

Strategischer Einsatz von Monitoring bei Ingenieurbauwerken mit Anwendungsbeispielen

Dr. Iris Hindersmann¹, Dr.-Ing. Matthias Müller¹, M. Sc. Felix Kaplan²

¹ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

² Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, Hoppegarten

KURZFASSUNG

Der Wandel des Erhaltungsmanagements von Ingenieurbauwerken von einem reaktiven Vorgehen zu einem prädiktiven Lebenszyklusmanagement kann zur Erreichung einer zuverlässigen und verfügbaren Infrastruktur beitragen. Mit dem Einsatz von Monitoring besteht die Möglichkeit, zusätzliche Informationen zum Bauwerk und dessen zukünftiger Entwicklung abzuleiten. Der Einsatz von Monitoring ist komplex und kann daher über die Realisierung von Anwendungsfällen gestärkt werden. In Deutschland weit verbreitete Anwendungsfälle werden mit konkreten Beispielen dargestellt. Zusätzlich werden Anwendungsfälle mit ersten Umsetzungsbeispielen und mögliche zukünftige Anwendungen mit ihren Potenzialen skizziert. Die Möglichkeit der Zusammenführung der Anwendungsfälle in digitalen Zwillingen ist ein Zukunftsbild, welches im Rahmen des Artikels beschrieben wird.

1 Einführung

Das Erhaltungsmanagement von Ingenieurbauwerken ist aktuell durch ein reaktives Vorgehen gekennzeichnet. Maßnahmen werden erst eingeleitet, wenn Schäden erkennbar sind. Die Entwicklung und Einführung eines prädiktiven Lebenszyklusmanagements kann zur Erreichung einer zuverlässigen und verfügbaren Infrastruktur einen bedeutenden Beitrag leisten.

Die Ingenieurbauwerke stehen aktuell einer Vielzahl von Herausforderungen gegenüber: das hohe Alter der Bauwerke, ein Stau der Erhaltungsmaßnahmen, gesteigerte Verkehrsmengen und Personalknappheit bei der Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen.

Die Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung, wie Planung mit *Building Information Modeling* (BIM), Datenauswertung mit Verfahren der künstlichen Intelligenz, Einsatz von Monitoring und digitalen Zwillingen oder der Einsatz von *Augmented and Virtual Reality* (AR/VR) für die periodische Zustandserfassung im Rahmen der Bauwerksprüfung können zur Unterstützung

der Erhaltungsziele beitragen. Der Einsatz unterschiedlicher Verfahren ermöglicht über die Zusammenführung eine ganzheitliche Bewertung digital vorliegender Informationen.

2 Monitoring

Monitoring beschreibt den Gesamtprozess zur Erfassung, Analyse und Bewertung von Bauwerksreaktionen und/oder der einwirkenden Größen mittels eines Messsystems über einen repräsentativen Zeitraum (zeitliche Entwicklung der Messgröße; kontinuierliche, periodische oder ereignisbasierte Messung, global – lokal) [1]. Eine Umfrage des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) bei den Straßenbauverwaltungen der Länder und der Autobahn des Bundes 2020 hat gezeigt, dass der Einsatz von Monitoring auf vorhandene Schäden und Defizite beschränkt ist. Im Rahmen der Abfrage konnten 100 Monitoringmaßnahmen identifiziert werden. Der Hauptteil der Brücken mit einer durchgeführten oder laufenden Monitoringmaßnahme wurde in den 1960er bis 1980er Jahren gebaut. Der Hauptgrund für den Monitoringereinsatz ist die Erfassung der Bauwerksre-

aktion. Hierbei kommen die in Bild 1 gezeigten Sensoren zum Einsatz. Verformungs- und Temperatursensoren sind anteilig am meisten vertreten [2].

Für den bislang relativ wenig verbreiteten Einsatz von Monitoring an Brücken der Bundesfernstraßen gibt es verschiedene Ursachen. Folgende Aspekte sind von Bedeutung:

- fehlende Fachkenntnisse in Bezug auf den Einsatz von Monitoring,
- nicht bekannter Nutzen von Monitoring,
- hohe Komplexität bei der Erstellung eines objektbezogenen Monitoringkonzepts.

Abhilfe können Regelwerke und Standardisierung wie das DBV-Merkblatt „Monitoring: Planung, Vergabe und Betrieb“ [1], das DGZfP-Merkblatt B 09 „Dauerüberwachung von Bauwerken“ [3] und die kommende Erfahrungssammlung „Monitoring bei Bestandsbrücken“ [4] schaffen. Weiterbildungen, Einbeziehung von Ingenieurbüros und Fachplanern sowie die Darlegung der Wirtschaftlichkeit und des Nutzens von Monitoringmaßnahmen können zum vermehrten Einsatz beitragen [5].

