Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

DOI 10.37544/0005-6650-2024-10-63

Neuartige Konzepte für die Zustandsüberwachung und -analyse von Brückenbauwerken – Einblicke in das Forschungsvorhaben SPP100+

H. Becks, L. Lippold, P. Winkler, M. Moeller, M. Rohrer, T. Leusmann, D. Anton, B. Sprenger, P. Kähler, I. Rudenko, D. Andrés Arcones, P. Koutsourelakis, J. F. Unger, M. Weiser, Y. Petryna, M. Schnellenbach-Held, D. Lowke, H. Wessels, A. Lenzen, V. Zabel, C. Könke, M. Claßen, J. Hegger

ZUSAMMENFASSUNG Die Brückeninfrastruktur in Deutschland und Europa steht aufgrund steigender Verkehrslasten und alternder Bauwerke vor erheblichen Herausforderungen. Das DFG-Schwerpunktprogramm 2388 „Hundert plus – Verlängerung der Lebensdauer komplexer Baustrukturen durch intelligente Digitalisierung“ (SPP100+) strebt an, durch digitale Innovationen und prädiktive Instandhaltungsstrategien die Nutzungsdauer bestehender Brückenbauwerke zu verlängern. Der vorliegende Beitrag fokussiert sich auf das SPP100+ zugehörige Cluster „Monitoring und Simulation“, das sieben Teilprojekte umfasst. Die Projekte entwickeln fortschrittliche Methoden zur Überwachung und Zustandsbewertung von Brücken mittels Digitaler Zwillinge, hochauflösender Sensortechnik und numerischer Simulationen. Innovative Ansätze wie nichtlineare Modellanpassungen, stochastische Methoden und künstliche Intelligenz ermöglichen eine präzise und frühzeitige Identifizierung potenzieller Schäden. Die Kombination aus kontinuierlichem Bauwerksmonitoring und effizienter Datenauswertung ist entscheidend für die langfristige Sicherheit und Langlebigkeit bestehender Brücken und trägt darüber hinaus zur Ressourcenschonung bei.

STICHWÖRTER

Bauwerkserhaltung, Brückenbau, Monitoring, Lebensdauer

Novel Concepts for the Condition Monitoring and Analysis of Bridge Structures – Insights into the SPP100+ Research Project

ABSTRACT Bridges in Germany and across Europe face significant challenges due to increasing traffic loads and aging structures. The DFG Priority Programme 2388 “Hundred Plus – Extending the Lifetime of Complex Engineering Structures through Intelligent Digitalization” (SPP100+) aims to extend the lifespan of existing bridge structures through digital innovations and predictive maintenance strategies. This paper focuses on the SPP100+ affiliated cluster “Monitoring and Simulation,” which encompasses seven sub-projects. These projects develop advanced methods for monitoring and assessing the condition of bridge structures using digital twins, high-resolution sensor technology, and numerical simulations. Innovative approaches such as nonlinear model adjustments, stochastic methods, and artificial intelligence facilitate precise and early identification of potential damages. The combination of continuous structural monitoring and efficient data evaluation is crucial for the long-term reliability and durability of existing bridges and contributes to resource conservation.

1 Einleitung

Die Infrastruktur Deutschlands sowie zahlreicher europäischer Länder ist angeschlagen. Insbesondere die Brückenbauwerke befinden sich teilweise in einem desolaten Zustand. Dies ist zum einen auf den kontinuierlich steigenden Güterverkehr zurückzuführen, der sich in den letzten 30 Jahren mehr als verdoppelt hat [1]. Zum anderen spielt die Altersstruktur eine entscheidende Rolle: Ein Großteil der über 130 000 deutschen Brücken wurde im Zeitraum von 1965 bis 1985 erbaut [2]. Das wachsende Güterverkehrsaufkommen und das fortschreitende Alter der Bauwerke erhöhen die Anforderungen an die Straßeninfrastruktur erheblich [3, 4]. Verschärfend wirken zudem Änderungen in den Normen zu Lastannahmen, strengere Sicherheitsanforderungen und robustere Ansätze für die Bauteilwiderstände, wodurch sich oft Defizite in der rechnerischen Tragfähigkeit älterer Brücken ergeben [4, 5]. Schätzungen zufolge müssen daher in den kommenden Jahren etwa 10 bis 15 % aller Brückenbauwerke ersetzt werden [6, 7].

Da der kurzfristige Neubau Tausender Brücken Deutschland vor immense Herausforderungen stellt, ist der Erhalt bestehender Bauwerke von entscheidender Bedeutung und ein essenzielles Mittel, dem zunehmenden Verfall nationaler Infrastruktur entgegenzuwirken und zusätzlich den Ressourcenverbrauch zu minimieren [8]. Neben der möglichst realistischen Berechnung vorhandener Tragreserven [9-12] sind insbesondere präventive Maßnahmen gegen fortschreitende Alterungsprozesse unerlässlich [13]. Ziel sollte hierbei eine prädiktive Instandhaltung sein, die durch die voranschreitende Digitalisierung ermöglicht wird. Sie erlaubt die Aggregation und Echtzeitauswertung aller für den Betrieb und die Instandhaltung erforderlichen Daten (z. B. Geometrie, Material, Beanspruchung, Bauwerksantwort und Degradation) sowie deren Implementierung in Zustands- und Prognosemodelle. Langfristig können somit potenzielle Schäden oder Ab-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

nutzungen frühzeitig erkannt und zeitgerecht Instandhaltungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Während solche digitalen Methoden in anderen Industriezweigen bereits seit längerem etabliert sind, fand im Straßenwesen in den vergangenen Jahrzehnten kaum nennenswerte Entwicklung statt [14]. Um diese zu ändern, wurde das Schwerpunktprogramm 2388 „Hundert plus – Verlängerung der Lebensdauer komplexer Baustrukturen durch intelligente Digitalisierung“ (SPP100+) ins Leben gerufen, das sich in drei interdisziplinären Forschungsbereichen und fünf Arbeitsgruppen (Clustern) der konzeptionellen Neuausrichtung der aktuellen Instandhaltungsstrategie für Infrastrukturbauwerke widmet. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit den Arbeiten des Clusters „Monitoring und Simulation“.

2 DFG-Schwerpunktprogramm Hundert Plus

Das SPP100+, initiiert im Frühjahr 2021 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), hat sich der Zielsetzung verschrieben, die Nutzungsdauer bestehender Brückenbauwerke zu verlängern. Kernstrategie ist hierbei die prädiktive Instandhaltung, die insbesondere durch den Einsatz digitaler Technologien – wie dem Digitalen Zwilling – ermöglicht werden soll. Insgesamt sind 19 Teilprojekte verschiedener deutscher akademischer Einrichtungen am SPP100+ beteiligt. Zur koordinierten Zusammenarbeit wurden die Teilprojekte in fünf Cluster eingeteilt, die sich jeweils spezifischen Aspekten der digitalen Bauwerksanalyse und -überwachung widmen. Im SPP100+ werden so unterschiedliche Methoden zur automatisierten Erstellung digitaler Modelle, zur Verknüpfung von Echtzeitdaten mit dem Digitalen Zwilling und zur Ableitung von Zustandsindikatoren aus kontinuierlichen Messdaten entwickelt. Durch die Nutzung von Big Data und künstlicher Intelligenz werden prädiktive Modelle für die Zustandsprognose erforscht, die eine frühzeitige Erkennung von Schäden ermöglichen sollen. Die Integration verschiedener Messdaten und die kontinuierliche Aktualisierung des Digitalen Zwillings bilden hierbei die Basis für das digitale Erhaltungsmanagement.

Das Cluster „Monitoring und Simulation“, dass im Rahmen des vorliegenden Beitrags vorgestellt wird, widmet sich der Entwicklung von Methoden zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung und -analyse von Bauwerken. In sieben Teilprojekten werden fortschrittliche Monitoring-, Simulations- und Hybridmethoden untersucht, die nicht nur Degradationsmechanismen erkennen, sondern auch eine Lebensdauerprognose zulassen.

Messverfahren und Analysemethoden, die im Rahmen des SPP100+ entstehen, werden zunächst an der Nibelungenbrücke in Worms getestet und validiert, um sie anschließend auf Ingenieurbauwerke im Allgemeinen zu übertragen [15]. Darüber hinaus sollen die Methoden zu Testzwecken an der Forschungsbrücke openLAB des Projekts „Infrastrukturdatenauswertung mithilfe künstlicher Intelligenz“ (IDA-KI) erprobt werden [16]. Das openLAB ist eine 45 m lange und 4,5 m breite Spannbetonbrücke, die auf dem Firmengelände der Hentschke Bau GmbH in Bautzen erbaut wurde. Die Forschungsbrücke besteht aus drei gleichlangen Feldern, die sich zur gezielten Untersuchung diverser Bauweisen hinsichtlich ihrer Bauart unterscheiden. Durch zahlreiche Belastungsversuche – die letztlich starke Schäden im Brückenbauwerk hervorrufen – und der gleichzeitigen Aufzeichnung aller Messgrößen über mehrere Monate hinweg, sollen schadensspezifische Signalcharakteristika und messtechnische Anomalien separiert werden, um in zukünftigen automatisierten Auswerteverfahren Messfehler zu bereinigen und Bauwerksschäden zielsicher zu erkennen. Die gesamte Brücke ist mit modernster Messtechnik ausgestattet und bietet darüber hinaus die Möglichkeit, neuentwickelte Messverfahren unter realistischen Bedingungen zu applizieren und zu testen.

3 Innovative Konzepte zum Bauwerksmonitoring

Die kontinuierliche Bauwerksüberwachung, auch Monitoring genannt, bietet die einzigartige Möglichkeit, Schäden unmittelbar beim Auftreten beziehungsweise teilweise vor der oberflächlichen Sichtbarkeit aufzuzeichnen. Im Zusammenspiel mit geeigneten numerischen Simulationen, gezielt trainierter künstlicher Intelligenz oder effizienten Prognosemodellen ist es möglich, den Ist-Zustand des Bauwerks abzuleiten und darüber hinaus eine Aussage über die Restlebensdauer zu treffen. Diese Strategie wird auch im Cluster „Monitoring und Simulation“ des SPP100+ verfolgt, wobei das Hauptaugenmerk auf einer Kombination aus Echtzeit-Messdaten und fortschrittlichen Prognosealgorithmen liegt. Im Folgenden werden die Ziele, Vorgehensweisen und ersten Erkenntnisse der einzelnen Teilprojekte vorgestellt.

3.1 2D-Fasersensorik zur Bewertung der Querkrafttragfähigkeit (RWTH Aachen)

Das Teilprojekt C01 „Messwertgestützte Zustandserfassung von Spannbetonbrücken mit geringem Querkraftbewehrungsgrad unter Betriebsbeanspruchung zur Lebensdauerprognose am Digitalen Zwilling“ (Projektnummer: 501771082) befasst sich mit der hochaufgelösten Identifizierung und Interpretation des Schädigungszustandes von Stahl- und Spannbetonbauteilen unter Ermüdungsbeanspruchung mithilfe oberflächlich applizierter, zweidimensionaler faseroptischer Sensortechnik (2D-FOS).

