

Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 193

bast

Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke

von

Martin Empelmann
Sara Javidmehr
Johannes Rathgen

Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Fachgebiet Massivbau

Andreas Hellenbrand
Markus Ulbricht
Florian Wagner

PricewaterhouseCoopers GmbH
Wirtschaftsprüfungsgesellschaft

Tanja Kessel
Julia Sietas

Technische Universität Braunschweig
Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb
Lehrstuhl für Infrastruktur- und Immobilienmanagement

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 193

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0671
Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke

Fachbetreuung
Sarah Windmann

Referat
Betonbau

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-742-6

Bergisch Gladbach, Juni 2023

Kurzfassung – Abstract

Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke

Das deutsche Bundesfernstraßennetz umfasst knapp 40.000 Brückenbauwerke und deren regelmäßige Zustandsbewertung erfordert einen hohen Einsatz finanzieller und personeller Ressourcen. In festen Zeitintervallen erfolgt im Zuge der Bauwerksprüfung eine visuelle Inspektion jeder Brücke, die die Grundlage der Bewertung des Brücken Zustands darstellt. Sowohl die Zustandserfassung als auch die -bewertung sind dabei jedoch personenabhängig und damit subjektiv. Bei Intelligenten Brücken kann durch die Verwendung von Sensoren und die kontinuierliche Überwachung die Zustandsbewertung verbessert und die Grundlage für ein prädiktives Erhaltungsmanagement gelegt werden. Um die Vorteile der Intelligenten Brücke umfänglich nutzbar zu machen, ist ein leistungsfähiges Datenmanagement erforderlich. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke“ wurde dazu ein Konzept für die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke erarbeitet.

Im Forschungsvorhaben wurde zunächst der Status quo analysiert. Dabei wurde das aktuell übliche Vorgehen zur Bestimmung des Bauwerkszustands sowie das mögliche zukünftige Vorgehen bei Intelligenten Brücken thematisiert. Zudem wurden die relevanten beteiligten Akteure (Betreiber, Fachplaner und Bauwerksprüfer) identifiziert und ihre grundlegenden Anforderungen an die zu erfassenden Daten ermittelt. Für die Erarbeitung der Anforderungen der beteiligten Akteure an die digitale Infrastruktur wurden zwölf Interviews mit zentralen Akteuren aus den drei identifizierten Bereichen durchgeführt. Die Interviewpartner wurden zu den Aspekten Datenerfassung, Datenübertragung, Datenhaltung und Datenaufbereitung bis hin zu möglichen Visualisierungen befragt. Die Erkenntnisse der Interviews, die Informationen aus der Erhebung zum Status quo sowie die Erfahrungswerte der Projektbeteiligten dienen anschließend als Grundlage für die Formulierung der Anforderungen an die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke.

Das erstellte (Mindest-) Anforderungsportfolio bezieht sich auf die ermittelten Ebenen des Daten-

managements (Datenerfassung, Datenübertragung, Datenhaltung, Datenaufbereitung, Datenauswertung und Lebenszyklusmanagement) und bildet den Rahmen für das Konzept zur digitalen Infrastruktur. Der Bereich der Datenerfassung beinhaltet die Erhebung, die Erschließung, die Digitalisierung sowie die Umformatierung unterschiedlichster Daten sowie Datenformate. Im Rahmen des Konzepts wurden die Zielstellung, zu berücksichtigende Datencluster, die Sensorausstattung und Messintervalle sowie die Bauwerke thematisiert. Die Datenübertragung wird definiert als die Übermittlung der erfassten Messwerte vom Sensor zur verarbeitenden Einheit sowie von der verarbeitenden Einheit zum Datenspeicher und kann prinzipiell drahtlos oder drahtgebunden erfolgen. Für die Übertragung der Daten vom Sensor zum Messrechner an der Brücke wird eine überwiegend drahtlose Übertragung vorgesehen, die anschließende Übertragung der Daten vom Messrechner zum Datenspeicher hingegen erfolgt drahtlos über den 5G-Mobilfunkstandard. Die Datenhaltung umfasst die Speicherung der gewonnenen Daten in strukturierter Form in einer Datenbank sowie die mit der Datenspeicherung in direktem Zusammenhang stehenden Prozesse. Das Konzept sieht eine cloudbasierte Lösung vor, die sowohl als Public oder Private Cloud realisiert werden kann. Die Datenaufbereitung und die Datenauswertung behandeln die Weiterverarbeitung sowie die Erhöhung der Qualität der erfassten Daten und sollten grundsätzlich automatisch erfolgen. Die letzte Ebene des Konzepts stellt das Lebenszyklusmanagement dar, wobei die Objektebene und die Netzebene unterschieden werden. Die Betrachtung auf Objektebene erfolgt auf Grundlage der erfassten sowie der aufbereiteten Daten individuell für jede Brücke. Die Betrachtung auf Netzebene hingegen sieht die Betrachtung von großflächigen Brücken-Clustern von einer übergeordneten Perspektive aus vor.

Für das entwickelte Konzept zur digitalen Infrastruktur wurden abschließend verschiedene Aspekte der Umsetzung behandelt. Dazu zählen notwendige Anpassungen der Prozesse im Betrieb, organisatorische Anpassungen, erforderliche personelle Qualifizierung, zu beschaffende Hard- und Softwareausstattung sowie eine exemplarische Abschätzung der Kosten.

Die Intelligente Brücke liefert im Zusammenspiel mit einem adäquaten Datenmanagement durch die kontinuierliche Überwachung mit Sensoren umfangreiche Informationen zu den tatsächlich aufgetretenen Einwirkungen sowie den tatsächlich vorhandenen Widerständen einer Brücke. Hierdurch ergeben sich neue Möglichkeiten, wie etwa die Durchführung der Nachrechnung auf Grundlage der tatsächlichen Einwirkungen und Widerstände oder die kontinuierliche rechnerische Zustandsbewertung. Darüber hinaus können weitere zukunftsweisende Technologien, wie z. B. der Einsatz von Drohnen, Virtual Reality oder Augmented Reality, berücksichtigt werden.

Concepts for Smart Bridge Data Management

The German federal road network comprises almost 40.000 bridge structures and their regular condition assessment requires a high commitment of financial and human resources. A visual inspection of each bridge is carried out at fixed intervals as part of the structural inspection, which defines the basis for assessing the condition of the bridge. However, both the condition assessment and the evaluation are dependent on human factors and are therefore subjective. Through the use of sensors and continuous monitoring of Smart Bridges, the condition assessment can be improved and the basis for a predictive maintenance management can be established. In order to make the advantages of the Smart Bridge comprehensively usable, an efficient data management is required. Therefore, a concept for the digital infrastructure of the Smart Bridge was developed within the framework of the research project "Concepts for Smart Bridge Data Management".

First, the research project analysed the status quo. The current procedure for the condition assessment as well as the possible future procedure for Smart Bridges were discussed. In addition, the relevant actors involved (operators, technical planners and structure inspectors) were identified and their basic requirements for the data to be collected were determined. Twelve interviews were conducted with key actors from the three identified areas in order to develop the requirements of the actors for the digital infrastructure. The interviewees were asked about the aspects of data acquisition, data transmission, data storage and data processing, up to possible visualisations. The results of the interviews, the

information from the survey on the status quo and the experiences of the project participants then served as the base for setting the requirements for the digital infrastructure of the Smart Bridge.

The created (minimum) requirements portfolio refers to the identified levels of data management (data acquisition, data transmission, data storage, data processing, data evaluation and life cycle management) and forms the framework for the digital infrastructure concept. The area of data acquisition includes the collection, indexing, digitalisation and reformatting of a wide variety of data and data formats. Within the framework of the project concept, the objective, data clusters, sensor equipment and measurement intervals are taken into account. Data transmission is defined as the transmission of the recorded measured values from the sensor to the processing unit as well as from the processing unit to the data storage, which can in principle be wireless or wired. For the transmission of the data from the sensor to the measuring computer at the bridge, a predominantly wireless transmission is provided. The subsequent transmission of the data from the measuring computer to the data memory is to be wireless via 5G mobile standard. The data storage includes the storage of the acquired data in structured form in a database as well as the processes directly related to the data storage. The concept envisions a cloud-based solution that can be implemented as a public or private cloud. Data processing and data evaluation deals with the further processing as well as increasing the quality of the collected data and should basically be carried out automatically. The last level of the concept is life cycle management, considering the object level and the network level. The consideration at object level is carried out individually for each bridge on the basis of the collected and processed data. The consideration at network level, on the other hand, provides for the consideration of large-scale bridge clusters from a superordinate perspective.

Finally, various aspects of implementation were dealt with for the developed concept for the digital infrastructure. These include the necessary adaptation of the processes in operation, organisational adaptations, necessary personnel qualification, hardware and software equipment to be procured, as well as an exemplary estimate of the costs.

In combination with adequate data management, the Smart Bridge provides comprehensive information on the actual impacts and resistances of the bridge through continuous monitoring by sensors. This opens up new possibilities, such as carrying out the recalculation based on the actual impacts and resistances or the continuous computational condition assessment. In addition, other future-oriented technologies, such as the use of drones, virtual reality or augmented reality, can be taken into account.

Summary

Concepts for Smart Bridge Data Management

1 Summary

The German federal road network comprises almost 40.000 bridge structures and their regular condition assessment requires a high commitment of financial and human resources. A visual inspection of each bridge is carried out at fixed intervals as part of the structural inspection, which defines the basis for assessing the condition of the bridge. However, both the condition assessment and the evaluation are dependent on human factors and are therefore subjective. A forward-looking addition to this is the monitoring and evaluation of bridge structures with the help of sensors. Based hereon, the development of a digital infrastructure can be pursued with the help of innovative sensors or sensor networks, which enable a holistic evaluation of the bridges for the operator. One future-oriented development in this area is the Smart Bridge conceived by the Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Through the use of sensors and the continuous monitoring of the bridge structures, the condition assessment of the bridges on federal roads can be improved and the basis for a predictive maintenance management can be established. In order to fully utilise the advantages of the Smart Bridge, a powerful data management system is required. Therefore, a concept for the digital infrastructure of the Smart Bridge was developed within the framework of the research project "Concepts for Smart Bridge Data Management".

1.1 Status quo

The first step was an analysis of the status quo. For this purpose, the current procedure for the condition assessment and evaluation of bridge structures as well as the possible future procedure for Smart Bridges were discussed. Based on this, the strengths, weaknesses, opportunities and risks for both approaches were determined in a SWOT analysis. In addition, the relevant actors (operators, technical planners and structure inspectors) were identified and their basic requirements for the collected data were defined.

1.2 Requirements for the digital infrastructure of the Smart Bridge

An essential part of the research project was to conduct interviews with relevant actors from the three identified areas (operators, technical planners and structure inspectors). A total of twelve interviews were conducted and the interviewees were asked about the aspects of data acquisition, data transmission, data storage and data processing, up to possible visualisations. Subsequently, the interviews were evaluated with regard to these clusters, so that the view of the interviewees on a future data management process in the context of the Smart Bridge could be presented. Based on the results of the interviews, the information from the analysis of the status quo and the experiences of the project participants, the requirements for the digital infrastructure of the Smart Bridge could be formulated.

The created (minimum) requirements portfolio refers to the identified levels of data management (data acquisition, data transmission, data storage, data processing, data evaluation and life cycle management) and forms the framework for the digital infrastructure concept.

1.3 Smart Bridge data management concept

Based on the developed requirements, the digital infrastructure concept for the Smart Bridge was designed using the described levels of data management. Figure 1-1 shows a qualitative illustration of the data management concept.

1.3.1 Data acquisition

The area of data acquisition includes the collection, indexing, digitalisation and reformatting of a wide variety of data and data formats. Sensors, which are defined in the monitoring concept and attached to the building depending on the current life cycle phase, are collecting the data. Within the framework of the project concept, the objective, data clusters, sensor equipment and measurement intervals are taken into account.

1.3.2 Data transmission

Data transmission is defined as the transmission of the recorded measured values from the sensor to the processing unit as well as from the processing

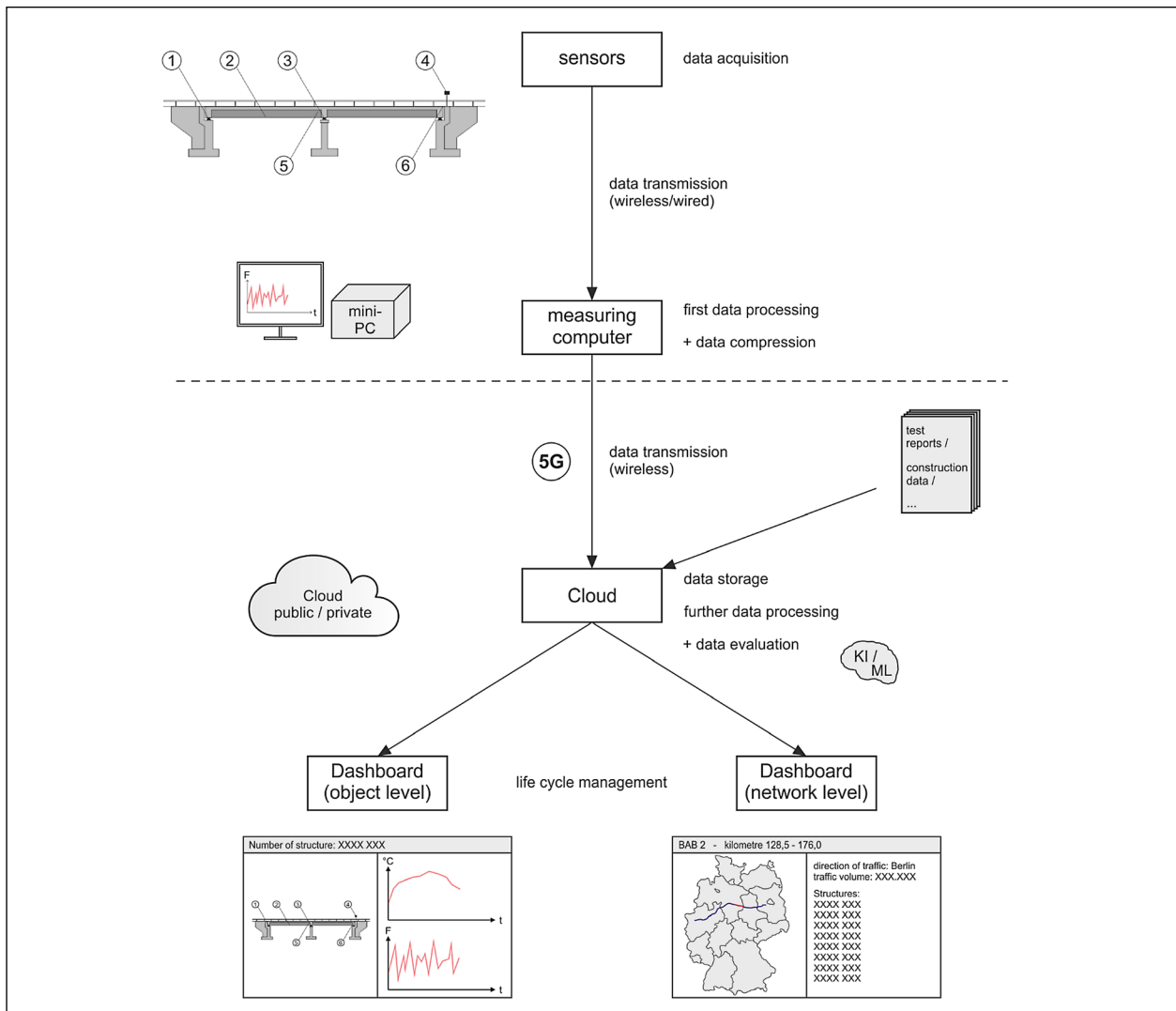


Fig. 1-1 Qualitative illustration of the data management of the Smart Bridge

unit to the data storage, which can in principle be wireless or wired. For the transmission of the data from the sensor to the measuring computer at the bridge, a predominantly wireless transmission is provided. In order to further reduce the amount of data that has to be transmitted from the measuring computer to the data storage, a compression of data should be provided on the measuring computer. The subsequent transmission of the data from the measuring computer to the data storage is to be wireless via 5G mobile standard.

1.3.3 Data storage

The data storage includes the storage of the acquired data in structured form in a database as well as the processes directly related to the data storage. The concept envisions a cloud-based solution that can be implemented as a public or private cloud. If a public cloud is chosen, an existing

platform of a standard market provider will be used; if implemented as a private cloud, the data storage will be realised in the organisation's own intranet or data centre. In addition to the transmitted measurement data from the sensors, other data (data from structural tests etc.) should also be included in the databases.

1.3.4 Data processing and data evaluation

Data processing and data evaluation deal with the further processing as well as increasing the quality of the collected data and should basically be carried out automatically. Data processing generally includes the correction of measured values (e.g. the measurement noise). In the data evaluation, among other things, the linking of measured values takes place so that the operator has key performance indicators for the evaluation of the bridges. In principle, data processing and data evaluation can

also be supported by machine learning or artificial intelligence.

1.3.5 Life cycle management

The last level of the concept is life cycle management, whereby a distinction is made between a view at the object level and a consideration at the network level. The view at object level is carried out individually for each bridge on the basis of the collected and processed data. The consideration at network level takes place for large-scale bridge clusters from a superordinate perspective of the operator.

carrying out the recalculation based on the actual impacts and resistances or the continuous computational condition assessment. In addition, other future-oriented technologies, such as the use of drones, virtual reality or augmented reality, can be taken into account.

1.4 Organisational implementation concept for the digital infrastructure

Finally, various aspects of implementation were dealt with for the developed concept for the digital infrastructure. Not only adjustments to the processes in operation are necessary, but also organisational adjustments should be made. In addition, for the successful and long-term implementation of the digital infrastructure or the Smart Bridge, the qualification of personnel must be considered and a corresponding training concept must be developed. In addition, the necessary hardware and software equipment for data management must be procured. Despite possible savings through the digital infrastructure or the Smart Bridge, e.g. through facilitations in the inspection of structures or the reduction of traffic disruptions, a certain economic framework is necessary for the development of the digital infrastructure. However, an exact estimation of the costs is not possible in a qualified manner due to many uncertainties. On one hand, this is due to many assumptions that had to be made, and on the other hand, the costs are subject to major fluctuations and depend on individual framework conditions and agreements, e.g. with the cloud provider. For this reason, in the further course of the implementation, costs must be determined in accordance with the specific framework conditions.

1.5 Outlook

In combination with adequate data management, the Smart Bridge provides comprehensive information on the actual impacts and resistances of the bridge through continuous monitoring by sensors. This opens up new possibilities, such as

Inhalt

1	Einleitung	11	4.3.4	Datenübertragung	32
2	Begriffsdefinitionen	12	4.3.5	Datenhaltung.....	32
3	Status quo	13	4.3.6	Datenaufbereitung	33
3.1	Monitoring von Brückenbauwerken.....	13	4.3.7	Lebenszyklusmanagement	34
3.1.1	Ablauf der Überwachung und Bewertung	13	4.4	Einordnung der Interviews und deren Ergebnisse	36
3.1.2	Möglicher Ablauf bei Intelligenten Brücken	14	5	Anforderungen an die digitale Infrastruktur	36
3.1.3	Anforderungen der beteiligten Akteure an die Daten.....	15	5.1	Datenerfassung.....	36
3.2	Datenmanagement an Brückenbauwerken	15	5.2	Datenübertragung	37
3.2.1	Datenerfassung.....	15	5.3	Datenhaltung.....	37
3.2.2	Datenübertragung	17	5.4	Datenaufbereitung	38
3.2.3	Datenhaltung und Datenschutz.....	17	5.5	Datenauswertung.....	38
3.2.4	Datenaufbereitung	17	5.6	Lebenszyklusmanagement	39
3.2.5	Datenauswertung.....	18	6	Konzepterstellung zur digitalen Infrastruktur	39
3.2.6	Datenüberwachung.....	20	6.1	Datenerfassung.....	40
3.3	Rahmenbedingungen für die Einführung.....	21	6.1.1	Zielstellung.....	40
3.3.1	Prozesse im Betrieb, Organisation und personelle Qualifizierung	21	6.1.2	Datencluster	40
3.3.2	Hard- und Softwareausstattung	21	6.1.3	Sensorausstattung und Messintervalle	41
3.3.3	Kostenabschätzung in Anlehnung an WiBe 5.0 des Bundes	21	6.1.4	Bauwerke	42
3.4	Gegenüberstellung.....	25	6.2	Datenübertragung	43
3.4.1	SWOT-Analyse zum Status quo	25	6.2.1	Drahtlose Übertragung.....	43
3.4.2	SWOT-Analyse zur Intelligenten Brücke...26		6.2.2	Datensicherheit	44
4	Interviews mit zentralen Akteuren	27	6.2.3	Ausfall- und Recovery-Konzept	44
4.1	Vorbereitung der Interviews	27	6.2.4	Kennzeichnung der Messpunkte	45
4.2	Durchführung der Interviews.....	27	6.3	Datenhaltung.....	45
4.3	Auswertung der Interviews.....	28	6.3.1	Cloud.....	45
4.3.1	Monitoring allgemein.....	28	6.3.2	Datenmodelle und Datenarchitektur	46
4.3.2	Installation von Sensoren.....	30	6.3.3	Rechte.....	46
4.3.3	Datenerfassung.....	31	6.3.4	Datenlöschung	46
			6.4	Datenaufbereitung und Datenauswertung.....	47
			6.4.1	Vorgehen.....	47
			6.4.2	Verknüpfung von Daten aus anderen Quellen.....	47

6.4.3	Dashboard	48
6.5	Lebenszyklusmanagement	48
6.5.1	Betrachtung auf Objektebene	48
6.5.2	Betrachtung auf Netzebene	49
6.6	Übersicht des erstellten Konzepts	50
7	Organisatorisches Umsetzungskonzept zur digitalen Infrastruktur	51
7.1	Prozesse im Betrieb	51
7.2	Organisation	53
7.3	Personelle Qualifizierung	54
7.4	Hard- und Softwareausstattung	55
7.5	Kostenabschätzung in Anlehnung an WiBe 5.0 des Bundes	55
8	Zusammenfassung und Ausblick	58
	Literatur	61
	Bilder	63
	Tabellen	64

Die Anhänge 1–13 zum Bericht sind im
elektronischen
BASt-Archiv ELBA unter:
<https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

Die Schadenserfassung und Zustandsbewertung von Bestandsbrücken erfordert einen hohen Einsatz an finanziellen und personellen Ressourcen. Derzeit umfasst das deutsche Bundesfernstraßennetz knapp 40.000 Brückenbauwerke und dementsprechend groß ist auch der kontinuierliche Erhaltungsaufwand [1]. Dabei sind gegenwärtig visuelle Inspektionen jeder Brücke in festen Zeitintervallen die Hauptquelle für die Bewertung des Brückenbestands und für die Ermittlung der entsprechenden Zustandsnote, wobei sowohl die Zustandserfassung als auch die resultierende Einstufung personenabhängig und damit subjektiv sind. Eine zukunftsweisende Ergänzung zu diesem Vorgehen stellt die Überwachung und Bewertung von Brückenbauwerken mithilfe von Sensoren dar. Darauf aufbauend kann die Entwicklung einer digitalen Infrastruktur mithilfe innovativer Sensoren oder Sensornetze verfolgt werden, die eine ganzheitliche Bewertung der Brücke für den Betreiber ermöglichen. Eine zukunftsorientierte Weiterentwicklung in diesem Bereich stellt die von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) konzipierte Intelligente Brücke (Bild 1-1) dar, bei der durch Sensoren und geeignete Algorithmen eine nahezu Echtzeitbewertung und -überwachung des Bauwerks ermöglicht wird.

Zu Beginn erfolgt die Erfassung von Messwerten mithilfe angebrachter Sensoren, sodass diese in maschinenlesbarer Form für die weitere Bewertung zur Verfügung stehen. Im Anschluss werden die Daten vom Messort zum Speicherort übertragen, dort gehalten und weiter aufbereitet. Zur Datenaufbereitung gehört dabei u. a. die Beseitigung von Störeinflüssen sowie die Zeitsynchronisation der Messdaten. Im nächsten Schritt werden die Daten ausgewertet, analysiert und in einem Dashboard visualisiert, sodass die Daten für die abschließende Entscheidungsfindung herangezogen werden können.

Seit dem Jahr 2001 nutzt die öffentliche Verwaltung Datenbanksysteme, wie z. B. SIB-Bauwerke, um den ständig wachsenden Bauwerksbestand einheitlich und digital zu erfassen, zu verwalten und auszuwerten. Diese Datenbanken umfassen u. a. Daten zu Baubeteiligten, Konstruktionsart, Prüfberichten und Schäden und bilden die Grundlage für die Entwicklung von reaktiven Managementsystemen, wie z. B. dem Bauwerks-Management-System (BMS), mit dessen Hilfe Bauwerks-

unterhaltungen zustandsabhängig, wirtschaftlich und nachhaltig optimiert werden können. Um diesen Zweck zu erfüllen, müssen reaktive Managementsysteme kontinuierlich die Daten aller Vorgänge im gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks betrachten. Neben den bereits in SIB-Bauwerke vorhandenen Daten können Sensoren im Rahmen einer Dauerüberwachung wertvolle und objektive Daten liefern [2]. Eine Möglichkeit stellt die Integration von reaktiven Managementsystemen in SIB-Bauwerke mittels geeigneter Sensortechnik dar, sodass ein direkter Schadensimport aus dem SIB-Bauwerke-Programmsystem möglich wäre [3].

Um jedoch Monitoringverfahren in übergeordnete Bewertungssysteme zu implementieren, müssen im Vorfeld geeignete Dateninfrastrukturen zur Verfügung stehen. Insbesondere besteht ein Bedarf an erweiterbaren und skalierbaren Dateninfrastrukturen und geeigneten Schnittstellen, um dem hohen Datenbestand der verschiedenen Beurteilungsebenen und der Notwendigkeit nach Erfassbarkeit durch den Nutzer gerecht zu werden [2].

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Strukturen, die für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke erforderlich sind, herausgearbeitet. Im Anschluss wurde ein Konzept für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke erarbeitet, mit dem im laufenden Betrieb eine optimale Nutzung der Daten möglich ist und das eine verbesserte Zuverlässigkeit der Datenerfassung über die gesamte Lebensdauer der Brücke sowie eine höhere Aussagekraft der datenbasierten Informationen für die Entscheidungsfindung, z. B. auf Basis von Machine Learning, ermöglicht. Die metho-

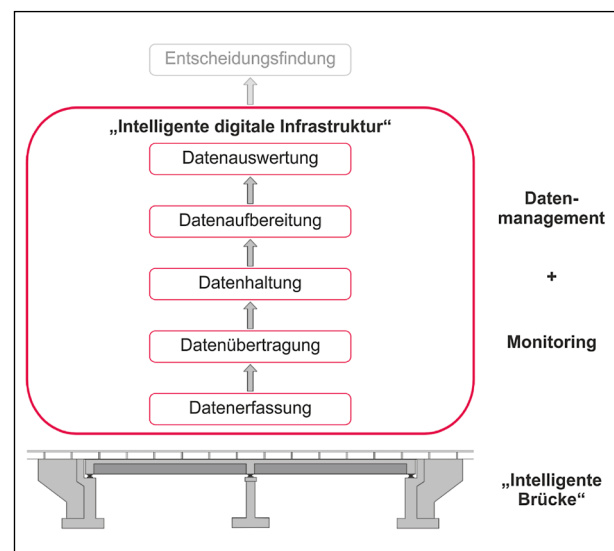


Bild 1-1 Konzept der Intelligenten Brücke

dischen, organisatorischen und technischen Maßnahmen und Verfahren zur Behandlung der Daten wurden dabei mit dem Ziel erarbeitet, deren Verfügbarkeit, Qualität, Schutz und Sicherheit bestmöglich über die gesamte Nutzungsdauer der Intelligenten Brücke zu gewährleisten.

Bei Brückenbauwerken handelt es sich in der Regel um Unikate, bei denen eine Vielzahl an unterschiedlichen Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grund wird die Untersuchung im Folgenden exemplarisch durchgeführt, sodass das Konzept später individuell an die jeweiligen Randbedingungen angepasst werden kann.

2 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden Definitionen für wichtige Begriffe gegeben, um eine Abgrenzung zu anderen Definitionen in der Literatur zu schaffen.

Monitoring

Gesamtprozess einer systematischen Überwachung von Bauwerksreaktionen und/oder einwirkenden Größen mittels eines Messsystems über einen repräsentativen Zeitraum mit dem Ziel, die zeitliche Entwicklung einer physikalischen Größe zu erfassen. Zum Monitoring zählen die Definition der Messaufgabe, die Auswahl geeigneter Messeinrichtungen, die Festlegung des Messablaufs sowie die Bewertung der Messergebnisse. In Abhängigkeit des Überwachungszeitraums kann darüber hinaus unterschieden werden in Kurzzeitmonitoring, Langzeitmonitoring und Dauermonitoring. (nach DBV-Merkblatt: Brückenmonitoring [4])

Datenmanagement

Menge aller methodischen, konzeptionellen, organisatorischen und technischen Maßnahmen und Verfahren zur Behandlung der Ressource „Daten“ mit dem Ziel, sie mit ihrem maximalen Nutzungspotenzial in die Geschäftsprozesse einzubringen und im laufenden Betrieb deren optimale Nutzung zu gewährleisten. (nach Prof. Dr. Freimut BODENDORF [5])

Datenerfassung

Tätigkeit der zeitlich diskreten Aufnahme von Daten, sodass diese im Anschluss als Messwerte in maschinenlesbarer Form, also als physikalische Größen, zur Verfügung stehen.

Datenübertragung

Übermittlung von Daten von einer Informationsquelle (Sensor) zum Informationsempfänger (Datenbank), die sowohl drahtlos als auch drahtgebunden erfolgen kann.

Datenhaltung

Speicherung von Daten in strukturierter Form in einer Datenbank, sodass eine Zuordnung, Bearbeitung und Auswertung der Daten erfolgen kann.

Datenaufbereitung

Maßnahmen zur Erhöhung der Datenqualität, damit z. B. Muster erkannt oder Big Data Analysen durchgeführt werden können. Die Datenaufbereitung umfasst u. a. die Umrechnung von elektrischen Größen in physikalische Größen, die Zeitsynchronisation zwischen unterschiedlichen Messsystemen sowie die sensorspezifische Kompensation zur Beseitigung von Temperatureinflüssen sowie weiterer Rausch- und Störeinflüsse. (nach DBV-Merkblatt: Brückenmonitoring [4])

Datenauswertung

Analyse der Daten mit spezifischen Signalverarbeitungen und Verrechnungen (Extrahieren von Minimal- und Maximalwerten, Erstellen von Approximationen bzw. Regressionen, Durchführung einer Modalanalyse, Zählungen etc.) sowie Plausibilisierung der Ergebnisse, damit Fehler in der Messkette oder Fehlfunktionen im System erkannt und behoben werden können. (nach DBV-Merkblatt: Brückenmonitoring [4])

Lebenszyklusmanagement

Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit mit dem Ziel einer lebenszyklusphasen-übergreifenden Nutzungs-, Ressourcen- und Informationsoptimierung (aus [6]).

Bei Intelligenten Brücken erfolgen die Prozesse des Datenmanagements in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen. Die Planung (Planung des Messsystems, Festlegung des Messablaufs etc.) erfolgt bei Neubauten z. B. in der Planungs- und Entwurfsphase und auf Basis von Erkenntnissen aus der Nutzungsphase anderer Brückenbauwerke. Der Einbau und die Inbetriebnahme des Systems erfolgen dann in der Bauausführungsphase. Bei Bestandsbauwerken erfolgen die Planung, der Einbau und die Inbetriebnahme hingegen vollständig in der Nut-

zungsphase. Die Erkenntnisse aus dem Monitoring können anschließend in allen Lebenszyklusphasen für die Betrachtung auf Objekt- und/oder Netzebene, die Durchführung technischer Maßnahmen und für Managementaufgaben genutzt werden.

Überwachung

Beobachtungen, die z. B. auf Messungen basieren und zielgerichtet durchgeführt werden. Die Daten werden erfasst und nach ggf. erforderlicher Umrechnung der Messwerte mit Erwartungswerten oder Grenzwerten verglichen. (nach DBV-Merkblatt: Brückenmonitoring [4])

3 Status quo

3.1 Monitoring von Brückenbauwerken

Monitoring, also die fortlaufende Erfassung von Messwerten mithilfe von Sensoren, wird aktuell vorwiegend für die Schadensüberwachung bei Brückenbauwerken, bei denen ein mittelfristiger oder kurzfristiger Handlungsbedarf besteht, eingesetzt. Ziel des durchgeführten Monitorings ist in der Regel eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Brücke durch einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn infolge der verbesserten Kenntnisse zu den Einwirkungs- und Widerstandsgrößen.

Mithilfe von Sensoren, die entweder extern am Bauwerk angebracht oder intern im Bauwerk verbaut sind, können eine Vielzahl an Einwirkungs- und Widerstandsgrößen kontinuierlich erfasst und ausgewertet werden. Neben der kontinuierlichen Messung von Umweltbedingungen (u. a. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windbeanspruchung) gehört dazu bei Brückenbauwerken insbesondere die Messung von Kräften, Beschleunigungen, Dehnungen und Verformungen. Darüber hinaus können noch weitere Zustandsparameter, wie der Chloridgehalt, der pH-Wert oder der Korrosionsfortschritt, erfasst werden. Ausführliche Informationen zu Sensoren sowie deren Einsatz können u. a. [2] und [7] bis [10] entnommen werden. Darüber hinaus sind erweiterte Kenntnisse zu typischen Schäden und rechnerischen Defiziten an Bestandsbrücken wichtig, um für eine geplante Überwachung die Problemstellen und Hot-Spots einer Brücke mit Sensoren ausstatten zu können. Eine Zusammenstellung typischer Schäden sowie rechnerischer Defizite an Brückenbauwerken kann u. a. [10] bis [12] entnommen werden.

Die mithilfe der Sensoren erfassten Struktureigenschaften einer Brücke können im Anschluss über sogenannte Performance Indikatoren, wie z. B. Ausnutzungsgrad oder Schädigungsmaß, als dimensionslose Leistungsparameter bzw. Indexe in einer grafischen Benutzeroberfläche dargestellt werden.

Gegenwärtig wird nur für ausgewählte Brücken ein Monitoring durchgeführt, sodass die Datenmengen überschaubar sind und das Datenmanagement in der Regel brückenspezifisch erfolgt. Zudem ist das Monitoring aktuell nur in den seltensten Fällen intelligent, da die Auswertung und Entscheidungsfindung in der Regel objektspezifisch stattfindet, meist noch manuell erfolgt und nicht durch maschinelle Systeme unterstützt wird. Im Rahmen der BAST-Forschungsprojekte zur Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn wurden seit 2017 über einen 5-jährigen Untersuchungszeitraum vier Messsysteme an der vierfeldrigen Spannbeton-Hohlkastenbrücke (BW 402e) im Bereich des Autobahnkreuzes Nürnberg unter Realbedingungen erprobt, hinsichtlich ihrer Praxisauglichkeit untersucht und u. a. im Hinblick auf Datenauswertungsmethoden weiterentwickelt. Die Erkenntnisse, die bisher an dieser Brücke gesammelt wurden (u. a. [13] bis [15]), fließen in die Entwicklung des Datenmanagementkonzepts für die Intelligente Brücke mit ein.