3 Anwendungsfälle

3.1 Übersicht

Um Monitoring vermehrt zum Einsatz zu bringen, ist die Implementierung von Anwendungsfällen eine Strategie. Anwendungsfälle können aus Projektzielen abgeleitet werden und stellen Prozesse zur Zielerreichung dar [6]. Der Vorteil der Anwendungsfälle ist, dass der Einsatz von neuen Technologien in abgegrenzten und definierten Bereichen erprobt und Hemmnisse abgebaut werden können. Die im Bundesfernstraßenbereich vorhandenen Anwendungsfälle für Monitoring sind in Bild 2 gezeigt.

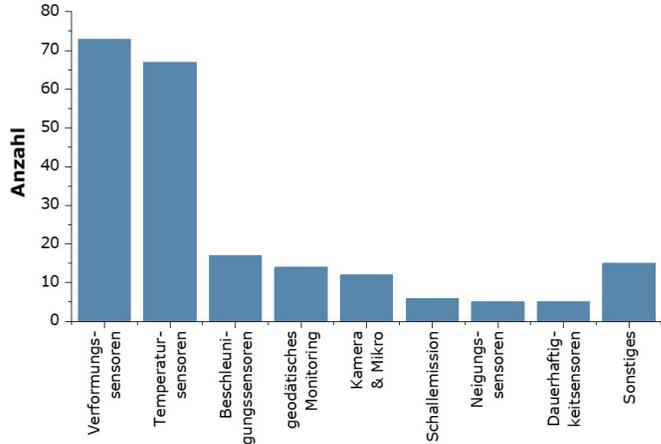


Bild 1: Art der eingesetzten Sensoren bei Monitoring an Straßenbrücken in Deutschland [2]

Die aktuellen Anwendungsfälle lassen sich in häufige Anwendungsfälle und Anwendungsfälle mit ersten Einsatzbeispielen, welche zur weiteren Implementierung Unterstützung beispielsweise aus der Forschung benötigen, unterteilen. Die rechte Seite von Bild 2 zeigt mögliche zukünftige Anwendungsfälle.

3.2 Anwendungsfälle mit häufigen Anwendungen

Die in Deutschland am häufigsten zu findenden Anwendungsfälle sind Monitoring bei bekannten lokal verorteten Schäden, bei bekannten Defiziten aus Nachrechnung oder Konstruktion und zur Ermittlung von Einwirkungen. Diese Anwendungsfälle werden genutzt, um konkrete Fragestellungen in Bezug auf die Ingenieurbauwerke, deren Zustand und dessen Entwicklung zu geben. Ausgehend von bekannten Schäden oder Defiziten wird ein auf das Bauwerk und die konkrete Fragestellung bezogenes Monitoringkonzept entwickelt.

3.2.1 Monitoring bei bekannten lokal verorteten Schäden

Im Bereich der Bundesfernstraßen ist der Einsatz von Monitoring bei Bestandsbauwerken am häufigsten bei bekannten und lokal verorteten Schäden zu finden. Grundlage für den Einsatz

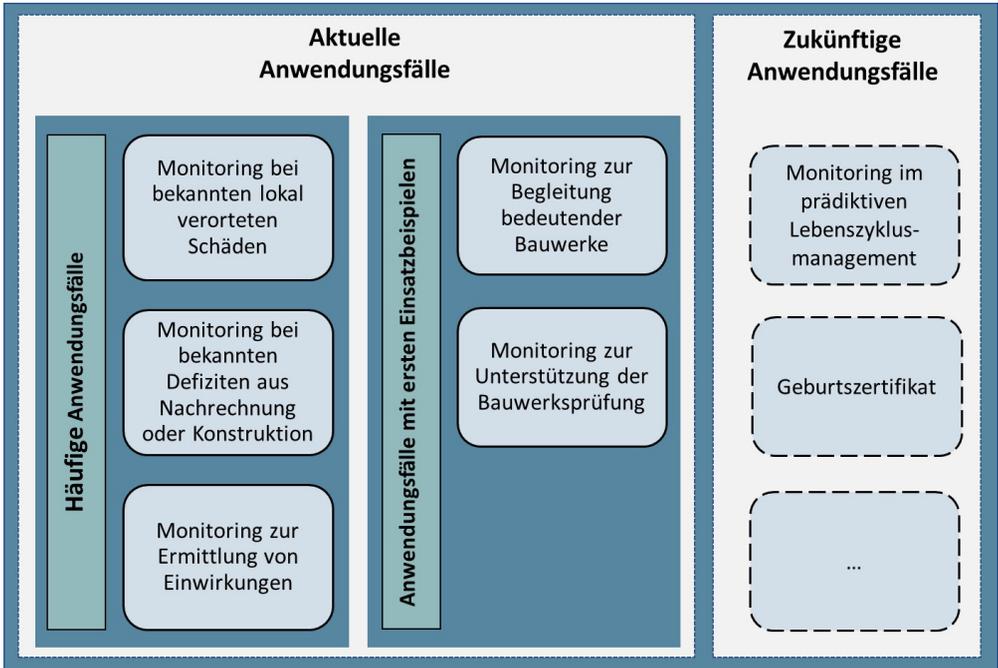


Bild 2: Anwendungsfälle von Monitoring im Bereich der Bundesfernstraßen

sind vorhandene Schäden am Bauwerk, welche aus der Bauwerksprüfung, der objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) oder dem Einsatz zerstörungsfreier Prüfungen (ZfP) bekannt sind [7], [8]. In diesem Fall wird ein lokales Monitoringssystem eingesetzt, welches eine gute Möglichkeit zur Überwachung des Schädigungsfortschritts bietet. Dieses Vorgehen dient der Verlängerung der Restnutzungsdauer und Erhöhung der Sicherheit. Das lokale Monitoring verfolgt einen Bottom-up-Ansatz. Von der Überwachung des lokalen Sachverhalts kann eine Abschätzung der weiteren lokalen Entwicklung erfolgen.

