

# Monitoring von Straßenbrücken - aktueller Einsatz und zukünftige Anwendung

Iris HINDERSMANN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Kontakt E-Mail: hindersmann@bast.de

**Kurzfassung.** Aufgrund der starken Zunahme des Verkehrs und konstruktiver sowie stoffbezogener Mängel kann es bei Brückenbauwerken zu Tragfähigkeitsdefiziten und Beschränkung der Restnutzungsdauer kommen. Eine Verstärkung oder der Ersatz aller betroffenen Bauwerke ist kurzfristig nicht möglich. Um das Bauwerk länger sicher nutzen zu können, kann Monitoring eingesetzt werden.

Im Rahmen des Artikels werden der aktuelle Einsatz von Monitoring in der Praxis dargestellt und verschiedene Anwendungsfälle erläutert. Aktuell ist der Einsatz von Monitoring bei Brückenbauwerken der Bundesfernstraßen begrenzt, wie eine Abfrage bei den Straßenbauverwaltungen der Länder ergeben hat. Als Ursache hierfür lassen sich verschiedene Hemmnisse identifizieren.

Um die vielfältigen Möglichkeiten für den Einsatz von Monitoring zu verdeutlichen, werden unterschiedliche Anwendungsfälle von Monitoring und deren Potenziale betrachtet. Relevante häufige Anwendungsfälle sind „Monitoring bei bekannten lokal verorteten Schäden“ oder „Monitoring bei bekannten Defiziten aus Nachrechnung oder Konstruktion“ aber auch Anwendungsfälle mit zukünftigen Potenzialen wie „Monitoring zur Unterstützung der Bauwerksprüfung“ oder „Geburtszertifikate“.

## 1. Einführung

Die Brücken der Bundesfernstraßen stehen einer Vielzahl von Herausforderungen gegenüber. Ursachen hierfür sind u.a. der starke Anstieg des Verkehrs auf Bundesfernstraßen, insbesondere im Güterverkehr, der Klimawandel, das hohe Alter der Brücken und die Notwendigkeit, Nachhaltigkeitsaspekte im gesamten Lebenszyklus der Brücken zu beachten. Monitoring stellt eine Möglichkeit dar diesen Herausforderungen zu begegnen. Monitoring kann zur Sicherstellung der Verfügbarkeit nutzbringend eingesetzt werden, indem Sicherheitsreserven erfasst, Veränderungen und Schwachstellen erkannt, beurteilt und beobachtet werden und damit die Prognose des zukünftigen Verhaltens ermöglichen. Weiterhin ist die Erfassung der tatsächlichen Einwirkungen möglich. Mit den so gewonnen Informationen kann das Erhaltungsmanagement optimiert werden, da mit diesen zusätzlichen Informationen der aktuelle Zustand ermittelt und Zustandsveränderungen prognostiziert werden können. Unter Monitoring wird der 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) verstanden [1].



## 2. Einsatz von Monitoring in der Praxis

### 2.1 Länderabfrage zum Einsatz von Monitoring

Eine Umfrage des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr aus dem Jahr 2020 hat gezeigt, dass der Einsatz von Monitoring bei Brücken der Bundesfernstraßen auf vorhandene Schäden und Defizite beschränkt ist. Die im Rahmen der Abfrage ermittelten 100 Monitoringmaßnahmen bezogen sich hauptsächlich auf Brücken der Baujahre von 1960 bis 1980 und spiegelten bei den Brückenarten die typische Verteilung der Bundesfernstraßen mit einem Fokus auf Spannbetonbrücken wider. Die Monitoringmaßnahmen erfolgten zumeist zur Erfassung der Bauwerksreaktion (Abbildung 1) unter Einsatz von Verformungs- und Temperatursensoren [2].