3.1.1 Ablauf der Überwachung und Bewertung

In Bild 3-1 ist ein typischer Ablauf der Überwachung und Bewertung für eine Bestandsbrücke, bei der nachträglich Sensoren für das Monitoring angebracht werden sollen, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mehrere Akteure am Monitoring beteiligt sind. Dazu gehören neben dem Betreiber der Brücke vor allem der Fachplaner Monitoring und der Bauwerksprüfer. Je nach Umfang und Komplexität der Monitoringaufgabe können auch mehrere Fachplaner Monitoring und Bauwerksprüfer sowie weitere Spezialdienstleister Monitoring an der Überwachung und Bewertung beteiligt sein.

Wird bei einer der regelmäßigen Bauwerksprüfungen ein Schaden vom Bauwerksprüfer festgestellt, wird dieser an den Betreiber gemeldet. Der Betreiber ist für die Sicherstellung der Tragsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit der Brücke verantwortlich und beauftragt für die Bewertung des Schadens in der Regel einen Fachplaner, der eine entsprechende gutachterliche Stellungnahme zum aufgetretenen Schaden erstellt. In Abhängigkeit der

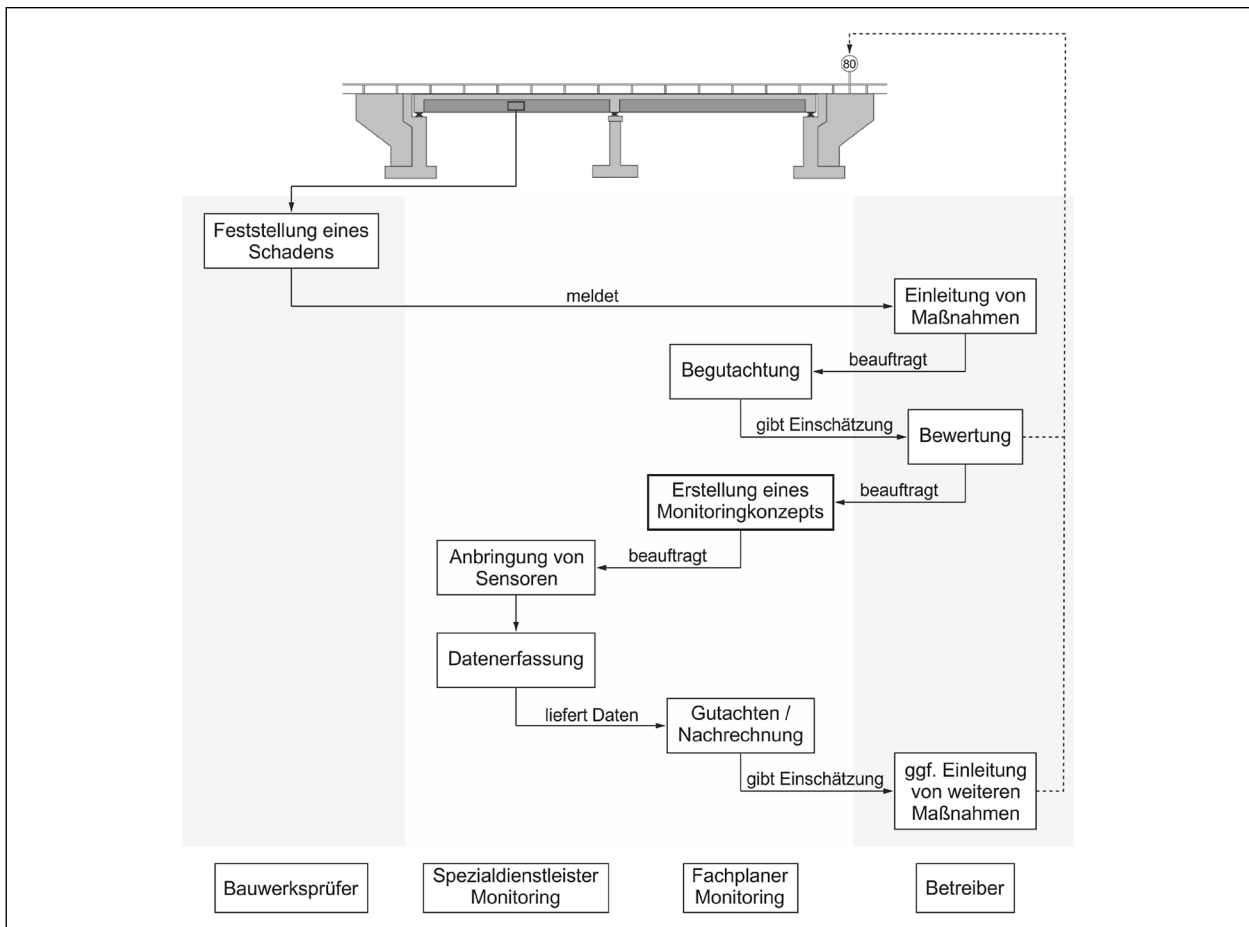


Bild 3-1 Typischer Ablauf der Überwachung und Bewertung für eine Bestandsbrücke

Bewertung des Schadens können bereits zu diesem Zeitpunkt (Ad-hoc) Maßnahmen, z. B. Nutzungseinschränkungen oder Instandsetzungen, erforderlich sein. Falls diese Maßnahmen, z. B. aufgrund des Brückenstandortes, nicht umsetzbar sind, kann für die Bestandsbrücke auch ein zielgerichtetes Monitoringkonzept erstellt werden. Hierzu werden Sensoren an der Brücke angebracht, die zu den entsprechenden Einwirkungs- und Widerstandsgrößen kontinuierlich Messwerte erfassen. Anschließend wird mithilfe der Messdaten eine erweiterte gutachterliche Bewertung oder eine Nachrechnung der Brücke durchgeführt, um damit eine bessere und zuverlässigere Bewertung des Schadens und der Brücke insgesamt zu ermöglichen sowie letztendlich die Kriterien und die Dauer der Restnutzung zu bestimmen.

3.1.2 Möglicher Ablauf bei Intelligenten Brücken

In Bild 3-2 ist zum Vergleich ein möglicher Ablauf der Überwachung und Bewertung bei Intelligenten Brücken dargestellt. Der wesentliche Unterschied

besteht darin, dass das Monitoring bei Intelligenten Brücken ein planmäßiger Bestandteil der Überwachung und Bewertung ist und parallel zu den regelmäßigen Bauwerksprüfungen erfolgt. Der Fokus liegt dabei, sowohl für Neubauten als auch für bestehende Bauwerke, auf einem ganzheitlichen und prädiktiven Ansatz.

Bei der Intelligenten Brücke bildet das Monitoringkonzept, das vom Betreiber sowie den beauftragten Fachplanern Monitoring erstellt wird, die Grundlage für die Überwachung und Bewertung der Brücke. Nach der Anbringung von Sensoren werden kontinuierlich die gewünschten Messwerte der Einwirkungs- und Widerstandsgrößen erfasst. Im Anschluss werden die Messwerte durch geeignete Algorithmen aufbereitet und ausgewertet (z. B. Überprüfung auf Anomalien und Abgleich mit vorher definierten Schwellwerten). Dadurch kann einerseits der Fachplaner das Modell der Brücke an die tatsächlich auftretenden Einwirkungen und Bauteilwiderstände anpassen, sodass eine realistische Bewertung der Brücke möglich ist, und andererseits kann der Betreiber sich abzeichnende Schädigung-

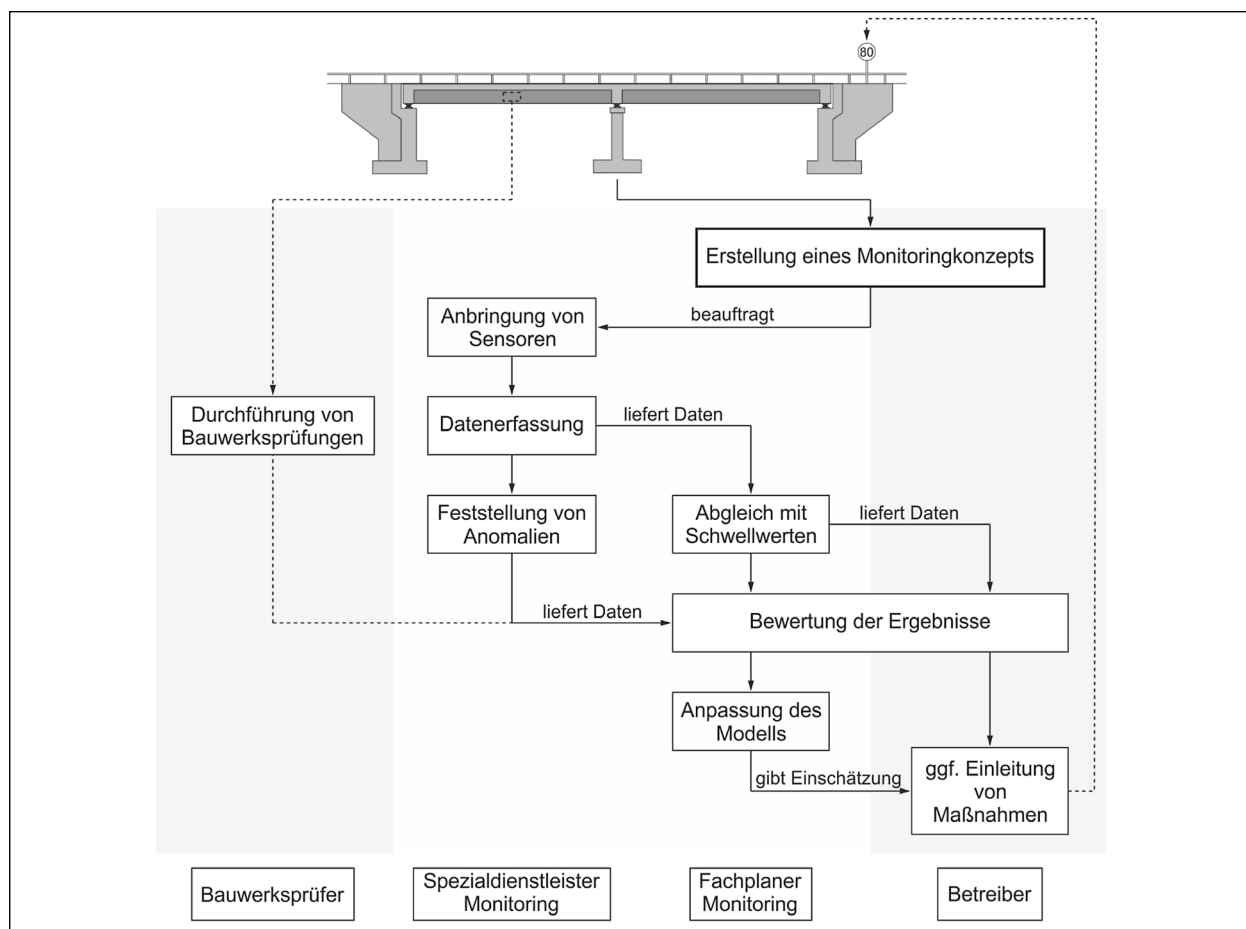


Bild 3-2 Möglicher Ablauf der Überwachung und Bewertung bei Intelligenten Brücken

gen frühzeitig erkennen, sodass Erhaltungsmaßnahmen rechtzeitig geplant und eingeleitet werden können.

Anders als beim aktuell üblichen Vorgehen, bei dem die Erhaltungsmaßnahme in der Regel erst nach dem Auftreten eines Schadens eingeleitet wird, ist bei Intelligenten Brücken eine prädiktive Erhaltungsplanung möglich. Dadurch können im Allgemeinen die Leistungsfähigkeit der Brücke aufrechterhalten und zusätzliche Kosten eingespart werden.

3.1.3 Anforderungen der beteiligten Akteure an die Daten

Die am Monitoring einer Brücke beteiligten Akteure (Betreiber, Fachplaner, Bauwerksprüfer) haben zum Teil ganz unterschiedliche Anforderungen an die erfassten Daten. Für den Betreiber stehen vorwiegend die Leistungsfähigkeit der Brücke sowie die wirtschaftlichen Aspekte im Vordergrund. Anhand der Daten möchte er Informationen zum Zustand sowie zum Erhaltungsbedarf der Brücke gewinnen und damit den optimalen Zeitpunkt bestimmen, wann z. B.

präventive Kompensationsmaßnahmen eingeleitet werden müssen, um die Leistungsfähigkeit der Brücke aufrechtzuerhalten. Der Fachplaner hingegen möchte mit den aufbereiteten Daten der Einwirkungen und Bauteilwiderstände das Bemessungsmodell der Brücke anpassen, um eine bessere Bewertung der Brücke durchführen und z. B. die Restnutzungsdauer bestimmen zu können. Der Bauwerksprüfer wiederum möchte mithilfe des Monitorings die Bewertung von aufgetretenen Schäden sowie des Zustands der gesamten Brücke verbessern und zudem bisher nicht oder nur schwer prüfbare Bereiche überwachen. In Bild 3-3 sind die Anforderungen der einzelnen Akteure an die erfassten Daten nochmal exemplarisch dargestellt.

3.2 Datenmanagement an Brückenbauwerken

3.2.1 Datenerfassung

Die Erfassung der Messdaten erfolgt, wie bereits beschrieben, durch am Brückenbauwerk ange-

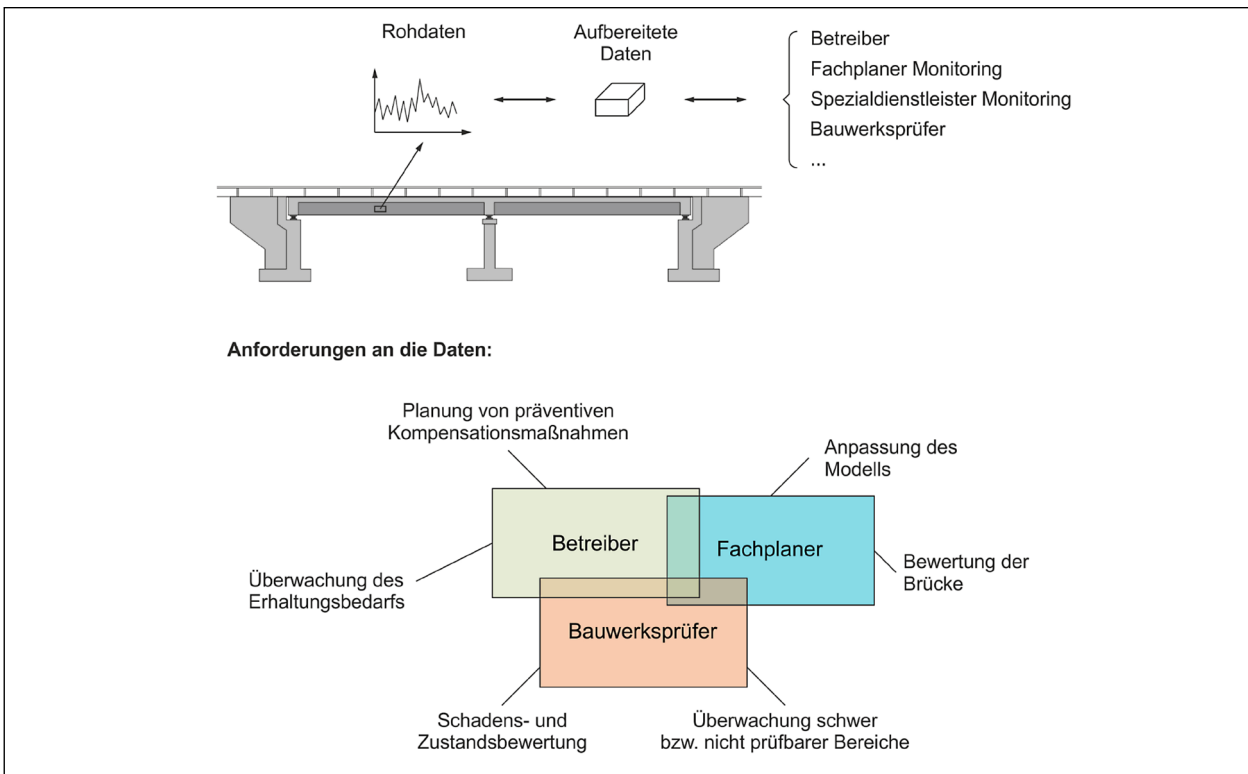


Bild 3-3 Anforderungen der beteiligten Akteure an die erfassten Daten

brachte Sensoren. Dabei wird zwischen zeitdiskreter, kontinuierlicher Messdatenerfassung und intelligenter, ereignisbasierter Messdatenerfassung unterschieden. Intelligente Messdatenerfassung basiert auf selbstlernenden Systemen, denen bestimmte Parameter der Datenerfassung, Datenauswertung und den zu erwartenden Ergebnissen zugrunde liegen [2]. Während bisher hauptsächlich kosten- und zeitaufwendige, kabelgebundene Überwachungssysteme eingesetzt wurden, bietet die Verwendung drahtloser, intelligenter Sensornetzwerke durch einfachere und kostengünstigere Applizierung ein breiteres Anwendungsspektrum (Bild 3-4). Durch den Einsatz von Miniatursensoren, wie z. B. mikroelektrischer, mechanischer Systeme (MEMS), können drahtlose Sensornetzwerke realisiert werden, die einfach und flexibel an kritischen Stellen einer Brücke angebracht und per Funk verbunden werden können [2].

Nach der Messdatenerfassung durch die Sensoren sorgt eine Hardwareeinheit, in der Literatur meist als Datenerfassungssystem beschrieben, für die Bündelung der Messdaten. Anschließend werden die Signale mithilfe eines entsprechenden Konverters verstärkt und Störsignale durch Filterung bereinigt [8]. Da für viele Messdatenauswertungen eine Zeitsynchronisation der Sensornetzdaten essenziell ist, werden entweder spezielle Algorithmen oder

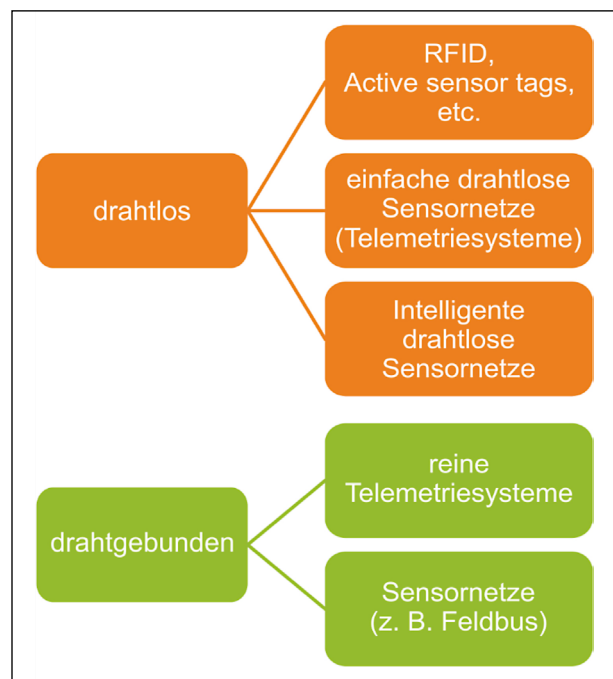


Bild 3-4 Überblick über Messsysteme zur Dauerüberwachung (nach [2])

GPS-Empfänger für die Bündelung der Messdaten benötigt [16] [17]. FREUNDT et al. [18] schlagen folgende Algorithmen zur Zeitsynchronisierung von Sensordaten vor: den Berkeley Algorithmus, der eine Methode zur Synchronisation von Uhren darstellt, den Cristians Algorithmus, der ebenfalls zur Synchronisation von Computersystemen eingesetzt

wird, allerdings nur für einen einzelnen Server vorgesehen ist, den Marzulli Algorithmus, der über die Lokalzeit ein Einverständnis zwischen ungenauen Zeitquellen herstellt und den Chandy-Lamport Algorithmus mit Vektoruhren, der, anders als die bisherigen Algorithmen, lediglich eine logische, konsistente Zeit auf allen Systemen herstellt.

Gegebenenfalls findet an dieser Stelle schon eine Datenaufbereitung statt, jedoch ist der Umfang und der Ort der Datenaufbereitung von System zu System unterschiedlich und hängt von vorhandenen Rechenkapazitäten sowie dem Grad der möglichen Automatisierung ab. Daten können z. B. in den einzelnen Sensorknoten, an Zentralrechnern am Bauwerk oder an anderen Orten aufbereitet werden (verteilte vs. datenzentrische Systeme). Umfassende Datenanalysen können jedoch prinzipiell nur am Ende der Übertragungskette durchgeführt werden, da nur dort die Gesamtheit aller Messdaten vorliegt [2].

3.2.2 Datenübertragung

Nach Bündelung und Konvertierung der Messdaten werden diese über eine drahtgebundene oder drahtlose Datenübertragungseinheit des Datenerfassungssystems als digitale Signale an einen Zentralrechner übertragen [8]. Während in der Industrie bereits breite Akzeptanz und Anwendung von Feldbusanwendungen herrscht, wurde beim Monitoring von Bauwerken noch kein einheitlicher Feldbusstandard etabliert. Hier werden vorwiegend LAN- oder WLAN-Technologien bzw. Industrienetze wie RS-485 als individuelle Lösungen genutzt, um Messdaten über weite Distanzen zu übertragen [2]. FREUNDT et al. [18] empfehlen diesbezüglich die Nutzung des in Java implementierten BridgeConnectors, der als zentrale Komponente zwischen den Sensornetzwerken und der Datenbank fungiert. Mithilfe des BridgeConnectors werden Datenpakete mit den gemessenen Werten aus dem Sensornetzwerk entgegengenommen und mittels Representational State Transfer (REST) in die entsprechende Datenbank geschrieben. REST beschreibt dabei einen Softwarearchitekturstil, der das Ziel hat, modernen Web-Anforderungen besser zu genügen.

3.2.3 Datenhaltung und Datenschutz

Durch Applikationen – wie den BridgeConnector – können Messdaten direkt in vorhandene Infrastrukturüberwachungs- und -planungssysteme einflie-

ßen. Grundlagen zu den richtigen Datenformaten, dem erforderlichen Datenumfang und den benötigten Schnittstellen liegen bereits in schon vorhandenen Informationsdatenbanken, wie z. B. Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten (ASB-ING), vor [2]. Da Brückenbauwerke allerdings von einer Vielzahl an Randbedingungen abhängen und in der Regel Unikate sind, gestaltet sich der Aufbau von Datenbanken mit allgemeinen Schadenssignaturen schwer [8]. FREUNDT et al. [18] schlagen eine durch eine Java-Applikation mit dem Internet verbundene SQL-Datenbank vor, welche automatisch neue Tabellen anlegt, wenn ein neuer Sensorknoten zum Sensornetzwerk hinzugefügt wird. Diese Datenbank wird auf einem Messrechner abgelegt und bildet so das Network Attachment Storage (NAS). Der Fernzugriff auf den Messrechner kann wiederum durch eine Virtual Network Computing (VNC) Software realisiert werden, die auf einer über den Router oder das NAS laufenden, gesicherten Verbindung zum Gesamtsystem basiert. Sollen die Messdaten zudem in einer Web-Publikation zugänglich sein, so ist auf dem Messrechner eine vollständige Spiegelung der an die Web-Publikation übertragenen Daten ratsam. Dadurch kann gewährleistet werden, dass sowohl auftretende Datenübertragungsfehler abgefangen werden können als auch ein Zurücksetzen der Datenbank der Web-Publikation möglich ist [18]. Um diverse Probleme, wie z. B. die sehr zeitintensive Übermittlung von Datenbankabfrageergebnissen, zu verhindern, ist die wichtigste Strategie der Datenhaltung eine angemessene Kompression, Verarbeitung und Projektion der Rohdaten [18].

Datenschutztechnisch ist zu beachten, dass insbesondere bei der Fernauslesung von Daten eine sichere Datenübertragung gewährleistet werden muss. Zudem sollten zusätzliche Sicherheitsaspekte für besonders sensible Bereiche der Monitoring-Daten berücksichtigt werden. Weitergehende Regelungen und Empfehlungen in diesem Bereich bietet unter anderem das VDMA-Einheitsblatt 24774: IT-Sicherheit in der Gebäudeautomation [19]. Zudem werden weitere Anforderungen an den Datenschutz in Kapitel 5.3 thematisiert.

3.2.4 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung kann, wie bereits beschrieben, entweder direkt nach der Messdatenerfassung oder nach der Datenübertragung erfolgen. Hierzu können einzelne Messdaten oder ganze Messrei-

hen charakterisiert, eingeordnet und bereinigt werden. Dies beinhaltet unter anderem die Entfernung von Ausreißern, die Ergänzung fehlender Daten, weitere Filterungsprozesse oder eine Nulllinienkorrektur der Daten. Des Weiteren können Kennwerte auch mittels einer Datenfusion miteinander kombiniert bzw. gekoppelt werden. Diese Datenfusion ist für eine umfassende Zustandsbewertung einer Brücke essenziell, da zwischen den erfassten Messdaten am Bauwerk zum Teil große Abhängigkeiten bestehen. Zudem kann durch die Datenfusion verhindert werden, dass verrauschte oder ungenaue Erfassungsdaten zu ungenauen Vorhersagen des Systems führen. Aufgrund der zeitlich und örtlich diskreten Datenerfassung durch die Sensoren ist es zusätzlich ratsam, Messungen mittels zeitlicher und örtlicher Interpolation in Beziehung zu setzen. Nur durch eine solche Interpolation von Sensordaten lässt sich verhindern, dass die zeitdiskreten Messintervalle und Ungenauigkeiten in der Sensorplatzierung zu falschen Vorhersagen über die Systemzuverlässigkeit führen [20].

3.2.5 Datenauswertung

Der Bewertung der bei der Datenerfassung erhaltenen Messdaten können einfache Analysemethoden, wie z. B. Grenzwertüberschreitungen, oder aber auch komplexere Methoden, die eine Vielzahl verschiedener Messwerte berücksichtigen können, zugrunde liegen. Das Ziel jeglicher Datenauswertungen ist es, beruhend auf den erhaltenen Messdaten, die angemessenste Reaktion auszulösen, wie z. B. die Alarmierung des Betreibers [2]. Generell eignen sich statistische Analyseverfahren sehr gut für verschiedene Einsatzbereiche beim Monitoring von Brückenbauwerken und bilden als mathe-

matisches Modell die Grundlage für weitere modellbasierte Analyseverfahren. Einen Überblick über mögliche Modellarten liefert Bild 3-5.

Modellbasierte Analyseverfahren haben den Vorteil, dass sie durch eine gute Rückverfolgbarkeit eine genaue Nachvollziehbarkeit der unterschiedlichen Ergebnisse ermöglichen [20]. Des Weiteren kann eine Modellbildung helfen, Probleme zu abstrahieren, durch Simulationen relevante von irrelevanten Messdaten zu unterscheiden und durch eine Sensitivitätsanalyse den Einfluss unterschiedlicher Umgebungsfaktoren zu analysieren [2]. Zur Validierung dieser Modelle liefert das Brückenmonitoring die erforderlichen realen Messdaten. Bild 3-6 zeigt ergänzend die wesentlichen Bausteine eines Überwachungssystems für Brückenbauwerke. Dabei wird deutlich, welche zentrale Rolle die Modelle bei der Überwachung von Brückenbauwerken spielen.

Mögliche Methoden der Datenanalyse sind Abweichungsanalysen zur Ermittlung von Datensätzen, die für bestimmte Merkmalswerte von einem erwarteten Wert abweichen, Abhängigkeitsanalysen zur Entdeckung von signifikanten Abhängigkeiten zwischen einzelnen Attributen (Einzelmesswerte oder auch Messwertgruppen) und Clustering, um Datensätze in interessante und sinnvolle Teilmengen oder Klassen aufzuspalten [2]. Clustering lässt sich weiter in deterministische Verfahren, wie das Nearest-Neighbourhood-Verfahren¹ oder das k-means-Verfahren², oder auch probabilistische Verfahren, wie das Fuzzy-Cluster-Verfahren³, unterteilen. Alternativ zu statistischen Verfahren können auch selbstlernende Verfahren zur Gruppenbildung eingesetzt werden, wie z. B. Künstliche Neuronale Netze [21] [22]. Neben der Datenreduktion bietet das Cluste-

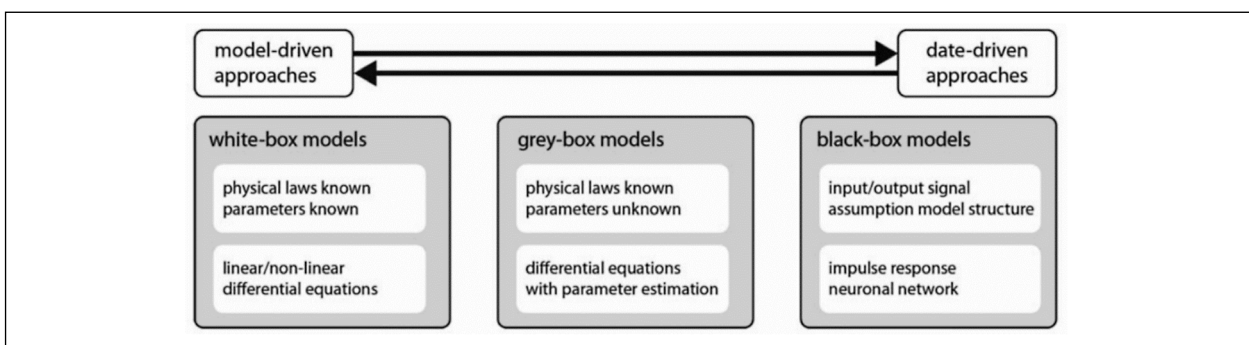


Bild 3-5 Klassifikation von mathematischen Modellen nach dem Gesichtspunkt, welche Informationen über Modellstrukturen und Modellparameter bekannt oder unbekannt sind und dadurch identifiziert bzw. geschätzt werden müssen [20]

- 1 Das Nearest-Neighbourhood-Verfahren stellt eine Methode zur Klassenzuordnung über die k nächsten Nachbarn eines Werts dar.
- 2 Das k-means-Verfahren stellt eine Methode zur Klassenzuordnung in eine bekannte Anzahl von k Gruppen dar.
- 3 Das Fuzzy-Cluster-Verfahren stellt als unüberwachter Clustering-Algorithmus eine Erweiterung des k-means-Clustering-Algorithmus dar.

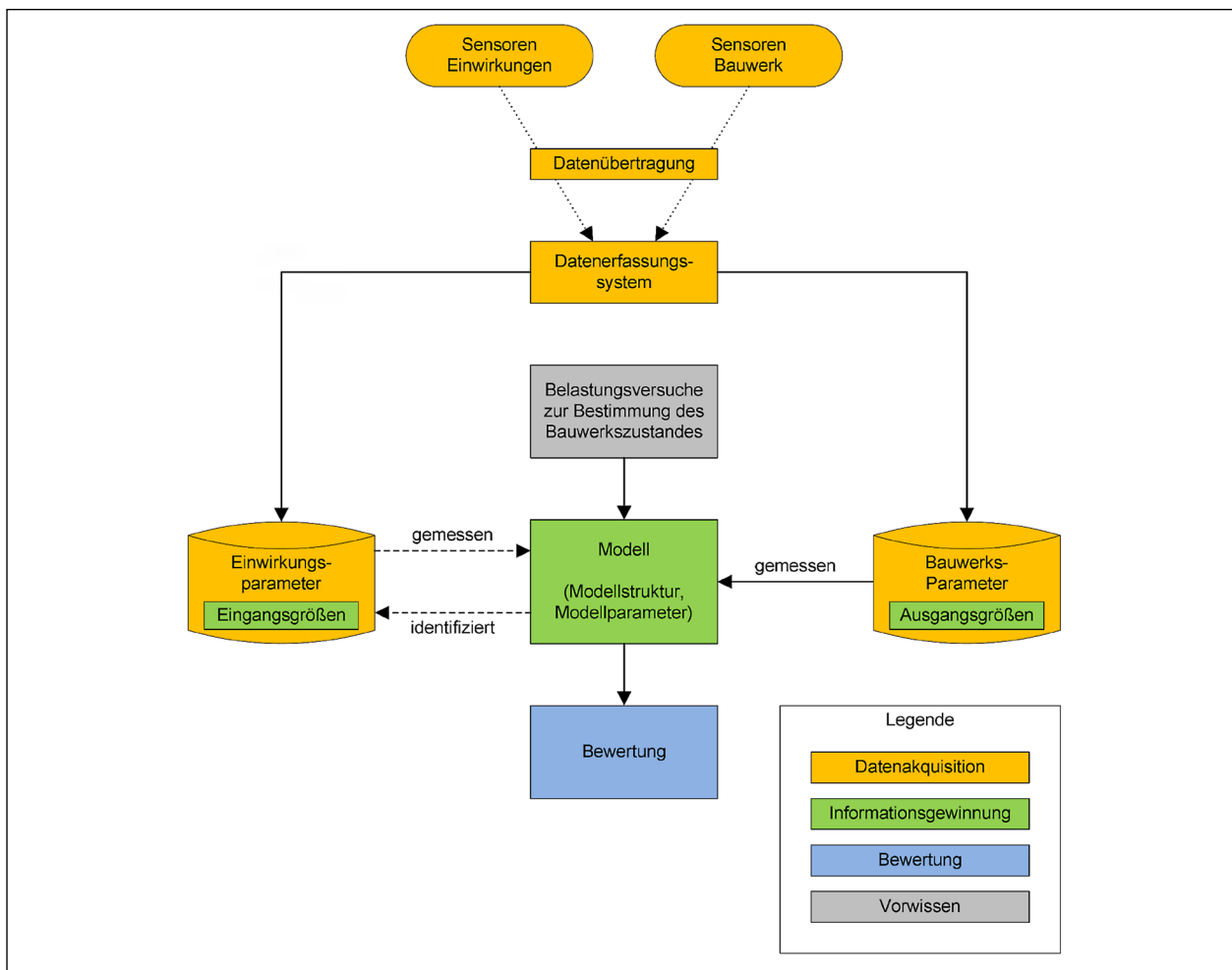


Bild 3-6 Wesentliche Bausteine eines Überwachungssystems für Brückenbauwerke [8]

ring den Vorteil, nur Sensorknoten aus betrachteten Clustern synchronisieren zu müssen. So kann eine höhere Genauigkeit bei geringerem Energieverbrauch erreicht werden [23]. Darüber hinaus bietet die Betrachtung einer Vielzahl von Messwerten den Vorteil, im Gegensatz zur Betrachtung einzelner Messwerte, weniger fehlerbehaftet zu sein und besser kritische Bauwerksveränderungen herauszufiltern und charakterisieren zu können [2].

