgl. Materialeigenschaften, Geometrien, Lage der Bewehrung usw.). Eine Nachrechnung des Brückenbauwerkes ist notwendig, um die relevanten Grenzzustände festlegen zu können. Diese Analyse bildet die Grundlage für die Ausarbeitung des Sensor-, Datenanalyse- und Bewertungskonzepts auf probabilistischer Ebene mit dem Ziel der Ermittlung der Zuverlässigkeit einzelner Bauteile und des gesamten Bestandsbauwerkes sowie deren Restlebensdauer.

Im Rahmen dieses Reallabors konnten verschiedene im Rahmen einer BMVI-Förderung entwickelten Systeme erprobt und weiterentwickelt werden. Dabei wurden für alle Systeme automatisierte Auswertungen der erfassten Messdaten sowie eine Webanwendung zur Visualisierung der relevanten Ergebnisse entwickelt und realisiert. Wichtige Praxiserfahrungen wurden mit der Messtechnik und IT-Komponenten über einen 4,5-jährigen Zeitraum gesammelt. Sowohl für eine Beurteilung der Langzeitstabilität und -tauglichkeit der Messtechnik und IT-Komponenten als auch im Hinblick auf das Bauwerksmonitoring reicht der Untersuchungszeitraum von 5 Jahren nicht aus. Eine Weiterführung des Reallabors über den Untersuchungszeitraum hinaus wird derzeit von der Autobahn des Bundes GmbH (AdB) geprüft.

Mit einer Weiterführung des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ über 2021 hinaus könnten verschiedene Ziele verfolgt werden. Diese sind zusammengefasst in den übergeordneten Zielen, die Gewährleistung der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit dieses Bauwerks während dessen Nutzungsdauer bestmöglich zu unterstützen sowie praxistaugliche Entwicklungen für ein prädiktives Erhaltungsmanagement für alle Brücken dieser Bauweise durch zielgerichtete Forschung zu erarbeiten. Durch einen möglichen Weiterbetrieb des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ könnten der AdB zusätzlich zur Bauwerksprüfung kontinuierlich auf Basis von Messdaten abgeleitete Belastungen und relevante Bauwerks- und Bauteilkennwerte zur Verfügung gestellt, die eine Beurteilung der Bauwerkszuverlässigkeit ermöglichen. Die gewonnenen Informationen könnten als Indikator für eine zuverlässigkeitsorientierte Bauwerksprüfung dienen und deren Effizienz steigern. Die

Weiterführung des Reallabors würde es ermöglichen, Langzeiterfahrungen mit den installierten und weiteren Messsystemen auch im Hinblick auf deren tatsächliche Lebensdauer zu sammeln sowie praxistaugliche Entwicklungen voranzutreiben und zu demonstrieren. Neben dem Potenzial, welches ein Reallabor bietet, ist es auch mit Kosten für Ausstattung, Betrieb und Systembetreuung verbunden. Darüber hinaus vereint der Betrieb eines Reallabors verschiedene Disziplinen, was ein hohes Maß an Kommunikation und ausgezeichnete Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Instanzen erfordert.

Aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen und Ergebnissen des Reallabors „Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“ konnte diverses Forschungspotenzial abgeleitet werden, siehe Kapitel 5. Ein zentraler Aspekt sind dabei Messdaten, die am Reallabor erfasst werden können. Diese stellen eine wichtige Grundlage für weitergehende Forschung dar, z.B. zur Optimierung und Validierung von Algorithmen oder zur Verifizierung von neu entwickelten Systemen, vgl. Bild 4.22.