Bei der Brücke über die Anlagen der DB im Zuge der B 1 in Brandenburg an der Havel kommt dieser Anwendungsfall zum Einsatz (Bild 3). Das Bauwerk wurde 1971 als einfeldriger Überbau mit einer Stützweite von 47 m errichtet. Die beiden Fahrrichtungen werden von separaten, parallel liegenden Überbauten überführt. Deren Querschnitt ist nahezu identisch und besteht aus zwei Stahlhohlkästen mit orthotroper Fahrbahn.



Bild 3: Brücke über die Gleise der DB im Zuge der B 1 in Brandenburg an der Havel

An dem Bauwerk wurden durch die Bauwerksprüfung zahlreiche Schäden aufgenommen, u. a. Querschnittsminderungen infolge Korrosion, Ermüdungsrisse in der Fahrbahn und eine außerplanmäßige Stellung der Rollenlager. Durch eine objektbezogene Schadensanalyse (OSA) konnte gezeigt werden, dass die Lagerstellungen auf eine Schiefstellung der Widerlager infolge von Setzungen zurückzuführen sind [7]. Geodätische Vermessungen der Widerlager zeigten, dass dieser Prozess noch nicht abgeklungen ist und somit weitere Verkipnungen zu

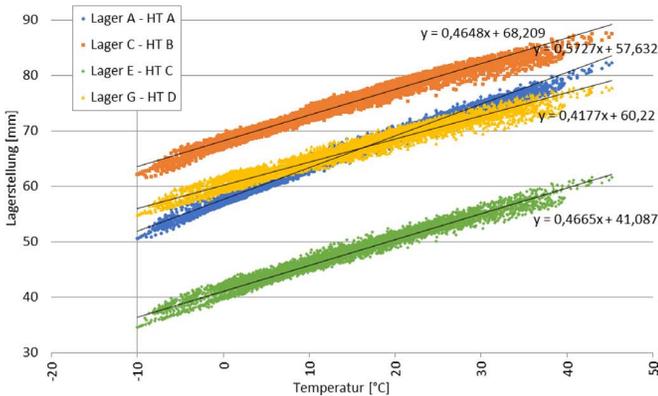


Bild 4: Installiertes Monitoringsystem an den Lagern (oben) sowie exemplarische Auswertung der Messdaten für ein Jahr (unten)

erwarten sind. Da gleichzeitig die Verformungskapazität der Rollenlager bereits sehr hoch ausgelastet ist, ist hier ein permanentes Monitoring der Lagerbewegung erforderlich.

Diese Überwachungsaufgabe wird realisiert, indem an jedem Rollenlager induktive Wegaufnehmer montiert wurden (Bild 4) [9]. Dadurch kann überwacht werden, dass der restliche zur Verfügung stehende Lagerweg nicht überschritten wird. Zur Identifizierung von langfristigen Trends werden zusätzlich die Messdaten aus der Temperaturmessanlage des Überbaus herangezogen. Über die Jahre zeigt sich eine nahezu lineare Abhängigkeit der Lagerbewegung von der Temperatur. Veränderungen in der Beschreibung der Regression können als Indikator für eine Systemänderung herangezogen werden.

3.2.2 Monitoring bei bekannten Defiziten aus Nachrechnung oder Konstruktion

Dieser Anwendungsfall ist von Bedeutung, wenn bei Bauwerken Defizite im Rahmen der Nachrechnung oder Defizite an ähnlichen Konstruktionen festgestellt werden. Häufig liegen noch keine sichtbaren Schäden vor und die Art eines potenziellen Schadens und der Schadensort sind nicht bekannt. Es kann zwischen globalem und lokalem Monitoring unterschieden werden.

Das globale Monitoring ermöglicht die Überwachung des defizitären Bauwerks. Es ist darauf ausgerichtet, globale Parameter eines Bauwerks, die auf eine Schädigung schließen lassen, zu erfassen und zu bewerten. Diese Parameter können aus der Systemreaktion z. B. über die Messung von Beschleunigung oder Verformung bestimmt werden. Die Messungen dienen dazu, Ver-

änderungen zu erfassen, welche sich im Lauf der Zeit am Bauwerk entwickeln. Unter Voraussetzung eines duktilen Bauwerksverhalten mit Versagensvorankündigung ist die Grundlage für das globale Monitoring der Systemreaktionen, dass sich Einwirkungen und Schäden signifikant auf die Systemsteifigkeit auswirken und damit einen direkten Einfluss auf das Tragverhalten des Bauwerks haben. Die verschiedenen Methoden der globalen Bauwerksüberwachung basieren also auf der Annahme, dass Schädigungen am Bauwerk anhand von Änderungen des globalen Tragverhaltens erkannt werden können. Über die Messungen der Parameter und die spätere Auswertung können Rückschlüsse auf die Art des Schadens und den Schadensort gezogen werden [10], [11].