Für die Systemmodellierung von Brückenbauwerken wird das Bauwerk in der Regel in einzelne Bauwerkskomponenten untergliedert, welche mittels logischer Verbindungen im Anschluss wieder zu einem Modell zusammengeführt werden [24]. SAWO und KEMPKENS [1] beschreiben folgende mögliche Herangehensweisen an den Modellbildungsprozess:

- Präzises Modellieren der vorliegenden physikalischen Prozesse
 - Generelles physikalisches Modellieren
 - Approximation durch die Nutzung mehrerer unterschiedlicher Modellierungsansätze
- KRÜGER und GROßE [2] teilen zudem die Modelle hinsichtlich des Materialverhaltens von Brücken in folgende Arten ein:
- Zeitunabhängige Stoffgesetze
 - Analytische Lebensdauermodelle
 - Potenzmodelle (empirische Modelle, z. B. Wöhlerkurven)
 - Arrhenius-Modelle (chemische Reaktionsmodelle)
 - Eyring-Modelle (quantenphysikalische Betrachtung chemischer Prozesse; vorwiegend temperaturbasiert)
 - Kumulative Schädigungsmodelle (z. B. nach Palmgren, Langer, Miner)
 - Stochastische Modelle
 - z. B. Exponentialverteilungen, Weibull-Modelle

BORRMANN et al. [24] wiederum beschreiben folgende Methoden zur Systemmodellierung von Brückenbauwerken:

- Zuverlässigkeitsblockdiagramme
- Fehlerbaumanalysen
- Ereignisablaufanalysen
- FE-Modelle

Laut BORRMANN et al. [24] sind diese Methoden allerdings mit wesentlichen Einschränkungen behaftet. Insbesondere sei die Reduzierung von komplexen Zusammenhängen auf ein binäres System problematisch, da dieses nicht die Möglichkeit bietet, teilweise geschädigte Bauteilkomponenten oder Schädigungsprozesse in Abhängigkeit der Zeit darzustellen. Sie befürworten daher die Einführung eines sogenannten Einflussbaums (vgl. Bild 3-7), der eine Erweiterung des Fehlerbaumansatzes darstellt. Der Einflussbaum hat den Vorteil, dass er nicht als Black-Box fungiert, sondern Rückschlüsse auf z. B. Schadensursachen und Informationen über die Relevanz der Schäden und deren Wirkung auf die einzelnen Bauteile zulässt [24]. Von der Parameterebene ausgehend liefert der Einflussbaum damit Informationen über den Zustand der jeweils übergeordneten Komponente. Der Schadensebene wiederum kann der Wirkmechanismus der Eingangsparameter auf die jeweiligen Schädigungsprozesse entnommen werden und auf Strukturebene können die Zustände der einzelnen Komponenten und über deren logische Verknüpfung der Zustand des Gesamtsystems ermittelt werden [24].

Alle diese unterschiedlichen Modellierungsansätze zum intelligenten Datenmanagement für Brückenbauwerke lassen sich zu einem digitalen Zwilling, als eine digitale Repräsentation der entsprechen-

den Brücke, zusammenführen. Ein digitaler Zwilling beschreibt „eine aktive, dynamische Simulation, die alle Daten und die damit gespeisten Modelle vereint“ ([3]: 122). Ziel des digitalen Zwillings ist es, die Brücke als reales Gegenstück möglichst genau zu repräsentieren und so den finanziellen und personellen Aufwand für die Bauwerkserhaltung, unter Einbeziehung von Sicherheitskonzepten, deutlich zu minimieren. Diese Brückenmodelle, die mithilfe der erfassten Messdaten kalibriert wurden, sollen im Anschluss mit den bestehenden Datenbanken aus Bauwerksprüfungen sowie mit weiteren objektbezogenen und netzbezogenen Daten zusammengeführt werden und als Entscheidungsgrundlage für den Betreiber dienen.

3.2.6 Datenüberwachung

Für eine zuverlässige Überwachung von Bauwerken ist es notwendig, neben dem eigentlichen Bauwerk auch das gesamte Sensorsystem mittels eines intelligenten Sensordatenüberwachungs- und Analysesystems zu überwachen. Ziel dieser Datenüberwachung ist es, Sensordaten durch Detektion von Sensorsignalfehlern zu plausibilisieren. Dazu können unüberwachte maschinelle Lernalgorithmen benutzt werden, die mittels Merkmalsextraktion und Clustering-Verfahren den typischen, normalen Signalverlauf der Mess- und Prüfdaten erlernen [20]. Treten Diskrepanzen zwischen dem gelernten Normalverhalten und dem gemessenen Signalverlauf auf, kann im Vorfeld oder parallel zur Datenauswertung festgelegt werden, ob die Daten weiter verwendet werden oder ob eine Benachrichtigung der zuständigen Person erfolgt, damit die Messdaten manuell analysiert werden können. WORDEN et al. [25] und SOHN et al. [26] geben eine Übersicht zu Algorithmen für diesen speziellen Bereich des Mo-

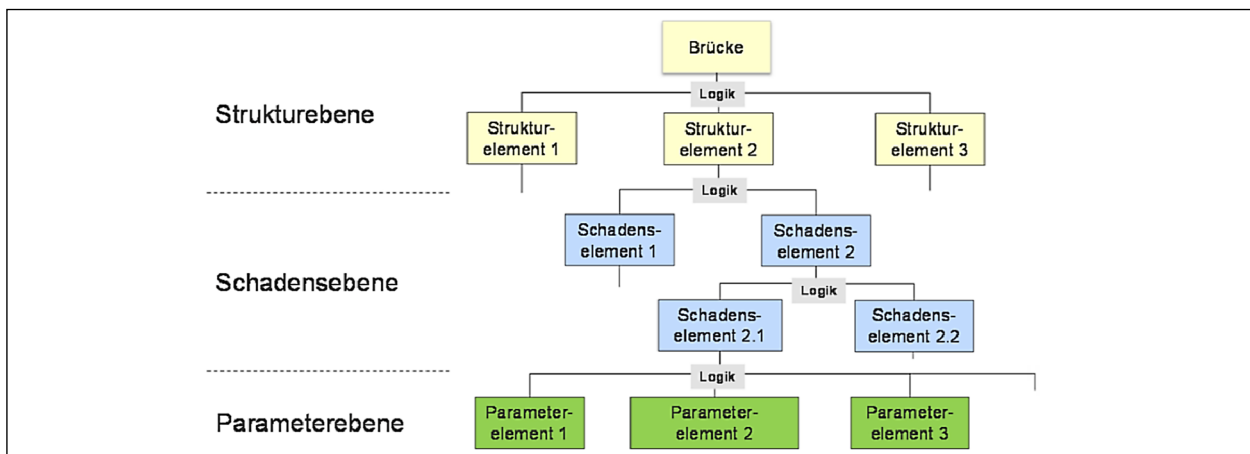


Bild 3-7 Ausschnitt eines Einflussbaums – konzeptionelle Darstellung [24]

nitorings. Stellvertretend für unüberwachte Lernalgorithmen führen SAWO et al. [20] folgende neuronale Netze auf:

- Künstliche neuronale Netze⁴
- Self-Organizing Maps⁵
- Generative Topographic Mapping⁶
- Principal Component Analysis⁷

3.3 Rahmenbedingungen für die Einführung

3.3.1 Prozesse im Betrieb, Organisation und personelle Qualifizierung

Die aktuellen Prozesse im Betrieb sowie die zukünftigen Prozesse mit Realisierung von Intelligenten Brücken wurden in Bild 3-1 und Bild 3-2 bereits skizziert. Im Rahmen der Interviews wurden diese validiert und angepasst. Nach Erstellung des Konzepts für die intelligente digitale Infrastruktur erfolgte zudem eine weitere Ergänzung, um die Prozesse im Betrieb gemäß dem entworfenen Konzept zutreffend abzubilden.

Für die Umsetzung eines IT-Projekts ist eine geeignete Aufbauorganisation erforderlich. Die Voraussetzungen hierfür wurden in den Interviews ermittelt. Grundsätzlich werden für die Implementierung eines IT-Projekts verschiedene Rollen unterschieden, wie etwa den Auftraggeber, den Projektleiter, den Projektmitarbeiter, einen IT-Lenkungsausschuss und die Projektberatung [27]. Auch für die Aufbauorganisation nach Einführung der neuen Prozesse der intelligenten digitalen Infrastruktur müssen Anpassungen der bislang bestehenden Organisation erfolgen.

Das Themengebiet Data Science ist interdisziplinär und dementsprechend muss für die Umsetzung der intelligenten digitalen Infrastruktur ein breites Fachwissen vorhanden sein. Zusätzlich zu mathematisch-statistischem und anwendungsspezifischem Wissen erfordert Data Science auch Programmierkenntnisse [28]. In den Interviews wurden die not-

wendigen Informationen zum üblichen Vorgehen beim Monitoring von Brückenbauwerken gesammelt, um eine Einschätzung dazu zu gewinnen, inwiefern Wissenslücken bestehen bzw. inwiefern eine eigenständige Realisierung der intelligenten digitalen Infrastruktur durch den Betreiber erfolgen kann. Darüber hinaus ergeben sich aus dem entworfenen Konzept weitere Fortbildungsbedarfe.

3.3.2 Hard- und Softwareausstattung

Für die Implementierung der digitalen Infrastruktur wird sowohl bestehende und neu zu beschaffende Hardware als auch Software notwendig sein. Bei der Hardware kann in drei Größenklassen von Computern unterschieden werden: Großrechner, mittlere Systeme und Personal Computer (PC). Alternativ kann eine Unterscheidung nach Prozessoren, Arbeitsspeicher, Datenwegen, Speichermedien sowie Komponenten zur Dateneingabe und -ausgabe erfolgen. Die Software hingegen wird nach ISO/IEC 2382-1 in Anwendungs-, System- und Unterstützungsssoftware unterschieden. Des Weiteren werden hier Datenbanksysteme bzw. Datenbankmanagementsysteme und Rechnernetze thematisiert [29].

Zum Bereich der Software zählt u. a. auch die Künstliche Intelligenz (KI) als ein Computersystem, das die menschliche Intelligenz imitieren soll [30]. Ziel des Einsatzes einer Künstlichen Intelligenz aus wirtschaftlicher Sicht ist in der Regel die Senkung der operativen Kosten [31].

Die erforderliche Hard- und Software zur Umsetzung der intelligenten digitalen Infrastruktur wird durch das entworfene Konzept vorgegeben.

3.3.3 Kostenabschätzung in Anlehnung an WiBe 5.0 des Bundes

Für das zu entwickelnde Konzept der intelligenten digitalen Infrastruktur wird eine Kostenabschätzung nach WiBe 5.0 des Bundes vorgenommen. Diese ist insbesondere für die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für IT-Maßnahmen in der Bundesverwaltung vorgesehen. Dabei werden

⁴ Künstliche neuronale Netze versuchen, Strukturen und Informationsarchitekturen näherungsweise durch mathematische Beschreibungen abzubilden.

⁵ Self-Organizing Maps sind spezielle, künstliche neuronale Netze, deren Ziel das unüberwachte Lernen von Merkmalen in Messdaten ist.

⁶ Generative Topographic Mapping sind eine probabilistische Erweiterung von Self-Organizing Maps, die systematisch Unsicherheiten in Messdaten sowie in gelernten Modellen berücksichtigen können.

⁷ Principal Component Analysis beschreibt eine Annäherung an eine Vielzahl statistischer Variablen durch eine geringere Zahl an aussagekräftigen Linearkombinationen.

im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht die Kosten für das Monitoring der Intelligenten Brücke an sich betrachtet, sondern die anschließenden Schritte des Datenmanagements behandelt. Zusätzlich zu den zahlreichen bereits bekannten Grundlagen für das Monitoring von Brückenbauwerken müssen von den Verantwortlichen die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu bestimmenden Kosten der intelligenten digitalen Infrastruktur berücksichtigt werden.

Zu den beschriebenen Kosten des Monitorings, die im Weiteren nicht behandelt werden, zählen neben den Beschaffungskosten für Sensoren und weitere benötigte elektronische Komponenten z. B. auch Kosten für die Erstellung des Monitoringkonzepts, die Installation, die Kalibrierung, die Wartung, den Austausch sowie den Betrieb, insbesondere durch den Energieverbrauch, und die manuelle Datenauswertung [2] [7] [8]. Zu den verwendeten Sensoren sowie Sensornetzen liegen z. B. diverse Grundlagen und Erfahrungswerte vor, sodass Aussagen zu den Vor- und Nachteilen sowie den zu erwartenden Kosten gemacht werden können [2] [7] [8] [10] [11].

Des Weiteren ist bekannt, wie die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit von Monitoringmaßnahmen gesteuert werden kann. Dazu sollte eine Optimierung der Anzahl an Sensoren und der Sensorplatzierung sowie die Ermittlung von sensitiven Messgrößen berücksichtigt werden. Die Zuverlässigkeit der Sensornetze kann dabei durch Redundanzen, Prozesskopplungen und interne Überwachung im autarken Sensor sichergestellt werden. Alle diese Maßnahmen haben jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit einer Monitoringmaßnahme, die jedoch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht weiter betrachtet werden sollen [7] [10]. Dieses Forschungsvorhaben setzt auf die bereits beschriebenen Grundlagen auf und knüpft mit einer Betrachtung der Kosten der intelligenten digitalen Infrastruktur an die bekannten Erkenntnisse zu Kosten von Monitoringmaßnahmen an.

Für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von IT-Maßnahmen stehen europaweit verschiedene Modelle und Instrumente (z. B. BEGIX, eGOV-Rechner, WiBe 5.0, SCM) zur Verfügung. Im Rahmen eines Vergleichs von Methoden in Deutschland, der Schweiz und Österreich wurde die WiBe 5.0 als eine der komplexeren Methoden zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von IT-Projekten identifiziert [32]. Auch in weiteren Literaturquellen wird die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von IT-Maßnahmen ähnlich zur WiBe 5.0 dargestellt [16] [29] [33]-[35].

Die „WiBe 5.0 – Konzept zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Bundesverwaltung, insbesondere beim Einsatz der IT“ unterstützt die Bundesverwaltung bei der einheitlichen Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Maßnahmen. Dabei sind die Kosten und eventuell entstehende Folgekosten sowie der (monetäre und nicht monetäre) Nutzen einer Maßnahme zu erfassen und zu bewerten. Ursprünglich entwickelt wurde die WiBe für Maßnahmen der Informationstechnik und die Kriterien wurden speziell für IT-Maßnahmen definiert, allerdings ist die WiBe prinzipiell auch auf andere Bereiche übertragbar [36].

Nach WiBe ist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in drei Schritte aufgeteilt. Zunächst werden die relevanten Kriterien für die Betrachtung ausgewählt. Anschließend findet die Durchführung der Datenerhebung sowie die eigentliche Gesamtbeurteilung der Maßnahme statt. Zudem erfolgt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in zwei Teilen, in einer Kapitalwert- und einer Nutzwertbetrachtung. Im Rahmen der Kapitalwertbetrachtung (KW) wird eine Betrachtung der durch die Maßnahme entstehenden, monetär quantifizierbaren Kosten und Nutzen durchgeführt. Diese können dabei einmalig oder laufend anfallen. Die Nutzenkriterien können zudem als Einsparungen oder als Mehrerlöse auftreten. In der anschließenden Bewertung werden die verschiedenen Kriterien in den Gruppen Entwicklungskosten und Entwicklungsnutzen sowie Betriebskosten und Betriebsnutzen aufgeführt [36].

Die Nutzwertbetrachtung wird unterteilt in die Bewertung der qualitativ-strategischen Bedeutung und die externen Effekte der IT-Maßnahme. Die Kriterien der qualitativ-strategischen Bedeutung der IT-Maßnahme beziehen sich auf das zu erstellende System und können nur qualitativ beschrieben werden. Daher wird eine Punktbewertung je Kriterium vorgenommen (Bewertungsskala von 0 bis 10, wobei 10 die höchste Bewertung darstellt). Mit den externen Effekten der IT-Maßnahme werden die Auswirkungen auf Kunden (Bürger, Unternehmen, andere Verwaltungseinheiten etc.) betrachtet, indem diese über die dazugehörigen Kriterien qualitativ bewertet werden. Auch hier erfolgt eine Punktbewertung je Kriterium (Bewertungsskala von 0 bis 10, wobei 10 die höchste Bewertung darstellt) [36].

Die Nutzwertbetrachtung wird unterteilt in die Bewertung der qualitativ-strategischen Bedeutung und die externen Effekte der IT-Maßnahme. Die Kriterien der qualitativ-strategischen Bedeutung der IT-Maßnahme beziehen sich auf das zu erstellende System und können nur qualitativ beschrieben werden. Daher wird eine Punktbewertung je Kriterium vorgenommen (Bewertungsskala von 0 bis 10, wobei 10 die höchste Bewertung darstellt) [36].

Die abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der WiBe erfolgt dreigeteilt. Die monetär bewertbaren Kriterien der Wirtschaftlichkeit werden in der WiBe KW erfasst. Die nicht monetäre Wirtschaftlichkeit wird in der Nutzwertbetrachtung thematisiert, getrennt nach qualitativen Aspekten (WiBe Q) und Wirkungen (WiBe E). Zusätzlich erfolgt eine abschließende Bewertung, bei der die vorgenannten Wirtschaftlichkeitsberechnungen gemeinsam betrachtet werden [36]. Auf eine detaillierte Beschreibung der Wirtschaftlichkeitsbewertung wird an dieser Stelle verzichtet, da die Nutzenseite in diesem Forschungsvorhaben nicht weiter betrachtet wird. Erkenntnisse zu Wirtschaftlichkeits- bzw. Nutzenbetrachtungen von Monitoringmaßnahmen wurden in weiteren Forschungsvorhaben der BAST (u. a. [37] und [38]) behandelt.

Für eine Kostenabschätzung von IT-Maßnahmen können prinzipiell die Kriterien nach WiBe herangezogen werden. Grundsätzlich wird unterschieden in Entwicklungskosten sowie in Betriebskosten. Die qualitativ-strategischen Kriterien und die externen Effekte spiegeln den Nutzen der Maßnahme wider und werden daher nur qualitativ bewertet [36]. Diese Kriterien werden, genauso wie die Entwicklungs- und Betriebsnutzen, im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht herangezogen.

Die Kosten des zu entwickelnden Konzepts für die intelligente digitale Infrastruktur werden maßgeblich von der Datenmenge, der Aufbewahrungsdauer der Daten, der Anzahl und Komplexität der Prozesse und Schnittstellen, der Komplexität der Datenaufbereitung sowie der verwendeten Technologien für die verschiedenen Datenprozesse beeinflusst [39].

Die Entwicklungskosten werden in Planungskosten, Entwicklungs- und Investitionskosten sowie Kosten der Systemeinführung unterschieden (vgl. Bild 3-8)

und fallen bis zum sogenannten Wirkbetrieb einer neuen IT-Maßnahme an. Der Wirkbetrieb beginnt nach WiBe nach der Planung und Realisierung der Maßnahme [36].

Die Planungskosten umfassen die Personalkosten für das eigene Personal, das bei der Planung der Maßnahme bis zum sogenannten Wirkbetrieb notwendig ist. Zudem können Kosten für externe Beratung für die Planung bis zum Wirkbetrieb anfallen, wozu auch weitere Nebenkosten zählen, die im direkten Zusammenhang damit stehen (z. B. Reisekosten). Zu den Kosten der Entwicklungsumgebung zählen alle Kosten, die während der Planungsphase bei der Beschaffung von Hard- und Software für das Entwicklerteam anfallen. Dazu zählen auch Kosten, die sich aus dem notwendigen Konfigurationsmanagement bzw. allgemein aus dem Vorgehensmodell des Bundes ergeben sowie Kosten für externe Schulungen. Des Weiteren zählen zu den Planungskosten sonstige Kosten für Sach-/Hilfsmittel, die während der Planung anfallen, und Reisekosten des eigenen Personals [36].

Zu den Entwicklungs- und Investitionskosten zählen alle Kosten, die im Zusammenhang mit der Erstellung der erforderlichen Hard- und Software anfallen. Dazu zählen zum einen die Hardwarekosten, die wiederum weiter unterteilt werden in Kosten für Host/Server, Netzbetrieb und Arbeitsplatzrechner. Zu den Softwarekosten zählen die Kosten für die Entwicklung bzw. Beschaffung von Software, die Kosten für die Anpassung von Software und/oder Schnittstellen sowie die Kosten für die Evaluierung, Zertifizierung und Qualitätssicherung von Software. Darüber hinaus können weitere Kosten für Datenschutz/Datensicherheit sowie für die Barrierefreiheit anfallen. Zum anderen werden auch die Installationskosten den Entwicklungs- und Investitionskosten zugeordnet. Hierzu zählen die bauseitigen Kos-

Planungskosten	Entwicklungs- und Investitionskosten	Kosten der Systemeinführung
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Personalkosten (eigenes Personal)	<input type="checkbox"/> Hardwarekosten	<input type="checkbox"/> System- und Integrationstest(s)
<input type="checkbox"/> Kosten für externe Beratung	<input type="checkbox"/> Softwarekosten	<input type="checkbox"/> Übernahme von Datenbeständen
<input type="checkbox"/> Kosten der Entwicklungsumgebung	<input type="checkbox"/> Installationskosten	<input type="checkbox"/> Ersts Schulung Anwender und IT-Fachpersonal
<input type="checkbox"/> Sonstige Kosten für Sach-/Hilfsmittel		<input type="checkbox"/> Einarbeitungskosten Anwender und IT-Fachpersonal
<input type="checkbox"/> Reisekosten (eigenes Personal)		<input type="checkbox"/> Sonstige Umstellungskosten

Bild 3-8 Entwicklungskosten nach WiBe 5.0 des Bundes (nach [36])

laufende Sachkosten	laufende Personalkosten
<input type="checkbox"/> Leitungs-/Kommunikationskosten	<input type="checkbox"/> Personalkosten aus Systembenutzung
<input type="checkbox"/> Host- und Serverkosten	<input type="checkbox"/> Systembetreuung und -administration
<input type="checkbox"/> Kosten für Arbeitsplatzrechner	<input type="checkbox"/> Laufende Schulung/Fortbildung
<input type="checkbox"/> Softwarekosten	
<input type="checkbox"/> Verbrauchsmaterial	
<input type="checkbox"/> Energie-, Raum- und Klimatisierungskosten	
<input type="checkbox"/> Kosten externer Unterstützung	
<input type="checkbox"/> Sonstige Kosten	

Bild 3-9 Betriebskosten nach WiBe 5.0 des Bundes (nach [36])

ten, die Aufwendungen für die Verlegung technischer Infrastruktur, die Büro-/Raumausstattung sowie weiteres Zubehör und die Personalkosten für die Systeminstallation [36].

Bei der Umstellung auf die neuen IT-Maßnahmen entstehen weitere Kosten, die zu den Kosten der Systemeinführung gezählt werden. Primäres Ziel der Maßnahmen ist es, dass der Anwender die neuen Möglichkeiten nach der Umstellung vollumfänglich nutzen kann. Zu diesen Kosten zählen Aufwendungen für System- und Integrationstests sowie Kosten für die Übernahme von Datenbeständen. Darüber hinaus können Ersts Schulungen für Anwender und IT-Fachpersonal erforderlich sein, die als Kosten zu berücksichtigen sind. Ebenso können Einarbeitungskosten für die Anwender und das IT-Fachpersonal anfallen. Weitere Kosten, die mit der Systemeinführung verbunden sind, können bei den sonstigen Umstellungskosten berücksichtigt werden [36].

Nach aktueller Einschätzung werden im Forschungsvorhaben insbesondere die Kosten für die Datenhaltung als entscheidend angesehen. Bei einer Umsetzung der Datenhaltung durch z. B. ein eigenes Rechenzentrum fallen Kosten im Bereich der Hardwarekosten an, die zu den Entwicklungskosten zählen. Detailliert gehören dazu die Kosten für die benötigten Server, die Kosten für den tatsächlichen Bau eines Rechenzentrums sowie die Kosten für die Verlegung technischer Infrastruktur, um die Verbindung von Intelligenten Brücken und Rechenzentrum sicherzustellen. Bei einer Umsetzung über eine Public Cloud fallen diese Kosten nicht direkt an, sondern werden indirekt über das Nutzungsentgelt des Cloudanbieters entrichtet. Des Weiteren werden die Kosten für die Erstimplementierung der

Daten als bedeutend eingeschätzt. Nach WiBe 5.0 sind Kosten für die Übernahme von Datenbeständen vorgesehen, nach aktueller Auffassung muss diese Kategorie allerdings erweitert werden, da aktuell noch keine Datenbestände in einer intelligenten digitalen Infrastruktur vorliegen.

Nach Einführung der IT-Maßnahme, also im sogenannten Wirkbetrieb, fallen dann Betriebskosten an, die aufgrund des Einsatzes der neuen IT-Maßnahme entstehen. Dabei wird unterschieden in laufende Sachkosten und laufende Personalkosten [36]. Eine Übersicht zu den Betriebskosten zeigt Bild 3-9.

Zu den laufenden Sachkosten zählen alle Kosten, die durch den Betrieb der IT-Maßnahme verursacht werden und nicht zu den Personalkosten zählen. Dazu zählen u. a. Leitungs- und Kommunikationskosten, worunter auch Kosten verstanden werden, die aufgrund der IT-Maßnahme von Leistungserbringern entstehen. Die Leistungserbringer können in dem Fall Kommunikationsdiensteanbieter außerhalb der öffentlichen Verwaltung, behördenübergreifende Kommunikationsdiensteanbieter innerhalb der öffentlichen Verwaltung sowie behördeninterne Kommunikationsdiensteanbieter sein [36].

Weitere laufende Sachkosten sind Host- und Serverkosten, die durch zentrale Rechenzentren und im Hostbetrieb entstehen, sowie Kosten für Arbeitsplatzrechner, die durch Ersatz oder Ergänzung im Wirkbetrieb anfallen. Darüber hinaus können noch Softwarekosten für zusätzliche Lizenzen, Lizenzerweiterungen, Wartung, Pflege und Updates während des Wirkbetriebs sowie Kosten für Verbrauchsmaterial (Papier, Datenträger etc.) anfallen [36].

Einen weiteren wichtigen Punkt stellen Energie-, Raum- und Klimatisierungskosten der IT-Maßnahme dar. Die Energiekosten entstehen durch den Betrieb der Hardware und durch eine eventuell erforderliche Klimatisierung. Als Raumkosten wiederum werden die Miete der Räumlichkeiten sowie ggf. weitere notwendige Maßnahmen, etwa zur Aufrechterhaltung der Datensicherheit durch ein Zugangskontrollsystem, gerechnet. Zudem entstehen für die Klimatisierung neben den Energiekosten noch weitere Kosten, etwa für Ersatz-/Ergänzungs- und Wartungskosten im Wirkbetrieb. Darüber hinaus können im Wirkbetrieb noch Kosten für eine externe Unterstützung sowie sonstige Kosten anfallen [36].

Im Umkehrschluss zählen die Kosten, die durch den Betrieb der neuen IT-Maßnahme verursacht werden und keine Sachkosten sind, als laufende Personalkosten. Dabei wird unterschieden in Personalkosten aus Systembenutzung durch den Anwender sowie ggf. entstehende Ausfallzeiten des Systems (downtime), die Systembetreuung und -administration durch zentrale Unterstützungsstellen (z. B. durch einen Benutzerservice) und laufende Schulungen und Fortbildungen nach der Erstschulung [36].

Über den gesamten Lebenszyklus gerechnet stellen im Allgemeinen die Betriebskosten von IT-Maßnahmen den größten Anteil an den Gesamtkosten dar, mit weitem Abstand gefolgt von den Errichtungskosten sowie den Planungskosten [40].

Ein eigenes Rechenzentrum weist in der Regel hohe monatliche Fixkosten sowie das Risiko auf, nicht ausgelastet zu sein [41]. Bei einer Umsetzung über einen externen Cloudanbieter hingegen können die Investitionen in ein eigenes Rechenzentrum sowie in die erforderliche Hardware eingespart wer-

den und es sind weniger Mitarbeiter auf Seiten des Betreibers notwendig, die entsprechende Qualifikationen und Kenntnisse im Bereich des Datenmanagements aufweisen. Für den Betreiber werden die Fixkosten damit zu variablen monatlichen Kosten, da der externe Cloudanbieter in der Regel nach tatsächlicher Nutzung des angebotenen Service vergütet wird. Damit fällt für den Betreiber entsprechend auch das Risiko der Unter- oder Überlastung der IT-Infrastruktur weg, da dieses auf den externen Cloudanbieter übergeht [41].

3.4 Gegenüberstellung

Im Folgenden sollen der Status quo sowie der Status zur Intelligenten Brücke in einer SWOT-Analyse dargestellt werden. Diese Form der Gegenüberstellung kann für strategische Planungen verwendet werden und stellt die Stärken (Strengths) und die Schwächen (Weakness) sowie die Chancen (Opportunities) und die Risiken (Threats) gegenüber.

3.4.1 SWOT-Analyse zum Status quo

Zu den Stärken des aktuell üblichen Vorgehens zur Zustandserfassung und -bewertung von Bestandsbrücken zählen, dass große Brückenflächen überwacht und Zusammenhänge zu anderen Ereignissen vom Bauwerksprüfer erfasst und auf Grundlage der Erfahrungen bewertet werden können. Demgegenüber steht auf der Seite der Schwächen, dass große zeitliche Abstände zwischen den Bauwerksprüfungen liegen, die Zustandserfassung und Bewertung personenabhängig und damit auch subjektiv ist und Schäden häufig erst lange Zeit nach dem Auftreten festgestellt werden. Eine vollständige Gegenüberstellung zeigt Tabelle 3-1.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • großflächige Beobachtungen möglich • Erfassung und Bewertung von Zusammenhängen (Erfahrungswerte Bauwerksprüfer) 	<ul style="list-style-type: none"> • große zeitliche Abstände zwischen den Bauwerksprüfungen • subjektive Bewertung • Feststellung von Schäden häufig erst nach dem Auftreten • keine zerstörungsfreie Bewertung des Schadenszustands im Bauteilinneren
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • große bestehende Datenbanken mit Bauwerksdaten • Kenntnisse über typische Schäden, Problemstellen und Hot-Spots 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Kenntnisse über das zeitliche Auftreten von Schäden • keine Informationen zum tatsächlichen Tragverhalten bzw. Zustand der Brücke • keine Informationen zum Einfluss von Einwirkungsgrößen

Tab. 3-1 SWOT-Analyse zum Status quo

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Überwachung und Bewertung des Zustands der Brücke frühzeitige Erkennung von Schäden und Veränderungen Möglichkeiten zum prädiktiven Eingriff und effizienten Mitteleinsatz alle Daten liegen vollständig digital vor 	<ul style="list-style-type: none"> finanzieller und personeller Aufwand für die Datenerfassung, Datenhaltung und Datenaufbereitung regelmäßige Wartung und ggf. auch Austausch der Sensoren erforderlich
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> Verknüpfung mit Bauwerksdaten und Identifikation von Korrelationen zwischen mehreren Brücken schneller Zugriff auf die Daten von Dritten 	<ul style="list-style-type: none"> Datensicherheit bei der Übertragung und Speicherung von Daten große anfallende Datenmengen Qualifizierung der Mitarbeiter erforderlich Datenbestand anfänglich ggf. zu gering falsche gefühlte Sicherheit

Tab. 3-2 SWOT-Analyse zur Intelligenten Brücke

Zu den Chancen des aktuellen Vorgehens zählen, dass große Datenbanken mit Bauwerksdaten zur Verfügung stehen, die für eine weitere Auswertung genutzt werden können, und Kenntnisse über typische Schäden, Problemstellen und Hot-Spots vorliegen, um die Überwachung der Brücke zielgerichtet durchführen zu können. Zu den Risiken hingegen zählen, dass derzeit keine Kenntnisse über das zeitliche Auftreten von Schäden vorliegen und keine Informationen zum tatsächlichen Tragverhalten bzw. zum aktuellen Zustand sowie zum Einfluss von Einwirkungsgrößen vorliegen.

3.4.2 SWOT-Analyse zur Intelligenten Brücke

In Tabelle 3-2 sind die allgemeinen Stärken und Schwächen sowie die Chancen und Risiken für die Intelligente Brücke gegenübergestellt. Es ist direkt zu erkennen, dass durch eine Ausstattung zur Intelligenten Brücke auf der einen Seite Schwächen abgebaut und auf der anderen Seite Chancen genutzt werden können. Eine abschließende Zuordnung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken muss jedoch individuell für jede Intelligente Brücke vorgenommen werden, da diese von der tatsächlichen Ausstattung mit Sensoren sowie dem angewendeten Grad der Intelligenz abhängt.

Zu den Stärken der Intelligenten Brücke zählt, dass die Überwachung und die Bewertung des Zustands bzw. der Zustandsindikatoren der Brücke kontinuierlich erfolgt und auftretende Schäden und Veränderungen dadurch frühzeitig erkannt werden können. Darüber hinaus bestehen durch dieses Wissen die Möglichkeiten, prädiktiv Erhaltungsmaßnahmen an der Brücke durchführen zu können, bevor größere Schäden auftreten oder Einschränkungen der Nutzbarkeit erforderlich sind, und die personellen

sowie finanziellen Mittel durch eine Optimierung der Eingriffszeitpunkte effizient einsetzen zu können. Eine weitere Stärke der Intelligenten Brücke ist, dass alle Daten vollständig digital vorliegen und zentral an einem Ort gespeichert sind, sodass diese unmittelbar für weitere Bewertungen der Brücke oder ggf. auch für netzweite Analysen verwendet werden können. Demgegenüber steht der finanzielle und personelle Aufwand für die Datenerfassung, Datenhaltung und Datenaufbereitung. Zudem ist eine regelmäßige Kontrolle und Wartung sowie ggf. auch ein Austausch der Sensoren erforderlich.

Zu den Chancen der Intelligenten Brücke zählt, dass eine direkte Verknüpfung mit den vorliegenden Bauwerksdaten erfolgen kann, sodass je nach Grad der Intelligenz der Brücke Korrelationen zu anderen Bauwerken hergestellt und Rückschlüsse gezogen werden können. Zudem besteht die Möglichkeit, Daten an Dritte weiterzugeben, sodass z. B. für Schwerlasttransporte eine Optimierung der Verkehrsführung erfolgen kann oder bei Minustemperaturen auf der Brücke eine automatische Benachrichtigung der Straßenmeisterei erfolgt. Auf der anderen Seite zählt zu den Risiken der Intelligenten Brücke, dass bei der Datenübertragung und Datenhaltung eine Sicherheitslücke entstehen kann, auch wenn die Datensicherheit durch geeignete Maßnahmen bestmöglich sichergestellt wird. Ein weiterer Punkt ist, dass bei der Intelligenten Brücke große Datenmengen anfallen, für die geeignete Auswertungsalgorithmen zur Verfügung stehen müssen, damit keine Datenfriedhöfe mit ungenutzten Daten entstehen. Hierzu ist eine entsprechende Qualifizierung der Mitarbeiter, die für die Datenerfassung, Datenhaltung und die anschließende Datenaufbereitung zuständig sind, essenziell. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass das

volle Potenzial der Verknüpfung von Daten zwischen unterschiedlichen Bauwerken vom vorhandenen Datenbestand abhängt und Korrelationen zum Teil erst bei steigendem Datenbestand sicher und zuverlässig erkannt werden können. Abschließend ist auf der Seite der Risiken zu erwähnen, dass durch die Überwachung mit Sensoren ein fiktives Gefühl von Sicherheit entstehen kann und Schäden und Veränderungen nicht als kritisch eingeordnet werden, solange vorher definierte Warn- und Alarmwerte nicht überschritten werden.

4 Interviews mit zentralen Akteuren

Um die aufbereiteten Informationen zur Intelligen-ten Brücke hinsichtlich möglicher Prozesse zur Datenerfassung, Datenübertragung, Datenverarbeitung und Datennutzung bis hin zu möglichen Visualisierungen anzureichern, wurden sieben Interviews mit insgesamt 12 zentralen Akteuren zur Intelligen-ten Brücke bzw. externen Experten durchgeführt. Ziel der Interviews war es, die Fragestellungen zu vertiefen und im Sinne des Gesamtmodells für das Datenmanagement der Intelligen-ten Brücke einzu- grenzen. Die Interviews hatten dazu einen zeitli- chen Umfang von 1,5 – 2 Stunden.