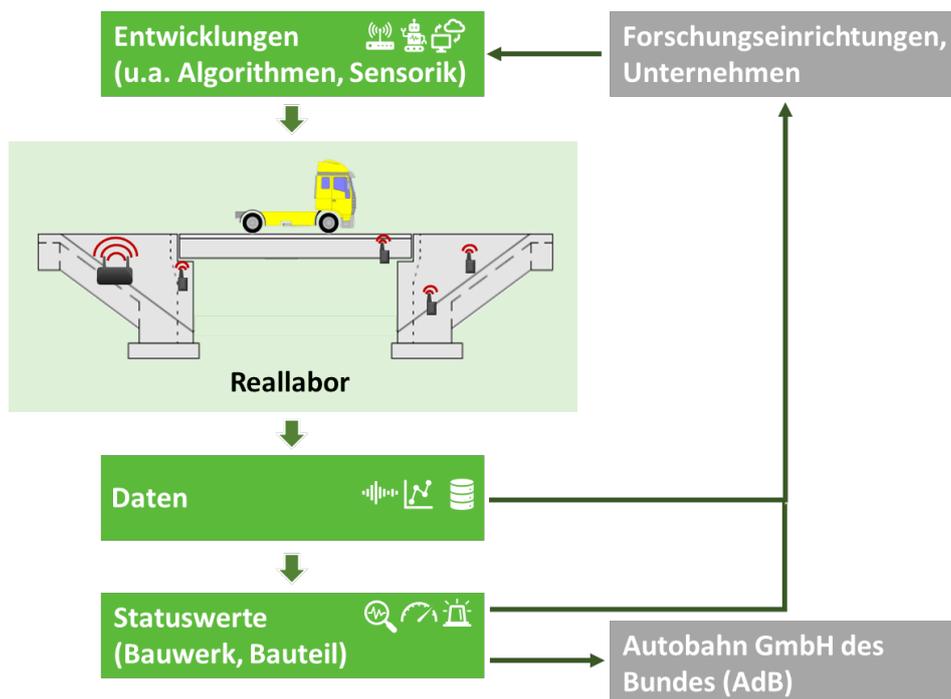


Bild 4.22: Schema zur Verwertung von Informationen aus Reallaboren

5 Ausblick

Im Rahmen des Forschungsclusters „Intelligente Brücke“ wurden im Rahmen von Ressort-, Antrags- und BAST-Eigenforschung umfangreiche Machbarkeitsstudien, fachtechnische Konzeptionen, Anwendungen, Entwicklungen sowie Anforderungen zur Thematik Intelligente Brücke erstellt. Auf dieser Grundlage erfolgten Demonstrationen im Rahmen von Reallaboren und deren Bewertung. In Form eines Workshops „Intelligente Brücke – Potentiale und Chancen“ (2014) wurden spezifische Fragestellungen in Fachkreisen diskutiert. Ergebnisse wurden sowohl in zahlreichen Veröffentlichungen als auch in den BAST Symposien „Intelligente Brücke – Der Weg in die Praxis“ (2015), „Intelligente Brücke – Neue Entwicklungen“ (2018) Interessierten zugänglich gemacht. Auf Grundlage der bereits erzielten Forschungsergebnisse können zukünftige Forschungsthemen abgeleitet werden, mit dem Ziel das Bauwerksmonitoring zu optimieren und eine Realisierung der Intelligenten Brücke in der Praxis zu unterstützen. Wie in Kapitel 4.5 dargestellt, sind Reallabore für die aktuelle und zukünftige Forschung von zentraler Bedeutung und stellen Messdaten unter Realbedingungen für Forschung zur Verfügung.

5.1 Forschungsthemen

Im Folgenden werden wichtige, zukünftige Forschungsthemen dargestellt:

- Weiterentwicklung der Systeme aus dem Reallabor „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ u.a.
 - Weiterentwicklung der Webanwendung unter Berücksichtigung der Anforderungen der AdB z.B. hinsichtlich einer automatisierten Anzeige von praktischen Schlussfolgerungen auf Grundlage der Ergebnisse,
 - Weiterentwicklung von Bewertungsverfahren: umfassende Einbindung der Ergebnisse der Messsysteme in eine ganzheitliche Bauwerksbetrachtung.
- Erprobung neuer Entwicklungen, u.a.
 - Erprobung sowie Bewertung der Dauerhaftigkeit und Langzeitstabilität von drahtlosen Sensornetzen,
 - Erprobung und Bewertung neuester Messverfahren und -technik.
- Gezielte Forschung auf dem Weg zu einem prädiktiven oder kognitiven Erhaltungsmanagement, u.a.
 - Entwicklung von Kennwerten für ein Warnsystem für Tragwerke,
 - Automatisierte Zuverlässigkeitsbetrachtungen auf Grundlage von Messdaten,
 - Entwicklung von hybriden Ansätzen (Kombination von modell- und rein datenbasierten Ansätzen) zur Ermittlung des Bauwerk-/Bauteilstatus und dessen Prognose sowie die Untersuchung der Verwendbarkeit von künstlichen Messdaten, vgl. Kapitel 3.1, zur Entwicklung und Validierung von datengetriebenen Algorithmen,
 - Entwicklung von Prognosealgorithmen für instrumentierte Fahrbahnübergänge und Lager,
 - Forschungsprojekte rund um das Thema „Digital Twin Brücke“, siehe Kapitel 5.2.
- Forschung auf dem Gebiet Asset Management, Key Performance Indicators (KPI)