Alternativ kann das globale Monitoring auf die Detektion der Schädigungsursache ausgelegt werden. Hierfür kann beispielsweise eine Schallemissionsmessanlage zur Messung von Spanndrahtbrüchen in Spannbetonbauwerken [12] oder einer Ermüdungsrissbildung in orthotropen Fahrbahnplatten [13] eingesetzt werden. Durch ein hinreichend großes Monitoringsystem sind dabei sämtliche Bereiche, in denen das Defizit ermittelt wurde, zu erfassen. Das Monitoringsystem erfasst und lokalisiert jeden Schaden, der ab Überwachungsbeginn eintritt.

Der Einsatz eines lokalen Monitorings kann beispielsweise bei dem Nachrechnungsdefizit Ermüdung Koppelfuge oder dem Nachrechnungsdefizit Querkraft bei der lokalen Überwachung der Schubbereiche zur Detektion entstehender Schubrisse eingesetzt werden.

Die Maßnahme Schleusenbrücke über die Havel im Zuge der B96 in Fürstenberg/Havel stellt ein Anwendungsbeispiel dar (Bild 5). Das Bauwerk wurde 1968 als einfeldrige Spannbetonplatte mit einer Stützweite von 16,3 m errichtet. Da-

bei kam Hennigsdorfer Spannstahl zum Einsatz, der mittlerweile als spannungsrissskorrosionsgefährdet eingestuft ist [14]. Im Rahmen der objektbezogenen Untersuchungen zum Nachweis des Ankündigungsverhaltens wurden Spanndrahtproben entnommen. Bereits bei der Probenentnahme wurden gebrochene Spanndrähte ermittelt. Die Laboruntersuchungen bestätigen, dass die Spanndrähte weder die erforderliche Bruchdehnung noch die erforderliche Zugfestigkeit erreichen. Die Bruchbilder zeigen ausgeprägte Anrisse infolge Spannungsrissskorrosion.

Aufgrund der Verkehrsbedeutung des Bauwerks ist eine Sperrung für den Verkehr nur im äußersten Fall zulässig. Aus diesem Grund wurde ein Monitoring mittels Schallemission vor Ort angebracht. Die Messanlage besteht insgesamt aus zwölf Schallemissionssensoren, die jeweils außerhalb der Fahrrinne der Havel angeordnet sind. Seit Inbetriebnahme wurden bis Ende 2022 insgesamt zehn Spanndrahtbrüche am Bauwerk erfasst (Bild 6). Die Bauwerksprüfung konnte somit ereignisbasiert veranlasst werden.



Bild 5: Brücke über die Havel im Zuge der B96 in Fürstenberg/Havel



Bild 6: Installation des Monitoringsystems und Lokalisierung von Spanndrahtbrüchen (Detail rechts unten)

3.2.3 Monitoring zur Ermittlung von Einwirkungen

Einwirkungen auf das Bauwerk können direkte Einwirkungen aus äußeren Lasten (Eigenlast, Verkehr, Wind, Schnee) und indirekte Einwirkungen infolge behinderter Verformungen (Zwang) durch klimatische Einwirkungen (Temperatur) oder von Setzungen sein. Die klimatischen Einwirkungen wie Feuchte und Temperatur können über Wetterstationen ermittelt werden. Der Einfluss der Temperatur auf das Bauwerk wird durch Temperatursensoren im und am Bauwerk gemessen. Die Bestimmung der Temperatur spielt bei der Kompensation des Temperatureinflusses auf die Messung eine große Rolle. In bestimmten Anwendungsfällen (z. B. bei der Überwachung von Koppelfugen) stellt die Temperatur eine für die Bewertung maßgebende Einwirkungsgröße dar.

Der Verkehr und die Zusammensetzung des Verkehrs sind ebenfalls von großer Bedeutung für die Erfassung der maßgebenden Einwirkung auf Brückenbauwerke. Mit dem Einsatz von *Bridge-weigh-in-motion*-Systemen (B-WIM-Systeme) kann beispielsweise die Bestimmung der realen aktuellen Verkehrslasten erfolgen [15].

Im Landesbetrieb Straßenwesen wurde eine Untersuchung zur realistischen Erfassung von objektbezogenen Ziellastniveaus durchgeführt.

