Intelligente Brücke

Peter HAARDT [1]
[1] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach
Kontakt E-Mail: haardt@bast.de

Kurzfassung. Das Bundesfernstraßennetz steht vor großen Herausforderungen: alternde Strukturen, ansteigende Verkehrsbelastungen, neue Qualitätsanforderungen und begrenzte Ressourcen für die Instandhaltung und Modernisierung des Brückenbestands. Um ein zuverlässiges Straßennetz aufrechtzuerhalten, müssen neue, innovative Ansätze verfolgt werden. In Zukunft sollen Brücken in der Lage sein, relevante Informationen über Laständerungen und Widerstände als Grundlage für ein vorausschauendes Erhaltungsmanagement bereitzustellen. Dies erfordert flexible Systeme zur sensorgestützten Erfassung relevanter Daten, differenzierte Bewertungsverfahren und ein entsprechend erweitertes Erhaltungsmanagement. Der BASt-Projektcluster "Intelligente Brücke" zielt auf ein solches adaptives System zur Information und ganzheitlichen Bewertung ab. Der Hauptvorteil der Intelligenten Brücke ist die kontinuierliche Information über die aktuelle Zuverlässigkeit und die verbleibende Lebensdauer der gesamten Brücke. Die ersten Pilotstudien (duraBASt, Digitales Testfeld Autobahn) sowie aktuelle Forschungsprojekte (z. B. OSIMAB) zeigen einige signifikante Aspekte auf.

1. Einführung

Das Bundesfernstraßennetz steht vor großen Herausforderungen. Der Brückenbestand altert und die notwendigen Instandhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen sind trotz erheblicher finanzieller Belastungen kurzfristig nicht realisierbar. Dies führt zu gravierenden und nicht zu akzeptierenden Einschränkungen der Verfügbarkeit. Die meisten der rund 39.500 Brücken im Bundesfernstraßennetz wurden in den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts gebaut. Die damaligen Planungs- und Konstruktionsvorschriften entsprechen nicht unseren heutigen Anforderungen. Daraus resultieren Defizite hinsichtlich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit, die die Restnutzungsdauer der vorhandenen Brücken begrenzen.

Derzeit ist das Erhaltungsmanagement primär schadensbasiert und reaktiv. Schäden werden bei den periodischen Bauwerksprüfungen in der Regel erst entdeckt, wenn sie sichtbar sind. Treffen jedoch baustoffliche oder konstruktive Defizite auf einschränkende Rahmenbedingungen, wie z.B. begrenzte Budgets oder Planungskapazitäten, so sind verbesserte Informationen und zuverlässige Prognosen unerlässlich. Dazu müssen neue, innovative Ansätze zur Informationsbereitstellung und Evaluierung in das Erhaltungsmanagement integriert werden. Im Rahmen der "Hightech-Strategie 2020" ist die Bundesregierung bestrebt, Lösungen für die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts durch die Integration moderner Informationstechnologien zu finden. Ziel ist es, intelligente Produkte, Techniken und Verfahren zu entwickeln und anzuwenden, die es ermöglichen, relevante Informationen mit Hilfe digitaler Techniken zu sammeln und auszuwerten. Von diesen Entwicklungen

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/

kann insbesondere auch die Wertschöpfungskette Planung, Konstruktion, Bau und Betrieb von Elementen der Straßeninfrastruktur profitieren.

Eine optimierte Erhaltungsplanung erfordert eine Strategie, die es ermöglicht, potenzielle Schäden zu antizipieren. Ziel im Sinne einer prädiktiven Erhaltungsstrategie ist es, die Reserven der Brücken und ihrer Komponenten voll auszuschöpfen und gleichzeitig Ausfälle zu vermeiden, um eine bestmögliche Verfügbarkeit zu gewährleisten. Voraussetzung dafür ist die Erfassung der relevanten Einwirkungen und Bauwerksreaktionen, z. B. durch geeignete Sensoren, sowie die Analyse und Bewertung dieser Informationen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Restlebensdauer, z. B. mit stochastischen Methoden. Diese Ansätze gehen über die Ziele eines konventionellen Monitorings hinaus und stellen für Verkehrsinfrastrukturen einen Paradigmenwechsel dar.

In diesem Zusammenhang wurde in der BASt der Forschungscluster "Intelligente Brücke" gegründet. Während sich erste konzeptionelle Projekte auf Machbarkeit und Grundlagen für Bewertungsmethoden und Entwicklungsprojekte auf intelligente Bauteile wie z. B. instrumentierte Fahrbahnübergänge und Brückenlager konzentrierten, liegt der aktuelle Schwerpunkt der Arbeiten auf Pilotstudien und vergleichenden Untersuchungen. Weitere Informationen finden Sie auch unter www.intelligentebruecke.de.

2. Intelligente Brücke

Das System "Intelligente Brücke" ist modular aufgebaut, so dass es individuell an die Bedürfnisse der unterschiedlichen Brückenkonstruktionen angepasst werden kann. Mit Hilfe von innovativer Sensorik in unterschiedlichen Bauteilen und auf der Grundlage analytischer Ingenieurmodelle wird der Zustand und die Zuverlässigkeit der Brückenkonstruktion und ihrer Komponenten sowie die Restlebensdauer ermittelt. Ein zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement wird durch die Verknüpfung von Prognosemodellen und verfügbaren Informationen aus bestehenden Datenbanken realisiert [1]. Aus objektbezogenen Betrachtungen lässt sich der Zustand von Brücken gleichen Brückentyps und gleicher Bauart ableiten und somit ein netzbezogenes Erhaltungsmanagement unterstützen. Damit kann eine begrenzte Anzahl instrumentierter Brücken ausreichen, um eine netzweite Verbesserung des Erhaltungsmanagements zu erreichen. Abbildung 1 zeigt ein Schema der Intelligente Brücke. Der wesentliche Unterschied zu SHM besteht darin, dass die Erfassung, Analyse und Auswertung der Messdaten ganzheitlich und im Lebenszyklus des Bauwerks erfolgt.

Obwohl für Neubauten konzipiert, kann der Einsatz von intelligenten Elementen auch für bestehende Brücken sinnvoll sein. Gerade weil Schäden und Schwachstellen in bestehenden Bauwerken bereits bekannt sind, ist es hilfreich, den Zustand des Bauwerks hinsichtlich Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit und Restnutzungsdauer ganzheitlich und zeitnah zu bewerten, um auf mögliche Strukturveränderungen effektiv und effizient reagieren zu können [2].

Zur Erfassung von bauwerks- und bauteilbezogenen Messgrößen werden geeignete "intelligente Komponenten" eingesetzt. Angepasste Analyse- und Auswertemethoden sind erforderlich. Die zu integrierenden Systeme sollen adaptiv arbeiten: Die gesammelten Informationen werden mit Hilfe eines zuverlässigkeitsbasierten Expertensystems ganzheitlich zusammengeführt und ausgewertet, einschließlich der bisher verfügbaren Informationen aus Datenbanken, so dass online Aussagen über die Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit und Restnutzungsdauer der Intelligente Brücke und die daraus resultierenden Erhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden können.

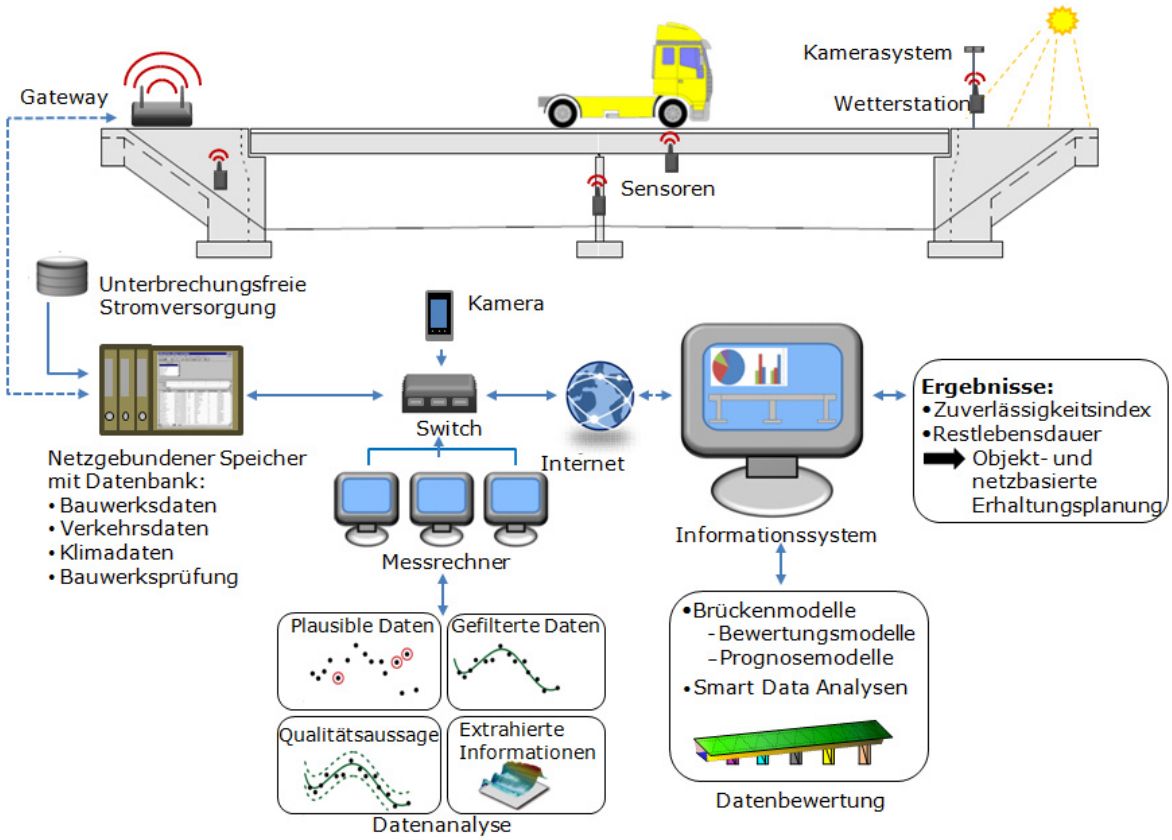

Abb.1: Schema der Intelligenten Brücke

3. Pilotstudie „Digitales Testfeld Autobahn“

Ein wichtiger Vorteil bei der Ausrüstung einer neuen Brücke mit sensorbasierten Messsystemen ist, dass das Tragverhalten und der Zustand der neuen Brücke sowie deren Komponenten präzise und zuverlässig erfasst werden können. Das erste Brückenbauwerk, das mit den relevanten Aspekten einer Intelligenten Brücke ausgestattet ist, wurde im Digitalen Testfeld Autobahn realisiert, einem vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zur Verfügung gestellten Testareal im Zuge der BAB A 9. Hier werden Innovationen rund um automatisiertes und vernetztes Fahren und intelligente Infrastrukturen erprobt, bewertet und weiterentwickelt. Die für die Pilotstudie genutzte 4-feldrige Spannbetonhohlkastenbrücke ist 156 m lang, 12 m breit und hat eine Gesamtfläche von ca. 2.445 m^2. Folgende Aspekte der Intelligenten Brücke sind eingebunden:

- ein Informationssystem zur Bewertung der Zuverlässigkeit und Restnutzungsdauer der Gesamtstruktur mittels analytischer Brückenmodelle und Auswertemethoden (dieses System erfasst und bewertet auch die Verkehrsbelastung der Brücke),
- instrumentierte Bauteile (Fahrbahnübergang und Lager instrumentiert) zur Zustandsbewertung auf Elementebene und zur Unterstützung des o. g. Informationssystems,
- ein drahtloses Sensornetzwerk mit einer Vielzahl üblicher Sensoren zur Erfassung von Temperatur, Dehnungen, Verschiebungen, Neigungen und Beschleunigungen
- sowie ein Kamerasystem zur Unterstützung der Verkehrslastauswertung.

Ziel dieser Pilotstudie ist es, aktuelle technologische Entwicklungen an einem Brückenbauwerk aufzuzeigen, die Funktionalität des Gesamtsystems zu verdeutlichen und einzelne Aspekte weiterzuentwickeln. Die gesammelten Informationen werden online der zu-

ständigen Straßenverwaltung zur Verfügung gestellt [4].

Ein „Network Attached Storage“ (NAS) zur Speicherung aller Daten ist eingebunden. Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung sorgt dafür, dass der NAS bei einer Stromunterbrechung abschaltet und nach der Stromunterbrechung automatisch wieder anläuft, um Datenverluste zu minimieren. Darüber hinaus verfügt die Intelligente Brücke über einen Internetzugang, der für Fernüberwachungsaspekte wichtig ist.

Ein Informationssystem ermittelt alle relevanten Einwirkungen und Bauwerksreaktionen und leitet daraus Informationen über den Zustand und die Zuverlässigkeit der Konstruktion ab. Umfassende Verkehrsdaten werden durch Messung und Auswertung von Dehnungen und Verschiebungen des Überbaus, des instrumentierten Fahrbahnübergangs und der Lager ermittelt (Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit, Gesamtgewicht, statische und dynamische Achslast, Achsabstand und die Anzahl der Achsen eines Fahrzeugs). Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird durch Dehnungsmessungen von zwei in Reihe geschalteten DMS und die Anzahl der Fahrzeugachsen und Achsabstände durch die Auswertung lokaler Messpunkte hinsichtlich Signalspitzen und Zuordnung eines Fahrzeugs bestimmt. Durch den Vergleich der ermittelten verkehrsbedingten Messkurven mit berechneten Einflusslinien können Fahrzeuggewichte abgeleitet werden.

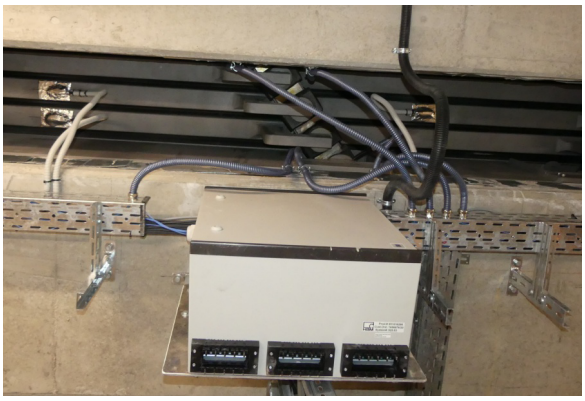

Abb.3: Instrumentierter Fahrbahnübergang

Fahrbahnübergänge werden eingesetzt, um temperatur- und verkehrsbedingte Brückenbewegungen auszugleichen. Sie werden als Verschleißteile mit begrenzter Lebensdauer betrachtet, weil sie hohen dynamischen Einflüssen ausgesetzt sind. Die Brücke ist mit einem instrumentierten Lamellenfahrbahnübergang ausgestattet, der Kraft-, Seilzug- und Beschleunigungssensoren zur Erfassung von Lasten, Frequenzen und Lamellenabständen aufweist (Abbildung 3). Über die Änderung der Fugenspaltweiten kann eine Aussage bzgl. Restnutzungsdauer der Konstruktion ermittelt werden. Weiterhin unterstützen die Messergebnisse die Ermittlung der o. g. Verkehrsdaten.

Brückenlager gehören zu den Basiskomponenten einer Brücke, da sie Verschiebungen, Drehungen und eine definierte Lastabtragung des Brückenüberbaus ermöglichen. An der Brücke sind zwei Kalottenlager eingebaut, die Druck- und Wegsensoren zur Erfassung der Lagerbelastung, der Lagerdrehung sowie des Lagerweges enthalten (Abbildung 4). Die gesammelten Daten erlauben eine Selbstüberwachung der Lager und eine Ermittlung der Anzahl der Fahrzeuge auf der Brücke.

Das drahtlose Sensornetzwerk der Intelligente Brücke gibt die erfassten Daten zur Weiterverarbeitung an einen netzwerkgebundenen Speicher weiter. Lange Distanzen zwischen den Sensoren werden durch Repeater überbrückt. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs bei der Fernübertragung wurde ein Schlaf-Wach-System entwickelt, bei dem Energie nur während des Datenaustausches verbraucht wird. Weiterhin wurden spezielle Gateways integriert, d. h. spezielle Sensorknoten, die eine Verbindung zwischen dem Sensor-

netzwerk und dem Netzwerkspeicher herstellen. Das installierte Sensornetzwerk beinhaltet auch eine Wetterstation und Temperatur-, Dehnungs-, Kraft- und Neigungssensoren.

Abb. 4: Instrumentiertes Brückenlager

Das Gesamtsystem wird in einem fünfjährigen Untersuchungsprogramm in Zusammenarbeit mit der Autobahndirektion Nordbayern betrieben und analysiert. Ziel des Untersuchungsprogramms ist es, die Funktionalität und Anwendbarkeit für zuverlässigkeitsorientierte Zustandsbewertungen und Prognosen zu demonstrieren. Die gemessenen Daten werden mit ermittelten Grenzwerten verglichen. Überschreitet der gemessene Wert die festgelegten Schwellenwerte, so wird eine Warnung erzeugt. Das Projekt beinhaltet ebenfalls ein Datenmanagement, das die Datenverarbeitung für die Online-Präsentation beinhaltet. Hierfür ist die automatische Auswertung der Daten in Bezug auf Lastmodell, Klimadaten und Brückenparameter vorgesehen. Die globale Zuverlässigkeit der Brücke wird in Form eines Zuverlässigkeitsindexes ermittelt und darüber die Restnutzungsdauer des Bauwerks bestimmt. Zunächst werden die Messdaten noch in den beteiligten Labors analysiert. Die Endausbaustufe beinhaltet eine automatische Auswertung der Messdaten vor Ort. Mit Hilfe des Internetzugangs werden Auswertungen online zur Verfügung gestellt.

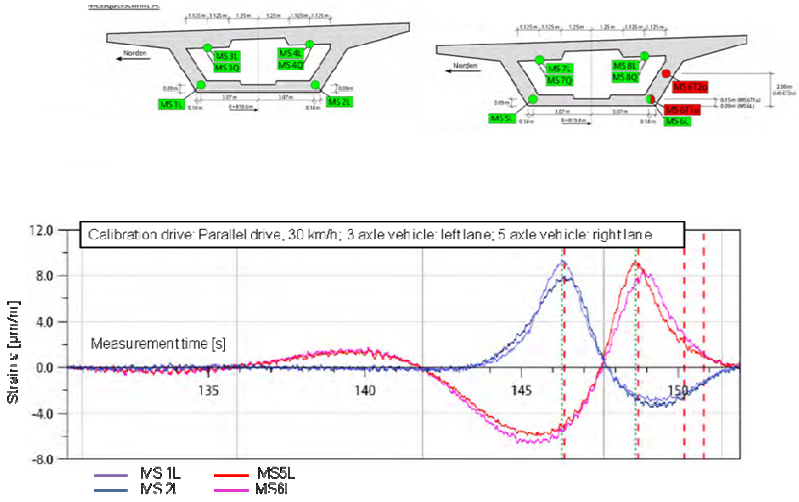

Abb. 5: Ergebnisse von Verformungsmessungen an 4 Messstellen im Brückenüberbau im Verlauf der Kalibrierfahrten

In einem ersten Schritt wurde eine Offline-Auswertung von Messdaten, die Anpassung der Auswertealgorithmen an die örtlichen Gegebenheiten und eine Qualitätskontrolle der gesammelten und ausgewerteten Daten durchgeführt. Die Datenauswertung basiert auf einem vordefinierten FE-Systemmodell. Mit Hilfe von Kalibrierfahrten wurde das FE-

Modell an das reale Strukturverhalten angepasst. Dafür wurden vor Verkehrsfreigabe der Brücke Ende 2016 insgesamt 36 Kalibrierfahrten mit verwogenen und vermessenen LKWs bei Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt. Abbildung 5 enthält exemplarische Messergebnisse. Die dargestellten Verformungsmessungen erfolgten mittels DMS an zwei Bewehrungsstäben im rechten und im linken Steg des Überbaus. Durch den Vergleich der Dehnungen ist auch die Identifizierung der benutzten Fahrspur möglich.

4. Pilotstudie duraBASt

DuraBASt ist eine von der BASt betriebene Untersuchungsstrecke in einem bisher ungenutzten Areal innerhalb des AK Köln-Ost (BAB A3/A4). Es bietet die Möglichkeit in realitätsnahen, groß angelegte Studien neue technologische Entwicklungen für Straßeninfrastrukturen zu evaluieren. In dem Areal befindet sich eine kleine zweifeldrige Spannbetonhohlkastenbetonbrücke aus dem Jahr 1972, die nie in Betrieb genommen worden ist. Die Brücke ist 66 m lang, 14 m breit und hat eine Gesamtfläche von ca. 950 m^2. Im Verlauf einer grundhaften Instandsetzung erfolgte bereits eine erste Instrumentierung mit Sensoren zur Erfassung von Parametern der Dauerhaftigkeit und von Verformungen (Abbildung 6).

Unter Dauerhaftigkeit versteht man in diesem Zusammenhang den Grad der Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Einwirkungen während der vorgesehenen Nutzungsdauer unter Berücksichtigung regelmäßiger Instandsetzungsmaßnahmen. Bei Betonbrücken besteht der Hauptaspekt im Eindringen von Chloriden und diesbezüglicher Korrosion. Relevante Parameter sind daher Feuchte, Temperatur und Korrosionsffekte.

Abb. 6: Instrumentierte Bridge im duraBASt Testgelände

Für Vergleichsstudien mit standardisiertem Chlorideintrag wurden in die neu hergestellten Kappen der duraBASt-Brücke unterschiedliche aktuelle Sensortypen (drahtlose RFID-Sensoren und drahtgebundene Sensoren wie Anodenleiter und Multiring-Elektrode) eingebaut (Abbildung 7). Ziel ist es, Informationen über relevante Betriebsparameter zu erhalten: Zuverlässigkeit der Messungen, der erfolgreiche Umgang mit RFID-Sensoren, die Möglichkeiten der Datenerfassung und ein Vergleich der unterschiedlichen Messtechniken.

Für die Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens der Brücke erfolgt derzeit eine umfassende Nachrechnung nach dem aktuellen Regelwerk (Nachrechnungsrichtlinie) und es wird ein FE-Modell zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens erarbeitet. Ziel ist es, die vorhandenen strukturellen Defizite als Grundlage für ein Monitoring-Konzept zu definieren nach dem eine weitere Instrumentierung der Brücke erfolgt. Eine experimentelle Bewertung der Tragsicherheit ist geplant, dafür werden Belastungsver-

suche mit definiertem Fahrzeuggewicht und definierter Geschwindigkeit durchgeführt. Die Belastungstests werden einerseits für die Bewertung und Weiterentwicklung des FE-Modells und andererseits für die Analyse von Auswerteelementen des eingebauten Überwachungssystems [3] eingesetzt.

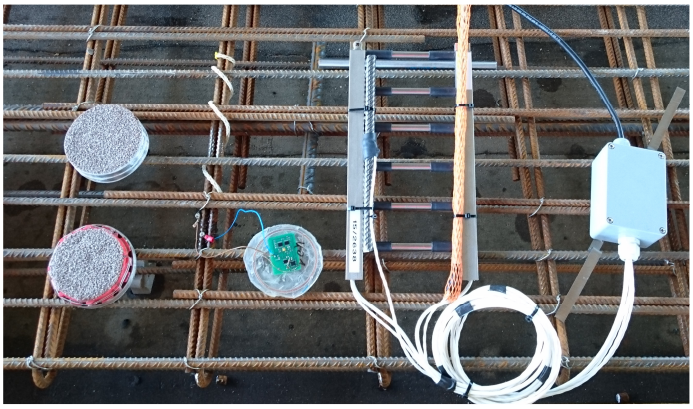

Abb. 7: Eingebaute Sensorik zur Erfassung von Dauerhaftigkeitsparametern

5. Online Sicherheitsmanagementsystem für Brücken (OSIMAB)

Ein weiteres BASt-Projekt mit dem Akronym OSIMAB zielt darauf ab, ein webbasiertes Risikomanagement-Tool zu entwickeln, das ein prädiktives Erhaltungsmanagement durch die Verknüpfung vorhandener Daten und Messdaten in Verbindung mit einem Systemmodell ermöglicht. Im Rahmen der zunehmenden Digitalisierung liegen bereits heute umfangreiche Daten aus dem Umfeld von Straßen vor. In diesem Zusammenhang sind die vorhandenen Struktur-, Verkehrs- und Klimadaten aufzulisten. Für Brückenbauwerke können zusätzliche Informationen mit Hilfe von statischen Überwachungssystemen gewonnen werden. Insgesamt ermöglicht dies einen innovativen Ansatz, strukturelle Defizite und Risiken frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls rechtzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Bislang werden notwendige Erhaltungsmaßnahmen in der Regel auf Grundlage der diskreten Zustandsbeurteilung geplant, was häufig zu erheblichen und zum Teil langwierigen Nutzungseinschränkungen der betroffenen Strukturen führt. Im Unterschied dazu verfolgt OSIMAB einen ganzheitlichen Ansatz zur Überwachung und Zustandsbewertung von Straßenbrücken, der dem der Intelligenten Brücke entspricht, jedoch in erster Linie für bestehende Bauwerke gilt. Neben der Ermittlung und Bewertung des Ist-Zustandes sind Prognosen aus den gewonnenen Daten über die Struktur und deren zeitliche Veränderungen in Verbindung mit Vorhersagemodellen auf analytischer und numerischer Ebene zu erstellen.

Durch die anschließende Bewertung potenzieller Risiken und möglicher Maßnahmen zur Aufrechterhaltung bzw. Wiederherstellung der geplanten Zielzuverlässigkeit schafft OSIMAB eine Plattform, die eine frühzeitige Einführung von Maßnahmen zur Sicherstellung der Verfügbarkeit von Brücken durch einen ganzheitlichen Ansatz (Zusammenführung vorhandener Daten, neue zu erhebende Daten, spezielle Datenanalyseverfahren und Modellrechnungen) ermöglicht. Verkehrseinschränkungen werden minimiert und die Planung und Durchführung notwendiger Maßnahmen kann direkt oder mit ausreichender Vorlaufzeit erfolgen. Wichtige Aufgaben sind die Entwicklung und Kalibrierung von Sensorkonzepten, Systemmodellen und intelligenten Datenanalysemethoden auf Basis der umfangreichen vorhandenen Datengruppen sowie die Entwicklung von Risikoanalyse- und -management-Tools. Erste Ergebnisse werden 2018 vorgestellt.

6. Schlussfolgerungen

Mit Blick auf die erwähnten begrenzten Ressourcen und steigenden Anforderungen wird ein prädiktives Erhaltungsmanagement immer wichtiger. Das Konzept der Intelligenten Brücke basiert auf dem Erfassen und Bewerten von relevanten Informationen über eine Brückenkonstruktion und dies könnte in Zukunft eine wichtige Rolle im Erhaltungsmanagement spielen. Es ist zu beachten, dass die Intelligente Brücke als Ergänzung und nicht als Ersatz für die Brückenprüfungen dient. Zu berücksichtigen ist auch, dass Intelligente Brücken teure Lösungen sind und zusätzliche Kosten für Anschaffung, Betrieb und Wartung anfallen. Dennoch ergeben sich für die Betreiber von Brücken erhebliche Vorteile. Der wichtigste Vorteil ist der Zugewinn an Sicherheit. Sicherheitsrelevante Veränderungen werden erkannt, indem alle relevanten Informationen kurzfristig verfügbar gemacht werden können. Darüber hinaus ermöglicht die Eigenüberwachung relevanter Bauteile wie Lager und Fahrbahnübergänge eine Funktionskontrolle und Qualitätssicherung. Ein weiterer Vorteil des Einsatzes von Sensoren zur Beurteilung einer Brückenkonstruktion ist, dass die Ergebnisse objektiv sind und der Zustand der Brücke kontinuierlich ermittelt werden kann.

Durch die frühzeitige Erkennung sich entwickelnder Schäden können Erhaltungsmaßnahmen langfristig geplant werden. Auf der Grundlage von Zuverlässigkeitsbewertungen ist es möglich, die Verfügbarkeit von Brückenbauwerken zu sichern. Für ein netzbezogenes Erhaltungsmanagements kann der Zustand von Brücken gleicher Brückenart und Bauzeit abgeleitet werden. Grundsätzlich reicht eine begrenzte Anzahl Intelligenter Brücken im Netz aus, um das Bestandsnetz zu überwachen. Die Integration von Sensoren und Systemmodellen in ein zuverlässigkeitsbasiertes Erhaltungsmanagement bietet auch für die Bauwerksprüfung neue Möglichkeiten. So können frühzeitig Informationen über den Zustand von unzugänglichen Bauteilen zur Verfügung gestellt werden. Ein zukünftiges Instandhaltungsmanagementkonzept könnte wie folgt umgesetzt werden:

- Weiterhin regelmäßige Bauwerksprüfung nach DIN 1076, ggf. zuverlässigkeitsbasierte Brückeninspektion, eingehende objektbezogene Schadensanalyse, verstärkter Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren, ggf. SHM.
- Ganzheitliche und lebenszyklusbezogene Monitoring- und Bewertungstechnologie für eine begrenzte Anzahl neuer Brücken zur Aktualisierung von Grenzwertfunktionen, für Systemanalysen, Prognosen und Erfahrungserfassungen.
- Kontinuierliche Mess- und Auswertetechnik für weniger robuste und hochbeanspruchte Bestandsbrücken zur Vorhersage kritischer Zustände, Ermittlung der aktuellen Zuverlässigkeit und Restlebensdauer.
- Prädiktives Erhaltungsmanagement mit präventiver Erhaltungsplanung. Das Ergebnis ist ein weitgehend reibungsloser Verkehr ohne Tragfähigkeitsdefizite. Mögliche Verkehrseinschränkungen im Falle einer baulichen Instandsetzung können selbstverständlich nicht vollständig ausgeschlossen werden.

7. Referenzen

[1] T. Neumann, P. Haardt: Intelligent Bridge – Adaptive Systems for Information and Holistic Evaluation in Real Time, *6th European Workshop on Structural Health Monitoring,* Dresden 2012

[2] S. Dabringhaus: First bridge with aspects of the „Intelligente Brücke“ released for traffic, *7th Transport Research Arena TRA,* Wien 2018

[3] S. Dabringhaus, I. Hindersmann: Intelligente Brücke – Way into practice. *4th Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Zürich 2017

[4] P. Haardt: Die Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. *Bautechnik* 94 (7) 2017, S. 438-444