Übergeordnete Ziele des Vorhabens sind a) die kontinuierliche Überwachung des veränderlichen Dehnungszustands infolge der ermüdungsbedingten Mikro- und Makrorissbildung, b) die Interpretation der zeitvarianten Zustandsinformationen und ihre Verknüpfung mit dem digitalen Bauwerkszwilling sowie c) die messwertgestützte Prognose der Restlebensdauer anhand ausgewählter physikalischer Modelle (**Bild 1**). Zur kontinuierlichen zweidimensionalen Dehnungsmessung wurde das Messkonzept 2D-FOS entwickelt, das auf einem oberflächlich applizierten faseroptischen Sensornetzwerk beruht (**Bild 2**). Die grundsätzliche Eignung eines solchen Systems wurde in eigenen Vorarbeiten zur Dehnungsüberwachung von Betonoberflächen bestätigt [17-19]. 2D-FOS verspricht im Vergleich zu eindimensionalen FOS-Anwendungen eine umfassendere Erfassung der Dehnungsentwicklung und Rissentstehung.

Im Gegensatz zur digitalen Bildkorrelation – einem Messverfahren, das ebenfalls zweidimensionale Informationen über den Dehnungszustand bereitstellt – verursacht 2D-FOS einen geringeren Auswerteaufwand, erzielt eine höhere Messauflösung, erzeugt weniger Daten und ist geeigneter für den dauerhaften Einsatz an Brückenbauwerken.

Zur Verarbeitung der Rohmessdaten und Visualisierung der zweidimensionalen Dehnungsprofile wurde ein Python-Algo-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

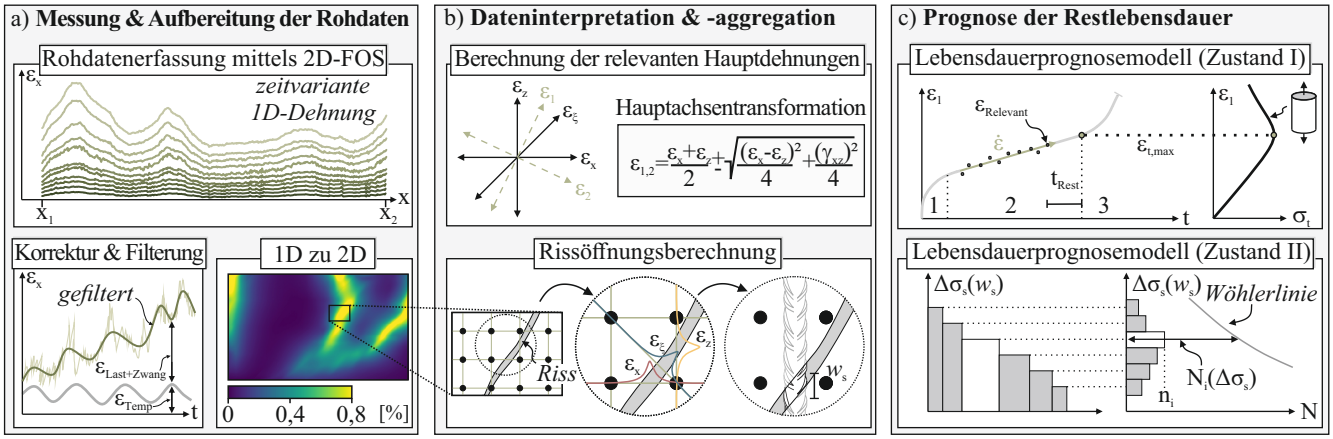

Bild 1. Schematische Übersicht der Einzelbausteine des Teilprojekts C01: a) Messung und Aufbereitung der Rohdaten, b) Dateninterpretation/-aggregation und c) Prognose der Restlebensdauer. *Grafik: RWTH Aachen*
Fig. 1. Schematic overview of sub-project C01: a) Measurement/processing of raw data, b) Data interpretation/aggregation, and c) Prediction of remaining service life. *Source: RWTH Aachen*

rithmus geschrieben, der die eindimensionalen Rohdaten voll automatisiert einliest, filtert, segmentiert, in richtungsabhängige Dehnungskomponenten zerlegt und zu Dehnungsprofilen verarbeitet (Bild 1a, unten). Aufgrund des erheblichen Einflusses der ständig variierenden Temperatur auf die Dehnungsmessung – insbesondere am realen Brückenbauwerk – müssen die zeitvarianten Rohdaten in diesem Arbeitsschritt zunächst temperaturbereinigt werden. Mithilfe von knotenpunktabhängigen Hauptachsentransformationen werden aus einzelnen Dehnungskomponenten die maximalen Zugdehnungen im Messfeld ermittelt (Bild 1b, oben). Da eigene Voruntersuchungen gezeigt haben, dass die Mikrorissbildung zuverlässig durch hochaufgelöste zweidimensionale Dehnungsmessung identifizierbar ist [20] und sich die Dehnungsentwicklung gut eignet, um die Degradation der Betonstruktur zu approximieren [21], werden die Zugdehnungen und deren zeitliche Entwicklung von einem Lebensdauerprognosemodell (Zustand I) als Eingangswert verwendet, um die Restnutzungsdauer bis zur Rissentstehung abzuschätzen (Bild 1c, oben).

Auch Bauwerke mit geringer Querkraftbewehrung weisen nach der Schubrissbildung noch erhebliche Tragreserven auf [22, 23]. Nach der Rissentstehung werden daher die aggregierten Messdaten zur Bestimmung und Verfolgung der Rissöffnung sowie des Rissfortschritts herangezogen (Bild 1b, unten). Die Identifizierung des Rissverlaufs basiert hierbei auf einer Maximalwertsuche [24, 25], während die Berechnung des Dehnungsintegrals (unter Berücksichtigung der inhärenten Faserübertragungslänge) die Rissöffnung liefert [26]. Aus der Rissöffnung wird die Stahlspannung in der Querkraftbewehrung approximiert und die Restnutzungsdauer des Bauteils durch ein weiteres Lebensdauerprognosemodell (Zustand II) abgeschätzt (Bild 1c, unten).

Um den großflächigen Einsatz des entwickelten Messkonzeptes praxisnah zu testen, soll 2D-FOS an der Forschungsbrücke openLAB [16] eingesetzt werden. Kritische Forschungsfragen zur Applizierbarkeit, Messgenauigkeit, Fehleranfälligkeit, Langlebigkeit und allgemeinen Kompatibilität sollen hierbei erörtert werden. Die Langzeitanwendung am Brückenbauwerk bietet darüber hinaus die Möglichkeit, bislang offene Fragestellungen zur Schädigungsentwicklung, Umgebungs- und Bauwerkstemperatur, Restlebensdauer sowie Versagensankündigung zu klären.

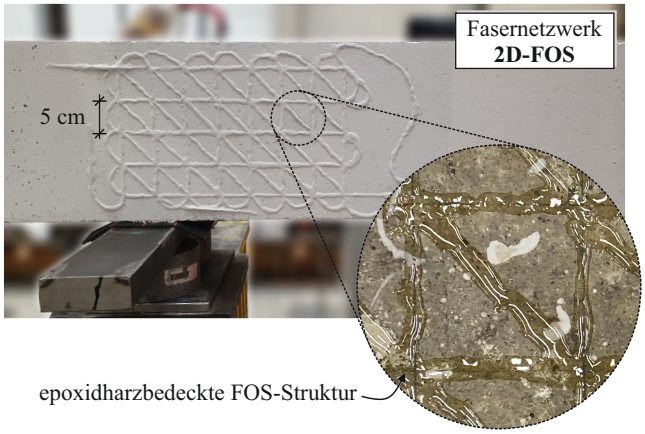

Bild 2. 2D-FOS appliziert an einem Stahlbetonbalken im Bereich des Auflagers. *Grafik: RWTH Aachen*
Fig. 2. 2D-FOS applied to a reinforced concrete beam in the area of the support. *Source: RWTH Aachen*

3.2 Verknüpfung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Schadensidentifikation (Bauhaus-Universität Weimar)

Im Teilprojekt C02 „DIVING – Digitale Verknüpfung von Multiskalenanalysen in Modellierung und Monitoring“ (Projektnummer: 501805504) werden multi-skalige Ansätze auf räumlicher Meso- und Mikroskala zur Bauwerksüberwachung erforscht (**Bild 3**). Durch eine hybride Modellierung werden kritische Bereiche, die auf Grundlage der Monitoringdaten auf der Makroskala identifiziert werden, detailreicher auf der Mesoskala abgebildet. Die dafür notwendigen Informationen zum aktuellen Bauwerkszustand werden mithilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren wie der Operational Modal Analysis (OMA) und der Acoustic Emission (AE) gewonnen.

Die OMA wertet Schwingungsdaten aus, die von Beschleunigungssensoren an ausgewählten Punkten am Bauwerk erfasst werden. Die Schwingungsantwort des Bauwerks auf ambiente oder gezielte Anregung wird analysiert, um modale Parameter wie Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfung mit Methoden wie Stochastic Subspace Identification time-domain covariance-driven (SSI-COV) oder data-driven (SSI-DATA) zu bestimmen

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

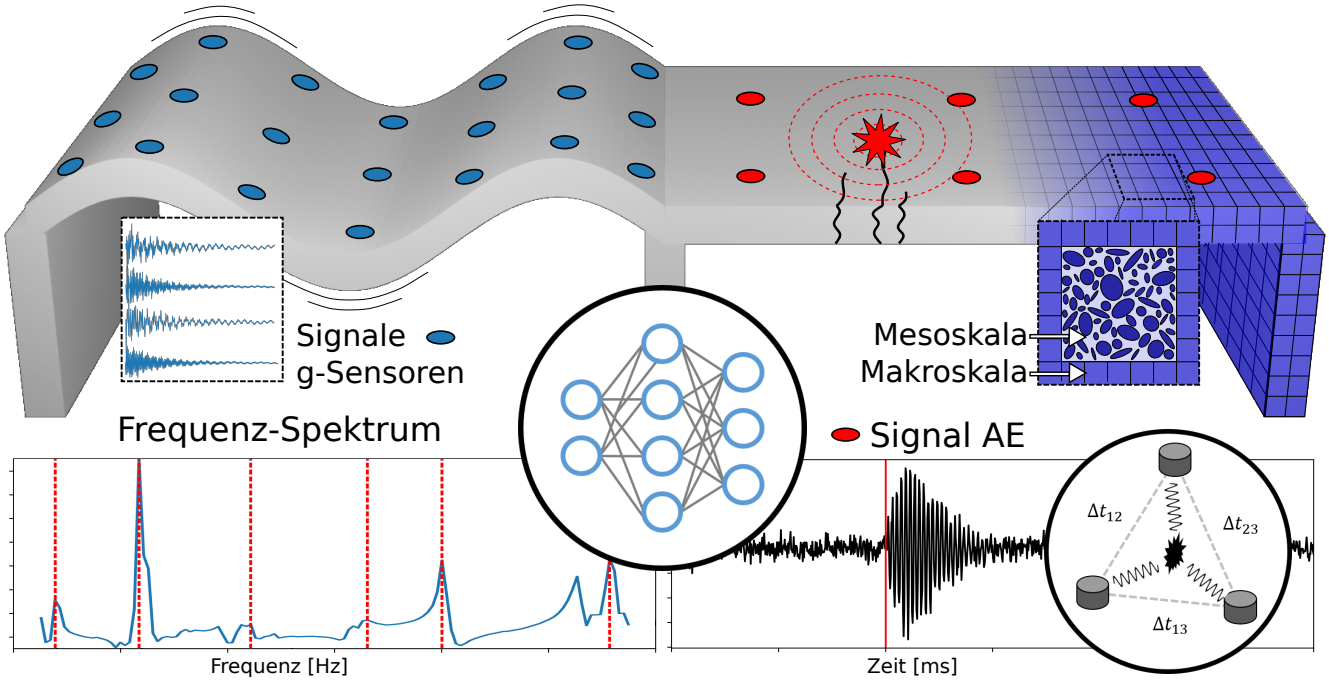

Bild 3. Verknüpfung von multiskaligen zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Schadensidentifizierung. *Grafik: Bauhaus-Universität Weimar*
Fig. 3. Integration of multiscale non-destructive testing methods for damage identification. *Source: Bauhaus-Universität Weimar*