Dabei wurden an einzelnen Bauwerken Monitoringanlagen installiert, um die jeweiligen Randbedingungen exakt erfassen zu können [16]. Ein Beispiel ist die Brücke über die Spree im Zuge der L 35 in Fürstenwalde/Spree. Die Spreequerung besteht aus einer Strombrücke und einer Brücke über einen Nebenarm (Archenarm) (Bild 7). Die Strombrücke ist ein vorgespannter Stabbogen mit einer Stützweite von 67,0 m. Bei der Brücke über den Archenarm wurde eine Verbundkonstruktion

mit Stahlträgerrost und Fahrbahnplatte ausgeführt. Sie weist Einzelstützweiten von 25,5 m, 28,0 m und 29,0 m auf.

Die Ermittlung des Ziellastniveaus war relevant, weil eine vergleichsweise hohe Verkehrsbelastung und Stausituationen aufgrund von Knotenpunkten vor und hinter dem Bauwerk vorliegen. Zur Erfassung der Einwirkung wurden Dehnmessstreifen und Temperatursensoren zur Kompensation der Messwerte eingesetzt (Bild 8). Die Verifizierung der Messergebnisse erfolgte über Kameraaufzeichnungen des laufenden Verkehrs. Insgesamt dauerte die Messung ca. zwei Jahre. Im Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass für das Bauwerk das Ziellastniveau BK 30/30 gerechtfertigt werden kann. Die anschließende Nachrechnung lieferte Defizite bei den Ermüdungsnachweisen. Anhand der vorhandenen Messdaten konnte ein objektbezogenes Ermüdungslastmodell abgeleitet werden.

3.3 Anwendungsfälle mit ersten Einsatzbeispielen

„Monitoring zur Unterstützung der Bauwerksprüfung“ und „Monitoring zur Begleitung bedeutender Bauwerke“ sind weitere zukunfts-trächtige Anwendungsfälle, bei denen erste Umsetzungen in der Praxis vorhanden sind, aber weiterhin Forschung und eine Unterstützung der Implementierung notwendig sind.



Bild 7: Brücke über die Spree im Zuge der L 35 in Fürstenwalde/Spree



Bild 8: Messzentrale, eingerichtet auf der Widerlagerbank (links), Lage der Dehnmessstreifen im Messquerschnitt (rechts)

3.3.1 Monitoring zur Unterstützung der Bauwerksprüfung

Im Rahmen der Bauwerksprüfung nach [8] kann Monitoring zur Unterstützung eingesetzt werden. Damit sollen ergänzende Informationen zur Optimierung der Beurteilung generiert werden, welche durch eine konventionelle Prüfung nicht ermittelt werden können. Monitoring kann an verschiedenen Stellen im Prozess der Bauwerksprüfung genutzt werden. Eine Möglichkeit sind instrumentierte Bauteile zur Beurteilung des Verhaltens. Die Instrumentierung

z. B. von Fahrbahnübergängen und die messtechnische Erfassung von Performanceparametern hat den Vorteil, dass eine Ertüchtigung in Abhängigkeit von der tatsächlichen Beanspruchung möglich ist. Dieses Vorgehen ist möglich, da Veränderungen an den Bauteilen erkannt und Aussagen zu Schäden und ggf. eine der Prognose zukünftiger Entwicklungen ermöglicht werden [17].

Eine Alternative ist der Einsatz des bildbasierten Monitorings. Hier werden Bauwerksbilder automatisiert erfasst und im Anschluss die

georeferenzierte 3D-Geometrie des Bauwerks ermittelt. Hiermit können Stellen am Bauwerk identifiziert werden, die im Rahmen der Bauwerksprüfung genauer untersucht werden sollen. Das Bildmaterial kann auch für eine KI-gestützte Auswertung der Bilder und damit automatisierte Erkennung von Rissen, Abplatzungen oder Veränderungen genutzt werden [18], [19]. Das Herausfiltern von Schadensinformationen und -orten, wie beispielsweise Rissen, aus den erfassten Bilddatensätzen bildet eine direkte Parallele zu den Systemidentifikationsmethoden klassischer sensorbasierter Monitoringansätze [20]. Anders als beim Einsatz von sensorbasiertem ermöglicht das bildbasierte Verfahren eine größere Standardisierung, Objektivierung und automatische Ortsreferenzierung. Hiermit werden Teile der bisherigen handnahen Prüfung durch digitale Tools weiterentwickelt.

3.3.2 Monitoring zur Begleitung bedeutender Bauwerke

Monitoring zur Unterstützung bedeutender Bauwerke bezieht sich auf Bauwerke, deren Ausfall große Auswirkungen auf das Verkehrsnetz hat. Hier sind beispielsweise große Talbrücken zu nennen. Für diese Bauwerke kann der Einsatz von Monitoring eine sinnvolle Ergänzung zur Sicherstellung der Verfügbarkeit sein, auch wenn aktuell kein Schaden oder Defizit bekannt ist. Zur Realisierung dieses Anwendungsfalls ist eine Identifikation der Bauwerke notwendig. Die Bedeutsamkeit kann sich aus verkehrlichen oder konstruktiven Gründen ergeben. Verkehrliche Gründe sind z. B. die Bedeutung der Bauwerke für die Netzverfügbarkeit oder hohe Verkehrszahlen. Konstruktive Gründe ergeben sich z. B. aus der Größe und Lage der Bauwerke unter Berücksichtigung ggf. eingeschränkter Möglichkeiten zur Schaffung von kurzfristigem Ersatz. Für diesen Anwendungsfall ist das globale Monitoring relevant. Im Unterschied zum Anwendungsfall „Monitoring bei bekannten Defiziten“ müssen bei diesem keine Defizite bekannt sein. Dieser Anwendungsfall kann bei Neubauten und bestehenden Bauwerken zum Tragen kommen.