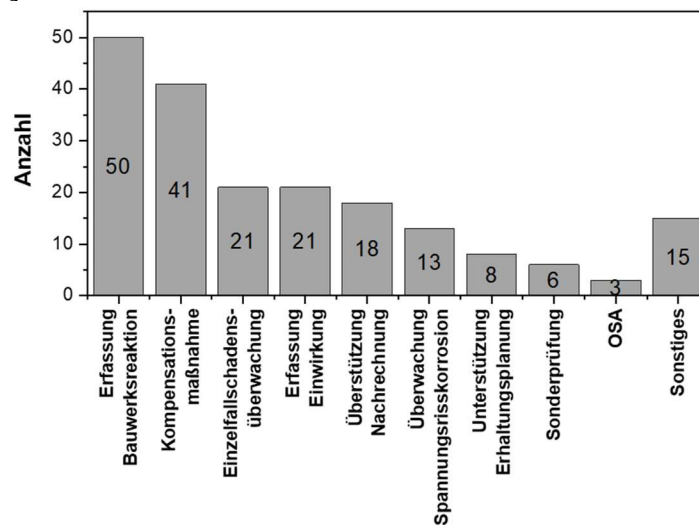


Abbildung 1: Anlass für das Bauwerksmonitoring

Die Durchführung eines Monitorings kann in einzelne Arbeitsschritte von „Definition der Fragestellung“, „Erstellung Monitoringkonzept“, „Ausführungsplanung Messsystem“, „Installation, Betrieb, Datenerhebung“, „Datenaufbereitung & Ergebnisauswertung“ bis zur „Bewertung der Messergebnisse“ eingeteilt werden [1]. Neben dem Auftragnehmer sind u.a. auch Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen und Fachplaner für Monitoring am Prozess von der Planung bis zur Bewertung beteiligt und übernehmen einen relevanten Anteil der Arbeit im Prozess [1]. Der Auftragnehmer ist bei den Prozessen „Definition der Fragestellung“ und „Bewertung der Messergebnisse“ stark eingebunden, wie die Umfrage gezeigt hat [2].

### 2.2 Hemmnisse

Die Ursachen für den bislang relativ wenig verbreiteten Einsatz von Monitoring an Brücken der Bundesfernstraßen sind vielfältig. Fehlende Fachkenntnisse in Bezug auf den Einsatz von Monitoring und die hohe Komplexität des Themas in Bezug auf die Planung, Durchführung und Bewertung sind Hemmnisse. Abhilfe können Regelwerke und Standardisierung wie das DBV-Merkblatt „Monitoring: Planung, Vergabe und Betrieb“, das DGZfP-Merkblatt B 09 „Dauerüberwachung von Bauwerken“ und die Erfahrungssammlung „Monitoring bei Bestandsbrücken“ schaffen [1; 3; 4]. Weiterbildungen und die Einbeziehung von Ingenieurbüros und Fachplaner für verschiedene Prozessschritte des Monitorings können ebenfalls eine Unterstützungsleistung bieten. Die Schwierigkeit, den Nutzen des Monitorings insbesondere in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit zu ermitteln, ist ein weiterer Grund für den wenig ver-

breiteten Einsatz. Die im Projekt „Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen“ gezeigte Vorgehensweise zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit und des Nutzens von Monitoringmaßnahmen kann zum vermehrten Einsatz beitragen [5].

### 3. Anwendungsfälle Monitoring

Um Monitoring vermehrt zum Einsatz zu bringen, ist die Implementierung von Anwendungsfällen eine Strategie. Der Vorteil der Anwendungsfälle ist, dass der Einsatz von neuen Technologien in abgegrenzten und definierten Bereichen erprobt und Hemmnisse abgebaut werden. Die im Bundesfernstraßenbereich vorhandenen Anwendungsfälle für Monitoring sind in Abbildung 2 gezeigt.