[27]. Die damit allein aus den Messdaten identifizierten Eigenformen können durch das Modal Assurance Criterion (MAC) über verschiedene Schädigungszustände hinweg eindeutig einander zugeordnet werden [28]. Veränderungen der modalen Parameter im Vergleich zur Initialmessungen beziehungsweise dem numerischen Modell ermöglichen Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit und Verkehrssicherheit wie bereits in Bauteilversuchen gezeigt [29].

Neben theoretischen Methoden zur Auswertung der dynamischen Daten sollen ebenfalls neuronale Netze Informationen zu auftretenden Schäden aus den veränderten Eigenfrequenzen und –formen ableiten. Es existieren bereits Ansätze, die basierend auf FE Trainingsdaten das Auftreten eines Schadens mithilfe modaler Parameter ermöglichen [30]. Es wird untersucht, inwieweit sich vordefinierte Schadensarten mit datengetriebenen neuronalen Netzen zusätzlich auch lokalisieren oder sogar quantifizieren lassen.

Solche datengetriebenen Ansätze setzen rechenaufwendige numerische Berechnungen voraus. Alternativ können für das Training der neuronalen Netze bekannte Gleichungen der Statik herangezogen werden, um aus aktuellen Zustandsdaten unbekannte Systemeigenschaften bestimmen zu können. In [31] konnte mit solchen einem Physics Informed Neural Network (PINN) bereits für ein einfaches 2D Tragwerk ein lokaler Steifigkeitsabfall auf Basis von Verformungsmessdaten charakterisiert werden. Diese Methodik soll für eine Anwendung auf reale Bauwerke wie die Brücke openLAB erweitert werden.

Zusätzlich wird mit der AE der Körperschall erfasst, der bei der Öffnung von Rissen im Beton entsteht. Die Schallsignale werden durch mehrere Sensoren auf der Bauteiloberfläche in einem breiten Frequenzspektrum gemessen. Aus Signalintensitäten und Zeitunterschieden können dann Rückschlüsse auf den Grad und Ort der Schädigung gezogen werden [32]. Die damit ermittelten Schadensorte werden anschließend herangezogen, um die Ergebnisse der Datenauswertung mithilfe der neuronalen Netze bewerten zu können.

Diese Methoden werden an der Forschungsbrücke openLAB erprobt. Ziel des Teilprojekts ist es durch die Integration verschiedener innovativer Ansätze die strukturelle Integrität umfassend und genau zu bewerten und dadurch eine prädiktive Instandhaltung zu ermöglichen.

3.3 Output-Only Schadensidentifikation (HTWK Leipzig)

Das Teilprojekt C03 “ADMO – Automatische datengetriebene Modellbildung mit Methoden der Systemidentifikation“ (Projektnummer: 501664543) verfolgt das Ziel, eine automatisierte, datengetriebene Modellbildung gekoppelt mit maschinellem Lernen zu realisieren. Dabei finden Methoden der linearen Algebra, der H_2/H_∞-Norm [33], sowie etablierte, theoretisch bekannte Methoden der Systemidentifikation Anwendung [34]. Das Teilprojekt beschäftigt sich mit der Systemidentifikation auf Basis von stochastischen Ansätzen aus der numerischen Mathematik, insbesondere mit Output-Only Blackbox Methoden, da die Anregung (z. B. Verkehr, Wind, etc.) bei realen Großstrukturen (z. B. Brücken) in ihrer Intensität und Wechselwirkung oftmals unbekannt und nur unter großem Aufwand messbar ist [35]. Bei der Identifikation werden Methoden der Linearen Algebra, wie die Singulärwertzerlegung oder H_2/H_∞-Schätzmethoden, verwendet [36]. Die auftretenden Umwelt- und Betriebsbedingungen (engl. Environmental and Operational Condition, EOC) finden zusätzliche Berücksichtigung. Damit wird eine Zustandsanalyse als Digitaler Zwilling über die Lebensdauer des realen Bauwerks möglich. Diese findet daraufhin Eingang in ein kombiniertes Konzept aus Structural Health Monitoring und Building Information Modeling (SHM/BIM-Konzept), das weitere Zustandsindikatoren und ver-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

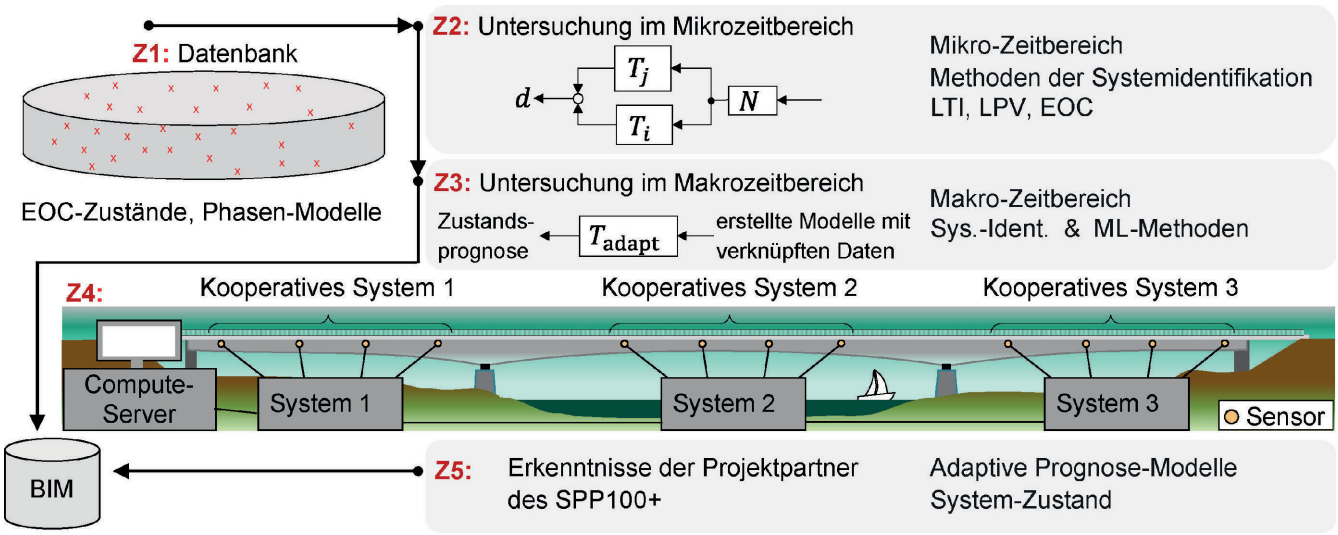

Bild 4. Konzept Teilprojekt C03 – ADMO. *Grafik: HTWK Leipzig*
Fig. 4. Concept of sub-project C03 – ADMO. *Source: HTWK Leipzig*

schiedene Informationen bündelt. Das Teilprojektkonzept unterscheidet dabei zwischen der aktuellen Schadensüberwachung im Mikrozeitbereich und der Zustandsbewertung über die gesamte Lebensdauer im Makrozeitbereich. Die einzelnen Teilprojektziele sind in **Bild 4** dargestellt.

Im Mikrozeitbereich wird die Automatisierung der Modellerstellung und -reduktion (Z1) und die darauf aufbauende, automatische Anpassung und Analyse der EOC mit Methoden des maschinellen Lernens zur Schadenslokalisation mit SP2E (Z2) realisiert [34]. Daran schließt sich der automatisierte Übergang vom Mikro- in den Makrozeitbereich und eine Schadensprädiktion über die gesamte Lebensdauer mittels eines adaptierbaren Filters an (Z3). Um eine Dimensionsreduktion im geometrischen Raum zu erreichen, werden kooperative Systeme und Sensornetzwerke untersucht (Z4) und final der zielführende Informationsaustausch im ganzheitlichen SHM/BIM-Konzept (Z5) abgestimmt.

Die Schadensidentifikation orientiert sich an den vier Stufen der Schadensidentifikation a) Detektion, b) Lokalisation, c) Quantifizierung des Schädigungsgrades und d) Einschätzung der Restlebensdauer und erfolgt unter globaler Bauwerksbetrachtung. Mit den Methoden des Teilprojekts ADMO können geschädigte Bereiche detektiert und lokalisiert werden. Daraufhin kann dann das Sensornetzwerk für eine Verbesserung der örtlichen Auflösung optimiert werden, oder, mit detaillierteren Methoden der Projektpartner, die Bereiche hinsichtlich der Schadensquantifizierung und Restlebensdauer genauer untersucht werden.

Die Validierung der Methoden erfolgt im Vorfeld an einem Versuchsfeld und einer realen Großstruktur unter Verkehr. Bei dem Versuchsfeld handelt es sich um ein speziell entworfenes Experimentierfeld, bestehend aus einem Labor- und ein Freifeldversuchsstand, das realen EOC-Einflüssen ausgesetzt ist [37]. Die Floßgrabenbrücke bei Zeitz, eine Bestandsbrücke unter Verkehr, wird zur weiteren Validierung verwendet. An dieser realen Großstruktur werden die Methoden weiterentwickelt, erprobt und optimiert [38].

Im Gegensatz zu der Floßgrabenbrücke bei Zeitz ist es bei der Forschungsbrücke openLAB [16] in Bautzen möglich, den Referenzzustand direkt nach Bauwerksfertigstellung zu erfassen. Durch den bekannten und realistisch induzierten Schadensverlauf, aber auch die realen Umgebungsbedingungen, können die Methoden und die oben genannten Projektziele optimal untersucht und verifiziert werden.