Seit 2020 bringt sich die BAST im Verbundforschungsprojekt BrAssMan, Brücken Asset Management für Straßenbrücken, ein. Dieses hat zum Ziel die bisherige Praxis des Erhaltungsmanagements durch eine bestandsübergreifende Datenanalyse und ein intelligentes Asset Management zu ergänzen. Im Rahmen des Projektes soll ein Bindeglied auf dem Weg von der inspektions- und nachrechnungsbasierten Bestandsbewirtschaftung zum zustands- und prognosebasierten Asset Management geschaffen werden. Teil des Projekts ist eine umfassende Analyse des Datenbestandes des Verkehrs, die in Form von Schlüsselleistungsindikatoren, bzw. Key Performance Indicators (KPIs), Aufschluss über die netzweite Beanspruchung der Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen geben soll. Im Rahmen dieses Projekts sollen 8 – 10 Brücken umfassend mit Sensorik ausgestattet werden (Socher 2021).
- Realisierung der Systematik Intelligente Brücke

Vertragliche Grundlagen sollen für die technische Realisierung der Systematik Intelligente Brücke entwickelt und den Bauwerkseigentümern zur Verfügung gestellt werden, vgl. 3.2.

5.2 Weiterentwicklung zum digitalen Zwilling

Gewonnene Erkenntnisse aus Reallaboren können wichtige Grundlagen für eine nachfolgende schnellere Implementierung neuer und innovativer Ansätze in der Praxis liefern, wobei dieser Ansatz eine volle Variation aller in der Praxis vorkommenden Randbedingungen nur eingeschränkt ermöglicht. Dies ist erst mit einem Digital Twin möglich. Der Digital Twin ist eine Schlüsseltechnologie für zahlreiche Branchen und auch für die Brücke von enormer Bedeutung. Der Digital Twin stellt eine gezielte Weiterentwicklung des Konzepts der Intelligenten Brücke im Hinblick auf z.B. Big Data/Smart Data-Anwendungen, KI-Ansätze, Mixed-Reality-Anwendungen und virtuelle Experimentierräume dar und birgt ein großes Forschungspotenzial.

5.2.1 Definition

Der Digital Twin eines Ingenieurbauwerks ist ein digitales Abbild eines realen Bauwerks und spiegelt sämtliche Eigenschaften und sein Verhalten über dessen gesamten Lebenszyklus hinweg anhand verschiedener Modelle. Zu diesen Modellen gehören u.a. Geometrie-, FE- sowie Datenmodelle. Der Digital Twin aktualisiert sich kontinuierlich, um den aktuellen Zustand des realen Bauwerks sowie die daraus ableitbaren Prognosen in nahezu Echtzeit darzustellen. Zu diesem Zweck greift er auf große Datenmengen zurück, die u.a. am realen Bauwerk, dem Reallabor, gesammelt oder auch von bereits bestehenden Systemen über Schnittstellen bereitgestellt werden. Daneben nutzt er Informationen aus unkonventionellen Datenquellen wie z.B. vernetzten Fahrzeugen, Smartphones und sozialen Medien sowie Daten von bereits bestehenden Systemen, die ihm über Schnittstellen bereitgestellt werden. In Anbetracht der großen Datenmengen kommen ein Datenmanagementsystem, Big Data/Smart Data-Anwendungen sowie Verfahren der künstlichen Intelligenz zur Analyse und Bewertung der Daten zum Einsatz. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Digital Twin ist der virtuelle Experimentierraum. Dort kann das virtuelle Objekt sämtlichen Randbedingungen ausgesetzt, hinsichtlich des Designs und des fehlerfreien Betriebs analysiert sowie szenariobasierte Prognosen

durchgeführt werden. Die Realisierung eines Digital Twin ist insbesondere für Ingenieurbauwerke mit besonderer Relevanz für das Bundesfernstraßennetz und/oder repräsentative Bauwerke sowie Teilaspekten von diesen interessant (Dabringhaus et al. 2020a).