Das Monitoring bedeutender Bauwerke hat im Ausland eine größere Verbreitung, wie beispielsweise die Überwachung der 2007 gebauten Brücke Ponte da Lezíria in Portugal zeigt [20]. Die Brücke wurde mit einem umfangreichen Monitoringsystem zur Ermittlung statischer und dynamischer Parameter ausgestattet. Hiermit wird u. a. die Bauwerksprüfung unterstützt. Gleichzeitig steht für den Bauwerkseigentümer eine Einschätzung des Zustands permanent zur Verfügung [21]. Auch an der Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn wird durch die eingebaute Sensorik und die Aggregation der gemessenen Daten zu Zustandsinformationen für den Bauwerkseigentümer dauerhaft die Möglichkeit geschaffen, den aktuellen Zustand der Brücke abzurufen und damit schnelle und effektive Entscheidungen bei Veränderungen der Zustandsinformationen vornehmen zu können [22]. Der Nutzen für den Einsatz eines präventiven Monitorings bei Brücken ohne Schäden konnte in [23] dargelegt werden.

3.4 Zukünftige Anwendungsfälle

Die zukünftigen Anwendungsfälle zeigen Potenziale für weitere Einsatzgebiete des Monitorings auf (Bild 2, rechts). Der Anwendungsfall „Monitoring im prädiktiven Lebenszyklusmanagement“ wird im Rahmen der Umsetzung digitaler Zwillinge, welche im BIM-Masterplan angekündigt werden, eine große Bedeutung bekommen [24]. Erste Schritte und Ideen zur Umsetzung dieses Anwendungsfalls wurden in [20] skizziert. Das Potential von Monitoring ergibt sich aus der Möglichkeit, Bauwerke über lange Zeiträume zu überwachen und Veränderungen zu erkennen. Potentiale liegen in der Ermittlung des Tragwerkszustandes und der Quantifizierung der Tragwerkszuverlässigkeit, der Charakterisierung des Bauwerksverhaltens mit dem Ziel der Anomaliedetektion und in der Absicherung der Restnutzungsdauer [20]. Aus den Monitoringdaten können Informationen beispielsweise zu Schädigungsmechanismen abgeleitet werden. Diese Informationen wiederum können als Grundlage für die Ermittlung von Performancekennwerten in Kombinationen mit anderen Daten verwendet werden. Dieses

Vorgehen dient dazu, Unsicherheiten in der Zustandsbeurteilung zu reduzieren und geeignete Instandhaltungsmaßnahmen zu identifizieren [20].

Das Anwendungsbeispiel „Geburtszertifikat“ hat das Ziel, einen Referenzzustand des Bauwerks vor der Verkehrsfreigabe zu ermitteln. Damit wird eine Grundlage für die Interpretation der Auswirkungen von späteren Veränderungen erhalten und es ist möglich, Aussagen über das zu erwartende Verhalten der Tragwerks- und Ausstattungskomponenten zu treffen. Dieser Referenzzustand kann mit Folgemessungen abgeglichen werden und somit eine Entscheidungsgrundlage für den Einsatzzeitpunkt erforderlicher Maßnahmen, wie beispielsweise ein dauerhaftes Monitoring, darstellen. Die Durchführung einer Nullmessung inkl. einer Belastungsprobe ist in der Schweiz, Italien und Frankreich vorgeschrieben [25]–[27]. In Deutschland existiert keine Vorschrift für die Durchführung einer Nullmessung und die Erstellung eines Geburtszertifikats einer Brücke.

In [18] wird die Durchführung einer Nullmessung an der Hochmoselbrücke beschrieben. Hier wurden neben der Durchführung einer Schwingungs- und Dehnungsmessung zur Feststellung des Verhaltens der Brücke auch ein bildgebendes Verfahren u. a. zur Ermittlung der 3D-Geometrie eingesetzt.

4 Zusammenführung der Anwendungsfälle im digitalen Zwilling

Das Zusammenwirken der einzelnen Anwendungsfälle ist über die Implementierung von digitalen Zwillingen vorstellbar. Ein digitaler Zwilling kann als digitales Abbild der realen Straßeninfrastruktur

verstanden werden, das in Wechselwirkung mit der realen Struktur steht, sämtliche Eigenschaften über den gesamten Lebenszyklus hinweg erfasst und aus den Daten Informationen zur Entscheidungsunterstützung erzeugt [28], [29]. Bild 9 zeigt schematisch einen digitalen Zwilling einer Brücke.