3.4 Monitoringdatengetriebenes Lebensdauermanagement (TU Braunschweig/TU München)

Im Teilprojekt C04 „Monitoringdatengetriebenes Lebensdauermanagement auf Basis einer adaptiven, KI-gestützen Korrosionsprognose“ (Projektnummer: 501798687) wird eine Methode zur adaptiven Lebensdauerprognose für Infrastrukturbauwerke aus Stahlbeton unter kombinierter Beanspruchung aus Chloridexposition und mechanischen Einwirkungen erforscht. Selektierte und interpretierte Sensordaten dienen dabei der regelmäßigen Adaption von Modellparametern. Sowohl für die Interpretation der lokalen und gegebenenfalls fehlerhaften Sensordaten als auch für die Adaption der Parameter des Prognose-Modells kommen Methoden des maschinellen Lernens zur Anwendung. Insbesondere mithilfe von neuronalen Netzen werden Zustandsdaten laufend aktualisiert und zu einer Adaption der Lebensdauerprognose genutzt [39–41]. **Bild 5** zeigt das Prinzip der adaptiven Lebensdauerprognose: Im Labor wird der Chlorid-Migrationskoeffizient in Abhängigkeit der Belastung ermittelt.

Untersuchungen von [42] zeigen, dass der Chlorid-Migrationskoeffizient bis zu einem Belastungsniveau von circa 30 %, abhängig von der Betonzusammensetzung, geringer als im unbelasteten Zustand ausfällt. Bei höheren Lastniveaus nimmt der Chlorid-Migrationskoeffizient in Folge der dann einsetzenden Mikrorissbildung zu. Für die Berücksichtigung des aktuellen lokalen Belastungsniveaus im Bauwerk werden die Dehnungen verwendet. Diese können am Bauwerk mit Hilfe von faseroptischen Sensoren kontinuierlich und lokal aufgelöst gemessen werden.

Mit den Messwerten wird der Dehnungszustand im Bauteil klassifiziert. Hier liegt der Fokus auf der Zugzone, in der sich der Chlorid-Diffusionswiderstand in Folge der Mikro- und Makrorissbildung maßgeblich vergrößert. Der Diffusionswiderstand

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

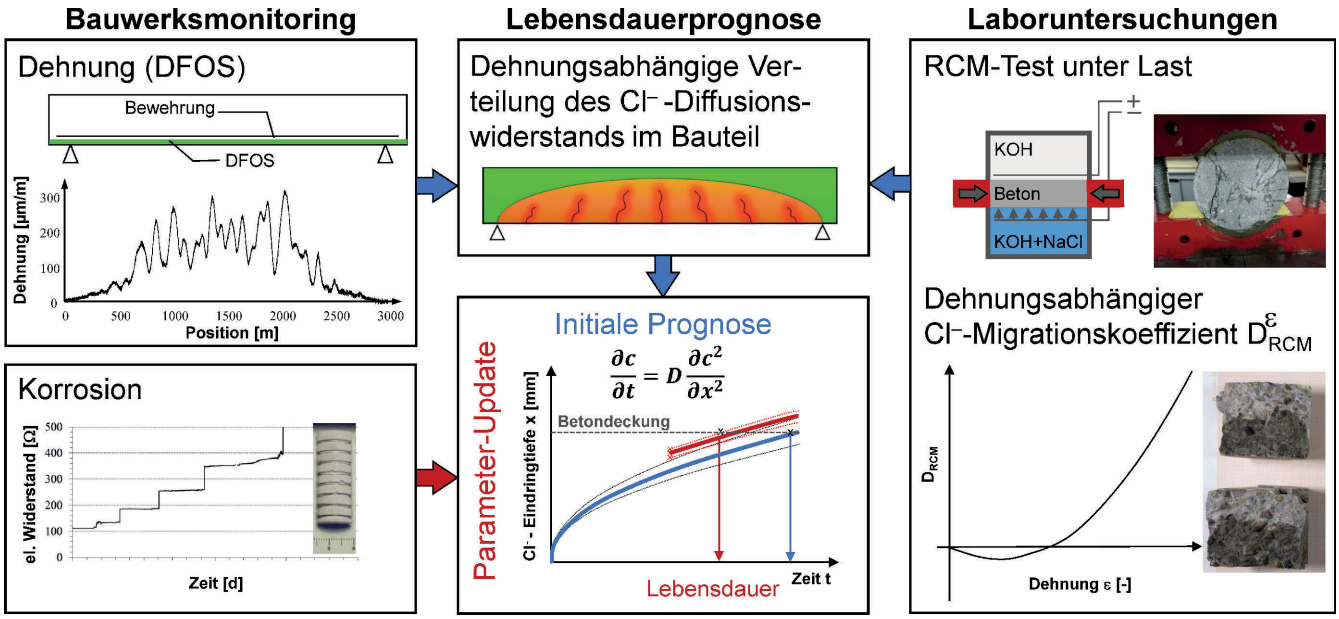

Bild 5. Prinzip der adaptiven Lebensdauerprognose. *Grafik: TU Braunschweig / TU München*
Fig. 5. Principle of adaptive service life prediction. *Source: TU Braunschweig / TU München*

wird dann auf Basis der im Labor bestimmten Chlorid-Migrationskoeffizienten lokal an den Dehnungszustand im Bauteil angepasst. Unter Zugrundelegung der initialen Dehnungsverteilung wird aus diesen Daten schließlich eine initiale, lokal differenzierte Lebensdauerprognose erstellt. Mit zunehmendem Bauwerksalter wird diese dann durch Daten aus dem Korrosionsmonitoring geschärft. Für das Korrosionsmonitoring werden Drahtsensoren eingesetzt. Die Drahtsensoren werden bei der Herstellung so in das Bauteil integriert, dass die 0,065 mm dicken Eisendrähte des Sensors in unterschiedlichen Tiefenlagen durchkorrodieren. Die Sensoren zeigen so die Eindringtiefe der Korrosionsfront zu einem bestimmten Zeitpunkt an. Die Eisendrähte sind mit unterschiedlichen Widerständen in Reihe geschaltet und auf einer Platine miteinander verbunden. Korrodiert nun ein Draht durch, steigt der kontinuierlich gemessene Sensorwiderstand sprunghaft um einen bestimmten Wert an. So kann exakt zugeordnet werden, welche und wie viele Drähte durchkorrodiert sind [43]. Die Sensorereignisse werden direkt nach Ihrem Auftreten zur Anpassung der Lebensdauerprognose genutzt. Jedes Ereignis markiert einen Zeitpunkt, zu dem ein Sensordraht durchkorrodiert ist. Die Chlorid-Konzentration hat zum Zeitpunkt des Sensorereignisses den Wert erreicht, der zur Depassivierung des Bewehrungsstahls führt. Ab dem Zeitpunkt können eine Einordnung und Neubewertung der gewählten Modellparameter und anschließend ein Update der Lebensdauerprognose erfolgen. Dabei kann sich der Chlorid-Diffusionswiderstand zum Beispiel durch Nacherhärtung reduzieren, er kann sich aber auch durch Gefügeschäden erhöhen. In beiden Fällen führt die angepasste Prognose zu einer Aktualisierung der Lebensdauer, beziehungsweise des Zeitpunktes, zu dem erwartet wird, dass die Chloridkonzentration an der Bewehrung den Wert erreicht, der zur Depassivierung des Bewehrungsstahls führt. Die adaptive Lebensdauerprognose ermöglicht es so, den aktuellen Bauwerkszustand zu berücksichtigen und lokal differenzierte Prognosen zu erstellen. Auf Basis dieser Prognosen können Instandsetzungsmaßnahmen rechtzeitig und gezielt geplant werden.

3.5 Nichtlineare Modelladaption zur Schadensdetektion (Universität Duisburg-Essen)

Das Teilprojekt C05 „Dauerüberwachung von Bauwerken mit modellbasierter Schadensdetektion unter Einsatz nichtlinearer Modellanpassungen und Methoden der Künstlichen Intelligenz“ (Projektnummer: 501496870) umfasst die Entwicklung eines geschlossenen Ansatzes zur automatisierten Zustandsüberwachung hoch beanspruchter Massivbauwerke. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Konzepts zur Strukturidentifikation durch Adaption numerischer Modelle an gemessene Tragwerksreaktionen des realen Bauwerks. Durch den Vergleich eines identifizierten Systems zu Systemen, die zu früheren Messungen festgestellt wurden, können neben Schädigungen und Abnutzungserscheinungen auch überbeanspruchte Bauteilbereiche detektiert werden. Zur realitätsnahen Repräsentation und möglichst genauen Modellierung von Schädigungen erfolgt die modellbasierte Schadensdiagnose des realen Tragwerks mithilfe physikalisch nichtlinearer Finite Elemente (FE) Berechnungen [44].

Das Monitoringkonzept umfasst eine Schadensdetektion auf Basis einer nichtlinearen Modelladaption (**Bild 6**). Der Adaptionsprozess erfolgt über Model-Updating Methoden [45]. Mit einer iterativen Modifikation der Parameter eines FE-Modells werden dessen Reaktionen möglichst genau auf in einer Datenbank gespeicherte Messwerte am realen Bauwerk angepasst. Um dieses inverse und hochdimensionale Optimierungsproblem zu lösen, umfasst das Konzept den Einsatz von genetischer Programmierung [46, 47]. Dieses stochastische Optimierungsverfahren verwendet gezielt Zufallsgrößen zur Lösung eines Optimierungsproblems und kann somit lokalen Extrema entkommen unter gleichzeitigem Einbezug des gesamten Lösungsraums. Dieser Optimierungsprozess wird bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums wiederholt. Die daraus resultierende Datenbasis von adaptierten Modellen wird anschließend mittels Clusteranalyse auf Parameterstreuungen und Ungenauigkeiten bewertet. Zur Analyse dieser Datenbasis werden mithilfe eines autoassoziativen künstlichen