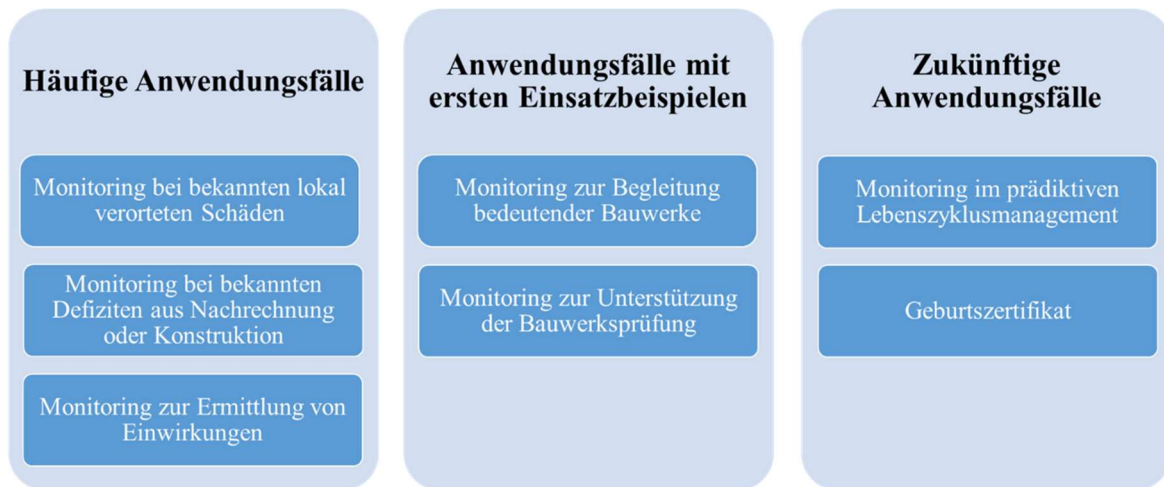


Abbildung 2: Anwendungsfälle Monitoring bei Bundesfernstraßen

#### 3.1 häufige Anwendungsfälle

Unter häufigen Anwendungsfällen werden die Einsätze von Monitoring verstanden, die bei den Bundesfernstraßen in Deutschland bereits heute zahlreich zu finden sind. Die Anwendungsfälle werden genutzt, um konkrete Fragestellungen in Bezug auf die Ingenieurbauwerke, deren Zustand und dessen Entwicklung zu ermitteln. Ausgehend von bekannten Schäden oder Defiziten wird ein auf das Bauwerk und die konkrete Fragestellung bezogenes Monitoringkonzept entwickelt.

##### 3.1.1 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. Wenn im Rahmen der Bauwerksprüfung, der objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) oder dem Einsatz von Zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP) Schäden am Bauwerk festgestellt werden, kommt der Anwendungsfall zum Einsatz [6; 7]. Zumeist wird ein lokales Monitoringsystem zur Überwachung des Schädigungsfortschritts eingesetzt, damit ist eine Abschätzung der weiteren lokalen Entwicklung möglich. Hiermit wird erreicht, dass die Restnutzungsdauer des Bauwerks verlängert und die Sicherheit erhöht wird. Beispiele für den Einsatz dieses Anwendungsfalls werden in der Tabelle 1 aufgeführt, den angeführten Literaturstellen können weitere Informationen entnommen werden.

Tabelle 1. Anwendung von Monitoring bei bekannten und lokal verorteten Schäden

<b>Brückentyp</b>	<b>Schaden</b>	<b>Messtechnik</b>	<b>Literatur</b>
Stahlbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte aus 1971	u. a. außerplanmäßige Stellung der Rollenlager	induktive Wegaufnehmer	[8; 9]
semiintegrale Spannbetonbrücke aus 1954	Rissfeststellung bei Bauwerksprüfung	Wegaufnehmer	[3]
Stahlbrücke aus 1979	Abschätzung der tatsächlichen Beanspruchung im Pfeilerbereich	Neigungssensoren	[3]

### 3.1.2 Monitoring bei bekannten Defiziten aus Nachrechnung oder Konstruktion

Dieser Anwendungsfall kommt bei Bauwerken mit Defiziten, welche im Rahmen der Nachrechnung oder an ähnlichen Konstruktionen festgestellt wurden, zum Einsatz. Sichtbare Schäden, die Art des Schadens und der Schadensort sind bei diesem Anwendungsfall häufig unbekannt, daher wird ein globales Monitoring zur Überwachung des defizitären Bauwerks eingesetzt. Die Methoden der globalen Bauwerksüberwachung basieren auf der Annahme, dass Schädigungen am Bauwerk anhand von Änderungen des globalen Tragverhaltens erkannt werden. Die Messungen dienen dazu, Veränderungen, welche sich im Lauf der Zeit am Bauwerk entwickeln, zu erfassen. Auf die Art des Schadens und den Schadensort kann über die Messungen der Parameter und die spätere Auswertung Rückschluss gezogen werden. Unter der Voraussetzung eines duktilen Bauwerksverhaltens 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. [10; 11]. Alternativ kann das globale Monitoring auf die Detektion der Schädigungsursache ausgelegt werden. Beispiele für den Einsatz dieses Anwendungsfalles sind Brücken mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl oder mit Koppelfugenproblematik, wie die Beispiele in Tabelle 2 zeigen.