Die Erkenntnisse aus den Interviews wurden dahin- gehend ausgewertet, dass am Ende ein Gesamtbild zum zukünftigen Datenmanagementprozess zur In- telligenten Brücke aus Sicht der Interviewpartner skizziert ist. Auf Grundlage der Interviews wurde im Anschluss das tragfähige Portfolio im Bereich der Intelligen-ten Brücke formuliert. Dieses Konzept greift bereits datenbezogene Aspekte auf und be- schreibt den sogenannten konzeptionellen Korridor des Datenmanagements.

4.1 Vorbereitung der Interviews

Zur Vorbereitung auf die Interviews wurde ein um- fangreicher Fragenkatalog erstellt und die Fragen wurden den drei Hauptakteuren (Betreiber, Fachpla- ner und Bauwerksprüfer) der Intelligen-ten Brücke zu- geordnet. Im Anschluss wurde anhand des erstellten Fragenkatalogs für jede Zielgruppe ein individueller Fragebogen angefertigt, der die Anforderungen und Wünsche der jeweiligen Akteure abfragt und auf die wesentlichen Fragestellungen abzielt. Zusätzlich wurden die Fragen zur Strukturierung der Interviews

in Themen gegliedert, die sich an den Ebenen der intelligenten digitalen Infrastruktur orientieren.

In Abhängigkeit der vorgenommenen Einordnung wurde den Interviewpartnern der entsprechende Fragebogen sowie zusätzlich ein Handout, das die wichtigsten Informationen zum Forschungsvorha- ben enthält, zugesandt. Der vollständige Fragenka- talog, die Fragebögen für Betreiber, Fachplaner und Bauwerksprüfer sowie das Handout sind im Anhang aufgeführt.

4.2 Durchführung der Interviews

Die Durchführung der Interviews erfolgte digital per Videokonferenz. Von Seiten der Interviewer waren immer mindestens zwei Personen beteiligt, sodass ein Interviewer die Gesprächsführung übernehmen und der andere Interviewer die Notizen festhalten konnte. Um zudem das Fragenspektrum möglichst großflächig abdecken zu können, setzte sich die Seite der Interviewer immer aus Personen von min- destens zwei Projektpartnern zusammen.

Die Durchführung der Interviews erstreckte sich auf den Zeitraum von Mitte Juni bis Ende Juli 2021. Durch diesen vergleichsweise langen Zeitraum be- stand die Möglichkeit, offene Fragestellungen aus den ersten Interviews in den später geführten Inter- views nochmal aufzugreifen und zu thematisieren.

Eine anonymisierte Übersicht über die Interview- partner enthält Tabelle 4-1.

Jedes durchgeführte Interview wurde protokolliert und in einer Ergebnis-Canvas-Darstellung aufberei- tet, um die wesentlichen Erkenntnisse aus dem In- terview zu fokussieren und für die Gesamtbetrach- tung zu erschließen. Auf Grundlage der Ergebnis- Canvas-Darstellungen wurde im Anschluss ein Cluster zu den thematisierten Schwerpunkten er- stellt, das die wichtigsten Aussagen der Interview- partner übersichtlich darstellt (Bild 4-1). Die Eintei- lung umfasst dabei folgende Schwerpunkte:

- Monitoring allgemein,
- Installation von Sensoren,
- Datenerfassung,
- Datenübertragung,
- Datenhaltung,
- Datenaufbereitung und
- Lebenszyklusmanagement.

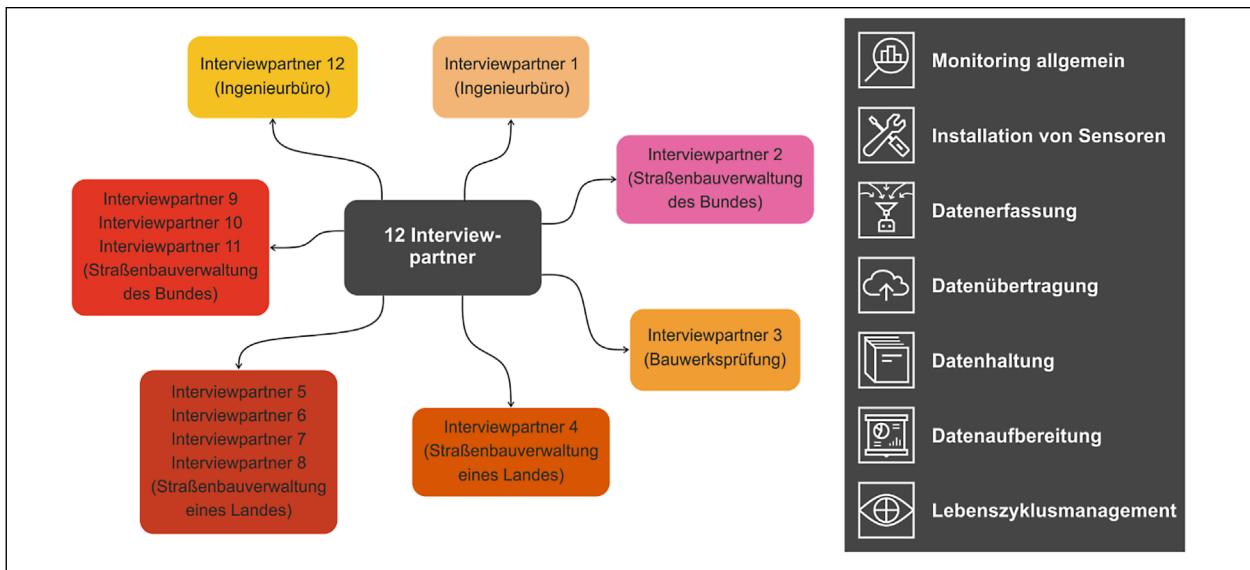


Bild 4-1 Darstellung der Interviewpartner sowie der thematisierten Schwerpunkte

Bezeichnung		Tätigkeit
(IP1)	Interviewpartner 1	Ingenieurbüro
(IP2)	Interviewpartner 2	Straßenbauverwaltung des Bundes
(IP3)	Interviewpartner 3	Bauwerksprüfung
(IP4)	Interviewpartner 4	Straßenbauverwaltung eines Landes
(IP5)	Interviewpartner 5	Straßenbauverwaltung eines Landes
(IP6)	Interviewpartner 6	Straßenbauverwaltung eines Landes
(IP7)	Interviewpartner 7	Straßenbauverwaltung eines Landes
(IP8)	Interviewpartner 8	Straßenbauverwaltung eines Landes
(IP9)	Interviewpartner 9	Straßenbauverwaltung des Bundes
(IP10)	Interviewpartner 10	Straßenbauverwaltung des Bundes
(IP11)	Interviewpartner 11	Straßenbauverwaltung des Bundes
(IP12)	Interviewpartner 12	Ingenieurbüro

Tab. 4-1 Übersicht über die Interviewpartner

Die Ergebnis-Canvas-Darstellungen zu den einzelnen Interviews sowie das zusammengestellte Cluster zu den jeweiligen Themenschwerpunkten sind im Anhang aufgeführt.

4.3 Auswertung der Interviews

Alle Interviewpartner hatten in der Vergangenheit bereits Erfahrungen mit dem Monitoring von Brückenbauwerken gesammelt. In der Regel handelte es sich dabei jedoch um Monitoring zur Überwa-

chung von lebensdauerverlängernden Maßnahmen und war auf die Überwachung einzelner Messwerte ausgerichtet. Aus diesem Grund sind einige Antworten der Interviewpartner nicht direkt auf Intelligente Brücken übertragbar, sodass eine klare Unterscheidung zwischen Monitoring, das der Überwachung von lebensdauerverlängernden Maßnahmen dient, und Monitoring, das im Rahmen der Intelligenten Brücke durchgeführt wird, erforderlich ist. Dies wird bei der Auswertung der Interviews entsprechend kenntlich gemacht. Sind die Aussagen hingegen teilweise oder vollständig übertragbar, wird nicht extra darauf hingewiesen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse aus den Interviews getrennt für die thematisierten Schwerpunkte zusammengefasst und gegenübergestellt.

4.3.1 Monitoring allgemein

Aktuell wird ein Monitoring in der Regel durchgeführt, wenn im Rahmen einer Nachrechnung Nachweisdefizite (Standicherheit, Ermüdung etc.) aufgetreten sind und alternativ regelmäßige Sonderprüfungen erforderlich wären. Interviewpartner 1 stellt dazu den typischen Ablauf eines Monitorings dar: Im Anschluss an die Nachrechnung erstellt der Fachplaner Monitoring ein Monitoringkonzept und legt auf Basis von Vergleichsrechnungen Warn- und Alarmwerte fest. Anschließend wird gemeinsam mit dem Betreiber eine Ausschreibung für die Monitoringmaßnahme erstellt und an einen Spezialdienstleister Monitoring vergeben. Der Dienstleister ist dann für die Installation der Sensoren, die Daten-

erfassung, die Datenhaltung sowie eine erste Aufbereitung der Daten zuständig und stellt diese dem Fachplaner sowie dem Betreiber grafisch aufbereitet zur Verfügung. Abschließend werden die zur Verfügung gestellten Messdaten vom Fachplaner und Betreiber weiter ausgewertet und für die Entscheidungsfindung herangezogen (IP1).

Auf Grundlage bisher durchgeführter Monitoringmaßnahmen berichtet Interviewpartner 11, dass Monitoring bisher immer ein Erfolgsmodell gewesen sei (IP11) und Interviewpartner 8 ergänzt, dass durch das durchgeführte Monitoring bisher immer neue Erkenntnisse zum Verhalten der Brücke gewonnen werden konnten, sodass in Zukunft bei Veränderungen früher eingegriffen werden kann (IP8). Interviewpartner 6 fügt an, dass das Monitoring aktuell durchschnittlich für einen Zeitraum von fünf Jahren und in der Regel bis zum Ende der Nutzungsdauer der Brücke (meist Rückbau für einen Ersatzneubau) erfolgt (IP6). Eine Abfrage des BMDV bei den Straßenbauverwaltungen der Länder hingegen hat ergeben, dass ein Großteil der Monitoringaufgaben innerhalb eines Zeitraums von zwei Jahren abgeschlossen war und nur wenige Monitoringmaßnahmen deutlich längere Laufzeiten aufwiesen [42].

Die Idee der Intelligenten Brücke sowie deren Ziele fanden alle Interviewpartner interessant, hatten jedoch zum Teil unterschiedliche Vorstellung, wie eine Intelligente Brücke auszusehen hat. Wichtig sei, dass bei einer Intelligenten Brücke alle Informationen digital vorliegen und diese nicht aus unterschiedlichen Quellen zusammengesucht werden müssen (IP1), dass das System lernfähig ist, damit Erfahrungen von anderen Bauwerken berücksichtigt werden können (IP7) und dass die Antworten einer Brücke direkt interpretiert werden und den Anwender klug aufbereitet erreichen (IP5). Interviewpartner 3 gibt jedoch zu bedenken, dass die Intelligente Brücke nicht intelligenter sein darf als der Ingenieur selber und die Nachvollziehbarkeit immer gewährleistet sein muss (IP3). Auf Grundlage von Erfahrungen im Projekt „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ merkt Interviewpartner 12 an, dass die Planung und Konzeptionierung der Überwachungsaufgabe ein multidisziplinärer Prozess ist und der Planer alle Schritte im Vorfeld sorgfältig durchdenken muss, um entsprechende Anforderungen zu formulieren (IP12).

Interviewpartner 2 weist darauf hin, dass die Lebensdauer einer Brücke nicht durch eine Überwa-

chung erhöht werden kann, aber dass durch die Erkenntnisse aus einer Überwachung die Eingriffszeitpunkte für Erhaltungsmaßnahmen optimiert werden können, worüber dann eine längere Lebensdauer erzielt werden kann. Damit dieses Ziel erreicht wird, muss der Betreiber alle Informationen erhalten, die für ein effektives Erhaltungsmanagement benötigt werden (IP2). Interviewpartner 12 bestätigt, dass mithilfe von Sensoren erforderliche Erhaltungsmaßnahmen erkannt werden können, merkt aber an, dass das Ziel der Intelligenten Brücke vorrangig die Überwachung und Bewertung des Tragverhaltens ist und Erhaltungsmaßnahmen deshalb im Optimalfall erfolgen sollten, bevor diese Auswirkungen auf das Tragverhalten haben (IP12). Zudem ergänzt Interviewpartner 11, dass die Ausführung einer Brücke als Intelligente Brücke keine robuste Bauweise ersetzen darf (IP11).

Bezüglich der zeitlichen Dauer weist Interviewpartner 12 darauf hin, dass bei Intelligenten Brücken die Überwachung auf einen langen Zeitraum ausgelegt ist und in den ersten Jahren in der Regel keine großen Veränderungen zu erwarten sind. Diese Tatsache ist für den Betreiber meist problematisch, da sich erstmal, anders als beim Monitoring zur Überwachung lebensdauererweiternder Maßnahmen, kein großer kommerzieller Nutzen aus der Überwachung einstellt (IP12). Auf Grundlage von Erfahrungswerten treten bei Brückenneubauten innerhalb der ersten 10-20 Jahre nur selten Probleme auf (IP5). Würden die ersten Jahre jedoch nicht überwacht werden, merkt Interviewpartner 8 an, würden Informationen fehlen und man müsste von der Annahme ausgehen, dass die Brücke bis zu diesem Zeitpunkt schadensfrei ist (IP8).

Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht darin, dass beim Monitoring zur Überwachung lebensdauererweiternder Maßnahmen nur einzelne Messwerte überwacht sowie mit Schwellwerten abgeglichen werden und im Gegensatz dazu bei der Intelligenten Brücke mehrere Messwerte miteinander verknüpft werden, um z. B. Änderungen im Tragverhalten erkennen zu können (IP12). Dabei ist entscheidend, dass die aufbereiteten Ergebnisse und die Sensoren mit dem Modell verknüpft werden, damit Aussagen zum Tragverhalten möglich sind (IP8). Zusätzlich sind Kalibrierfahrten in regelmäßigen Abständen mit einem definierten Fahrzeug erforderlich, damit Änderungen festgestellt werden können (IP12).

Bei der Frage, ob nur Neubauten oder auch Bestandsbauwerke zu Intelligenten Brücken ausgestattet werden können, herrschte Uneinigkeit. Interviewpartner 12 ist der Meinung, dass nur Neubauten zu Intelligenten Brücken ausgerüstet werden können, da nur bei diesen Null-Messungen durchgeführt werden können (IP12). Die anderen Interviewpartner hingegen können sich auch vorstellen, bestehende Bauwerke zu Intelligenten Brücken auszurüsten. Interviewpartner 4 fügt zudem an, dass in Deutschland die Unterhaltung der bestehenden Brückenbauwerke mit anlassbezogenem Monitoring von besonderer Bedeutung ist, da im Vergleich zu anderen Ländern nur wenige Großbrücken neu gebaut werden (IP4).

Weitgehende Einigkeit herrschte wieder bei der Frage, welche Brücken bevorzugt zu überwachen sind und zu Intelligenten Brücken ausgerüstet werden sollten. Demnach sollten nach Aussage der Interviewpartner vor allem Großbrücken und kritische Brücken im Netz zu Intelligenten Brücken ausgestattet werden (IP2). Dazu kommen hoch frequentierte Brücken sowie Brücken, die schlecht erreichbar sind bzw. bei denen Bauwerksprüfungen nur mit viel Aufwand oder innerhalb kurzer Sperrzeiten durchgeführt werden können (IP4). Ergänzend könnten noch Brücken auf setzungsempfindlichen Böden und Brücken, die eine gewisse Schlankheit unterschreiten, überwacht werden (IP11).

Auch in dem Punkt, dass erstmal nur ausgewählte Brücken zu Intelligenten Brücken ausgerüstet werden sollten, waren sich die Interviewpartner einig. An dieser Stelle wäre eine Kategorisierung sinnvoll, sodass jeweils nur einige Bauwerke gleichen Bauwerkstyps ausgestattet werden. Zu beachten ist, dass die Brückentypen unterschiedliche Bauwerksreaktionen hervorrufen und dementsprechend auch unterschiedlich mit Sensoren ausgestattet werden müssen (IP12). Interviewpartner 9 schlägt diesbezüglich vor, an jeder Strecke mindestens ein Bauwerk auszurüsten, um globale Aussagen z. B. zur Verkehrsbelastung tätigen zu können (IP9).

4.3.2 Installation von Sensoren

Bezüglich der Installation von Sensoren thematisierten die Interviewpartner auf der einen Seite, welche Sensoren grundsätzlich für eine kontinuierliche Überwachung von Brückenbauwerken zur Verfügung stehen und auf der anderen Seite, was bei der Erstellung eines Monitoringkonzepts zu beachten ist. Wichtig ist dabei, dass jede Brücke indi-

viduell ist und deshalb immer ein auf die jeweiligen Randbedingungen der Brücke abgestimmtes Monitoringkonzept erforderlich ist (IP12).

Für die Überwachung können unterschiedliche Arten von Sensoren eingesetzt werden. Grundsätzlich kann dabei in Sensoren, die Einwirkungen messen, und Sensoren, die Widerstände messen, unterschieden werden. Bei aktuellen Monitoringmaßnahmen werden meist, abgesehen von der Temperatur, nur Widerstandsgrößen gemessen, berichtet Interviewpartner 5 (IP5). Das kann darauf zurückgeführt werden, dass das Ziel des Monitorings in der Regel die Überwachung lebensdauer verlängernder Maßnahmen ist. Interviewpartner 3 nennt dazu Schäden an Koppelfugen, Schäden infolge eines Querkraftdefizits, Schäden infolge spannungsrissskorrosionsempfindlicher Stähle sowie Schäden an Abdichtungen, Fahrbahnübergängen und Lagern als typische Schäden bei Brückenbauwerken (IP3). Die anderen Interviewpartner bestätigten diese Einschätzung und ergänzten, dass ein Monitoring nur zielführend ist, wenn eine Versagensvorankündigung eintritt (IP2). Bei der Intelligenten Brücke sollte allerdings sowohl die Einwirkungsseite als auch die Widerstandsseite betrachtet werden (IP7).

Für die Erfassung der Verkehrseinwirkungen sind, berichtet Interviewpartner 9, Dauerzählstellen nicht ausreichend, da mit diesen nicht die tatsächlichen Achslasten eines Fahrzeugs gemessen werden können. Aus diesem Grund sollten zukünftig verstärkt Achslastmessungen an Brücken durchgeführt werden, deren Ergebnisse dann auch auf andere Bauwerke an der Strecke übertragen werden können (IP9). Interviewpartner 10 hingegen ist der Meinung, dass es an allen Brücken interessant sei, die tatsächlich auftretende Belastung zu erfassen, um Überbelastungen einer Brücke feststellen zu können (IP10). Als weitere Möglichkeit werden Achslastmessungen auf der freien Strecke genannt, da dort eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden kann und die Messwerte im Anschluss auf die Brücken an der Strecke übertragen werden können (IP2).

Darüber hinaus können Lagerkräfte, Bremskräfte, Schwingungen, Dehnungen, Verformungen und Setzungen gemessen werden (IP1). Hinzu kommt die Überwachung von Rissen, Durchfeuchtungen und des Chlorideintrags (IP2). Interviewpartner 12 weist darauf hin, dass zukünftig verstärkt Feuchtemonitoring an Brücken betrieben werden sollte, da Wasser eine große Gefahr für Bauwerke darstellt

und mithilfe von Sensoren Schäden festgestellt werden können, die sonst erst nach vielen Jahren sichtbar werden (IP12). Zusätzlich schlägt Interviewpartner 2 vor, globale Grundwerte, wie z. B. die Eigenfrequenz der Brücke, zu überwachen, deren Veränderung auf eine kritische Entwicklung hindeutet (IP2).

Hinsichtlich der Erkennung von Sensorproblemen sowie -ausfällen merkt Interviewpartner 4 an, dass die Sensoren zusätzlich auch Zustandsinformationen übertragen müssen, damit sie bei auftretenden Problemen eine Warnung abgeben können (IP4). Zudem ist es wichtig, dass die Sensoren austauschbar sind, damit zukünftig auch Weiterentwicklungen im Bereich der Sensoren berücksichtigt werden können (IP7). Interviewpartner 3 ergänzt, dass in den letzten Jahren große Entwicklungen im Bereich der Sensoren stattgefunden haben, aber für den Erfolg des Monitorings vor allem das strategische Konzept entscheidend ist. Aus diesem Grund sollte das Monitoringkonzept von einem multidisziplinären Team erstellt werden, das aus einem Planer, einem Bauwerksprüfer, einem Baustoffkundler, einem Monitoringexperten sowie einem Datenexperten besteht (IP3).

Bei der Planung von Monitoringmaßnahmen zur Überwachung lebensdauer verlängernder Maßnahmen sollte laut Interviewpartner 3 immer ein Bauwerksprüfer miteinbezogen werden, da dieser meist Erfahrungswerte zu typischen Schäden an einer Brücke hat (IP3). Interviewpartner 1 berichtet dazu, dass bei aktuellen Monitoringmaßnahmen die Planung in der Regel nur beim Fachplaner Monitoring liegt und auf Grundlage einer Nachrechnung oder aufgetretenen Schäden erfolgt (IP1). Für die Planung von Monitoringmaßnahmen bei Intelligenten Brücken muss hingegen ein anderes Vorgehen gewählt werden, da bei diesen Bauwerken in der Regel erstmal keine Problemstellen bekannt sind. Insbesondere bei Neubauten sollte daher erstmal kein Bedarf für Monitoring bestehen, da diese auf Grundlage der aktuellen Regelwerke gebaut sind und ausreichend tragfähig und dauerhaft ausgelegt sein sollten (IP2).

Die Installation der Sensoren erfolgt in der Regel durch externe Dienstleister, die sich auf Monitoring spezialisiert haben (IP11). Nur in Ausnahmefällen und bei kleinen Überwachungsaufgaben übernimmt das Ingenieurbüro die Anbringung der Sensoren selber (IP1). Um in Zukunft die Monitoringmaßnahmen effizient durchführen zu können, schlägt Inter-

viewpartner 2 ein stufenweises Vorgehen vor. Dieses sieht eine Einteilung der Brücken in unterschiedliche Kategorien vor, in deren Abhängigkeit im Anschluss die Ausstattung mit Sensoren erfolgen kann (IP2). Zur Unterstützung schlägt Interviewpartner 1 vor, Richtzeichnungen zu erstellen, die bei der Planung von Monitoringmaßnahmen herangezogen werden können und die typische Ausführungsformen darstellen (IP1).

4.3.3 Datenerfassung

Die Datenerfassung muss, da waren sich die Interviewpartner weitgehend einig, kontinuierlich über die gesamte Lebensdauer der Brücke erfolgen, um die tatsächlich auftretenden Einwirkungen bestimmen und Veränderungen feststellen zu können (IP5). Interviewpartner 2 hingegen vertritt die Meinung, dass eine kontinuierliche Überwachung der Brücke nicht immer erforderlich ist und der personelle sowie finanzielle Aufwand deutlich reduziert werden könnte, wenn nur in gewissen Intervallen repräsentative Messungen erfolgen würden. Dazu könnten robuste Sensoren fest am Bauwerk installiert werden, an die temporär ein Messgerät angeschlossen werden kann. Für die Zeiträume, in denen keine kontinuierliche Messung erfolgt, könnten die Ergebnisse stattdessen hochgerechnet werden. Zudem könnten Messwerte von benachbarten Bauwerken herangezogen werden, wobei Ungenauigkeiten über einen entsprechenden Sicherheitsfaktor kompensiert werden könnten (IP2).

Für die effiziente Erfassung von Daten ist ein geeignetes Monitoringkonzept entscheidend. Ziel dieses Konzeptes ist es, dass nur Daten erfasst werden, die für die Bewertung erforderlich sind und keine Datenfriedhöfe mit unbrauchbaren Daten entstehen. Folgende Fragen können bei der Erstellung des Monitoringkonzepts helfen: „Was muss ich messen?“, „Wo muss ich messen?“, „Wann muss ich messen?“ und „Wie oft muss ich messen?“ (IP3). Zudem müssen Warn- und Alarmwerte für die einzelnen Messwerte festgelegt werden und es muss bestimmt werden, ob ein Verhalten mit Vorankündigung zu erwarten ist (IP1).

Interviewpartner 12 berichtet aus dem Projekt „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“, dass unterschiedliche Sensoren eingesetzt werden und diese seit knapp fünf Jahren nahezu problemlos laufen. Zur Sicherstellung der gewünschten Funktion werden die Sensoren einmal im Jahr kontrolliert, gereinigt und gewartet. Die eingesetzten

Sensoren erfassen kontinuierlich Messwerte und übertragen diese an den Messrechner. Die Messfrequenz liegt dabei zwischen 1000 Hz am Fahrbahnübergang und 60 Hz bzw. 75 Hz an den weiteren Sensoren. Die Genauigkeit sowie der Messbereich der Sensoren wurde dazu im Vorfeld auf den erwarteten Wertebereich abgestimmt (IP12). Interviewpartner 4 ergänzt, dass die Messfrequenz für jeden Sensor in Abhängigkeit der Messgröße sowie des Messziels spezifisch bestimmt werden sollte und es z. B. für Feuchtesensoren ausreichend ist, wenn diese nur wenige Werte pro Tag liefern (IP4).

Bei Neubauten sollte laut Interviewpartner 2 vor der Verkehrsfreigabe immer eine Null-Messung durchgeführt werden, die vergleichbar zur ersten Hauptprüfung bei Fertigstellung der Brücke ist, sodass später ein Vergleich mit dem Ausgangszustand möglich ist (IP2). Dies wird von den anderen Interviewpartnern weitgehend bestätigt, wobei darauf hingewiesen wird, dass besonders auf die Dauerhaftigkeit der eingesetzten Sensoren geachtet werden muss (IP11).

Für die Datenerfassung bei schwer erreichbaren Brücken schlägt Interviewpartner 7 abschließend vor, auf den Einsatz von Drohnen zurückzugreifen (IP7).

4.3.4 Datenübertragung

Zur Übertragung der Daten konnten die Interviewpartner nur vereinzelt Aussagen treffen, da die Datenübertragung in der Regel im Aufgabenbereich des Spezialdienstleisters Monitoring liegt (IP1). Grundsätzlich stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl, um Daten vom Sensor zum Messrechner sowie vom Messrechner zum Datenspeicherort zu übertragen. Entweder erfolgt die Übertragung der Daten kabelgebunden oder drahtlos.

Interviewpartner 12 berichtet, dass im Projekt „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ sowohl kabelgebundene als auch drahtlose Sensoren eingesetzt und auf ihre Verwendbarkeit überprüft werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Synchronisation der Zeit zwischen unterschiedlichen Messsystemen eine wichtige Rolle spielt und diese vor der Datenübertragung erfolgen muss. Im Projekt wurde die Synchronisation der Zeit dadurch gelöst, dass alle Messsysteme auf einen Zentralrechner mit einheitlicher Zeit zugreifen. Ein weiteres Problem war, dass die Datenmengen zu groß waren, um diese drahtlos vom Messrechner zum Da-

tenspeicherort zu übertragen. Aus diesem Grund wurden die Daten auf einer Festplatte an der Brücke zwischengespeichert und die Festplatten wurden in regelmäßigen Abständen gewechselt (IP12).

Um die Daten sicher übertragen und anderen Personen zur Verfügung stellen zu können, wird von Interviewpartner 4 vorgeschlagen, dies über eine API-Anbindung (Application Programming Interface) zu lösen (IP4). Interviewpartner 2 schlägt zudem die Erstellung einer Richtlinie vor, in der u. a. Randbedingungen für die Übertragung von Daten geregelt sind, um das Vorgehen zu vereinheitlichen und den Ablauf zu vereinfachen (IP2).

4.3.5 Datenhaltung

Die Interviewpartner berichteten, dass aktuell unterschiedliche Methoden der Datenhaltung eingesetzt werden. Grundsätzlich kann in eine Speicherung der Daten auf lokalen Festplatten und eine Speicherung der Daten in einer Cloud (Speicher, auf den über das Internet zugegriffen werden kann) unterschieden werden. Aktuell ist die Datenhaltung in der Regel Aufgabe des Spezialdienstleisters Monitoring und erfolgt in einer Cloud (IP1). Ein wichtiger Punkt dabei ist, dass die Daten jederzeit online abrufbar sind (IP11).

Interviewpartner 4 berichtet, dass die Datenhaltung bei der smartBRIDGE Hamburg vollständig in einer Cloud erfolgt und keine Daten lokal gespeichert werden. Die wesentlichen Vorteile dieser Methode sind, dass einerseits von überall auf die Daten zugegriffen werden kann, andererseits aber das interne Netzwerk für den Zugriff auf die Daten nicht nach außen hin geöffnet werden muss. Dabei werden die CIA-Schutzziele (Confidentiality, Integrity, Availability) jederzeit gewährleistet, die die Vertraulichkeit, die Integrität und die Verfügbarkeit der Daten sicherstellen. Weitere Bedenken bezüglich der Sicherheit der gespeicherten Daten bestehen kaum, da in der Regel nicht die Sensoren und die zugehörigen Daten, sondern das interne Netzwerk dahinter das Hauptangriffsziel für fremde Zugriffe darstellt. Aufgrund der Tatsache, dass die Cloud nur einen Datenpool darstellt und keinen Zugriff auf das interne Netzwerk ermöglicht, ist ein fremder Zugriff auf die Cloud als weniger kritisch einzustufen (IP4).

Ein weiterer wichtiger Punkt der Datenhaltung ist, dass alle Daten möglichst an einem Ort gehalten werden (Single Source of Truth), sodass die Aktualität der Daten sichergestellt ist und die Daten nicht

aus unterschiedlichen Quellen zusammengesucht werden müssen (IP1). Für die Speicherung empfiehlt Interviewpartner 4 die Verwendung von Data Meshes, da diese Vorteile gegenüber Data Lakes und Data Warehouses haben und die Daten so unterschiedlichen Nutzergruppen bereitgestellt werden können. Zudem sollte eine Möglichkeit vorgesehen werden, Datenservices in geeigneter Form auch für Dritte bereitzustellen. In dem Zuge wäre es denkbar, dass eine automatisierte Benachrichtigung der Straßenmeisterei erfolgt, wenn auf einer Brücke Tausalz gestreut oder diese aufgrund des Windes gesperrt werden muss (IP4).

Bezüglich der Frage, wer die Hoheit über die Daten besitzen soll, bestand bei den Interviewpartnern Einklang. Bei aktuellen Monitoringmaßnahmen liegt die Datenhoheit beim Betreiber der Brücke, der in dem Fall auch Auftraggeber für das Monitoring ist, und auch bei Intelligenten Brücken sollte die Datenhoheit beim Betreiber liegen (IP11). Allerdings wurde in den Interviews auch deutlich, dass die vorliegenden Verhältnisse nicht immer für alle Seiten eindeutig geklärt sind, sodass an dieser Stelle zukünftig eine klare Regelung erforderlich ist (IP10).

Auch in dem Punkt, dass nicht alle Daten dauerhaft gespeichert werden können, sondern eine sinnvolle Reduktion der Daten erforderlich ist, waren sich die Interviewpartner einig. Hinsichtlich der erforderlichen Dauer der Datenspeicherung existierten jedoch unterschiedliche Meinungen. Interviewpartner 12 ist der Meinung, dass für relevante Daten immer ausreichend Speicherplatz vorgehalten werden muss und für einen gewissen Zeitraum alle Daten gespeichert werden sollten, um z. B. nach dem Auftreten eines Schadens einen Vergleich mit dem Ausgangszustand ziehen zu können (IP12). Interviewpartner 6 berichtet, dass aktuell die Rohdaten nach Ende des Monitorings in der Regel gelöscht werden, die aufbereiteten Daten hingegen zum Teil auch länger aufgehoben werden (IP6). Für die Intelligente Brücke schlägt Interviewpartner 4 vor, sich an den Intervallen der Bauwerksprüfungen zu orientieren und die Rohdaten mindestens 3 Jahre und die aufbereiteten Daten mindestens 6 Jahre zu speichern (IP4). Interviewpartner 7 ergänzt, dass ausgewählte Daten auch in 20-30 Jahren noch nutzbar sein sollten und in dem Zuge Strategien für die langfristige Nutzung der Daten entwickelt werden müssen (IP7). Abschließend fügt Interviewpartner 9 an, dass eine Speicherung der Daten in einheitlicher Form besonders wichtig ist, um die Nutzbarkeit der Daten sicherzustellen. Dies ist ins-

besondere dann entscheidend, wenn die Daten beim Spezialdienstleister Monitoring liegen und z. B. nach Ende des Monitorings nochmal zum Betreiber übertragen werden müssen (IP9).

Abschließend fasst Interviewpartner 12 nochmal zusammen, dass die Datenhaltung und das Datenmanagement eindeutig geregelt sein müssen, damit es feste Zuständigkeiten und Abläufe gibt. Grundsätzlich ist dazu auch eine zentrale Speicherung aller Daten an einem Ort möglich, sodass die Daten einheitlich verwaltet werden können und sich der Aufwand insgesamt reduziert. Bei der Speicherung der Daten kann dann eine Kontrolle erfolgen, dass die Datenbanken sauber ausgefüllt und die Festplatten sektorweise gefüllt wurden (IP12).

4.3.6 Datenaufbereitung

Nach Meinung der Interviewpartner kann und sollte die Datenaufbereitung an mehreren Stellen im Prozess erfolgen. Die erste Aufbereitung der Messwerte sollte dabei möglichst schon vor der Datenübertragung erfolgen, um z. B. die Messwerte um den Einfluss aus Temperatur oder Messrauschen zu bereinigen und damit die zu übertragenden Datenmengen zu reduzieren (IP1). Die weitere Aufbereitung kann dann nach der Speicherung der Daten in die Datenbanken erfolgen, sodass Muster erkannt und Korrelationen zu anderen Bauwerken festgestellt werden können. An dieser Stelle ist auch eine Unterstützung durch den Einsatz Künstlicher Intelligenz denkbar (IP4).

Interviewpartner 12 weist darauf hin, dass die Datenaufbereitung automatisiert und möglichst schon vor Ort an der Brücke erfolgen sollte, da später in der Regel niemand mehr den Aufwand betreibt und die Daten entsprechend aufbereitet (IP12). Diesbezüglich berichtet Interviewpartner 10, dass bei aktuellen Monitoringmaßnahmen die Aufbereitung sowie die Auswertung der Daten zum Teil noch sehr lange dauert und dies zukünftig schneller erfolgen muss, damit die Erkenntnisse aus dem Monitoring für die weitere Entscheidungsfindung genutzt werden können (IP10). Interviewpartner 12 berichtet, dass beim Projekt „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ die Aufbereitung und die Auswertung der Daten automatisiert auf den Messrechnern an der Brücke erfolgt und die Auswertungszyklen je nach betrachtetem Messwert festgelegt wurden. Dies funktioniert, wie die verwendeten Sensoren, seit der Implementierung im dritten Jahr quasi problemfrei (IP12).