5.2.2 Ziel und Nutzen

Hauptziel des Digital Twins in der Betriebsphase ist die Unterstützung des Bauwerkseigentümers bei der Gewährleistung der Sicherheit, Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und Verfügbarkeit des Bauwerks. In nahezu Echtzeit liefert der Digital Twin Informationen hinsichtlich des Zustands, der Zuverlässigkeit und der Restnutzungsdauer des Bauwerks und seiner Bauteile und zeigt kritische Bauwerkszustände frühzeitig an. Darüber hinaus legt der Digital Twin einen starken Fokus auf Prognosen hinsichtlich des Lebenszyklus und leitet Handlungsbedarf ab, bevor konkrete Gefahren und Schäden entstehen. In virtuellen Experimentierräumen des Digital Twins können sämtliche Randbedingungen variiert und Analysen sowie insbesondere Prognosen für verschiedene Szenarien wie z.B. Unfälle und Extremereignisse durchgeführt werden. Schließlich können erprobte Maßnahmen mit Hilfe des Digital Twin früher, zuverlässiger und effizienter eingeleitet werden. Auch der Einsatz neuer Technologien wie KI-Anwendungen kann im Rahmen von virtuellen Experimentierräumen erprobt werden, ohne die Integrität des sicheren Betriebs zu verletzen. Durch die genannten Eigenschaften bietet der Digital Twin das Potenzial zu einer Entwicklung vom prädiktiven Lebenszyklusmanagement, welches basierend auf Zustandserkennung und -prognose zielgerichtete vorausschauende Maßnahmen ermöglicht, hin zum kognitiven Lebenszyklusmanagement. Das kognitive Lebenszyklusmanagement ist eine Erweiterung des prädiktiven Lebenszyklusmanagements. Es zeichnet sich durch einen proaktiven, lernenden sowie interaktiven Charakter aus und zielt auf ein im Hinblick auf ökologische, ökonomische und gesamtgesellschaftliche Aspekte optimiertes Management ab. Anhand selbstlernender Algorithmen kann ein kognitives Managementsystem in seiner höchsten Entwicklungsstufe, die für den Lebenszyklus relevanten Sachverhalte verstehen, analysieren, evaluieren, anwenden und weiterentwickeln. Auf dieser Grundlage kann das System interagierend mit Experten ein optimales Handeln erzielen (BITKOM 2015). Gewonnene Erkenntnisse können auf das Teil-/Gesamtnetz übertragen werden. Insgesamt lassen sich durch die aufgeführten Aspekte z.B.

Potenziale hinsichtlich reduzierter Erhaltungsmaßnahmen, verminderter Sperrzeiten und verlängerter Bauwerkszyklen erschließen (Dabringhaus et al. 2020a).

Literatur

- Bao, Yuequan; Chen, Zhicheng; Wei, Shiyin; Xu, Yang; Tang, Zhiyi; Li, Hui (2019): The State of the Art of Data Science and Engineering in Structural Health Monitoring. In: *Engineering* 5 (2), S. 234–242. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.027.
- BITKOM (2015): Kognitive Maschinen – Meilenstein in der Wissensarbeit. Leitfaden. Hg. v. BITKOM. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Kognitive-Maschinen-Meilenstein-in-der-Wissensarbeit.html>.
- BMVBS (2013a): Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten. Dokumentation 2013. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/dokumentation-bauwerkspruefung-nach-din-1076.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 10.06.2021.
- BMVBS (2013b): Richtlinien zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- BMVI (2015): Brückenmodernisierung im Bereich der Bundesfernstraßen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- BMW (2020): Reallabore – Innovation ermöglichen und Regulierung weiterentwickeln. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/1/info-reallabore.pdf?__blob=publicationFile&v=20.
- Borrmann, André; Fischer, Oliver; Dori, Gergö Wild, Matthias (2014): Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (Heft B 104).
- BSI (2013): Hochverfügbarkeit eine herausfordernde Aufgabenstellung für ein professionelles IT-Service Management. Band G, Teil 2 - Definitionen. Hg. v. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.
- Online verfügbar unter https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Empfehlungen-nach-Angriffszielen/Hochverfuegbarkeit/HVKompendium/BandG/HVKompendium_Band_G_node.html.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.) (2005): Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Ingenieurbauten, TL/TP ING, Teil 8 Abschnitt 1. Technische Lieferbedingungen und Prüfvorrichtungen für wasserdichte Fahbahnübergänge in Lamellenbauweise und Fingerübergänge mit Entwässerung von Straßen- und Wegbrücken. Bergisch Gladbach.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2020): Brückenstatistik. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/brueckenstatistik/bruecken_hidden_node.html.
- Butz, Christiane (2017): Intelligente Kalottenlager. Auswertung der Kalibrierfahrten und des regellosen Verkehrs. Abschlussbericht (unveröffentlicht). Maurer SE. München.
- Butz, Christiane (2021): Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager. Schlussbericht zu Projekt FE 15.0632/2016/LRB. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (B160).
- Dabringhaus, S.; Neumann, S.; Hindersmann, I. (2020a): Monitoring, Intelligente Brücke, Digital Twin. Positionspapier der Abteilung B Brücken- und Ingenieurbau der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).
- Dabringhaus, Sarah (2020): Intelligente Brücke: Datenaufbereitung und –analyse mittels modell- und datenbasierter Ansätze. 4. Brückenkolloquium. Hg. v. Technische Akademie Esslingen. Esslingen.
- Dabringhaus, Sarah; Bill, Roger; Büttner, Till (2019): Brückenbau: Vom Labor auf die Straße. Hg. v. der gemeinderat. Online verfügbar unter <https://www.treffpunkt-kommune.de/brueckenbau-vom-labor-auf-die-strasse/>, zuletzt geprüft am 08.06.2021.
- Dabringhaus, Sarah; Neumann, Sonja; Hindersmann, Iris (2020b): Monitoring, Intelligente Brücke, Digital Twin. Positionspapier der