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

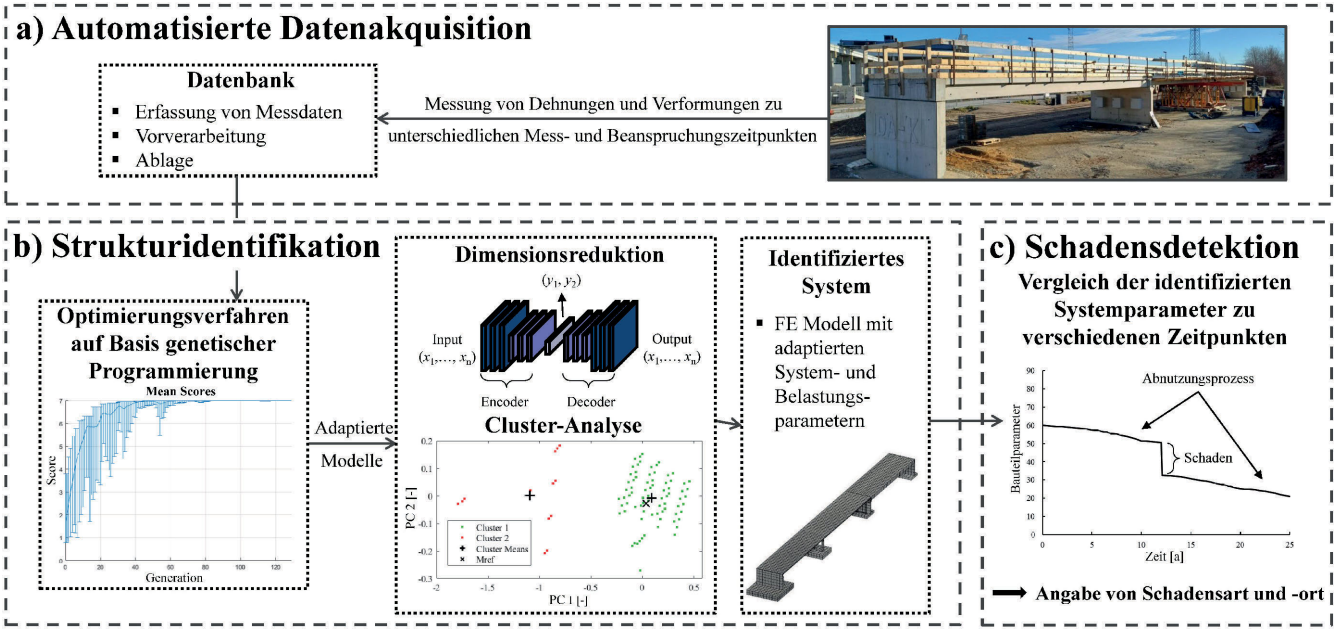

Bild 6. Konzept der modellbasierten Schadensdetektion: a) Automatisierte Datenakquisition, b) Strukturidentifikation auf Basis von genetischer Programmierung und künstlichen neuronalen Netzen und c) Schadensdetektion durch Vergleich der identifizierten Systemparameter zu verschiedenen Zeitpunkten.
Grafik: Universität Duisburg-Essen
Fig. 6. Concept of model-based damage detection: a) Automated data acquisition, b) Structural identification based on genetic programming and artificial neural networks, and c) Damage detection through comparison of identified system parameters at different timestamps.
Source: Universität Duisburg-Essen

neuronalen Netzwerkencoders [48] (KNN-Autoencoder) der hochdimensionale Parameterraum in eine niedrigdimensionale Darstellung überführt und visualisiert. Durch einen Abgleich mit zuvor durchgeführten Sensitivitätsanalysen [49], kann die Datenbasis bewertet und ein Modell zur Adaption der realen Struktur identifiziert werden. Die Schadensdiagnose erfolgt über den Vergleich der identifizierten Systemparameter zu verschiedenen Zeitpunkten und ermöglicht so die Feststellung von Systemänderungen und Alterungsprozessen. Unter der Berücksichtigung temperaturbedingter Reaktionen weisen allmähliche Änderungen über einen ausgedehnten Zeitraum auf Alterung beziehungsweise Abnutzung hin, plötzliche Änderungen stellen Indikatoren für auftretende Schädigungen dar. Die identifizierten Modellparameter, beziehungsweise festgestellten Schäden können anschließend in den Digitalen Zwilling implementiert werden.

Das Monitoringkonzept soll anhand der schädigenden Belastungsversuche an der Forschungsbrücke openLAB [16] getestet und validiert werden. Im Rahmen der Evaluierung sollen insbesondere die minimale Anzahl und zweckmäßige Anordnung der Messelemente festgestellt werden, die zur zuverlässigen Strukturidentifikation des Systems erforderlich sind. Die Verwendung einer minimalen Anzahl an Messelementen ist ein bedeutendes Kriterium zur Anwendung des entwickelten Konzepts im Rahmen eines praxisorientierten Bauwerksmonitorings unter realistischen Tragwerksreaktionen infolge Einwirkungen, zu denen insbesondere der Einfluss der Verkehrs- und Temperaturbeanspruchung auf das Tragverhalten zählt.

3.6 Neue Methoden für die Überwachung von Brückentragwerken (TU Berlin)

Das Teilprojekt C06 LEMOTRA „Lebensdauermonitoring von Tragwerken mittels Datenassimilation im Digitalen Zwilling mit Künstlicher Intelligenz“ (Projektnummer: 501728141) verfolgt schwerpunktmäßig die Entwicklung und Erstellung Digitaler Zwillinge für Brückentragwerke mit dem Ziel einer automatisierten Strukturüberwachung und Zustandsbewertung. Für die Abbildung des realen Tragverhaltens werden Simulationsmodelle in verschiedenen Detailstufen erstellt und validiert. Einige Modelle mit reduzierter Anzahl an Freiheitsgraden sind für die Online-Überwachung konzipiert, wohingegen komplexere Modelle für die Zustandsbewertung und Nachweisführung adaptiert werden. Die Online-Prognosen der Simulationsmodelle werden in Echtzeit mit den Messdaten abgeglichen und ausgewertet. Für die Evaluation des Zustandes und für die Modellanpassung werden Methoden der Datenassimilation verwendet, die in der Lage sind, ein prognostiziertes Modellverhalten mit realen Messdaten unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Messungenauigkeiten zu vereinen und entsprechende Modelladaptionen zur Folge haben. Das entwickelte Konzept eines Digitalen Zwillings für die Zustandsüberwachung von Brückentragwerken enthält somit drei wesentliche Komponenten: das Simulationsmodell (FE-Berechnung), das Sensornetzwerk mit kontinuierlichem Datenfluss und die Auswerteeinheit auf der Basis der Datenassimilation zwischen Modellprognosen und Messungen. Die Datenassimilation geschieht auf der Grundlage von [50] mittels ensemblebasierter Kalman Filter [51, 52]. Dieses Konzept wird zunächst anhand einer Ersatzbrücke im Labor getestet und demnächst am openLAB ansatzweise erprobt. Anschließend wird das Konzept für den Einsatz an realen Bauwerken wie der Nibelungenbrücke vorbereitet.

Um die Verfahren der Datenassimilation für die Echtzeitanalyse des Tragverhaltens nutzen zu können, ist die Kenntnis über die Belastung notwendig. Im Zuge dessen wurde ein Verfahren für die Echtzeit-Verkehrslastidentifikation mithilfe von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) anhand von Schwingungsmessdaten entwickelt. Dazu wurde eine Cluster-Struktur verschiedener Con-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

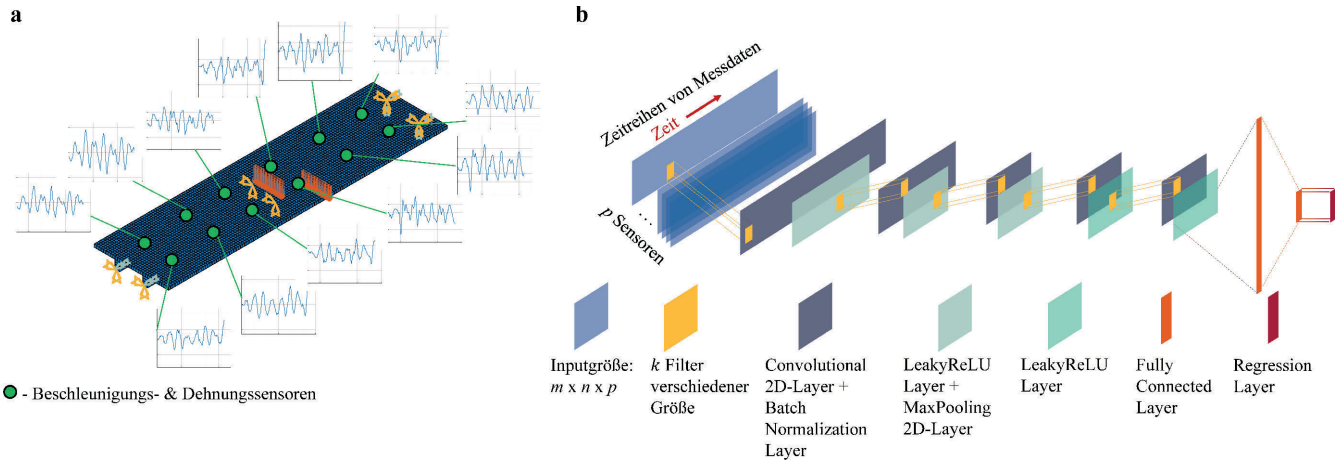

Bild 7. a) FE-Model einer Brücke mit numerischen Überfahrten und künstlichen Beschleunigungs- und Dehnungssensoren und b) Aufbau des Convolutional Neural Networks für die Lastidentifizierung. *Grafik: TU Berlin*
Fig. 7. a) FE model of a bridge with numerical traversals, artificial acceleration, and strain sensors as well as b) Setup of the Convolutional Neural Network for load identification. *Source: TU Berlin*

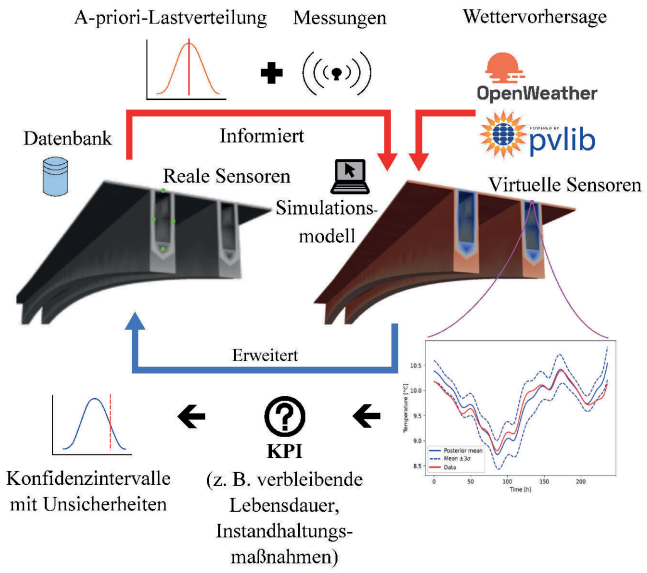

Bild 8. Stochastischer Digitaler Zwilling für die Prognose des Temperaturfeldes in der gesamten Struktur basierend auf punktuellen Messungen. *Grafik: BAM Berlin*
Fig. 8. Stochastic Digital Twin for predicting the temperature field across the entire structure based on point measurements. *Source: BAM Berlin*

volutional Neural Networks (CNN) für die Ermittlung von Lasteigenschaften, wie Lastgröße, -geschwindigkeit, -position oder -anzahl, von Lkw-Überfahrten über eine numerische Brücke entwickelt, um diese rekonstruieren und als Input für die Datenassimilationsverfahren verwenden zu können (**Bild 7**). CNNs sind eine besondere Art von KNNs, die in der Lage sind lokal begrenzte Informationen aus Zeitreihen-Datensätzen zu extrahieren. KNN finden heute vermehrt den Einzug in das SHM [53] und können somit um den Aspekt der Lastidentifikation erweitert werden.