Tabelle 2. Anwendung von Monitoring bei bekannten Defiziten aus der Nachrechnung oder ähnlichen Konstruktionen

<b>Brückentyp</b>	<b>Defizit</b>	<b>Messtechnik</b>	<b>Literatur</b>
Spannbetonbrücke aus 1968	Einsatz eines spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahls	Schallemission	[8]
Spannbetonbrücke aus 1967	Einsatz eines spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahls	Schallemission; Neigungssensoren; faseroptische Sensoren	[12]
Spannbetonbrücke mit Balken-/Plattenmischsystem aus 1960	Koppelfugen	Dehnungsmesssensoren; Temperatursensoren	[5]

### 3.1.3 Monitoring zur Ermittlung von Einwirkungen

Für den Anwendungsfall „Monitoring zur Ermittlung der Einwirkungen“, können direkte Einwirkungen aus äußeren Lasten (Eigenlast, Verkehr, Wind, Schnee) und indirekte Einwirkungen infolge behinderter Verformungen durch klimatische Einwirkung oder von Setzungen unterschieden werden.

Die Erfassung der folgenden Aspekte ist bei Brücken der Bundesfernstraßen möglich:

- Temperatur: Mithilfe von Temperatursensoren wird der Einfluss der Temperatur in und am Bauwerk gemessen. Dieses spielt insbesondere bei der Kompensation des Temperatureinflusses auf die Messung eine große Rolle. Bei der Überwachung der Koppelfuge stellt die Temperatur die maßgebende Einwirkungsgröße für die Bewertung dar.
- Dauerhaftigkeitsparameter: Feuchte und Chlorid stellen eine weitere direkte Einwirkung dar, welche mittels eines Monitoringsystems überwacht werden können.
- Verkehr: Die Einwirkungen des Verkehrs sind eine weitere wichtige Kenngröße, hierbei sind Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung von Bedeutung, beispielsweise für die Erstellung eines objektbezogenen Verkehrslastmodells.

Die Tabelle 3 zeigt Beispiele aus der Literatur für den beschriebenen Anwendungsfall.

Tabelle 3. Anwendung von Monitoring zur Ermittlung von Einwirkungen

Brückentyp	Ziel	Messtechnik	Literatur
vorgespannter Stabbo- gen aus 1968	Erstellung eines objektbezogenen Ziellastniveaus	Dehnmessstreifen; Tem- peratursensoren	[8]
Stahlbrücke mit or- thotroper Fahrbahnplatte aus 1974	Erfassung des tatsächlichen Tragver- haltens unter Gebrauchslast und Er- stellung eines objektbezogenen Ver- kehrslastmodells	Dehnmessstreifen; Tem- peratursensoren	[3]
Stahlverbundbauwerk in Segmentbauweise (Pi- lotprojekt)	Überprüfung einer möglichen Depas- sivierung	Anodenleiter	[3]

### 3.2 Anwendungsfälle mit ersten Einsatzbeispielen

Die Anwendungsfälle „Monitoring zur Begleitung bedeutender Bauwerke“ und „Monitoring zur Unterstützung der Bauwerksprüfung“ haben im Bundesfernstraßennetz noch keine große Bedeutung. Erste Praxisanwendungen zeigen aber das Potenzial auf und können als Grundlage für die verstärkte Implementierung genutzt werden.

Der Anwendungsfall „Monitoring zur Begleitung bedeutender Bauwerke“ kommt bei Bauwerken zum Einsatz, deren Ausfall große Auswirkungen auf das Verkehrsnetz haben kann. Als sinnvolle Ergänzung zur Sicherstellung der Verfügbarkeit können diese Bauwerke mit einem globalen Monitoring ausgestattet werden. Das globale Monitoring wird auch für den Anwendungsfall „Monitoring bei bekannten Defiziten aus Nachrechnung oder Konstruktion“ genutzt, der Unterschied ist, dass bei den bedeutenden Bauwerken kein Schaden oder Defizit bekannt sein muss.

Ein erstes Einsatzbeispiel ist die Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn, hier werden mit Hilfe der eingebauten Sensorik und der Aggregation der gemessenen Daten Zustandsinformationen ermittelt. Die übermittelten Zustandsinformationen ermöglichen dem Bauwerkseigentümer bei Veränderungen eine effektive Unterstützung für Erhaltungsentscheidungen [13]. Der Nutzen für den Einsatz eines präventiven Monitorings bei Brücken ohne Schäden konnte in [14] dargelegt werden.

Im Rahmen der Bauwerksprüfung nach [7] kann Monitoring zur Unterstützung eingesetzt werden, um ergänzende Informationen zur Optimierung der Beurteilung des Zustands zu ermöglichen. Dieses Vorgehen beschreibt den Anwendungsfall „Monitoring zur Unterstützung der Bauwerksprüfung“. Teile der handnahen Prüfung können durch digitale Tools angereichert und verbessert werden. Ausführungsbeispiele für diesen Anwendungsfall sind:

- Instrumentierte Bauteile: Instrumentierte Bauteile ermöglichen Aussagen zu vorhandenen Schäden an den entsprechenden Bauteilen und ggf. die Prognose zukünftiger Entwicklungen. Einsatzbeispiele sind instrumentierte Fahrbahnübergänge, welche die messtechnische Erfassung von Zustandsinformationen zulassen und so eine Erhöhung in Abhängigkeit von der tatsächlichen Beanspruchung ermöglichen [15].
- Bildbasierte Verfahren: Im Rahmen des bildbasierten Monitorings werden Bauwerksbilder automatisiert erfasst und im Anschluss die georeferenzierte 3D-Geometrie des Bauwerks ermittelt. Dies ermöglicht die Identifikation von Stellen am Bauwerk, die im Rahmen der Bauwerksprüfung genauer untersucht werden sollen. Weiterhin ist eine KI-gestützte Auswertung der Bilder und damit automatisierte Erkennung von Rissen, Abplatzungen oder Veränderungen möglich [16; 17].

### 3.3 potenzielle zukünftige Anwendungsfälle

Die zukünftigen Anwendungsfälle zeigen Potenziale für weitere Einsatzgebiete des Monitorings auf.

Der Anwendungsfall „Monitoring im prädiktiven Lebenszyklusmanagement“ wird im Rahmen der Umsetzung digitaler Zwillinge, welche im BIM Masterplan angekündigt werden, eine große Bedeutung bekommen [18]. Monitoring ist im digitalen Zwilling ein Teil der Zustandserfassung und liefert notwendige Informationen zum aktuellen Zustand des Bauwerks und ermöglicht Prognosen (Abbildung 3).

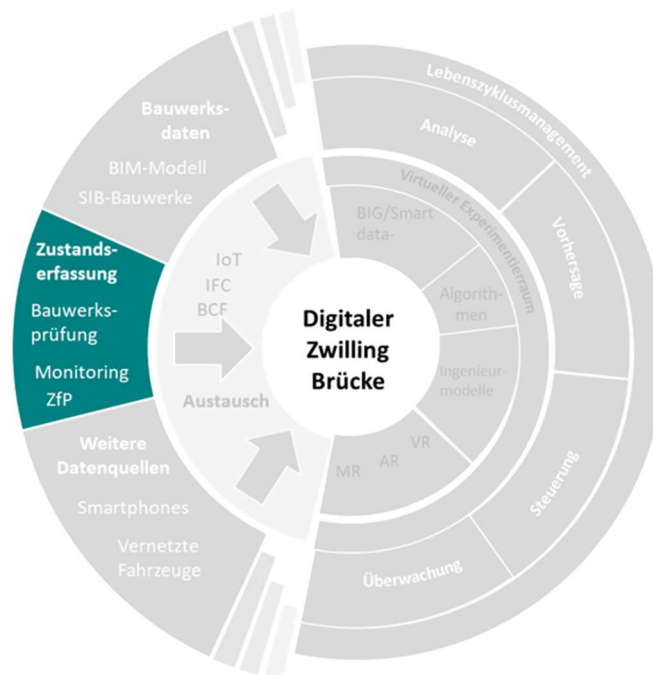


Abbildung 3: Monitoring im digitalen Zwilling (verändert nach [19])

Ziele des digitalen Zwillinges sind die Bereitstellung essenzieller Informationen für ein nachhaltiges, prädiktives Lebenszyklusmanagement, Maßnahmenempfehlungen für Bauwerksbetreibende u.a. durch Zustandsanalysen und -vorhersagen, Kosteneinsparungen für Eigentümer und Nutzer und die Erprobung innovativer Ansätze [20]. Insbesondere für die Ziele Bereitstellung essenzieller Informationen und Zustandsanalysen und -vorhersagen sind Monitoring und die daraus abgeleiteten Zustandsinformationen von großer Bedeutung.

Erste Schritte und Ideen zur Umsetzung dieses Anwendungsfalles und damit der Bereitstellung von Informationen für ein nachhaltiges, prädiktives Lebenszyklusmanagement werden



in [21] skizziert. Beispielsweise können aus den Monitoringdaten Informationen zu Schädigungsmechanismen abgeleitet werden. Diese Informationen wiederum können als Grundlage für die Ermittlung von Performancekennwerten in Kombination mit anderen Daten verwendet werden. Dieses Vorgehen dient dazu, Unsicherheiten in der Zustandsbeurteilung zu reduzieren und geeignete Instandhaltungsmaßnahmen zu identifizieren [21].

Der Anwendungsfall „Geburtszertifikat“ beschreibt die Nullmessung der Brücke, welche den Referenzzustand und das Tragverhalten einer Brücke nach deren Fertigstellung und vor der Verkehrsfreigabe anhand geeigneter Parameter darstellt. Mit diesem Vorgehen soll die Möglichkeit geschaffen werden, spätere Veränderungen und mögliche langfristige Schäden im Bauwerk rechtzeitig zu erkennen, zu bewerten und Maßnahmen zu ergreifen. Das Geburtszertifikat bildet eine Grundlage für die Interpretation der Auswirkungen von späteren Veränderungen und hilft Aussagen über das zu erwartende Verhalten der Tragwerks- und Ausstattungskomponenten zu treffen. Für das Geburtszertifikat werden physikalische (dynamische und statische) Parameter, chemische Parameter und die georeferenzierte, dreidimensionale Rekonstruktion des Bauwerks ermittelt. Der ermittelte 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 [22–24]. In [16] 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. Für die Bundesfernstraßen gibt es noch kein allgemein anerkanntes Konzept für die Erstellung von Geburtszertifikaten. Im Rahmen der BAST-Forschung werden die Ermittlung des Referenzzustands und der Einsatz von Sensoren im Neubau (hier insbesondere faseroptische Sensoren) aktuell untersucht.

#### **4. Fazit**

Monitoring im Bereich der Bundesfernstraßen ist derzeit im Wesentlichen auf den Einsatz bei bekannten Schäden und Defizite beschränkt, obwohl auch für den standardmäßigen Betrieb der Nutzen von Monitoring bereits klar belegt werden kann. Eine Abfrage bei den Straßenbauverwaltungen hat dieses bestätigt. Hemmnisse für den Einsatz sind neben wenig verbreitetem Wissen zum Thema Monitoring, das Fehlen von Personal, Finanzierungsmöglichkeiten und Standardisierungen.

Um die vielfältigen Möglichkeiten für den Einsatz von Monitoring zu verdeutlichen, werden unterschiedliche Anwendungsfälle von Monitoring und deren Potentiale betrachtet. Der Artikel beinhaltet eine Darstellung der heute bereits häufigen Anwendungsfälle anhand von Beispielen, sowie einen Ausblick für weitere Anwendungsfälle mit großem Potenzial.

Im Rahmen der Entwicklung von einem reaktiven und schadensbasierten Vorgehen hin zu einem prädiktiven Vorgehen in der Bauwerkserhaltung spielt eine monitoringbasierte Zustandserfassung und -bewertung in Verbindung mit Prognosetools eine große Rolle. Monitoring stellt eine Möglichkeit dar, weitergehende Informationen zum Zustand eines Bauwerks bereitzustellen. Mit dem zunehmenden Einsatz von neuen Technologien, z.B. KI, wird es zukünftig möglich sein, aus den verbesserten Zustandsinformationen szenariobezogene Prognosen zu verschiedenen relevanten Aspekten, wie der Restlebensdauer, zu treffen.

Sowohl die vorhandenen Erkenntnisse und Informationen aus der Forschung als auch neue Entwicklungen der Industrie sollten verstärkt in Konzepte und Ideen umgesetzt werden, um

diese für die verschiedenen Verkehrsträger in der Praxis nutzbar zu machen . Mit einem verbesserten Lebenszyklusmanagement und einem daraus resultierenden verbesserten Zustand der Verkehrsinfrastruktur können für die Ingenieurbauwerke in den Bereichen Verfügbarkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit deutliche Fortschritte erzielt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Deutscher Beton- und Bautechnikverein (2018) *Merkblatt: Brückenmonitoring*.
- [2] Hindersmann, I. (2021) *Anwendung von Monitoring bei Brücken der Bundesfernstraßen und zukünftige Monitoringstrategien* in: Krieger, J. [Hrsg.] *Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur: Tagungshandbuch 2021*. Tübingen: Expert Verlag.
- [3] Novák, B. et al. (2023) *Erfahrungssammlung Monitoring von Brückenbauwerken – Vorabveröffentlichung*.  
[https://www.bast.de/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Ingenieurbau/Downloads/Erfahrung\\_Bruecken.html](https://www.bast.de/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Ingenieurbau/Downloads/Erfahrung_Bruecken.html) [Zugriff am: 27.10.23].
- [4] DGZfP (2022) *Merkblatt B 09 – Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken*.
- [5] Schubert, M. et al. (2020) *Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken und Ingenieurbau B156.
- [6] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007) *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING - Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA)*.
- [7] DIN 1076:1999 *DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung*.
- [8] Hindersmann, I.; Müller, M.; Kaplan, F. (Juni 2023) *Strategischer Einsatz von Monitoring bei Ingenieurbauwerken mit Anwendungsbeispielen* in: Curbach, M. et al. [Hrsg.] *12. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen: 01. Juni 2023*. Dresden: Institut für Massivbau Technische Universität Dresden.
- [9] Jansen, A.; Geißler, K. (2020) *Ausreißerererkennung zur Strukturüberwachung von Bestandsbrücken durch Bauwerksmonitoring mit vier Signalmerkmalen* in: Isecke, B.; Krieger, J. [Hrsg.] *Esslingen*. Expert Verlag.
- [10] Retze, U. (2007) *Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke* [Dissertation]. Universität der Bundeswehr.
- [11] Schnellenbach-Held, M.; Karczewski, B.; Kühn, O. (2014) *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.
- [12] Fischer, O. et al. (2022) *Wirklichkeitsnahe Beurteilung des Brückenbestands mit innovativer Sensorik - SpRK-Monitoring der Kreuzhofbrücken, München* in: Berger, J. [Hrsg.] *Innsbrucker Bautage 2022: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Feix*. Innsbruck: Studia Universitätsverlag Innsbruck.
- [13] Windmann, S. (2022) *Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau B178.
- [14] Sousa, H.; Courage, W. (2022) *Value of information of a pro-active SHM-based tool supported by advanced FE models and Bayesian statistics towards efficiency in bridge management* in: *Structure and Infrastructure Engineering* 18, H. 4, S. 554–572. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1978507>



- [15] Haardt, P. et al. (2017) *Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn* in: Bautechnik 94, H. 7, S. 438–444. <https://doi.org/10.1002/bate.201700035>
- [16] Kühne, J. et al. (2021) *Die Digitalisierung der Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen und Brücken im Vergleich* in: Stahlbau 90, H. 2, S. 128–137. <https://doi.org/10.1002/stab.202000093>
- [17] Morgenthal, G.; bim auf (2021) *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.
- [18] BMVI (2021) *Masterplan BIM Bundesfernstraßen*.
- [19] Nieborowski, S. et al. (2023) *Digitaler Zwilling Brücke im Betrieb – Mögliche Anwendungsfälle* in: Bautechnik 100, H. 2, S. 86–93. <https://doi.org/10.1002/bate.202200089>
- [20] Oeser, M. et al. (2023) *Vom digitalen Zwilling zum digitalen Asset-Management* in: Curbach, M.; Marx, S. [Hrsg.] *Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken: 32. Dresdner Brückenbausymposium : 31. Mai 2023*. Dresden: Technische Universität Dresden Institut für Massivbau.
- [21] Morgenthal, G. et al. (2023) *Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken – unveröffentlichter Bericht zu FE 69.0006. Veröffentlichung in Vorbereitung*.
- [22] Bundesamt für Straßen (2005) *Richtlinie - Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen*.
- [23] Bundesamt für Straßen (2005) *Richtlinie Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen*.
- [24] Transport Research Board (2019) *Primer on Bridge Load Testing* [online] [Zugriff am: 21. Apr. 2023].