- Abteilung B Brücken- und Ingenieurbau der Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht. Bergisch Gladbach.
- Dargie, Walteneagus; Poellabauer, Christian (2010): *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice (Wireless Communications and Mobile Computing)*: Wiley, zuletzt geprüft am 04.05.2017.
- Dilthey, Ulrich; Brandenburg, Annette (2002): *Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Gestaltung und Festigkeit von Schweißkonstruktionen. 2. überarbeitete Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- DIN 1319-1:1995-01: DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik- Teil 1: Grundbegriffe.
- Fakhouri, Abdalla (2013): *Sensorik für die Dauerüberwachung von Betonbrücken. Sachstandsbericht zu F1100.2113002*, unveröffentlicht. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- Fischer, Johannes; Straub, Daniel; Schneider, Ronald; Thöns, Sebastian; Rücker, Werner (2014): *Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen*. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen (Heft B 99).
- Fischer, Stefan; Boldt, Dennis (2015): *iBAST - instantaneous Bridge Assessment based on Sensor Network Technology*. Bericht zu FE 88.0122/2012 der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht). Lübeck.
- Fischer, Stefan; Lau, Florian; Boldt, Dennis (2017): *Installation und Inbetriebnahme Digitales Testfeld Autobahn. Abschlussbericht* (unveröffentlicht). Universität zu Lübeck, Institut für Telematik. Lübeck.
- Freundt, Ursula (2014): *Roadtraffic Management System (RTMS)*. Bericht zum Forschungsprojekt 88.0106/2010. Bremen: Fachverl. NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, 100). Online verfügbar unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2014/777/pdf/B100b_ELBA.pdf.
- Freundt, Ursula (2020): *Erzeugung künstlicher Messdaten einer geschädigten Brücke*. Bericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).
- Freundt, Ursula; Böning, Sebastian; Fischer, Stefan; Lau, Florian (2020a): *Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten*. FE-Nr. 15.0631/2016/LRB Entwurf zum Schlussbericht (noch nicht veröffentlicht).
- Freundt, Ursula; Böning, Sebastian; Stade, Ingmar; Leipold, Matthias (2017): *Installation und Inbetriebnahme der Intelligenten Brücke im Rahmen des Digitalen Testfeldes Autobahn. Abschlussbericht* (unveröffentlicht). Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt.
- Freundt, Ursula; Vogt, Ralf; Böning, Sebastian; Michael, Dirk; Könke, Carsten; Beinersdorf, Heiko (2014): *Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustandes von Brückenbauwerken*. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (Heft B 106).
- Freundt, Ursula; Werner, Eric; Butz, Christiane; Rill, Daniel; Fischer, Stefan; Lau, Florian (2020b): *Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm. 4. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen FE 15.0615/2015/ARB* (unveröffentlicht).
- Haardt, Peter; Dabringhaus, Sarah (2018): *Sensorik für Brückenbauwerke*. In: *Straße und Autobahn* (4), S. 290–293.
- Haardt, Peter; Dabringhaus, Sarah; Friebel, Wolf Dieter; Bayerstorfer, Robert; Bäumler, Tobias; Freundt, Ursula (2017): *Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn*. In: *Bautechnik* 94 (7), S. 438–444. DOI: 10.1002/bate.201700035.
- Kempkens, Eckhard (2021): *Qualitätssicherungskonzept Intelligente Brücke - Betriebssicherheit des ganzheitlichen lebenszyklusbasierten Bauwerksmonitorings*. Schlussbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen zu Projekt F1100.2115003 (unveröffentlicht). Bergisch Gladbach.
- Kleinert, Markus; Sawo, Felix (2020): *Intelligente Bauwerke- Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten*. Schlussbericht FE 15.0636/2016/GRB.
- Krueger, Markus; Große, Christian (2010): *Einsatz von Sensorik an Brückenbauwerken*.