Das Monitoring und die daraus gewonnenen Informationen und Erkenntnisse sind wichtige Grundlagen für die Entwicklung und Nutzung von digitalen Zwillingen. Die Monitoringdaten geben Aufschluss zum aktuellen Zustand des Bauwerks und dienen als Eingangsdaten für die Ermittlung des zukünftigen Verhaltens. Damit ist der Monitoringinsatz grundlegend für die im digitalen Zwilling ablaufenden Prozesse Überwachung, Analyse, Vorhersage und Steuerung.

Für die Implementation digitaler Zwillinge im Bundesfernstraßennetz kann eine Strategie zur schrittweisen Einführung sinnvoll sein. Erste Schritte können die Erstellung von dreidimensionalen Betriebsmodellen, Geburtszertifikata-

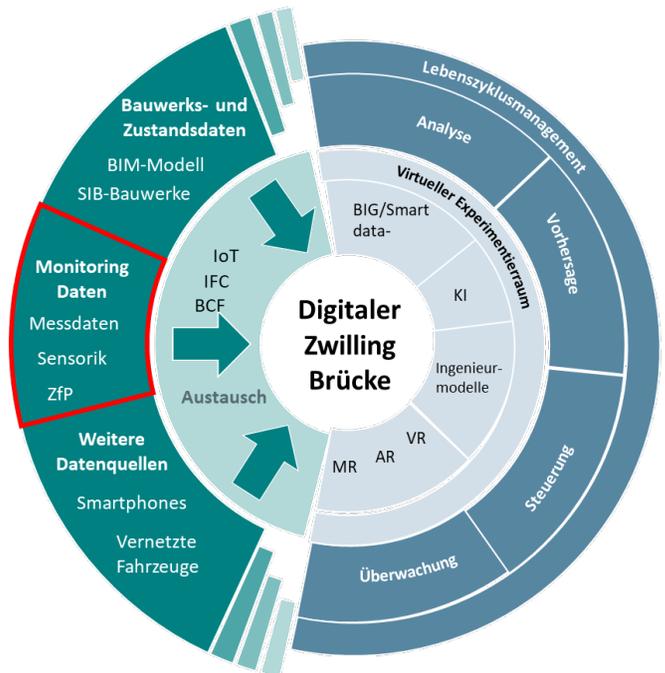


Bild 9: Digitaler Zwilling Brücke (verändert nach [28])

ten, digitalisierten Bauwerksprüfungen und die Zusammenführung und Bewertung von Daten beispielsweise aus Monitoringanwendungen sein.

5 Fazit

Der Monitoringeneinsatz an Ingenieurbauwerken der Bundesfernstraßen ist aktuell noch nicht sehr stark verbreitet, gewinnt aber an Bedeutung. Über die Anwendungsfälle besteht die Möglichkeit, das Potenzial von Monitoring aufzuzeigen und Hemmnisse für den Einsatz von Monitoring abzubauen. Aktuell ist Monitoring bei der Unterstützung der Sicherstellung der Verfügbarkeit der Ingenieurbauwerke und insbesondere der Absicherung der Restlebensdauer von großer Bedeutung. Im Rahmen dieser Anwendungsfälle werden bereits heute eine Vielzahl von Erfahrungen gesammelt, die langfristig für die Einführung von digitalen Zwillingen von Vorteil sein können.

Der Nutzen, der sich aus der Anwendung von Monitoringmaßnahmen ergibt, ist monetär quantifizierbar, für den digitalen Zwilling ist der Nutzen aktuell noch nicht quantifizierbar, aber beschreibbar.

Literatur

- [1] DBV (Hrsg.): Merkblatt: Monitoring: Planung, Vergabe und Betrieb. 2018.
- [2] Hindersmann, I.: Anwendung von Monitoring bei Brücken der Bundesfernstraßen und zukünftige Monitoringstrategien. In: Krieger, J. (Hrsg.): Tagungsband zum Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur am 29./30.06.2021 in Esslingen, Tübingen: expert Verlag, 2021.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP, Hrsg.): Merkblatt B 09 – Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken. 2022.
- [4] Novák, B.; Stein, F.; Dudon, A.; Farouk, A.; Thomas, L.; Reinhard, J.; Boros, V.; Koster, G.: Erfahrungssammlung Monitoring von Brückenbauwerken. Schlussbericht zum BMDV Projekt STB24/7192.70/40-3418027, 2022.
- [5] Schubert, M.; Faber, M.; Betz, W.; Straub, D.; Niemeier, E.; Ziegler, D.; Walther, Ch.; Majka, M.: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken und Ingenieurbau B 156, Bremen: Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag, 2020.
- [6] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVI, Hrsg.): Handreichungen und Leitfäden – Teil 6 – Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle. Arbeitsgemeinschaft BIM4INFRA2020, 2019.
- [7] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.): Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING – Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA).
- [8] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung.
- [9] Jansen, A.; Geißler, K.: Ausreißererkennung zur Strukturüberwachung von Bestandsbrücken durch Bauwerksmonitoring mit vier Signalmerkmalen. In: Isecke, B.; Krieger, J. (Hrsg.): Tagungsband zum TAE Brückenkolloquium am 08./09.09.2020 in Esslingen, Tübingen: expert Verlag, 2020.
- [10] Retze, U.: Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke. Diss., Universität der Bundeswehr München, 2007.
- [11] Schnellenbach-Held, M.; Karczewski, B.; Kühn, O.: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau B 105, Bremen: Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag, 2014.
- [12] Kaplan, F.; Steinbock, O.; Saloga, K.; Ebell, G.; Schmidt, S.: Überwachung der Brücke am Altstadter Bahnhof. Bautechnik 99 (2022) 3, S. 222-230 – DOI: 10.1002/bate.202200008
- [13] Salg, D.; Schmidt, S.: Structural Health Monitoring am Beispiel von zwei Autobahnbrücken. In: DGZfP (Hrsg.): Digitaler Tagungsband zur Bauwerksdiagnose am 13./14.02.2020 in Berlin, 2020.
- [14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.): Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion). 2011.
- [15] Freundt, U.: Roadtraffic Management System (RTMS). Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken und Ingenieurbau B 100, Bremen: Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag, 2014.
- [16] Degenhardt, K.; Steffens, N.; Kraus, J.; Geißler, K.: Mehrstufiges Verfahren zur Festlegung des erforderlichen Ziellastniveaus für die Nachrechnung von Straßenbrücken. In: Isecke, B.; Krieger, J. (Hrsg.): Tagungsband zum TAE Brückenkolloquium am 08./09.09.2020 in Esslingen, Tübingen: expert Verlag, 2020.
- [17] Haardt, P.; Dabringhaus, S.; Friebel, W.; Bayerstorfer, R.; Bäumler, T.; Freundt, U.: Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn. Bautechnik 94 (2017) 7, S. 438-444 – DOI: 10.1002/bate.201700035

- [18] Kühne, J.; Gündel, M.; Ebert, C.; Colomer, C.: Die Digitalisierung der Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen und Brücken im Vergleich. *Stahlbau* 90 (2021) 2, S. 128–137 – DOI: 10.1002/stab.202000093
- [19] Morgenthal, G.; Rodehorst, V.; Hallermann, N.; Debus, P.; Benz, Ch.: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte). *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Brücken- und Ingenieurbau B171*, Bremen: Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag, 2021.
- [20] Morgenthal, G.; Hallermann, N.; Rau, S.; Schellenberg, K.; Martín-Sanz, H.; Schubert, M.; Kübler, O.: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken. *Schlussbericht zum BAST FE-Projekt 69.0006*, 2023.
- [21] Sousa, H.; Félix, C.; Bento, J.; Figueiras, J.: Design and implementation of a monitoring system applied to a long-span prestressed concrete bridge. *Structural Concrete* 12 (2011) 2, S. 82–93 – DOI: 10.1002/suco.201000014
- [22] Windmann, S.: *Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn*. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 178*, Bremen: Fachverlag NW im Carl Schünemann Verlag, 2022.
- [23] Sousa, H.; Courage, W.: Value of information of a pro-active SHM-based tool supported by advanced FE models and Bayesian statistics towards efficiency in bridge management. *Structure and Infrastructure Engineering* 18 (2022) 4, S. 554–572 – DOI: 10.1080/15732479.2021.1978507
- [24] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVI, Hrsg.): *Masterplan BIM Bundesfernstraßen*. 2021.
- [25] Bundesamt für Straßen (ASTRA, Hrsg.): *Richtlinie: Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen*. 2005.
- [26] Bundesamt für Straßen (ASTRA, Hrsg.): *Richtlinie: Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen*. 2005.
- [27] Transprt Research Board (TRB): *Primer on Bridge Load Testing*. Online unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiahKKvorr-AhWri_0HHZnXBlsQFnoECBUQAQ&url=https%3A%2F%2Fonlinepubs.trb.org%2Fonlinepubs%2Fcirculars%2Fec257.pdf&usg=AOvVaw10WNfXOkmBNVQQu0TEB-1R. 2019.
- [28] Bednorz, J.; Nieborowski, S.; Windmann, S.; Hindersmann, I.: *BIM – auf dem Weg zum Digitalen Zwilling. Straße + Autobahn* (2021) 11, S. 917–924.
- [29] Nieborowski, S.; Windmann, S.; Bednorz, J.; Hindersmann, I.; Zinke, T.: *Digitaler Zwilling Brücke im Betrieb – Mögliche Anwendungsfälle*. *Bautechnik* 100 (2023) 2, S. 86–93 – DOI: 10.1002/bate.202200089

Bildquellen

- Bilder 1, 2: Iris Hindersmann
Bilder 3, 6 (links): Felix Kaplan
Bild 4: Ronald Stein
Bild 5: Till Brauer
Bild 6 (rechts): Timo Stüben
Bilder 7, 8: Kay Degenhardt
Bild 9: Jennifer Bednorz