Einen weiteren Schwerpunkt des Teilprojekts bildet die Integration von BIM in die Zustandsüberwachung und -bewertung von Tragwerken. Das Ziel dabei ist das BIM-Modell zur einzigen Quelle aller Informationen über das Bauwerk zu machen, von der Entwurfsphase bis zum Lebensdauermanagement. Für alle erforderlichen konstruktiven Nachweise sollen aus dem BIM-Modell die entsprechenden FE-Modelle verschiedener Komplexität und Dimensionalität automatisch extrahiert werden können. Die Ergebnisse der rechnerischen Nachweise oder der messtechnischen Überwachung sollen im Nachhinein im BIM-Modell gespiegelt und während der Nutzungsdauer stetig aktualisiert werden. Dabei werden offene und herstellerneutrale Datenformate, wie zum Beispiel Industry Foundation Classes (IFC), für den Datentransfer verwendet, was für eine bessere Interoperabilität sorgt.

Diese Methoden wurden im Detail auf den folgenden Tagungen präsentiert und veröffentlicht [54-58].

3.7 Entwicklung von stochastischen Digitalen Zwillingen unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit (BAM Berlin)

Das Teilprojekt C07 „Datenbasierte Verbesserung von Simulationsmodellen zur Identifikation von stochastischen Digitalen Zwillingen von Brücken“ (Projektnummer: 501811638) entwickelt Verfahren zum Design von Digitalen Zwillingen von Brücken auf der Basis von Simulationen. Die Hauptziele des Teilprojekts sind die Einbeziehung von Sensordaten in die Aktualisierung von Simulationsmodellen unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit (**Bild 8**), die Quantifizierung der Diskrepanz zwischen Daten und Modellprognose, die sich direkt aus Annahmen zur Reduzierung der Modellkomplexität ergibt, und die Nutzung solcher Diskrepanzen, um potenzielle Modellverbesserungen zu identifizieren (**Bild 9**). Simulationsbasierte Digitale Zwillinge kombinieren Daten, Simulationsmodelle und Vorkenntnisse der Nutzer, um prädiktive Analysen zur Vorhersage des Systemverhaltens für verschiedene Szenarien durchzuführen. Die Möglichkeit, virtuelle Sensoren an jeder Stelle des Modells zu integrieren oder akkumulierte Größen wie zum Beispiel die Restlebensdauer zu berechnen, macht einen Simulationszwilling zu einer wesentlichen Grundlage für die Instandhaltungsplanung. Dabei sollte während der gesamten Lebensdauer eine Synchronisation zwischen dem realen System und dem Simulationsmodell durch die Einbindung von Sensordaten erfolgen.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

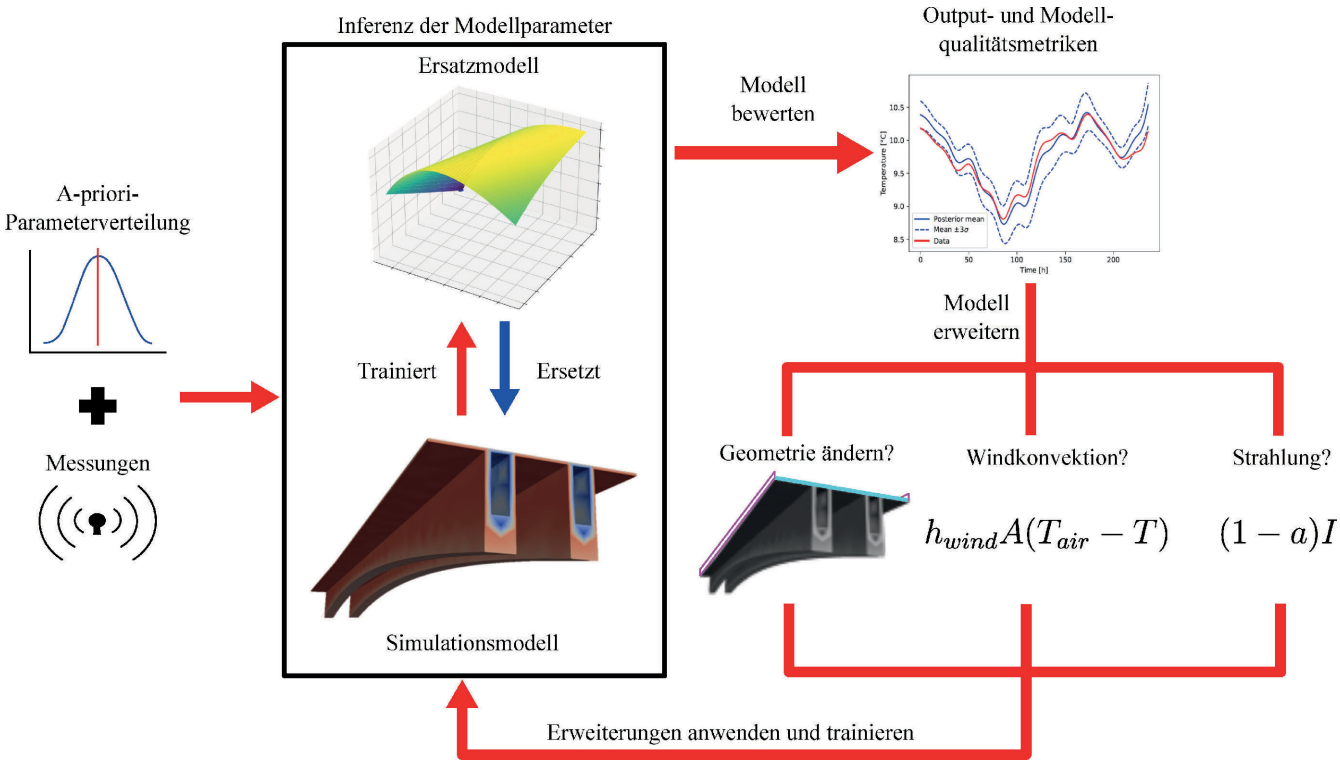

Bild 9. Semi-automatische Modellverbesserung mit Metriken zur Modellqualität unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. *Grafik: BAM Berlin*
Fig. 9. Semi-automatic model refinement with metrics for model quality, considering uncertainties. *Source: BAM Berlin*

Die Methode wurde exemplarisch für ein thermisches Modell der Nibelungenbrücke implementiert, als weiterer Demonstrator ist ein Digitaler Zwilling des openLAB geplant. Basierend auf einem instationären thermischen FE-Modell kann die Temperatur an jedem Punkt der Brücke für verschiedene Umweltbedingungen prognostiziert werden. Auf der Grundlage von Daten der Temperatursensoren werden die Parameter des thermischen Modells [59] bestimmt. Im Gegensatz zu deterministischen Verfahren werden die Parameter über Dichtefunktionen beschrieben. Das aktualisierte Simulationsmodell wird in das Datenbankmodell des Digitalen Zwillings integriert, sodass die Abfrage von Temperaturen an Stellen, die nicht direkt gemessen wurden, ermöglicht wird. Darüber hinaus erfolgt eine Einbindung der Wettervorhersage, sodass die prognostizierten Temperaturen im Bauwerk inklusive der Prognosegenauigkeit auch für Zeitpunkte in der Zukunft abfragbar sind – zum Beispiel für die Bestimmung von thermisch induzierten Verformungen.

Die Innovation liegt in der Bewertung von Modellierungsannahmen bezogen auf die Prognosequalität mit robusten Metriken zur Quantifizierung der Unsicherheit mithilfe von Bayes'schen Methoden [60]. Wenn Modellunsicherheiten nicht berücksichtigt werden, konvergiert die Posterior-Parameterverteilung zu einem deterministischen Parametersatz und damit zu unrealistischen Verteilungen für die Modellprognose. Eine Alternative ist die explizite Bestimmung des Modellierungsfehlers in der Aktualisierung der Modellparameter, entweder als additiver Term in der Modellantwort [61] oder eingebettet in die Unsicherheit der Modellparameter [62]. Dies ermöglicht eine Quantifizierung des Fehlers aufgrund von Modellierungsentscheidungen und liefert dem Anwender Hinweise für potenzielle Verbesserungen des Modells.

Die vorgeschlagenen Verfahren sind sehr rechenintensiv (z. B. 1e5 Auswertungen des FE-Modells) für verschiedene Parametersets. Für komplexe Modelle wird deshalb ein Metamodell mit adaptiven Gauß-Prozessen basierend auf den Ansätzen in [63] entwickelt, das mit dem Inferenzverfahren zur Parameterbestimmung gekoppelt ist. Dabei werden die Stützpunkte des Metamodells, die eine Berechnung des FE-Modells erfordern, auf den relevanten Parameterbereich (Posterior) fokussiert. Gleichzeitig können verschiedene Modellgenauigkeiten berücksichtigt werden, um den Rechenaufwand weiter zu minimieren.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Arbeit von sieben Teilprojekten des Forschungsvorhabens SPP100+, die sich mit dem Bauwerksmonitoring und der darauf aufbauenden Zustandsbewertung von Bestandsbrücken mithilfe modernster Messtechnik und hoch entwickelten Analysemethoden beschäftigen. Die bisherige Forschung verdeutlicht die Relevanz einer kontinuierlichen Bauwerksüberwachung für die Sicherheit und Lebensdauer von alternden Brücken. Der Einsatz von Digitalen Zwillingen, hochauflösender Sensortechnik und komplexen numerischen Simulationen ermöglicht prädiktive Analysen und eine effektive Instandhaltungsplanung. Verschiedene innovative Ansätze wie nichtlineare Modellanpassungen, hochsensible stochastische Methoden und Lastidentifikation durch künstliche Intelligenz erlauben hierbei die zielgerichtete und zeiteffiziente Auswertung.

Neben der möglichst realistischen Berechnung vorhandener Tragreserven ist in Zukunft die Applikation ausgewählter Monitoringsysteme an Bestandsbauwerken – und auch Neubauten – essenziell, um frühzeitig Schäden durch Überbelastung, Materialdegradation oder Fehlkalkulation zu erfassen. Damit aus den ge-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

messenen Daten präzise Aussagen über den Zustand und die Restnutzungsdauer des Bauwerks abgeleitet werden können, sind zudem ausgearbeitete Auswertemethoden notwendig. Das Forschungsvorhaben SPP100+ befasst sich in umfangreichen Arbeitsprogrammen intensiv mit diesen Themen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Initiierung des Schwerpunktprogramms SPP100+ und die Förderung der einzelnen Teilprojekte.

Literatur

[1] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Verkehr in Zahlen 2022/2023 – 51. Jahrgang. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022, https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022–2023-pdf.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am: 11.11.2023].

[2] Bundesanstalt für Straßenwesen: Brückenstatistik Ausgabe 2023.

[3] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin Ausgabe Mai 2013.

[4] *Naumann, J.:* Brücken und Schwerverkehr – Eine Bestandsaufnahme. *In:* Bauingenieur 85 (2010), Heft 1, S. 1–9.

[5] *Maurer, R.; Bäätjer, G.:* Sicherheit von Spannbetonbrücken – Entwicklung von Konstruktions- und Bemessungsgrundsätzen in Deutschland. *In:* Bauingenieur 82 (2007), Heft 1, S. 14–24.