- Schlussbericht FE 88_001_2009, zuletzt geprüft am 04.05.2017.
- Mangerig, Ingebert; Friedl, Roland; Butz, Christiane (2015): IFuLa – Intelligenete Schwenktraversen- Dehnfuge und intelligentes Kalottenlager. Schlussbericht zu FE 88.0110/2011 der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).
- Neumann, Tabea; Kempkens, Eckhard; Haardt, Peter (2015): Intelligente Brücke – Qualitätsmanagement und Koordination des Themenschwerpunkts. Schlussbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht. Bergisch Gladbach.
- Novák, B.; Ensle, A. (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf bestehende Spannbetonbrücken. Schlussbericht FE 89.0232/2009/Ap. Hg. v. Universität Stuttgart.
- Rill, Daniel (2017): Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis des instrumentierten Fahrbahnübergangs. Auswertung der Kalibrierfahrten vom 30.09.2016 und des regellosen Verkehrs. Abschlussbericht (unveröffentlicht). Maurer SE. München.
- Rill, Daniel (2020): Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen. FE 15.0644/2017/LRB (noch nicht veröffentlicht).
- Sauerer, Josef (2013): Smart Sensors. Vom Messwertaufnehmer zum intelligenten Sensor. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/3036704-Smart-sensors-vom-messwertaufnehmer-zum-intelligenten-sensor.html>, zuletzt geprüft am 11.06.2021.
- Sawo, Felix; Klumpp, Vera; Beutler, Frederik (2015a): Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (Heft B 114).
- Sawo, Felix; Klumpp, Vesa; Beutler, Frederik (2015b): Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Online verfügbar unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de>.
- Schadler, Michael; Hafner, Norbert; Landschützer, Christian (2019): Konzepte und Methoden für prädiktive Instandhaltung in der Intralogistik. In: *Logistics Journal : Proceedings* (12), S. 2192–9084. DOI: 10.2195/LJ_PROC_SCHADLER_DE_201912_01.
- Scharnigg (2021): Digitales Testfeld Autobahn. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/V5-digitales-Testfeld.html?nn=1497198, zuletzt aktualisiert am 10.06.2021.
- Schneider, Ronald; Fischer, Johannes; Straub, Daniel; Thöns, Sebastian; Bügler, Max; Borrmann, André (2015): Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (Heft B 117).
- Schnellenbach-Held, Martina; Peeters, Michael; Miedzinski, Gregor (2015): Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (Heft B 110).
- Schnellenbach-Heldt, Martina; Fakhouri, Abdalla; Karczewski, Björn (2013): Erstellung eines Glossars zum Themenschwerpunkt Intelligente Bauwerke. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen zu FE 89.0277/2012 unveröffentlicht.
- Seiffert, Annemarie; Jansen, Andreas (Hg.) (2019): A practical approach for modeling tendon and wire failures for model-based damage detection of prestressed concrete bridges. 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Potsdam.
- Smarsly, Kay; Dragos, Kosmas; Wiggerbrock, Jens (2016): Machine learning techniques for structural health monitoring. Hg. v. Bauhaus University Weimar, Chair of Computing in Civil Engineering. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/303933051_Machine_learning_techniques_for_structural_health_monitoring.
- Socher, Andreas (2021): Entwicklung der Verkehrseinwirkungen auf Bundesautobahnen. 1. Fachkongress Digitale Transformation im

Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur. Hg. v. Technische Akademie Esslingen.

Thöns, Sebastian; Schneider, Ronald; Borrmann, André; Bügler, Max; Straub, Daniel; Fischer, Johannes (2015): Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Online verfügbar unter <http://www.schuenemann-verlag.de/buchverlag/pdf/B117.pdf>.

UAG Traglastindex, AG Schwerverkehr (2020): Grundkonzeption für den Traglastindex. Hg. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

Bilder

Bild 5.1: Schema der Intelligenten Brücke

Bild 3.1: Funktionaler Aufbau von SMART-DECK, grün: Abdichtung ok, rot: Eindringen von Feuchtigkeit (Institut für Baustoffforschung, ibac, RWTH Aachen)

Bild 3.2: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung oben – Spur 1 (Freundt 2020)

Bild 3.3: Ablauf der algorithmisch unterstützten Sensordatenanalyse (Kleinert und Sawo 2020)

Bild 3.4: Eingebettete Merkmale eingefärbt nach Fahrspur (grün: Überfahrt links, blau: Überfahrt rechts, rot: nicht zugeordnet), (Kleinert und Sawo 2020)

Bild 3.5: Eingebettete Merkmale eingefärbt nach Gruppierung durch den DBSCAN Algorithmus (rot: Ausreißer), (Kleinert und Sawo 2020)

Bild 4.1: Projekte zum Digitalen Testfeld Autobahn (Scharnigg 2021)

Bild 4.2: Ziele und Nutzen des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“

Bild 4.3: Prinzipskizze zur Lage der Sensoren (Freundt et al. 2017)

Bild 4.4: Gateway des Sensornetzes neben dem Schaltschrank der Universität zu Lübeck (Fischer et al. 2017)

Bild 4.5: Sensoranordnung am Fahrbahnübergang (Rill 2017)

Bild 4.6: Anordnung der Drucksensoren (DS), Abstandssensoren (AS) und Wegsensoren (WA) am Lager A40/Süd (links), ein-gebauten Lager A40/Süd (rechts) (Butz 2017)

Bild 5.2: IT-Infrastruktur an der Brücke (Fischer et al. 2017)

Bild 4.8: Übersichtsseite der Webanwendung (Freundt et al. 2020a)

Bild 4.9: Mittleres tägliches Schwerverkehrsaufkommen, Montag bis Freitag (02/2017 - 08/2020) (Freundt et al. 2020a)

Bild 4.10: Kennwertverlauf „Auslastung statisch“ (02/2017 – 10/2020)

Bild 4.11: Kennwertverlauf „Auslastung Ermüdung“, (02/2017 – 10/2020)

Bild 4.12: Kennwertverlauf „Vorspannung“, (02/2017 – 10/2020)

Bild 4.13: Kennwertverlauf „Bauwerkssteifigkeit“, (02/2017 – 10/2020)

Bild 4.14: Neigungssensor an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn (Freundt et al. 2020a)

Bild 4.15: Horizontale Lagerverschiebung und akkumulierten Gleitweg (Butz 2021)

Bild 4.16: Quasi-statische Lagerverdrehung sowie Maxima und Minima (Butz 2021)

Bild 4.17: Quasi-stationäre Lagerverdrehung und relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte (Butz 2021)

Bild 4.18: Verkehrszusammensetzung im Zeitraum 04/2018 und 06/2020 (Rill 2020)

Bild 4.19: Tagesmaxima der Lagerlasten über die Zeit (zulässiger Maximalwert: 140 kN), (Rill 2020)

Bild 4.20: Verlauf der maximal gemessenen Einzelachslasten (zulässiger Maximalwert 210 kN), (Rill 2020)

Bild 4.21: Fugenspaltweiten im Vergleich zur Temperatur (Zulässige Werte zwischen 190 und 320 mm), (Rill 2020)

Bild 4.22: Schema zur Verwertung von Informationen aus Reallaboren

Tabellen

Tabelle 3.1: Relevante Schäden an Massivbrücken nach (Schnellenbach-Held et al. 2015)

Tabelle 3.2: Einwirkungen auf Brückenbauwerke nach (Schnellenbach-Held et al. 2015)

Tabelle 3.3: Monitoringparameter mit zugehörigem Messintervall und Messgenauigkeit nach (Schnellenbach-Held et al. 2015)

Tabelle 3.4: Einsatzbereiche verschiedener Analyseverfahren nach (Sawo et al. 2015a)

Tabelle 4.1: Knoten des Sensornetzes (Fischer et al. 2017)

Tabelle 4.2: Projekte im Rahmen des Reallabors „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlege unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen

Staeck

€ 15,00

B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.