Einig waren sich die Interviewpartner auch, dass die Messwerte möglichst automatisch um den Einfluss aus Temperatur oder Messrauschen bereinigt werden sollten, da für die anschließende Bewertung die Änderung des Normalzustandes entscheidend ist (IP6). Bei aktuellen Monitoringmaßnahmen erfolgt die erste Aufbereitung in der Regel durch den Spezialdienstleister Monitoring, der die bereinigten Daten im Anschluss an das Ingenieurbüro übergibt, das weitere Aufbereitungen durchführt und die aufbereiteten Daten dann an den Betreiber weiterleitet (IP11).

Einen wesentlichen Unterschied zum aktuell häufig durchgeführten Monitoring sowie großes Potenzial für die Bewertung bei Intelligenten Brücken sieht Interviewpartner 12 in der Verknüpfung von Messwerten, da Einzelwerte alleine in der Regel keinen Mehrwert für die Erkennung von Tragverhaltensänderungen an einer Brücke liefern. Dabei ist entscheidend, dass der Fachplaner Monitoring im Vorfeld eindeutig definiert, wie die Verknüpfung der einzelnen Messwerte erfolgen soll, damit dies im Anschluss von IT-Fachleuten oder einem Spezialdienstleister Monitoring umgesetzt werden kann. Der Auswertungsalgorithmus kann dabei zum Teil empirisch begründet sein und muss regelmäßig vom Ingenieur kontrolliert und gegebenenfalls neu angepasst werden (IP12). Interviewpartner 3 ergänzt, dass bei der Bewertung der Daten auch auf die Erfahrungen der Bauwerksprüfer zurückgegriffen werden sollte, da diese in der Regel umfangreiche Kenntnisse zu tatsächlich auftretenden Schäden und Problemen haben (IP3).

Bezüglich des Einsatzes Künstlicher Intelligenz im Rahmen der Datenaufbereitung gab es in den Interviews unterschiedliche Meinungen. Grundsätzlich befürworteten zwar alle Interviewpartner eine sinnvolle Unterstützung durch Künstliche Intelligenz, Interviewpartner 3 merkte jedoch an, dass beim Einsatz Künstlicher Intelligenz die Nachvollziehbarkeit der Daten weiterhin gewährleistet sein muss (IP3). Interviewpartner 4 ergänzte, dass bei aktuellen Monitoringmaßnahmen noch keine Notwendigkeit für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz besteht und ein Einsatz nur sinnvoll ist, wenn eine ausreichende Datengrundlage vorliegt, um gewisse Szenarien auch trainieren zu können. Darüber hinaus müssten im Vorfeld geeignete Lösungen erarbeitet werden, um Ereignisse trainieren zu können, die in der Regel nicht auftreten sollen (IP4). Interviewpartner 2 stellte hierzu dar, dass der Lernprozess auch umgekehrt erfolgen kann und die Künstliche Intelligenz

den Normalzustand trainiert, sodass alle ungewöhnlichen Ereignisse herausgefiltert und individuell bewertet werden können. Darüber hinaus sind mit einer Künstlichen Intelligenz netzweite Analysen zur Mustererkennung möglich, um z. B. Bauwerke mit ähnlichen Problemen oder Schwachstellen ermitteln zu können (IP2). Interviewpartner 12 hingegen ist der Meinung, dass der Schwerpunkt erstmal auf der Lösung wichtigerer Probleme liegen sollte, bevor der Einsatz von Künstlicher Intelligenz beim Monitoring von Brückenbauwerken angestrebt wird (IP12).

4.3.7 Lebenszyklusmanagement

Bei aktuellen Monitoringmaßnahmen werden die aufbereiteten Daten in der Regel automatisiert in eine Web-Publikation hochgeladen (IP12). Für zukünftige Überwachungen schlägt Interviewpartner 8 die Erstellung eines Web-GIS-Systems vor, um zusätzlich die Sensoren innerhalb des Geosensornetzwerks darzustellen (IP8). Für Interviewpartner 5 hingegen muss eine Möglichkeit für die Verknüpfung mit BIM vorgesehen werden, da BIM das System der Zukunft sein könnte (IP5). Darüber hinaus wurde in den Interviews wiederholt eine Anbindung an SIB-Bauwerke angesprochen, allerdings wurde auch darauf hingewiesen, dass SIB-Bauwerke und BIM wahrscheinlich nicht geeignet sind, um alle Daten aus dem Monitoring zu integrieren und automatisiert auswerten zu lassen (IP4). Interviewpartner 9 meint jedoch, dass es trotzdem sinnvoll wäre, sich bezüglich der Verarbeitung der Daten an SIB-Bauwerke zu orientieren, damit ein einheitlicher Standard für den ständig wachsenden Bauwerksbestand vorliegt. Zudem sollen die Informationen, die aktuell schon in SIB-Bauwerke gespeichert sind, für eine weitere Bewertung herangezogen werden können. Dies umfasst insbesondere Informationen aus der Planung, dem Betrieb, den durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen sowie dem aktuellen Zustand des Bauwerks (IP9).

Aufgrund der langen Lebensdauer der Brückenbauwerke muss zudem der vorhandene Datenschatz für die weitere Bewertung genutzt werden. Dazu zählt laut Interviewpartner 2 auch, die historischen Daten zusammenzutragen und nutzbar zu machen, wobei an dieser Stelle wahrscheinlich noch Weiterentwicklungen erforderlich sind. Im Anschluss können durch eine Verknüpfung der Daten Korrelationen zwischen unterschiedlichen Bauwerken festgestellt werden, die bei der Entscheidungsfindung un-

terstützend herangezogen werden können. Dazu zählen z. B. Korrelationen zwischen bestimmten Bauwerkstypen oder Arten von verwendeten Abdichtungen (IP2).

Damit die kontinuierliche Überwachung tatsächlich für Entlastung sorgt, weist Interviewpartner 4 darauf hin, dass die aufbereiteten Daten möglichst leicht konsumierbar sein sollten. Wichtig ist zudem, dass die Visualisierung der Daten über einen Browser erfolgt, damit keine extra Programme erforderlich sind und von unterschiedlichen Geräten auf die Daten zugegriffen werden kann (IP4). Interviewpartner 9 schlägt ergänzend die Implementierung einer Ampelfunktion vor, um die wichtigsten Informationen auf einen Blick erfassen zu können. Grundsätzlich wäre auch ein deutschlandweites System vorstellbar, in dem alle Informationen, ähnlich wie in einer Leitzentrale, zusammengeführt und visualisiert werden (IP9). Interviewpartner 5 berichtet dazu, dass bereits ein Austausch mit anderen Landesbetrieben erfolgt, der Fokus allerdings aktuell noch auf dem Monitoring zur Überwachung lebensdauererweiternder Maßnahmen liegt (IP5).

Bei der Überschreitung von Warn- und Alarmwerten muss eine Benachrichtigung der zuständigen Personen erfolgen. Interviewpartner 3 merkt hierzu an, dass die Ereignisketten hinsichtlich Verantwortlichkeiten und Maßnahmen bereits im Vorfeld definiert werden müssen, damit Überschreitungen nicht unentdeckt bleiben (IP3). Interviewpartner 10 ergänzt, dass die Benachrichtigungen von unten nach oben freigegeben werden müssen und zuerst ein Bauwerksprüfer oder der zuständige Fachplaner Monitoring benachrichtigt werden sollte, um die automatische Sperrung einer Brücke aufgrund eines Fehlers im System zu vermeiden (IP10). Zudem fügt Interviewpartner 11 an, dass die Benachrichtigung möglichst per E-Mail erfolgen sollte, da Benachrichtigungen in webbasierten Anwendungen schnell übersehen werden (IP11).

Für eine ganzheitliche Bewertung schlägt Interviewpartner 12 die Einführung eines Sicherheitsbeiwerts vor, über den eine Aussage zur aktuellen Nutzung gemacht werden kann, indem der aktuelle Messwert mit dem Messwert der durchgeführten Nullmessung verglichen wird (IP12). Interviewpartner 5 ergänzt, dass zudem eine Reduktion auf wenige Variablen bzw. Kennzahlen, über die die Bewertung erfolgen kann, sinnvoll wäre (IP5).

Für das Lebenszyklusmanagement und die kontinuierliche Bewertung der Brücke weist Interviewpartner 12 darauf hin, dass die Verknüpfung sowie die Kalibrierung mit dem FE-Modell besonders wichtig sind und in regelmäßigen Abständen erneute Kalibrierungen durchgeführt werden sollten, um das Modell der Brücke anzupassen (IP12). Interviewpartner 8 ergänzt, dass für das Modell auch Daten herangezogen werden können, die mithilfe von Laser-Scanning an der Brücke erfasst wurden. Problematisch ist dabei jedoch, dass mithilfe von Laser-Scanning nur die Oberfläche der Brücke erfasst werden kann, sodass für die Erstellung eines geeigneten Modells jeder Bauabschnitt einzeln mithilfe von Laser-Scanning erfasst werden müsste (IP8).

Ein weiteres häufig genanntes Thema in den Interviews bildete die Einsparung von Bauwerksprüfungen durch das durchgeführte Monitoring, wofür aktuell jedoch noch keine entsprechende rechtliche Grundlage besteht (IP4). Interviewpartner 3 verweist zudem auf den Erfahrungsschatz der Bauwerksprüfer und meint, dass wiederkehrende Bauwerksprüfungen nicht vollständig durch Monitoring ersetzt werden können (IP3). Andere Interviewpartner bestätigten dies, könnten sich jedoch eine Optimierung der aktuellen Prüfintervalle vorstellen (IP5). Für Interviewpartner 4 wiederum stellt Monitoring nur eine Unterstützung für Bauwerksprüfungen dar, sodass die Mehrbelastung durch das Monitoring grundsätzlich so gering wie möglich gehalten werden sollte (IP4).

Für die erforderliche Wartung der Sensoren schlägt Interviewpartner 3 die Erstellung von Handlungsanweisungen vor, damit die Wartung im Rahmen der regelmäßigen Kontrolle der Brücke von z. B. der Straßenmeisterei durchgeführt werden kann (IP3).

Abschließend fügt Interviewpartner 12 an, dass ein großes Problem darin besteht, dass in der Vergangenheit zu wenig in die Pflege und Erhaltung der bestehenden Brückenbauwerke investiert wurde und sich viele Probleme nicht ergeben würden, wenn die Brücken zukünftig besser gepflegt und erhalten werden. Dies ist insbesondere unter dem Aspekt der Überwachung mit Sensoren wichtig, da ein Monitoring nicht zielführend ist, wenn es nur erfolgen muss, weil in der Vergangenheit die Pflege und Instandhaltung der Brücke nicht wie vorgesehen erfolgt ist (IP12).

4.4 Einordnung der Interviews und deren Ergebnisse

Die Auswertung der Interviews hat gezeigt, dass bei den Interviewpartnern bei einem Großteil der thematisierten Schwerpunkte grundsätzlich Einigkeit besteht und nur bei wenigen Themen deutlich voneinander abweichende Meinungen existieren, z. B. zu der Frage, ob eine kontinuierliche Datenerfassung erforderlich ist.

Insgesamt stellten die Interviews eine gute Orientierung für die Definition von Anforderungen und die Erstellung des Konzepts dar, weil in den Interviews neben aktuellen Problemstellungen auch bereits bestehende Vorgehensweisen und Ideen aus der Praxis thematisiert wurden. Zudem konnte ein Eindruck darüber gewonnen werden, welche Vorstellungen und Erwartungen die Interviewpartner an das Datenmanagement der Intelligenten Brücke haben und wo aktuell Bedenken bestehen.

Da die Interviews, obgleich einer aufwendigen Vorbereitung, die im Vorfeld veranschlagte Zeit in der Regel vollständig ausgefüllt bzw. überschritten haben, sollte bei zukünftigen Interviews bzw. Befragungen zu der Thematik der Fragenkatalog aufgrund der komplexen und verschiedenartigen Themenfelder noch stärker auf die wesentlichen Fragestellungen eingegrenzt werden. Vorteilhaft hingegen war, dass sich die Interviews über einen Zeitraum von etwa 1,5 Monaten erstreckt haben, so dass noch offene oder neue Fragestellungen aus den zuerst geführten Interviews in den späteren Interviews nochmal aufgegriffen und diskutiert werden konnten.

5 Anforderungen an die digitale Infrastruktur

Im Folgenden wird auf die Maßgaben des Datenmanagements eingegangen und welche Anforderungen diesbezüglich an die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke bestehen. Dazu werden die datenbezogenen Anforderungen basierend auf den Betrachtungen, die sich aus den Interviews, den Erfahrungswerten der Projektbeteiligten sowie weiteren Analysen ergeben, formuliert. Anschließend wird darauf aufbauend das Anforderungsprofil an ein sachgerechtes und nachhaltiges Datenmanagement abgeleitet.

Es wird eine multivariante Portfoliokonzeption angestrebt, die unterschiedliche Rahmenbedingungen aufgreift und u. a. Einschränkungen bei der Übertragung von Daten, Ausstattung mit Sensoren oder zu beurteilender Datenparameter berücksichtigt. Auf dieser Grundlage wird sich der Kernprozess für das zukünftige Datenmanagement der Intelligenten Brücke herauskristallisieren. Abhängig vom jeweiligen Portfolio kann der Kernprozess dann spezifisch angepasst (erweitert oder verkürzt) werden.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die digitale Infrastruktur getrennt für die in den Interviews behandelten Ebenen des Datenmanagements (Datenerfassung, Datenübertragung, Datenhaltung, Datenaufbereitung und Lebenszyklusmanagement) dargestellt. Die genannten Punkte stellen dabei die Mindestanforderungen dar und können in einem final entwickelten Konzept noch weiter spezifiziert bzw. ergänzt werden.

5.1 Datenerfassung

Für die Datenerfassung müssen zu Beginn der Planung die übergeordneten Parameter der Intelligenten Brücke für die anschließende Messung am Bauwerk definiert und mit den beteiligten Akteuren abgestimmt werden. Darauf aufbauend können durch die Erstellung eines individuellen Datenerfassungsbzw. Monitoringkonzepts die wichtigsten Punkte der Datenerfassung definiert und für die Umsetzung näher beschrieben werden.

Der generelle Ablauf kann sowohl auf bestehende Brückenbauwerke als auch auf neu gebaute Brückenbauwerke angewendet werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass für Brückenneubauten prinzipiell wesentlich mehr Sensoren (interne und externe) für die Datenerfassung zur Verfügung stehen als bei bestehenden Bauwerken (oft nur externe Sensoren).

Folgende Anforderungen gelten allgemein für die Datenerfassung:

- Erstellung eines individuellen Monitoringkonzepts
 - Berücksichtigung von Einflussfaktoren (Tragwerksart, Alter, Lage, Zustand des Bauwerks, bisherige Nutzung etc.) sowie der zukünftigen Nutzungsplanung (ggf. Veränderung des Verkehrsaufkommens durch Streckenumbau)

- Bestimmung der erforderlichen Messfrequenzen sowie der Messgenauigkeiten für die einzelnen Sensoren
- Planung der Installation und Inbetriebnahme (z. B. Kalibrierung)
- Fokus liegt auf der Zustandsbewertung des Bauwerks sowie auf dem Erhalt der Brücke (Ziel: prädiktive Planung von Erhaltungsmaßnahmen)
- Planung einer regelmäßigen Wartung der Sensoren sowie ggf. eines Austausches

Darüber hinaus gilt für Brückenneubauten zusätzlich:

- Durchführung von Null-Messungen vor Verkehrsfreigabe
- Berücksichtigung von Möglichkeiten, um im Laufe der Lebensdauer der Brücke weitere Sensoren anbringen zu können (mehrstufiges Monitoringkonzept)

5.2 Datenübertragung

Die Anforderungen an die Datenübertragung werden maßgeblich durch das im Vorfeld definierte Monitoringkonzept beeinflusst, in dem die einzelnen Sensorpunkte, aber auch die zu übertragenden Datenpakete festgelegt wurden. Dabei hat insbesondere die Anzahl sowie die Größe der zu übertragenden Datenpakete einen wesentlichen Einfluss auf den Einsatz sowie die Wahl der Übertragungstechnologie.

Grundsätzlich ist für jeden Sensor zu untersuchen, ob kabelgebundene oder drahtlose Sensoren eingesetzt werden können und welche Vor- bzw. Nachteile bestehen. Wesentliche Vorteile der drahtlosen Sensoren sind der flexible Einsatz, die einfachere Planung und Montage sowie geringere Kosten. Ein Nachteil hingegen ist eine in der Regel geringere übertragbare Datenmenge. Bei zukünftigen Monitoringaufgaben sind im Allgemeinen, wenn ein Einsatz beider Übertragungstechnologien möglich ist, drahtlose Sensoren zu bevorzugen. Dies kann mit der schnell fortschreitenden technologischen Entwicklung sowie mit der Möglichkeit, die Daten für die Datenübertragung auf ein Minimum der ursprünglichen Größe komprimieren zu können, begründet werden.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass immer eine sichere Übertragung der Daten gewährleistet werden muss. Sollte es aus irgendwelchen Gründen nicht möglich sein, mit drahtlosen Sensoren eine sichere Übertragung zu gewährleisten, muss bei der Erstellung des Monitoringkonzepts frühzeitig der Einsatz kabelgebundener Sensoren berücksichtigt werden.

Weitere wichtige Punkte stellen die Energieversorgung sowie die Anbindung an das Internet dar, welche nicht bei jeder Brücke gegeben sind. Aus diesem Grund muss frühzeitig bei der Planung überprüft werden, wie die Energieversorgung für die Sensoren sowie die Messrechner sichergestellt werden kann und wie eine Anbindung an das Internet erfolgen kann [43].

Folgende Anforderungen gelten allgemein an die Datenübertragung:

- Datenmenge muss über die gewählte Technologie übertragbar sein (Daten für die Übertragung komprimieren)
- Daten müssen vor unbefugter Manipulation geschützt werden
- Strom- und Internetanbindung an der Brücke muss sichergestellt werden
- Definition eines Ausfallkonzepts, sodass eine zuständige Person benachrichtigt wird, wenn Probleme im Prozess auftreten

5.3 Datenhaltung

Mit der Planung für die Speicherung der Daten wird das Datenmanagement für die Intelligente Brücke festgelegt und wichtige Kernanforderungen für die späteren Nutzungs- sowie Zugriffsmöglichkeiten definiert. Bei der Datenhaltung sind im Besonderen die IT-Schutzziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit anzustreben, um eine effektive Nutzung der Daten in den weiteren Phasen des Datenmanagements zu gewährleisten. Dabei kann auf bewährte Konzepte aus der Industrie zurückgegriffen werden, die als Leitfaden dienen können.

Folgende Anforderungen gelten allgemein für die Datenhaltung:

- Zuverlässigkeit der Daten

- Zugriff auf die Daten muss jederzeit gewährleistet sein
- Schutz vor unbefugtem Zugriff und unbefugter Nutzung der Daten bzw. Manipulation
- Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen
- Festlegung der Dauer der Datenspeicherung sowie der zu speichernden Daten
- Definition von Zuständigkeiten für das Datenmanagement sowie Festlegung des Eigentümers der Daten

Folgende zusätzliche Anforderungen haben sich aus den Interviews sowie auf Grundlage bestehender Erfahrungswerte ergeben:

- Zugriff auf die Daten muss von unterschiedlichen Orten und Endgeräten aus möglich sein
- Daten müssen schnell und einfach durch die Nutzer abrufbar sein (ohne die Installation zusätzlicher Programme)
- Zugriff sollte möglichst barrierefrei erfolgen können
- Einheitliche Form der Datenspeicherung

Einen wichtigen Punkt stellt die einheitliche Form der Datenspeicherung dar, damit die Daten für weitere Auswertungen und Analysen verwendet werden können. Auch unter dem Aspekt, dass die Daten nach dem Ende der Überwachung ggf. vom Spezialdienstleister Monitoring zum Betreiber übertragen werden müssen, ist die einheitliche Form der Datenspeicherung essenziell.

Für die physische Datenhaltung besteht die Möglichkeit der Speicherung und Verwaltung der Daten in einem eigenen Rechenzentrum (On-Premise), der Auslagerung der Daten in eine Cloud (Off-Premise) oder der Nutzung eines hybriden Rechenzentrums mit On- und Off-Premise Strukturen. Jedes dieser drei Modelle bietet unterschiedliche Vor- und Nachteile und kann in unterschiedlichen Ausbaustufen verwendet werden, sodass die Wahl individuell und unter Berücksichtigung eventueller betrieblicher und gesetzlicher Regelungen erfolgen muss.

5.4 Datenaufbereitung

Im Rahmen der Datenaufbereitung sollten die an der Intelligenten Brücke erfassten Daten so aufbe-

reitet werden, dass mithilfe der Daten eine Bewertung der Brücke möglich ist. Diese Aufbereitung umfasst z. B. das Entfernen eines Messrauschens oder die Bereinigung eines Messwerts um den Einfluss aus Temperatur, sodass bei der späteren Bewertung ein größtmöglicher Nutzen aus den Daten gezogen werden kann. Das Entfernen des Messrauschens kann dabei auch direkt auf einem Messrechner am Bauwerk erfolgen, um die Datenmenge für die Übertragung zu reduzieren. Zudem ist es wichtig, die gewonnenen Informationen abschließend zielgerichtet und aussagekräftig darzustellen.

Folgende Anforderungen gelten allgemein an die Datenaufbereitung:

- Interferenzen, Rauschen und fehlerhafte Abweichungen sind zu entfernen
- Einheitliche Formate für die Endergebnisse sind zu wählen
- Aufbereitung muss automatisiert und so früh wie möglich im Prozess erfolgen

5.5 Datenauswertung

Die Datenauswertung bildet die Grundlage für die zukünftigen Entscheidungen im Rahmen des Lebenszyklusmanagements der Intelligenten Brücke. Um eine zielgerichtete Datenauswertung durchführen zu können, bedarf es im Vorfeld einer geeigneten Datenaufbereitung sowie einer genauen Definition der auszuwertenden Messwerte. Dazu sollten geeignete Analyseverfahren genutzt werden und im Rahmen der Datenauswertung sollten diese regelmäßig auf ihre Anwendbarkeit überprüft werden.

Folgende Anforderungen gelten allgemein an die Datenauswertung:

- Fachplaner Monitoring und Betreiber erstellen gemeinsam ein Konzept für die Datenauswertung
 - Verknüpfung von Messwerten
 - Definition bzw. Erstellung von Algorithmen für die Datenauswertung
 - Definition von Kennzahlen
 - Festlegung der Darstellungsart für die ausgewerteten Daten (für unterschiedliche Nutzergruppen)

- Auswertung muss automatisiert und so früh wie möglich im Prozess erfolgen
- Auswertungsalgorithmen sind in der Regel empirisch begründet und müssen regelmäßig überprüft sowie ggf. angepasst werden
- Erstellung eines Dashboards
 - Erstellung verschiedener Abstraktionssichten und Filtermöglichkeiten
 - Möglichkeit zur Durchführung weiterer Analysen
 - Benachrichtigung bei Überschreitung von Warn- und Alarmwerten

Damit haben die definierten Anforderungen auch einen direkten Einfluss auf die Datenhaltung, da die Daten für die Datenaufbereitung und Datenauswertung in geeigneter Form gespeichert werden müssen. Es wird deutlich, dass die Datenaufbereitung und die Datenauswertung sehr komplexe Themengebiete sind und viele Abhängigkeiten sowie Korrelationen bestehen. Zudem sind unterschiedliche Ausbaustufen möglich, die u. a. auch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz umfassen, sodass automatisierte Software-as-a-Service-Systeme (SaaS-Systeme) in der Cloud zu bevorzugen sind. Eine mögliche Ausbaustufe stellt diesbezüglich die Übertragung von Daten auf andere Bauwerke dar.

5.6 Lebenszyklusmanagement

Das Datenmanagement der Intelligenten Brücke geht prinzipiell weit über das Datenmanagement bei aktuellen Monitoringmaßnahmen hinaus, sodass auch der Blick wesentlich größer gefasst sein muss. Das Ziel sollte deshalb ein Gesamtsystem für die Beurteilung von Brückenbauwerken sein, das dem Betreiber alle Kerninformationen darstellt, diese bewertet und auf dessen Grundlage er im Anschluss Entscheidungen treffen kann.

Grundsätzlich kann in eine Betrachtung auf Objektebene und in eine Betrachtung auf Netzebene unterschieden werden. Bei einer Betrachtung auf Objektebene werden nur für ein einzelnes Bauwerk Informationen dargestellt, bei einer Betrachtung auf Netzebene hingegen können die vorliegenden Informationen zu allen Bauwerken eines Betreibers genutzt werden, sodass auch strecken- oder clusterweise Auswertungen möglich sind. Im Folgenden werden die Anforderungen für das Lebenszyklus-

management auf Objektebene dargestellt, da diese die erste Ausbaustufe darstellt. Die Betrachtung auf Netzebene stellt die logische Weiterentwicklung dar und ist eine weitere Ausbaustufe.

Folgende Anforderungen gelten allgemein an das Lebenszyklusmanagement:

- Erstellung eines Dashboards
 - Darstellung aller wesentlichen Daten einer Brücke sowie der verbauten Sensoren
 - Darstellung verschiedener Abstraktionsebenen und Auswertungsmöglichkeiten
 - Integration der Ergebnisse von Bauwerksprüfungen und durchgeführten baulichen Maßnahmen (Reparaturen, Wartung etc.)
 - Benachrichtigung zuständiger Personen bei Überschreitung von Warn- oder Alarmwerten (bevorzugt nach dem Prinzip von unten nach oben)
- Kontinuierliche Bewertung der Brücke
- Verknüpfung mit bestehenden Datenbanken, damit die Informationen für die Datenaufbereitung und Datenauswertung genutzt werden können
- Einhaltung der IT-Schutzziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit

Zudem ist eine Verknüpfung bzw. Anbindung an weitere Datenbanken anzustreben. Hierbei erscheint eine direkte Anbindung an SIB-Bauwerke zwingend erforderlich, um die Aktualität der Daten (Single Source of Truth) sicherzustellen. Dadurch kann eine Vereinheitlichung der Systeme sowie der Kompatibilität sichergestellt werden und ein vereinfachter Informationsaustausch erfolgen.

6 Konzepterstellung zur digitalen Infrastruktur

Im Folgenden wird für die Konzepterstellung zur digitalen Infrastruktur der Intelligenten Brücke beschrieben, wie die jeweiligen Daten bzw. Datensätze im integrierten Gesamtkonzept zu handhaben sind. Die Konzepterstellung erfolgt dabei getrennt für die Ebenen der Datenerfassung, der Datenübertragung, der Datenhaltung, der Datenaufbereitung und Datenauswertung sowie für die Ebene des Lebenszyklusmanagements. Beim Lebenszyklusma-

nagement wird zudem unterschieden in die Betrachtung auf Objektebene und die Betrachtung auf Netzebene, da daraus unterschiedliche Anforderungen an das Datenmanagement resultieren.

Das übergeordnete Ziel soll sein, den Betreiber bei der Gewährleistung der Sicherheit, der Verfügbarkeit und der Zuverlässigkeit des Bauwerks zu unterstützen und durch sinnvoll ausgewählte Maßnahmen die Lebensdauer der Brückenbauwerke zu verlängern. Dies ist nicht nur aus volkswirtschaftlicher Sicht von großer Bedeutung, sondern auch aus Gründen der Nachhaltigkeit, eines weiterhin steigenden Verkehrsaufkommens, eines zunehmenden Fachkräftemangels und der (beschränkten) Verfügbarkeit von sachkundigen Bauunternehmen.

Da das Meinungsspektrum sowie die Vorgehensweisen im Rahmen des Datenmanagements sehr vielfältig sind, werden im Folgenden unterschiedliche Möglichkeiten für das Konzept dargestellt und diskutiert. Das Datenmanagement thematisiert dazu neben der Erfassung, der Speicherung, der Verarbeitung, der Nutzung und der Archivierung von Daten auch Kriterien der Datensicherheit und des Datenschutzes. Der Fokus des Konzepts liegt dabei auf dem Monitoring im Rahmen der Intelligenten Brücke und geht damit deutlich über ein Monitoring, das zur Überwachung lebensdauerverlängernder Maßnahmen durchgeführt wird, hinaus, bei dem nur einzelne Messwerte zumeist kurzzeitig erfasst und verarbeitet werden.

6.1 Datenerfassung

Die Datenerfassung beinhaltet die Erhebung, die Erschließung, die Übertragung, die Digitalisierung sowie die Umformatierung unterschiedlichster Daten sowie Datenformate, damit diese im Anschluss für die Bewertung einer Brücke verwendet werden können. Dazu gehören u. a. Ausführungs- und Werkstattpläne, Lieferscheine von Baustoffen und Bewehrungen, aber auch Informationen zu den Einwirkungen, Bauwerksreaktionen, durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen sowie Zustandserfassungen am Bauwerk (Verformungsmessungen, Schadenskataster etc.), die in einer digitalen Bauwerksakte zur Verfügung gestellt werden.

6.1.1 Zielstellung

Ziel der Datenerfassung ist es, alle notwendigen Daten zum einen für das frühzeitige Erkennen von

Veränderungen am Bauwerk und zum anderen für Bewertungen und Prognosen zum Bauwerksverhalten nutzbar zu machen, um somit die Grundlage für eine prädiktive Erhaltungsstrategie und für eine schnelle Reaktionszeit (im Falle von eingreifenden Maßnahmen) zu legen. Für die weitere Verarbeitung sollten diese Daten zentral an einem Ort gesammelt, gespeichert und aktuell gehalten werden, damit die Daten nicht aus unterschiedlichen Quellen zusammengesucht werden müssen und ein Zugriff jederzeit und von jedem Ort aus möglich ist.

Aufgrund der langen Lebensdauer von Brücken sind die historischen Daten in die Bewertung einzubeziehen. Alle Daten, auch die, die aktuell noch nicht in digitaler Form vorliegen, müssen in geeigneter Form digitalisiert und in Datenbanken gespeichert werden. Im Anschluss können, wenn eine ausreichende Anzahl an Brücken mit Sensoren ausgestattet ist, Auffälligkeiten und Muster zwischen unterschiedlichen Brückenbauwerken erkannt und neue Erkenntnisse gewonnen werden. In den durchgeführten Interviews wurde diesbezüglich dargestellt, dass die Auswertung von Brückendaten sowie die Ermittlung von Korrelationen zwischen unterschiedlichen Bauwerken mithilfe des Einsatzes von Machine Learning großes Potenzial bieten würde. Über diese Auswertungen können Hinweise auf tendenzielle Schwachstellen einer Brücke identifiziert werden, sodass diese überprüft und bei Bedarf vor Auftreten eines größeren Schadens behoben werden können. Dies beinhaltet z. B. die Überprüfung von Korrelationen zwischen strukturmechanischen Aspekten oder auch zwischen verwendeten Überbauabdichtungen verschiedener Bauwerke, wenn die Bauwerke innerhalb vergleichbarer Zeiträume errichtet wurden.

Bei der Erstellung des Monitoringkonzepts ist zudem zu berücksichtigen, dass zum einen in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen unterschiedliche Stufen einer Ausstattung mit Sensoren erforderlich sind und dass zum anderen bei Auftreten neuer Problemstellen die Möglichkeit bestehen muss, das Monitoringkonzept um weitere Sensoren zu erweitern. Aus diesem Grund handelt es sich bei dem entwickelten Konzept für die Datenerfassung um ein stufenweises und adaptierbares Vorgehen.

6.1.2 Datencluster

Die im Rahmen der Intelligenten Brücke zu erfassenden Daten können grundsätzlich in drei Datencluster unterteilt werden. Dazu zählen Messdaten

der Einwirkungen bzw. Umgebungsbedingungen, Messdaten zu Expositionsbedingungen und chemisch-physikalischen Beanspruchungen sowie Messdaten zur Schadensüberwachung.

Zu den Messdaten der Einwirkungen bzw. Umgebungsbedingungen gehört unter anderem die Temperatur, die bei allen Brückenbauwerken erfasst werden sollte, da sie im Allgemeinen immer einen Einfluss auf andere Messwerte hat. Infolgedessen muss bei der Datenaufbereitung der Messwerte eine Bereinigung um den Einfluss aus der Temperatur stattfinden, und dies auch in gleicher Art und Weise während der Lebensdauer des Bauwerks. Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Intelligenten Brücke stellt die Erfassung der auftretenden Verkehrseinwirkungen dar, da diese z. B. zur Bestimmung der tatsächlichen Lastwechselzahlen oder zur Bewertung von Überfahrten von Schwertransporten verwendet werden können. Die Erfassung der Verkehrseinwirkungen kann dabei über Messungen an der Brücke erfolgen (z. B. an Lagern oder Fahrbahnübergängen). Alternativ besteht die Möglichkeit, den Verkehr an Messstellen auf der freien Strecke zu erfassen und die Messwerte auf die Brückenbauwerke an der jeweiligen Strecke zu übertragen.

Zu den Messdaten zu Expositionsbedingungen und chemisch-physikalischen Beanspruchungen zählen unter anderem die Feuchtigkeit, der Chloridgehalt und die Karbonatisierungsfront, wobei insbesondere die Feuchtigkeit in Bezug auf die Bewehrungskorrosion und die Degradation von Ausrüstungselementen (z. B. Lagern und Fahrbahnübergängen) von großer Bedeutung ist. In den Interviews wurde bestätigt, dass eindringendes Wasser (bzw. Feuchtigkeit) eine große Gefahr für Brückenbauwerke darstellt und Schäden infolge von Durchfeuchtungen in der Regel erst nach einem langen Zeitraum sichtbar werden.

Zu den Messdaten zur Schadensüberwachung gehören unter anderem Sensoren im Bereich von Rissen sowie Sensoren im Bereich von Koppelfugen. Ein wichtiger Aspekt bei der Ausstattung von Intelligenten Brücken ist, dass die Sensoren nachträglich applizierbar sein müssen, damit diese auch situationsbedingt angebracht werden können, wenn Schäden an der Brücke festgestellt werden. Hinzu kommt, dass in den ersten Jahren in der Regel keine Schäden an der Brücke zu erwarten sind, sodass eine Anbringung von externen Sensoren zur Schadensüberwachung direkt nach der Brückener-

stellung nicht unbedingt wirtschaftlich ist. Sollen hingegen Sensoren im Inneren der Bauteile angebracht werden, um z. B. über die Dehnung der Bewehrung auftretende Risse frühzeitig erkennen zu können, müssen diese schon beim Neubau der Brücke vorgesehen werden, da ein späterer Einbau nicht zerstörungsfrei möglich ist. Daraus folgt, dass bei (vorgeschädigten) Bestandsbauwerken in der Regel auf externe Sensoren zur Schadensüberwachung zurückgegriffen wird, um Eingriffe in die Bauwerkssubstanz zu vermeiden.

Für alle Messdaten ist zu beachten, dass die Herkunft der Daten eindeutig spezifiziert werden muss, damit die Daten für die weitere Bewertung verwendet werden können. Die Datenherkunft könnte dazu z. B. über eine eindeutige Identifikation und Deklaration des Sensors festgelegt und den jeweiligen Messdaten zugeordnet werden. In Kapitel 6.2.4 wird die Kennzeichnung der Daten genauer beschrieben.

6.1.3 Sensorausstattung und Messintervalle

Für die Übertragung der Messdaten wurden in der Vergangenheit u. a. aufgrund der größeren übertragbaren Datenmengen meist kabelgebundene Sensoren eingesetzt. Aufgrund der stetig fortschreitenden Entwicklungen ist allerdings davon auszugehen, dass in Zukunft verstärkt auch drahtlose Sensoren eingesetzt werden können, da diese Vorteile bei der Ausstattung einer Brücke mit Sensoren bieten. Ein entscheidender Punkt dabei ist die Sicherheit der Daten bei der drahtlosen Datenübertragung, jedoch bestanden diesbezüglich bei den Interviewpartnern wenig Bedenken.

Aus den durchgeführten Interviews konnte zudem entnommen werden, dass bei der Intelligenten Brücke verstärkt flächige und linienförmige Messungen und weniger punktuelle Messungen erfolgen sollen. Dafür eignen sich z. B. faseroptische Sensoren, mit denen unterschiedliche Messwerte (u. a. Dehnungen und Verformungen) über längere Strecken erfasst und zugeordnet werden können. Die jeweilige Messfrequenz sowie die erforderliche Genauigkeit der Sensoren ist dabei im Vorfeld vom zuständigen Fachplaner Monitoring festzulegen und muss im Laufe der Überwachung regelmäßig kontrolliert und bei Bedarf angepasst werden.

Die Sensorausstattung sollte schon bei der Entwurfs- und Ausführungsplanung flexibel und adaptierbar geplant werden. Für Neubauten würde dies

zunächst eine Grundausstattung an Sensoren umfassen, die dann im Laufe der Lebensdauer der Brücke um weitere Sensoren ergänzt werden kann. Zudem sollte eine Anpassung der Messfrequenz der bereits vorhandenen Sensoren möglich sein. Die einzelnen Ausbaustufen sollten sich dann an den Lebenszyklusphasen der Brücke orientieren, sodass die Sensorausstattung über die Lebensdauer des Bauwerks fortwährend erweitert wird. In Kapitel 6.1.4 sind diese Ausbaustufen näher beschrieben.

Bei neu erstellten Intelligenten Brücken sollte zudem vor der Verkehrsfreigabe eine Null-Messung unter definierten Beanspruchungen durchgeführt werden. Gleiches gilt aber auch für bestehende Bauwerke, die zu Intelligenten Brücken ausgestattet werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass bestehende Bauwerke schon eine gewisse Nutzungsdauer aufweisen und ggf. entsprechende Schäden bzw. Zustandsveränderungen zeigen, sodass zum Zeitpunkt der Null-Messung bereits ein anderer Ausgangszustand als bei Neubauten vorliegt. Mit den Messdaten aus der Null-Messung liegen im Anschluss aber wichtige Vergleichswerte vor, auf die zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der weiteren Lebensdauer zurückgegriffen werden kann und über die dann eine Bewertung der Zustandsveränderung bzw. des Schadensausmaßes erfolgen kann.

6.1.4 Bauwerke

Grundsätzlich sollten sowohl Neubauten als auch Bestandsbauwerke zu Intelligenten Brücken ausgerüstet werden. Für Neubauten stehen dabei eine größere Auswahl an Sensoren zur Verfügung, da die Sensoren bereits bei der Planung berücksichtigt werden können und damit auch interne Sensoren eingesetzt werden können.

Bei Neubauten ist aber abzuwägen, welche Sensoren aus der Vielfalt der zur Verfügung stehenden Sensoren ausgewählt werden. Hierbei sind natürlich die Aspekte der Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen, aber auch der Degradations- bzw. Schadensverlauf, der bei Neubauten in den ersten Jahren in der Regel nur zu wenigen bis keinen Schäden führt. Dessen ungeachtet sollte bei der Planung einer neuen Intelligenten Brücke die (großzügige) Anbringung weiterer Sensoren berücksichtigt werden, auch wenn sie später nicht vollumfänglich installiert werden. In dem Fall sind aber die erforderlichen Anschlüsse vorhanden und nachträgliche Ein-

griffe in das dann bestehende Bauwerk werden vermieden. Im Rahmen der Eingriffsminimierung und der Wirtschaftlichkeit ist auch zu prüfen, eine Brücke z. B. nicht großflächig und nicht symmetrisch mit Sensoren auszustatten.

Bei Bestandsbauwerken müssen zwangsläufig bei der Erstellung des Monitoringkonzepts für die Datenerfassung die vorhandenen baulichen, verkehrlichen und technischen Gegebenheiten der Brücke berücksichtigt werden. Von großer Bedeutung ist dabei auch die Zugänglichkeit für die Anbringung und Wartung der Sensoren, die entsprechend bei der Planung berücksichtigt werden muss.

Eine vollständige Ausstattung aller Brücken an Bundesfernstraßen zu Intelligenten Brücken ist, insbesondere in der Implementierungsphase, sowohl aus finanzieller als auch aus rein praktischer Sicht nicht umsetzbar. Aus diesem Grund muss zunächst eine Auswahl an Brücken getroffen werden, die zu Intelligenten Brücken ausgerüstet werden und die im Laufe der Zeit um weitere Brücken ergänzt werden. Hierfür sollten u. a. folgende Kriterien herangezogen werden:

- verkehrliche Bedeutung,
- Notwendigkeit einer Überwachung aufgrund vorliegender Schäden,
- Bauweise,
- Standort,
- Zugänglichkeit bzw. Sperrzeiten und
- vorliegende Baugrundverhältnisse.

Ein weiteres wichtiges Kriterium stellt die Zustandsnote des Bauwerks dar. Die Zustandsnote einer Brücke ergibt sich aus der Bauwerksprüfung und der vom Bauwerksprüfer vergebenen Bewertung für die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. Als sehr wertvolle Erkenntnisse müssen die Ergebnisse der Bauwerksprüfung in geeigneter Weise digitalisiert und für die weitere Bewertung nutzbar gemacht werden.

Bild 6-1 zeigt eine Übersicht über die Zustandsnoten der Brückenbauwerke an Bundesfernstraßen in Deutschland.

Es ist zu erkennen, dass sich im Jahr 2021 rund 13 % der knapp 40.000 Brückenbauwerke an Bundesfernstraßen in einem sehr guten (Note 1,0-1,4) oder guten (Note 1,5-1,9) Zustand befinden. Für

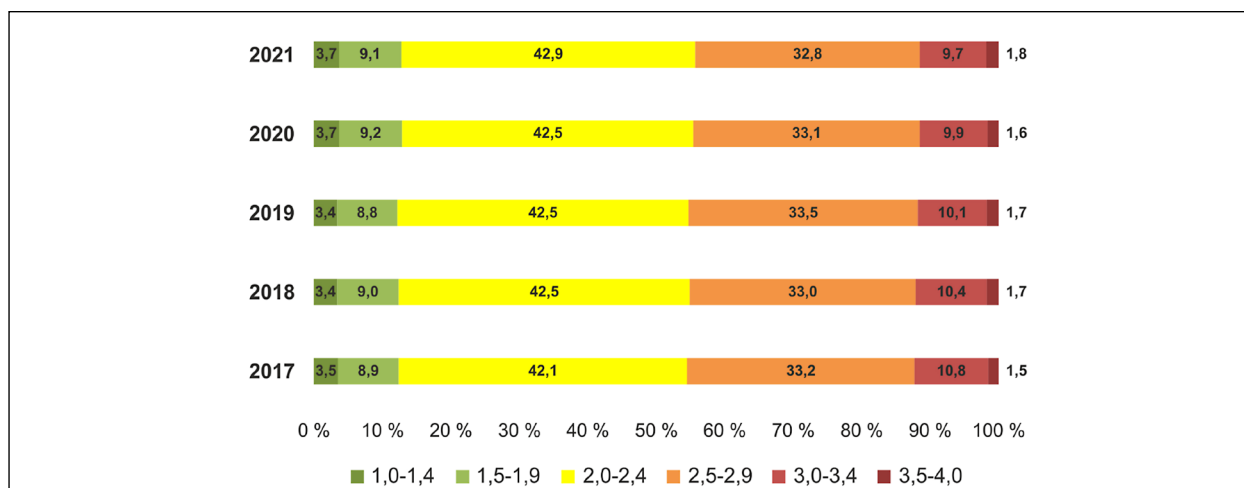


Bild 6-1 Zustandsnoten der Brücken an Bundesfernstraßen (nach [44])

diese Bauwerke ist eine laufende Unterhaltung sicherzustellen. Der Großteil der Bauwerke (ca. 43 %) ist in einem befriedigenden Zustand (Note 2,0-2,4), für die neben der laufenden Unterhaltung auch eine mittel- bis langfristige Instandsetzung erforderlich ist. Bei Brücken mit ausreichendem Zustand (Note 2,5-2,9), die rund 33 % der Bauwerke ausmachen, ist zusätzlich zur laufenden Unterhaltung eine kurz- bis mittelfristige Instandsetzung erforderlich. In einem nicht ausreichenden (Note 3,0-3,4) oder ungenügenden (Note 3,5-4,0) Zustand befinden sich knapp 12 % der Bauwerke. Neben der laufenden Unterhaltung muss für Bauwerke mit nicht ausreichendem Zustand eine umgehende Instandsetzung erfolgen und bei Bauwerken mit ungenügendem Zustand muss gegebenenfalls auch eine Erneuerung erfolgen, in jedem Fall sind jedoch unmittelbar Maßnahmen zur Sicherstellung der Verkehrssicherheit einzuleiten [44] [45].

Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Alter einer Brücke und der ermittelten Zustandsnote besteht nicht, jedoch ist die Zustandsnote ein Indiz für die Kritikalität der Brücke und damit auch für die erforderlichen Maßnahmen, die zur Sicherstellung einer langfristigen Nutzung durchgeführt werden müssen. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die Zustandsnote einer Brücke bei der Einteilung in die entsprechende Lebenszyklusphase zu berücksichtigen. Daraus folgt, dass bei einer Veränderung der Zustandsnote – zusätzlich zur Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen bzw. Maßnahmen zur Sicherstellung der Verkehrssicherheit – auch das Sensorkonzept überdacht und ggf. angepasst wird und die Brücke damit in die nächste Lebenszyklusphase des Monitorings übergeht.

Auch wenn eine vollständige Ausstattung aller Brückenbauwerke zu Intelligenten Brücken derzeit nicht umsetzbar ist, sollte es trotzdem auf langfristige Sicht das Ziel sein, möglichst viele Brückenbauwerke zu Intelligenten Brücken auszustatten. Ein Aspekt ist dabei, dass durch eine große Anzahl Intelligenter Brücken eine größere Grundgesamtheit an Auffälligkeiten und Mustern vorliegt und diese dann im Hinblick auf Vertrauensbereiche bzw. Sicherheitsaspekte besser bewertet werden können.

6.2 Datenübertragung

Die Datenübertragung beschreibt die Übermittlung der erfassten Messwerte zur verarbeitenden Einheit über eine drahtlose oder drahtgebundene Verbindung. Aufgrund der aktuell schnell fortschreitenden Entwicklungen im Bereich der Sensoren ist zukünftig jedoch davon auszugehen, dass die Übertragung der Messdaten vom Sensor zur verarbeitenden Einheit sowie von der verarbeitenden Einheit zum Datenspeicher vorwiegend drahtlos erfolgen wird. Die Sicherheit der Daten bei der Datenübertragung spielt dabei eine wichtige Rolle und muss durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden.

6.2.1 Drahtlose Übertragung

Für die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke wird eine vorwiegend drahtlose Übertragung der Daten vom Sensor zum Messrechner an der Brücke vorgesehen. Damit die zu übertragenden Datenmengen nicht zu groß sind, sollte so früh wie möglich eine intelligente Vorfilterung der Rohdaten erfolgen, was im ersten Schritt vor allem die Bereinigung

der Messdaten um ein mögliches Messrauschen betrifft. Durch diese Vorfilterung der Daten, die entweder direkt im Sensor oder auf dem Messrechner erfolgt, kann die Datenmenge zum Teil erheblich reduziert werden, was sich positiv auf die Übertragungszeit auswirkt.

Als Datenübergabepunkt am Bauwerk fungiert ein Messrechner, bei dem es sich um einen Mini-PC mit spezialisierter Software handelt. Die weitere Übertragung der Daten vom Messrechner zum Datenspeicher erfolgt drahtlos über Mobilfunk, wobei als Grundlage hierfür der 5G-Mobilfunkstandard vorgesehen wird, der als zukünftiger Standard angesehen wird. Hinzu kommt, dass der 5G-Mobilfunkstandard für derartige Aufgaben entwickelt wurde und die Übertragung großer Datenmengen in nahezu Echtzeit ermöglicht. Trotzdem sollte vor der Datenübertragung eine Datenkomprimierung auf dem Messrechner (durch eine dedizierte Software) durchgeführt werden, um die zu übertragende Datenmenge weiter zu reduzieren. Der Mini-PC fungiert damit als IoT-Gateway (Internet of Things) und überträgt die Daten in den Datenspeicher bzw. in die Cloud.

Ein wichtiger Punkt dabei ist, dass an der Brücke eine ausreichende Energieversorgung sowie eine stabile Internetanbindung sichergestellt werden müssen, um sowohl die Sensoren als auch die Verarbeitungseinheit zuverlässig und dauerhaft betreiben zu können. Zudem sind weitere wichtige Eigenschaften des Mini-PCs ein geringer Platzverbrauch, eine geeignete Benutzeroberfläche oder die Möglichkeit, diesen mit einem Laptop zu verbinden, Ethernet-Steckplätze, Slots für SIM-Karten, 5G-Fähigkeit sowie ein ausreichender Prozessor und Arbeitsspeicher für die Datenverarbeitung.

Des Weiteren ist, insbesondere bei der drahtlosen Übertragung von Daten, zu beachten, dass geltende Regeln zum Thema Datensicherheit eingehalten werden und ein unbefugter Zugriff bzw. eine Änderung der Daten bestmöglich verhindert wird.

6.2.2 Datensicherheit

Die oberste Priorität bei der Datenübertragung hat die Sicherheit der Daten. Dies beinhaltet insbesondere die Einhaltung der Schutzziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit der Daten. Übertragen auf das Datenmanagement der Intelligenten Brücke bedeutet dies, dass sowohl die geplante Hardware als auch Software diese Ziele vollständig erfüllen

müssen. Daraus folgt, dass bei den Hardwarekomponenten darauf zu achten ist, dass diese sich an den Systembausteinen des BSI (Bundesamt in der Informationstechnik) orientieren oder sogar zertifiziert sind [46].

Sicherheitsgefahren bezüglich der Daten von Brückenbauwerken sehen KRÜGER und GROßE [2] vor allem bei der Motekonfiguration, der Übertragungssicherheit bei sicherheitsrelevanten Messaufgaben, der Manipulation der erfassten Messwerte sowie der Manipulation bei vom System vorbestimmten Reaktionen. Diese Punkte werden im Konzept in geeigneter Weise durch die Orientierung an den Systembausteinen des BSI für die Software und Hardware berücksichtigt. Zusätzlich stellen die meisten Cloudanbieter weitere Lösungen für die Sicherheit der Daten zur Verfügung.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Datensicherheit (Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit der Daten) sich nicht nur auf die Datenübertragung bezieht, sondern grundsätzlich für das gesamte Datenmanagement der Intelligenten Brücke sowie für alle sich anschließenden Prozesse gilt.

6.2.3 Ausfall- und Recovery-Konzept

Einen weiteren wichtigen Punkt bei der Datenübertragung stellt ein geeignetes Ausfall- und Recovery-Konzept dar, das im Falle eines Ausfalls einer oder mehrerer Komponenten, etwa durch Vandalismus, Mobilfunkstörungen oder Stromausfall, den Verlust von Daten verhindert. Bei der Erstellung dieses Konzepts müssen wirtschaftliche und strategische Gesichtspunkte berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden, da aus wirtschaftlichen Gründen nicht jeder mögliche Fall abgedeckt werden kann. Mögliche Strategien für die intelligente digitale Infrastruktur wären beispielsweise die Nutzung von Redundanzen und die regelmäßige Erstellung von Backups auf geeigneten Systemen. Des Weiteren ist die Nutzung einer asynchronen Datenübertragung anzustreben, bei der die Daten vom Sensor bzw. vom Messrechner solange zwischengespeichert werden, bis das nächste System im Prozess nach einem Ausfall wieder verfügbar ist.

Redundanzen können in Bezug auf die Hardware oder in Bezug auf die Zeit berücksichtigt werden. Im Bereich der Hardware wird hierfür ein mehrfaches Vorhandensein von Sensoren, Kommunikationskanälen, Verarbeitungseinheiten und Rechnereinheiten vorgesehen. Im Falle eines Defekts wird damit

ein weiteres Senden von Daten zum Messrechner oder in die Cloud ermöglicht. Besondere Berücksichtigung sollten dabei die Sensoren bekommen, die kritische Daten zum Zustand der Brücke erfassen.

Für die Erstellung von Redundanzen eignet sich die Erstellung von Backups durch geeignete Software oder Hardware. Dabei ist wichtig, dass die Daten des Messrechners in regelmäßigen Abständen einem Backup-Verfahren unterzogen werden, um große Zeiträume mit Datenverlust zu vermeiden. Insbesondere dann ist dies von großer Bedeutung, wenn die Datenübertragung zum Datenspeicher bzw. in die Cloud zeitverzögert erfolgt. Des Weiteren sollte für Intelligente Brücken ein zweiter, redundanter Messrechner vorgesehen werden, der zum Einsatz kommt, wenn der Hauptrechner ausfällt.

6.2.4 Kennzeichnung der Messpunkte

Um für die spätere Weiterverwendung und Nutzung der Daten eine eindeutige Zuordnung zu den jeweiligen Messpunkten an der Brücke zu ermöglichen, ist eine Kennzeichnung der Messpunkte erforderlich. Dies sollte durch eine klare Benennung der Sensoren oder des Datenstroms, welcher durch die Sensoren erzeugt wird, erfolgen.

Die zusätzlichen Informationen zur Kennzeichnung der Messpunkte werden dem jeweiligen Sensor zugeordnet und anschließend gemeinsam mit den Messdaten übertragen. Im Dashboard kann daraufhin von den Nutzern eingesehen werden, von welchem Sensor die Daten kommen und welcher Parameter genau gemessen wurde. Dies ist insbesondere für Sensoren entscheidend, mit denen linienförmige oder flächige Messungen (z. B. faseroptische Sensoren) durchgeführt werden und die mehrere Messwerte in einem bestimmten Raster erfassen.

6.3 Datenhaltung

Die Datenhaltung umfasst die Speicherung der gewonnenen Daten in strukturierter Form in einer Datenbank sowie die mit der Datenspeicherung in direktem Zusammenhang stehenden Prozesse. Neben der Speicherung der Daten selbst zählen dazu auch der Zugriff auf die Daten sowie die Löschung von Daten. Die strukturierte Speicherung der Daten bildet im Anschluss die Grundlage für die weitere Zuordnung, Bearbeitung und Auswertung der Daten

und stellt damit einen wichtigen Aspekt im gesamten Datenmanagementprozess dar.

Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Brückenbauwerken müssen Lösungen entwickelt werden, mit denen die Daten für diese langen Zeiträume nutzbar und verarbeitbar bleiben. Da geschlossene, binäre Datenformate in der Regel an Softwareprodukte gebunden sind und dadurch häufig schon nach wenigen Versionsschritten nicht mehr weiterverwendbar sind, kommen für die Langzeitspeicherung der Daten in der Regel nur offene, neutrale und gut dokumentierte Datenformate infrage. Bei diesen Datenformaten ist davon auszugehen, dass sie auch nach mehreren Jahrzehnten noch verarbeitbar sind [47].

6.3.1 Cloud

Für die Datenhaltung der Intelligenten Brücke ist, nach Abwägung der Vor- und Nachteile sowie auf Basis der Erkenntnisse aus den Interviews, eine cloudbasierte Lösung anzustreben. Dieser Ansatz wird durch die Architekturrichtlinie für die IT des Bundes (Version 2020) bekräftigt, die einen Cloud-First-Ansatz für die Einführung neuer IT-Maßnahmen vorsieht [48]. Grundsätzlich stehen dafür mit der Public Cloud und der Private Cloud zwei unterschiedliche Cloudlösungen zur Verfügung, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Eine Public Cloud bedeutet die Nutzung einer vorhandenen Plattform eines marktüblichen Anbieters mit dem Vorteil, dass dieser ein großes Portfolio für IoT-Lösungen zur Verfügung stellt. Die Prozesse, wie z. B. die Datenübertragung, die Datenaufbereitung und Datenauswertung sowie die Pflege des Dashboards, können dadurch deutlich vereinfacht werden und liegen zum Teil im Aufgabenbereich des Dienstleisters. Darüber hinaus bietet eine Public Cloud den Vorteil, dass der Bedarf an internen IT-Fachkräften auf ein Minimum reduziert werden kann, keine eigenen Lösungen entwickelt werden müssen und eine flexiblere Skalierung möglich ist.

Eine Private Cloud ermöglicht grundsätzlich die gleichen Funktionen wie eine Public Cloud, läuft allerdings im organisationsinternen Intranet bzw. Rechenzentrum und muss entsprechend auch durch eigenes Personal betreut werden. Aus diesem Grund ist eine Private Cloud mit deutlich mehr personellem und organisatorischem Aufwand sowie mit höheren Anschaffungskosten verbunden. Zudem ist aufgrund geltender Beschaffungsverfahren

mit einem deutlich höheren Planungshorizont zu rechnen, was sich negativ auf die Skalierbarkeit auswirkt. Vorteile einer eigenen Cloud wiederum sind die volle Kontrolle über die Hardware und die Prozesse. Außerdem können die laufenden Kosten besser prognostiziert werden. Die jeweiligen Vor- und Nachteile beider Möglichkeiten müssen abschließend vom Betreiber abgewogen werden.

6.3.2 Datenmodelle und Datenarchitektur

Beim strukturierten Einsatz von IoT-Lösungen sind spezifische und individuelle Datenmodelle anzuwenden. Dies ist der Komplexität einer IoT-Landschaft geschuldet, ist aber ein wichtiger Bestandteil und zwingend erforderlich, um die Systeme und die zu verarbeitenden Daten im Anwendungsbereich und deren Beziehungen untereinander zu definieren.

Zu den klassischen Datenmodellen zählen u. a. das logische, das physische und das konzeptionelle Datenmodell [49], wobei für den IoT-Bereich der Einsatz eines logischen Datenmodells naheliegend ist. Es zeigt sich jedoch, dass durch die gegebene Komplexität ein individuell erstelltes Datenmodell, welches bspw. das logische Datenmodell um neue Notationen erweitert, die Realität in der Regel besser beschreiben kann. Da die Erstellung eines solchen individuellen Datenmodells in der Praxis allerdings sehr aufwendig ist, bieten die gängigen Cloudplattformen ein auf IoT abgestimmtes Datenmodell an, auf das bei einer Cloudnutzung zurückgegriffen werden kann.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verwendung einer offenen Datenarchitektur, um die Wiederverwendbarkeit der Daten zu gewährleisten. Dies umfasst z. B. die Weitergabe der Daten von einem Dienstleister an einen anderen Dienstleister, wenn ein Vertrag endet, oder die Übergabe der Daten vom Dienstleister an den Betreiber, wenn die Überwachung eines Bauwerks abgeschlossen ist. Für die intelligente digitale Infrastruktur bedeutet dies, dass Systeme, Software und Methoden in der IoT-Datenarchitektur genutzt werden müssen, die eine Migration der Daten zu einem anderen Dienstleister ermöglichen. Dazu sollte auf gängige Datenaustauschformate zurückgegriffen werden, die auch in anderen Bereichen des Bauwesens eingesetzt werden [47].

6.3.3 Rechte

Für den Zugriff auf die Daten sowie die weitere Verwendung und Verarbeitung der Daten ist es essen-

ziell, dass eindeutig geregelt ist, wer welche Rechte an den Daten besitzt und wer der Eigentümer der Daten ist. Beides sollte eindeutig geregelt und vertraglich festgehalten werden, wobei auch zu prüfen ist, welche rechtlichen Grundsätze darüber hinaus bei der Erhebung von Daten eingehalten werden müssen. Zudem besteht die Möglichkeit, die Rechte an einen anderen beteiligten Akteur innerhalb des Prozesses abzutreten.

Daraus folgt, dass mit den Dienstleistern und dem Management des Projektes entsprechende Regelungen getroffen werden müssen, die u. a. die Übergabe der Daten an den Auftraggeber thematisieren. Darüber hinaus müssen die Zugriffsrechte für die verschiedenen Nutzer der Daten festgelegt und vergeben werden. Damit die Festlegung der Zugriffsrechte später eindeutig und nachvollziehbar umsetzbar ist, muss z. B. eine geeignete Klassifizierung der Daten erfolgen.

Die Regelung der Rechte kann dabei in der Cloud durch zugewiesene Nutzergruppen (Rollen), ausgewählte Nutzer und durch Richtlinien eingerichtet werden und vom Administrator regelmäßig angepasst werden. Diese Rollenfunktion kann später im Dashboard (siehe Kapitel 6.4.3) umgesetzt werden, sodass jeder Nutzergruppe ein personalisiertes Dashboard angezeigt wird.

6.3.4 Datenlöschung

Bei der Datenlöschung sind die Datenselektion und die Datenhierarchie wichtige Aspekte. Dabei ist darauf zu achten, dass schon im Vorfeld ein Datenlöschkonzept erstellt wird, welches die Dauer der einzelnen Datenströme der Sensortypen (bspw. Metadaten) und abstrahierten Daten (Analysen) berücksichtigt.

Grundsätzlich besteht kein Zwang für die Löschung von Daten, jedoch ist es aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sinnvoll, nur die noch erforderlichen Daten langfristig bzw. dauerhaft zu speichern. Alle Daten, die nur für einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung stehen müssen, können entsprechend nach Ablauf dieses Zeitraums gelöscht werden. Die jeweiligen Zeiträume sowie die zu löschenden Daten können dabei individuell vom Betreiber festgelegt werden.

Auf Grundlage der Interviews und orientierend an den zeitlichen Abständen der Bauwerksprüfungen können sich die Zeiträume für die Datenlöschung

an den im Folgenden genannten Richtwerten orientieren. Die Rohdaten können beispielsweise, wenn keine wesentlichen Veränderungen aufgetreten sind, nach 3 bis 5 Jahren gelöscht werden. Ähnliches gilt für einen Großteil der aufbereiteten Daten, wobei für diese Daten ein längerer Zeitraum von beispielsweise 6 bis 10 Jahren gewählt werden sollte, damit Veränderungen zwischen zwei Hauptprüfungen einer Brücke bewertet und nachvollzogen werden können. Dem gegenüber müssen die Messdaten der Null-Messung sowie die Messdaten von später durchgeführten Kalibrierfahrten dauerhaft gespeichert werden, da diese über die gesamte Lebensdauer der Brücke für einen Vergleich herangezogen werden sollen. Das Gleiche gilt für die allgemeinen Daten der Brücke (Bauwerksdaten, durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen etc.) sowie die Daten aus den Bauwerksprüfungen, die dauerhaft und ggf. sogar über die Lebensdauer der Brücke hinaus gespeichert werden müssen.

6.4 Datenaufbereitung und Datenauswertung

Im Rahmen der Datenaufbereitung erfolgt eine Weiterverarbeitung der erfassten Daten sowie eine Erhöhung der Qualität der Daten und beinhaltet z. B. eine Bereinigung der Messwerte um ein Messrauschen oder ungewollte Effekte. Für diese Aufbereitung muss ein Basiskonzept vorgesehen werden, mit dem individuelle Anpassungen möglich sind und das spezifisch an das vorliegende Bauwerk angepasst werden kann. Der Zugriff auf die Daten durch die Nutzer soll im Anschluss über ein Dashboard erfolgen, in dem die Daten übersichtlich dargestellt und hinsichtlich unterschiedlicher Parameter gefiltert und ausgewertet werden können.

6.4.1 Vorgehen

Die Aufbereitung und Auswertung der Daten muss, wie von Interviewpartner 12 dargestellt, automatisch erfolgen und kann über individuell angepasste Auswertungsalgorithmen durchgeführt werden. Die erste Datenaufbereitung erfolgt auf Basis der Rohdaten und ermöglicht die grafische Darstellung und Bewertung einzelner Werte. In weiteren Aufbereitungsschritten können relevante Informationen für die einzelne Nutzergruppen weiter aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden.

Je nach Nutzergruppe und Verwendungszweck kann im Anschluss auf die Rohdaten oder auf die aufbereiteten Daten zugegriffen werden, wobei die Betrachtung unterschiedlicher Aufbereitungsstufen möglich ist, um die Nachvollziehbarkeit sicherzustellen. Die höchste Aufbereitungsstufe umfasst dabei nur noch Kennzahlen, auf Grundlage derer für den Betreiber eine Bewertung des gesamten Brückenbauwerks möglich ist.

Grundsätzlich erfolgt die Aufbereitung der Daten immer unter Berücksichtigung der Effektivität und Effizienz sowie spezifisch für eine bzw. mehrere Nutzergruppen. Dazu gehört auch, dass gegebene Einflussfaktoren berücksichtigt werden können und eine Analyse der bisherigen gemessenen Daten vorgenommen werden kann.

In weiteren Ausbaustufen ist darüber hinaus denkbar, dass sich die Algorithmen auf Grundlage von Machine Learning oder Künstlicher Intelligenz selbstständig weiterentwickeln. Hierfür müssen jedoch geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der Daten jederzeit sichergestellt werden kann. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, dass diese Vorgänge nachvollziehbar gestaltet sind. Die eingesetzten Algorithmen müssen daher regelmäßig erneut evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden. Der Einsatz von Machine Learning bzw. Künstlicher Intelligenz ist dabei jedoch nur als Entscheidungsunterstützung und als Hilfsmittel für das zuständige Personal gedacht und hat als Voraussetzung, dass ausreichend Daten als Grundlage zur Verfügung stehen oder andere Brücken als Vergleich herangezogen werden können. Die Künstliche Intelligenz kann zudem im weiteren Verlauf aus dem Normalzustand lernen, Ausschläge bewerten und Analysen durchführen. Ein Beispiel für die Ermöglichung einer Kontrolle der Messdaten mithilfe von Algorithmen ist die Nutzung von Modellwissen über z. B. das Temperaturverhalten, indem dieses mit den tatsächlichen Messwerten abgeglichen wird und darüber Ausreißer oder ungewöhnliche Vorgänge erkannt werden können [1].

6.4.2 Verknüpfung von Daten aus anderen Quellen

Im Rahmen der Datenaufbereitung und Datenauswertung muss zudem eine Verknüpfung mit Daten aus anderen Quellen möglich sein, sodass z. B. die Verkehrsbelastung auch von Messstellen, die an der freien Strecke und nicht direkt am Bauwerk an-

geordneten sind, herangezogen werden kann. Diese Daten müssen dann vom Spezialdienstleister Monitoring bzw. Betreiber automatisiert, über z. B. eine Schnittstellenanbindung (API) oder den Einsatz von RPA (Robotic Process Automation), in die Cloud übertragen werden. Erfolgt die Verwendung einer API, kann eine direkte Verbindung zur Cloud erstellt werden, die lediglich am Anfang einer manuellen Konfiguration bedarf.

6.4.3 Dashboard

Für die Verarbeitung der Daten sowie die Kontrolle der Richtigkeit der Datenspeicherung ist eine geeignete Oberfläche für die Administratoren und Nutzer vorzusehen. Ein Dashboard beschreibt eine solche (grafische) Benutzeroberfläche, in der Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt, aufbereitet und dargestellt werden können. Dieses Dashboard sollte rollenspezifische Zugriffsrechte, Analyse-/Darstellungsmöglichkeiten sowie den Lebenszyklus der Intelligenten Brücke inklusive einer Bewertung enthalten. Die Verwendung eines digitalen Zwillinges ist anzustreben, stellt jedoch eine optionale weitere Ausbaustufe dar. Zudem ist eine interaktive Benutzeroberfläche gefragt, welche eine einfache Handhabung ermöglicht und Optionen für einen barrierefreien Einsatz vorsieht.

Als Hauptfunktion ist ein 2D Modell der Brücke vorzusehen, in dem die Punkte der Sensoren mit groben Standorten an der Brücke gekennzeichnet sind. Beim Anklicken des jeweiligen Punktes öffnet sich z. B. ein Fenster in der unteren Bildhälfte, welches detaillierte Informationen zum Sensor und den dazugehörigen, gemessenen Daten liefert. Zudem sind weitere Optionen zu Ansichten, Auswertungen, Schnittstellen, Terminen und der Rollenverteilung vorgesehen und liefern zum jeweiligen Gebiet nähere, detaillierte Informationen und weitere Auswahlmöglichkeiten.

Im Gegensatz zum Dashboard, das nur eine grobe Skizzierung der Brücke sowie der verbauten Sensoren bietet, kann mit einem digitalen Zwilling eine genaue Darstellung der Brücke mit den tatsächlichen Abmessungen der Intelligenten Brücke sowie den genauen Koordinaten der Sensoren in einem 3D-Modell erfolgen. Damit ermöglicht ein digitaler Zwilling weitere, detailliertere Betrachtungen der Brücke sowie weitere Steuerungsfunktionen, Analysemöglichkeiten und Simulationen.

Für beide Darstellungsformen ist es wichtig, dass das Dashboard samt aller beinhalteten Funktionen stetig aktualisiert und mit dem Stand der realen Brücke abgeglichen wird.

6.5 Lebenszyklusmanagement

Beim Lebenszyklusmanagement wird übergeordnet in eine Betrachtung auf Objektebene und eine Betrachtung auf Netzebene unterschieden.

Grundsätzlich kann das gesamte Potenzial der Intelligenten Brücke und der vorliegenden Daten erst vollständig genutzt werden, wenn eine große Anzahl an Brückenbauwerken mit Sensoren ausgestattet wurde und entsprechende Daten vorliegen. Neben Auswertungen für das Einzelbauwerk können dann auch Auswertungen für den gesamten Brückenbestand durchgeführt werden, sodass für Brücken ähnlichen Bauwerkstyps oder vergleichbaren Herstellungsjahres z. B. Rückschlüsse auf mögliche Probleme oder Schwachstellen gezogen werden können. Hierbei erfolgt die Betrachtung auf Netzebene.

Auf der anderen Seite ist eine individuelle Betrachtung jedes einzelnen Brückenbauwerks notwendig und Veränderungen sowie erforderliche Maßnahmen müssen isoliert für jedes einzelne Bauwerk bewertet bzw. ermittelt werden. Diese Betrachtungen erfolgen auf Objektebene.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Betrachtung auf Objekt- und Netzebene besteht in der Nutzergruppe, für die die Darstellung gedacht ist. Neben dem Betreiber der Brücke richtet sich die Betrachtung eines einzelnen Bauwerks auch an den Fachplaner und den Bauwerksprüfer, die Betrachtung des gesamten Brückenbestands hingegen richtet sich in der Regel nur an den Betreiber. Dies kann durch die Zuordnung entsprechender Rechte im Dashboard festgelegt werden, sodass die Akteure nur auf die für sie freigegebenen Daten zugreifen können.

6.5.1 Betrachtung auf Objektebene

Das Lebenszyklusmanagement auf Objektebene erfolgt individuell für jedes einzelne Brückenbauwerk auf Grundlage der erfassten sowie der aufbereiteten Daten und wird im Dashboard auf einer Abstraktionsebene dargestellt. Auf Basis dieser Daten kann im Anschluss die Einordnung der Brücke

in eine Lebenszyklusphase erfolgen, worüber auf der einen Seite die Sensorausstattung der Brücke festgelegt und auf der anderen Seite die Maßnahmen für die Sicherstellung der Nutzbarkeit definiert werden. Die Bewertung erfolgt dabei auf Grundlage objektiver Daten und wird durch die Verknüpfung mit weiteren Datenbanken zur Nutzung aller zur Verfügung stehender Daten ergänzt.

Treten wesentliche Veränderungen am Bauwerk auf oder werden festgelegte Warn- oder Alarmwerte überschritten, muss eine Benachrichtigung der zuständigen Personen erfolgen. Das Konzept sieht dabei eine Benachrichtigung mit dem Vorgehen „Down to Up“ vor, sodass zuerst der zuständige Bauwerksprüfer oder Fachplaner Monitoring informiert wird und agieren muss, und erst im zweiten Schritt der Betreiber der Brücke „in-action“ gesetzt wird. Die Benachrichtigung sollte dabei idealerweise per E-Mail erfolgen, da die E-Mail das bevorzugte Kommunikationsmittel darstellt. Für den Fall jedoch, dass unmittelbarer Handlungsbedarf besteht, sollte zusätzlich noch eine Benachrichtigung auf das Mobiltelefon der zuständigen Person erfolgen. Im Anschluss kann die zuständige Person die Veränderung bzw. die Überschreitung eines Warn- oder Alarmwerts bestätigen oder im Fall eines falschen Alarms die Benachrichtigung aufheben. Dadurch besteht die Möglichkeit, Falschmeldungen zu reduzieren und die Sperrung der Brücke aufgrund eines Sensorfehlers zu vermeiden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, dass eine Benachrichtigung von der Auswertungseinheit ausgehend an die zuständigen Personen verschickt wird, wenn z. B. die Analyse bestimmter Sensoren einen dringenden Handlungsbedarf empfiehlt.

Für ein vollumfängliches Lebenszyklusmanagement ist es zudem wichtig, dass alle Daten in digitaler Form vorliegen, wozu auch die Daten aus bereits durchgeführten Bauwerksprüfungen gehören. Dadurch besteht die Möglichkeit, bei zukünftigen Bauwerksprüfungen erneut auf die Daten zuzugreifen und die Veränderung von z. B. Schäden zu dokumentieren. Hinzu kommt, dass Auffälligkeiten direkt über Referenzen und Koordinaten zugeordnet und mit bildgebenden Verfahren hinterlegt werden können. Als Hilfestellung dient dem Bauwerksprüfer dabei ein mobiles Endgerät, über das auf alle relevanten Informationen des Bauwerks zugegriffen werden kann, und mit dem die eingetretenen Veränderungen dokumentiert werden können. Perspektivisch ist es damit auch möglich, dass der Bauwerksprüfer Schritt für Schritt durch die Bauwerksprüfung

geführt und explizit auf bereits festgestellte Schäden oder Problemstellen hingewiesen werden kann. Darüber hinaus besteht für den Betreiber die Möglichkeit, die ordnungsgemäße und sorgfältige Durchführung der Bauwerksprüfungen anhand der Eingaben auf dem Endgerät zu kontrollieren.

Im Anschluss können alle vorliegenden Daten der Brücke im Dashboard visualisiert, gefiltert und ausgewertet werden. Darauf aufbauend können anschließend Prognosen für das Bauwerk abgeleitet werden, sodass erforderliche Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen zeitlich und monetär planbarer werden. Dabei ist zu beachten, dass die verschiedenen Bauteile einer Brücke unterschiedliche Lebensdauern aufweisen. Für Fahrbahnübergänge und Lager, die im Vergleich zu der (Beton-) Tragwerksstruktur einer Brücke eine geringere Lebensdauer aufweisen, ist über einen Vergleich zwischen den gemessenen Verkehrseinwirkungen und den Erfahrungswerten bzw. Herstellerangaben prognostizierbar, wann ein Austausch ansteht bzw. durchgeführt werden muss. So kann erreicht werden, dass zum einen keine Schäden an der Brücke auftreten, aber zum anderen auch die Nutzungseinschränkungen durch eine Clusterung von Erhaltungsmaßnahmen an der Brücke minimiert werden.

6.5.2 Betrachtung auf Netzebene

Im Rahmen der Betrachtung auf Netzebene werden alle Brückenbauwerke eines Betreibers betrachtet. Aufgrund der Vielzahl an Daten wird für die Darstellung im Dashboard in der Regel eine übergeordnete Perspektive gewählt, jedoch kann der Betreiber auch bei dieser Darstellungsart auf die Daten jeder einzelnen Brücke zugreifen. Dies liegt darin begründet, dass zwar ein gestaffeltes Modell mit unterschiedlichen Ebenen für das Datenmanagement gewählt wurde, aufgrund der gewählten Datenhaltung jedoch immer alle Daten zur Verfügung stehen. Im Dashboard können die Daten dann in unterschiedlichen Abstraktionsebenen dargestellt und nach verschiedenen Kriterien gefiltert werden.

Im Dashboard sollte die Darstellung der Brücken über eine Karte realisiert werden, sodass eine eindeutige Zuordnung aller Brücken möglich ist und ganze Strecken analysiert werden können. Der Zustand der Brückenbauwerke kann im Anschluss über eine Art Ampelansicht abgerufen werden, sodass auch auf höherer Ebene ein schneller Überblick über den vorhandenen Brückenbestand ermöglicht wird.

Für die weitere Bewertung sowie die Entscheidungsfindung können auf dieser Ebene auch die Daten aller Brücken eines Streckenabschnitts dargestellt werden. Durch diese Betrachtung ist es dem Betreiber möglich, ganze Strecken zu bewerten und die erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen festzulegen, damit die Einschränkungen des Verkehrs weitgehend reduziert werden können. Zusätzlich sollte die Anbindung bzw. der Aufbau weiterer Datenbanken angestrebt werden, um Prognosen und Szenario-Betrachtungen auf Netzebene durchführen zu können. Insbesondere die Verknüpfung zu Verkehrsprognosedatenbanken und Kostendatenbanken ist dabei wichtig, um die verkehrliche Auswirkung und die monetäre Belastung prognostizieren zu können. Darüber hinaus ist eine Verknüpfung zu ökologischen Datenbanken anzustreben, um die ökologische Nachhaltigkeit von Entscheidungen bewerten zu können.

Auch auf Netzebene sollte die Benachrichtigung nach dem Vorgehen „Down to Up“ erfolgen. Dem Betreiber sollten auf dieser Ebene alle Benachrichtigungen dargestellt werden, da er als Verantwortlicher für die Sicherheit der Brückenbauwerke in Schadensfällen belangt werden kann und daher stets informiert sein muss. Es kann allerdings eine entsprechende Kennzeichnung der Benachrichtigungen erfolgen, wenn durch die zuständigen Personen eine Überprüfung stattgefunden hat (vgl. Kapitel 6.5.1).

6.6 Übersicht des erstellten Konzepts

In Bild 6-2 ist abschließend eine Übersicht des erstellten Konzepts zur digitalen Infrastruktur der Intelligenten Brücke mit den in Kapitel 6 beschriebenen Ebenen dargestellt. Grundsätzlich kann unterschieden werden in Prozesse, die direkt am Bau-

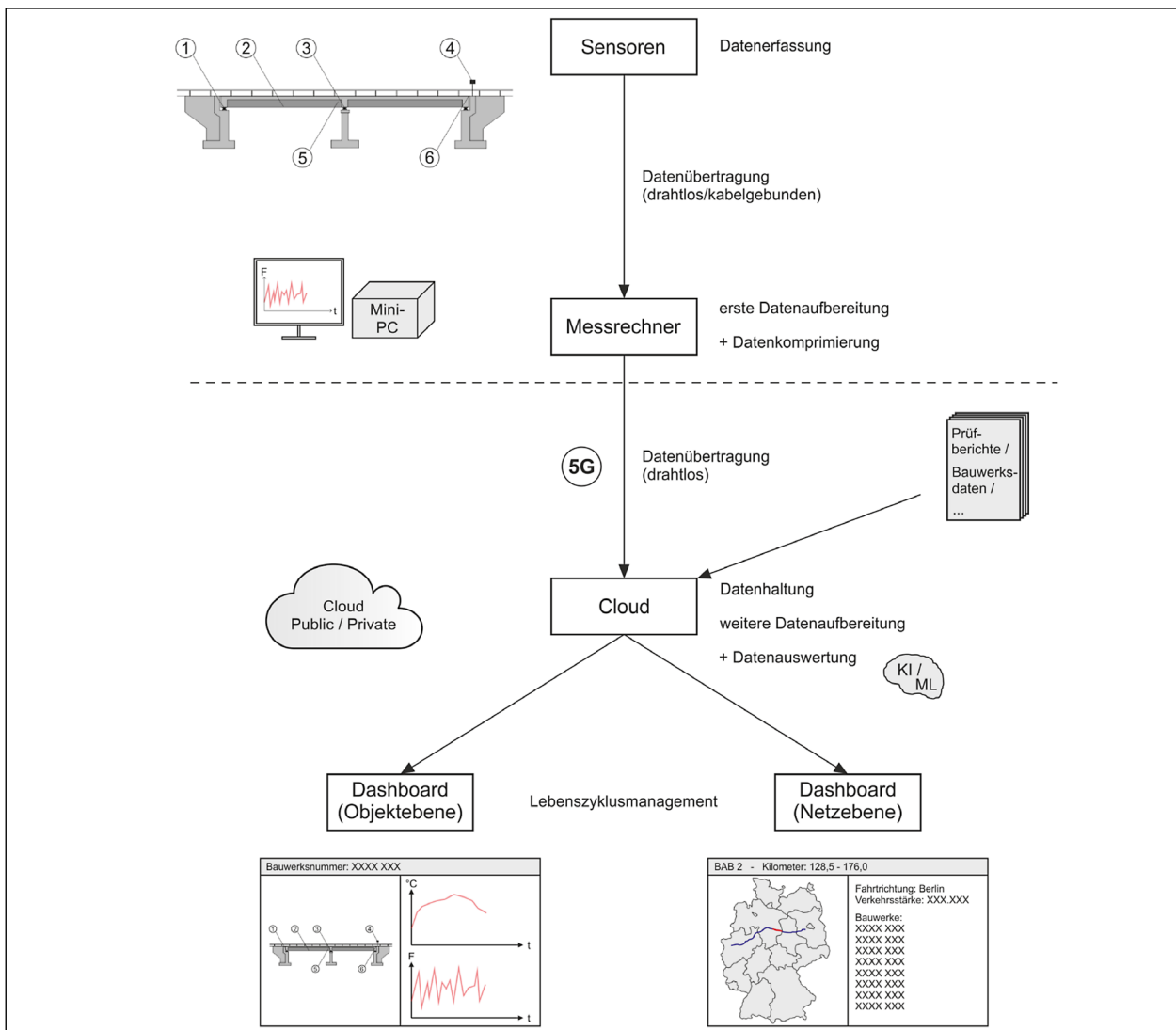


Bild 6-2 Qualitativer Ablauf des Datenmanagements der Intelligenten Brücke

werk erfolgen, und Prozesse, die bei der weiteren Verarbeitung der Daten in der Cloud stattfinden.

Die Datenerfassung erfolgt über Sensoren, die durch das Monitoringkonzept definiert sind und in Abhängigkeit der vorliegenden Lebenszyklusphase am Bauwerk angebracht sind. Im Anschluss werden die erfassten Daten drahtlos oder kabelgebunden zum Messrechner übertragen, auf dem eine erste Datenaufbereitung durchgeführt wird. Zudem erfolgt auf dem Messrechner eine Komprimierung der Daten, um die Datenmenge zu reduzieren, die vom Messrechner in die Cloud übertragen werden muss.

Die Datenübertragung in die Public bzw. Private Cloud erfolgt über den 5G Mobilfunkstandard, wobei an dieser Stelle auch weitere Daten (Daten aus Bauwerksprüfungen etc.) in die Datenbanken aufgenommen werden müssen. Im Anschluss kann dann eine weitere Datenaufbereitung sowie Auswertung der Daten erfolgen. Auch hierbei ist eine Unterstützung durch Machine Learning oder Künstliche Intelligenz möglich, eine detailliertere Beschreibung dazu übersteigt jedoch den Rahmen dieses Projektes. Abschließend wird beim Lebenszyklusmanagement und der zugehörigen Darstellung im Dashboard in die Betrachtung auf Objektebene und die Betrachtung auf Netzebene unterschieden.

7 Organisatorisches Umsetzungskonzept zur digitalen Infrastruktur

Ein geeignetes Konzept für die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke führt nicht automatisch zur gewünschten Wirkung. Das im Konzept beschriebene Vorgehen bewirkt einen Veränderungsprozess, der für eine erfolgreiche Implementierung sinnvoll gestaltet werden muss.

Die größten Hürden eines Veränderungsprozesses sind meist bestehende Widerstände, die individuelle, organisationsbezogene oder externe Gründe haben können. Individuelle Ursachen für Widerstand gründen meist auf Bedenken vor Neuem und Unbekanntem oder auch in der Gewöhnung an bekannte Arbeitsweisen und Problemlösungswege. Diese Ursachen können ebenfalls mit einer verzerrten Wahrnehmung einhergehen oder mit der Unterschätzung der Notwendigkeit einer Veränderung bzw. der Überschätzung der negativen Konsequenzen dar-

aus. Grundsätzlich steht hier meist die Veränderung im Gegensatz zu den persönlichen Zielen. Zu den organisationsbezogenen Ursachen des Widerstands zählen die Systemträgheit einer Organisation, die bestehenden gut etablierten Strukturen und Prozesse sowie eine vorherrschende Organisationskultur, die nur schwer verändert werden können. Darüber hinaus können auch externe Ursachen auftreten, wie etwa der Einfluss der Gesetzgebung oder Regierung sowie das technologische oder gesellschaftliche Umfeld, in dem der Veränderungsprozess stattfindet [50].

Nachfolgend werden diese drei Aspekte in den verschiedenen Ebenen des Umsetzungskonzepts berücksichtigt, um die erfolgreiche Implementierung der digitalen Infrastruktur der Intelligenten Brücke zu gewährleisten.

7.1 Prozesse im Betrieb

Die aktuellen Prozesse im Betrieb sowie die zukünftigen Prozesse mit Einführung der Intelligenten Brücke wurden bereits in Kapitel 3.1 skizziert. Im Rahmen der Interviews wurden die Prozesse validiert und angepasst.

In der Regel sind drei Hauptakteure an der Überwachung und Bewertung Intelligenter Brücken beteiligt. Dazu gehören der Betreiber, der Fachplaner Monitoring und der Bauwerksprüfer. Zudem kann ein Spezialdienstleister Monitoring, der über ein vertieftes Fachwissen auf dem Gebiet der Messtechnik sowie dem Aufbau und Betrieb von Messanlagen verfügt, an der Überwachung beteiligt sein [4].

Die Akteure nehmen die in Kapitel 3.1 dargestellten Aufgaben wahr. Werden die im Vorfeld festgelegten Warn- oder Alarmwerte überschritten, erfolgt eine automatische Benachrichtigung der zuständigen Personen durch das System, die daraufhin die Benachrichtigung überprüfen und ggf. weitere Schritte einleiten. Ein möglicher Ablauf ist in Bild 7-1 für die Überschreitung eines Warnwerts und in Bild 7-2 für die Überschreitung eines Alarmwerts dargestellt.

Bei der Überschreitung eines Warnwerts erfolgt eine Benachrichtigung der zuständigen Personen per E-Mail, sodass diese eine Überprüfung der aufgetretenen Warnung durchführen können. Stellt sich die Benachrichtigung dabei als Fehlmeldung heraus, kann eine entsprechende Rückmeldung an

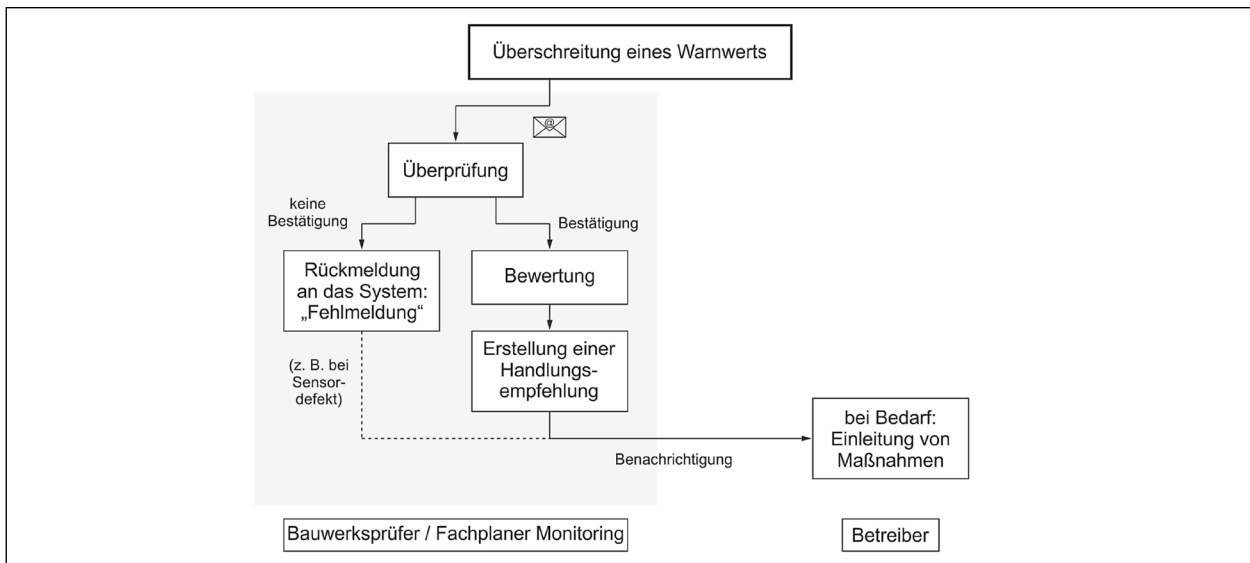


Bild 7-1 Möglicher Ablauf bei Überschreitung eines Warnwerts

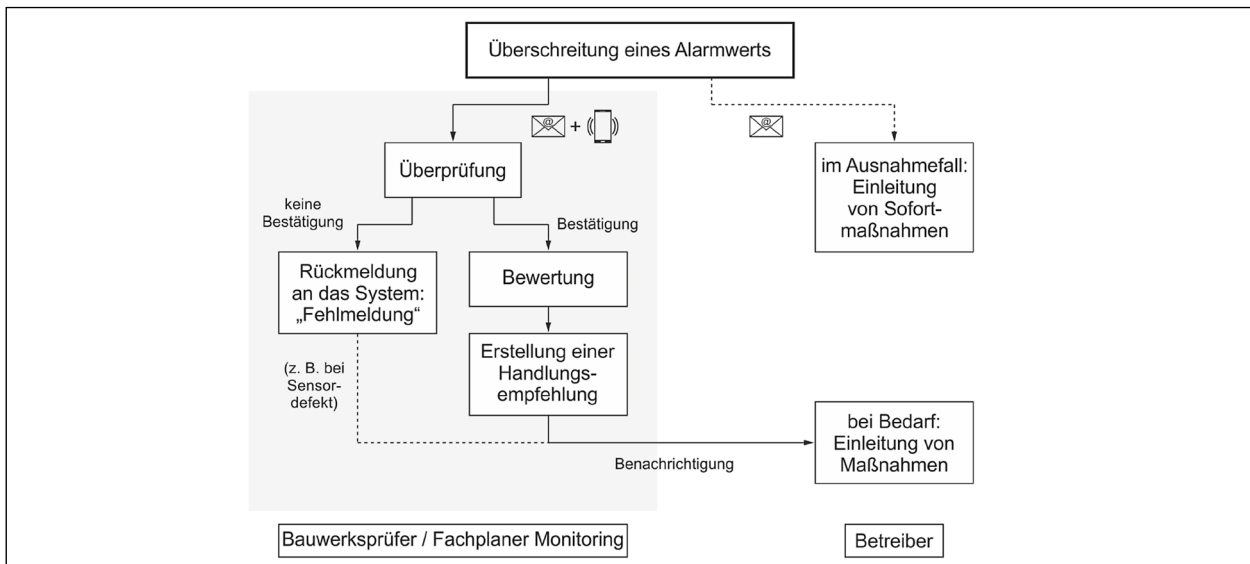


Bild 7-2 Möglicher Ablauf bei Überschreitung eines Alarmwerts

das System erfolgen. Für den Fall, dass die Überschreitung des Warnwerts z. B. auf einen Defekt des Sensors zurückgeführt werden kann, erfolgt zusätzlich eine Benachrichtigung des Betreibers, damit dieser den Sensor zeitnah austauschen kann. Bestätigt sich bei der Überprüfung hingegen die Überschreitung des Warnwerts, muss eine Bewertung des Ausmaßes erfolgen und eine Handlungsempfehlung erstellt werden, die an den Betreiber der Brücke weitergeleitet wird. Dieser kann daraufhin, wenn entsprechender Bedarf besteht, weitere Maßnahmen einleiten.

Der Ablauf bei Überschreitung eines Alarmwerts ist grundsätzlich vergleichbar zum Ablauf bei Überschreitung eines Warnwerts. Da jedoch die Überschreitung eines Alarmwerts schwerwiegendere Folgen haben kann als die Überschreitung eines

Warnwerts, erfolgt zusätzlich zur Benachrichtigung per E-Mail eine Benachrichtigung auf das Mobiltelefon der zuständigen Personen. Des Weiteren erfolgt eine direkte Benachrichtigung des Betreibers per EMail, sodass dieser im Ausnahmefall ohne zeitliche Verzögerung Sofortmaßnahmen einleiten kann. Damit das Vorgehen möglichst effizient ist, muss die Personalverfügbarkeit im Alarmfall gesichert sein bzw. eine Rufbereitschaftsplanung erfolgen.

In den Prozessübersichten in Bild 7-1 und Bild 7-2 kann zusätzlich zur Ebene des Lebenszyklusmanagements auf Objektebene die Netzebene aufgenommen werden bzw. diese lassen sich in dieser Hinsicht erweitern.

Für die Einführung der neuen Prozesse sollte ein Konzept für das Veränderungsmanagement, ein so-

genanntes Change-Management-Konzept, erstellt werden. Darin gilt es, die Lücken zwischen aktueller Praxis und den neuen Prozessen zu erkennen [50]. Hierfür sollten u. a. folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Welche Stakeholder sind einzubeziehen und in welche Zielgruppen lassen sie sich strukturieren?
- Was ist die konkrete Ausgangssituation für die Veränderung?
- Welche Rolle nimmt der jeweilige Stakeholder ein?
- Wie muss die organisatorische Veränderung erfolgen?
- Wie und an wen kann Wissen effizient transportiert werden?
- Wie kann eine effiziente Kommunikations- und Informationsstruktur gewährleistet werden?

Diese Aspekte sollten in einem ersten Schritt für die Implementierung des Datenmanagements der Intelligenten Brücke in einem Change-Management-Konzept, bestehend aus zielgruppenspezifischen Maßnahmen, Kommunikationsplan und Change-Management-Plan, eingebracht und dann entsprechend umgesetzt werden [50].

In einem Veränderungsprozess ist Kommunikation ein wesentlicher Erfolgsfaktor, um im Austausch mit allen Beteiligten und Betroffenen zu bleiben. Damit können Widerstände erkannt und eine Veränderungsbereitschaft hergestellt werden [50]. Daher sollte ein Kommunikationskonzept erstellt werden, in dem die vorgesehenen Maßnahmen mit den entsprechenden Verantwortlichkeiten und Terminen versehen werden. Mögliche Maßnahmen [50] können sein:

- Projektvorstellung auf der Informationsplattform der betroffenen Verwaltungen sowie bei der BAST (alternativ auf Intranetseite, Website etc.)
- Regelmäßige Status- und Ergebnismitteilungen
- Information über verschiedene Besprechungsrunden: Bereichsmeetings, Mitbestimmungsgremien, fachliche Arbeitskreise sowie regelmäßige Telefon-/Videokonferenzen mit den Multiplikatoren (vgl. hierzu Kapitel 7.2)
- Zugänglichkeit der Unterlagen zu angebotenen Qualifizierungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 7.3)

7.2 Organisation

Ein Veränderungsprozess kann nur unter Mitarbeit aller Beteiligten erfolgreich sein, insbesondere derer, die die neuen Prozesse aktiv anwenden müssen. Des Weiteren muss es treibende Kräfte geben, die die Veränderung vorantreiben und mit Engagement, hoher Expertise und Zielgruppen-Akzeptanz den aktiven Beteiligten zur Seite stehen [50].

Um die erfolgreiche Umsetzung zu unterstützen, sollten Rollen definiert werden, die explizit in der Implementierungsphase von Mitarbeitern wahrgenommen werden. Mitarbeiter aus einer höheren Managementebene sollten dabei die Rolle von Promotoren übernehmen. Diese Promotoren fördern beratend und begleitend die Implementierung, besitzen hohes Engagement, haben umfangreiche Kenntnisse zur intelligenten digitalen Infrastruktur und sind unter den betroffenen Mitarbeitern bekannt. Aus den unterschiedlichen betroffenen Bereichen sollten darüber hinaus noch Multiplikatoren gewonnen werden. Sie dienen als Mittelsleute zwischen dem Veränderungsprojekt der intelligenten digitalen Infrastruktur und den relevanten Abteilungen und sollen ihre Erfahrung einbringen sowie Rückmeldung geben. Ebenso sollten die Multiplikatoren für Motivation in ihrer Abteilung sorgen und den Wissenstransfer unterstützen. Darüber hinaus sollte die Etablierung eines Implementierungsboards evaluiert werden, das sich aus Repräsentanten der verschiedenen Hierarchieebenen, betroffenen Abteilungen und anderen relevanten Organisationseinheiten zusammensetzen kann und die Umsetzung verantwortet [50].

Für die Umsetzung eines IT-Projekts ist im Allgemeinen, wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschrieben, eine geeignete Aufbauorganisation erforderlich. Grundsätzlich werden speziell für die Implementierung eines IT-Projekts verschiedene Rollen unterschieden, wie etwa den Auftraggeber, den Projektleiter, den Projektmitarbeiter, einen IT-Lenkungsausschuss und die Projektberatung [27]. Erfolgt die Realisierung über eine Cloudlösung, ist die Schaffung einer eigenen IT-Organisation für den Aufbau der digitalen Infrastruktur der Intelligenten Brücke nicht notwendig. In dem Fall muss jedoch eine entsprechende Rolle vorgesehen werden, die mit dem Cloudanbieter im Austausch steht und diesen anleitet. Dieser Funktionsträger könnte zudem auch Teil des Implementierungsboards sein. Generell steht dieser aber unabhängig von der Zugehörigkeit in engem Austausch mit dem Implementierungsboard,

berichtet über den aktuellen Stand und stimmt sich zu konkreten Fragestellungen mit dem Implementierungsboard ab.

Zusätzlich zu den beschriebenen zusätzlichen Rollen für ein IT-Projekt bestehen die im vorherigen Kapitel beschriebenen drei Hauptakteure. In diesen technischen Bereichen bestehen die notwendigen Strukturen bereits. Daher ist ggf. eine Erweiterung der Aufgaben der jeweiligen Akteure erforderlich, jedoch ist keine grundlegende organisatorische Anpassung vorzusehen.

7.3 Personelle Qualifizierung

Um Veränderungen erfolgreich umzusetzen, sollte der Fokus insbesondere auf den Mitarbeitern und den Beteiligten liegen. Die Hauptprobleme können fehlende Information, fehlende Motivation oder fehlende Qualifikation sein. In allen drei Bereichen können laut Literatur Maßnahmen angesetzt werden [50].

Bei den Informationsmaßnahmen geht es darum, dass alle Beteiligten die Notwendigkeit zur Veränderung, die Art der geplanten Veränderungsmaßnahmen und ihre persönliche Betroffenheit kennen und verstehen. Motivation wiederum kann bereits durch die genannte Informationsvermittlung entstehen, weitere Maßnahmen können aber erforderlich sein. Qualifizierungsmaßnahmen können „On the Job“ (Wissen oder Fähigkeiten werden am Arbeitsplatz entwickelt) und „Off the Job“ (losgelöst von der individuellen Arbeitsplatzsituation des Einzelnen) durchgeführt werden [50]. Hierfür sind nachfolgend Maßnahmen beschrieben, die ergriffen werden können, wobei diese auch die Erfolgsfaktoren der Veränderung berücksichtigen sollten. Zu diesen zählen eine angemessene Führung, die Formulierung einer Vision sowie motivierender Ziele, die Kommunikation, die Einbindung der Betroffenen und die Integration zur Überwindung von Unterschieden. Darüber hinaus sollte durch eine gezielte Qualifizierung und geeignetes Projekt- (bzw. Komplexitäts-) -management des Veränderungsprozesses eine Etablierung der Veränderung erreicht werden. Ziel sollte dabei immer der permanente Wandel sein [51].

Unabhängig davon, ob die digitale Infrastruktur über eine Cloudlösung oder ein eigenes Rechenzentrum realisiert wird, erfolgt die eigentliche Umsetzung des Datenmanagements durch externe Dienstleister. Daher muss keine tiefe Qualifizierung der Mit-

arbeiter im Bereich Data Science erfolgen. Es müssen lediglich solche Kenntnisse vorhanden sein, mit denen die geforderten Aufgaben im notwendigen Umfang erfüllt werden können.

Alle Mitarbeiter sollten zur Implementierung der digitalen Infrastruktur der Intelligenten Brücke bzw. zur Intelligenten Brücke an sich informiert werden. Dies sollte insbesondere für die Promotoren und Multiplikatoren mit qualifizierten Informationen zu den Inhalten sowie dem Nutzen und Aufbau des Vorgehensmodells erfolgen. Auch der Auftraggeber des IT-Projekts, also der Betreiber der Brücke, sollte mithilfe einer Informationsveranstaltung informiert werden, um die Einbindung aller Abteilungen des Auftraggebers zu ermöglichen. Die Informationen sollten zudem permanent, z. B. auf einer Informationsplattform, einsehbar sein [50].

Im Rahmen einer ersten Qualifizierungsveranstaltung ergibt sich u. a. folgender Qualifizierungsbedarf:

- Einführung in die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke (für alle Personengruppen gleichermaßen):
 - Aufbau
 - Funktionsweise (Informationsfluss, Zusammenhänge, Schnittstellen, technische Realisierung etc.)
 - Vorteile / Nutzen / ggf. weitere Ausbaustufen
- Spezifische Aspekte je nach Akteur (Betreiber, Fachplaner Monitoring, Bauwerksprüfer) und damit zugeordneten Rechten zu unterschiedlichen Bereichen:
 - Einsehbare Daten und Funktionen
 - Aufgaben / durchzuführende Tasks
 - Verknüpfung zu anderen Akteuren (z. B. Benachrichtigungsketten)
- Ansprechpersonen bei Problemen

Dabei ist neben der reinen Wissensvermittlung auch die gemeinsame, praktische Durchführung gängiger Tasks erforderlich. Im Nachgang sollten weitere Schulungen bei Bedarf erfolgen.

Für diese weitreichenden Schulungen sollten zielgruppenorientierte Qualifizierungsbausteine entwickelt sowie Steckbriefe, Trainerleitfäden und Schulungsunterlagen erstellt werden. Hierzu zählen auch die entsprechende Terminplanung und die ge-

samte Schulungsorganisation. Die Unterlagen zu angebotenen Qualifizierungsmaßnahmen sollten zudem allen Interessierten leicht zugänglich sein [50].

7.4 Hard- und Softwareausstattung

Für die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke ist für alle in Bild 6-2 dargestellten Ebenen eine gewisse Hard- und Softwareausstattung erforderlich.

Am Brückenbauwerk sind für die Datenerfassung, wie in Kapitel 6.1 erläutert, Sensoren analog zum erstellten Monitoringkonzept vorzusehen. Die Sensoren sind kabelgebunden oder drahtlos an den Messrechner angeschlossen, der, wie bereits in Kapitel 6.2 erläutert, einen Mini-PC mit spezialisierter Software darstellt. Als Anforderungen an den Messrechner wurden hier bereits identifiziert:

- geringer Platzverbrauch,
- geeignete Benutzeroberfläche oder die Möglichkeit, diesen mit einem Laptop zu verbinden,
- Ethernet-Steckplätze,
- Slots für SIM-Karten,
- 5G-Fähigkeit sowie
- ausreichender Prozessor und Arbeitsspeicher für die Datenverarbeitung.

Am Brückenbauwerk muss außerdem neben einer Energieversorgung für die Sensoren und den Messrechner auch eine stabile Internetanbindung vorliegen, über die die Daten vom Messrechner über den 5G-Mobilfunkstandard drahtlos in die Cloud übertragen werden können.

Die Datenhaltung erfolgt in einer Private oder Public Cloud. Bei der Umsetzung mittels einer Private Cloud muss ein Rechenzentrum mit der dazugehörigen technischen Ausstattung vorhanden sein.

Für die Datenaufbereitung ist die Anschaffung einer entsprechend benötigten Software auf den Messrechnern zu planen. Zusätzlich sollte nach Möglichkeit bereits eine erste Datenaufbereitung in den Sensoren stattfinden. Für die weitere Datenaufbereitung und die Datenauswertung muss, wenn keine Public Cloud genutzt wird, bei der dies bereits über Services abgedeckt ist, eine geeignete Software für das Rechenzentrum vorgesehen werden.

Um im Rahmen des Lebenszyklusmanagements auf Objekt- und auf Netzebene auf die Ergebnisse der Datenauswertung zugreifen zu können, sind Desktop-Computer bzw. Laptops erforderlich. Um die Vorteile der intelligenten digitalen Infrastruktur, wie in Kapitel 6.5.1 beschrieben, nutzen zu können, sind außerdem mobile Endgeräte erforderlich, mit denen die Bauwerksprüfer am Brückenbauwerk unterstützt werden können. Diese Geräte sollten über einen ausreichend großen Bildschirm verfügen, eine lange Akkulaufzeit aufweisen, robust gegenüber Witterungseinflüssen sein und über GPS sowie eine Kamera verfügen.

7.5 Kostenabschätzung in Anlehnung an WiBe 5.0 des Bundes

Im Umsetzungskonzept zur intelligenten digitalen Infrastruktur wird eine Kostenabschätzung nach WiBe 5.0 des Bundes vorgenommen. Das Forschungsvorhaben betrachtet dabei nicht die Kosten für das eigentliche Monitoring einer Intelligenten Brücke an sich, sondern nur die Kosten der anschließenden Schritte des Datenmanagements.

Bei der Konzeptionierung des Datenmanagements der Intelligenten Brücke wurden die Kostensenkungsstrategien der IT nach BUCHTA et al. [52] berücksichtigt. Dazu werden im Allgemeinen folgende Bereiche betrachtet:

- IT-Anwendungen
- IT-Infrastruktur
- Beschaffung von IT
- Interner IT-Dienstleister
- Fremdvergabe von IT-Leistungen

Um die Kosten der IT-Anwendungen zu senken, gibt es zwei wesentliche Kostentreiber: die Harmonisierung von Prozessen sowie die Vereinheitlichung und Bereinigung von IT-Anwendungen. Um eine Kosteneinsparung im Bereich der IT-Infrastruktur zu erzielen, wird eine Standardisierung der IT-Infrastruktur, die Zentralisierung von IT-Infrastruktur und die Konsolidierung von Rechenzentren vorgeschlagen [52]. Zu guter Letzt kann auch die strategische Gestaltung der Beschaffung von IT einen wichtigen Beitrag zur Kostensenkung bieten. Dabei sollte die Fertigungstiefe der IT überprüft und eine Bündelung von IT-Leistungen vorgesehen werden [52]. Neben der Optimierung der IT wird auch ein

interner IT-Dienstleister als kosteneffiziente Maßnahme angesehen. Dazu zählen die strategische Aufstellung und Ausgründung des IT-Dienstleisters, „Strategische Spielregeln für die Zusammenarbeit“ festzulegen und „Ausbauen, Insourcen oder Desinvestieren des IT-Dienstleisters“ [52]. Des Weiteren können Kostenvorteile durch eine Fremdvergabe erreicht werden. So können mittels IT-Outsourcing die Fertigungstiefe im Unternehmen reduziert oder mit IT-Offshoring Faktorkostenvorteile genutzt werden [52].

Da sich diese Strategien auf bereits bestehende IT-Strukturen beziehen, die im Rahmen einer Umstellung angepasst werden, können nicht alle Strategien auch auf das neu zu implementierende Datenmanagementsystem der Intelligenten Brücke angewendet werden. Bestimmte Prinzipien können jedoch im Rahmen der Konzeptionierung berücksichtigt werden. Dazu zählen die Harmonisierung der Prozesse, einheitliche IT-Anwendungen und standardisierte sowie zentralisierte IT-Infrastrukturen und die Überprüfung der Auslagerung von IT-Leistungen. Alle diese drei Strategien wurden bei der Konzeptionierung berücksichtigt.

Aufgrund vielfältiger Unklarheiten zur tatsächlichen Umsetzung der digitalen Infrastruktur in Bezug auf die organisatorische Angliederung, den zeitlichen Horizont, die Gegebenheiten der auszustattenden Brücken, der bestehenden Strom- und Internetanbindungen vor Ort oder der vorhandenen technischen Ausstattung, kann keine abschließende Kostenabschätzung durchgeführt werden. Es kann daher auf Basis von diversen Annahmen nur eine erste überschlägige Einschätzung der Kosten vorgenommen werden. Da diese Kosten zudem starken Schwankungen unterliegen können und von individuellen Rahmenbedingungen und Vereinbarungen, z. B. mit dem Cloudanbieter, abhängig sind, ist im weiteren Verlauf der Implementierung eine auf die konkreten Rahmenbedingungen abgestimmte Kostenermittlung durchzuführen.

Folgende Annahmen werden dazu getroffen:

- Bei einer vollumfänglichen Implementierung der Intelligenten Brücke sollten Brücken jedes Brückentyps sowie Brücken aller Zustandsnoten zu Intelligenten Brücken ausgestattet werden, damit der vorliegende Datenbestand repräsentativ ist. (An dieser Stelle wird jedoch für eine grobe Kostenschätzung lediglich eine Beispielbrücke betrachtet.)

- Es wird von einer exemplarischen Sensorausstattung der Beispielbrücke mit unterschiedlichen Messfrequenzen ausgegangen, die nachfolgend erläutert wird.
- Die Datenhaltung erfolgt in einer Public Cloud und die Daten werden drahtlos über den 5G Mobilfunkstandard übertragen.

Nach der in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Einteilung entstehender Kosten bei der Implementierung einer IT-Maßnahme nach WiBe 5.0 des Bundes sind zunächst die Entwicklungskosten zu betrachten. Hier müssen zum einen Planungskosten berücksichtigt werden. Diese hängen beim vorliegenden Konzept von der Anzahl und den Stundensätzen der beteiligten Mitarbeiter ab. Je nach Kenntnisstand der eigenen Mitarbeiter ist auch mit einer externen Beratung zu kalkulieren. Für die Initialisierung sind die exakten Anforderungen für den Aufbau des Datenmanagements und das Customizing der Aufbereitmeechanismen und des Dashboards festzulegen. Hierbei sind ggf. Workshops zur Findung der Anforderungen zu planen, die zusammen mit dem bezuschlagten Anbieter stattfinden sollen. Hierdurch entstehen Kosten für die Durchführung der Workshops seitens des Anbieters sowie Personalkosten auf Seiten des Auftraggebers.

Des Weiteren müssen bei den Planungskosten die Entwicklungs- und Investitionskosten berücksichtigt werden. Diese werden beim Einsatz einer Public Cloud über die Vergütung des Anbieters/Dienstleisters abgegolten. Für diesen entstehen dabei Kosten für die Installation sowie die Anpassung (Customizing), bei der Einrichtung der Schnittstellen, für die individuelle Programmierung und die Integration der Cloudlösung sowie des initialen Setups. Eine Kostenabschätzung ist hier nicht möglich, da erst mit dem Customizing die exakten Anforderungen festgelegt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die genannten Bereiche vergleichsweise hohe Kosten verursachen werden.

Zum anderen zählen die Kosten der Systemeinführung zu den Planungskosten. Vorhandene Datenbestände sind in der Form nicht vorhanden, da das System neu aufgesetzt wird. Es sind jedoch bestehende Datenbanken über die Schnittstellen einzubinden. Darüber hinaus sind Qualifizierungsveranstaltungen der verschiedenen Nutzergruppen erforderlich (siehe Kapitel 7.3). Hier variieren die entstehenden Kosten je nach Nutzergruppe und Schulungsaufwand von wenigen Hundert bis zu mehreren Tausend Euro. Auch hat die Anzahl der zu schu-

lenden Mitarbeiter Auswirkungen auf die Schulungskosten. Im Anschluss an die erste Qualifizierungsveranstaltung ist mit einer Einarbeitungszeit der Mitarbeiter und daher mit Produktivitätsverlust zu rechnen. Dieser Produktivitätsverlust kann, abhängig von den Stundensätzen der Mitarbeiter, kalkuliert bzw. überschlagen werden.

Die Begleitung der Implementierung durch den Auftraggeber ist durch das Implementierungs-board (vgl. Kapitel 7.2) sicherzustellen. Auch diese Personalkosten müssen in die Kostenbestimmung einfließen. Ebenfalls ist eine entsprechende Dokumentation der Initialisierung und Implementierung zu berücksichtigen, die für die Nachvollziehbarkeit erstellt werden sollte. Diese Dokumentation führt zu Kosten sowohl auf Seiten des Auftraggebers als auch auf Seiten des IT-Dienstleisters.

Die Betriebsphase führt zu laufenden Sach- und Personalkosten (vgl. Kapitel 3.3.3). Viele dieser Kosten entstehen dabei direkt beim Anbieter der Public Cloud und werden durch die an ihn entrichteten Entgelte abgegolten. Aus diesem Grund kann an dieser Stelle keine genaue Trennung zwischen Sach- und Personalkosten auf Seiten der Anbieter erfolgen. Die Kosten der Datenerfassung sind, wie bereits in Kapitel 3.3.3 erläutert, nicht Teil der vorliegenden Betrachtung. Aktuell wird davon ausgegangen, dass die Kosten für die Datenübertragung, die Datenhaltung, die Datenaufbereitung und Datenauswertung und das Lebenszyklusmanagement bzw. das Dashboard im niedrigen fünfstelligen Bereich liegen. Wie bereits beschrieben, sind für eine aussagekräftige Kostenschätzung die Rahmenbedingungen jedoch nicht ausreichend genau definiert. Zudem unterliegen die Preise starken Schwankungen bzw. können sich in individuellen Vereinbarungen mit den Anbietern grundlegend anders darstellen.

Die Kosten der Datenübertragung sind hauptsächlich von der Anzahl der erforderlichen (Rechen-) Operationen abhängig, wenn die Realisierung über eine Public Cloud erfolgt. Für die Beispielrechnung zu den entstehenden Kosten bei der Realisierung der digitalen Infrastruktur über eine Public Cloud müssen daher weitere Annahmen getroffen werden.

Durchschnittlich bewegt sich die Anzahl der Sensoren bei aktuellen Monitoringmaßnahmen an Bundesfernstraßen bei unter 20 Sensoren [42]. Für die Beispielbrücke werden daher exemplarisch zehn Sensoren angenommen. Als Messfrequenzen wer-

den exemplarisch 1000 Hz am Fahrbahnübergang und 60 Hz an den weiteren Sensoren angenommen (vgl. Kapitel 4.3.3). Vereinfacht wird dabei von zwei Sensoren am Fahrbahnübergang und 8 weiteren Sensoren an der Brücke ausgegangen.

Damit ergibt sich für die Anzahl der Messwerte:

$$\begin{aligned} n_s &= 2 \cdot 1.000 \frac{\text{Messwerte}}{\text{s}} + 8 \cdot 60 \frac{\text{Messwerte}}{\text{s}} \\ &= 2.480 \frac{\text{Messwerte}}{\text{s}} \\ n_d &= 2.480 \frac{\text{Messwerte}}{\text{s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \\ &= 214.272.000 \frac{\text{Messwerte}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Die Übertragung der Messwerte in die Public Cloud erfolgt in Echtzeit, wobei die Übertragung jedes einzelnen Messwerts als eine (Rechen-) Operation gezählt wird. Ausgehend von einem beispielhaften Kostensatz von ca. 2150 €/Monat bei maximal 300.000.000 Operationen/Tag (Region: Nordeuropa) [53] folgt für die Kosten pro Jahr:

$$2150 \frac{\text{€}}{\text{Monat}} \cdot 12 \frac{\text{Monate}}{\text{a}} = 25.800 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

Diese Kosten erfassen dabei nur die Kosten für die Datenübertragung, sodass noch weitere Kosten hinzukommen. Für die Kosten der Datenhaltung wiederum können nur grobe Richtwerte anhand von Annahmen aus der Literatur bestimmt werden. Dazu wird von einer Datenrate von 0,01 kB/Messwert ausgegangen [54]. Für die Beispielbrücke ergibt sich damit eine Datenmenge von:

$$\begin{aligned} \text{Datenmenge}_s &= 2.480 \frac{\text{Messwerte}}{\text{s}} \\ &\cdot 0,01 \frac{\text{kB}}{\text{Messwert}} = 24,8 \frac{\text{kB}}{\text{s}} \\ \text{Datenmenge}_d &= 24,8 \frac{\text{kB}}{\text{s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \\ &\cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \approx 2,143 \frac{\text{GB}}{\text{d}} \\ \text{Datenmenge}_a &= 2,143 \frac{\text{GB}}{\text{d}} \cdot 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \approx 782,2 \frac{\text{GB}}{\text{a}} \end{aligned}$$

Für die Datenhaltung ergeben sich mit diesen Annahmen Kosten von weniger als Tausend Euro im Monat [55]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Beispiel bei einer Vereinbarung nach dem Pay-as-you-go-Modell lediglich die tatsächlich ge-

nutzten Speicherkapazitäten bezahlt werden müssen. Die Datenmenge steigt jedoch mit der Implementierung der Intelligenten Brücke über die Zeit an. Dementsprechend werden für die Datenhaltung zu Beginn geringere Kosten anfallen, die dann mit der Zeit sukzessive ansteigen. In Abhängigkeit der Festlegungen zur Datenlöschung kann sich die Datenmenge allerdings zeitweise auch wieder reduzieren. Zudem wird unterschieden, ob auf die Daten aktiv zugegriffen wird oder ob diese im Archiv abgelegt werden können, was auch zu einer Reduzierung der Kosten führen würde.

Die Kosten der Datenaufbereitung und Datenauswertung sowie die Kosten für das Lebenszyklusmanagement können im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht bestimmt werden, da zum einen die Anforderungen nicht konkret genug formuliert sind und zum anderen die Preisspanne zwischen den Anbietern sehr groß ist bzw. die Preise teilweise auch mit den Anbietern verhandelt werden müssen.

Bei Nutzung einer Public Cloud sind weitere Services des Cloudanbieters in Betracht zu ziehen, die für eine vollumfängliche Nutzung der Cloud unumgänglich sind. Zu diesen Services zählen z. B. die Infrastruktur, wie Server und Storage, das Netzwerk und die Kommunikation zwischen den Sensoren, der Datenbank und dem Dashboard, unterschiedliche Analytik- und Machine Learning-Services sowie Event-Driven-Funktionalitäten, wie Benachrichtigungen jeglicher Art. Im Gegensatz zur Datenhaltung, die beim Pay-as-you-go-Modell nutzungsabhängig vergütet wird, sind die Dienste aus den Bereichen Datenaufbereitung, Datenauswertung und Lebenszyklusmanagement größtenteils nutzungsunabhängige Kosten, die nach einem Festpreis vergütet werden.

Darüber hinaus ist, wie in Kapitel 7.4 dargestellt, weitere Hardware erforderlich. Diese Kosten können auch zu den laufenden Sachkosten gezählt werden. Die Anzahl und Ausstattung der beschriebenen Endgeräte ist von den Anforderungen des Auftraggebers abhängig. Die größten Anschaffungskosten werden Desktop-Computer bzw. Laptops verursachen (voraussichtlich niedriger vierstelliger Bereich). Die beschriebenen mobilen Endgeräte (Mobiltelefone oder Tablet-Computer) haben hingegen eine große Preisspanne von wenigen Hundert bis Tausenden Euros. Im Bereich der Betriebskosten fallen auf Seiten des Auftraggebers da-

rüber hinaus Personalkosten aus der Systembenutzung an.

Laufende Schulungen der verschiedenen Nutzergruppen, z. B. für neue Mitarbeiter oder bei Änderungen im System bzw. zur Auffrischung, sind ebenfalls erforderlich und zählen zu den laufenden Personalkosten. Diese sind wiederum abhängig vom Umfang der Schulungsinhalte und der Anzahl der Schulungsteilnehmer und erzeugen Kosten durch die Durchführung der Qualifizierungsveranstaltungen an sich und durch die anfallenden Personalkosten der Mitarbeiter.

Insgesamt ist eine Abschätzung der Kosten aufgrund vieler Unsicherheiten nicht qualifiziert möglich. Daher kann dieses Kapitel nur erste Ansätze für eine folgende, genauere Kostenbestimmung bieten, die sich auf konkrete Rahmenbedingungen, fachliche Anforderungen und technische Architekturen stützt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Intelligente Brücke eröffnet durch die Verwendung von Sensoren und die kontinuierliche Überwachung der Brückenbauwerke neue Möglichkeiten für die Zustandsbewertung sowie das Erhaltungsmanagement der Brücken an Bundesfernstraßen, aber perspektivisch auch anderen Bauwerken im Rahmen der Verkehrsinfrastruktur. Um diese Potenziale umfassend nutzen zu können, ist ein adäquates Datenmanagement notwendig. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke“ wurde ein Konzept für die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke entwickelt und im vorliegenden Schlussbericht beschrieben.

Zunächst wurden in Kapitel 2 wesentliche Begriffsdefinitionen für das Forschungsvorhaben festgelegt und damit der Rahmen für die weitere Bearbeitung abgesteckt. Im Anschluss wurde der Status quo analysiert und in Kapitel 3 festgehalten. Dabei wurde einerseits der Ablauf der Überwachung und Bewertung für eine Bestandsbrücke betrachtet, bei der nach Feststellung eines Schadens bei einer Bauwerksprüfung oder Defizits in der Nachrechnung ein ergänzendes Monitoring angeordnet wird, sowie das mögliche zukünftige Vorgehen bei Intelligenten Brücken beleuchtet. Andererseits wurden die rele-

vanten beteiligten Akteure – Betreiber, Fachplaner Monitoring und Bauwerksprüfer – identifiziert und ihre grundlegenden Anforderungen an die zu erfassenden Daten festgestellt.

Um die Anforderungen der beteiligten Akteure an die digitale Infrastruktur der intelligenten Brücke weiter zu spezifizieren, wurden zwölf Interviews mit zentralen Akteuren aus den drei identifizierten Bereichen (Betreiber, Fachplaner und Bauwerksprüfer) geführt. Die Interviewpartner wurden dazu hinsichtlich möglicher Prozesse zur Datenerfassung, Datenübertragung, Datenverarbeitung und Datennutzung bis hin zu möglichen Visualisierungen befragt. Das Vorgehen sowie die Ergebnisse der Interviews sind in Kapitel 4 festgehalten. Im Anschluss wurden die Interviews hinsichtlich der Cluster Monitoring allgemein, Installation von Sensoren, Datenerfassung, Datenübertragung, Datenhaltung, Datenaufbereitung und Lebenszyklusmanagement ausgewertet, um einen Überblick über die Sicht der Interviewpartner zu einem zukünftigen Datenmanagementprozess im Rahmen der Intelligenten Brücke zu erhalten.

Auf Basis der Ergebnisse aus den Interviews, den Informationen aus der Erhebung zum Status quo sowie den Erfahrungswerten der Projektbeteiligten konnten im Anschluss die Anforderungen an die digitale Infrastruktur der Intelligenten Brücke eingegrenzt und zusammengestellt werden. Das Anforderungsportfolio ist in Kapitel 5 dargestellt, wobei wieder die unterschiedlichen Ebenen des Datenmanagements (Datenerfassung, Datenübertragung, Datenhaltung, Datenaufbereitung, Datenauswertung und Lebenszyklusmanagement) als Struktur zugrunde gelegt wurden. Die formulierten (Mindest-) Anforderungen bilden damit die Grundlage für das Konzept zur digitalen Infrastruktur, das in Kapitel 6 dargestellt ist und in dem für die betrachteten Ebenen des Datenmanagements die grundlegenden Aspekte beschrieben werden.

Der Bereich der Datenerfassung (Kapitel 6.1) umfasst die Erhebung, die Erschließung, die Digitalisierung sowie die Umformatierung unterschiedlichster Daten sowie Datenformate. Dabei wurden die Zielstellung, zu berücksichtigende Datencluster, die Sensorausstattung und Messintervalle sowie Bauwerke thematisiert. Die Datenerfassung hat zum Ziel, alle zur Verfügung stehenden Daten für das frühzeitige Erkennen von Veränderungen sowie für Prognosen zum Bauwerksverhalten nutzbar zu machen und die Basis für eine prädiktive Erhal-

tungsstrategie zu legen. Wichtige Punkte sind hierbei auch die Einbindung von vorhandenen (historischen) Daten und die Anpassbarkeit des Monitoringkonzepts über die lange Lebensdauer einer Brücke.

Die Datenübertragung (Kapitel 6.2) wird definiert als die Übermittlung der erfassten Messwerte vom Sensor zur verarbeitenden Einheit sowie von der verarbeitenden Einheit zum Datenspeicher. Die Übertragung kann dabei grundsätzlich über eine drahtlose oder drahtgebundene Verbindung erfolgen. Für die Übertragung der Daten vom Sensor zum Messrechner an der Brücke wird eine überwiegend drahtlose Übertragung vorgesehen. Der Messrechner am Bauwerk besteht aus einem Mini-PC mit spezieller Software und dient als Datenübergabepunkt. Zudem sollte auf dem Messrechner bereits eine intelligente Vorfilterung der Rohdaten erfolgen, um die zu übertragende Datenmenge zu reduzieren. Im Anschluss erfolgt die Übertragung der Daten vom Messrechner zum Datenspeicher drahtlos über Mobilfunk im 5G-Mobilfunkstandard. Ein wichtiger Aspekt dabei ist, dass die Sicherheit der Daten gewährleistet ist, wofür die Schutzziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit der Daten eingehalten werden müssen. Darüber hinaus thematisiert das vorliegende Konzept ein Ausfall- oder Recovery-Konzept, wobei als mögliche Strategien für die intelligente digitale Infrastruktur die Nutzung von Redundanzen, die regelmäßige Erstellung von Backups auf geeigneten Systemen sowie die asynchrone Datenübertragung identifiziert wurden. Abschließend wurde die Kennzeichnung der Messpunkte sowie die eindeutige Benennung der Sensoren beleuchtet.

Die Datenhaltung (Kapitel 6.3) umfasst die Speicherung der gewonnenen Daten in strukturierter Form in einer Datenbank sowie die mit der Datenspeicherung in direktem Zusammenhang stehenden Prozesse. Im Konzept wird hierfür eine cloudbasierte Lösung vorgesehen, wobei sowohl eine Public Cloud (Nutzung einer vorhandenen Plattform eines marktüblichen Anbieters) als auch eine Private Cloud (Datenspeicher im unternehmenseigenen Intranet bzw. Rechenzentrum) möglich sind. Bei der Speicherung der Daten müssen spezifische Datenmodelle sowie eine offene Datenarchitektur zur Sicherstellung einer Wiederverwendbarkeit der Daten berücksichtigt werden. Für den Zugriff auf die Daten sowie die weitere Verwendung und Verarbeitung der Daten müssen zudem für die Nutzer, abhängig von ihrer Aufgabe, Zugriffsrechte erteilt werden.

Auch die Festlegung, wer der Eigentümer der Daten ist und wer welche Rechte an den Daten hat, ist zu definieren und muss in entsprechenden Regelungen, z. B. mit externen Dienstleistern, beachtet werden. Zuletzt müssen Regelungen zur Datenlöschung getroffen werden, was in Form eines im Vorfeld erstellten Datenlöschkonzepts erfolgen sollte.

Die Ebene der Datenaufbereitung und Datenauswertung (Kapitel 6.4) behandelt die Weiterverarbeitung sowie die Erhöhung der Qualität der erfassten Daten und sollte grundsätzlich automatisch erfolgen. Die erste Datenaufbereitung erfolgt auf Basis der Rohdaten und ermöglicht die grafische Darstellung und Bewertung einzelner Werte. In weiteren Aufbereitungsschritten werden die Informationen für die verschiedenen Nutzergruppen verarbeitet. Zusätzlich zur Aufbereitung der Messdaten muss an dieser Stelle auch eine Verknüpfung mit Daten aus anderen Quellen erfolgen. Zudem ist für die Akteure zur Darstellung, Kontrolle und weiteren Verarbeitung der Daten ein Dashboard als grafische Oberfläche vorzusehen.

Abschließend wird im Konzept zum Datenmanagement der Intelligenten Brücke das Lebenszyklusmanagement (Kapitel 6.5) behandelt. Dabei wird in eine Betrachtung auf Objektebene und in eine Betrachtung auf Netzebene unterschieden. Die Betrachtung auf Objektebene erfolgt auf Grundlage der erfassten sowie der aufbereiteten Daten für jede Brücke individuell und wird im Dashboard auf einer Abstraktionsebene dargestellt. Die Betrachtung auf Netzebene ermöglicht die Berücksichtigung aller Intelligenten Brücken in einem großmaßstäblichen Kontext von einer übergeordneten Perspektive. Auch dies kann im Dashboard in unterschiedlichen Abstraktionsebenen dargestellt und nach gewünschten Kriterien gefiltert werden.

Im letzten Schritt wurden für das entwickelte Konzept zur digitalen Infrastruktur verschiedene Aspekte der Umsetzung beleuchtet. Dazu wird in Kapitel 7 dargestellt, dass nicht nur eine Anpassung der Prozesse im Betrieb erforderlich ist, sondern auch organisatorische Anpassungen vorgenommen werden müssen. Außerdem muss zur erfolgreichen und langfristigen Implementierung der digitalen Infrastruktur bzw. der Intelligenten Brücke ein Programm zur personellen Qualifizierung durchgeführt werden. Zudem muss die notwendige Hard- und Softwareausstattung für das Datenmanagement beschafft werden. Trotz möglicher Einsparungen durch die digitale Infrastruktur bzw. die Intelligente

Brücke, etwa durch Erleichterungen bei der Bauwerksprüfung oder die Vermeidung von Verkehrsbeeinträchtigungen, ist zum Aufbau der digitalen Infrastruktur ein gewisser wirtschaftlicher Rahmen notwendig. Obwohl dieser Rahmen pauschal schwierig zu benennen ist, wurde exemplarisch eine Abschätzung der Kosten durchgeführt. Diese muss, basierend auf den tatsächlichen Rahmenbedingungen der jeweiligen Intelligenten Brücke, individuell angepasst und konkretisiert werden.

Zum Schluss soll ein kurzer Ausblick gegeben werden, welche Möglichkeiten sich durch die Einführung der Intelligenten Brücke ergeben und welche weiteren Ausbaustufen zukünftig denkbar wären.

Grundsätzlich liegen für Intelligente Brücken durch die kontinuierliche Überwachung umfangreiche Informationen zu den tatsächlich aufgetretenen Einwirkungen sowie den tatsächlich vorhandenen Widerständen einer Brücke vor. Infolgedessen kann die Nachrechnung einer Brücke zukünftig auf Grundlage der tatsächlichen Einwirkungen (als Ersatz für die allgemein geltenden Verkehrslastmodelle, wie sie bei der Entwurfs- und Ausführungsplanung der Brücke angenommen wurden) erfolgen. Demzufolge ist es auch möglich, eine kontinuierliche rechnerische Bewertung der Brücke durchzuführen und das Ergebnis in geeigneter Weise im Dashboard darzustellen. Diese Darstellung bietet sich z. B. für die Nachweise der Ermüdungsfestigkeit oder für Lager bzw. Fahrbahnübergänge an, da hier in einfacher Weise ein Abgleich mit der jeweiligen, prognostizierten Schwingungszahl bzw. Lebensdauer möglich ist.

Darüber hinaus ermöglicht das erstellte Konzept zur digitalen Infrastruktur, weitere (zukunftsorientierte) Ausbaustufen zur Unterstützung der Bauwerksprüfungen vorzusehen. Dies ist z. B. der Einsatz von Drohnen, mit denen insbesondere schwer erreichbare Bereiche einer Brücke mit bildgebenden Verfahren begutachtet und bewertet werden können. Ein anderer Schwerpunkt wird im Zusammenhang mit BIM auch der Einsatz bzw. die Unterstützung durch Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR) sein.

Literatur

- [1] SAWO, F.; KEMPKENS, E. (2016): Model-based Approaches for Sensor Data Monitoring for Smart Bridges, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), S. 347-352.
- [2] KRÜGER, M.; GROßE, C. (2010): Einsatz von Sensorik an Brückenbauwerken.
- [3] ULLERICH, C. et al. (2020): smartBridge Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings, Bautechnik, Vol. 97, No. 2, S. 118-125.
- [4] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (2018): DBV-Merkblatt „Brückenmonitoring – Planung, Ausschreibung und Umsetzung“.
- [5] BODENDORF, F. (2006): Daten- und Wissensmanagement. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [6] LEBHARDT, A. et al. (2021): Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 159).
- [7] FAKHOURI, A. (2013): Sachstandbericht „Sensorik für die Dauerüberwachung von Betonbrücken“. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht.
- [8] SCHNELLENBACH-HELD, M. et al. (2014): Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 105).
- [9] HEGGER, J.; MARK, P. M. (2021): Stahlbetonbau-Fokus: Brückenbau – Beispiele zu Entwurf, Bemessung und Konstruktion. Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- [10] SCHNELLENBACH-HELD, M. et al. (2015): Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 110).
- [11] SIEGERT, C. et al. (2015): Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 118).
- [12] MEHLHORN, G.; CURBACH, M. (2014): Handbuch Brücken – Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, 3. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [13] FREUNDT, U. et al. (2020): Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten. Vorabveröffentlichung.
- [14] BUTZ, C. (2021): Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleittager. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 160).
- [15] RILL, D. (2021): Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken und Ingenieurbau, B 168).
- [16] ESTRIN, D. et al. (2002): File-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts, Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI).

- [17] RÖMER, K.; ELSON, J. (2003): Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 33, No. 1, S. 149-154.
- [18] FREUNDT, U. et al. (2020): Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten.
- [19] VDMA-Einheitsblatt 24774 (2016): IT-Sicherheit in der Gebäudeautomation.
- [20] SAWO, F. et al. (2015): Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brückenbau, B 114).
- [21] FENG, M.; BAHNG, E. (1999): Damage Assessment of Bridges with Jacked RC Column Using Vibration Test, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 3671, No.1, S. 316-327.
- [22] CHOI, M. Y.; KNOW, I. B. (2000): Damage Detection System of a Real Steel Truss Bridge by Neural Networks, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 3988, No.1, S. 295-306.
- [23] MAROTI, M. et al. (2004): The Flooding Time Synchronization Protocol, *Proceedings of the 2nd International conference on Embedded Networked Sensor Systems*.
- [24] BORRMANN, A. et al. (2014): Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 104).
- [25] WORDEN, K. et al. (2007): The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring, *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 463, No. 2082, S. 1639-1664.
- [26] SOHN, H. et al. (2001): Structural Health Monitoring Using Statistical Pattern Recognition Techniques, *ASME Journal of Dynamics, Measurement and Control*, Vol. 123, No. 4, S. 706-711.
- [27] WIECZORREK, H. W.; MERTENS, P. (2011): Management von IT-Projekten – Von der Planung zur Realisierung, 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [28] SCHULZ, M. (2020): Data-Science-Projekte und ihre Besonderheiten, *Wirtschaftsinformatik & Management*, S. 376–381.
- [29] LEIMEISTER, J. M. (2015): Einführung in die Wirtschaftsinformatik, 12. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [30] POSPIECH, M. (2019): Aufgabengerechte Informationsbereitstellung in Zeiten von Big Data – Konsequenzen für ein Informationsmanagement.
- [31] BUXMANN, P.; SCHMIDT, H. (2021): Künstliche Intelligenz – Mit Algorithmen zum wirtschaftlichen Erfolg, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [32] STEMBER, J. et al. (2018): Wirkungen von E-Government – Impulse für eine wirkungsgesteuerte und technikinduzierte Verwaltungsreform. Springer-Verlag, Wiesbaden.
- [33] GADATSCH, A. (2020): IT-Controlling für die öffentliche Verwaltung kompakt – Methoden, Werkzeuge und Beispiele für die Verwaltungspraxis. Springer-Verlag, Wiesbaden.
- [34] HELMKE, S.; UEBEL, M. (2013): Eine Referenzmethode zur IT-Leistungsverrechnung, in: *Managementorientiertes IT-Controlling und IT-Governance*, 2. Auflage. Springer-Verlag, Wiesbaden, S. 83-100.
- [35] MÜNZL, G. et al. (2015): Cloud Computing als neue Herausforderung für Management und IT. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [36] Die Beauftragte der Bundesregierung für Informationstechnik (2014): *WiBe 5.0 – Konzept zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Bundesverwaltung, insbesondere beim Einsatz der IT*.
- [37] SCHUBERT, M. et al. (2020): Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 156).

- [38] HINDERSMANN, I. (2021): Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau, B 163).
- [39] HILDEBRAND, K. et al. (2021): Daten- und Informationsqualität – Die Grundlage der Digitalisierung, 5. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [40] JOHANNING, V. (2019): IT-Strategie – Die IT für die digitale Transformation in der Industrie fit machen, 2. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [41] FRANK, R. et al. (2019): Cloud-Transformation – Wie die Public Cloud Unternehmen verändert. Springer-Verlag, Wiesbaden.
- [42] HINDERSMANN, I. (2021): Anwendung von Monitoring bei Brücken der Bundesfernstraßen und zukünftige Monitoringstrategien, in: Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Heft 1, S. 137-145.
- [43] HUISINGA, H. et al. (2014): Intelligente Bauwerke – Konzepte und Verfügbarmachung intelligenter Energieversorgung am Bauwerk die energieautarke Brücke.
- [44] Drucksache 19/32463 (2021): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Luksic, Frank Sitta, Bernd Reuther, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Zustand der Brücken auf den Autobahnen und Bundesfernstraßen.
- [45] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017): Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 – RI-EBW-PRÜF.
- [46] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2021): SYS.4.4: Allgemeines IoT-Gerät.
- [47] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Masterplan BIM Bundesfernstraßen – Rahmendokument: Datenmanagement – Version 1.0.
- [48] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2020): Architekturrichtlinie für die IT des Bundes – Version 2020 – Version 1.0 vom 31.07.2020.
- [49] <https://www.dev-insider.de/was-ist-ein-datenmodell-a-1067328/> [Abruf: 02.12.2021]
- [50] HISCHE, V. (2012): Wege zum projektorientierten Unternehmen – Wie eine effektive Projektkultur die Zukunft Ihres Unternehmens sichert. Springer-Verlag, Wiesbaden.
- [51] LAUER, T. (2021): Change Management – Fundamentals and Success Factors. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [52] BUCHTA, D. et al. (2009): Strategisches IT-Management – Wert steigern, Leistung steuern, Kosten senken, 3. Auflage. Gabler-Verlag, Wiesbaden.
- [53] <https://azure.microsoft.com/de-de/pricing/details/iot-hub/> [Tag des Abrufs: 01.12.2021]
- [54] KLEINERT, M.; SAWO, F. (2020): Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten – Endbericht.
- [55] <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/calculator/?service=iot-hub> [Tag des Abrufs: 10.12.2021]

Bilder

- Bild 1-1 Konzept der Intelligenten Brücke (Quelle: iBMB)
- Bild 3-1 Typischer Ablauf der Überwachung und Bewertung für eine Bestandsbrücke (Quelle: iBMB)
- Bild 3-2 Möglicher Ablauf der Überwachung und Bewertung bei Intelligenten Brücken (Quelle: iBMB)
- Bild 3--3 Anforderungen der beteiligten Akteure an die erfassten Daten (Quelle: iBMB)
- Bild 3-4 Überblick über Messsysteme zur Dauerüberwachung (nach [2]) (Quelle: iBMB)
- Bild 3-5 Klassifikation von mathematischen Modellen nach dem Gesichtspunkt, welche Informationen über Modellstrukturen und Modellparameter bekannt oder unbekannt sind und

dadurch identifiziert bzw. geschätzt werden müssen [20] (Quelle: [20])

- Bild 3-6 Wesentliche Bausteine eines Überwachungssystems für Brückenbauwerke [8] (Quelle: [8])
- Bild 3-7 Ausschnitt eines Einflussbaums – konzeptionelle Darstellung [24] (Quelle: [24])
- Bild 3-8 Entwicklungskosten nach WiBe 5.0 des Bundes (nach [36]) (Quelle: IIM)
- Bild 3-9 Betriebskosten nach WiBe 5.0 des Bundes (nach [36]) (Quelle: IIM)
- Bild 4-1 Darstellung der Interviewpartner sowie der thematisierten Schwerpunkte (Quelle: iBMB)
- Bild 6-1 Zustandsnoten der Brücken an Bundesfernstraßen (nach [44]) (Quelle: iBMB)
- Bild 6-2 Qualitativer Ablauf des Datenmanagements der Intelligenten Brücke (Quelle: iBMB)
- Bild 7-1 Möglicher Ablauf bei Überschreitung eines Warnwerts (Quelle: iBMB)
- Bild 7-2 Möglicher Ablauf bei Überschreitung eines Alarmwerts (Quelle: iBMB)

Tabellen

- Tab. 3-1 SWOT-Analyse zum Status quo
- Tab. 3-2 SWOT-Analyse zur Intelligenten Brücke
- Tab. 4-1 Übersicht über die Interviewpartner

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2021

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

Butz

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

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

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

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

Müller

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

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

Hindersmann

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

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

Kleinert, Sawo

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

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

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

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

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

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

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

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

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

Rill

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

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

Neumann, Brauer

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

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

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

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

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

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

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

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

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

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

B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

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

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

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

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

Purtak, Möbius

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

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

Staeck

€ 15,00

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

Freundt, Böning, Fischer, Lau

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

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

Windmann

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

B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

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

B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung

Schreck, Decker, Wawrzyniak

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

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan

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

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

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

B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennerberger, Zulauf,

Locher

€ 18,00

B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken

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

B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2023**B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie**

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

B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen

Friedrich € 18,00

B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken

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

B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schuber, Kübler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau

Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe, Weißbrod
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur

Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 193: Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke

Empelmann, Javidmehr, Rathgen, Hellenbrand, Ulbricht, Wagner, Kessel, Sietas
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

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

www.schuenemann-verlag.de

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