[6] *Marzahn, G.:* Brücken an Bundesfernstraßen – Bilanz und Ausblick. *In: Krieger, J.; Isecke, B. (Hrsg.):* 5. Brückenkolloquium – Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken. Techn. Akademie Esslingen e. V. Weiterbildungszentrum, Tagungshandbuch / TAE, Technische Akademie Esslingen Heft 5. Technische Akademie Esslingen, 2022, S. 17–35.

[7] *Arndt, W.-H.; Schneider, S.:* Investitionsbedarfe für ein nachhaltiges Verkehrssystem, Berlin, Germany, 7 Ausgabe 2023.

[8] *Glock, C.; Heckmann, M.; Hondl, T. et al.:* Massivbau in Zeiten von Klimawandel und Ressourcenverknappung – Herausforderungen und Lösungsansätze. *In:* Bauingenieur 97 (2022), Heft 1/2, S. 1-12. doi.org/10.37544/0005-6650-2022-01-02-33.

[9] *Hegger, J.; Fischer, O.; Maurer, R. et al.:* Nachrechnungen von Spannbetonbrücken mit Verfahren der Nachrechnungsstufe 4. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 1/2, S. 12-21. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-01-02-34.

[10] *Hegger, J.; Fischer, O.; Maurer, R. et al.:* Querkraft und Torsion – zukünftige Ansätze und Potenziale in Stufe 2 der Nachrechnungsrichtlinie. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 1/2, S. 1-11. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-01-02-23.

[11] *Herbrand, M.; Kueres, D.; Claßen, M. et al.:* Einheitliches Querkraftmodell zur Bemessung von Stahl- und Spannbetonbrücken im Bestand. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 2, S. 58-67. doi.org/10.1002/best.201500055.

[12] *Dommes, C.; Hegger, J.:* Ermittlung von Traglastreserven in 16,5 m Spannbetonträgern unter Querkraftbeanspruchung. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 1/2, S. 22-34. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-01-02-44.

[13] *Steinbock, O.; Garibaldi, M.P.; Curbach, M.:* Der Umgang mit dem Brückenbestand – ein Vergleich zwischen Deutschland und den USA. *In:* Bauingenieur 91 (2016), Heft 6, S. 215-226. doi.org/10.37544/0005-6650-2016-06-33.

[14] *Kaliske, M.; Oeser, M.; Wollny, I. et al.:* Welchen Weg nimmt die „Straße der Zukunft"? – Digitalisierung der Straße im Sonderforschungsbereich/Transregio 339 „Digitaler Zwilling Straße". *In:* Bauingenieur 97 (2022), Heft 1/2, S. 29-37. doi.org/10.37544/0005-6650-2022-01-02-61.

[15] *Kang, C.; Voigt, C.; Eisermann, C. et al.:* Die Nibelungenbrücke als Pilotprojekt der digital unterstützten Bauwerkserhaltung. *In:* Bautechnik 101 (2024), Heft 2, S. 76-86. doi.org/10.1002/bate.202300089.

[16] *Herbers, M.; Bartels, J.-H.; Richter, B. et al.:* openLAB – Eine Forschungsbrücke zur Entwicklung eines digitalen Brückenzwillings. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 119 (2024), Heft 3, S. 169-180. doi.org/10.1002/best.202300094.

[17] *Becks, H.; Baktheer, A.; Marx, S. et al.:* Monitoring concept for the propagation of compressive fatigue in externally prestressed concrete beams using digital image correlation and fiber optic sensors. *In:* Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 46 (2023), Iss. 2, pp. 514-526. doi.org/10.1111/ffe.13881.

[18] *Becks, H.; Brockmann, D.; Hegger, J. et al.:* Monitoring the Fatigue-Induced Strain Evolution of Concrete Bridges using Fiber Optic Sensors. *In:* ce/papers (EuroStruct 2023), Vol. 6 (2023), Iss. 5, pp. 1119-1126. doi.org/10.1002/cepa.2033.

[19] *Becks, H.; Hegger, J.; Classen, M.:* Measuring Strain and Crack Evolution in Reinforced Concrete under Monotonic and Fatigue Tension using Fiber Optic Sensors. *In: Motavalli, M. (ed.):* Proceedings of the 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR2024), Salerno, Italy, 2024, (im Druck).

[20] *Hegger, J.; Sherif, A.; Görtz, S.:* Investigation of Pre- and Postcracking Shear Behavior of Prestressed Concrete Beams Using Innovative Measuring Techniques. *In:* ACI Structural Journal, Vol. 101 (2004), Iss. 2, pp. 183-192.

[21] *Becks, H.; Classen, M.:* New insights into the load sequence effect: Experimental characterization and incremental modeling of plain high-strength concrete under mode II fatigue loading with variable amplitude. *In:* International Journal of Fatigue, Vol. 185 (2024), 108334. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108334.

[22] *Hillebrand, M.; Teworte, F.; Hegger, J.:* Shear fatigue of prestressed I-beams with shear reinforcement. *In:* Structural Concrete, Vol. 22 (2021), Iss. 2, pp. 1085–1099. doi.org/10.1002/suco.202000187.

[23] *Teworte, F.:* Zum Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern unter Ermüdungsbeanspruchung. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2014.

[24] *Becks, H.; Bielak, J.; Camps, B. et al.:* Application of fiber optic measurement in textile-reinforced concrete testing. *In:* Structural Concrete, Vol. 23 (2022), Iss. 4, pp. 2600-2614. doi.org/10.1002/suco.202100252.

[25] *Richter, B.; Herbers, M.; Marx, S.:* Crack monitoring on concrete structures with distributed fiber optic sensors—Toward automated data evaluation and assessment. *In:* Structural Concrete, Vol. 25 (2023), Iss. 2, pp. 1465-1480. doi.org/10.1002/suco.202300100.

[26] *Janiak, T.; Becks, H.; Camps, B. et al.:* Evaluation of distributed fibre optic sensors in structural concrete. *In:* Materials and Structures, Vol. 56 (2023), Iss. 159. doi.org/10.1617/s11527-023-02222-9.

[27] *Peeters, B.; Roeck, G. de:* Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. *In:* Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 123 (2001), Iss. 4, pp. 659-667. doi.org/10.1115/1.1410370.

[28] *Allemang, R. J. , Brown, D. L.:* A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis. *In: Juhl, P.B. (ed.):* Proceedings of the First International Modal Analysis Conference. Union College, Orlando, Florida, USA, 1982, pp. 110-116.

[29] *Winkler, P.; Lippold, L.; Zabel, V. et al.:* Verknüpfung globaler und lokaler Verfahren zur Schädigungsidentifikation am Beispiel einer schrittweisen geschädigten Stahlbetonstruktur. *In: Oesterle, B.; Bögle, A.; Weber, W. et al. (Hrsg.):* Berichte der Fachtagung Baustatik – Baupraxis 15. Institut für Baustatik, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2024, S. 525–532.

[30] *Ozdagli, A.I.; Koutsoukos, X.:* Machine learning based novelty detection using modal analysis. *In:* Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 34 (2019), Iss. 12, pp. 1119–1140. doi.org/10.1111/mice.12511.

[31] *Lippold, L.; Rödiger, N.; Most, T. et al.:* Identifikation inhomogener Materialeigenschaften von Flächentragwerken mit Physics Informed Neural Networks. *In: Oesterle, B.; Bögle, A.; Weber, W. et al. (Hrsg.):* Berichte der Fachtagung Baustatik – Baupraxis 15. Institut für Baustatik, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2024, S. 499-507.

[32] *Li, D.; Nie, J.-H.; Wang, H. et al.:* Damage location, quantification and characterization of steel-concrete composite beams using acoustic emission. *In:* Engineering Structures, Vol. 283 (2023), p. 115866. doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115866.

[33] *Lenzen, A.; Vollmering, M.:* On experimental damage localization by SP2E: Application of H∞ estimation and oblique projections. *In:* Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 104 (2018), pp. 648-662. doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.028.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

[34] *Lenzen, A.; Rohrer, M.; Vollmering, M.:* Damage localization of mechanical structures considering environmental and operational conditions based on output-only system identification and H∞-estimation. *In:* Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 156 (2021), p. 107572. doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107572.
[35] *Mellinger, P.; Döhler, M.; Mevel, L.:* Variance estimation of modal parameters from output-only and input/output subspace-based system identification. *In:* Journal of Sound and Vibration, Vol. 379 (2016), pp. 1-27. doi.org/10.1016/j.jsv.2016.05.037.
[36] *Datta, B.N.:* Numerical Methods for Linear Control Systems. Elsevier, Amsterdam, 2004.
[37] *Rohrer, M.; Moeller, M.; Lenzen, A.:* A Testing Field for Studies of Environmental and Operational Effects in Structural Damage Localization of Mechanical Structures (2024). doi.org/10.1155/2024/3970794.
[38] *Lenzen, A.; Moeller, M.; Rohrer, M.:* Monitoring an der Floßgrabenbrücke in Zeitz-Experimente zur Systemidentifikation. *In: Oesterle, B.; Bögle, A.; Weber, W. et al. (Hrsg.):* Berichte der Fachtagung Baustatik – Baupraxis 15. Institut für Baustatik, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2024, S. 491-498.
[39] *Römer, U.; Hartmann, S.; Tröger, J.-A. et al.:* Reduced and All-at-Once Approaches for Model Calibration and Discovery in Computational Solid Mechanics April 2024. http://arxiv.org/pdf/2404.16980v1.
[40] *Anton, D.; Wessels, H.:* Physics-Informed Neural Networks for Material Model Calibration from Full-Field Displacement Data Dezember 2022. http://arxiv.org/pdf/2212.07723v2.
[41] *Anton, D.; Tröger, J.-A.; Wessels, H. et al.:* Deterministic and statistical calibration of constitutive models from full-field data with parametric physics-informed neural networks Mai 2024. http://arxiv.org/pdf/2405.18311v1.
[42] *Ullmann, S.:* Abhängigkeit des Chlorideindringwiderstands von der Spannungsverteilung in instandgesetzten Betonbauteilen. Universitätsbibliothek Braunschweig, Dissertation, 2024.
[43] *Holst, A.; Budelmann, H.; Wichmann, H.-J.:* Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken als Element des Lebensdauermanagements. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 12, S. 536-549. doi.org/10.1002/best.201000066.
[44] *Sprenger, B.; Schnellenbach-Held, M.:* Schadensmodellierung mittels nichtlinearer FE-Simulationen zur Bauwerksüberwachung im Rahmen eines Digitalen Zwillings. *In: Oesterle, B.; Bögle, A.; Weber, W. et al. (Hrsg.):* Berichte der Fachtagung Baustatik – Baupraxis 15. Institut für Baustatik, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2024, S. 517-524.
[45] *Ereiz, S.; Duvnjak, I.; Fernando Jiménez-Alonso, J.:* Review of finite element model updating methods for structural applications. *In:* Structures, Vol. 41 (2022), pp. 684-723. doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.041.
[46] *Slowik, A.; Kwasnicka, H.:* Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems. *In:* Neural Computing and Applications, Vol. 32 (2020), Iss. 16, pp. 12363-12379. doi.org/10.1007/s00521-020-04832-8.
[47] *Schnellenbach-Held, M.; Pullmann, T.:* Genetische Optimierung von Tragstrukturen – Ein neuartiger Ansatz zur flexiblen und bedarfsgerechten Anwendung stochastischer Optimierungsverfahren in der Bauplanung. *In:* Bauingenieur 86 (2011), Heft 9, S. 390-399.
[48] *Huang, X.; Hu, Z.; Lin, L.:* Deep clustering based on embedded auto-encoder. *In:* Soft Computing, Vol. 27 (2023), Iss. 2, pp. 1075-1090. doi.org/10.1007/s00500-021-05934-8.
[49] *Sprenger, B.; Schnellenbach-Held, M.:* Sensitivity Analysis of Model Parameters in a Nonlinear Model-Updating Approach for Prestressed Concrete Bridges. *In:* 11th European Workshop on Structural Health Monitoring, Potsdam (2024), (im Druck).
[50] *Schillings, C.; Stuart, A.M.:* Analysis of the Ensemble Kalman Filter for Inverse Problems. *In:* SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 55 (2017), Iss. 3, pp. 1264-1290. doi.org/10.1137/16M105959X.
[51] *Evensen, G.:* Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *In:* Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 99 (1994), C5, pp. 10143-10162. doi.org/10.1029/94JC00572.
[52] *Whitaker, J.S.; Hamill, T.M.:* Ensemble Data Assimilation without Perturbed Observations. *In:* Monthly Weather Review, Vol. 130 (2002), Iss. 7, pp. 1913-1924. doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1913:EDAWPO>2.0.CO;2.
[53] *Avci, O.; Abdeljaber, O.; Kiranyaz, S. et al.:* A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *In:* Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 147 (2021), p. 107077. doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077.
[54] *Kähler, P.; Petryna, Y.:* SHM approach with indirect load measurements and Kalman update of state and model parameters. *In:* EURODYN 2023 – XII International Conference on Structural Dynamics, Delft, the Netherlands (2023). doi.org/10.1088/1742-6596/2647/25/252022.
[55] *Kähler, P.; Petryna, Y.:* Application of artificial neural networks for indirect load measurements on bridges from vibration measurements. *In:* 11th European Workshop on Structural Health Monitoring, Potsdam, Germany (2024). https://doi.org/10.58286/29594.
[56] *Kähler, P.; Petryna, Y.:* Vibration monitoring of structures with indirect load identification and Kalman update. *In: Motavalli, M. (ed.):* Proceedings of the 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR2024), Salerno, Italy, 2024, (im Druck).
[57] *Rudenko, I.; Petryna, Y.:* Interaction between BIM and FE models in structural health monitoring. *In: Motavalli, M. (ed.):* Proceedings of the 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR2024), Salerno, Italy, 2024, (im Druck).
[58] *Rudenko, I.:* Kompatibilität von BIM- und FE-Modellen für die Tragwerksanalysen. *In: Oesterle, B.; Bögle, A.; Weber, W. et al. (Hrsg.):* Berichte der Fachtagung Baustatik – Baupraxis 15. Institut für Baustatik, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2024, S. 75-82.
[59] *Xiao, S.; Neti, S.; Suleiman, M.T. et al.:* A Modeling Approach of Heat Transfer of Bridges Considering Vehicle-Induced Thermal Effects. *In:* Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 57 (2018), Iss. 12, pp. 2851-2869.doi.org/10.1175/jamc-d-17-0315.1.
[60] *Andrés Arcones, D.; Weiser, M.; Koutsourelakis, F.-S. et al.:* A Bayesian Framework for Simulation-based Digital Twins of Bridges. *In:* ce/papers (EuroStruct 2023), Vol. 6 (2023), Iss. 5, pp. 734-740. doi.org/10.1002/cepa.2177.
[61] *Andrés Arcones, D.; Weiser, M.; Koutsourelakis, P.-S. et al.:* Model bias identification for Bayesian calibration of stochastic digital twins of bridges. Ausgabe 2023.
[62] *Sargsyan, K.; Huan, X.; Najm, H.N.:* Embedded model error representation for Bayesian model calibration. *In:* International Journal for Uncertainty Quantification, Vol. 9 (2019), Iss. 4, pp. 365-394. doi.org/10.1615/Int.J.UncertaintyQuantification.2019027384.
[63] *Semler, P.; Weiser, M.:* Adaptive Gaussian process regression for efficient building of surrogate models in inverse problems. *In:* Inverse Problems, Vol. 39 (2023), Iss. 12. doi.org/10.1088/1361-6420/ad0028.

Henrik Becks, M.Sc.

hbecks@imb.rwth-aachen.de
RWTH Aachen University, Institut für Massivbau
Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen

Lukas Lippold, M.Sc.

lukas.lippold@mfpa.de
Bauhaus-Universität Weimar, Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA)
Coudraystraße 4, 99423 Weimar

Dipl.-Ing. Paul Winkler

paul.winkler@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Strukturmechanik
Marienstr. 15, 99423 Weimar

Max Moeller, M.Sc.

max.moeller@htwk-leipzig.de

Maximilian Rohrer, M.Sc.

maximilian.rohrer@htwk-leipzig.de

HTWK-Leipzig, Institut I4S
Karl-Liebknechtstr. 132, 04277 Leipzig

Dr.-Ing. Thorsten Leusmann

t.leusmann@ibmb.tu-bs.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig

David Anton, M.Sc.

d.anton@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Institut für rechnergestützte Modellierung im
Bauingenieurwesen (iRMB)
Pockelsstr. 3, 38106 Braunschweig

Bjarne Sprenger, M.Sc.

bjarne.sprenger@uni-due.de
Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau
Universitätsstraße 15, 45141 Essen

Philipp Kähler, M.Sc.

philipp.kaehler@tu-berlin.de

Iryna Rudenko, M.Sc.

i.rudenko@tu-berlin.de

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Statik und Dynamik
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Daniel Andrés Arcones, M.Sc.

daniel.andres-arcones@bam.de
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 7.7
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Prof. Phaedon-Stelios Koutsourelakis, Ph.D.

p.s.koutsourelakis@tum.de
Technische Universität München
Professur für Data-driven Materials Modeling
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching b. München

Dr. Jörg F. Unger

joerg.unger@bam.de
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 7.7
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Dr. Martin Weiser

weiser@zib.de
Zuse-Institut Berlin
Takustr. 7, 14195 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

yuriy.petryna@tu-berlin.de
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Statik und Dynamik
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held

m.schnellenbach-held@uni-due.de
Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau
Universitätsstraße 15, 45141 Essen

Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke

lowke@tum.de
Technische Universität München, Lehrstuhl für Binder Jetting Technology
Freisinger Landstr. 52, 85748 Garching b. München

Prof. Dr.-Ing. Henning Wessels

h.wessels@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für rechnergestützte Modellierung im
Bauingenieurwesen (iRMB)
Pockelsstr. 3, 38106 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing Armin Lenzen

Armin.Lenzen@htwk-leipzig.de
HTWK-Leipzig, Institut I4S
Karl-Liebknechtstr. 132, 04277 Leipzig

PD Dr.-Ing. habil. Volkmar Zabel

volkmar.zabel@uni-weimar.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

carsten.koenke@mfpa.de

Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Strukturmechanik
Marienstr. 15, 99423 Weimar

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Claßen

mclassen@imb.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger

jhegger@imb.rwth-aachen.de

RWTH Aachen University, Institut für Massivbau
Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen

Vereinheitlichung der Dokumentation von Standsicherheitsprüfungen

Die Richtlinie VDI 6200 „Standsicherheit von Bauwerken“ bildet seit 2010 eine bewährte Grundlage für die regelmäßige Prüfung von Bestandsbauten und die Bewertung ihrer Standsicherheit. Seither wurden Tausende Bauwerke gemäß dieser Richtlinie überprüft. Bisher gibt es jedoch keine einheitliche Form für die Berichterstellung der Prüfungen nach VDI 6200. Sowohl Prüfende als auch Auftraggeber nutzen unterschiedliche Berichtsvorlagen, was die Vergleichbarkeit und die Fortschreibung der Berichte erschwert.

Die jüngst veröffentlichte Erweiterung der VDI 6200 bietet nun eine standardisierte Grundlage für die Ergebnisdarstellung und Dokumentation der Standsicherheitsüberprüfungen.

Der Entwurf dieser Richtlinie kann ab sofort über DIN-Media bezogen werden. Einsprüche zum Richtlinienentwurf sind bis zum 31. Januar 2025 möglich.

Weitere Informationen auch unter www.vdi.de/6200

Die defekte Stütze eines Lagers. *Foto: Frank Jansen*

Ihr Kontakt im VDI:
Dipl.-Ing. Frank Jansen | jansen_f@vdi.de

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

VDI Fachmedien

Jetzt auf E-Paper-Teamlizenz umstellen und profitieren

50% Rabatt*

Ihre Vorteile:

- *** 50% Rabatt auf den regulären Jahresabonnementpreis. Angebot nur gültig für das erste Jahr sowie nur für Neu-Abonnent*innen.**
- E-Paper für den Desktop
- Downloadfunktion
- Zugriff auf das Archiv
- Volltext-Suche über das Archiv seit 2015
- E-Paper bereits fünf Tage vor Printausgabe verfügbar

Anzahl Nutzer*nnen	Preise in EUR
1	441,30
2–5	882,60
6–10	1.323,90
11–50	1.765,20
> 50	2.206,50

Alle Preise brutto.

Ihre Zugänge:

- Bis 10 Nutzer*innen = personenbezogene Zugangscodes
- Ab 10 Nutzer*innen = IP-Range

Jetzt E-Paper-Lizenz Bauingenieur bestellen!

Technikwissen für Ingenieur*innen

Leserservice VDI Fachmedien
T +49 6123 9238-202
E vdi-fachmedien@vuservice.de

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

UNSER PARTNER: VDI

VDI NACHRICHTEN RECRUITING TAG – DEUTSCHLANDS FÜHRENDE KARRIERE-MESSE FÜR INGENIEUR*INNEN.

Ideal für Ihre erfolgreiche Jobsuche:

- **Renommierte Unternehmen**
- **Direkter Kontakt mit Entscheidern**
- **Karriereberatung und -vorträge**
- **Job Board**

Wir machen Ingenieurkarrieren. Vor Ort. Und Online.

Bauingenieur*innen gesucht – auf den VDI nachrichten Recruiting Tagen und VDI nachrichten Recruiting Tagen Online mit BAU SPEZIAL. Für alle wechselwilligen Fach- und Führungskräfte, Professionals und Young Professionals ein Muss. Knüpfen Sie Kontakte zu renommierten Unternehmen und sprechen Sie mit Entscheidern aus den Fachabteilungen. Serviceangebote wie Karriereberatung und -vorträge unterstützen Sie bei Ihrem Wechselwunsch.

Jetzt informieren und kostenfrei teilnehmen: www.ingenieur.de/recruitingtag

Mehr Informationen?
Recruiting-Tag Team
Telefon: +49 211 6188-170
recruiting@vdi-nachrichten.com

VDI nachrichten
recruiting tag

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-63 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY