
Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 210

Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke

von

Frederik Wedel, Sarah Pitters

MKP GmbH, Weimar

Falk Hille, Ralf Herrmann, Ronald Schneider

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 210

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0707

Leitfaden - Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke

Fachbetreuung:

Iris Hindersmann, Lydia Puttkamer

Referat:

Stahlbau, Brückenausstattung

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen

Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach

Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:

MedienMélange: Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen

Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293 | ISBN 978-3-95606-864-5 | <https://doi.org/10.60850/bericht-b210>

Bergisch Gladbach, Juni 2025

Kurzfassung–Abstract

Leitfaden - Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke

Das Forschungsprojekt zielte darauf ab, den strategischen Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke, insbesondere Brücken, zu verbessern und zu systematisieren. Durch den Einsatz moderner Monitoringtechnologien soll die Effizienz und Effektivität der Erhaltung von Ingenieurbauwerken gesteigert werden. Der Fokus lag auf der Entwicklung eines Leitfadens für Planung, Durchführung, Datenmanagement und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringprojekten, ergänzt durch eine Broschüre mit strategischen Empfehlungen und Checklisten zur Unterstützung bei Ausschreibung, Vergabe und Vertragsgestaltung.

Das Projekt kombinierte Literaturrecherche, Expertenbefragungen, Online-Umfragen und einen Workshop, um bestehende Praktiken und Herausforderungen zu identifizieren und darauf aufbauend Empfehlungen zu entwickeln. Es stützte sich auf drei wesentliche Dokumente: das DBV-Merkblatt "Brückenmonitoring", das Merkblatt B 09 "Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken" der DGZfP und die Neufassung der DIN 1076. Diese Dokumente bieten grundlegende Informationen und Hilfestellungen für die Planung und technische Umsetzung von Monitoringmaßnahmen sowie die Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken.

Das Projekt erörterte außerdem die Potentiale und Grenzen von Monitoring, betonte die Vorteile einer kontinuierlichen Datenerfassung und -auswertung für die präventive Instandhaltung und Lebensdauererlängerung von Bauwerken, und wies auf Herausforderungen hin, insbesondere in Bezug auf Kosten und technischen Aufwand. Elf Monitoring-Anwendungsfälle wurden definiert, um einen besseren Überblick über die Praxis zu bieten. Die Auswahl der Messtechnik und die technischen Komponenten eines Monitoringsystems wurden detailliert beschrieben, ebenso wie die Bedeutung eines sorgfältig erstellten und geprüften Monitoringkonzepts.

Durch eine Online-Umfrage und einen Workshop wurden Einblicke in die Bedürfnisse und Herausforderungen der Stakeholder gewonnen. Es wurde die geringe Akzeptanz von Monitoring bei Baulastträgern durch den Mangel an Erfahrung, offizieller Einführung von Leitdokumenten und Mitwirkung der Länderverwaltungen an ebendiesen erklärt und Lösungen vorgeschlagen.

Der Monitoringprozess wurde als mehrstufig dargestellt, mit besonderem Augenmerk auf den beteiligten Akteuren und deren spezifische Expertise. Empfehlungen zur Ausschreibung, Vergabe und Vertragsgestaltung wurden entwickelt, um Transparenz zu schaffen und die Zusammenarbeit zu optimieren. Zusätzlich wurden Checklisten erstellt, um Straßenbauverwaltungen bei Ausschreibung und Vergabe sowie der Vertragsgestaltung zu unterstützen. Das Thema der Haftung und die Notwendigkeit einer angepassten juristischen Betrachtung wurden hervorgehoben. Hinweise zu Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erlauben es, die Kosten und den Nutzen von Monitoring zu evaluieren.

Das Datenmanagement spielte eine zentrale Rolle für die langfristige Effizienz und Effektivität von Monitoringprojekten. Die Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA) wurde entwickelt, um die Schnittstelle zur Datenübergabe zu definieren und die zentrale Speicherung, leichte Zugänglichkeit und systematische Auswertung von Monitoringdaten zu ermöglichen. Es wurde weiterhin auf die Wichtigkeit der Monitoringdaten und ihre nachhaltige Speicherung innerhalb der Baulastträger hingewiesen.

Die Ergebnisse des Projekts wurden in einem Schlussbericht und einer Broschüre zur Verfügung gestellt, die als Arbeitshilfe zur Durchführung von Monitoringprojekten dient.

Guideline – Strategic application of monitoring for engineering structures

The research project aimed to improve and systematize the strategic use of monitoring for civil engineering structures, especially bridges. The focus was on developing a guideline for the planning, execution, data management, and economics of monitoring projects, supplemented by a brochure with strategic recommendations and checklists to support the tendering and contract design processes. The goal was to enhance the efficiency and effectiveness of the maintenance of civil engineering structures through modern monitoring technologies.

The project combined literature research, expert interviews, online surveys, and a workshop to identify existing practices and challenges and to develop recommendations based on these findings. It relied on three essential documents: the DBV leaflet "Bridge Monitoring," the DGZfP leaflet B 09 "Permanent Monitoring of Civil Engineering Structures," and the revised version of DIN 1076. These documents provide fundamental information and guidance for the planning and technical implementation of monitoring measures as well as the inspection and monitoring of civil engineering structures.

Furthermore, the project discussed the potentials and limits of monitoring, emphasizing the benefits of continuous data collection and analysis for preventive maintenance and the extension of the lifespan of structures. It also highlighted challenges, especially regarding costs and technical effort. Eleven monitoring use cases were defined to provide a better overview of the practice. The selection of measurement technology and the technical components of a monitoring system were described in detail, as well as the importance of a carefully developed and tested monitoring concept. Insights into the needs and challenges of stakeholders were gained through an online survey and a workshop. The low acceptance of monitoring by infrastructure operators was explained by the lack of experience, official introduction of guiding documents, and participation of state administrations in these documents, with solutions proposed. The monitoring process was described as multi-staged, with special attention to the involved actors and their specific expertise. Recommendations for tendering and contract design were developed to create transparency and optimize collaboration. Additionally, checklists were created to assist road construction administrations in tendering and contract design. The issue of liability and the need for a tailored legal consideration were emphasized. Economic feasibility considerations were provided to evaluate the costs and benefits of monitoring. Data management played a central role in the long term efficiency and effectiveness of monitoring projects. The Client Data Requirement (CDR) was developed to define the interface for data transfer and enable central storage, easy accessibility, and systematic evaluation of monitoring data. The importance of monitoring data and its sustainable storage within the infrastructure operators was further emphasized.

The results of the project were provided in a final report and a brochure, serving as a practical guide for conducting monitoring projects.

Summary

Guideline – Strategic application of monitoring for engineering structures

The main goal of the research project was to improve and systematize the strategic use of monitoring for engineering structures, especially bridges. This included the development of a guideline covering the planning, implementation, data management, and economic efficiency of monitoring projects. Furthermore, recommendations for strategic procedures in the management of monitoring measures were summarized in a brochure. In addition, checklists were composed to support the practical work related to tendering, awarding contracts, and contract design. The project aimed to increase the efficiency and effectiveness of the maintenance of engineering structures through the use of modern monitoring technologies.

The project's approach involved a combination of literature research, expert interviews, online surveys, and a workshop. These methods were used to identify existing practices and challenges in the field of monitoring and to develop recommendations for tendering, awarding contracts, and contract design based on these findings.

The project was based on three essential documents. Firstly, the DBV leaflet "Bridge Monitoring" contains fundamental information on the process of monitoring projects and its participants. It views monitoring as a holistic process that includes the systematic observation of structural responses and influences. This process, with regulated steps and defined participants, is based on a fixed monitoring concept and aims to capture the temporal development of meaningful physical quantities. The DBV leaflet, established in 2018, laid the foundation for the use of monitoring in infrastructure construction and is recommended for a deeper engagement with the topic. Secondly, the guideline B 09 "Permanent Monitoring of Engineering Structures" by the DGZfP served as a basis for the project, providing guidance for planning and technical implementation of monitoring measures. This guideline describes the practical planning and realization of monitoring systems on structures and components of civil engineering, including an overview of technical systems and sensors suitable for attachment to or within the structure to monitor selected parameters over the required period. It also includes a collection of numerous current or recently implemented monitoring measures, presenting case studies structured by structure, task, monitoring system, and results. The third essential document was the currently revised version of DIN 1076, which regulates the inspection and monitoring of engineering structures in terms of their stability, traffic safety, and durability, aiming at the detection and assessment of the current condition and for the first time regulating the use of monitoring in engineering structures after the revision. Monitoring is intended to complement regular structural inspections, especially in the event of extraordinary occurrences to ensure the safety of the structure. It differentiates between "monitoring for continuous condition monitoring," which involves the continuous observation of the structure to collect and process necessary data for ongoing condition assessment, and "monitoring for special occasions," which addresses situations requiring immediate intervention, such as after extraordinary natural events or significant changes in condition that could pose a hazard.

Moreover, the potentials and limits of monitoring were discussed, emphasizing the benefits of continuous data collection and evaluation for preventive maintenance and extending the lifespan of structures. In this context, the challenges associated with implementing such systems, particularly regarding costs and technical effort, were also addressed. For a better overview of practice, 11 monitoring use cases that can be covered by monitoring were defined. These include application during load testing, known damages, or known deficiencies from finite element calculations, which currently represent the most common use cases in practice.

Additionally, a compilation of common measuring technology was provided. This includes a variety of sensors and systems selected based on the application case and specific requirements. The importance of a carefully developed and reviewed monitoring concept that considers all relevant aspects from objectives to technical implementation and measurement accuracy requirements was highlighted. The selection of measuring technology is influenced by various criteria, including the type and size of the structure to be monitored, the duration of the monitoring measure, and specific environmental conditions. The technical components of a monitoring system were also detailed, from sensors to data transmission and processing, to the possibilities for data visualization and evaluation.

An online survey and a workshop provided comprehensive insights into the needs and challenges of stakeholders in the field of structural monitoring, ensuring participation from representatives of road construction administrations and highways in the guideline. These activities helped to better understand

the practical requirements for monitoring and data processing and to integrate them into the guideline. A significant outcome of the workshop was the low acceptance of monitoring and guidelines among construction clients due to the lack of official introduction and participation by state administrations. Proposed solutions included the official introduction of the guideline, authority participation in the creation of the guideline and an accompanying brochure, free provision of materials, and public relations work. The need for a dedicated data management system for infrastructure operators to store data long-term was also highlighted.

The monitoring process was described, considering various phases from planning through implementation to data evaluation. Special attention was given to the involved actors. The roles of various actors in the monitoring process were described, including authorities, planners, specialized monitoring providers, and, if applicable, technical inspectors. Each actor brings specific expertise to ensure the integrity and longevity of critical infrastructure structures. The process itself is multi-staged, starting with the definition of the question and feasibility check, followed by the creation of a qualified monitoring concept, the execution planning of the measurement system, installation, operation and data collection, data processing and evaluation, to the assessment of the measurement results. Each phase has specific responsibilities and requires detailed planning and execution to ensure the quality and accuracy of the data and to draw well-founded conclusions about the condition of the bridge.

Recommendations for tendering, awarding, and contract design were developed to ensure clear and efficient execution of monitoring projects. These guidelines aim to create transparency and optimize cooperation among the various parties involved. It is explained that monitoring services can be awarded through different procedures, depending on the complexity and scope of the measure. Special expertise is often required, which occasionally leads to direct awarding. Due to the specialized nature of monitoring and the limited experience in this field, construction clients often face uncertainty regarding optimal tendering and awarding practices. Monitoring is divided into phases to enable a structured approach. The tendering of monitoring concepts and executions is usually separate to consider the specific expertise of the involved parties and ensure better planning and calculation. The award criteria are regulated by the procurement order and specific guidelines. Besides price, the qualification of providers plays a crucial role. Due to the novelty and complexity of monitoring projects, qualification can be even more important than price. The proof of reference projects serves as evidence of professional suitability.

Contracts between clients and service providers include special contract conditions covering dates, deadlines, and liability insurance. Due to the specific risks associated with monitoring projects, such as component failure or incorrect measurements, specific requirements for the reliability of measuring technology and risk management are set. The contracts must contain clear agreements on the handover of data and results and billing.

In addition to the descriptions and explanations in the guideline, checklists were created to support road construction administrations as clients of monitoring services in tendering and awarding as well as contract design. This is particularly important given the currently limited experience with monitoring in administrations combined with the sometimes significant complexity of the task.

The issue of liability is complex and requires a tailored legal consideration. The responsibility for maintenance thus lies with the owners or those entitled to dispose, who must ensure that their structures do not endanger public safety. Responsibility can be transferred to third parties, with contract conditions containing clear regulations on liability and insurance coverage.

Economic considerations were provided to evaluate the costs and benefits of monitoring. The goal was to propose a regulated and as simple as possible procedure for assessing the economic efficiency of monitoring as a guide for road construction administrations. It is outlined how targeted monitoring can influence the lifecycle costs of structures by enabling early maintenance measures that prevent costly repairs or even replacement of structures. The use of modern monitoring technologies can detect changes in condition and potential damages earlier, not only increasing the safety and reliability of structures but also extending their use life. This early detection leads to a more efficient allocation of resources for maintenance and repair, ultimately saving costs. The importance of integrating monitoring systems into the overall concept of lifecycle management of structures and the associated positive economic impact was also highlighted.

Data management, especially the Client Data Requirement (CDR) developed as part of the project, plays a central role in the efficiency and effectiveness of monitoring projects regarding data management. By defining clear data requirements and creating a structured data management system, the collected data can be better utilized and integrated. The current situation in road construction authorities and administrations is characterized by a heterogeneous handling of monitoring data. Often, the measurement data is not available at the administrations, or there is a lack of standardized processes for data management, which affects the efficiency of using and analyzing this data. The data is not available or is in different formats and distributed across various systems, complicating access and use. The project's goal regarding data management was to sharpen awareness of the value of data and the need for it to be saved by road construction authorities. Suggestions for a uniform, efficient data management system that enables central storage, easy accessibility, and systematic evaluation of monitoring data were given. The importance of data is particularly emphasized. Monitoring data is essential for assessing and predicting the condition of engineering structures. Their reliable storage by road construction authorities is indispensable for analyzing long-term trends, initiating immediate measures in case of anomalies, and ensuring historical data integrity for future analyses. The CDR, an innovative tool, was developed to clearly define the interface for data transfer between monitoring service providers and road construction authorities. It specifies which data must be delivered in what format, quality, and timing to ensure compatibility and usability of the data. The validation of the concept is carried out by implementing an example CDR. This serves to test the practicability and efficiency of the tool and make any necessary adjustments. A simple example explains how the data must be received by the road administrations at a minimum. Based on this, an extension of the concept was proposed as a target vision, which includes automated data visualization. This made interpreting the data easier and enabled an intuitive representation of changes in condition and trends. This supports decision-making and contributes to efficiency gains in the monitoring and maintenance of road infrastructures. This extension can be regarded as the target state of data management.

The results of the project are provided in a final report in abbreviated form with basic information on conducting monitoring projects as a work aid in the form of a brochure. This serves as orientation for conducting monitoring projects and can be used by road authorities and administrations as a basis.

Inhalt

1	Einleitung	11
1.1	Grundsätze und Ziele des Monitorings im Erhaltungsmanagement	11
1.2	Problemstellung, Zielsetzung und Adressaten des Leitfadens	11
2	Stand der Wissenschaft und Technik	12
2.1	Richtlinien und Regelwerke	12
2.1.1	DBV-Merkblatt „Brückenmonitoring“	12
2.1.2	DGZfP Merkblatt B 09 „Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken“	13
2.1.3	DIN 1076 (vorläufige Neufassung)	13
2.2	Potentiale und Grenzen von Monitoring	14
2.3	Digitaler Zwilling und prädiktives Lebenszyklusmanagement	15
2.3.1	Allgemein	15
2.3.2	Die Rolle von Monitoring im Digitalen Zwilling	15
2.3.3	Prädiktives Lebenszyklusmanagement	16
2.4	Anwendungsfälle für Monitoring zur Erhaltung von Bauwerken	17
2.5	Zusammenstellung von Messtechnik	42
2.5.1	Grundsätze für die Auswahl von Messtechnik	42
2.5.2	Komponenten des Monitoringsystems	43
2.5.3	Messaufgaben und zugehörige Messtechnik	47
3	Prozesse	60
3.1	Beteiligung von Infrastrukturbetreibern	60
3.1.1	Allgemein	60
3.1.2	Online-Umfrage	60
3.1.3	Workshop	63
3.2	Der Monitoringprozess und seine Akteure	65
3.2.1	Definition: Monitoring	65
3.2.2	Die Akteure	66
3.2.3	Der Monitoringprozess	66
4	Ausschreibung, Vergabe und Vertragsgestaltung	72
4.1	Allgemeines	72
4.2	Vergabekriterien	73
4.3	Ausschreibung und Vergabe von Monitoringleistungen	73
4.4	Vertragsgestaltung	76
4.5	Haftung	77

5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	78
5.1	Allgemeines	78
5.2	Aktuelle Situation	79
5.3	Stand der Wissenschaft	80
6	Datenmanagement für Monitoringdaten	81
6.1	Aktuelle Situation	81
6.2	Zielvorstellungen	84
6.3	Methodik bei der Konzeption eines Datenmanagements für Monitoringdaten	85
6.3.1	Grundlagen für die Anforderungsanalyse an ein Datenmanagement	85
6.3.2	Grundlagen für die Konzeption eines Datenmanagements	87
6.3.3	Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA)	91
6.3.4	Geschäftsprozesse der Straßenbauverwaltung in Bezug auf Datenmanagement von Monitoringdaten	92
6.4	Aspekte bei den Anforderungen an ein Datenmanagement	103
6.4.1	Arten von Messdaten	104
6.4.2	Datenhaltung / Datenstruktur	104
6.4.3	Datenformate bei dateibasierter Datenhaltung	107
6.4.4	Datenverknüpfung	108
6.4.5	Metadaten	109
6.4.6	Datenqualität	110
6.4.7	Performance und Kosten	111
6.4.8	Zugriffsadministration und -sicherheit	111
6.4.9	Backup und Wartung	112
6.5	Vorstellung und Validierung des Konzepts	112
6.5.1	Vorgehen bei der Konzepterstellung und Validierung	112
6.5.2	Vorstellung und Validierung des Grundkonzepts: Einführung einer dateibasierten Datensinke	113
6.5.3	Erweiterung des Konzepts: Datenintegration und -analyse	122
7	Zusammenfassung	125
	Literatur	128
	Bilder	133
	Anhänge	135
	Anhang A: Glossar Abkürzungen	135
	Anhang B: Sensortechnik	139

Anhang B1: Weg- bzw. Distanzsensoren	139
B1.1: Induktive Wegsensoren (LVDTs)	139
B1.2: Seilzugensensoren	139
B1.3 Linearpotentiometer	139
B1.4 Laserdistanzsensoren	140
B1.5 Wegaufnehmer auf DMS-Basis / Elastomersensoren	140
Anhang B2: Dehnungssensoren	141
B2.1 Dehnungsmessstreifen	141
B2.2 Schwingsaitensensoren	141
B2.3 Diskrete faseroptische Sensoren - FBG (Fiber Bragg Grating) / LGFBG (Long Gauge FBG)	142
B2.4 Verteilte Faseroptische Sensoren (DFOS – Distributed Fiberoptical Sensing)	142
Anhang B3: Neigungssensoren	143
B3.1 Neigungssensoren	143
Anhang B4: Schwingungssensoren	144
B4.1 Beschleunigungssensoren - piezoelektrisch und kapazitiv	144
B4.2 Geophone	144
B4.3 MEMS - Beschleunigungssensoren	145
B4.4 Laser-Doppler-Vibrometer	145
Anhang B5: Kraft- und Drucksensoren	146
B5.1 Kraftmessdosen	146
B5.2 Kapazitive Drucksensoren	146
B5.3 Piezoelektrische Drucksensoren	146
B5.4 Optische Drucksensoren	147
B5.5 Magnetoelastische Hohlsensoren	147
Anhang B6: Temperatursensoren	147
B6.1 Widerstandsthermometer	147
B6.2 Thermoelemente	148
B6.3 Faseroptische Sensoren	148
Anhang B7: Weitere Sensoren zur Messung von Umgebungsbedingungen	149
B7.1 Hygrometer	149
B7.2 Anemometer	149
B7.3 Pyranometer	149
Anhang B8: Sensoren zur Verkehrscharakterisierung	150
B8.1 Weigh in Motion (WIM) – Systeme	150
B8.2 Bridge Weight in Motion (BWIM) – Systeme	150
Anhang B9: Korrosion	151
B9.1 Korrosionssensoren	151
Anhang B10: Materialfeuchte	152
B10.1 Feuchtesensoren	152

1 Einleitung

1.1 Grundsätze und Ziele des Monitorings im Erhaltungsmanagement

Das Hauptziel des Monitorings im Rahmen des Erhaltungsmanagements besteht darin, Einschränkungen des Verkehrsflusses bis hin zu Sperrungen zu verhindern und die Sicherstellung der Restnutzungsdauer von Bauwerken zu gewährleisten. Derzeit wird Monitoring häufig anlassbezogen durchgeführt. Es besteht jedoch das Potenzial, Monitoring als eine ganzheitliche Methode zur Planung der Instandhaltung und Vermeidung von Schäden und Defekten über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken zu nutzen.

Das Erhaltungsmanagement für Bauwerke in Deutschland basiert derzeit hauptsächlich auf regelmäßigen Bauwerksprüfungen gemäß DIN 1076 [1]. Dieses Vorgehen ist in erster Linie schadensbasiert und reaktiv, da Schäden oft erst sichtbar werden, wenn sie die Oberfläche erreichen. Das führt unter Umständen zu verspäteten Reaktionen auf die Schäden, die wiederum längere Ausfallzeiten und Brückensperrungen nach sich ziehen können. Bauwerksmonitoring kann an dieser Stelle Abhilfe schaffen.

Ein langfristiges übergeordnetes Ziel des Monitorings besteht darin, durch die kontinuierliche Bereitstellung umfassender Informationen über den Zustand eines Bauwerks die Grundlage für ein prädiktives Erhaltungsmanagement zu schaffen. Dies bedeutet den Übergang vom gegenwärtigen zustandsorientierten Erhaltungsmanagement hin zu einem u.a. von Monitoring unterstütztem Erhaltungs- und Vorhersagemanagement. Die Erfassung des Zustands und die Vorhersage von Zustandsentwicklungen hängen wesentlich von den erfassten Daten ab. Es besteht ein wachsender Trend, vom reaktiven Ansatz zu einem prädiktiven und ganzheitlichen Ansatz überzugehen, der das Monitoring als integrierten Bestandteil des Gesamtmanagementprozesses für bestehende Strukturen betrachtet. Monitoring ermöglicht die kontinuierliche Überwachung einer großen Anzahl von Brücken über ihren gesamten Lebenszyklus, um die Instandhaltung besser zu planen und Schäden und Defekte zu vermeiden, bevor sie ein kritisches Niveau überschreiten und zu schnell voranschreitenden Schadensmechanismen führen. In diesem Fall spielt die automatisierte Datenaufbereitung, -verarbeitung und -bewertung eine entscheidende Rolle, damit die Datenmengen reduziert werden, und die Informationen aus den bewerteten Daten zielgerichtet und leicht interpretierbar bereitgestellt werden können.

Ursprünglich wurden Monitoringsysteme an Brücken installiert, um spezifische Probleme wie Überlastung oder Ermüdung zu lösen oder Schäden zu überwachen, die sich entwickelt hatten bzw. durch andere Bauwerksprüfung identifiziert oder veränderte Einwirkungen verursacht wurden. Das Ziel des derzeit anlassbezogenen Monitorings besteht beispielsweise darin, bekannte Schäden zu überwachen, Defizite aus der Nachrechnung zu kompensieren oder die Bauwerksprüfung zu unterstützen. Es existieren darüber hinaus zahlreiche weitere Anwendungsfälle, die im Leitfaden und der Broschüre aufgeführt werden. Die Dokumente dienen bei der Unterstützung im Umgang mit aktuell häufig zum Einsatz kommenden Anwendungsfällen, zeigen aber auch zukünftige Möglichkeiten auf.

Zusammenfassend spielt das Monitoring im Erhaltungsmanagement zukünftig eine Schlüsselrolle, um Bauwerke sicher und funktionsfähig zu erhalten und gleichzeitig Kosten und Unterbrechungen im Verkehr zu minimieren. Es ermöglicht die kontinuierliche Überwachung des Zustands, die frühzeitige Erkennung von Schäden und die Vorhersage von zukünftigen Entwicklungen, wodurch letztendlich die Sicherheit erhöht, die Lebensdauer von Bauwerken verlängert und die Verfügbarkeit aufrechterhalten wird.

1.2 Problemstellung, Zielsetzung und Adressaten des Leitfadens

Die Problemstellung im Erhaltungsmanagement von Bauwerken im Zusammenhang mit Monitoring ist vielschichtig und umfasst mehrere Herausforderungen. Beispielsweise fehlt Fachpersonal, und somit ausreichend Zeit, sich mit dem Thema zu beschäftigen, sodass Auftraggeber zum Teil nicht ausreichend über die Potentiale, Vorteile oder Möglichkeiten des Monitorings informiert sind. Der gesamte Prozess, von der Planung bis zur Umsetzung, sowie die möglichen Ausschreibungen, Vergaben und Vertragsgestaltungen dieser Prozessschritte, sind oft unklar und es fehlen klare Verantwortlichkeiten und Qualitätsstandards. Ein häufiges Problem besteht darin, dass Messungen durchgeführt werden, aber

aufgrund mangelhafter Planungen oder Ausführungen unbrauchbar sind oder fehlerhaft bzw. unzureichend ausgewertet werden. Dies führt dazu, dass kein Mehrwert aus den erhobenen Daten entsteht und aufgrund dieser negativen Erfahrungen eine Abwehrhaltung gegenüber dem Thema Monitoring entsteht. Darüber hinaus stehen Ingenieurbauwerke im Bundesfernstraßennetz vor zahlreichen Herausforderungen, darunter die steigende Verkehrslast, das hohe Alter der Bauwerke, der teilweise schlechte Zustand und klimatische Belastungen. Bisher wird das Monitoring in erster Linie auf vorhandene Schäden und Defizite beschränkt. Es besteht ein Bedarf an einem effektiveren Ansatz für das Erhaltungsmanagement von Bauwerken.

Das zentrale Ziel dieses Leitfadens und einer damit zusammenhängenden Broschüre mit wesentlichen Inhalten des Leitfadens ist, das Bauwerksmonitoring im Erhaltungsmanagement von Bauwerken zu stärken. Dies umfasst die Schaffung von Akzeptanz für Monitoring bei Infrastrukturbereibern, deren Aufklärung und Sensibilisierung sowie die Kompensation fehlenden Wissens. Der Leitfaden zielt darauf ab, das Monitoring strukturiert in die Verwaltungspraxis zu integrieren und klare Grundsätze festzulegen. Dies betrifft u. a. die Definition von Verantwortlichkeiten, Prozessen und Kriterien für den Einsatz von Monitoring. Die Ergebnisse werden zur Unterstützung der Bauherren in einer Broschüre aufbereitet und zusammengefasst. Diese Broschüre enthält zudem Checklisten zu den Themen Ausschreibung und Vergabe von Monitoringleistungen. Ein besonderes Augenmerk liegt beim Leitfaden auf übergeordneten Bundesinteressen wie einheitlichem Vorgehen und wirtschaftlichem Handeln. Die Potenziale des Monitorings für die Erhaltung von Bauwerken sollen detailliert analysiert, bewertet und strukturiert dargestellt werden. Dies umfasst grundlegende Informationen zur Ausschreibung, Vergabe, Qualitätssicherung und Abrechnung sowie die Klärung von Haftungsfragen. Ein übergeordnetes Ziel besteht darin, den verlängerten und sicheren Betrieb von Ingenieurbauwerken im Sinne eines prädiktiven Lebenszyklusmanagements zu erreichen, indem Bauherren in die Lage versetzt werden, Monitoring gezielt einzusetzen und die resultierenden wertvollen Daten langfristig zu speichern und zu nutzen.

Um diese Ziele zu erreichen, werden die Inhalte und der Aufbau des Leitfadens und der Broschüre zusammen mit ihren Adressaten erarbeitet. Die Auftragsverwaltungen der Länder bzw. der Autobahn des Bundes werden über verschiedene Methoden wie ein Workshop, eine Online-Umfrage und durch den Betreuerkreis in die Erstellung und Erarbeitung eingebunden, sodass die Inhalte zielgerichtet und strukturiert aufbereitet werden können.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Nachfolgend wird der Stand der Wissenschaft und Technik in Hinblick auf Monitoring an Infrastrukturbauwerken aus der Literatur zusammengestellt. Für die Erläuterung von Begriffen oder Abkürzungen sei auf den Anhang verwiesen (Anhang A: Glossar | Abkürzungen).

2.1 Richtlinien und Regelwerke

2.1.1 DBV-Merkblatt "Brückenmonitoring"

Im DBV-Merkblatt "Brückenmonitoring" [2] werden Handlungsanweisungen für die Planung und Ausschreibung von Monitoring gegeben. Dabei wird Monitoring als ein ganzheitlicher Prozess betrachtet und definiert, der die systematische Überwachung von Bauwerksreaktionen und/oder Einwirkungen einschließt. Dieser Prozess mit geregelten Schritten und definierten Akteuren basiert auf einem festgelegten Monitoringkonzept und zielt auf die Erfassung der zeitlichen Entwicklung aussagekräftiger physikalischer Größen ab.

Das DBV-Merkblatt legte 2018 einen Grundstein für die Nutzung von Monitoring an Infrastrukturbauwerken. Der vorliegende Leitfaden ist insbesondere bei der Darstellung des Prozesses und der Akteure sehr stark an dieses Merkblatt angelehnt.

2.1.2 DGZfP Merkblatt B 09 „Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken“

Das von der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) im Jahr 2022 veröffentlichte Merkblatt B 09 „Dauerüberwachungen von Ingenieurbauwerken“ [3] soll als Hilfestellung für die Planung und technische Umsetzung von Monitoring dienen. Das Merkblatt beschreibt die praktische Planung und Realisierung von Monitoringsystemen an Bauwerken und Bauteilen des Ingenieurbaus, wobei der Fokus auf Brückenbauwerken liegt. Dem Auftraggeber bietet das Merkblatt eine Unterstützung darin, im Rahmen seiner Verantwortlichkeit die Konzeptionierung, sowie Planung, Installation und Betrieb von Monitoringsystemen optimal zu beauftragen bzw. angebotene Monitoringlösungen fachlich zu bewerten.

Das Merkblatt beinhaltet einen Überblick über technische Systeme und Sensoren, die geeignet sind, im oder am Bauwerk befestigt zu werden, um ausgewählte Parameter über den geforderten Zeitraum zu überwachen. Außerdem beinhaltet das Merkblatt eine Sammlung zahlreicher aktuell oder kürzlich realisierter Monitoringmaßnahmen. Dabei werden je Praxisbeispiel Bauwerk, Aufgabenstellung, Monitoringsystem und Ergebnisse strukturiert vorgestellt [4].

Das Merkblatt richtet sich an Eigentümer, Betreiber und Baulastträger von Ingenieurbauwerken, die verantwortlich sind, die Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit während des Lebenszyklus eines Bauwerks zu gewährleisten. Weiterhin richtet sich das Merkblatt an sachkundige Planer von Monitoringsystem sowie die Systeme betreibenden Spezialdienstleister.

2.1.3 DIN 1076 (vorläufige Neufassung)

Die DIN 1076 regelt die Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit mit dem Ziel der Erkennung und Beurteilung des Istzustandes. Die aktuelle Fassung aus dem Jahr 1999 wird zurzeit überarbeitet [5]. Neben der Schärfung von Begrifflichkeiten wurden Begriffsdefinitionen für den Digitalen Zwilling als digitales Abbild eines realen Bauwerks, für das Bauwerksmonitoring als langfristige und kontinuierliche Zustands- oder Eigenschaftsüberwachung, für die bildbegebenden Aufnahmeverfahren zur Erfassung digitaler Bilddaten zur Eigenschafts-, Zustands- oder Geometrieerfassung sowie für die Referenzinformationen also Dokumentation detaillierter Eigenschaften des Bauwerks zu einem bestimmten Zeitpunkt für spätere Vergleichsbetrachtungen im Rahmen der Bauwerkserhaltung ergänzt.

Die Norm legt die Inhalte, technischen Regelungen und Untersuchungszyklen der Bauwerksprüfungen fest. Auch in der Überarbeitung gilt die zentrale und grundlegende Verpflichtung zur handnahen Prüfung bei den Hauptprüfungen, es werden jedoch definierte Fälle aufgeführt, bei denen unter strengen Bedingungen von der handnahen Prüfung abgewichen werden darf. Die Norm regelt nach der Überarbeitung erstmalig den Einsatz von Monitoring an Ingenieurbauwerken. Monitoring kann dabei die reguläre Bauwerksprüfung ergänzen und sollte insbesondere bei außergewöhnlichen Ereignissen zum Einsatz kommen, um die Sicherheit des Bauwerks zu gewährleisten, wobei Monitoring weder den Widerstand erhöht noch die Last reduziert, aber wertvolle Daten für eine Entscheidung liefert. Die Sicherheit resultiert aus der besser fundierten Nutzungsentscheidung auf Grundlage von Erkenntnissen aus den Monitoringmaßnahmen. Es wird weiterhin unterschieden zwischen „Monitoring zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung“, das die kontinuierliche Überwachung des Bauwerks beinhaltet, um notwendige Daten zu erfassen und zu verarbeiten, sodass eine laufende Zustandsbewertung ermöglicht wird. Demgegenüber steht das „Monitoring aus besonderem Anlass“, wo es um Fälle geht, in denen ein sofortiges Eingreifen notwendig ist, zum Beispiel nach außergewöhnlichen Naturereignissen oder bei signifikanten Veränderungen des Zustands, die eine Gefährdung darstellen könnten.

Mit der Ergänzung von digitalen Verfahren zur Unterstützung der Bauwerksprüfung wird das Ziel der Erhöhung der Aussagekraft der Zustandserfassung verfolgt, unter der Einschränkung, dass die gewährleistete Zuverlässigkeit der Bauwerke durch die Anwendung der neu zu regelnden Verfahren nicht abgesenkt werden darf. Es findet innerhalb der digitalen Verfahren eine Unterscheidung zwischen Verfahren des Monitorings und den bildgebenden, fotografischen Verfahren statt.

Die bildgebenden Verfahren können nur sichtbare Merkmale von Zustandsänderungen aufnehmen und stellen damit eine rein visuelle Schadensaufnahme dar. Der Einsatz der bildgebenden Verfahren wird mit

steigender Signifikanz der Prüfung zunehmend eingeschränkt, um die erforderliche Zuverlässigkeit des Prüfprozesses zu erreichen. Dennoch wird durch ihren Einsatz eine Qualitätsverbesserung der Prüfergebnisse vornehmlich durch bessere Nachvollziehbarkeit und Dokumentation der Prüfbefunde sowie der Möglichkeit der nachträglichen Bewertung durch Dritte erzielt. Grundlage für die Anwendung von digitalen Verfahren ist ein detailliertes einzelbauwerksbezogenes Untersuchungsprogramm, welches den gesamten Prozess von der Zielstellung bis zur Ableitung der Zustandsinformationen darstellt.

In [5] wird ein ausführlicher Überblick über die Änderungen im Zuge der Neufassung gegeben. Das Veröffentlichungsdatum der überarbeiteten Fassung ist unbekannt.

2.2 Potentiale und Grenzen von Monitoring

Grundsätzliches Ziel von Monitoring ist die Generierung zusätzlicher Informationen. Ergänzend zu der turnusmäßigen Bauwerksprüfung, ergibt sich das Potential von Monitoring nach [6] aus der Möglichkeit der über lange Zeiträume kontinuierlichen oder oftmaligen und regelmäßigen Überwachung eines Bauwerks, sodass Veränderungen daran erkannt werden können. Während bei einem kontinuierlichen Dauermonitoring zwar auch Veränderungen innerhalb kurzer Zeiträume überwacht werden können, soll langfristig der Degradationsprozess beobachtet werden. Auf dieser Grundlage kann die Entwicklung des Tragwerkszustands in Form eines Trends ermittelt und ggf. eine Verstärkung oder Abschwächung derselben identifiziert werden.

Für die aktuell vornehmlich anlassbezogen durchgeführten Maßnahmen (Monitoring von bereits vorhandenen Schäden, bekannten Defiziten aus Konstruktion oder Nachrechnung sowie zur Ermittlung von Einwirkungen) ergibt sich durch den Einsatz von Monitoring eine mögliche Aufrechterhaltung und Weiternutzung von Brücken, die ihre geplante Laufzeit überschritten oder ihre Tragreserven aufgrund theoretischer oder tatsächlicher Defizite bereits aufgebraucht haben. Es wird somit eine Verschlechterung der Verfügbarkeit durch Umleitungen, Verkehrsstaus usw. vermieden und Zeit für die Instandsetzung, die Ertüchtigung oder den Ersatzneubau gewonnen [7].

Es werden in [6] weiterhin die folgenden Potentiale abgeleitet:

- Die Ermittlung des Tragwerkszustandes und die Quantifizierung der Tragwerkssicherheit (Zuverlässigkeit) bzw. dessen Performance bezüglich maßgeblicher Anforderungen (Gebrauchstauglichkeit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit) zur Verwendung für z. B. Model Updating oder zur Nachrechnung von Bestandstragwerken
- Das „datenbasierte Begleiten“ der Nutzung des Bauwerks mit dem Ziel der Charakterisierung des Bauwerksverhaltens und der Detektion von Schäden und Anomalien (automatisch erkannte Veränderungen in den Messdaten) als Anlass für detailliertere Untersuchungen. Typischerweise wird die Einhüllende des Zustandes bzw. Verhaltens unter Einwirkungen inklusive der Lasten, aber auch jahreszeitlicher Schwankungen ermittelt. Voraussetzung ist das Vorhandensein eines Referenzzustandes, idealerweise einer „Nullmessung“ am ungeschädigten Bauwerk, siehe AwF 090 in Kapitel 2.4
- Die Absicherung der Restnutzungsdauer nach der Erkennung wesentlicher Schädigungen, aber auch ggf. Aufhebung von auferlegten Einschränkungen, typischerweise zur Überbrückung des Zeitraumes bis zur Durchführung von Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen bzw. der Realisierung eines Ersatzneubaus. Dieses Potential besteht insbesondere für Brücken mit entsprechend hohem Schadensgrad bzw. Tragfähigkeitsdefiziten.

Ogleich Monitoring zu einem Informationsgewinn beiträgt, muss abhängig von den jeweiligen projektspezifischen Randbedingungen entschieden werden, ob der Einsatz von Messtechnik geeignet ist und die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung erfüllt sind. Der Informationsgewinn und das erforderliche Sicherheitsniveau stehen dem finanziellen und organisatorischen Aufwand gegenüber und müssen gegeneinander abgewogen werden [8]. In Kapitel 5 wird auf Verfahren zur Quantifizierung des finanziellen Aufwandes eingegangen, der organisatorische Aufwand wird in den Kapiteln 0 und 4 beleuchtet.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass der Mehrwert eines Monitorings nicht aus der reinen Erfassung der Messdaten besteht. Erst die Auswertung der rohen Messdaten und damit verbunden die Extraktion von Informationen sowie die Bewertung ebendieser ermöglicht eine Identifikation und Dokumentation von Veränderungen oder Schäden an einem Bauwerk und daraus abgeleitet eine Zustandsbewertung.

Die Weichen für ein erfolgreiches, also aussagekräftiges Monitoring, werden bereits bei der Erstellung des Messkonzeptes gestellt. Auch in den weiteren Schritten des Monitoringprozesses, wie der Aus- und Bewertung, ist Expertise notwendig, um die Ergebnisse in einen fachlichen Kontext zu setzen. Ebendiese Expertise ist von besonderer Relevanz im Fall von Überwachung sicherheitsrelevanter Zustände. Hier ist die Ausarbeitung von Alarmplänen und Havariekonzepten in frühen Projektphasen unabdingbar. Auf diese Punkte wird in Kapitel 3.2.3 nochmals detaillierter eingegangen.

2.3 Digitaler Zwilling und prädiktives Lebenszyklusmanagement

2.3.1 Allgemein

Die Themen des digitalen Zwillings und des prädiktiven Lebenszyklusmanagements gewinnen aktuell mehr und mehr Aufmerksamkeit und ihre Relevanz im Erhaltungsmanagement wird beleuchtet. Der digitale Zwilling liefert durch die Integration von Zustandsinformationen eine Aussage über den aktuellen Zustand des Bauwerks. In höheren Reifegraden werden digitale Zwillinge prädiktiv und selbst präskriptiv, und an dieser Stelle setzt das prädiktive Lebenszyklusmanagement an. Hierbei werden auf Grundlage aller zur Verfügung stehenden allgemeinen Bauwerksinformationen Prognosen über die Entwicklung des Zustandes und der Leistungsfähigkeit gestellt und schließlich erforderliche Maßnahmen mit dem Ziel der lebenszyklusübergreifenden aktiven Verwaltung des Bauwerksbestandes abgeleitet. In den beiden folgenden Kapiteln wird sowohl auf den digitalen Zwilling als auch das prädiktive Lebenszyklusmanagement kurz eingegangen.

2.3.2 Die Rolle von Monitoring im Digitalen Zwilling

Das Monitoring im Kontext des digitalen Zwillings ist ein entscheidender Bestandteil der modernen Instandhaltung und Betriebsführung von Bauwerken und technischen Systemen. Es dient nicht nur der Zustandsbewertung und Schadenserfassung, sondern auch der Optimierung von Wartungszyklen und der Verlängerung der Lebensdauer von Strukturen. Die Integration eines digitalen Zwillings ermöglicht dabei eine ganzheitliche und vernetzte Betrachtungsweise, die weit über traditionelle Überwachungsmethoden hinausgeht.

In [9] wird ein Digitaler Zwilling als digitales Abbild eines physischen Systems verstanden, wobei diese beiden im besten Fall über den gesamten Lebenszyklus hinweg durch einen automatischen Daten- und Informationsaustausch in Echtzeit miteinander verbunden sind. Die Reifegrade eines digitalen Zwillings beschreiben den Entwicklungsstand von einfachen, deskriptiven Modellen (Reifegrad 1) hin zu hochintelligenten, autonomen Systemen (Reifegrad 5). Schon der zweite Reifegrad, der die Nutzung von Monitoringdaten erfordert, stellt eine erhebliche Weiterentwicklung gegenüber dem deskriptiven ersten Reifegrad dar. Auf der informativen Ebene werden die gesammelten Daten nicht nur dargestellt, sondern mithilfe von Algorithmen analysiert und interpretiert. Dies bietet die Grundlage für die Erkennung von Mustern und Trends, die für die Zustandsüberwachung und vorbeugende Wartung von unschätzbarem Wert sind. Ab dem zweiten Reifegrad ist Monitoring demnach unabdinglich und ein fester Bestandteil der digitalen Instandhaltungsstrategie.

Die Einbettung des Monitorings in den digitalen Zwilling ermöglicht es, die erfassten Daten in einen breiteren Kontext zu setzen und somit tiefere Einblicke in das Verhalten und die Performance der überwachten Objekte zu erhalten. Daraus resultieren nicht nur reaktive Maßnahmen zur Schadensbehebung, sondern auch präventive oder prädiktive Strategien zur Vermeidung zukünftiger Probleme. So können etwa Verschleißerscheinungen frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, bevor es zu einem Ausfall oder gar einem Unfall kommt.

Mit fortschreitender Reife werden digitale Zwillinge prädiktiv und schließlich präskriptiv. Sie sind in der Lage, auf Basis von historischen und Echtzeitdaten Vorhersagen über den Zustand und zukünftige Entwicklungen zu treffen. Im präskriptiven Reifegrad werden diese Vorhersagen genutzt, um konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Es wird eine proaktive Instandhaltung möglich, die sich nicht mehr nur an festen Intervallen orientiert, sondern am tatsächlichen Bedarf. Im höchsten Reifegrad, der Autonomie, trifft der digitale Zwilling eigenständige Entscheidungen basierend auf den gelernten Mustern und Prognosen. Dies stellt den Übergang zu einem selbstregulierenden System dar, das nicht nur effizient und kosteneffektiv ist, sondern auch die Sicherheit maßgeblich erhöht.

2.3.3 Prädiktives Lebenszyklusmanagement

Unter Lebenszyklusmanagement (LZM) wird nach [10] die „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“ verstanden. Unter das Ziel der Nutzungsoptimierung fallen dabei alle Aktivitäten, die die geplante Nutzung des Objektes ermöglichen und den Nutzen der Einheit darüber hinaus steigern. Als oberste Ziele werden die Tragfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit genannt, wobei die Optimierung der Eigenschaften wie Sicherheit im Betrieb, Zugänglichkeit und Ausstattung ebenfalls anzustreben ist. Gegenüber der Ressourcenoptimierung, welche den verantwortungsvollen und wirtschaftlichen Umgang mit stofflichen, energetischen, finanziellen und sonstigen Ressourcen beinhaltet, und der Informationsoptimierung, worunter die Optimierung auf Verfügbarkeit, Aktualität und Strukturierung fällt, wird der Nutzungsoptimierung die höchste Priorität im LZM zugewiesen.

Im Rahmen der COST Action TU1406 wird in [11] folgende Definition von LZM erarbeitet: „Jede Brücke sollte sicher und tragfähig, für den Benutzer verfügbar, günstig hinsichtlich der Gesamtkosten über die Lebensdauer und umweltfreundlich sein.“ Das Ziel vom LZM wird in [6] auf Grundlage der Definitionen als das ökologisches, soziales und ökonomisch nachhaltiges Verwalten von Bauwerksbeständen verstanden, das einen sicheren Verkehrsfluss ermöglicht und auch für die Zukunft gewährleistet.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden Infrastrukturen über alle Lebenszyklusphasen, also vom Entwurf bis hin zum Rückbau, aktiv verwaltet. Grundlage für die Bewertung des Bauwerkszustandes und der Ableitung von zu ergreifenden Maßnahmen stellen Kenngrößen dar, die zum einen für das Systemverhalten eine hohe Aussagekraft haben. Diese Kenngrößen werden als Key Performance Indikatoren (KPI) verstanden und sollen helfen Entscheidungen zu treffen [6]. Mögliche KPI für Brückenbauwerke stellen beispielsweise die strukturelle Zuverlässigkeit (lokales oder globales Versagen), die Verkehrssicherheit für die Verkehrsteilnehmenden, die Dauerhaftigkeit oder auch Kosten, umwelttechnische Aspekte oder die Verfügbarkeit dar. Diese Eigenschaften können nicht immer direkt beobachtet werden. Die am Bauwerk beobachtbaren Größen, die Informationen enthalten und mit deren Hilfe KPI abgeschätzt oder berechnet werden können, werden als Performance Indikatoren (PI, Leistungsindikatoren) bezeichnet [6].

Performance-Indikatoren werden mittels Inspektionen, zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen, Monitoring und numerischer sowie experimenteller Modellierung erhoben. Aber auch der Tragwerkstyp oder das Baujahr können als Performance Indikator verstanden werden. Beispielsweise geben die Indikatoren Baujahr, Tragwerkstyp und Normengeneration zusammen einen Hinweis auf die Anfälligkeit einer Brücke auf Spannungsrisskorrosion oder Koppelfugenproblematik. Ein PI könnte die Rissbreite am entsprechenden Bauteil sein. Mit den aus dem Monitoring der Rissbreite gewonnenen Informationen über diesen PI können Hinweise für den KPI Zuverlässigkeit abgeleitet werden [6].

Ein Performance-Indikator charakterisiert eine maßgebliche Eigenschaft, welche den Zustand eines Bauwerks zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreibt. Zur Ermittlung des Zustandes und der Schadensprozesse werden die Leistungsindikatoren mit festgelegten Zielen (performance goals, PG) und deren Grenzwerten (performance thresholds, PT) verglichen [11].

Mit Hilfe der Performance-Indikatoren können die Key-Performance-Indikatoren ermittelt oder aktualisiert werden. Mit den aktualisierten KPIs und der Nutzenfunktion können im Rahmen des LZM optimale Maßnahmen auf Bauwerksebene identifiziert werden. Dies wiederum bildet die Basis, um das LZM auf Netzebene zu optimieren. [6]

2.4 Anwendungsfälle für Monitoring zur Erhaltung von Bauwerken

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Monitoring werden im folgenden Kapitel in Form von Anwendungsfällen zusammengestellt. Die projektspezifischen Anwendungsfälle können aus den Projektzielen abgeleitet werden und stellen Prozesse dar, die zur Erreichung der festgelegten Ziele beitragen [12]. In [13], [14], [15] und [16] werden bereits verschiedene Anwendungsfälle identifiziert. Dabei handelt es sich vorrangig um Anwendungsfälle, die aktuell bereits häufig eingesetzt werden oder erste Einsätze, die in der Praxis stattgefunden haben. Aktuell beschränkt sich der Einsatz von Monitoring weitgehend auf anlassbezogene (reaktive) Maßnahmen (Überwachung von bekannten Schäden, Überwachung von Defiziten aus der Nachrechnung oder der Konstruktion). Das große Potential von Monitoring liegt jedoch darüber hinaus in der Unterstützung der prädiktiven Instandhaltung. Aktuell bereits häufig eingesetzte Anwendungsfälle werden im vorliegenden Leitfaden aufgenommen und um weitere, zukünftige ergänzt. Die Anwendungsfälle 010, 020 und 030 finden in der Praxis aktuell schon häufig Verwendung, während für die Anwendungsfälle 040, 050, 060, 070, 100 sowie 110 erste Beispiele in der Praxis umgesetzt wurden. Bei den Anwendungsfällen 080 und 090 handelt es sich um zukünftige Anwendungsfälle. Die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten können nach dem Vorhandensein von Schäden am Bauwerk bzw. der Schadensfreiheit und der Dauer der Überwachung geclustert werden, siehe Bild 1. Das Monitoring im Rahmen des digitalen Zwillings stellt dabei einen allumfassenden Rahmen dar, der alle möglichen Anwendungsfälle beinhalten kann. Die Einordnung sollte dabei nicht als starrer Rahmen verstanden werden, sondern viel mehr einer Übersicht dienen.

Der Aufbau der Anwendungsfälle ist angelehnt an die Vorlage des Mustersteckbriefs bzw. den Anwendungsfallsteckbrief von BIM Deutschland [12]. Durch die Aufbereitung in Steckbriefen soll eine übersichtliche und einleuchtende Darstellung der umfassenden Möglichkeiten zum Einsatz von Monitoring erzielt werden, um Hemmnisse abzubauen. Für jeden Anwendungsfall werden eine Ausgangssituation, die Umsetzung sowie der Nutzen beschrieben und anhand von konkreten Beispielen die Anwendung in der Praxis anschaulich aufgezeigt.

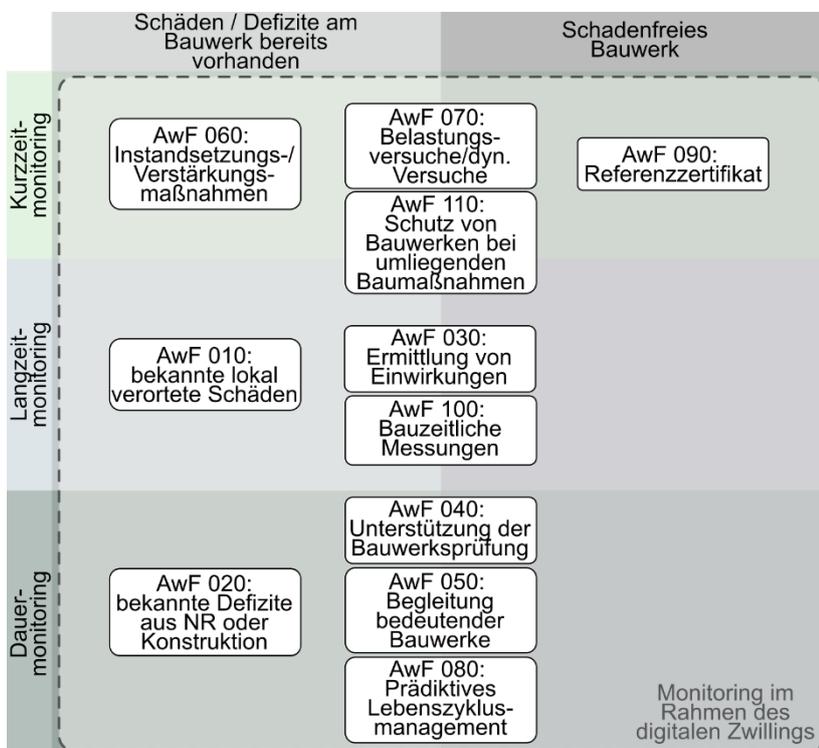


Bild 1: Anwendungsfälle Monitoring (eigene Darstellung)

Anwendungsfall 010: Bekannte lokal verortete Schäden

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen

Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation

Am Bauwerk sind Schäden vorhanden. Diese wurden bspw. in Rahmen der Bauwerksprüfung, einer OSA oder in ZfP festgestellt.

Umsetzung

Da es sich meist um lokale Schäden handelt, wird i.d.R. ein lokales Monitoringsystem eingesetzt, das den vorliegenden Schaden gezielt überwacht.

Handelt es sich um eine sicherheitsrelevante Überwachung eines Schadens, sind im Vorfeld zur Messung im Rahmen der Erstellung des Monitoringkonzeptes bereits Grenzwerte und einzuleitende Gegenmaßnahmen zu definieren.

Nutzen

Durch das Monitoring erfolgt die Überwachung des Schadensfortschrittes sowie die Abschätzung weiterer lokaler Entwicklungen durch Überwachung des lokalen Sachverhaltes. Hierdurch wird eine Erhöhung der Sicherheit sowie die Sicherung bzw. Gewährleistung und ggf. die Verlängerung der Restnutzungsdauer erreicht. Weiterhin können durch die messtechnische Schadensüberwachung erforderliche Sonderinspektionen in ihrer Anzahl reduziert werden.

Projekt-/Praxisbeispiel

Monitoring von Rissen in Pfeilerköpfen an der Gänsebachtalbrücke:



Bild 2: Gänsebachtalbrücke (Foto: MKP GmbH)

Die Gänsebachtalbrücke überführt als 1000 m lange semiintegrale Spannbetonbrücke die Neubastrecke Ebenfeld-Erfurt-Halle/Leipzig. Vor Inbetriebnahme wurden im Rahmen einer Bauwerksprüfung Risse im biegesteifen Anschlussbereich der Unterbauten an die Überbauten festgestellt. Das Auftreten der Risse konnte auf Zwangsbeanspruchungen in der Rahmenecke zurückgeführt werden. Zur Überwachung der Rissentwicklung über die Zeit auch unter Verkehr wurden nach einer Risskartierung zur statischen und dynamischen Erfassung der Rissbewegungen Wegaufnehmer angeordnet, siehe Bild 3. Die Wegaufnehmer wurden zwischen zwei Winkelprofilen montiert, die unmittelbar an den Rissflanken angebracht sind.

Durch die Überwachung der Rissbewegungen über insgesamt 3,5 Jahre konnten auf Grundlage der Risskartierung, bei der ein Öffnungsspaltmaß erfasst wurde, Aussagen über die absoluten Rissbreiten im Jahresgang getroffen werden.



Bild 3: Wegaufnehmer zur Erfassung der Rissbreite (Foto: MKP GmbH)

Im Ergebnis wurde kein kritisches Risswachstum festgestellt. Die Risse wurden anschließend verpresst.

Monitoring an der Oelzetalbrücke:

Die Oelzetalbrücke liegt auf der Neubaustrecke Ebensfeld-Erfurt in Südthüringen und überspannt unter anderem mit einem Bogen von 165 m Stützweite das Oelzetal. Der Überbau besteht aus einem 13-feldrigen Durchlaufträger, der als Spannbeton-Hohlkasten-Querschnitt ausgeführt wurde. Im Bereich des Bogens mit einem Stich von knapp 41 m ist die Fahrbahn aufgeständert. Der Bogen ist als Betonhohlquerschnitt ausgeführt.



Bild 4: Oelzetalbrücke (Foto: MKP GmbH)

Im Rahmen der regulären Bauwerksprüfung und in deren Folge initiiert Sanierungsarbeiten wurden Schäden in Form von umfangreichen Kiesnestern im Bogen in Scheitelnähe an der Ecke Bodenplatte/Steg sowie großflächige Bereiche auf der Bogenoberseite ohne Zuschlagstoffe und deutlich geringerer Festigkeit im Vergleich zum Planungsstand festgestellt.



Bild 5: Induktiver Wegaufnehmer mit Extensometerstab zur Erfassung der Betonoberflächendehnung (Foto: MKP GmbH)

Da zum einen das genaue Ausmaß der Schäden durch die übliche oberflächennahe Sichtprüfung nicht erfasst werden kann und die festgestellten Schäden lediglich eine Bogenseite betreffen, soll durch ein messtechnisches Monitoring untersucht werden, wie sich die Schädigung auf die Lastverteilung im Bogen auswirkt. Hierfür wurden auf den innenliegenden Seiten des Bogenquerschnitts zur Erfassung der Betonoberflächendehnungen induktive Wegsensoren installiert, siehe Bild 5. Mittels

Extensometerstäben wird die Längenänderung über eine Basislänge von 30 cm erfasst. Durch die symmetrische Anordnung von jeweils einer Messstelle im geschädigten sowie im ungeschädigt angenommenen Querschnitt kann das Tragverhalten beurteilt werden. Aus den gemessenen Betonoberflächendehnungen können Krümmungen des Querschnitts bestimmt werden.

Eine Bewertung der Ergebnisse und Ableitungen zum weiteren Vorgehen stehen aktuell noch aus.

Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Überwachung von Rissbewegungen im Beton z. B. an Koppelfugen oder Brückenpfeilern mittels Wegsensoren (induktive Wegaufnehmer), faseroptischer Sensoren oder Schwingsaitenaufnehmer
- Überwachung von Spannungsumlagerungen aufgrund von Schweißnahtissen mittels Dehnungsmessungen an umliegenden Stahlbauteilen
- Lagermonitoring aufgrund von Schiefstellungen des Widerlagers mittels Weg- oder verschiedener Neigungssensoren (Schwingsaitenneigungsmesser, elektronische Neigungsmesser, Servo-Neigungsmesser oder spezielle faseroptische Messaufnehmer) zur Erfassung von Lagerverschiebungen oder Lagerverdrehungen

Anwendungsfall 020: Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen			
Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation

Im Ergebnis bereits durchgeführter Nachrechnungen des Tragwerks ergaben sich rechnerische Defizite oder an ähnlichen Konstruktionen wurden Defizite festgestellt, die es zu überwachen gilt.

Am betreffenden Tragwerk müssen dabei noch keine Schäden infolge dieser Defizite aufgetreten sein.

Umsetzung

Obwohl die Nachrechnung Hinweise auf die Art eines Schadens oder den potenziellen Schadensort liefern kann, ist beides im Vorfeld oft nicht hinreichend bekannt. Haben sich bereits Schädigungen infolge des Defizites eingestellt und wurden diese im Rahmen einer Bauwerksprüfung erkannt, ist der Schadensort bekannt. Aufgrund des Schadensbildes kann häufig auch auf die Schadensursache geschlossen werden.

Sind Schadensort und Schadensart unbekannt, wird ein globales Monitoringsystem eingesetzt, bei dem globale Parameter eines Bauwerks, die auf eine Schädigung schließen lassen, erfasst werden. Entsprechende Parameter können aus Systemreaktionen über Messungen von bspw. Beschleunigungen oder Verformungen bestimmt werden.

Durch die Erfassung der globalen Systemreaktion können durch Schäden verursachte Änderungen an der Systemsteifigkeit und in der Folge am Tragverhalten des Systems detektiert werden. Voraussetzung für den Einsatz von Monitoring als Kompensationsmaßnahme ist, dass sich die maßgebenden Defizite und die sich daraus ergebenden möglichen Strukturveränderungen mit einer entsprechenden Vorankündigung einstellen, lokalisierbar und mit messtechnischen Mitteln überwachbar sind. Die Messung der Parameter und anschließende Auswertung ermöglicht Rückschlüsse auf die Art des Schadens und den Schadensort [14].

Alternativ kann das globale Monitoring auch auf die Detektion der Schädigungsursache ausgelegt werden. Hierbei ist jedoch aufgrund des unbekanntes Schadensortes ein hinreichend großes Monitoringsystem erforderlich, um sämtliche Bereiche, in denen das Defizit ermittelt wurde, erfassen zu können [14].

Für den Fall, dass Schadensart und Schadensort bekannt sind (bspw. beim Nachrechnungsdefizit Ermüdung der Koppelfuge oder Querkraft), ist der Einsatz eines lokalen Monitorings, bspw. zur lokalen Überwachung der Schubbereiche zur Detektion entstehender Schubrisse, zu bevorzugen. Die Ergebnisse des Monitorings können in diesem Fall auch für einen messwertgestützten Nachweis verwendet werden.

Aus den Nachrechnungen können Grenzwerte für bspw. Einwirkungen oder Beanspruchungen ermittelt werden, mit denen die Nachweise noch erbracht werden können. Mit Hilfe des Monitorings am Bauwerk kann dann überwacht werden, ob diese Grenzwerte eingehalten werden. Kommt es zu einer Überschreitung der Grenzwerte, kann eine ereignisbasierte Bauwerksprüfung oder Sonderprüfung eingeleitet werden. Wichtig ist in diesem Fall, dass das weitere Vorgehen bei einer Überschreitung eindeutig definiert ist, damit unmittelbar gehandelt werden kann. Diese Leistung liegt beim AG, sie kann aber beispielsweise als Teil des Messkonzepts an den Fachplaner Monitoring vergeben werden.

Brücke über die DB AG in Waren/Müritz [19]:

Die Straßenüberführung im Zuge der B 192 über die Strecke 6325 (Neustrelitz–Rostock/Warnemünde) in Waren an der Müritz wurde 1973 in Betrieb genommen und hat seitdem eine große überregionale Netzbedeutung. Das Bauwerk besteht aus zwei Teilbauwerken und wurde als Spannbetonbrücke mit Bündelspanngliedern BSG mit Spannstahl der Hennigsdorfer Produktion hergestellt. Nach der Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion [17] gilt das Bauwerk als stark gefährdet. Im Zuge einer Nachrechnung wurde das Ankündungsverhalten untersucht und konnte in nahezu allen Querschnitten nachgewiesen werden. In Zuge von Materialuntersuchungen am Spannstahl und am Verpressmörtel konnten bei der Oberflächenprüfung vereinzelt Anrisse festgestellt werden, die auf SpRK hindeuten. Auf Grund der Streckenführung über die Bahngleise war eine regelmäßige Sichtprüfung nicht möglich, weshalb eine automatisierte Dauerüberwachung umgesetzt wurde. Das Messkonzept verfolgt den Ansatz, dass der untersuchte Schädigungsprozess durch eine Veränderung bestimmter Formänderungsgrößen begleitet wird. Ein geeignetes Messprinzip hierfür stellt die Messung der Verdrehungen mit Inklinometern (Neigungssensoren) dar, da hierfür keine Messbasis erforderlich ist und die abschnittsweise Krümmungsinformation auch eine Zuordnung des Ortes der Verformung erlaubt. Über die Länge des Bauwerks verteilt wurden mehrere Neigungssensoren angeordnet. Durch zusätzliche Temperaturmessungen konnte der Einfluss der Temperatur auf die Messwerte in der Datenaufbereitung herausgefiltert werden. Die Messtechnik wurde durch Belastungsfahrten kalibriert, die in bestimmten Abständen wiederholt wurden (Kontrollfahrten).



Bild 8: Brücke in Waren/Müritz (Foto: MKP GmbH)

Die Analyse der Zeitreihen ergab Hinweise auf bleibende Verformungsanteile im Messsignal, die nicht allein auf den Einfluss der Temperatur zurückzuführen sind. Zur Verifikation wurden die Belastungsversuche (Kontrollfahrten) wiederholt. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die 2016 gemessenen Krümmungen durchweg größer ausfielen als die bei den Kalibrierfahrten im Jahr 2015. Die in der Langzeitmessung festgestellten Krümmungsänderungen konnten so unter Verkehrslast reproduziert werden. Daraufhin wurde eine Sonderprüfung veranlasst, in der im auffälligen Krümmungsbereich ein Biegeriss eindeutig identifiziert werden konnte. Eine frühzeitige Detektion einer Rissbildung als Vorankündigung eines Versagens war somit zuverlässig möglich. Mit dem vorhandenen Monitoring konnte die Vorankündigung des Versagens spannungsrissskorrosionsgefährdeter Brücken bestätigt werden; das zuvor rechnerisch nachgewiesene Ankündungsverhalten bestätigte sich durch das tatsächliche Eintreten des Risses vor dem Bruch. Damit stellt Monitoring unter den gegebenen Randbedingungen eine Alternative zur Sonderprüfung dar; die Rissbildung ist rein visuell nur unter sehr großer Belastung erfassbar, wohingegen der Steifigkeitsverlust messtechnisch identifizierbar ist und durch den Biegeriss bestätigt werden konnte. Daraus wird deutlich, dass kritische Veränderungen im Verformungsverhalten messtechnisch deutlich eher erfassbar sind als durch visuelle Prüfungen.

Die Analyse der Zeitreihen ergab Hinweise auf bleibende Verformungsanteile im Messsignal, die nicht allein auf den Einfluss der Temperatur zurückzuführen sind. Zur Verifikation wurden die Belastungsversuche (Kontrollfahrten) wiederholt. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die 2016 gemessenen Krümmungen durchweg größer ausfielen als die bei den Kalibrierfahrten im Jahr 2015. Die in der Langzeitmessung festgestellten Krümmungsänderungen konnten so unter Verkehrslast reproduziert werden. Daraufhin wurde eine Sonderprüfung veranlasst, in der im auffälligen Krümmungsbereich ein Biegeriss eindeutig identifiziert werden konnte. Eine frühzeitige Detektion einer Rissbildung als Vorankündigung eines Versagens war somit zuverlässig möglich. Mit dem vorhandenen Monitoring konnte die Vorankündigung des Versagens spannungsrissskorrosionsgefährdeter Brücken bestätigt werden; das zuvor rechnerisch nachgewiesene Ankündungsverhalten bestätigte sich durch das tatsächliche Eintreten des Risses vor dem Bruch. Damit stellt Monitoring unter den gegebenen Randbedingungen eine Alternative zur Sonderprüfung dar; die Rissbildung ist rein visuell nur unter sehr großer Belastung erfassbar, wohingegen der Steifigkeitsverlust messtechnisch identifizierbar ist und durch den Biegeriss bestätigt werden konnte. Daraus wird deutlich, dass kritische Veränderungen im Verformungsverhalten messtechnisch deutlich eher erfassbar sind als durch visuelle Prüfungen.

Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Erfassung von Schwingungen als Zeitreihen über Beschleunigungssensoren am Bauwerk und anschließender Ermittlung der Eigenfrequenzen sowie Eigenformen; Veränderungen am mechanischen System (z. B. Steifigkeitsdegradation als Folge von Rissbildungen) führen zu Änderungen des Eigenschwingungsverhaltens [6]
- Schallemissionsmessungen zur Detektion von Spanndrahtbrüchen bei spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brücken
- Verschiebungsmessungen an Koppelfugen zur Ermittlung realer Spannstahldehnungen

Anwendungsfall 030: Ermittlung von Einwirkungen

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen			
Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation
Es wird eine objektspezifische Auskunft zur Höhe der Einwirkungen benötigt, um z. B. reduzierte Lastannahmen in der Nachrechnung berücksichtigen zu können.

Umsetzung
<p>Die direkten Einwirkungen aus äußeren Lasten (Eigenlast, Wind, Schnee, Verkehr) sowie indirekten Einwirkungen infolge behinderter Verformung (Zwang) durch klimatische Einwirkungen (Temperatur) oder Setzungen werden über Messungen erfasst.</p> <p>Klimatische Einwirkungen (Feuchte, Lufttemperatur) können mit Hilfe von Wetterstationen, während die Temperatur und ihre Einflüsse auf das Bauwerk durch Messungen im und am Bauwerk selbst ermittelt werden. Besonders der Erfassung der Temperatur kommt im Rahmen der Temperaturkompensation von Messungen eine bedeutsame Rolle zu.</p> <p>Die Erfassung der tatsächlichen Verkehrsbelastung erfolgt bspw. mit Hilfe von Bridge Weigh-in-Motion-Systemen (B-WIM).</p> <p>Aus den erfassten Daten können unter Anwendungen statistischer Auswertungen zur Berücksichtigung normativ geforderter Zuverlässigkeiten (bspw. Berechnung eines 50-Jahres-Quantils) objektspezifische Einwirkungen berechnet werden, die in die Nachweisführung Eingang finden. Voraussetzung für eine statistische Auswertung ist die Erfassung von Daten über einen repräsentativen Zeitraum. Nach [3] ist hierfür eine Monitoringdauer von mindestens einem Jahr erforderlich, um jahreszeitliche Schwankungen ebenfalls erfassen zu können.</p> <p>Aus den erfassten Verkehrsbelastungen können objektbezogene Ziellastniveaus und Ermüdungslastmodelle abgeleitet werden, die ebenfalls Eingang in eine Nachrechnung finden.</p> <p>Im Rahmen des strategischen Lebenszyklusmanagements kann eine kontinuierliche Überwachung bspw. der Verkehrsbelastung in Kombination mit Kamera bzw. Blitzertechnik oder Schrankenanlagen zum Ausschluss kritischer Zustände und damit zur Sicherstellung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit genutzt werden [2]. Ein weiteres Beispiel in diesem Zusammenhang stellt die Überwachung zulässiger Windgeschwindigkeiten auf Brückenbauwerken dar. Kommt es hierbei zu Überschreitungen zuvor festgelegter Grenzwerte, können Geschwindigkeitsbegrenzungen, der Ausschluss von Fahrzeugen mit großer Windangriffsfläche oder gar eine (temporäre) Sperrung des Bauwerks eingeleitet werden, bis wieder ein verkehrssicherer Zustand erreicht wird.</p>

Nutzen
<p>Durch die Berücksichtigung der realen (gegenüber den normativ vorgegebenen günstigeren) Lastansätzen für Einwirkungen erfolgt eine objektspezifische Nachweisführung wodurch eine Verlängerung der Nutzungsdauer, eine Aufhebung von Nutzungseinschränkungen aufgrund von rechnerischen Nachweisdefiziten oder die Vermeidung kostspieliger Ertüchtigungsmaßnahmen erzielt werden kann [3].</p> <p>Im Rahmen des strategischen Lebenszyklusmanagements erfolgt eine kontinuierliche Überwachung der Einwirkungen zum Ausschluss kritischer Zustände.</p> <p>Bei der Erfassung der Verkehrseinwirkungen können die Verkehrsdaten dafür genutzt werden, um strecken- oder objektspezifische Lastmodelle zu ermitteln, die in der Nachrechnung angesetzt werden können. Auch ist eine Anpassung der Teilsicherheitsfaktoren für die Verkehrslasten ggf. möglich, da</p>

mit der Überwachung der Einwirkung die ursprüngliche Unsicherheit in Bezug auf die Einwirkung reduziert wird, was im semi-probabilistischen Sicherheitskonzept einer Reduktion der Teilsicherheitsbeiwerte entspricht. Werden neben den Einwirkungen auch die Bauwerksreaktionen erfasst, können diese in detaillierteren Ermüdungsberechnungen angesetzt werden. [7]

Die Kenntnis der Verkehrsauslastung eines ganzen Streckenzuges kann ebenfalls von Nutzen sein, um weiterführend die Planung von eventuellen Umleitungen zu verbessern.

Projekt-/Praxisbeispiel

Erfassung der Verkehrseinwirkungen mittels Weigh-in-Motion-System (WIM):



Bild 9: Köhlbrandbrücke Strombrückenteil (Foto: MKP GmbH)

Die Köhlbrandbrücke in Hamburg, errichtet im Jahr 1974, überführt als Stahl-Schrägseilbrücke mit einer Länge von 520 m die Bundesstraße 3 über den Köhlbrand im Hamburger Hafen. An den Strombrückenteil grenzen beidseitig Stahlbeton- und Spannbetonrampenbauwerke mit Längen von 2050 m und 1048 m an.

Neben einer Vielzahl von Maßnahmen werden an der Köhlbrandbrücke auch die Verkehrseinwirkungen mittels einer WIM-Anlage für beide Fahrrichtungen ermittelt.

Auslöser für die Installation der Anlage war das hohe Verkehrsaufkommen mit Staubbildung, vor allem aus Schwerverkehr. Dies ließ auf hohe

Beanspruchungen des Tragwerks schließen. Gegenüber herkömmlichen Verkehrszählungen, bei denen lediglich die Anzahl der Fahrzeuge ermittelt werden, konnten mit Hilfe der WIM-Anlage auch die Achslasten erfasst werden. Dabei wurde festgestellt, dass ein Großteil der LKW lediglich Leercontainer transportiert und somit das mittlere Gewicht der Fahrzeuge deutlich geringer ist, verglichen mit vollbeladenen LKW. In der später durchgeführten Nachrechnung konnten auf Grundlage der Messungen die Eingangsparameter für die Verkehrsstärke angepasst und so das reale (ggü. der Norm günstigere) Verkehrsaufkommen abgebildet werden.

Durch die WIM-Anlage erfolgt auf der Köhlbrandbrücke eine Überwachung des Verkehrs, in diesem Fall jedoch nicht gekoppelt mit Kameras oder Blitzertechnik, mit dem Ziel der Erstellung einer Verkehrsstatistik und Überprüfung der Lastansätze.

Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Erfassung von Windeinwirkungen an exponierten Bauwerken, ggf. gekoppelt mit Schrankenanlagen
- Messung des Tidenhubs oder von Pegelständen zur Definition und Planung der Bautechnologie bei Einschwimmvorgängen
- Messung des tatsächlichen Temperaturfeldes bei einer bestehenden Brücke im Zuge einer Umbau-, Rückbauplanung oder Nachrechnung

Anwendungsfall 040: Unterstützung der Bauwerksprüfung

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen			
Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation
Die in regelmäßigen Abständen durchgeführten Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 [1] sollen durch Monitoring unterstützt werden. Sowohl bei schadensfreien Bauwerken als auch bei solchen, an denen bereits Schäden oder Defizite bekannt sind, können durch Monitoring zusätzliche Informationen gewonnen werden.

Umsetzung
<p>Alle Ingenieurbauwerke werden in regelmäßigen Abständen nach der DIN 1076 [1] einer handnahen Sichtprüfung unterzogen. Dabei wird das Bauwerk visuell auf Mängel, Schäden und Zustandsveränderungen untersucht. Im Ergebnis werden die Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit des Bauwerks zu diskreten Zeitpunkten festgestellt.</p> <p>Monitoring kann dabei an verschiedenen Stellen im Prozess der Bauwerksprüfung eingesetzt werden, um ergänzende Informationen zur Optimierung der Beurteilung des Tragwerkes zu generieren [14].</p> <p>Eine Möglichkeit der Unterstützung stellt der Einsatz von instrumentierten Bauteilen dar. Die Erfassung von Performanceparametern ermöglicht Aussagen zu vorhandenen Schäden an den entsprechenden Bauteilen und ggf. sogar die Prognose zukünftiger Entwicklungen [14]. Auch die kontinuierliche sensorbasierte Überwachung von bekannten Defiziten oder in früheren Bauwerksprüfungen festgestellten Schäden sei an dieser Stelle noch einmal genannt, siehe Anwendungsfälle 010 und 020.</p> <p>Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von bildbasiertem Monitoring dar, wodurch zum einen Stellen am Bauwerk identifiziert werden, die im Rahmen der Bauwerksprüfung genauer untersucht werden sollen. Durch den Einsatz von mobilen Robotersystemen und Drohnen (unmanned aircraft systems, UAS) zur automatischen Bilderfassung wird zum anderen eine Reduzierung von Einsatzrisiken für speziell ausgebildete Kletterer und Ingenieure an schwer erreichbaren Bauteilen erzielt, während die UAS-Bilddaten der gesamten Oberfläche großer Bauwerke hochauflösend und effizient erfassen [6]. Unter Zuhilfenahme von KI-gestützten Auswerteverfahren der Bilder kann eine automatisierte Erkennung von Rissen, Abplatzungen oder anderen Veränderungen erfolgen. Im Gegensatz zum sensorbasierten Monitoring ermöglichen bildbasierte Verfahren eine größere Standardisierung, Objektivierung und automatische Ortsreferenzierung [15]. Beim Einsatz automatisierter Verfahren zur Erkennung von Schäden ist sicherzustellen, dass ebendiese sicher erkannt werden [20].</p> <p>Werden durch das Monitoring oder durch automatisierte Verfahren Schäden festgestellt, sind diese durch eine handnahe Prüfung näher zu untersuchen.</p> <p>Bei allen genannten Einsatzmöglichkeiten ist Monitoring nicht als Ersatz bzw. Konkurrenz zur Bauwerksprüfung, sondern als sinnvolle Ergänzung zu verstehen [2].</p>

Nutzen
Sensordaten können permanent abgefragt werden, wohingegen die Bauwerksprüfung stets eine Momentaufnahme darstellt, die im Regelfall alle drei bis sechs Jahre aktualisiert wird. Ein Monitoring z. B. bei vorgeschädigten Bauteilen kann somit eine Möglichkeit darstellen, die Anzahl erforderlicher Bauwerks- bzw. Sonderprüfungen zu reduzieren bzw. die Sicherheit durch permanente Überwachung der Bauwerksreaktionen zu erhöhen [2].

Bedingt durch die zeitlich diskreten Zustandserfassungen und analogen Aufnahme, Auswertung und Verwaltung von Zustandsinformationen im Rahmen der Bauwerksprüfung, die im Regelfall alle drei bis sechs Jahre durchgeführt wird, erfolgt die Verknüpfung von Prüfergebnissen und Erhaltungsmaßnahmen eher reaktiv. Prognosen über bisherige und zukünftige zeitliche Entwicklungen von Schäden spielen kaum eine Rolle, [6]. Zusätzlich lässt sich die Kontrolle von nicht oder nur schwer zugänglichen Bereichen (z.B. nicht begehbare Hohlkästen, Bauteile über Bahnstrecken) durch Monitoring ergänzen [2] und es wird eine Reduzierung von Einsatzrisiken für speziell ausgebildete Kletterer und Ingenieure erzielt.

Insgesamt wird folglich die Informationsdichte zur Interpretation des Bauwerkszustandes erhöht und dem Betreiber stehen kontinuierliche Informationen zu Veränderungen des Bauwerkszustandes zur Verfügung und es erfolgt die Identifikation von Stellen, die im Rahmen der Bauwerksprüfung näher untersucht werden sollen.

Projekt-/Praxisbeispiel

Dehnungsmessungen an den Pfeilerköpfen der Eisenbahnüberführung (EÜ) Itztal:

Die EÜ Itztal wurde zwischen 2002 und 2005 im Zuge der Schnellfahrstrecke Nürnberg-Erfurt in Oberfranken errichtet und 2017 in Betrieb genommen.

Der Stahlverbundfachwerküberbau liegt auf Hohl Pfeilern aus Stahlbeton auf. An den Pfeilerköpfen wurde im Zuge der zyklischen Inspektionen und Begutachtungen Risse festgestellt, die auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Betongefüge zurückgeführt werden konnten. Bei der AKR kommt es zu einer chemischen Reaktion zwischen den Alkalien des Zementsteins im Beton und der Gesteinskörnung mit alkalilöslicher Kieselsäure, wobei die chemische Reaktion mit einer Volumenzunahme verbunden ist. Voraussetzung für die AKR sind neben den im Zement meist enthaltenen Alkalien entsprechend reaktive Gesteinskörnungen sowie das Eindringen von Feuchtigkeit. Es gibt keine wirksamen Maßnahmen zur Verhinderung des weiteren Ablaufs der betonschädigenden AKR, sodass durch geeignete Maßnahmen die Reaktion lediglich verzögert werden kann. An der EÜ Itztal werden aktuell umfangreiche Sanierungsmaßnahmen resultierender Risse an allen Pfeilerköpfen durchgeführt. Dabei werden zunächst die vorhandenen Risse verpresst und zum Schutz der Betonoberfläche vor Zutritt von Feuchtigkeit eine elastische Beschichtung aufgebracht. Durch diese rissüberbrückende Beschichtung sind weitere visuelle Inspektionen zu Veränderungen der Pfeilerköpfe nicht mehr uneingeschränkt möglich. Um die weitere Entwicklung der geschädigten Bereiche trotz Beschichtung verfolgen zu können, werden die Oberflächendehnungen auf dem gerissenen Beton unter der Beschichtung durch die Anordnung von faseroptischen Sensoren erfasst. Die Sensoren werden an den Pfeilerköpfen umlaufend installiert, sodass die Dehnungen infolge weiterer Rissbildung über den ganzen Querschnitt erfasst werden können. Durch das Monitoring wird die Bauwerksprüfung im Bereich der Pfeilerköpfe ergänzt. Die Dehnungsmessungen werden wertvolle Erkenntnisse bezüglich der Rissentwicklung im Bauteil liefern und werden bei der Zustandsbewertung und Bewertung der Restnutzungsdauer herangezogen. Die Maßnahmen der rissüberbrückenden Beschichtung in Kombination mit dem Monitoringsystem bietet damit eine zielführende Möglichkeit einer Entschleunigung der AKR und der Bauwerkserhaltung.



Bild 11: EÜ Itztal (Foto: MKP GmbH)

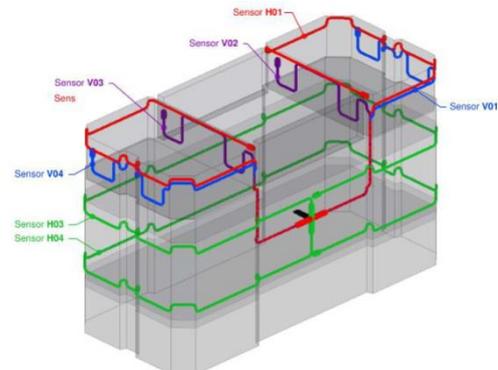


Bild 10: Itztalbrücke und Installationsplan der DFOS an den Pfeilern unter Einhaltung der Biegeradien (eigene Darstellung)

Schallemissionsmessungen an den Seilen der Köhlbrandbrücke:

Die Strombrücke der Köhlbrandbrücke (zur Kurzbeschreibung des Bauwerks siehe AwF 030) wird durch 88 Schrägkabel abgespannt (vier Harfen mit je 22 Seilen). Im Rahmen der Bauwerksprüfung erfolgt zum einen eine Sichtprüfung der Kabeloberflächen. Dafür ist ein Hubsteiger oder eine Drohne sowie das Entfernen der Ummantelung erforderlich. Der Zugang ist nur mit Hilfe von Besichtigungsgeräten möglich, woraus Verkehrseinschränkungen resultieren. Zum anderen werden die Seile mit einem magnetinduktiven Prüfgerät abgefahren. Im Rahmen von smartBridge Hamburg [21] wurden

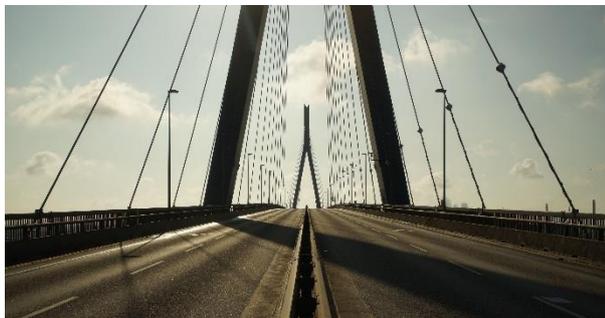


Bild 12: Strombrücke der Köhlbrandbrücke mit Schallemissionssensoren an der rechten Seilharfe (Foto: MKP GmbH)

an einer Seilharfe (22 Seile) Schallemissionssensoren installiert. Ähnlich der Auswertung der Schallemissionsmessungen zur Detektion von Spanndrahtbrüchen bei spannungsrissskorrosionsgefährdeten Bauwerken (siehe Projektbeispiel Stennertbrücke in Hagen Hohenlimburg im AwF 020) können aus den Messungen Informationen zu potentiellen Drahtbrüchen extrahiert werden. Im Kontext des digitalen Zwillings der Köhlbrandbrücke erfolgt im Weiteren eine Bewertung der potentiellen Drahtbrüche hinsichtlich der Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Abhängig von der Ausnutzung und dem Querschnitt des individuellen Kabels ergibt sich eine Anzahl an ertragbaren Drahtbrüchen. Dies dient als Grundlage für die Einschätzung des Erfordernisses einer Sonderprüfung.

Die Schallemissionsmessungen an ausgewählten Kabeln sind als ergänzende Maßnahmen zur Bauwerksprüfung zu verstehen. Dem Bauherrn stehen durch die Messungen auch im Zeitraum zwischen den Bauwerksprüfungen Informationen zum Zustand der Schrägkabel zur Verfügung.

Anwendungsfall 050: Begleitung bedeutender Bauwerke

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen

Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation

Die Verfügbarkeit bedeutender Bauwerke, deren Ausfall große Auswirkungen auf das Verkehrsnetz oder die einen hohen kulturellen Wert haben, soll sichergestellt werden. Ein Bauwerk kann aus verschiedenen Gründen als bedeutsam erachtet werden. Die Bedeutung des Bauwerks für die Netzverfügbarkeit, hohe Verkehrszahlen oder ein aufwendiges Umleitungssystem im Ausfall können bspw. als verkehrliche Gründe aufgeführt werden. Konstruktive Gründe ergeben sich z. B. aus der Lage und Größe des Bauwerks sowie der Berücksichtigung von Möglichkeiten zur Schaffung von kurzfristigem Ersatz [14].

Am entsprechenden Bauwerk müssen keine Schäden oder Defizite bekannt sein. Der Anwendungsfall kann sowohl bei Neubauten als auch Bestandstragwerken zum Tragen kommen.

Umsetzung

Bei diesem Anwendungsfall wird ein globales Monitoringsystem eingesetzt, sofern keine zu überwachenden Schäden vorhanden sind. Neben globalen statischen und dynamischen Parametern, aus denen Änderungen der Systemsteifigkeit erkannt werden, können auch verschiedene Parameter in den hochbeanspruchten Bereichen des Bauwerks überwacht werden. Die Identifikation der hochbeanspruchten Bereiche kann in der Planung (Neubau) oder durch eine Nachrechnung (Bestandsbauwerk) erfolgen.

Wird bereits in der Planungsphase eines Bauwerks die Entscheidung für ein begleitendes Monitoring gefällt und die Installation in den Bauprozess integriert, können schon aus dem Herstellungsprozess Informationen gewonnen werden.

Nutzen

Durch die permanente Überwachung steht zum einen dem Bauwerkseigentümer zu jedem Zeitpunkt eine Einschätzung des Zustandes zur Verfügung, zum anderen wird die Bauwerksprüfung unterstützt (vgl. auch Anwendungsfall 040). Hierdurch wird ein effizienteres zustandsabhängiges Ertüchtigungs- und Instandsetzungsmanagement möglich.

Übergeordnet wird eine größtmögliche Verfügbarkeit bedeutender Bauwerke sichergestellt.

Die Ausführungen in diesem Anwendungsfall lassen sich auch auf die Überwachung von Teilkomponenten und neuralgischen Punkten eines Tragwerks (bspw. Endverankerungen, Gerbergelenke) skalieren.

Projekt-/Praxisbeispiel

Structural Health Monitoring der Nibelungenbrücke:

Die 1953 erbaute Nibelungenbrücke ist sowohl die erste Spannbetonbrücke über den Rhein als auch eine der ersten Brücken, die im Freivorbau errichtet wurden. Die baukulturelle Bedeutung dieses Bauwerks spiegelt sich in der Erfassung als Kulturdenkmal in Rheinland-Pfalz und Hessen sowie der Auszeichnung von der Bundesingenieurkammer als „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“ wider [22].

Die Nibelungenbrücke überführt die Bundesstraße B 47 zwischen Worms und Bürstadt mit zwei getrennten Fahrbahnen. Die insgesamt 335 m lange Strombrücke als mittleres der insgesamt drei Teilbauwerke verfügt über drei Öffnungen mit Spannweiten zwischen 101 m und 114 m. Der Überbau besteht aus jeweils zwei Kragträgern, die von den Pfeilern aus im Freivorbau errichtet wurden und im Endzustand in Feldmitte über vertikal vorgespannte Gerbergelenke miteinander gekoppelt sind.



Bild 13: Nibelungenbrücke (Foto: MKP GmbH)

Im Ergebnis der in 2005 durchgeführten Nachrechnung ergaben sich unter anderem Defizite hinsichtlich der Biegebruch- und Schubtragfähigkeit des Überbaus. Darüber hinaus wurden eine Vielzahl historischer, konstruktiver Schwachstellen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit festgestellt. Trotz einer umfangreichen Grundinstandsetzung und dem Einbau externer Spannglieder wurde aufgrund der mangelhaften Schubtragfähigkeit eine Restnutzungsdauer von 15 bis 20 Jahren mit Neubau im Jahr 2028 festgelegt. Aufgrund der hohen baukulturellen Bedeutung der Nibelungenbrücke wurde in der jüngsten Vergangenheit beschlossen, die Brücke durch geeignete lebensverlängernde Maßnahmen über das Jahr 2028 hinaus nutzen zu können. Dabei sollen auch digitale Methoden zur Bestandsbewertung und Zustandsprognose herangezogen werden.

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 2388 „Hundert plus – Verlängerung der Lebensdauer komplexer Baustrukturen durch intelligente Digitalisierung“ (kurz: SPP 100+), initiiert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), soll eine beispielhafte konzeptionelle und grundlegende Neuausrichtung der derzeitigen Instandhaltungsstrategie von Infrastrukturbauwerken entwickelt werden. Die Nibelungenbrücke wurde hierfür als prototypisches Pilotprojekt ausgewählt. In einem Pilotbereich des Bauwerks (linksrheinische Seitenöffnung) wurde die äußere Bauwerksgeometrie mittels Laserscans und Photogrammetrie erfasst. Aktuell ist vorgesehen, den inneren Zustand durch zerstörungsfreie und -arme Prüfverfahren (Georadar, magnetinduktive Aufnahmen, Ultraschalluntersuchungen) zu inspizieren. Für das Structural Health Monitoring (SHM) wurden, basierend auf einer Sensitivitätsanalyse, insgesamt 12 Messmaßnahmen zur Erfassung von Umwelteinflüssen, Bauwerksreaktionen (Längsverschiebung, Neigung, Beschleunigung, Betondehnung) und Verkehrseinflüssen abgeleitet. In einer parallel laufenden Nachrechnung Stufe 4 wird das Querkraftdefizit unter Berücksichtigung der Ergebnisse der bauwerksdiagnostischen Untersuchungen (Materialkennwerte, tatsächliche innere und äußere Geometrie) detailliert untersucht. Das Modell soll anhand von Messergebnissen von Belastungsfahrten kalibriert werden. Im Ergebnis der FE-Berechnungen werden zum einen kritische Bereiche festgelegt, für die ein Messprogramm entwickelt wird. Zum anderen werden kritische Schwellwerte für die Messgrößen festgelegt, die auf Tragfähigkeitsdefizite hinweisen und Handlungsbedarf aufzeigen.

Insgesamt soll durch den Einsatz von Monitoring nebst weiteren Methoden die Lebensdauer der Nibelungenbrücke bedeutend verlängert werden.

Anwendungsfall 060: Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen

Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation

An einem bestehenden Bauwerk werden Ertüchtigungen (Instandsetzungen oder Verstärkungen) durchgeführt, deren Wirksamkeit überwacht werden soll.

Umsetzung

Durch Messungen vor und nach Ausführung der Ertüchtigungsmaßnahme kann die Wirksamkeit der Maßnahme sowohl lokal als auch global nachgewiesen werden. Dazu werden die Messwerte bzw. Tragverhalten vor und nach der Ausführung miteinander verglichen. Die Messungen können im Rahmen von Belastungsfahrten (siehe AwF 070) durchgeführt werden.

Auch kann durch vorangehende Messungen belegt werden, dass gewisse Grenzwerte (bspw. Schwinggeschwindigkeiten oder Beschleunigungen) während des normalen Betriebes eingehalten sind und Verkehrseinschränkungen während der Umsetzung entsprechender Maßnahmen entfallen können [2].

Nutzen

Es erfolgt eine Überprüfung der Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen durch die begleitenden Messungen.

Auch kann der Entfall ggf. notwendiger Verkehrseinschränkungen während der Ausführung entsprechender Maßnahmen erfolgen.

Projekt-/Praxisbeispiel

Monitoring von Querrahmenrissen an der Köhlbrandbrücke Hamburg:

Im Rahmen der Hauptprüfung im Frühling 2019 wurden im Bereich der Strombrücke Anrisse in den Ecken der Querrahmen des Hohlkastenprofils festgestellt. Die Schäden sind an den stegzugewandten Anschlüssen der Fahnenbleche aufgetreten. Als Ursache wurde eine zu hohe Anzahl an Lastwechseln sowie eine mangelhafte Geometrie zur Lastverteilung vermutet. Die Rahmenecken wurden daraufhin saniert und die Knotenbleche geometrisch optimiert.

Zur Bewertung der Effektivität der Maßnahme wurden vor der Sanierung Dehnungsmessstreifen appliziert. Hiermit wurden verteilt über den Querschnitt der Querrahmen die Dehnung erfasst, woraus Dehnungs- und damit Spannungsverläufe abgeleitet werden konnten. Mit Hilfe von Belastungsfahrten vor und nach der Sanierung konnten Spannungsverläufe unter definierten Lasten miteinander verglichen werden.

Die Effektivität der Maßnahmen konnte damit nachgewiesen werden.



Bild 14: Blick ins Innere des Stahl-Hohlkastens mit Querrahmen vor Sanierung (Foto: MKP GmbH)

Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Überwachung der durch Schwerverkehr induzierten Erschütterungen vor bzw. während des Betonierens: Da Vibrationen den Erhärtungsprozess des Betons negativ beeinflussen können, sind Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeiten einzuhalten. Um auf Verkehrseinschränkungen, wie bspw. ein LKW-Fahrverbot, zu verzichten, kann die Einhaltung der Grenzwerte durch ein vorangehendes Monitoring belegt werden.

Anwendungsfall 070: Belastungsversuche / dynamische Versuche**Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen****Straßen- und Brückenbau**

Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau
--------	-------	------------------------------	---------

Ausgangssituation

Es werden an einem bestehenden Bauwerk erhebliche Tragreserven vermutet, jedoch können diese rechnerisch nicht nachgewiesen werden. Ziel ist, das tatsächliche Tragwerksverhalten besser abzubilden, numerische Modelle zu kalibrieren (Systemidentifikation) und dadurch Tragwerksreserven zu erschließen.

Das entsprechende Tragwerk kann auch schadensfrei sein.

Bei der Anwendung neuartiger Bauweisen oder bei Bauwerken, denen aufgrund ihrer Größe oder Lage im Streckennetz besondere Bedeutung zukommt, können für die Inbetriebnahme ebenfalls Belastungsversuche durchgeführt werden.

Umsetzung

Das für Belastungsversuche ausgelegte Monitoring ist in erster Linie als einmalige Kurzzeitmessung zu verstehen. Es werden in der Regel globale Systemparameter (Verformung, Dehnungen, Beschleunigungen) zur Erfassung der Tragwerksreaktionen überwacht.

Grundsätzlich werden bekannte (zuvor definierte) Belastungen auf das Bauwerk aufgebracht. Dazu wird in der Regel ein separates Konzept vom Fachplaner Monitoring erstellt. Diese basiert auf modellbasierten Voruntersuchungen. Soll eine Systemidentifikation oder die Bestimmung real auftretender Tragwerksreaktionen erfolgen, so werden die Versuche i.d.R. auf Gebrauchslastniveau durchgeführt. Die Ergebnisse werden anschließend zur Kalibrierung des Rechenmodells verwendet und/oder um die Nachweise zu führen [2]. Auch ein messwertgestützter Nachweis unter direkter Verwendung der Messergebnisse ist in manchen Fällen möglich. Dabei können in Abhängigkeit der Aufgabenstellung sowohl Verkehrsbelastungen mit schweren Fahrzeugen auf das Bauwerk aufgebracht oder hydraulische Versuchstechnik genutzt werden. Durch den Einsatz von bspw. Schwingungsanregern oder auf der Grundlage ambienter dynamischer Anregungen kann aus am Bauwerk gemessenen Schwingungsdaten die Schwingungscharakteristik des Bauwerks bestimmt werden, die ebenfalls eine Systemidentifikation ermöglichen. Auf Grundlage von kalibrierten Rechenmodellen können Nachweise der Standsicherheit geführt werden. Hierbei werden die kalibrierten Modelle häufig zur Ermittlung von Beanspruchungen im Tragwerk verwendet.

Werden die Belastungsversuche als Messungen zur Inbetriebnahme durchgeführt, ist das Ziel der Abgleich des prognostizierten mit dem tatsächlichen Lastabtrages bzw. die Bestätigung der rechnerischen Annahmen [2], [3].

Bestehen auch unter Berücksichtigung des realen Lastabtrages bei der Nachrechnung eines bestehenden Bauwerks weiterhin Defizite, kann das Monitoring ggf. in eine Dauerüberwachung zur Erfassung von Zustandsänderungen (AwF 020) überführt werden.

Durch Belastungsversuche kann ebenfalls der Nachweis einer ausreichenden Tragsicherheit erbracht werden (Probelastung). Ziel ist hierbei, eine vorab festgelegte Versuchsziellast auf die Brücke aufzubringen und darauf aufbauend die vorhandene Tragwerkszuverlässigkeit nachzuweisen [23]. Zur rechtzeitigen Erkennung und ggf. vorzeitiger Beendigung des Versuchs vor Eintreten einer Schädigung wird die Belastung stufenweise gesteigert und die Tragwerksreaktion kontinuierlich messtechnisch überwacht. Weiterhin sind im Vorfeld Versuchsziellastkriterien zu definieren, um eine frühzeitige Beurteilung des Zustandes zu erlauben. Solche Versuche dürfen nur selbstsichernd durchgeführt werden [2].

Nutzen

Durch eine Verbesserung der rechnerischen Annahmen für Einwirkungen und Widerstände bzw. die Kalibrierung des Rechenmodells über die Erfassung des realen Lastabtrages können sich für Bestandstragwerke günstigere Ergebnisse im Rahmen einer Nachrechnung ergeben. Bei Neubauten werden die Annahmen aus der Planung überprüft.

Es kann ebenfalls der direkte Nachweis einer ausreichenden Tragsicherheit eines Bestandsbauwerks über Belastungsversuche erbracht werden.

Projekt-/Praxisbeispiel

Belastungsversuche an der Fuldabrücke in Bad Hersfeld:



Bild 15: Belastungsfahrzeuge auf der Fuldabrücke mit temporärer Messstation (Foto: MKP GmbH)



Bild 16: Messung der Durchbiegung des Überbaus mittels Wegaufnehmer (Foto: MKP GmbH)

Die Fuldabrücke in Bad Hersfeld überführt die Berliner Straße zentrumsnah und stellt damit einen wichtigen Verkehrsanschlusspunkt dar. Das Bauwerk wurde Ende der 60er Jahre in Spannbetonbauweise hergestellt. Der Überbau ist als 6-feldriger Durchlaufträger mit Hohlkastenquerschnitt ausgebildet. Bereits während der Bauzeit und in den ersten Jahren der Nutzung wurden verschiedene Mängel (Veränderungen der Überbaugeometrie durch Gerüstabsenkungen, Risse in der Bodenplatte des Überbaus, laterale Verformungen des Überbaus) festgestellt. Es ist geplant, das Bauwerk im Falle einer erfolgreichen Nachrechnung zu ertüchtigen.

Zur Messstellenkalibrierung mit dem Ziel der Erfassung der Beanspruchung infolge Verkehrslast wurden Belastungsversuche durchgeführt. Hierdurch kann eine aussagekräftige Beziehung zwischen der gemessenen Dehnung und der Belastung hergestellt werden. Ergänzend zum handelt es sich um Durchbiegungs- und Neigungsmessungen, mit denen neben den horizontalen Verformungen

auch die vertikalen Verformungen des Überbaus erfasst werden können. Die vertikalen Verformungen des Überbaus wurden dabei durch Wegaufnehmer erfasst, die an einer Stahlkonstruktion am Boden unter der Brücke befestigt sind. Es wird die vertikale Verschiebung eines Gewichts gemessen, das mittels eines Drahtes oder Stabes an der Unterseite des Überbaus aufgehängt ist, siehe Bild 16.

Als Belastungsfahrzeuge wurden Muldenkipper eingesetzt. Für die Auswertung besonders wichtig ist die Kenntnis über Achslasten und Achsabstände der Fahrzeuge. Die Belastungsfahrten selbst unterteilten sich in Überfahrten auf zuvor definierten Fahrspuren mit konstanter Schrittgeschwindigkeit sowie statischen Laststellungen. Während der Versuche war die Brücke für den Verkehr gesperrt. Aus den erfassten Messdaten wurden Einflusslinien für die Verformungsgrößen ermittelt, mit denen im Anschluss das der Nachrechnung zugrunde liegende Modell kalibriert werden kann.

Durch eine Wiederholung der Belastungsfahrten zu einem späteren Zeitpunkt besteht zusätzlich die Möglichkeit, Veränderungen der Steifigkeit im Bereich des Bauwerks zu identifizieren.

Belastungsversuche an der Köhlbrandbrücke Hamburg:

An der Köhlbrandbrücke in Hamburg (zur Beschreibung des Bauwerks siehe AwF 030) wurden mit dem Ziel der Kalibrierung des numerischen Modells unter bekannten Randbedingungen Belastungsversuche durchgeführt. Das numerische Modell diente dem Zweck der sensorgestützten Überwachung des Beulproblems der Strombrücke. Neben den Messungen an den Querrahmen des Überbaus wurden ebenfalls Messungen unter ambienter Anregung (ohne Verkehr) durchgeführt.



Bild 17: Betonpumpen als Belastungsfahrzeuge auf der Köhlbrandbrücke (Foto: MKP GmbH)

Für die Schwingungsmessungen wurden Beschleunigungssensoren an den Tragseilen einer Seilharfe sowie im Bereich der Kappen des Überbaus installiert. Die Dehnungen im Überbau wurden mittels Dehnungsmessstreifen (T-Rosetten) verteilt über insgesamt 7 Messquerschnitte erfasst. Zusätzlich wurden während der Versuche die Bauteil- und Lufttemperatur sowie weitere Umgebungsbedingungen (Wind, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag) messtechnisch erfasst.

Neben der ambienten Messung der Seilbeschleunigungen wurden ausgewählte Seile ebenfalls gezielt händisch angeregt, um ein ausgeprägtes Schwingen und Ausschlagen zu erzeugen. Die Belastungsfahrten mit insgesamt vier Betonpumpen als Belastungsfahrzeuge mit bekannten Achslasten und Achsabständen erfolgten sowohl als langsame Überfahrten (5 km/h) als auch mit höherer Geschwindigkeit (20 km/h). Hierdurch konnten auch die dynamischen Auswirkungen (Erhöhung der Beanspruchungen bei höheren Geschwindigkeiten) ermittelt werden. Zusätzlich wurden statische Laststellungen angefahren. Durch den Einsatz mehrerer Belastungsfahrzeuge konnten insgesamt höhere Lasten und auch asymmetrische Laststellungen aufgebracht werden.

Alle Versuche erfolgten ohne Verkehr.

Die Beschleunigungsmessungen an den Seilen verfolgten das Ziel, die Seilkräfte zu ermitteln und so den Spannungszustand des Überbaus unter ständigen Einwirkungen abschätzen zu können. Durch die gezielte Anregung einzelner Seile konnten weiterhin die Dämpfungsparameter ermittelt werden.

Aus den Überfahrten wurden anschließend Einflusslinien ermittelt und mit dem numerischen Modell abgeglichen.

Im Ergebnis konnte das FE-Modell die gemessenen Beanspruchungen gut abbilden und für weitere Berechnungen verwendet werden.

Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Ermittlung der Hängerkräfte von Netzwerkbogenbrücken mit Hilfe von Dehnungsmessungen oder alternativ über Messung der Eigenfrequenzen mit Beschleunigungsaufnehmern

Anwendungsfall 080: Prädiktives Lebenszyklusmanagement

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen

Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation

Der Bauwerksbestand (bestehend aus einem oder mehreren Einzelbauwerken) soll über den gesamten Lebenszyklus hinweg optimal, d.h. ökologisch, sozial und ökonomisch nachhaltig, verwaltet werden. Um die hierfür notwendigen Entscheidungen hinsichtlich umzusetzender Maßnahmen treffen zu können, ist Wissen über den aktuellen Zustand und die zeitliche Entwicklung unabdingbar. Eine Möglichkeit zur Schaffung von Informationen über den Bauwerkszustand stellt Monitoring dar.

Die Planung bzw. Initiierung von Monitoringmaßnahmen mit der konstruktiven Planung von Messpositionen (z. B. Kabelführungen) und der Einbau von intelligenten Fahrbahnübergängen oder intelligenten Lagern kann bereits Teil der Planung des Tragwerks selbst sein, sodass noch keine Schäden am Bauwerk vorliegen. Auch für bestehende Bauwerke ist ein prädiktives Lebenszyklusmanagement, welches durch Monitoring unterstützt wird, möglich.

Umsetzung

Eine ausführliche Definition von prädiktivem Lebenszyklusmanagement findet sich in Kapitel 2.3.3.

Die aus dem Monitoring bzw. den Messdaten generierten Informationen werden als Performance Indikatoren (PI) bezeichnet. Die PIs werden objektspezifisch festgelegt. Abhängig vom Bauwerkstyp und Bauteil ergeben sich unterschiedliche Schädigungsmechanismen, die identifiziert werden müssen und aus denen PIs sowie zugehörigen Monitoringmaßnahmen abgeleitet werden [6]. Neben den Schädigungsmechanismen können sich PIs ebenfalls aus neuralgischen Bereichen des Tragwerks ergeben. Dies können bspw. Bauteile sein, die für die Funktionstüchtigkeit des Bauwerks unabdingbar sind oder aber hoch ausgelastete Bereiche, die in der Statik oder Nachrechnung identifiziert wurden.

Der Brückenbestand in Deutschland besteht zu einem überwiegenden Teil aus Betonbrücken (Stahlbeton und Spannbeton, insgesamt 91 % nach Anzahl der Bauwerke) [24]. Typische Schäden bei dieser Bauart sind nach [25]:

- am Überbau: freiliegende Bewehrung, Risse, Abplatzungen und Ausbrüche,
- Am Vorspannsystem: Schäden am Vorspannsystem (z. B. Spanngliedbrüche oder gerissene Koppelfugen),
- am Unterbau: freiliegende Bewehrung, Risse, Abplatzungen und Ausbrüche,
- an den Lagern: Korrosion, Schäden am Elastomer, fehlerhafte Lage,
- an den Fahrbahnübergangskonstruktionen: Materialermüdung, Undichtigkeiten,
- an der Ausrüstung: Risse bzw. Beschädigungen an Belag und Abdichtung, Geländer und Schutzeinrichtungen, Leitungen und Entwässerung.

Sind die maßgebenden Schadensmechanismen und die neuralgischen Bereiche identifiziert, können Monitoringmaßnahmen abgeleitet werden, die Informationen über die Entwicklung des Bauteil- bzw. Tragwerkszustandes sowie Hinweise auf ein mögliches Versagen geben. Hierbei gilt es zu beachten, dass lediglich diejenigen Schädigungsprozesse durch ein Monitoring erfasst werden können, bei denen die Schädigung zu einer Änderung der Formänderungsgrößen (bspw. Änderung der

Dehnungen infolge Längskräften, Krümmung oder Durchbiegung infolge von Biegemomenten) führt [6] oder die Schäden direkt erfasst werden (Schallemissionsmonitoring, Korrosionsmonitoring, etc.). Grundsätzlich können auch mehrere Monitoringmaßnahmen notwendig werden, um aussagekräftige Informationen für einen PI zu generieren. Bspw. können im Fall von Spannungsrissskorrosionsgefährdung sowohl lokale Schallemissionsmessungen als auch globale Messungen von Neigungen oder der Bauwerkstemperatur zum Einsatz kommen. Besonders aus globalen Maßnahmen lassen sich für verschiedenste PIs Informationen ableiten. Lokale Messungen liefern lediglich für den erfassten Bereich des Tragwerks Informationen und sind damit nur bedingt aussagekräftig bzw. muss die maßgebende Stelle im Vorhinein bekannt sein.

Nutzen

Die aus den Messdaten extrahierten Informationen bilden als Performance Indikatoren eine Grundlage für die Zustandsbewertung eines Bauwerks. Die kontinuierliche Überwachung eines Bauwerks über lange Zeiträume ermöglicht eine Früherkennung von Veränderungen im System. Hierdurch können Entscheidungen hinsichtlich Instandsetzungs-, Verstärkungs- oder Ersatzneubaumaßnahmen mit ausreichend zeitlichem Vorlauf geplant und die Instandsetzungen auf Netzebene abgestimmt ausgeführt werden. Die Monitoringdaten können helfen, die Restnutzungsdauer besser einzuschätzen. Wird ein kritischer Zustand und damit die Verkürzung der Restnutzungsdauer erkannt, kann unmittelbar gehandelt werden [6]. Weiterhin können auch Zustände erkannt werden, die besser sind als erwartet, sodass sich die rechnerische Restnutzungsdauer erhöht.

Projekt-/Praxisbeispiel

Beim prädiktiven Lebenszyklusmanagement handelt es sich um einen zukünftigen Anwendungsfall, aktuell werden erste Konzepte entwickelt. Als Beispiele seien die Köhlbrandbrücke in Hamburg (smartBRIDGE, [26]) oder auch die EÜ Filstalbrücke genannt.

Digitaler Zwilling der Filstalbrücken [27]:

Bei den Filstalbrücken handelt es sich um zwei parallel verlaufende eingleisige Eisenbahnbrücken auf der Strecke Stuttgart-Ulm im Südwesten Deutschlands. Die Bauwerke sind als semiintegrale Tragwerke über sechs Felder mit einer Länge von 485 m und 472 m in Spannbetonbauweise ausgeführt. Mit einer Höhe von 75 m sind die Filstalbrücken die dritthöchsten Eisenbahnbrücken Deutschlands. Die Abweichung von den im Eisenbahnbrückenbau geltenden Bauweisen und normativen Grundlagen erfordern eine automatische und sensorbasierte Überwachung neuralgischer Bereiche. Hierzu gehören unter anderem die Längsfesthaltungen, die aus zwei sich kreuzenden Stahllamellen bestehen und deren Funktionstüchtigkeit für die Standsicherheit relevant ist.



Bild 18: Die Filstalbrücken im Bau (Foto: MKP GmbH)

Zur Überwachung des Zustandes des Federlamelle sind Dehnungsmessstreifen zur Erfassung lokaler Beanspruchungen auf der Federlamelle installiert, weiterhin werden Bauteiltemperaturen mittels in den Beton eingelassener Temperatursensoren und Fugenverformungen durch Inklinometer und Wegaufnehmer erfasst. Durch die Kenntnis des Temperaturprofils kann eine Separation der erfassten Verformungen erfolgen. Aus den erfassten Dehnungen an der Federlamelle können Schnittgrößen berechnet werden. Da sich die Längskraft in der Federlamelle durch die zeitabhängigen Kriechverformungen stetig vergrößert, wurden Grenzwerte für die maximalen Beanspruchungen der Federlamelle festgelegt.



Bild 19: Federlamelle zur Längsfesthaltung (Foto: MKP GmbH)

Die aufgezeichneten Messdaten werden automatisch von der Messanlage vor Ort fernübertragen und automatisiert ausgewertet. Die Auswertung umfasst u. a. Algorithmen zur Umrechnung der elektrischen in physikalische Größen, die Bereinigung von Messfehlern sowie die Umrechnung der physikalischen in die zu bewertende Größe (Schnittgrößen). Anschließend erfolgt eine automatisierte Bewertung, wobei eine Gegenüberstellung mit den zuvor definierten Grenzwerten stattfindet. Bei Schwellwertüberschreitungen werden die entsprechenden Stakeholder nach einer Plausibilitätsprüfung benachrichtigt und vordefinierte Gegenmaßnahmen können eingeleitet werden.

Die Schwellwerte werden dabei so gewählt, dass notwendige Instandsetzungsmaßnahmen frühzeitig erkannt und die Instandsetzungsplanung mit ausreichender Vorlaufzeit in die bestehenden Prozesse eingetaktet werden können.

Die Bewertung des Brückenzustandes erfolgt im digitalen Zwilling mit einer Zustandskategorie, die für jedes Brückenelement auf Grundlage der Schäden und Mängel sowie ihrer Eigenschaften vergeben wird. Neben der Zustandskategorie erfolgt die Bewertung mit Hilfe eines Handlungsbedarfes, der auf die Notwendigkeit einer Sonderprüfung aufmerksam macht.

Zur Bewertung der Tragsicherheit werden die aus dem Monitoring gewonnenen Informationen in messwertgestützte Nachweise abgeleitet und durch einen Indikator dargestellt. Dieser besteht aus dem Quotienten der auf Basis der rechnerischen Nachweise aktuell ermittelten zur zulässigen bzw. angestrebten Streckenklasse.

Alle Informationen werden auf einer benutzerfreundlichen Plattform dargestellt und sind jederzeit einsehbar.

Anwendungsfall 090: Referenzzertifikat

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen

Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation

Für ein Bauwerk steht bereits in der Planungsphase fest, dass im weiteren Lebenszyklus eine Überwachung erfolgen soll. Um den Ausgangszustand für die Bewertung aller zukünftigen Messungen zu erfassen, wird am (fertiggestellten) Neubau eine globale „Nullmessung“ durchgeführt.

Umsetzung

Mit Hilfe von Monitoring sind durch die kontinuierliche Überwachung eines Bauwerks die Erkennung von Veränderungen des Systems möglich. Hierfür ist jedoch die Kenntnis des Anfangszustandes als Referenz notwendig, da erst der Vergleich der Ergebnisse einer Messung mit einem früheren Zustand Aussage über ggf. eingetretene Zustandsveränderungen ermöglicht. Dieser globale Referenzzustand soll das Trag- und Verformungsverhalten der Brücke im möglichst ungeschädigten, voll funktionstüchtigen Ausgangszustand abbilden. Die Durchführung dieser „Nullmessung“ sollte daher bei Verkehrsübergabe erfolgen. Um die Vergleichbarkeit mit späteren Folgemessungen zu gewährleisten, sind Umwelteinflüsse (bspw. Temperatur) während der Messungen zu erfassen. Die in diesem Zusammenhang erfassten Messdaten sowie die extrahierten Informationen müssen für Neubauten dann in zukunftssicheren Formaten in digitaler Form beim Baulastträger als eine Art „Referenzzertifikat“ hinterlegt werden [6]. Der Abgleich von Folgemessungen mit dem Referenzzustand dient als Entscheidungsgrundlage für den Einsatzzeitpunkt erforderlicher Maßnahmen (bspw. Ertüchtigungen, dauerhaftes Monitoring) [14].

Teil der Nullmessungen im Rahmen des Referenzzertifikates kann auch die Durchführung von Belastungsversuchen (siehe AwF 070) sein. Die Nullmessungen können ebenfalls für die Kalibrierung von FE-Modellen der Tragstrukturen verwendet werden.

Bei der Nullmessung handelt es sich dabei folglich zunächst um eine einmalige Kurzzeitmessung zur Erfassung der systembeschreibenden Parameter. Die hierfür eingesetzte Messtechnik kann bei Bedarf in ein Dauermonitoring im Rahmen des prädiktiven Lebenszyklusmanagements integriert werden. Neben Monitoringmaßnahmen können auch diagnostische Untersuchungen im Rahmen des Referenzzertifikates eingesetzt werden.

Nutzen

Durch die Erfassung eines globalen Referenzzustandes des Bauwerks im ungeschädigten, voll funktionstüchtigen Ausgangszustand werden die grundlegenden Systemparameter erfasst. Alle weiteren Folgemessungen können mit diesem Zustand abgeglichen werden und geben Aufschluss über Systemveränderungen.

Ebenfalls können durch die messtechnische Erfassung des Referenzzustandes numerische Modelle kalibriert und Annahmen in der Berechnung verifiziert werden, was bspw. bei neuen Bauarten aufschlussreich ist.

Projekt-/Praxisbeispiel

Messungen an der EÜ Oder bei Küstrin:

Bei der EÜ Oder handelt es sich um eine vierfeldrige Stahlverbundbrücke, bestehend aus einer Netzwerk-Stabbogenbrücke mit einer Stützweite von 130 m und einer Vorlandbrücke mit Stützweiten von jeweils ca. 45 m. Der Überbau der Strombrücke besteht aus einer Fahrbahnplatte in Verbundbauweise, die an Schrägseilen aus Carbon aufgehängt ist.

Zur Überprüfung der rechnerischen Annahmen wurden messtechnische Untersuchungen gefordert.

Es werden die Eigenfrequenzen der Hänger zur Ermittlung der Normalkraft in den Stäben messtechnisch untersucht. Durch Erfassung der Beschleunigungen unter transienter Anregung und Auswertung des Messsignals mit Berechnung der Eigenfrequenzen kann anschließend über weitere mathematische Zusammenhänge auf die Seilkraft geschlossen werden.



Bild 20: EÜ Oder im Bau (Foto: MKP GmbH)

Weiterhin wird der Risszustand der Fahrbahnplatte erfasst. Herausforderung hierbei ist die Zugänglichkeit (Endlage des Bauwerks über Fluss). Die gesamte Plattenunterseite wird mittels Drohnenbefliegung aufgenommen und eine Risskartierung erstellt. Durch geeignete Wahl der Kamera können Risse ab einer Größe von 0,1 mm erkannt werden.

Zusätzlich zur Risskartierung auf Grund der Drohnenbefliegung werden faseroptische DFOS-Sensoren (Distributed Fiber Optic Sensing) direkt in die Betonfahrbahnplatte zur Überwachung der Risse eingebettet. Diese Liniensensoren ermöglichen eine genaue und ortsaufgelöste Messung der Risse entlang der Faser. Hierdurch kann auch bei Einschränkungen der Sichtbarkeit der gesamten Plattenunterseite vor Inbetriebnahme (bspw. durch Korrosionsschutzsanierung und zugehöriges Hängegerüst) die Erfassung von Rissen sichergestellt werden. Die faseroptische Messung stellt dabei eine Redundanz zum bildbasierten Verfahren dar. Durch die quasikontinuierliche Erfassung der Dehnungen kann über die Ermittlung der Dehnungsänderungen auch die Entwicklung von Rissen verfolgt werden. Im Gegensatz zum bildgebenden Verfahren, bei dem flächige Informationen erfasst werden, werden durch die faseroptische Messung die Entwicklung des Rissbildes entlang des Sensors erfasst. Der Einbau der Sensoren erfolgt bereits vor der Betonage der Fahrbahnplatte, sodass von einem rissfreien Ausgangszustand (Null-Zustand) für die Messung ausgegangen werden kann.

Bei allen Messungen wird der Temperaturzustand des Tragwerks erfasst, um die Einflüsse aus statischer Belastung (Eigengewicht + Vorspannung) von den thermischen Beanspruchungen separieren und einen Vergleich mit dem numerischen Modell anstellen zu können.

Die Messungen der Hängerkräfte als auch die Erfassung des Rissbildes vor Inbetriebnahme des Bauwerks ermöglichen zum einen den Abgleich mit den Annahmen aus der Planung und bilden zum anderen den Referenzzustand für zukünftige Betrachtungen ab. Für die EÜ Oder sind erneute Messungen vier und zehn Jahre nach Inbetriebnahme geplant.

Anwendungsfall 100: Bauzeitliche Messungen

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen

Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation

Werden in der Planung eines Tragwerks besondere Annahmen hinsichtlich Bauzuständen oder neuartige Bauweisen getroffen, können ebendiese über baubegleitende Messungen überprüft werden.

Auch die Überwachung besonderer Bauzustände während des Rückbaus kann durch Messungen erfolgen.

Umsetzung

Besondere Bauzustände können messtechnisch begleitet werden. Neben der Überwachung von Tragwerksreaktionen in den einzelnen Bauzuständen können auch Witterungsbedingungen überwacht werden, sofern es hierbei definierte Randbedingungen einzuhalten gibt (bspw. Überwachung der Windgeschwindigkeit).

Es gilt hierbei zu unterscheiden zwischen sicherheitsrelevanten aktiven Überwachungen und Messungen, die der Informationsgewinnung dienen. Im Fall einer aktiven Überwachung werden die Ergebnisse der Messungen vom Bedienpersonal direkt interpretiert und als Regelungsgröße für die Prozesssteuerung eingesetzt werden. Hierfür sind im Vorfeld durch den Planer Arbeitsanweisungen zu erstellen. Alle notwendigen Zielwerte für die überwachten Größen sowie die zu ergreifenden Kontroll- und Korrekturmaßnahmen werden in der Arbeitsanweisung vorgegeben, die beispielsweise als Teil des Messkonzeptes erstellt werden kann. Da die Messergebnisse in diesem Fall direkt als

Entscheidungsgrundlage der unmittelbaren Baudurchführung dienen, müssen die Daten in Echtzeit analysiert und dargestellt werden. Ist im Projekt ebenfalls eine automatische Alarmierung vorgesehen, bestehen erhöhte Anforderungen an Verfügbarkeit und Redundanz des Systems [8].

Dem gegenüber werden bei Überwachungen mit dem Ziel der Informationsgewinnung bspw. als Grundlage für die Definition oder Prüfung von Annahmen, zur Analyse des Verhaltens, zur Feststellung der Entwicklung eines Zustandes oder zur Beweissicherung die erfassten Daten zunächst gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet. Es bestehen geringere Anforderungen an die Ausfallsicherheit und Redundanz des Messsystems [8].

Beim Einsatz von neuartigen Bauweisen kann die Überwachung des Last-Verformungsverhaltens oder der Spannungszustände während der Bauphase sinnvoll sein.

Das im Rahmen von bauzeitlichen Messungen verwendete Monitoringsystem kann bei Bedarf anschließend in ein Dauermonitoring überführt werden, siehe hierzu „Anwendungsfall 080: Prädiktives Lebenszyklusmanagement“.

Die Überwachung bestimmter Bauzustände im Neubau kann direkt übertragen werden auf den Rückbau.

Nutzen

Es erfolgt die Überprüfung und Absicherung kritischer Zustände während der Durchführung von Arbeiten sowohl im Neu- als auch im Rückbau. Im Fall von sicherheitsrelevanten Überwachungen kann durch den Abgleich der Messwerte mit zuvor definierten Grenzwerten kritischen Zuständen direkt entgegengesteuert werden, sodass diese ausgeschlossen werden.

Neben dem Abgleich mit den rechnerischen Annahmen erfolgt bei der Überwachung von Tragwerksreaktionen beim Einsatz neuartiger Bauweisen ein Informations- und Erkenntnisgewinn, der eine Risikominimierung bewirkt.

Projekt-/Praxisbeispiel

Baubegleitende Messungen an verschiedenen Bauwerken auf der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle [28]:

Im Zuge des 2015 eröffneten Teilabschnitts der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle befinden sich mehrere Talbrücken. Die Ausbildung als semi-integrale Tragwerke stellte für das damalige Entwurfskonzept der DB Netz AG eine völlige Neuheit dar, der den bisherigen Erfahrungsbereich verlies. Seitens des EisenbahnBundesamtes wurden darum erhöhte Anforderungen an die Planung, Herstellung und Überwachung der Bauwerke gestellt, die mit Auflagen einhergingen. Neben der Überwachung einiger oberbauspezifischer Themen sollte das tatsächliche Verformungsverhalten der Tragwerke infolge Temperatur, Kriechen und Schwinden sowie im Übergangsbereich zwischen den Tragwerksblöcken überwacht werden. Ziel der Messungen war die Überprüfung der Übereinstimmung mit den rechnerisch ermittelten Größen. Sie wurden jedoch auch genutzt, um im Laufe der Realisierung eine versuchsgestützte Bemessung durchzuführen.

Bei den instrumentierten Brücken handelt es sich um die Scherkondetalbrücke (Bild 22), Gänsebachtalbrücke (Bild 21), Unstruttalbrücke (Bild 23), Stöbnitztalbrücke (Bild 24) sowie die Saale-Elstertalbrücke, bei der es sich mit einer Gesamtlänge von 8,2 km um die längste Eisenbahnbrücke Deutschlands handelt.



Bild 22: Scherkondetalbrücke (Foto: MKP GmbH)



Bild 21: Gänsebachtalbrücke (Foto: MKP GmbH)

Für jedes Bauwerk wurde ein spezifisches Messkonzept erstellt. Die Installation des Monitorings erfolgte baubegleitend. Die Schwerpunkte der Messungen stellten sich wie folgt dar:

- Verformungen in Längsrichtung, Lateral- und Höhenversatz am Überbauende
- Dehnungen in den monolithischen Knoten durch Messung an der Bewehrung mittels DMS
- Dehnungen im Überbau (Feldmitte) mittels DMS an der Bewehrung
- Vertikale und horizontale Beschleunigungen
- Rissmessungen an den monolithisch angeschlossenen Pfeilern



Bild 24: Stöbnitztalbrücke (Foto: MKP GmbH)

Neben den Verformungsmessungen wurden die Querschnittstemperaturen über in den Beton eingelassene Temperatursensoren erfasst.

Aus dem Zusammenhang zwischen Längenänderung der Überbauten und Querschnittstemperatur konnten die Temperatursdehnungskoeffizienten ermittelt werden, die bei einigen Bauwerken im Vergleich zur Bemessungsnorm deutlich größer waren. Grund für die Abweichungen stellen die verwendeten Zuschlagstoffe des Betons dar. In der Folge resultieren größere Beanspruchungen für die Fugenkonstruktionen und die monolithischen Anschlüsse der Unterbauten.

Aus den erfassten Dehnungen im Bereich der monolithischen Anschlüsse können die Krümmungen der Pfeilerköpfe ermittelt werden und aus dem Zusammenhang zwischen Krümmung und Längsverschiebung die Steifigkeitskonfigurationen der Pfeiler abgeleitet werden. Im Vergleich zu den berechneten Krümmungs-Verschiebungs-Beziehungen konnten Unterschiede von bis zu 38 % festgestellt werden, die durch geringere Baugrundsteifigkeiten erklärt werden konnten. Durch die günstigeren Bodeneigenschaften ergeben sich langfristig geringere Beanspruchungen der Pfeilerköpfe.

Die gemessenen Gesamtverformungen können in thermische und zeitabhängige, bleibende Verformungsanteile zerlegt werden. Die ermittelten Kriech- und Schwindverformungen wurden einer Vergleichsberechnung unter Berücksichtigung der Belastungs- und Herstellungsgeschichte gegenübergestellt, wobei sich signifikante Übereinstimmungen ergaben; die auf Grundlage des normativ geregelten Modells erfolgten Prognosen konnten grundsätzlich bestätigt werden.

Besonders bei langen integralen oder semi-integralen Brücken kann durch eine geeignete Bauausführung eine Reduktion der Zwangskräfte infolge der Längsverformungen des Überbaus erwirkt werden. Bei der Scherkondetalbrücke wurde das Bauwerk vom Widerlager Achse 13 in Richtung Achse 00 hergestellt mit einer temporären Festpunktsicherung in Achse 13. Die frühen Kriech- und Schwindverformungen wirkten somit entgegen der Arbeitsrichtung und erzeugten hohe negative Krümmungen in den Pfeilerköpfen. Bei Betonage des letzten Überbaufeldes erfolgte ein Festpunktwechsel und die Herstellung des endgültigen Tragsystems, wodurch sich die Wirkungsrichtung der zeitabhängigen Verformungen umkehrte und die Beanspruchung der Pfeiler deutlich reduzierte. Aufgrund der komplexen Randbedingungen ist die Prognose des tatsächlichen Verhaltens trotz sorgfältiger Planung oft schwierig; die baubegleitenden Messungen können in diesem Fall als überwachendes Werkzeug dienen.

Die durchgeführten Messungen liefern zum einen Aussagen über die Qualität und Aussagekraft der Berechnungsmodellen und ermöglichen deren Verbesserung. Zum anderen wurden wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der semi-integralen Bauweise gewonnen.

Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Ermittlung der Zwangsbeanspruchungen im frisch betonierten Bauabschnitt infolge thermischer Verformungen des Tragwerks zur Ermittlung des richtigen Zeitpunktes für das Lösen des temporären Festpunktes bei der Errichtung der semi-integralen Aurachtalbrücke
- Ermittlung der Frischbetoneigenschaften mittels ultraschallbasierter Festigkeitsmessung
- Überwachung von Pressenkräften beim Anheben bzw. Absenken von Überbauten
- Überwachung der Tragwerksreaktionen während Montagevorgängen (z. B. Messungen von Durchbiegungen, Auflager- oder Seilkräften)

- Messung der Vorspannkraft von Spanngliedern und Ankern
- synchrone Messungen des Weges an verschiedenen Gleitstellen während des Verschubs oder beim Taktschiebeverfahren

Anwendungsfall 110: Schutz von Bauwerken bei umliegenden Baumaßnahmen

Zuordnung des Anwendungsfalls zu den Projekt- bzw. Lebenszyklusphasen			
Straßen- und Brückenbau			
Planen	Bauen	Betrieb und Erhaltung	Rückbau

Ausgangssituation
Finden Baumaßnahmen in der direkten Umgebung oder auch an Teilen von bestehenden Tragwerken statt, können Einflüsse auf das Bestandstragwerk (Brückenbauwerk oder andere Gebäude) erfasst werden.

Umsetzung
Am Bestandsbauwerk bzw. dem umliegenden Bauwerk werden zusätzlich zu den üblichen visuellen bzw. geodätischen Überwachungen hinaus globale Parameter, bspw. Verformungen oder Neigungen, während der Baumaßnahme überwacht, um die Einwirkungen und Reaktionen präzise abbilden zu können.
Handelt es sich bei der Überwachung um den Ausschluss kritischer Zustände, so ist eine eindeutige und konkrete Definition der Schnittstellen und Verantwortlichkeiten in der Informationskette sowie der anschließend zu ergreifenden Maßnahmen im Vorfeld in Abstimmung mit Fachplanern, Sachverständigen und Prüfsingenieuren erforderlich [8]. Einzuhaltende Grenzwerte und einzuleitende Gegenmaßnahmen können beispielsweise als Teil des Monitoringkonzeptes im Rahmen einer Arbeitsanweisung (siehe auch AwF 100) definiert werden.

Nutzen
Durch die Überwachung globaler Parameter werden auffällige Zustandsentwicklungen, die Auswirkungen auf die Standsicherheit des Bestandsbauwerks haben können, direkt erkannt und es kann entsprechend reagiert werden. Ziel ist die Aufrechterhaltung der Verfügbarkeit und Unversehrtheit des betrachteten Bauwerks durch eine frühe Detektion und Reaktion.

Projekt-/Praxisbeispiel
Überwachung von Unterbauverformungen und Erschütterungen während des Ersatzneubaus der Schleibrücke Lindaunis:
Die EÜ über die Schlei ist eine Eisenbahnklappbrücke, die die beiden Halbinseln Schwansen und Angeln an der schmalsten Stelle des Meeresarms der Schlei verbindet.
Besonders an diesem Bauwerk ist die kombinierte Nutzung durch Straßen- und Schienenverkehr. Zusätzlich wird das Passieren von Schiffen über die Wasserstraße durch einen stündlichen Klappvorgang ermöglicht.

Der südliche Teil des Bauwerkes ist als zweifeldriges Stahlfachwerk ausgebildet. Der Klappenbereich ist ein einfeldriges Stahlfachwerk, das über ein Betonrollwiderlager als Kontergewicht bei Bedarf hochgeklappt werden kann und stellt den nördlichen Teil des Brückenbauwerkes dar. Der ehemals über einen Kettenantrieb angetriebene Klappmechanismus wird heute über eine Hydraulik betrieben.

Die Schleibrücke wird auf Grund altersbedingter Mängel und zum Ausbau verkehrstechnischer Kapazitäten durch einen Neubau ersetzt. Der Neubau wird unmittelbar neben dem Bestandsbauwerk errichtet. Um während des Baubetriebes eine unterbrechungsfreie Weiternutzung des Bestandsbauwerkes zu gewährleisten, wird dieses über ein Monitoring überwacht. Somit können Einwirkungen und Interaktionen infolge des Bauprozesses frühzeitig erkannt und die Bauarbeiten entsprechend gesteuert werden, sodass der Verkehr auf dem Bestandstragwerk möglichst ohne Einschränkungen sicher aufrechterhalten werden kann.



Bild 25: Schleibrücke Lindaunis (Foto: MKP GmbH)

Über ein vorlaufendes Monitoring wurde das Bauwerksverhalten ohne Einfluss von Bauarbeiten dokumentiert. Auf dieser Grundlage und einer Nachrechnung des Bestandsbauwerkes wurden Schwellwerte definiert, die zur Überwachung während des Bauprozesses dienen. Die Überwachung und Auswertung von Erschütterungen, Neigungen und Setzungen sämtlicher Unterbauten erfolgt voll automatisiert und mit einer sehr geringen Reaktionszeit, praktisch in Echtzeit.

Weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Überwachungen bei Abbrucharbeiten (Messungen z. B. von Verformungen, Kräften oder Schwinggeschwindigkeiten)

2.5 Zusammenstellung von Messtechnik

Die Interpretation des Begriffs Messtechnik ist in der Fachliteratur vielfältig. Im Allgemeinen umfasst Messtechnik die Zusammenstellung aller technischen Komponenten eines Monitoringsystems. Diese beinhalten nicht nur die eigentlichen Messaufnehmer bzw. Sensoren und gegebenenfalls Aktuatoren, sondern auch Komponenten der Signalübertragung sowie der Datenverarbeitung und -speicherung. Im Zentrum dieses Abschnitts steht die Sensortechnik, bei der unterschiedliche physikalische Messprinzipien zur Anwendung kommen und bei der die optimale Wahl von verschiedenen Kriterien beeinflusst wird. Im Anhang B werden die verschiedenen Sensortechniken mit ihren Funktionsweisen, ihren Vor- und Nachteilen und ihren Einsatzgrenzen kurz vorgestellt, die für unterschiedliche Anwendungsbereiche und Rahmenbedingungen geeignet sind.

Im Rahmen eines Monitorings werden zumeist mehrere Messaufgaben geplant und ausgeführt, was die Kombination unterschiedlicher Messsysteme einschließt. So werden neben den eigentlichen die Bauwerksreaktion beschreibenden Messgrößen oft Temperaturen von Bauteil und Umgebung gemessen, um deren Einfluss auf das Bauwerk und/oder den Sensor selbst bewerten zu können. Am Ende dieses Kapitels zur Messtechnik ist in einer Messaufgaben-Messtechnik-Matrix für jede Messaufgabe die einsetzbare Sensortechnik entsprechend ihrer Eignung zugeordnet.

2.5.1 Grundsätze für die Auswahl von Messtechnik

Die Messtechnik wird anhand eines zuvor erstellten und geprüften Monitoringkonzepts ausgewählt. Dieses Konzept berücksichtigt sämtliche grundlegenden Aspekte in Bezug auf die technische Umsetzung der Monitoringaufgabe in einem Monitoringsystem. Diese Aspekte umfassen neben der eigentlichen Zielsetzung der Überwachungsaufgabe unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitskriterien auch Teil- und Randaspekte, wie beispielsweise die Art und Größe des zu untersuchenden Bauwerkes, die Anforderungen an die Messgenauigkeit sowie die Anforderungen an die Auswertung und Bewertung der

Daten. Nicht zuletzt sind auch eventuelle störende technische und umweltbedingte Einflüsse zu berücksichtigen.

Je nach Zielsetzung werden im Monitoringkonzept die einzelnen Messgrößen festgelegt, die als Grundlage für die Auswahl der Messtechnik dienen [6]. Zur Festlegung der Messgrößen ist ein bautechnisch-konstruktives Verständnis von entscheidender Bedeutung. Der Erfolg einer Monitoringmaßnahme hängt in hohem Maße von der Qualität des Monitoringkonzepts ab. Aus diesem Grund sollte das Konzept grundsätzlich von einem Fachplaner Monitoring erstellt und möglichst unabhängig geprüft werden (siehe Kapitel 3.2.2 und 3.2.3).

Nachfolgend sind die verschiedenen die Auswahl von Messtechnik beeinflussenden Aspekte aufgelistet.

Bauwerk

Die geeignete Messtechnik kann sich bei verschiedenen Bauwerken aufgrund von spezifischen Nutzungs-, Konstruktions- und/oder Materialspezifikationen unterscheiden. Dabei können sowohl die Wahl der Sensorik als auch die Art der Signalübertragung durch konstruktive oder ästhetische Aspekte beeinflusst werden, zum Beispiel wenn die Kabelführung nicht möglich ist. Die Unterschiede im Materialverhalten verschiedener Werkstoffe (Beton, Stahl, Holz) erfordern häufig den Einsatz von Sensortechniken, die speziell darauf abgestimmt sind (z.B. DMS zur Dehnungsmessung an Stahlkomponenten, FOS ggf. zur Betonüberwachung). Darüber hinaus können spezifische Randbedingungen, wie beispielsweise stromführende Oberleitungen (bei denen bspw. der Einsatz von DMS nicht möglich ist), oder umwelteinflussbedingte Randbedingungen (z.B. Spritzwasserbereich o.ä.) die Verwendung von Sensoren auf der Basis bestimmter physikalischer Messprinzipien erfordern. Eine eingeschränkte Zugänglichkeit von Bauwerksbereichen kann die Wahl der Messtechnik ebenfalls erheblich beeinflussen, zum Beispiel bei der Entscheidung zwischen Laser und Schlauchwaage zur Bestimmung von Durchbiegungen oder Stützensenkungen.

Dauer des Monitorings

Bei der Auswahl der passenden Sensortechnologie muss die Langzeitstabilität der Messdaten berücksichtigt werden. Je nach Dauer und Exposition der Messungen treten bei der Messtechnik, insbesondere bei den Sensoren und ihrer Befestigung am Bauwerk, Alterungseffekte, Verschmutzungen oder Vandalismus auf, die zu einer nachlassenden Messgenauigkeit führen. Bei langfristigen Überwachungsmaßnahmen sollte die Möglichkeit einer Plausibilitätsprüfung gegenüber unabhängigen Messwerten geschaffen werden, um den Umfang einer Sensordrift beurteilen zu können. Dabei ist zu unterscheiden, ob eine vermeintliche Drift oder ein Offset auf Hardware-Effekten oder auf Veränderungen am Bauwerk beruht.

Sensor- und messsystembezogene Einflussparameter

Verschiedene die Messung beeinflussende Parameter sind von der Sensortechnik, von der Technik zur Datenerfassung als auch von der Übertragungstechnik abhängig. Die wichtigsten dieser Parameter sind:

- Messbereich,
- Messgenauigkeit,
- Empfindlichkeit,
- Messwertauflösung,
- Abtastfrequenz,
- Temperatureinsatzbereich.

Eine Erläuterung der Begriffe erfolgt im Glossar, der Teil des Anhangs A bildet.

Weitere Einflussparameter

Neben den genannten prinzipiellen Aspekten bei der Wahl der Messtechnik können weitere Faktoren eine entscheidende Rolle spielen. Genannt seien hier u.a.:

- das Erfordernis der Kompensation klimatischer Einflüsse,
- Austauschbarkeit,
- Wiederverwendbarkeit,
- Befestigung,
- Wartung,
- Netzabdeckung für Datenfernübertragung über das Mobilfunknetz,
- Spannungsversorgung.

Sensormanzahl und Sensoranordnung

Die erforderliche Sensormanzahl sowie deren Platzierung ist von der Zielstellung der Monitoringmaßnahme abhängig. Unter Umständen (Langzeitüberwachung, hoher Zuverlässigkeitsbedarf) kann es notwendig sein, durch redundante Sensoranordnung einem Informationsverlust durch ungewollten Sensorausfall entgegenzuwirken.

Kosten

Die Kosten für die Beschaffung, Installation und Betrieb der Messtechnik sowie des dazugehörigen Datenmanagements spielen in der Entscheidungsfindung zur Wahl der geeigneten Messtechnik eine bedeutende Rolle. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden sie dem Nutzen des Monitorings gegenübergestellt (vgl. Kapitel 5).

2.5.2 Komponenten des Monitoringsystems

Neben den gängigen Mess- und Monitoringsystemen, die derzeit hauptsächlich zur Überwachung von Infrastrukturbauwerken verwendet werden, findet derzeit die Entwicklung und erprobte Anwendung von IoT-basierten Monitoring-Netzwerkssystemen statt. Diese erfordern beziehungsweise bewirken im Gegensatz zu den herkömmlichen Messsystemen eine unterschiedliche Systemarchitektur. In diesem Kapitel werden vorrangig die Komponenten eines konventionellen Systems erläutert, während IoT-Systeme in einem Unterkapitel kurz vorgestellt werden. Darüber hinaus werden vermehrt bildgebende Verfahren der Digitalfotographie in Zusammenhang mit KI-unterstützter Auswertung eingesetzt und gegebenenfalls mit klassischen Monitoringsystemen kombiniert [6].

In der Fachliteratur werden die Begriffe Monitoring- oder Dauerüberwachungssystem, Messkette, Messsystem, Messeinrichtung und Messgerät uneinheitlich verwendet. Die Norm DIN 1319-1:1995-01 [29] gibt zwar Vorgaben für die Bezeichnung technischer Einrichtungen zur Messung einer Messgröße, jedoch hat sich die Messhardware seit Einführung dieser Norm signifikant weiterentwickelt und eine Beibehaltung der altbewährten Begrifflichkeiten erscheint schwierig. Basis der hier gewählten Erläuterungen sind die Ausführungen des im Jahr 2022 veröffentlichten DGZfP Merkblatts B 09 „Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken“ [3].

Das technische System zur Aufzeichnung von Messwerten einschließlich der Datenvorverarbeitung und Onsite-Speicherung wird allgemein als Messsystem bezeichnet. Derzeit werden hauptsächlich elektrische Messsysteme für die Überwachung von Brückenbauwerken eingesetzt. Wenn Komponenten zur externen Kommunikation, Datenauswertung, Datenverwaltung und eventuell auch zur Auslösung eines Alarms eingebunden werden, wird das Gesamtsystem in der Regel als Überwachungs- oder Dauerüberwachungssystem bezeichnet.

Ein solches Monitoringsystem für Brücken-Anwendungen mit herkömmlichen Messsystemen besteht in der Regel aus den nachfolgend beschriebenen Komponenten.

Sensor / Messaufnehmer:

Sensoren sind technische Einheiten, die Messgrößen erfassen. Im Falle von elektrischen Sensoren nehmen sie die physikalische Größe auf und wandeln sie abhängig vom Messprinzip in elektrische Signale wie beispielsweise eine Spannungsänderung um. Faseroptische Sensoren (FOS) hingegen erfassen Änderungen in der physikalischen Größe (z.B. Dehnung oder Temperatur) als sich ändernde Lichtreflektionen und wandeln diese mittels Spektrometer in elektrische Signale um.

Sensoren mit ihren Spezifikationen (Messprinzipien, Anbindung) müssen entsprechend der Aufgabenstellung sorgsam ausgewählt werden [30]. Neben den klassischen Anforderungen an den Sensor (Messbereich und -genauigkeit) ist die Langzeitstabilität als zu berücksichtigender Parameter erforderlich [3].

Zur Gewährleistung eines optimalen Messergebnisses müssen Sensoren kalibriert sein. Bei der Kalibrierung erfolgt der Vergleich der Messwerte mit den „richtigen“ Werten, die von einer Referenzmess-einrichtung dargestellt werden [31]. Eventuelle Abweichungen werden dabei systematisch über den gesamten Messbereich erfasst und dokumentiert.

Neben analogen Sensoren werden zunehmend digitale MEMS-Sensoren eingesetzt. Ein Vorteil ist dabei, dass das digitale Signal bereits vor der Übertragung an das Datenerfassungsmodul durch Edge Computing vorverarbeitet werden kann. Digitale Sensoren bilden die technische Grundlage von IoT-Monitoringsystemen [32].

Sensoranbindung:

Die Sensoranbindung erfolgt per Kabel oder drahtlos per Funkübertragung.

Mit kabelgebundenen Systemen können vergleichsweise hohe Datenraten erreicht werden, jedoch ist aufgrund potenzieller Störeinflüsse die zu überwindende Entfernung begrenzt. Kabel können neben der Datenübertragung auch zur Energieübertragung (Sensorspeisung) verwendet werden, wenn dies erforderlich ist.

Bei der Wahl der Kabel sollte eine ausreichend gute Abschirmung der Adern beachtet werden, um elektromagnetische Störeinflüsse bei der Signalübertragung zu minimieren. Insbesondere in der Nähe von stromführenden Leitungen ist eine sehr gute Abschirmung gegen den Einfluss elektromagnetischer Felder erforderlich.

Drahtlose Sensoranbindungen bieten den Vorteil, dass große Entfernungen damit überbrückt werden können. Je nach Art der Funkübertragung ist im Vergleich zur kabelgebundenen Übertragung eine eher geringe Datenrate möglich. Außerdem müssen für die Energieversorgung der Funkübertragungseinheit und des Sensors spezielle Lösungen gefunden werden. Zur Funkübertragung werden in der Regel WLAN, Bluetooth oder andere Funkprotokolle im lizenzfreien 2,4 GHz Band verwendet.

Datenerfassungssystem:

Die analogen Signale, für gewöhnlich sind dies elektrische Spannungs- oder Widerstandsänderungen, werden, wenn nicht bereits am Sensor geschehen, in einem Datenerfassungssystem konditioniert und digitalisiert. Datenerfassungssysteme werden weit verbreitet auch als Messverstärker und Datenlogger bezeichnet. Bei kabelgebundenen Messsystemen und großen Bauwerken kommen mehrere Datenerfassungssysteme dezentral zum Einsatz.

Die Amplitude der vom Sensor übertragenen Eingangssignale kann unter Umständen sehr klein sein. Signalverstärker werden eingesetzt, um diese zu verstärken und so eine zuverlässige Auswertung zu gewährleisten. Um die bestmögliche Genauigkeit zu erreichen, sollte das Signal so verstärkt werden, dass der maximale Amplitudenbereich des konditionierten Signals dem maximalen Eingangsbereich des A/D-Wandlers entspricht. Der A/D Wandler formt dabei das analoge kontinuierliche Signal in ein digitales diskretes Signal um. Eine hohe Auflösung des A/D-Wandlers verringert die Notwendigkeit einer hohen Verstärkung.

Die Signalfilterung entfernt unerwünschtes hochfrequentes Rauschen aus einem Signal, indem das Signal so verarbeitet wird, dass ein festgelegter Frequenzbereich des Signals getilgt wird. Die wesentlichsten Gründe für Filterung sind Störgeräusche (z. B. auch 50-Hz-Leitungsrauschen) sowie der Aliasing-Effekt, der bei falscher (zu geringer) Abtastung des analogen Signals zu einer fehlerhaften Messwerterfassung führen kann. Wie der Rauschfilter ist auch der Antialiasing-Filter ein Tiefpassfilter, d.h., die tiefen Frequenzbereiche können passieren während die hohen Frequenzbereiche abgeschnitten werden.

Mittels A/D-Wandler werden die Messdaten punktweise über Zeit und Amplitude abgetastet. Dabei charakterisiert die systeminhärente Bitrate die Auflösung des Signals über die Amplitude und die entsprechend der Aufgabenstellung festzulegende Abtastrate die Auflösung über die Zeit. Hochwertige Datenerfassungssysteme können durch spezielle Hardware, sehr zeitgenau mit geringen zeitlichen Schwankungen, sog. Jitter und sehr zeitsynchron über alle Messkanäle hochauflösend messen.

Messrechner:

Die konditionierten und digitalisierten Messdaten können an einem angeschlossenen Messrechner bei Erfordernis bereinigt, synchronisiert, analysiert, visualisiert und gespeichert werden.

Bereinigung: Unter Umständen ist es erforderlich, die Qualität von Messdaten zu prüfen und ggf. inkorrekte, inkonsistente und irrelevante Daten zu modifizieren, zu korrigieren oder ggf. zu entfernen [3].

Synchronisation: Kommen mehrere Datenerfassungssysteme dezentral zum Einsatz, müssen die Datensätze der einzelnen Systeme synchronisiert werden.

Reduktion: In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung kann es sinnvoll sein, im weiteren Verlauf Datensätze in einem eingeschränkten Datenumfang zu betrachten. Gründe für eine Datenreduzierung liegen zumeist in Aufwandsparnissen bei Bearbeitung, Speicherung und Übertragung. Die Datenreduzierung kann nur unter der Prämisse durchgeführt werden, dass dadurch keine wesentlichen Informationen verloren gehen.

Alarmierung: Auf dem Messrechner können Programme installiert werden, die entsprechend einem Protokoll eine Alarmierung bei Überschreitung von Grenzwerten im Verlauf der Messung durchführen.

Visualisierung: Bei Erfordernis ist es hier möglich, Zeitreihen der gemessenen Größen zu visualisieren und so eine zumindest subjektive Plausibilisierung der Daten durchzuführen.

Externe Kommunikationsanbindung:

Die externe Kommunikationsanbindung verbindet das Messsystem an der zu überwachenden Brückenstruktur mit den offsite installierten Komponenten des Monitoringsystems. In erster Linie ist hier das Datenmanagementsystem zu nennen.

Datenmanagementsystem:

Das Datenmanagementsystem speichert die übermittelten Messdatensätze und verknüpft sie mit den Metadaten. Auf dieser Grundlage können Abfragen zur Datenauswertung durchgeführt werden. Dabei werden die entsprechenden Informationen gemäß der Aufgabenstellung aus den Messdaten extrahiert und gegebenenfalls statistisch ausgewertet. Unter Umständen kann es im Rahmen der Datenauswertung erforderlich und möglich sein, aus den Messgrößen weitere physikalische Parameter der Brückenstruktur zu berechnen. Ein Beispiel hierfür wäre die Berechnung der Eigenschwingcharakteristik aus Messreihen von Beschleunigung oder Schwinggeschwindigkeit.

IoT-Monitoringsysteme:

IoT-basierte Monitoringsysteme sind technische Neuerungen, bei denen die Komponenten eines vernetzten Systems miteinander kommunizieren [32]. Diese Systeme sind in der Regel autonom und liefern in Abhängigkeit von Zielsetzungen Informationen. IoT-Monitoringsysteme zeichnen sich durch den Einsatz digitaler, oft programmierbarer Sensoren aus, die in Sensornetzwerken mit Sensorknoten organisiert sind, die wiederum aus mehreren Einzelsensoren bestehen können. Da die Sensoren meist drahtlos verbunden sind, eignen sich diese Messsysteme besonders für langfristige Überwachungsaufgaben an großen Strukturen wie Brücken mit einem dichten Sensornetzwerk. Durch die Anwendung digitaler und programmierbarer Sensoren können Teile des Datenerfassungssystems wie A/D-Wandler wegfallen bzw. sind Teil des Sensorknotens. Die Vorauswertung kann bereits auf dem Sensor erfolgen, wodurch zumeist eine Reduktion der zu übermittelnden Daten erreicht wird. Die Daten können direkt extern per Fernabfrage gespeichert und entsprechend der Aufgabenstellung verarbeitet werden. Herausforderungen bei der Planung und dem Betrieb von Monitoringsystemen dieser Art

umfassen die Energieversorgung der Sensoren sowie die Zeitsynchronisation der Signale aus den verschiedenen Sensorknoten sowie die Kompatibilität verschiedener Produkte.

2.5.3 Messaufgaben und zugehörige Messtechnik

Für die typischen Messaufgaben im Monitoring von Ingenieurbauwerken werden hier die jeweils geeigneten und einsetzbaren Messtechniken vorgestellt. Die Zusammenstellung beinhaltet für jede messtechnisch zu lösende Fragestellung eine kurze Erläuterung der Intension zur Messwerterfassung sowie die sich daraus ergebende Messaufgabe. Anschließend werden typische Messverfahren und die zweckmäßige Messtechnik zusammengestellt und, falls zweckdienlich, Bemerkungen zum Einsatz der Messtechnik für die beschriebene Messaufgabe zugeordnet. Für eine erste Übersicht ist am Ende dieses Kapitels eine Messaufgabe-Messtechnik-Matrix abgebildet, in der in den drei Kategorien 'sehr gut geeignet', 'gut geeignet' sowie 'unter Umständen geeignet' für jede Messaufgabe die einsetzbare Sensortechnik gekennzeichnet ist.

Detaillierte Erläuterungen der einzelnen hier zugeordneten Sensortechniken mit ihren Funktionsweisen, ihren Vor- und Nachteilen und ihren Einsatzgrenzen werden in der Zusammenstellung 'Sensortechnik' in Anhang B gegeben

Überwachung von Rissbreiten und Koppelfugen

Intension und Messaufgaben

Rissbreiten- und Koppelfugenmonitoring bezweckt die messtechnische Überwachung bereits bekannter äußerer Risse und Koppelfugen.

Risse signalisieren eine Abminderung von Steifigkeiten, die ggf. mit einer Abminderung der Tragfähigkeit und Verkehrssicherheit einhergehen kann. Insbesondere aber können Risse und Koppelfugen ab einer bestimmten Breite weitere Schädigungsprozesse initiieren oder beschleunigen. Korrosion von Stahlbetonbewehrung sowie Ermüdung von Spannstahlelementen in Koppelfugen sind typische Schädigungsprozesse.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Rissbreiten- und Koppelfugenmonitoring den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden (010),
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (020)
- 040 - Unterstützung Brückenprüfung

Messverfahren und Messtechnik

Da die zu überwachenden Risse und Fugen bekannt sind, kommt lokales Monitoring zur Anwendung, die Messaufnehmer werden unmittelbar an den zu überwachenden Rissen und Koppelfugen appliziert.

Wegsensoren:

Zur Überwachung der zeitlichen Entwicklung kommen in erster Linie Wegaufnehmer zum Einsatz, die prinzipiell die Verschiebungen zweier Punkte (je einem pro Rissufer) zueinander messen. Typische Wegaufnehmer, die direkt appliziert werden sind:

- Induktive Wegsensoren
- Seilzugensensoren
- Linearpotentiometer
- Laserdistanzsensoren

Weiterhin können Dehnungsmessstreifen indirekt als Wegsensoren genutzt werden, wenn diese auf elastische Trägerstrukturen appliziert werden. Die gemessene Dehnung wird über die Sensorlänge zu einer Weggröße aufintegriert und der Sensor kann vergleichbar mit Wegaufnehmern den Riss überbrückend eingebaut werden.

Bildgebende Verfahren:

Zusätzlich kommen vermehrt neuartige bildbasierte Verfahren zum Einsatz. Diese basieren auf 2D und 3D Digitalfotografie sowie digitaler Auswertelgorithmen. Durch die implementierten stochastischen oder KI-basierten Methodiken können automatisiert Unterschiede in der Bildfolge eines überwachten Risses bzw. einer Koppelfuge extrahiert und quantifiziert werden.

- Digital Image Correlation (DIC)
- Image Analysis

Weitere Messverfahren und Messtechnik

- Schwingsaitensensoren (integrierte Dehnung)
- Diskrete Faseroptische Sensoren (hier insbesondere Long Gauge FBG-Sensoren (LGFBGs))
- Verteilte Faseroptische Sensoren – ermöglicht Kombination Rissdetektion und -überwachung

Bemerkungen

Temperaturabhängigkeit:

Riss- und Koppelfugenbreiten sind stark temperaturabhängig. Sollen Abhängigkeiten des Rissverhaltens von verkehrsbedingten Beanspruchungen untersucht werden, ist die Aufzeichnung der vorherrschenden Temperatur, bei Hohlkästen ggf. innen und außen, zu empfehlen, um diese temperaturbedingten Anteile der Messgrößen eliminieren zu können.

Rissdetektion und Rissfortschrittsdetektion

Intension und Messaufgaben

Risse können durch Überbeanspruchung oder Ermüdung entstehen und Tragfähigkeit sowie Dauerhaftigkeit vermindern. Äußere Risse in Stahlbeton können ein Indiz für Schädigungsprozesse im Inneren der Struktur sein, wie bspw. Korrosion der Bewehrung oder AKR-Prozesse. In Spannbetonbrücken können äußere Risse außerdem das Versagen einzelner Spanndrähte bspw. durch Spannungsrisskorrosion anzeigen.

Verfahren zur Rissdetektion werden angewendet, wenn Risse auf lokale Überbeanspruchung oder Materialermüdung hinweisen, die lokal oder global zu einem Verlust der Tragfähigkeit führen können. Bei reduzierter Ermüdungssicherheit, bei Veränderungen der Einwirkungen und Lasten oder auch als Kontrollmaßnahme nach Sanierungs- und Verstärkungsmaßnahmen kann die Überwachung der Rissfreiheit sinnvoll sein. Diese Anwendungen sind zumeist lokales Monitoring.

Für eine lebensdauerübergreifende Zustandsbewertung von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken, die gleichzeitig in eine intelligente Instandhaltungsplanung einfließen soll, liefert die dauerhafte Überwachung des Risszustands, die die Detektion von Rissen einschließt, eine wesentliche Rolle. So werden vermehrt in Neubauprojekten großflächig insbesondere faseroptische Sensoren eingebaut, die über die Lebensdauer hinweg Informationen über den Risszustand im überwachten Bereich liefern können. Da die Örtlichkeit der Rissbildung unbekannt ist, werden diese Anwendungen zumeist als (semi-) globales Monitoring durchgeführt.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird die Rissdetektion den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 080 - Prädiktives Lebenszyklusmanagement
- 090 - Referenzzertifikat

Messverfahren und Messtechnik

Schallemissionssensoren:

Der bei Rissentstehung und Risswachstum im Stahlbauteil emittierte hochfrequente Körperschall kann über eine eingeschränkte Entfernung mittels Schallemissionssensoren aufgezeichnet werden. Kommen mehrere Sensoren zum Einsatz, ist durch die Analyse der Laufzeiten auch die Lokalisierung der entstandenen bzw. gewachsenen Risse möglich. So können Ermüdungsrisse in Stahlbauteilen als auch Spanndrahtbrüche in Spannbetonbrücken detektiert werden.

Verteilte Faseroptische Sensoren:

Mit verteilten faseroptischen Sensoren ist es möglich, großflächige Bauteilbereiche von Massivbrücken auf Rissentstehung und -wachstum hin zu überwachen. Dazu werden einzelne Fasern gerade bei linienförmiger und mäandrierend bei flächiger Überwachung in den vulnerablen Bereichen der Bauteile appliziert. Besteht ein erwartbares Interesse an Informationen zum Rissverhalten bereits in der Planungsphase, werden die Fasern bereits vor der Betonage (z. B. an Bewehrungsstrukturen oder extra Trägerelementen) fixiert und mit einbetoniert. Bei Erfordernis einer Applikation an bestehenden Bauwerken werden die Fasern zumeist auf der Oberfläche oder oberflächennah angeordnet, d.h. kurz unter der Oberfläche in einer vorab eine wenige Millimeter tiefe eingefräste Nut.

Bildbasierte Verfahren:

Zusätzlich kommen vermehrt neuartige bildbasierte Verfahren zum Einsatz. Diese basieren auf 2D und 3D Digitalfotografie sowie digitaler Auswertelgorithmen. Durch die implementierten stochastischen oder KI-basierten Methodiken können so automatisiert Unterschiede in der Bildfolge eines überwachten Bereichs auf Rissbildung hin analysiert werden.

- Digital Image Correlation (DIC)
- Image Analysis (bspw. Drohnenbasiert)

Korrosionsmonitoring

Intension und Messaufgaben

Stahlbeton- und Spannbetonbrücken:

Bewehrungskorrosion in Stahlbeton- und Spannbetonbrücken kann die strukturelle Integrität und die Lebensdauer der Brücken signifikant beeinträchtigen. Typische Ursachen für die Entstehung von Korrosion der Bewehrung ist das Eindringen von Feuchtigkeit. Wenn Wasser durch Risse, Fugen oder poröse Bereiche des Betons in die Struktur eindringt, kann es zur Carbonatisierung und im Fortgang zur carbonatisierungsinduzierten Korrosion kommen. Bei der Carbonatisierung reagiert das Wasser mit dem Kohlendioxid aus der Atmosphäre und die schützende alkalische Umgebung der Bewehrung wird abgebaut. Zweite Ursache für Bewehrungskorrosion ist das Eindringen von Chloriden, insbesondere in Form von Salzen (z. B. Streusalz auf Straßen). Die chloridinduzierte Korrosion besitzt ein stark ausgeprägtes Schädigungspotenzial durch den lokalen Schädigungscharakter (Lochkorrosion). Anders als bei der carbonatisierungsinduzierten Korrosion sind die Auswirkungen der chloridinduzierten Korrosion nach außen meist nicht oder erst spät erkennbar, da nicht zwangsläufig Abplatzungen stattfinden [33].

Durch das rechtzeitige Erkennen und Beheben von Korrosionsschäden können Brückenbauwerke länger betrieben werden, bevor Sanierungsarbeiten erforderlich werden. Dies trägt zur Verlängerung der Lebensdauer der Brücke bei und reduziert Betriebskosten. Korrosionsmonitoring hilft dabei, die Ressourcen effizienter zu nutzen, da es gezielte Reparaturen und Wartungsmaßnahmen ermöglicht. Dies führt zu geringeren Kosten im Vergleich zu umfangreichen Reparatur- oder Sanierungsarbeiten, die aufgrund fortgeschrittener Korrosion notwendig werden könnten.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Korrosionsmonitoring den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 090 - Referenzzertifikat (vorbeugend)

Messverfahren und Messtechnik

Beim Korrosionsmonitoring können verschiedene Messverfahren und -technologien zum Einsatz kommen. Elektrochemische Sensoren messen die elektrische Aktivität in der Nähe der Bewehrung im Beton. Sie können Korrosionsströme und Potenzialunterschiede erfassen, die auf beginnende Korrosion hinweisen. Feuchtigkeitssensoren messen die Feuchtigkeit im Beton. Eine erhöhte Feuchtigkeit kann auf Korrosion hinweisen, da Feuchtigkeit den korrosiven Prozess begünstigen kann. Kupfer- oder Silberelektroden können zur Überwachung des Korrosionszustands verwendet werden. Wenn diese Elektroden korrodieren, kann dies auf Korrosion der Bewehrung hinweisen [34].

- Potentialmessung, (z.B. Anodenleiter)
- Messung des elektrischen Widerstands von Beton
- Korrosionsstrommessung
- Lineare Polarisationswiderstandsmessung
- Drahtsensoren

Weitere Messverfahren und Messtechnik

- Ultraschallsensoren und elektromagnetische Sensoren zur Abstandsmessung (Betonoberfläche – Bewehrungsstahl)
- pH-Wert-Messung
- Feuchtemessung
- Messung der Chloridkonzentration

Spanndrahtbruchdetektion

Intension und Messaufgaben

In Bezug auf die Spannungsrissskorrosionsgefährdung von Spannbetonbrücken kommen Verfahren zur Rissdetektion insbesondere bei älteren Bauwerken aus den 1950er bis 1970er Jahren zur Anwendung, bei denen versprödungsempfindliche Spannstähle (Neptun-Stahl bis 1965, Sigma-Stahl bis 1978, Hennigsdorfer Spannstahl bis 1993) verbaut wurde. Das meistverbreitete Verfahren ist dabei die Schallemissionsanalyse (SEA). Da die Örtlichkeit der Spanndrahtbrüche nicht vorhergesagt werden kann, werden Sensoren für die SEA über das betroffene Bauteil bzw. Bauwerk verteilt angeordnet [35]. Diese Anwendungen sind daher zumeist globales Monitoring.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird die Spanndrahtbruchdetektion den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden (Risse als Anzeichen von existenten Spanndrahtbrüchen)
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (Brücken mit vulnerablen Spannstahl)

Messverfahren und Messtechnik

Schallemissionssensoren (Körperschallsensoren):

Der bei Rissentstehung und Risswachstum emittierte hochfrequente Körperschall kann, insbesondere, wenn er in Stahlbauteilen emittiert wurde, über eine eingeschränkte Entfernung mittels Schallemissionssensoren aufgezeichnet werden. Kommen mehrere Sensoren zum Einsatz, ist durch die Analyse der Laufzeiten auch die Lokalisierung der Spanndrahtbrüche möglich [35].

Monitoring von Verformungen / Durchbiegungen

Intension und Messaufgaben

Durch die messtechnische Bestimmung des Lastverformungsverhalten kann die fortschreitende Schädigung eines Bauteils erkannt werden. Außerdem können im Rahmen von Belastungsversuchen Steifigkeitsverhältnisse in Form der gemessenen Durchbiegungen bestimmt und so Modellannahmen verifiziert bzw. kalibriert werden. Ist das elastische Last-Verformungsverhalten durch Belastungsversuche bekannt, können indirekt auch Rückschlüsse auf die Beanspruchung gezogen werden (siehe Verkehrsmonitoring). So können Verformungsdaten bei dauerhafter Erfassung zur Evaluierung der Ermüdungsbeanspruchung oder des Schwerverkehrs herangezogen werden [3].

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Monitoring von Verformungen und Durchbiegungen den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden (Verlust Biegesteifigkeit)
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (vulnerable Brücken, Monitoring Last-Verformungsverhalten)
- 050 - Begleitung bedeutender Bauwerke
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 070 - Belastungsversuche
- 080 - Prädiktives Lebenszyklusmanagement
- 090 - Referenzzertifikat
- Monitoring im Rahmen des Digitalen Zwillings

Messverfahren und Messtechnik

- Schlauchwaagen
- Laserdistanzsensoren
- Seilzugaufnehmer
- Induktive Wegaufnehmer
- Neigungsaufnehmer
- Photogrammetrie
- Geodätische Verfahren (Tachymeter, Laserscanner)

Monitoring von Verschiebungen / Verdrehungen / Lagerfunktionalität

Intension und Messaufgaben

Verschiebungen an Brückenbauwerken können unterschiedliche Ursachen haben. Die Hauptursache sind Temperaturänderungen im Tages- bzw. Jahreszyklus, die planmäßige Verschiebungen und Verdrehungen verursachen. Unplanmäßige Verschiebungen und Verdrehungen können durch Setzungen des Baugrunds verursacht werden. Bei mangelbehafteten Brückenlagern können

Verformungen und Verdrehungen auch unplanmäßig verhindert werden. Hier kann über das Monitoring von Verschiebungen und Verdrehungen die Funktionalität überwacht werden.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Monitoring von Verschiebungen, Verdrehungen und Lagerfunktionalität den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden (z.B. Setzung Baugrund durch Bautätigkeit in Nachbarschaft, Lagerschäden, temperaturbedingte Verformungen)
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (vulnerable Brücken, temperaturbedingte Verformungen)
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen (z.B. Anheben Fundament durch Verpressen)
- 070 - Belastungsversuche (Lagerfunktionalität)

Messverfahren und Messtechnik

- Schlauchwaagen
- Laserdistanzsensoren
- Seilzugaufnehmer
- Induktive Wegaufnehmer
- Neigungsaufnehmer
- Photogrammetrie
- Geodätische Verfahren (Tachymeter, Laserscanner)
- GNSS-Langzeitmessungen (*Global Navigation Satellite Systems*; z.B. GPS, Galileo)
- Satellitendaten der Fernerkundung (z.B. Copernicus, Envisat)

Monitoring von Dehnungen / Spannungen / Spannungsschwingbreiten

Intension und Messaufgaben

Zur Bestimmung und Überwachung von Beanspruchungszuständen werden zumeist Dehnungen gemessen. Dehnungsmessungen erfolgen lokal, quasi an einem Punkt. Auch bei Dehnungsmessungen über eine relativ kleine Strecke und bei der Integration von gemessenen Längenänderungen über eine Strecke handelt es sich, bezogen auf das gesamte Bauwerk bzw. Bauteil, um eine lokale Information hinsichtlich des Material- oder Bauteilverhaltens.

Das Monitoring von lokalen Veränderungen im elastischen Materialverhalten über einen definierten Zeitraum trägt dazu bei, Veränderungen im Lastabtragverhalten, die gegebenenfalls auf Schäden zurückzuführen sind, frühzeitig zu erkennen und deren Entwicklung zu überwachen.

Im Bereich des elastischen Materialverhaltens können aus den gemessenen Dehnungen direkt Spannungen berechnet werden. Damit kann für den Nachweis der Ermüdungssicherheit die erforderliche Beanspruchungshistorie über Dehnungsmessungen für den Messzeitraum bestimmt und darauf basierend für die Gesamtlebensdauer des Brückenbauwerks abgeschätzt werden.

Werden Dehnungsmessungen mittels Referenzbelastung kalibriert, liefern sie auch Informationen über die Belastungsbedingungen, denen die Brücke ausgesetzt ist und können so zur Bestimmung der Verkehrslastcharakteristik eingesetzt werden. Voraussetzung ist, dass das Bauteil innerhalb der Grenzen für das elastische Materialverhalten verbleibt.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Monitoring von Dehnungen, Spannungen und Spannungsschwingbreiten den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden (Ermüdungsrisse etc.)
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (vulnerable Brücken, Monitoring Last-Verformungsverhalten)
- 050 - Begleitung bedeutender Bauwerke

- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 070 - Belastungsversuche
- 080 - Prädiktives Lebenszyklusmanagement
- 090 - Referenzzertifikat
- Monitoring im Rahmen des Digitalen Zwillings

Messverfahren und Messtechnik

- Dehnungsmessstreifen
- Schwingsaitensensoren
- Diskrete Faseroptische Sensoren
- Verteilte Faseroptische Sensoren
- Wegaufnehmer (integrativ)
- Digitale Bildkorrelationsverfahren (DIC)

Monitoring von Kräften (Lagerkräfte, Verankerungskräfte, Vorspannkkräfte)

Intension und Messaufgaben

Eine kontinuierliche Überwachung der veränderlichen Lasten kann die tatsächlichen Belastungsdaten für eine Ermüdungsberechnung liefern und Hinweise darauf geben, ob das Bauwerk Lasten ausgesetzt ist, die ggf. zulässige Grenzwerte überschreiten.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Monitoring von Kräften den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden (Lagerschäden)
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (vulnerable Brücken, Monitoring Last-Verformungsverhalten)
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 100 – Bauzeitliche Messungen

Messverfahren und Messtechnik

- Kraftaufnehmer / DMS basiert oder piezoelektrisch
- Drucksensoren

Monitoring von Spanngliedkräften / Seilkräften

Intension und Messaufgaben

Die Überwachung der Vorspannkräfte bei Spannbetonbauteilen ist mit Einschränkungen mit einem Monitoringsystem möglich.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Monitoring von Spannglied- und Seilkräften den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden (Lagerschäden)
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (vulnerable Brücken, Monitoring Last-Verformungsverhalten)
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 100 - Bauzeitliche Messungen

Messverfahren und Messtechnik

- Kraftsensoren (Kraftmessaufnehmer, elastomagnetische Hohlsensoren)
- Schwingungssensoren
- Verteilte Faseroptische Sensoren

Schwingungsmonitoring

Intension und Messaufgaben

Schwingungsmonitoring wird mit dem Ziel durchgeführt, das Eigenschwingverhalten eines Bauwerks zu identifizieren. Dies kann aus verschiedenen Aufgabenstellungen heraus erforderlich werden [3]:

- Bestimmung absoluter Eigenschwingungsgrößen (z. B. Struktureigenfrequenzen zur Vermeidung von Resonanzanregungen) und daraus resultierender Größen (z. B. Vorspannkraft bei Zugelementen und Seilen).
- Überwachung von Eigenschwingungsgrößen in Bezug zu einem vorhergehenden Zeitpunkt zur Detektion von Änderungen in der Eigenschwingcharakteristik, die auf strukturelle Veränderungen, ggf. Schäden schließen lassen.
- Bestimmung modaler Kenngrößen zum Abgleich mit den numerisch bestimmten Modalgrößen eines digitalen Bauwerksmodells (z. B. Digitaler Zwilling).

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Schwingungsmonitoring den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion
- 050 - Begleitung bedeutender Bauwerke
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 070 - Belastungsversuche
- 080 - Prädiktives Lebenszyklusmanagement
- 090 - Referenzzertifikat
- Monitoring im Rahmen des Digitalen Zwillings

Messverfahren und Messtechnik

- Beschleunigungs- und Schwingungsgeschwindigkeitssensoren (analog)
- MEMS – Beschleunigungssensoren
- Laser-Doppler-Vibrometer
- Faseroptische Sensoren

Messung von Erschütterungen

Intension und Messaufgaben

Die Messung von Erschütterungen (Immissionen) im Sinne mechanischer Schwingungen, die auf Gebäude oder Menschen in Gebäuden einwirken, sind im Rahmen des Immissionsschutzes sowie zur Prüfung der Wirksamkeit ggf. vorgenommener Schutzmaßnahmen erforderlich (DIN 4150-2). Die Beurteilung von Erschütterungen erfolgt auf der Grundlage von zulässigen Grenzwerten (DIN 4150-3) [3].

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Messen von Erschütterungen den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 050 - Begleitung bedeutender Bauwerke
- 060 - Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen
- 090 - Referenzzertifikat
- 100 - Bauzeitliche Messungen

Messverfahren und Messtechnik

- Beschleunigungssensoren (piezoelektrisch)
- Geophone
- MEMS – Beschleunigungssensoren
- Faseroptische Sensoren

Messung der Materialfeuchte

Intension und Messaufgaben

Durch die Aufnahme von Wasser in ein Baumaterial können sich dessen Eigenschaften verschlechtern und Schäden entstehen. Die wesentlichen strukturellen Schadensmechanismen sind Frostabplatzungen (Frost-Tausalz-Reaktion) und Salzkristallisation. Darüber hinaus kann die Aufnahme von Wasser in Abhängigkeit vom Material zu Korrosionsschäden, Fäule, biologischer Besiedlung, Alkali-Kieselsäure-Reaktion, usw. führen sowie Messgrößen verfälschen. Ebenso geht mit zunehmender Feuchte häufig eine Abnahme der Festigkeit einher. Ein Monitoring der Materialfeuchte kann somit, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Dauerhaftigkeit, einen wesentlichen Informationsgewinn darstellen. [3].

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird das Messen der Materialfeuchte den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 010 - Bekannte lokal verortete Schäden
- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion

Messverfahren und Messtechnik

- Feuchtesensoren

Temperaturmessungen

Intension und Messaufgaben

Die Bestimmung der Umgebungstemperatur sowie gegebenenfalls der Bauteiltemperatur mittels Messtechnik ist ein unerlässlicher Bestandteil jedes Monitoringsystems. Einerseits sind viele Komponenten, insbesondere Sensoren, temperatursensitiv und erfordern hierfür eine entsprechende Kalibrierung. Andererseits werden viele Kenngrößen, die im Rahmen von Monitoringmaßnahmen erfasst werden, aufgrund des temperatursensitiven Materialverhaltens allein von der Temperatur beeinflusst.

Temperatursensoren werden oft in Verbindung mit anderen Sensoren eingesetzt, um thermische Effekte unabhängig zu messen und kompensieren zu können. Beispielsweise setzen sich Werte, die von Dehnungssensoren aufgezeichnet werden, teilweise aus mechanischen Beanspruchungen der Struktur durch externe Lasten sowie aus Materialausdehnungen aufgrund von Temperaturänderungen zusammen. Um Dehnungen, die zu unterschiedlichen Messzeitpunkten aufgezeichnet wurden vergleichen zu können, sollten die Messdaten korrigiert werden, um den Einfluss der Temperatur zu eliminieren [3].

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen werden Temperaturmessungen den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- alle Anwendungsfälle (Temperatur immer messen zur Kompensation thermischer Effekte auf Tragwerk und Messtechnik)

Messverfahren und Messtechnik

- Widerstandsthermometer
- Thermoelemente
- digitale Temperatursensoren
- Faseroptische Sensoren

Messung / Überwachung weiterer Umwelteinflüsse (Luftfeuchtigkeit, Wind, Sonneneinstrahlung, Niederschlag)

Intension und Messaufgaben

Neben Temperatur existieren weitere Einwirkungen aus den Umgebungsbedingungen, die nicht nur einen Einfluss auf die überwachte Struktur ausüben, sondern auch auf messtechnischen Komponenten. Diese Einflüsse sollten erfasst werden, um sie im Rahmen der Signalanalyse in ausreichendem Maße zu kompensieren bzw. ihren Einfluss bewerten zu können [3].

- Wind, Regen: windinduzierte Schwingungen von Seilen, Stäben und windanfälligen Brücken,
- Sonneneinstrahlung, Regen: insbesondere, wenn hohe Temperaturgradienten zu strukturellen Defiziten (Rissen) führen können,
- Hagel: u.U. bei Spanndrahtbruchüberwachung, um Schallsignale aus Hagelaufschlag von denen aus Spanndrahtbrüchen zu unterscheiden

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird die Überwachung weiterer Umwelteinflüsse den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- alle Anwendungsfälle (Umwelteinflussgrößen können u.U. in allen Anwendungsfällen Effekte auf Tragwerk und Messtechnik verursachen, die ggf. erfasst und kompensiert werden müssen)

Messverfahren und Messtechnik

- Windrichtung und Winddruck: Flügelrad-Anemometer, Ultraschall-Anemometer
- Sonnenstrahlung: Pyranometer
- Niederschlag: Infrarotsensoren (Regen), Schalldrucksensoren (Hagel)

Verkehrslastcharakterisierung

Intension und Messaufgaben

Für Straßenbrücken ist der Straßenverkehr die maßgebende Belastung. Die Häufigkeit und die Höhe der Verkehrslasten hat einen signifikanten Einfluss auf die Beanspruchung und damit auf die Lebensdauer der Brückenbauwerke. Nach Schadensinitiierung spielt die Intensität der Verkehrslast eine entscheidende Rolle für den zeitlichen Schadensverlauf [3]. Im Rahmen von Nachrechnungen bildet die messtechnische Bestimmung der objektbezogenen Verkehrsbeanspruchung die Basis für eine Plausibilisierung gewählter Lastansätze. Entsprechend bildet das Wissen über Achslasten, Gesamtfahrzeuggewichte und Fahrzeuglängen, über Verkehrsaufkommen, die Anteile verschiedener Fahrzeugtypen am Gesamtverkehr, Fahrzeuggeschwindigkeiten und -abstände sowie Fahrspuraufteilung einen elementaren Baustein zur Bewertung der Tragsicherheit bzw. der Lebensdauer eines Straßenbrückenbauwerks [36].

Die Überwachung des Verkehrs kann außerdem dazu dienen, einerseits das Auslösen von zeitlich hochaufgelösten Kurzzeitmessungen zu steuern. Durch die Triggerung durch bspw. schwergewichtigen Verkehr können so kurzzeitliche Schwingungsmessungen mit hohem resultierendem Datenvolumen gestartet werden, um dynamische Effekte oder Parameter messtechnisch aufzuzeichnen.

Bezogen auf die in Kapitel 2.4 durchgeführte Klassifizierung von Monitoringanwendungen wird Verkehrslastcharakterisierung den folgenden Anwendungsfällen zugeordnet:

- 020 - Bekannte Defizite aus Nachrechnung oder Konstruktion (Ermüdung)
- 070 - Belastungsversuche
- 080 - Prädiktives Lebenszyklusmanagement

Messverfahren und Messtechnik

Weigh in Motion (WIM) Systeme:

WIM-Systeme sind in der Fahrbahn integrierte Anlagen zur direkten Messung des überfahrenden Verkehrs. Sie basieren zumeist auf integrierte piezoelektrische Sensoren (Streifen- oder Piezosensor) oder auf integrierte Dehnungsmessstreifen (Plattensensor, Lastzellen). Über integrierte Induktionsschleifen können zusätzliche Informationen über Rad- und Achsgruppenwirkungen erzielt werden [37].

Bridge Weigh in Motion (BWIM) Systeme:

In BWIM-Systemen wird die Verkehrslast indirekt als Reaktion des Bauwerks gemessen. Bspw. werden über die Messung von Dehnungen und Beschleunigungen an den tragenden Bauteilen die Beanspruchungs-Zeitverläufe erfasst und nach Kalibrierung in Verkehrslastgrößen umgerechnet. Da hier von der Wirkung auf die Ursache geschlossen wird, ist die Analyse der Daten anspruchsvoll [38].

Weitere Messtechniken:

- Laserscanner [36]
- Magnetfeldsensoren [37]
- Kameraüberwachung [36]
- Instrumentierte Lager [39]
- Instrumentierte Dehnfugen [39]

Bemerkungen

Systemkalibrierung:

Systeme zur Erfassung der Verkehrslastcharakteristik müssen zwingend kalibriert werden. Insbesondere für indirekt arbeitende Messsysteme geschieht dies zumeist über Belastungsversuche mit definierten Fahrzeugen bei definierten Geschwindigkeiten und auf definierten Fahrbahnspuren.

Kameraanwendungen:

Zur Fahrzeugklassifizierung bzw. zu deren Qualitätskontrolle ist die zusätzliche Integration webbasierter Kameras erforderlich bzw. empfehlenswert.

3 Prozesse

3.1 Beteiligung von Infrastrukturbetreibern

3.1.1 Allgemein

Der Erfolg und die spätere Nutzung des Leitfadens und seiner Broschüre ist maßgeblich von der Beteiligung von Infrastrukturbetreibern abhängig. Die Mitwirkung wird innerhalb des Projekts über die folgenden Bausteine realisiert:

- Austausch mit dem Betreuerkreis in regelmäßigen Treffen zur Ausrichtung und den Inhalten des Leitfadens und der Broschüre. Die Ergebnisse und das Feedback fließen direkt in den Leitfaden und die Broschüre ein.
- Review des Leitfadens und der Broschüre durch den Betreuerkreis.
- Durchführung einer Online-Umfrage zur Vorbereitung auf einen Workshop und zur Gewinnung eines ersten Eindrucks zum aktuellen Umgang mit dem Thema Monitoring bei den Straßenbauverwaltungen der Länder, sowie des Bundes.
- Durchführung eines Workshops zur Diskussion verschiedener Themen und zur Ausrichtung und den Inhalten der Broschüre.

Während die Ergebnisse der Besprechungen und des Reviews implizit Eingang in den Leitfaden finden, werden die Ergebnisse der Online-Umfrage und des Workshops nachfolgend dargestellt. Es wird dabei nur auf die wesentlichen Erkenntnisse eingegangen.

3.1.2 Online-Umfrage

Im Rahmen des Projekts wurde eine Online-Umfrage durchgeführt. Sie hatte das Ziel, den aktuellen Stand der Technik, bzw. die Erfahrungen der Infrastrukturbetreiber im Zusammenhang mit Monitoring zu ermitteln. Sie diente dazu, die Belange der späteren Adressaten zu erfassen, um den Leitfaden und die Broschüre darauf ausrichten zu können und zur Vorbereitung auf den späteren Workshop. Adressaten der Umfrage waren im Wesentlichen die Verwaltungsbehörden der Länder, die mit Aufgaben zur Betreuung des Bundesfernstraßennetzes beauftragt sind, sowie die Autobahn des Bundes oder andere Infrastrukturbetreiber.

Die Umfrage wurde in die folgenden Themenbereiche unterteilt:

- Angaben zur Person/Funktion sowie Erfahrungen im Zusammenhang mit Monitoring
- Inhalt der Broschüre
- Quellen und Grundlagen
- Prozess- und Arbeitsschritte beim Einsatz von Monitoring
- Ausschreibung, Vergabe, Vertragsgestaltung und Abrechnung
- Anforderungen an das Datenmanagement von Monitoringdaten

Insgesamt wurde die Umfrage 137 Mal aufgerufen und davon 37 Mal vollständig beantwortet. Die Umfrage war so aufgebaut, dass auch unvollständige Teilnahmen ausgewertet werden können. Besonderes Augenmerk bei der Auswertung liegt auf Teilnehmern, die über sich angegeben haben, Infrastrukturbetreiber von Straßenbrücken zu sein, sodass sich eine Teilmenge von 35 Personen ergibt, die im Wesentlichen bei der Auswertung betrachtet wurden. Bild 26 zeigt die Verteilung der Teilnehmer bzw. ihre Herkunft / ihren Zuständigkeitsbereich.

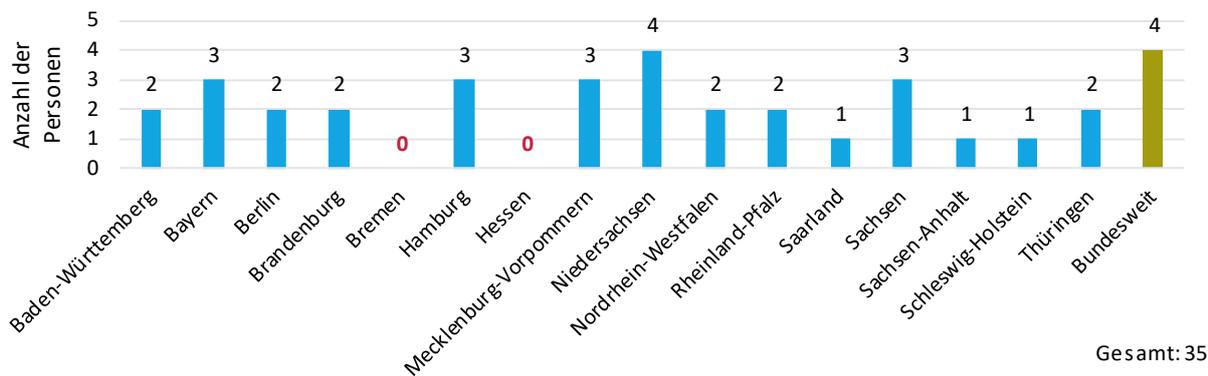


Bild 26: Zuständigkeitsbereich bzw. Herkunft des Teilnehmers/Infrastrukturbetreibers bei der Online-Umfrage (eigene Darstellung)

Bild 26 ist zu entnehmen, dass die meisten Bundesländer mit wenigstens zwei Personen teilgenommen haben, sodass davon auszugehen ist, dass ein repräsentatives Umfrageergebnis erzielt wurde. Lediglich die Länder Bremen und Hessen haben nicht teilgenommen.

Bei einer weiteren Abfrage antworteten 43 %, dass sie Probleme oder Hemmnisse mit dem Thema Monitoring haben, was die Zurückhaltung bei diesem Thema widerspiegelt. Die Probleme wurden dabei durch die Teilnehmenden in die folgenden Prozessschritte nach Bild 27 einsortiert.

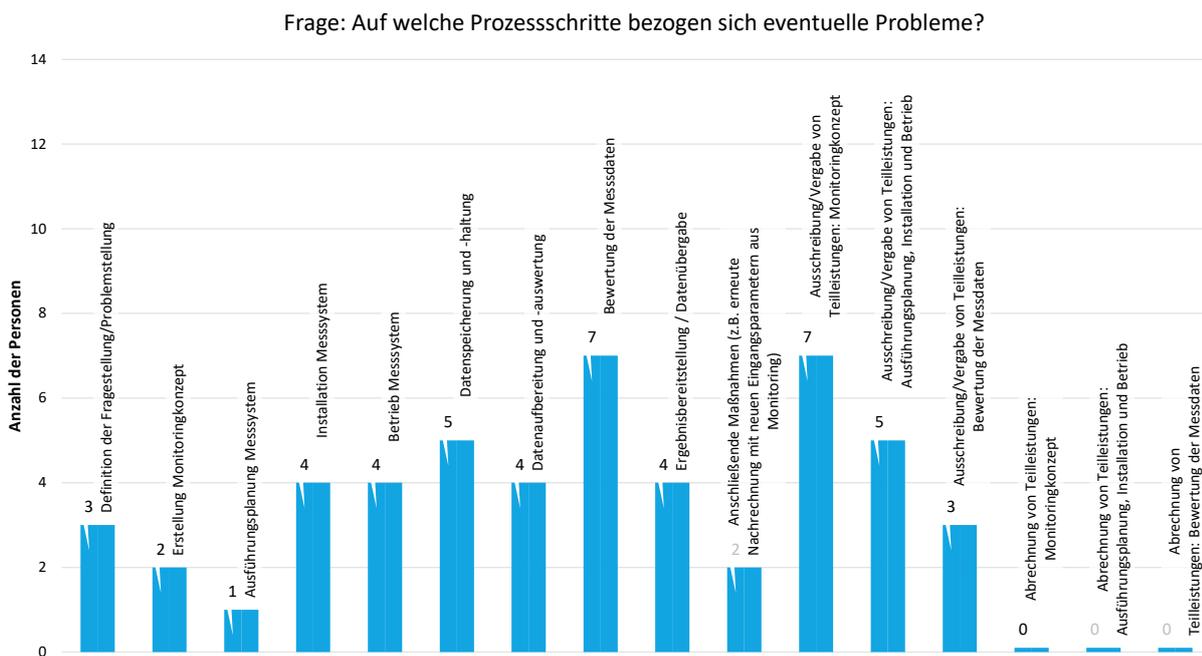


Bild 27: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Auf welche Prozessschritte bezogen sich eventuelle Probleme? (eigene Darstellung)

Nach Bild 27 treten die häufigsten Probleme im Zusammenhang mit der Bewertung der Messdaten und mit der Ausschreibung/Vergabe der Messkonzepterstellung auf. Das kann viele Ursachen haben. Monitoring muss als ein Prozess verstanden werden, der von der Aufgabenstellung bis hin zur Lieferung einer qualifizierten Antwort bzw. Aussage über das Bauwerk reicht. Gerade die Bewertung der Messdaten muss bereits bei der Messkonzepterstellung ausreichend durchdacht werden, damit das Monitoring bestmöglich für die Beantwortung der Fragestellungen eingesetzt werden kann. Die Messkonzepterstellung ist daher ein Schlüsselement im Monitoringprozess und sollte durch qualifiziertes Personal vorgenommen werden,

das laut DBV-Merkblatt als „Fachplaner Monitoring“ bezeichnet wird, siehe auch Kapitel 3.2.2. Bei der Ausschreibung der Leistung ist darauf zu achten, diese Qualifikation abzufragen, siehe Kapitel 4.2.

Probleme werden auch in der Datenspeicherung und -haltung gesehen. Das hängt möglicherweise damit zusammen, dass es bei den meisten Infrastrukturbetreibern wahrscheinlich noch kein geregelter Vorgehen zum Empfangen und Speichern großer Datenmengen gibt.

Zusätzlich wird das Thema der Installation und des Betriebs sowie der Ausschreibung und Vergabe dieser Leistungen oft als problematisch angesehen. In den Freitextantworten werden Hinweise gegeben, dass es häufiger zu Sensor- bzw. Messausfällen oder Messfehlern kommt, weil die Dauerhaftigkeit der Sensorik eingeschränkt ist, Vandalismus stattfindet oder die Zugänglichkeiten (insbes. im Bahnbereich) schwierig sind. Außerdem werden mangelnde Erfahrungen bei der Ausschreibung genannt.

Bild 28 zeigt die Antworten auf die Frage, ob sich schon mal gegen die Durchführung eines Monitorings entschieden wurde. Die häufigste Antwort ist „Nein“, was positiv zu bewerten ist. An zweiter Stelle wird die Wirtschaftlichkeit als Grund genannt. In einer weiteren, hier nicht dargestellten Frage, wurde abgefragt, ob die Wirtschaftlichkeit einer Monitoringmaßnahme im Vorfeld überprüft wurde, was häufiger mit „Nein“ beantwortet wurde. Dies stellt einen leichten Widerspruch zu der hier dargestellten Frage dar und zeigt gleichzeitig die Komplexität. Das Thema der Wirtschaftlichkeit ist sehr facettenreich und wird in Kapitel 5 diskutiert. Die in der Frage dargestellten Gründe werden durch den Leitfaden und die Broschüre adressiert, sodass entsprechende Abhilfemaßnahmen zur Verfügung stehen.

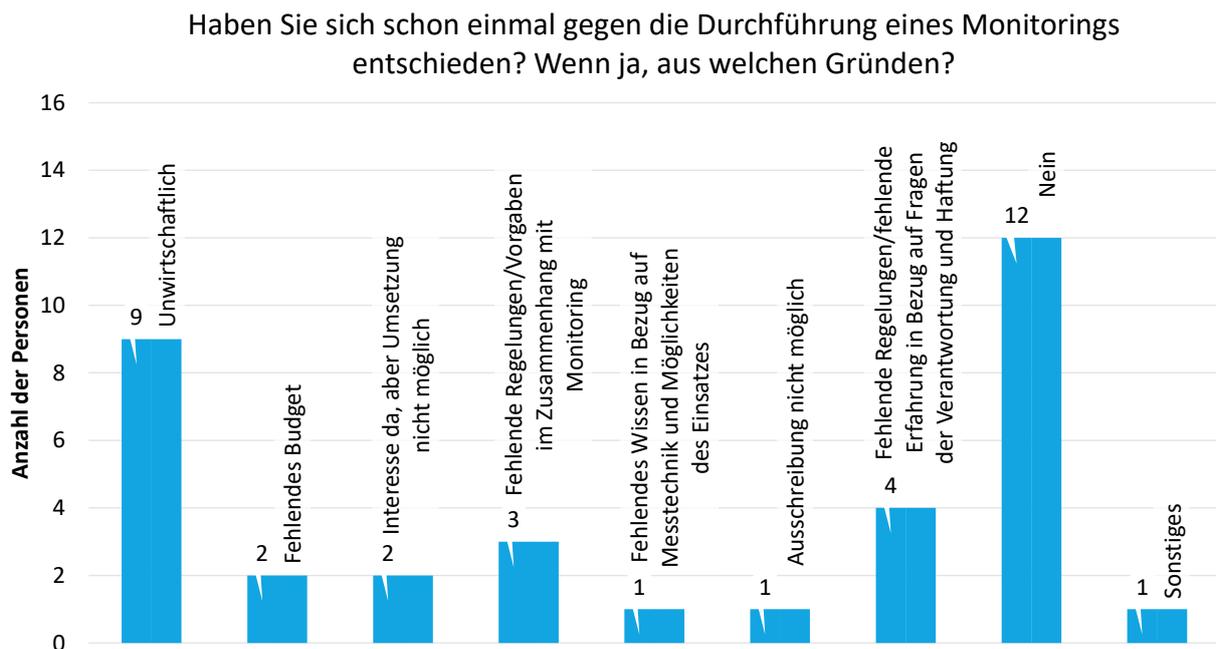


Bild 28: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Nutzung bestehender Merkblätter (eigene Darstellung)

Es existieren bereits mehrere Merkblätter zur Nutzung von Monitoring, siehe Kapitel 2.1. Es wurde im Rahmen der Umfrage abgefragt, wie diese bereits bekannt sind und ob sie Anwendung finden. Die Ergebnisse sind in Bild 29 dargestellt.

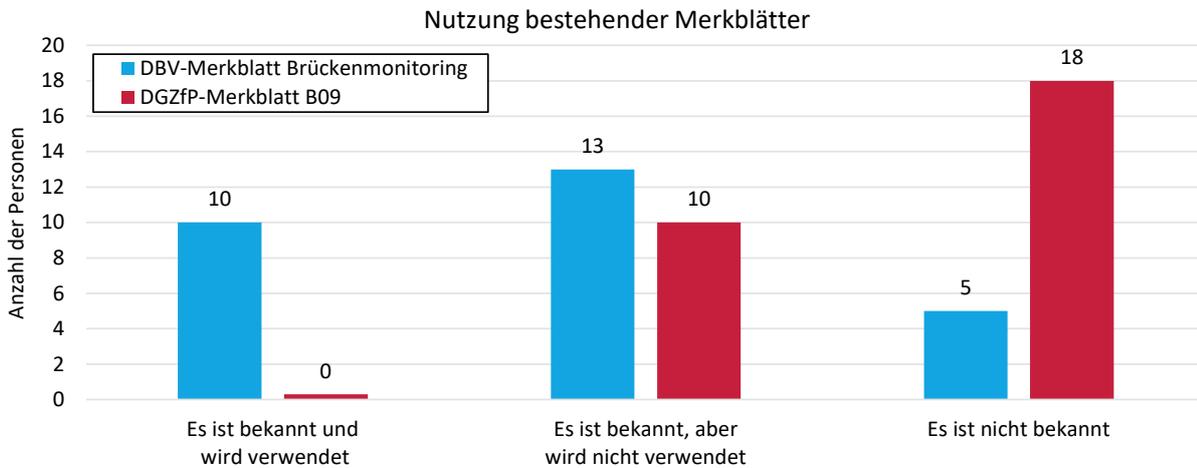


Bild 29: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Nutzung bestehender Merkblätter (eigene Darstellung)

Das DGZfP-Merkblatt [3] erschien im September 2022 als Neufassung, sodass dieses noch relativ jung und dadurch möglicherweise noch nicht sehr bekannt ist. Das DBV-Merkblatt ist [2] im Jahr 2018 erschienen, dem überwiegenden Teil bekannt und wird dennoch nicht umfänglich verwendet. Ursachen hierfür wurden im Workshop erarbeitet (Kapitel 3.1.3).

In der Umfrage wurde die Wichtigkeit bzw. der Bedarf verschiedener Themen in Hinblick auf die Inhalte der Broschüre abgefragt. Das Ergebnis ist in Bild 30 dargestellt.

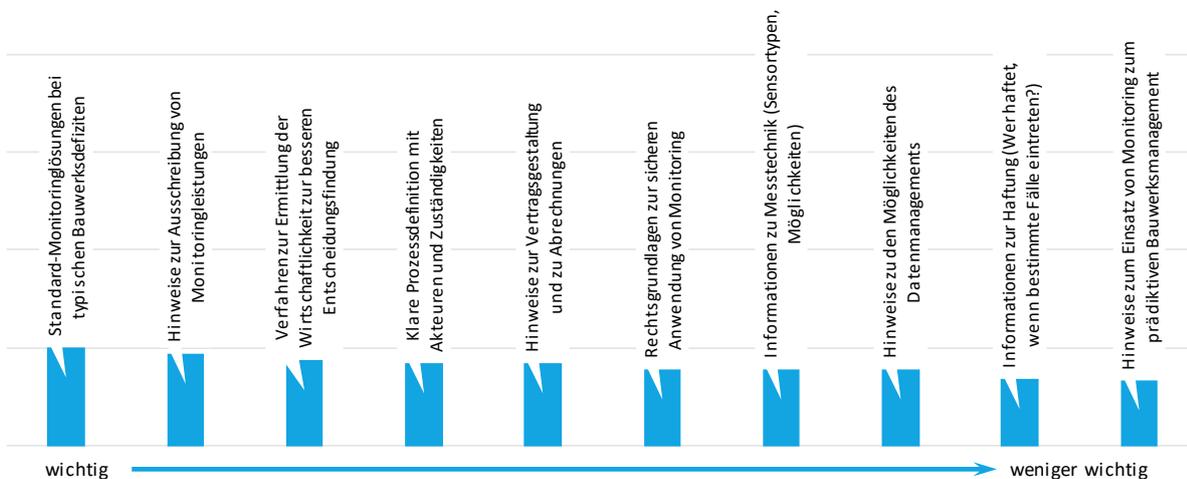


Bild 30: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Wichtigkeit der Inhalte der Broschüre (eigene Darstellung)

Für die Gliederung und die Inhalte der Broschüre wird das Umfrageergebnis zum großen Teil berücksichtigt bzw. auf vorhanden Inhalte, wie den Leitfaden, das DBV-Merkblatt oder das DGZfP-Merkblatt verwiesen. Die Umfrage zeigt, an welchen Stellen die Probleme auftreten und eine Unterstützung der Baulastträger hilfreich ist. .

3.1.3 Workshop

In Vorbereitung auf die Erstellung der Broschüre wurde die Planung, Durchführung und Auswertung eines Expertenworkshops mit Vertretern der Straßenbauverwaltungen und der Autobahn des Bundes durchgeführt, um die spezifischen Anforderungen und Besonderheiten im Zusammenhang mit

Monitoring ermitteln zu können. Der Workshop stellt eine Schlüsselkomponente im Projekt dar, da nur über den Kontakt zu den Adressaten die Projektergebnisse bzw. die Broschüre auf die Belange der Verwaltungen zugeschnitten werden können und die letztendliche Akzeptanz erhöht werden kann.

Der Workshop wurde thematisch analog zur Online-Umfrage gestaltet, sodass die offenen Punkte aus der Umfrage im Workshop diskutiert werden konnten.

Randbedingungen des Workshops

- Titel: Workshop zum strategischen Leitfadens Monitoring
- Teilnehmer:innen (15 Personen):
 - o Autobahn des Bundes GmbH (AdB)
 - o Verwaltungsbehörden der Länder, die mit Aufgaben des Bundesfernstraßennetzes beauftragt sind
 - o Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
 - o Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
 - o MKP GmbH
- Ort: MKP GmbH, Werftstraße 17, 30163 Hannover (Workshop fand in Präsenz statt)
- Zeit: 21.11.2023, 09:00-15:30 Uhr

Wesentliche Ergebnisse aus dem Workshop und zugehörige Ableitungen

Akzeptanz, Bewusstsein und Anerkennung

Das Thema Monitoring und die bisherigen Merkblätter finden wenig Akzeptanz bei den Baulastträgern aufgrund fehlender Regelprozesse zur Einführung und Nutzung der Dokumente sowie deren nicht verpflichtenden Charakter. Die Einbindung der Straßenbauverwaltungen der Länder in die Erstellung dieser Dokumente wurde als notwendig erachtet, um Bedarfe und Lösungsansätze zu formulieren und Akzeptanz zu steigern. Zudem sollten Merkblätter kostenfrei zugänglich sein, um den Verwaltungsaufwand zu reduzieren. Empfohlene Maßnahmen umfassen eine offizielle Einführung der Broschüre, die namentliche Nennung der Mitwirkenden, kostenlose Veröffentlichung durch die BASt und verstärkte Öffentlichkeitsarbeit wie Webinare und Konferenzen.

Prozesse und Arbeitsschritte beim Einsatz von Monitoring

Die Broschüre sollte Akteure und Prozessschritte klar definieren, ähnlich wie das DBV-Merkblatt Brückenmonitoring. Es ist wichtig, zwischen Monitoringkonzept und Ausführungsplanung des Messsystems zu unterscheiden. Das Messkonzept ist entscheidend für den Erfolg des Monitorings, daher muss es in frühen Prozessschritten klar definiert werden. Zudem sollten wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden, um eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung zu ermöglichen.

Ausschreibung, Vergabe, Vertragsgestaltung, Abrechnung

Die zu erstellenden Dokumente sollen insbesondere auch in Bezug auf Ausschreibung, Vergabe, Vertragsgestaltung und Abrechnung einen Leitfaden zur Herangehensweise und zu beachtenswerten Punkten beinhalten. Dabei ist u.a. herauszustellen, dass Ausschreibung und Vergabe von Monitoringkonzept getrennt von denen der Monitoringausführung erfolgen sollte. Abhängig von der Erfahrung des Bauherrn und der Komplexität des Projekts können vor allem für die Erstellung des Monitoringkonzepts zwei Ansätze verfolgt werden. Einerseits und übliche Herangehensweise ist die Vergabe dieser Tätigkeit an einen externen Fachplaner. Verfügt der Bauherr aber über eine ausreichende Expertise, kann er die Konzepterstellung selbst ausführen. Ausschreibungen von Monitoringleistungen können sowohl in funktionaler als auch in konkreter Form erfolgen. Dabei definiert der Bauherr bei funktionaler Ausschreibung lediglich das zu erreichende Ziel, bei konkreter Ausschreibung gibt er hingegen ein detailliertes Leistungsverzeichnis vor, was die Vergleichbarkeit der Angebote und die Abrechnung erleichtert. In der Broschüre sollte herausgestellt sein, dass die Qualifikation der Bieter unabhängig von der Ausschreibungsform über Referenzprojekte oder vergleichbare Nachweise zu prüfen ist. Für die Vertragsgestaltung sollte Beachtung finden, dass Abbruchkriterien und Mindestlaufzeiten sowie

Reaktionszeiten bei Datenausfällen und die Erfordernis redundanter Messsysteme vertraglich festgelegt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass Langzeitmonitoring den wiederholten Austausch von Messtechnik erforderlich machen kann und auch der Rückbau der Messtechnik sollte vertraglich geregelt werden. In Bezug auf die Abrechnung ist zu beschreiben, dass diese in regelmäßigen Schritten nach einem festgelegten Rechnungsplan erfolgen sollte, um eine diesbezügliche Planbarkeit für alle Parteien zu gewährleisten.

Datenmanagement

Der langfristige Mehrwert der Monitoringdaten wird als hoch angesehen. Es ist sinnvoll diese über die Bauwerkslebensdauer aufzubewahren und verfügbar zu halten. Aktuell liegen die Daten beim Betreiber des Monitorings, zukünftig sollte der Infrastrukturbetreiber ein eigenes Datenmanagementsystem mit Zugriff auf die Daten aufbauen, um diese nachhaltig und langfristig speichern zu können. Mit Hilfe des Leitfadens und der Broschüre soll dafür sensibilisiert werden. Aktuell findet i.d.R. noch keine Übergabe von Daten (Monitoring- und Metadaten), sondern nur von Berichten, vom Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen bzw. Fachplaner Monitoring zum Bauherrn statt. Für bestimmte Monitoring-Maßnahmen (z. B. Korrosionsmonitoring) sollte eine Standardisierung der Datenstruktur zukünftig ermöglicht werden. Eine gewisse Einheitlichkeit in der Darstellung des Datenmanagements zwischen den Anwendungsfällen (AwF) unterschiedlicher Bauwerke sollte angestrebt werden. Es wurde die Aufnahme von Nutzungsvereinbarungen in den Verträgen zum Monitoring zur Regelung, wie Daten beschrieben und übergeben werden sollen angeregt. Die Übergabe der regelmäßigen Berichte sollte gemeinsam mit den entsprechenden Messdaten erfolgen. Für die Analyse werden möglichst Rohdaten und für die Entscheidungsfindung möglichst Informationen in einer hohen Aggregationsstufe aus dem Datenmanagement in geeigneter Darstellung benötigt. Eine ausreichende Beschreibung der Daten (insbes. der Meta-Daten) ist notwendig, um die zukünftige Nutzung zu ermöglichen basierend auf dem Messkonzept. Aktuell existieren bei den Bauherren in der Regel keine geeigneten Speichermöglichkeiten in der notwendigen Größenordnung, um die Messdaten langfristig und nachhaltig zu speichern. Die ZTV-ING und ASB-ING müssen hinsichtlich der Bestandsdaten angepasst werden (auch Monitoringdaten sollten dort integriert werden). Im Workshop wurde der Vorschlag vorgestellt, abhängig von der Anwendung die Anforderungen an Datenformate und Meta-Daten als Auftraggeber-Daten-Anforderungen (ADA) zu definieren. Diese Vorgehensweise ähnelt dem aktuellen Vorgehen bei den Auftraggeber-Information-Anforderungen der BIM-Methode. Der AN reagiert in diesem Fall mit einem entsprechenden Abwicklungsplan. Außerdem müssen bei jedem Monitoring jeweils aktuell geltende rechtlichen Vorgaben und Verwaltungsvorschriften Berücksichtigung finden, sowie potentielle rechtliche Risiken identifiziert werden.

3.2 Der Monitoringprozess und seine Akteure

3.2.1 Definition: Monitoring

Monitoring bezeichnet die kontinuierliche und systematische Überwachung von Bauwerken durch den Einsatz sensorischer Messsysteme. Diese Überwachung ermöglicht die Erfassung und Analyse von Daten in Echtzeit, um den Zustand und die Leistungsfähigkeit des Bauwerks temporär oder über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg zu überwachen. Es ist dabei als Gesamtprozess der Planung über die Erfassung von Bauwerksreaktionen und/oder der einwirkenden Größen, mittels eines elektronischen Messsystems über einen repräsentativen Zeitraum bis hin zur Auswertung und Bewertung zu verstehen. Es unterscheidet sich von klassischen Vermessungen, zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) oder Inspektionen dadurch, dass es nicht auf die Erfassung eines einzelnen Messwerts abzielt, sondern auf die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung einer physikalischen Größe. Dabei kann die zugehörige Messung kontinuierlich, periodisch oder durch ein Ereignis ausgelöst erfolgen, was mit der erwarteten Ursache der Änderung der überwachten Messgröße gekoppelt ist.

3.2.2 Die Akteure

Brückenmonitoring ist ein komplexes Feld, in dem Präzision und Zuverlässigkeit Hand in Hand gehen müssen, um die Sicherheit und Langlebigkeit dieser kritischen Infrastrukturbauwerke zu gewährleisten. Bei diesem sorgfältigen Prozess, der den Zustand und die Funktionalität von Brücken bewertet, ist eine Vielzahl von Fachleuten beteiligt. Jeder Akteur bringt seine spezielle Expertise ein. Vom Bauherrn, der die Richtung vorgibt, über den Fachplaner, der die Details ausarbeitet und den Spezialdienstleister, der die technische Umsetzung übernimmt, bis hin zum Prüfer, der bei komplexen Projekten sinnvoll werden kann – sie alle spielen eine entscheidende Rolle in einem Orchester, das darauf abgestimmt ist, die Integrität unserer Brücken zu bewahren. Im Folgenden werden die Rollen im Prozess des Brückenmonitorings detaillierter vorgestellt. Sie orientieren sich an dem DBV-Merkblatt Brückenmonitoring [2] und wurden durch die Ergebnisse des Workshops (siehe Kapitel 3.1.3) ergänzt:

- **Bauherr/Auftraggeber (AG):** Eigentümer oder Betreiber des Bauwerks, verantwortlich für die Initiierung, Definition der Fragestellung und Finanzierung des Monitorings.
- **Fachplaner Monitoring (FPM):** Bringt fachliche Expertise in die Planung und Durchführung des Monitorings ein und entwickelt das Monitoringkonzept. Der Fachplaner spielt eine zentrale Rolle im gesamten Prozess und kann dem Bauherrn / Baulastträger beratend zur Seite stehen. Er stellt sicher, dass die technischen Anforderungen und Ziele erreicht werden. Der Fachplaner besitzt Kenntnisse und Erfahrungen sowohl in der Tragwerksplanung als auch in der Messtechnik und Messdatenverarbeitung.
- **Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen (SDB):** Ein Anbieter mit Fachwissen im Bereich der Messtechnik, der das Messsystem installiert und betreibt. Er kann eng mit dem Fachplaner zusammenarbeiten und ist für die technische Umsetzung zuständig.
- **Fachtechnischer Prüfer (FP):** Abhängig von der Komplexität des Projekts kann er hinzugezogen werden, um einzelne Phasen des Prozesses zu überprüfen und die Qualitätssicherung zu gewährleisten. Dabei sollte er in Abhängigkeit der Prüfaufgabe ähnliche Kenntnisse wie der Fachplaner Monitoring besitzen oder vertiefte statisch konstruktive Kenntnisse vorweisen.

Es ist möglich, dass ein Akteur mehrere Rollen übernimmt, was zu einer effizienteren Projektabwicklung und stärkeren Kohärenz im Prozess führen kann. Beispielsweise kann der Bauherr, wenn er bereits auf einen Erfahrungsschatz zurückgreifen kann, auch die Rolle des Fachplaner Monitorings übernehmen und beispielsweise das Messkonzept selbst erstellen.

Diese Personalunion ist häufig zwischen Fachplaner Monitoring und Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen sinnvoll. Ein solcher Ansatz minimiert Schnittstellenverluste – ein entscheidender Faktor für den Erfolg von Monitoringprojekten. Expertise aus einer Hand führt nicht nur zu einer nahtlosen Kommunikation und einem einheitlichen Verständnis für das Projektziel, sondern es fördert auch eine agile Reaktionsfähigkeit auf Herausforderungen, die während des Monitorings auftreten können. Diese Agilität ist entscheidend, um zeitnah Anpassungen vorzunehmen und die Qualität und Zuverlässigkeit der Datenerfassung und –auswertung zu sichern.

3.2.3 Der Monitoringprozess

Ein Monitoringprojekt ist ein mehrstufiger Prozess, der von der initialen Idee bis zur abschließenden Bewertung reicht. Bild 31 verdeutlicht das Vorgehen und die Zuständigkeiten. Grundsätzlich können alle Phasen einzeln oder in Kombination von einem Bauherrn ausgeschrieben werden. Hinweise dazu sind in den jeweiligen Phasen enthalten. Nachfolgend wird dieser Prozess zusammengefasst, wobei auf die optionalen Prozessschritte aufgrund der Übersichtlichkeit nicht eingegangen wird, da sie in der Regel nur bei sehr großen und komplexen Projekten zum Einsatz kommen. Weitere Informationen zu den optionalen Prozessschritten können dem Leitfaden entnommen werden.

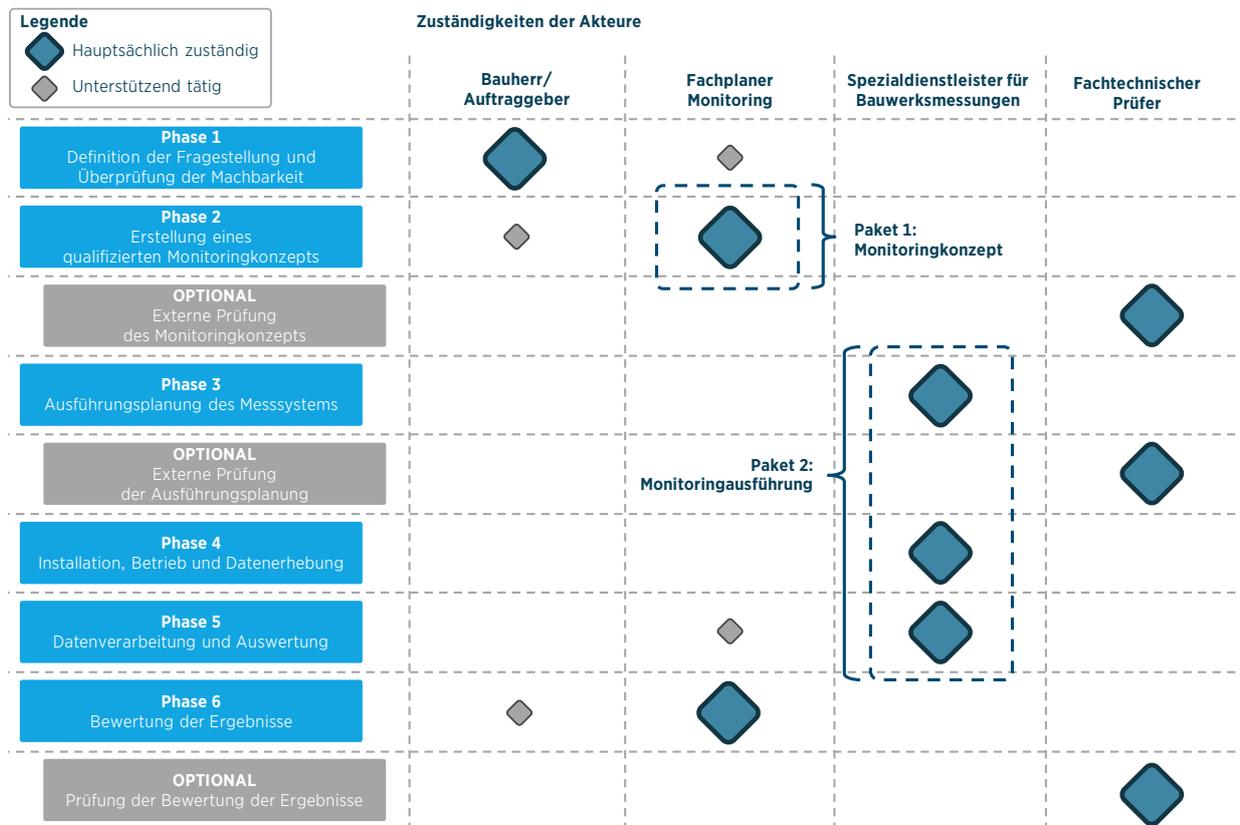


Bild 31: Der Monitoringprozess inkl. der üblichen Zuständigkeiten in Anlehnung an [2] (eigene Darstellung)

Nachfolgend wird der Prozess in Anlehnung an das DBV-Merkblatt Brückenmonitoring zusammengefasst. Für eine detailliertere Ausführung, siehe [2].

Phase 1: Definition der Fragestellung und Überprüfung der Machbarkeit

In diesem grundlegenden Schritt wird das Ziel des Monitorings definiert. Zu überwachende Aspekte wie etwa Verformungen, Rissbildungen oder Schwingungen werden identifiziert und eine Machbarkeitsstudie wird durchgeführt. Diese Studie beurteilt, ob das geplante Monitoring technisch umsetzbar ist und ob es im Verhältnis zu den erwarteten Ergebnissen und Kosten steht, siehe auch Kapitel 5. Risiken und Herausforderungen werden identifiziert, um einen reibungslosen Ablauf des Projekts zu gewährleisten. Es kann dabei auf die Anwendungsfälle in Kapitel 2.4 zurückgegriffen werden.

Die Zuständigkeit liegt in der Regel beim Bauherrn. Er kann sich durch den Fachplaner Monitoring hinsichtlich des Bedarfs und der Definition der Fragestellung beraten lassen. In einigen Fällen unterstützt auch ein Bauwerksprüfer oder Aufsteller einer Nachrechnung, sofern vorhanden. Gerade letzterer ist häufig derjenige, der ein Monitoring als Kompensationsmaßnahme vorschlägt (AwF 020) und der damit die Aufgabenstellung für das Monitoring definiert. Je nach Anwendungsfall kann die Fragestellung auch aus bekannten Schäden (AwF 010) und somit aus der Bauwerksprüfung resultieren.

Eine detaillierte Auflistung der Leistungen in dieser Phase ist in [2] enthalten.

Phase 2: Erstellung eines qualifizierten Monitoringkonzeptes

Auf Basis der Aufgabenstellung aus Phase 1 wird ein detailliertes Monitoringkonzept erstellt. Dieses Konzept bildet die Grundlage für das gesamte Projekt und ist daher von besonderer Wichtigkeit. Die Aussagekraft eines Monitorings wird dadurch bestimmt, wie viel Informationsgehalt aus den Messungen extrahiert werden kann. Nach Definition der Messaufgabe unter Berücksichtigung aller objektspezifischen Randbedingungen (u. a. erwartetes Bauwerksverhalten, mögliche Risiken und Degradationsprozesse

sowie Anforderungen an die Umgebungsbedingungen und Einsatzzeit) muss die Frage geklärt werden, welche Informationen zur Beantwortung der Messaufgabe benötigt werden. Im Konzept wird festgelegt, welche Daten gesammelt, wie sie erfasst und übertragen, und welche Methoden zur Datenanalyse und -bewertung angewendet werden. In dieser Phase werden auch die spezifischen Anforderungen an die Messtechnik und die Datenverarbeitung festgelegt. Dies umfasst die Entscheidung über die Art der Sensoren, ihre genaue Platzierung und die Häufigkeit der Messungen. Gerade die Datenbewertung muss in diesem Schritt bereits vorgedacht werden, da sie Einfluss auf das Sensorlayout und die Art der Sensoren hat. Der Detaillierungsgrad des Sensorlayouts ist im Gegensatz zur Ausführungsplanung des Monitorings noch nicht besonders hoch. Es wird schematisch gezeigt, an welchen Stellen des Bauwerks welche Messungen durchzuführen sind. Dabei sind auch Fragestellungen zur Ausfallsicherheit zu betrachten und ggf. in einer entsprechenden Redundanz im Messlayout zu berücksichtigen. Als Beispiel dient ein Ausschnitt aus einer Sensorübersicht in Bild 32.

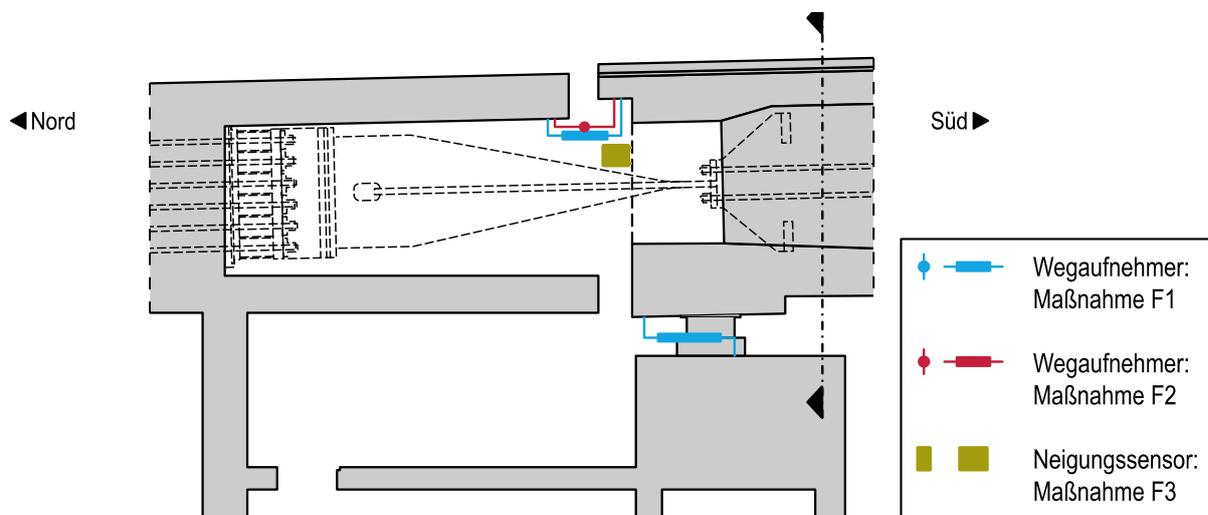


Bild 32: Beispiel für die Detailtiefe eines Monitoringkonzepts hinsichtlich Sensorpositionen (eigene Darstellung)

Im Fall von Überwachung sicherheitsrelevanter Zustände ist es unerlässlich, dass eine genaue Kenntnis über den Grenzzustand vorliegt und die kritischen Entwicklungen sich als eindeutig messbare physikalische Größen äußern. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende Vorankündigung von Strukturveränderungen, die zu kritischen Zuständen führen. Hierfür müssen die Bauwerksreaktionen sowohl betrag- als auch zeitmäßig detektierbar sein. Auch müssen die Formänderungswerte ausreichend groß sein, um zwischen tatsächlichem Bauwerksverhalten und Betriebs- und Umwelteinflüssen oder Rauschen im Messsignal unterscheiden zu können. Die eingesetzte Sensorik muss verlässlich und robust sein und es sollten redundante Messungen eingeplant werden, um im Fall von Ausfall der Messtechnik Rückfallebenen zu haben. Da die Überwachung von sicherheitsrelevanten Zuständen mit der Auslösung von Folgehandlungen einhergeht, muss weiterhin eine ausreichende Reaktionszeit zwischen Messung/Auswertung der Messung und Umsetzung der entsprechenden Folgehandlungen vorhanden sein. Um im Fall des Eintretens kritischer Zustände sofort handeln bzw. Gegenmaßnahmen einleiten zu können, kommt der Festlegung von Schwellwerten (maximal zulässige Anzahl von Einzelereignissen oder Überschreitung eines vorher festgelegten Bereichs) und der Definition entsprechender Alarmpläne/Havariekonzepte eine besondere Rolle zu. Die Definition der Grenzwerte und die Erstellung entsprechender Notfall- bzw. Alarmpläne sollten im Vorfeld der Messungen, idealerweise bereits im Rahmen der Erstellung des Monitoringkonzeptes erfolgen, sofern möglich.

Die Zuständigkeit liegt in der Regel beim Fachplaner Monitoring. Die Prüfung des Konzepts erfolgt durch den Bauherrn.

Dieser Prozessschritt wird üblicherweise separat ausgeschrieben (Paket 1, nach Bild 31). Eine kombinierte Ausschreibung zusammen mit der Umsetzung des Monitorings ist oftmals nicht sinnvoll, weil das Konzept den Umfang der Messungen festlegt und somit keine seriöse Kalkulation für die Umsetzung erstellt werden kann.

Das Konzept hat einen besonderen Anspruch an Sorgfalt und Vollständigkeit da es den Grundstein für ein erfolgreiches gesamtes Monitoringprojekt legt. Eventuelle Planungsfehler können zu Komplikationen in späteren Phasen führen. Eine detaillierte Auflistung der Leistungen in dieser Phase ist in [2] enthalten und sollte unbedingt beachtet werden.

OPTIONAL: Externe Prüfung des Monitoringkonzepts

Nachdem das Monitoringkonzept vom Fachplaner Monitoring erstellt wurde, übernimmt der Bauherr in der Regel die Prüfung dieses Konzepts hinsichtlich seiner Vollständigkeit, Machbarkeit und Eignung, die spezifischen Anforderungen des Bauwerks zu erfüllen.

Bei sehr komplexen Fragestellungen oder Sachverhalten (siehe Ende Kapitel 3.2.3) kann ein fachtechnischer Prüfer hinzugezogen werden. Dieser weist die gleichen Qualifikationen wie der Fachplaner Monitoring auf. In diesem Fall muss die Prüfungsleistung ausgeschrieben werden, was den Monitoringprozess verlangsamt, sodass dieser Schritt nur in Einzelfällen in Betracht gezogen werden sollte, wenn die Komplexität oder das Risiko des Projekts dies rechtfertigen.

Die Zuständigkeit liegt dann beim fachtechnischen Prüfer.

Phase 3: Ausführungsplanung des Messsystems

Die dritte Phase konzentriert sich auf die operative Planung der Messungen. Hier werden die zuvor im Konzept festgelegten Aspekte in einen praktischen Plan umgesetzt. Die Auswahl der Sensoren und die Bestimmung ihrer Positionen sind entscheidend für die Genauigkeit und Effektivität des Monitorings. In dieser Phase wird auch die Infrastruktur für die Datenübertragung und -speicherung (siehe Kapitel 6), einschließlich der notwendigen Hardware und Software, detailliert geplant. Außerdem wird ein genauer Zeitplan für die Installation und die Durchführung der Messungen erstellt. Der Detaillierungsgrad beispielsweise für Sensorpositionen bei der Ausführungsplanung unterscheidet sich von dem des Monitoringkonzepts. Bild 32 zeigt ein Beispiel aus einem Monitoringkonzept, während Bild 33 einen Auszug aus einer Ausführungsplanung als Beispiel zeigt.

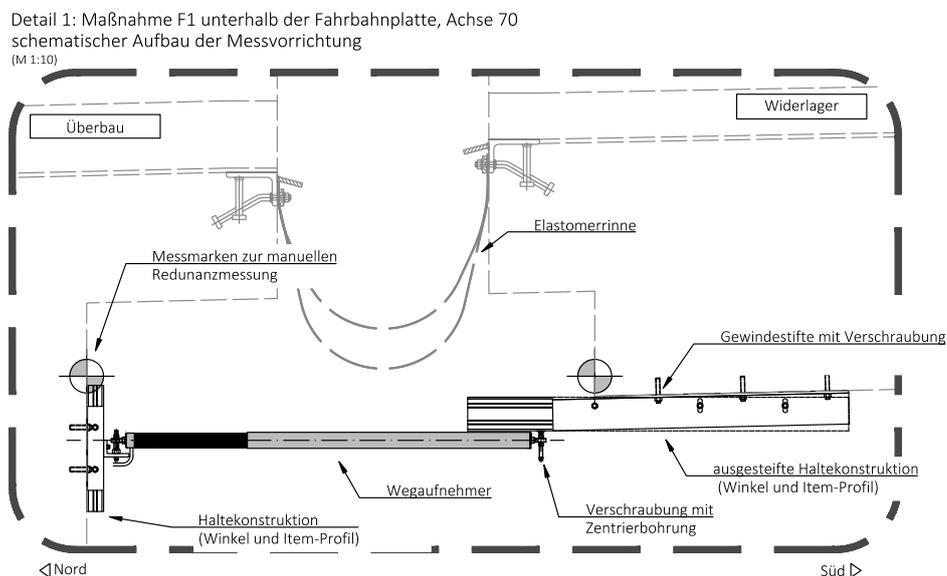


Bild 33: Beispiel für die Detailtiefe einer Ausführungsplanung hinsichtlich Sensorlage und -montage und Redundanzmessungen (eigene Darstellung)

Die Zuständigkeit liegt beim Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen, sodass dieser Schritt üblicherweise ausgeschrieben wird. Eine kombinierte Ausschreibung zusammen mit der Installation und dem Betrieb als Gesamtpaket ist dabei sinnvoll (siehe Paket 2 in Bild 31).

Eine detaillierte Auflistung der Leistungen in dieser Phase ist in [2] enthalten.

OPTIONAL: Externe Prüfung der Ausführungsplanung

Eine einfache Prüfung der Unterlagen sollte immer durch den Bauherrn erfolgen. Unter bestimmten Randbedingungen (siehe Ende Kapitel 3.2.3) kann eine externe Prüfung sinnvoll werden. In diesem Fall ist eine Überprüfung der Ausführungsplanung durch einen sachkundigen Dritten sinnvoll. Diese Leistung kann zum Beispiel durch den Fachplaner Monitoring übernommen werden, sofern dieser nicht in Personalunion mit dem Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen innerhalb des Projekts auftritt. Andernfalls muss ein Fachtechnischer Prüfer hinzugezogen werden, der mindestens gleiche Qualifikationen wie der Fachplaner aufweist. Da diese Leistung möglicherweise separat vergeben wird, kann dieser Schritt durch den Vergabeprozess unter Umständen zu Verzögerungen im zeitlichen Ablauf des Projekts führen. Die externe Prüfung sollte daher nur in Ausnahmefällen und beim Zutreffen der o.g. Kriterien eingesetzt werden.

Phase 4: Installation, Betrieb und Datenerhebung

Die Sensoren und die zugehörige Messausrüstung werden an der Brücke installiert. Diese Phase erfordert präzise Arbeit, um sicherzustellen, dass alle Geräte korrekt positioniert und voll funktionsfähig sind. Nach der Installation und der Überprüfung der Plausibilität der Messwerte beginnt der Betrieb des Messsystems. Die Daten werden kontinuierlich gemäß dem Monitoringkonzept erhoben. Während dieser Phase sind sowohl eine ständige Überwachung und Wartung des Systems als auch eine regelmäßige Plausibilitätsüberprüfung der Messwerte erforderlich, um die Qualität und Genauigkeit der Daten sicherzustellen.

In dieser Phase wird die Installationsdokumentation angefertigt, welche u.a. für die Messdatenauswertung notwendig ist. Sie ist ein wesentliches Dokument zur Nachvollziehbarkeit der Messungen und umfasst diverse Informationen und Anleitungen zur Installation und Inbetriebnahme des Systems. Ohne die Informationen aus der Dokumentation ist eine Auswertung der Messdaten nicht möglich. Sie umfasst u. a. die genauen Sensorpositionen und Messrichtungen (mit Detaillierungsgrad der Ausführungsplanung (siehe Bild 33), Bezeichnung der Sensoren, eine Fotodokumentation der Sensoren und Installationsarbeiten, Details zur Sensorkalibrierung und die Dokumentation der Systemkonfiguration (Messschranke, Kabelwege, etc.)).

In der Phase 4 werden verschiedene Prozessschritte zusammengefasst. Das hängt damit zusammen, dass diese in der Regel durch den gleichen Akteur übernommen werden sollten. Die Zuständigkeit liegt beim Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen. Der Schritt wird üblicherweise zusammen mit Phase 3 ausgeschrieben (siehe Paket 2 in Bild 31).

Eine detaillierte Auflistung der Leistungen in dieser Phase ist in [2] enthalten.

Phase 5: Datenverarbeitung und -auswertung

Die gesammelten Daten werden zunächst aufbereitet, um sie für die Analyse nutzbar zu machen. Dies umfasst die Messfehlerbehandlung, Filterung, Kalibrierung und Synchronisation der Daten, die technisch bedingt häufig anders erfasst werden, als sie für die spätere Auswertung benötigt werden. Beispielsweise messen Sensoren Spannungsänderungen in Einheiten wie mV/V . Diese müssen in interpretierbare Größen übersetzt werden, zum Beispiel mm . Anschließend erfolgt die eigentliche Auswertung. Hierbei werden die Daten mit Hilfe von statistischen Methoden und Analysetechniken interpretiert, um aussagekräftige Informationen über den Zustand der Brücke zu gewinnen. Diese Informationen werden je nach Projekt in Berichten zusammengefasst, die eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Brücke bilden und für die spätere Bewertung als Daten übergeben.

Die Zuständigkeit der Datenverarbeitung (Messfehlerbehandlung, Filterung, Kalibrierung, etc.) liegt in der Regel beim Erfasser der Daten, somit also beim Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen. Der Schritt wird üblicherweise zusammen mit den Phasen 3 und 4 ausgeschrieben (siehe Paket 2 in Bild 31).

Die Auswertung bei der aus Daten Informationen werden, kann ebenfalls durch den Spezialdienstleister übernommen werden oder durch den Verfasser des Monitoringkonzepts (Fachplaner Monitoring). Falls die Auswertung nicht durch den Erfasser der Daten erfolgt, müssen die Schnittstellen und Datenübergabe klar definiert sein. Hinweise dazu sind in Kapitel 6 enthalten. Für diese Phase ist ein umfangreiches Wissen in Bezug auf Bauwerksmessungen und in den meisten Fällen auch statisch konstruktive

Kenntnisse im Zusammenhang mit dem Bauwerk und seiner Fragestellung erforderlich. Häufig ist daher eine Personalunion aus Spezialdienstleister und Fachplaner sinnvoll.
Eine detaillierte Auflistung der Leistungen in dieser Phase ist in [2] enthalten.

Phase 6: Bewertung der Ergebnisse

In der letzten Phase werden die analysierten Daten im Kontext der ursprünglichen Hypothesen und der konstruktiven Eigenschaften der Brücke ingenieurtechnisch interpretiert. Diese Interpretation erlaubt es, fundierte Schlussfolgerungen über die strukturelle Integrität und die Sicherheit der Brücke zu ziehen. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Empfehlungen für weiterführende Maßnahmen oder notwendige Anpassungen der Monitoringstrategie abgeleitet. Die Bewertung kann je nach Bedarf und Festlegung im Messkonzept bereits während der Messungen fortlaufend oder einmalig am Ende der Monitoringmaßnahme erfolgen.

Sowohl die Bewertung der fachlichen und technischen Randbedingungen als auch die Aus- und Bewertung der Daten erfordern fachkundiges Personal. Erst durch die Betrachtung der erfassten Daten im fachlichen Kontext gewinnen diese an Wert. Damit ist die Qualität der Ergebnisse des Monitorings und das Erreichen der im Vorfeld definierten Ziele nicht nur von der technischen Ausführung der Messung, sondern maßgeblich von der Expertise der Beteiligten im individuellen Fall abhängig.

Für die Bewertung sind statisch konstruktive Kenntnisse des Bauwerks inkl. seiner Problemstellungen erforderlich, sodass diese Aufgabe je nach Anwendungsfall (siehe Kapitel 2.4) vom Fachplaner Monitoring, dem Ausführungsplaner des Bauwerks/Aufsteller der Nachrechnung (siehe Phase 1) oder dem Bauherrn selbst erfolgen kann.

Eine detaillierte Auflistung der Leistungen in dieser Phase ist in [2] enthalten.

OPTIONAL: Prüfung der Bewertung der Ergebnisse

Eine einfache Prüfung der Unterlagen sollte immer durch den Bauherrn erfolgen. Sofern erforderlich, unterzieht ein unabhängiger Prüfer die Messergebnisse, nachdem diese ausgewertet und interpretiert wurden, die bewerteten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Empfehlungen einer detaillierten Überprüfung. Diese Prüfung ähnelt dem Verfahren, das in der traditionellen Ingenieurbauplanung angewandt wird, und dient dazu, die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse sowie die Angemessenheit der empfohlenen Maßnahmen zu bestätigen. Der Prüfer überprüft die Dokumentation und Berichte, die im Rahmen des Monitoringprojekts erstellt wurden mit Fokus auf den bewerteten Ergebnissen. Besonderes Augenmerk kann auch auf der Überprüfung der vorgeschlagenen Maßnahmen zur Instandhaltung, Verstärkung oder Reparatur der Brücke liegen, um sicherzustellen, dass diese auf einer soliden Datenbasis beruhen und technisch sowie wirtschaftlich sinnvoll sind. Der Prüfer erstellt einen Prüfbericht, der die Freigabe der Ergebnisse und Empfehlungen enthält oder Anforderungen für Anpassungen formuliert.

Die Zuständigkeit liegt bei einem unabhängigen Prüferingenieur oder einer Prüfinstanz, die vom Bauherrn beauftragt wird. Dieser Prüfer sollte nicht an den vorangegangenen Schritten des Monitorings beteiligt gewesen sein, um Objektivität zu gewährleisten.

Ob und wann einer dieser Schritte durchgeführt werden sollte, ist abhängig von verschiedenen Faktoren innerhalb eines Monitoringprojekts. Im nachfolgenden Kapitel werden die Randbedingungen für eine Prüfung dargelegt.

Wann ist eine Prüfung sinnvoll?

Der Monitoringprozess nach [2] wurde an verschiedenen Stellen um die Ergebnisse aus dem Workshop (siehe Kapitel 3.1.3) ergänzt. Dabei wurden hauptsächlich verschiedene Prüfprozesse eingeführt, die je nach Randbedingungen des Projekts mehr oder weniger sinnvoll werden. Nachfolgend werden einige Hinweise dazu gegeben:

Randbedingungen, die für eine Prüfung sprechen:

- **Komplexe oder kritische Bauwerke:**
Bei Brücken, die aufgrund ihrer Konstruktion, Nutzung oder historischen Bedeutung als besonders komplex oder kritisch einzustufen sind, bietet eine zusätzliche Prüfung eine weitere Sicherheitsebene.
- **Hochrisiko-Szenarien:**
In Situationen, in denen potenzielle Defizite oder Schäden gravierende Folgen für die öffentliche Sicherheit oder die Umwelt haben könnten, ist eine Prüfung sinnvoll.
- **Große öffentliche oder wirtschaftliche Bedeutung:**
Bei Projekten, die eine erhebliche Investition darstellen oder für die Infrastruktur von großer Bedeutung sind, sichert die Prüfung die Investition ab und gewährleistet die Effizienz der getroffenen Maßnahmen.
- **Bei erstmaliger Anwendung neuer Technologien oder Methoden:**
Wenn im Rahmen des Monitorings neue oder unerprobte Messverfahren und Auswertemethoden zum Einsatz kommen, kann eine unabhängige Überprüfung dazu beitragen, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse zu validieren.
- **Wenn gesetzliche oder regulatorische Vorgaben dies erfordern:**
In manchen Rechtsgebieten, für bestimmte Bauwerkstypen oder durch das Qualitätssicherungskonzept als Teil des Monitoringkonzeptes können unabhängige Prüfungen verpflichtend sein.

Randbedingungen, bei denen eine Prüfung nicht sinnvoll ist:

- **Standardprojekte mit geringem Risiko:**
Bei Brückenmonitoringprojekten, die standardisierte Verfahren und gut etablierte Techniken nutzen und bei denen keine besonderen Risiken oder Komplexitäten vorliegen, kann unter Umständen auf eine zusätzliche Prüfung verzichtet werden.
- **Expertise des Bauherrn:**
Wenn der Bauherr bereits Monitoringprojekte durchgeführt hat und selbst in der Lage ist, die Dokumente und Ergebnisse zu sichten und zu bewerten, kann auf eine externe Prüfung in der Regel verzichtet werden.
- **Kleinere Instandhaltungsmaßnahmen:**
Wenn die Ergebnisse des Monitorings lediglich kleinere Wartungs- oder Instandhaltungsarbeiten nach sich ziehen, die regelmäßig durchgeführt werden und deren Auswirkungen gut bekannt sind, kann die Notwendigkeit einer Prüfung geringer sein.
- **Hohe Kosten-Nutzen-Disparität:**
In Fällen, in denen die Kosten für die unabhängige Prüfung in keinem sinnvollen Verhältnis zum potenziellen Nutzen stehen, insbesondere bei kleineren oder weniger kritischen Projekten.
- **Hohe Expertise des Monitoringteams:**
Wenn das Team, das das Monitoring durchführt, über eine hohe Expertise und Erfahrung verfügt und intern strenge Qualitätskontrollen und Peer-Reviews durchgeführt werden, kann dies die Notwendigkeit einer externen Prüfung mindern.

Grundsätzlich sollte der Bauherr immer alle Ergebnisse prüfen. Ob und wann eine externe Prüfung durchgeführt werden sollte, ist somit im Einzelfall zu entscheiden. Prüfprozesse verzögern in der Regel das Vorgehen, da die Leistung ausgeschrieben bzw. vergeben wird.

4 Ausschreibung, Vergabe und Vertragsgestaltung

4.1 Allgemeines

Monitoringleistungen können nach öffentlicher oder beschränkter Ausschreibung mit oder ohne Teilnahmewettbewerb sowie nach freihändiger Vergabe vergeben werden. Die Wahl der Vergabeart richtet

sich nach dem Umfang des geplanten Monitorings sowie nach der Komplexität der zu erbringenden Leistung. Die öffentliche Auftragsvergabe oberhalb der EU-Schwellenwerte regelt die Vergabeordnung (VgV) [40], unterhalb der Schwellenwerte greift die Unterschwellenvergabeordnung (UVgO) [41]. Auftraggeber von Monitoringleistungen im Bereich des Straßen- und Brückenbaus müssen bei der Vergabe von freiberuflichen Leistungen sowohl die Vorgaben der VgV bzw. UVgO als auch die spezifischen Bestimmungen des Handbuchs für die Vergabe und Ausführung von freiberuflichen Leistungen im Straßen- und Brückenbau (HVA F-StB) [42] beachten. Allerdings sind für Monitoringleistungen in der aktuellen Auflage der HVA F-StB noch keine fachspezifischen Hinweise verankert.

Die Erstellung eines Monitoringkonzepts durch einen Fachplaner Monitoring wird mitunter auch freihändig vergeben, da hierfür Spezialkenntnisse sowie bzgl. des Tragwerkverhaltens als auch bzgl. der Monitoringleistungen bis hin zur Datenauswertung und des Datenmanagements erforderlich sind.

Im Vergleich zu Ausschreibungen für Planungsarbeiten im Brückenbau, Brückenprüfungen und Instandhaltungsarbeiten, für die bei den Baulasträgern umfangreiche Erfahrungen vorliegen, sind Monitoringmaßnahmen Spezialdienstleistungen, die in der Vergangenheit in nur eingeschränktem Umfang durchgeführt und deshalb ausgeschrieben und vergeben wurden. Daraus ergibt sich für die Baulasträger derzeit oft noch eine Unsicherheit darüber, in welcher Form Ausschreibung und Vergabe bestmöglich erfolgen sollten, welche Leistungen ausgeschrieben und welche Randbedingungen in den Leistungsbeschreibungen einbezogen werden sollten. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die Kriterien der Angebotsbewertung im Rahmen der Vergabe von Monitoringleistungen u.U. anders gewichtet werden sollten, als dies von gewöhnlichen Bauleistungen bekannt ist. Auch die Vertragsgestaltung mit der Berücksichtigung von Punkten zur Haftung kann sich merklich von denen bei den bisher üblichen Aufgabenstellungen in der Brückenerhaltung unterscheiden.

Monitoring wird in Kapitel 3.2.3 in sechs Leistungsphasen gegliedert. Dies ermöglicht vor dem Hintergrund des bekannt breiten Anwendungsspektrums für Monitoring und den entsprechend sehr unterschiedlichen möglichen Ausführungen eine strukturierte Herangehensweise in der Leistungsbeschreibung. Für Monitoring im Straßen- und Brückenbau ist es sinnvoll, die sechs Phasen grundsätzlich in zwei Pakete zusammenzufassen, die i.d.R. separiert ausgeschrieben und vergeben werden. Dies wird in Kapitel 4.3 näher erläutert.

4.2 Vergabekriterien

Die Vergabe von Aufträgen wird von der VgV bzw. der UVgO geregelt. Im Straßen- und Brückenbau müssen zusätzlich die spezifischen Bestimmungen des HVA F-StB Teil 2 Richtlinien für das Durchführen der Vergabeverfahren [42] berücksichtigt werden. Darin ist u.a. geregelt, dass die Zuschlags- bzw. Vergabekriterien bereits in den Aufforderungen zur Angebotsabgabe mitgeteilt werden müssen.

Prinzipiell sind haushaltswirtschaftliche Ziele und Zwänge bei der Zuschlagerteilung zu berücksichtigen und gemäß HVA F-StB Teil 2 das wirtschaftlichste Angebot zu berücksichtigen. Gleichzeitig muss die Vergabe grundsätzlich an fachkundige, leistungsfähige und zuverlässige Unternehmen zu angemessenen Preisen erfolgen. All diese Gesichtspunkte sind bei der Definition der Vergabekriterien zu berücksichtigen.

Neben dem Preis ist vor allem die nachweisbare Qualifikation das entscheidende Kriterium für die erfolgreiche Durchführung von Monitoringprojekten. Derzeit nimmt das Monitoring aufgrund der Neuartigkeit der Verfahrensweise als auch aufgrund der zumindest zum Teil ausgeprägten Komplexität eine Sonderrolle ein, da durch diese Umstände eine nur verhältnismäßig geringe Anzahl von Wettbewerbern eine ausreichend hohe Qualifizierung nachweisen können. Um eine fachkundige Auftragsbearbeitung sicherzustellen, sollte die Qualifikation höher gewichtet sein als der Preis, bspw. in einem Verhältnis von 70 % zu 30 % oder 60 % zu 40 %.

Das probate Mittel für das Belegen einer fachlichen Eignung sowohl für das Erstellen von Monitoringkonzepten als auch für die Ausführung von Monitoring besteht im Nachweis von Referenzprojekten in der Vergangenheit. Das gilt sowohl für das angebotsabgebende Unternehmen allgemein als auch für den zugeordneten Projektleiter persönlich. Dabei sollten die eingereichten Referenzprojekte sowohl in den konstruktiven Randbedingungen des Bauwerks als auch in der

Aufgabenstellung des Monitorings vergleichbar sein. Für außergewöhnliche Merkmale des Monitorings, z. B. Messtechnik, Datenauswertung oder Datenmanagement betreffend können gesondert Referenzen verlangt werden.

Aufgrund der Neuartigkeit von Monitoring und der sich daraus ergebenden Begrenztheit an Referenzprojekten kann es zielführend sein, weitere Möglichkeiten für einen Nachweis der fachlichen Eignung eines Bieters in Betracht zu ziehen. Dies können Erfahrungen mit hinreichend vergleichbaren messtechnischen Methodiken zur Bestimmung der Integrität von Bauwerken sein oder der Nachweis der Begleitung von Monitoringprojekten im Rahmen von Forschungsvorhaben an Hochschulen. In diesem Zusammenhang können auch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften von der Fachkundigkeit der Autoren zeugen. Fachliche Weiterbildungen sind prinzipiell ein Mittel der Qualifizierung, allerdings sind aufgrund der Komplexität und Vielschichtigkeit der Aufgabenstellung im Monitoring Weiterbildungsmaßnahmen schwer zu realisieren und vorgelegte Nachweise daher genau zu prüfen bzw. nur für einzelne spezifische Aufgabenstellungen, bspw. das Datenmanagement, zuzulassen.

Bei komplexen Aufgabenstellungen kann außerdem von den Bietern ein Konzept bei Angebotsabgabe verlangt werden, in dem die Herangehensweise an die Aufgabenstellung dargestellt ist. Dies ist ein sehr gutes Mittel zur Abfrage der Qualifikation, es führt aber bei den Bietern häufig zu einem erhöhten Aufwand bei der Angebotserstellung. Daher sollte es nur bei komplexen Projektanforderungen oder -aufgabenstellungen eingesetzt werden.

Die Vergabekriterien können ggf. einen Einfluss auf das Vergabeverfahren haben. Beispielsweise können alternativ zum Verfahren der öffentlichen Ausschreibung, mit dem möglichst vielen potenziellen Bietern die Gelegenheit zum Einreichen eines Angebots gegeben wird, in einem Präqualifikationsverfahren zunächst die Referenzen oder alternative Nachweise abgefragt werden. Im Anschluss werden dann einige Bieter zur Angebotsabgabe aufgefordert. Weiterhin könnten Verhandlungsverfahren mit vorgeschaltetem Teilnahmewettbewerb genutzt werden. Bei diesem Verfahren geben die Bieter zunächst ihre Qualifikationen im Rahmen eines Teilnahmewettbewerbs ab. Anschließend werden ausgewählte Bieter zur Abgabe eines Angebots und eventuell zu Verhandlungen eingeladen. Dies ermöglicht es, die Qualifikationen im direkten Gespräch genauer zu prüfen und zu bewerten.

Um eine objektive Bewertung der eingegangenen Qualifikationsnachweise zu gewährleisten, empfiehlt es sich, eine Bewertungsmatrix zu entwickeln. Diese Matrix sollte die verschiedenen Qualifikationskriterien und deren Gewichtung enthalten. So kann eine transparente und nachvollziehbare Bewertung der Bieter erfolgen. Die Bewertungsmatrix bzw. Vergabekriterien und deren Wertung sind bei der Ausschreibung mit aufzunehmen.

Die Vergabe öffentlicher Aufträge muss grundsätzlich markt- und wettbewerbsorientiert erfolgen, ohne Unternehmen aufgrund ihres geografischen Standorts zu benachteiligen oder zu bevorzugen. Wenn für das Projekt schnelle Reaktionszeiten im Falle von Notfällen oder dringenden Reparaturen entscheidend sind, könnte die Fähigkeit des Bieters, solche Anforderungen zu erfüllen, bewertet werden. Dabei muss allerdings sichergestellt sein, dass diese Anforderung objektiv und nichtdiskriminierend ist.

4.3 Ausschreibung und Vergabe von Monitoringleistungen

Für die Ausschreibung und Vergabe von Monitoringaufträgen im Straßen- und Brückenbau ist es sinnvoll, die sechs in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Phasen nach [2] grundsätzlich in zwei Paketen zusammenzufassen, die i.d.R. separiert ausgeschrieben und vergeben werden.

- Paket 1 Monitoringkonzept: Das erste Paket beinhaltet im Wesentlichen die Erstellung eines qualifizierten Monitoringkonzepts für das geplante Monitoring, im Regelfall durch einen Fachplaner Monitoring.
- Paket 2 Monitoringausführung: Aufbauend auf dem Monitoringkonzept wird im in diesem Paket das Monitoring durch einen Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen geplant und ausgeführt. Das zweite Paket beinhaltet i.d.R. auch die Auswertung der erhobenen Messdaten im Sinne der Zielstellung sowie das Datenmanagement.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufgabenstellung und der damit zusammenhängenden Fachkompetenzen der jeweils beteiligten Akteure ist eine separate Ausschreibung und Vergabe von Monitoringkonzept und Monitoringausführung der Regelfall. Nicht zuletzt aufgrund des Umstandes, dass das Monitoringkonzept den Umfang der Ausführung definiert, sodass eine seriöse Kalkulation bei kombinierter Ausschreibung nur schwer möglich ist.

Die Komplexität von Monitoring kann in der praktischen Anwendung sehr unterschiedlich sein. Die messtechnische Überwachung einzelner Kenngrößen, die direkt gemessen und bewertet werden, beinhaltet im Normalfall eine geringe Komplexität. Auf der anderen Seite können große Monitoringsysteme mit vielen verschiedenen installierten Sensorarten und umfangreichen Auswertungs- und Bewertungsroutinen zu einer signifikanten Komplexität der Gesamtmaßnahme führen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine ggf. vorhandene monitoringbezogene Fachkompetenz und Erfahrung seitens des Auftraggebers die wahrgenommene Komplexität des Monitorings beeinflussen.

Die Erstellung des Monitoringkonzepts erfolgt üblicherweise durch einen Fachplaner Monitoring, der sowohl Kenntnisse und langjährige Erfahrungen bzgl. des Tragwerkverhaltens als auch bzgl. der zum Teil komplexen Messaufgaben bis hin zur Datenauswertung und des Datenmanagements besitzt. Besteht beim AG (Bauherrn) ausreichend Expertise und Erfahrung zum Aufstellen des Monitoringkonzepts, muss dieses nicht ausgeschrieben werden. Der AG ist in diesem Fall selbst der Fachplaner Monitoring (Personalunion). Aufgrund der Charakteristik der zu erbringenden Leistung eignet sich für die Ausschreibung des Monitoringkonzepts die Form der funktionalen Ausschreibung. Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, können aufgrund der Spezifität der Anforderungen an den AN (Fachplaner Monitoring) diese Leistungen u.U. auch frei vergeben werden.

Auf der Basis des erstellten Monitoringkonzepts kann im Anschluss das Vergabeverfahren mit Ausschreibung zur Ausführung des Monitorings durchgeführt werden. Zu den dabei auszuschreibenden Leistungen gehören die Planung, die Installation sowie der Betrieb des Monitoringsystems bis hin zur Datenerhebung sowie die Aufbereitung der Daten und die Bereitstellung der Ergebnisse (Phasen 3 bis 5 in Kapitel 3.2.3). Zusätzlich sind zu erbringende Leistungen zum Datenmanagement Teil dieses Leistungspakets. Aufgrund seiner Spezialkenntnisse ist der o.g. Fachplaner Monitoring befähigt, den AG bei Ausschreibung und Vergabe der Monitoringausführung zu beraten.

Die Arbeiten des Pakets Monitoringausführung können sowohl in konkreter als auch in funktionaler Form ausgeschrieben werden. Entsprechend Kapitel 3.2.3 wird das Paket Monitoringausführung i.d.R. an einen Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen vergeben.

Besteht beim AG eine ausreichend große Expertise und Erfahrung zu Planung, Installation und Betrieb von Monitoringsystemen, können die Arbeiten der Monitoringausführung funktional ausgeschrieben werden. Dabei wird kein konkretes Leistungsverzeichnis vorgegeben, sondern die zu erbringenden Leistungen werden vom AG entsprechend der Zielvorgaben definiert. Allerdings muss der AG in der Lage sein, die abgegebenen Angebote hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzielung des gewünschten Ergebnisses zu bewerten.

Bei komplexeren Monitoringmaßnahmen oder wenn die Expertise beim AG nur im eingeschränkten Maße vorliegt, sollte die konkrete Form der Ausschreibung Anwendung finden. Dabei gibt der AG ein konkretes Leistungsverzeichnis vor und definiert die zu erbringen Leistungen sehr detailliert. In dieser Form der Ausschreibung ist die Vergleichbarkeit der Angebote deutlich besser und die Abrechnung von Leistungen einfacher, da sie sich an einem detaillierten Leistungsverzeichnis orientieren. Leistungsbeschreibungen von konkreten Ausschreibungen zur Ausführung von Monitoring sollten neben Angaben zum Bauwerk, die ggf. die Zugänglichkeit beeinflussen, eine detaillierte Beschreibung des Leistungsumfangs beinhalten. Dabei sind u. U. auch Anforderungen an die Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit des Messsystems sowie an die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft bei Störungen festzulegen. Zusätzlich müssen möglichst allumfassend die das Monitoringsystem beeinflussende Randbedingungen wie Energieversorgung oder die aufgrund der Örtlichkeit höher wahrscheinlichen Störquellen (Vandalismus, Hochwassergefahr, etc.) benannt sein. Weiterführend sollte bereits in den Leistungsbeschreibungen festgelegt werden, wie die vorhandenen Risiken für Ausfall und ggf. Verlust des Monitoringsystems oder von Teilen dessen zwischen AG und AN verteilt werden, so dass dies bereits im Angebot Berücksichtigung finden kann.

Für die Erstellung von Monitoringkonzepten und bei einfachen Monitoringmaßnahmen mit geringem Umfang können Angebote pauschalisiert werden. Aus Sicht der Autoren des Leitfadens sind ausschreibungsfreie Open-House Verfahren für Monitoringleistungen als nicht sinnvoll zu erachten, da das Spektrum an verschiedenen Monitoringanwendungen groß ist und damit viele Ausformungen von Systemen existieren. Als Open-House-Verfahren wird dabei ein nicht exklusives Zulassungsverfahren bezeichnet, an dem alle interessierten Unternehmen während der festgelegten Vertragslaufzeit teilnehmen können. Der Auftraggeber wählt dabei keine einzelnen Unternehmen aus, sondern schließt mit allen Bietern einen Rahmenvertrag ab. Das Open-House-Verfahren unterliegt nicht dem Vergaberecht [43].

Im Rahmen des Vorhabens sind, jeweils für das Paket Monitoringkonzept sowie für das Paket Monitoringausführung, Checklisten für Ausschreibung und Vergabe von Monitoringleistungen erstellt und im Anhang der Broschüre veröffentlicht worden.

4.4 Vertragsgestaltung

Die Beauftragung erfolgt schlussendlich über Ingenieurverträge, die eine Form von Werkverträgen nach §§ 631 bis 651 BGB darstellen. Im Straßen- und Brückenbau gelten die HVA F-StB Vertragsbedingungen gemäß HVA F-StB Kapitel 1.4 [42], dementsprechend werden sie in die Abschnitte Besondere Vertragsbedingungen, Technische Vertragsbedingungen und Allgemeine Vertragsbedingungen für freiberufliche Leistungen im Straßen- und Brückenbau (AVB F-StB) [44] untergliedert, wobei letztere immer vereinbart werden müssen. In den Besonderen Vertragsbedingungen werden Termine und Fristen, Deckungssummen für Haftpflichtversicherungen sowie ergänzende Vereinbarungen und Bestimmungen bzgl. des Datenschutzes festgelegt. Die ergänzenden Vereinbarungen beinhalten u.a. bspw. Geheimhaltungsvereinbarungen, Vereinbarung zum Honorar und zur Mangelhaftung und ggf. zur Informationssicherheit. Werden Leistungen eines Monitorings separat an mehrere Auftragnehmer vergeben, ist es wichtig, die einzelnen Zuständigkeiten klar zu benennen und abzugrenzen.

Aufgrund des derzeit noch begrenzten Erfahrungspotentials in der Anwendung von Monitoring an Ingenieurtragwerken als auch aufgrund des Umstandes, dass es sich bei den zum Einsatz kommenden Monitoringsystemen zumeist nicht um industriell spezifizierte und standardisierte Systeme handelt, besteht im Monitoring ein vulnerables Risiko dafür, dass die beauftragten Leistungen durch Ausfall von Komponenten des Monitoringsystems nicht oder nur eingeschränkt erbracht werden können. Außerdem können Messwerte von Beginn an oder im Verlauf des Betriebs fehlerbehaftet sein bzw. werden, oder nachfolgende Auswertungsroutinen fehlerhaft durchgeführt werden.

Die erforderliche Zuverlässigkeit der Messtechnik, also die geforderte minimale Ausfallwahrscheinlichkeit von Messtechnik und der damit verbundene Daten- bzw. Informationsverlust sollte in den Ausschreibungsunterlagen benannt und vertraglich verankert werden. Bspw. ist es möglich, prozentual den max. zulässigen Ausfall zu definieren. Die Bereitstellung von Redundanz und ggf. von zeitnaher Reparatur der ausgefallenen Technik liegen dann im Bereich des AN.

Da Monitoringmaßnahmen i.d.R. über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, besteht das potenzielle Risiko des Verlusts an Messtechnik durch mutwillige oder unbeabsichtigte Beschädigung und/oder Diebstahl. Außerdem kann Messtechnik durch Extremwetterereignisse beschädigt oder zerstört werden. Hier sollten die bekannten Risiken klar einer der beiden Vertragspartei zugeordnet werden. Dies kann bspw. so erfolgen, dass Ersatz oder Reparatur dem AN obliegt oder aber es wird vertraglich festgelegt, dass Kosten für Ersatz und Reparatur per Nachweis dem AG zugewiesen werden.

In den Verträgen sollte auch die Art und Weise der Übergabe von Daten und Ergebnissen vorgeschrieben sein. Dazu zählen u.a. Vorhaltezeiten für Daten, Datenformate, Datenträgerart oder auch Datenbanksysteme. Hier sind die Vorgaben des Monitoringkonzepts bezüglich des Datenmanagements in den Verträgen umzusetzen.

Die Abrechnung erfolgt i.d.R. über das bepreiste Leistungsverzeichnis. Der Modus der Abrechnung ist vertraglich festzulegen. Abrechnungen sind nach Übergabe des Installationsberichts, nach Zwischenberichten zu festgelegten Zeitpunkten und nach dem Schlussbericht möglich. Die Berichte sollten dabei auch immer den Nachweis der Funktionalität und der Plausibilität der Messdaten bzw. der Ergebnisse beinhalten. Bei Monitoring über einen längeren Zeitraum sollten die Kosten für die Planung und Installation

des Systems von den laufenden Kosten des Betriebs getrennt werden. Weiterhin ist u. U. eine prozentuale Kostensteigerung pro Kalenderjahr zu berücksichtigen.

Die Ausführungsplanung kann nach Aufwand, ggf. pauschal erfolgen, Monitoringsysteme werden nach Komponenten abgerechnet, die Installation nach Aufwand, ggf. pauschal. Die Messwerterfassung kann nach Zeitraum und Messsystem erfolgen. Die Bewertung bei Sondersituation, z. B. bei Spannstahlbrüchen muss nach Aufwand erfolgen. Die Vorplanung bzw. das Monitoringkonzept erfolgen sinnvollerweise nach Aufwand, außer die Bauwerksuntersuchungen und die statische Bewertung sind so lückenlos, dass darauf das Monitoringkonzept entwickelt werden kann.

Unter Umständen kann es bei Monitoringmaßnahmen dazu kommen, dass während der vertraglich festgelegten Betriebszeit basierend auf den erzielten Erkenntnissen eine planmäßige Weiterführung der Maßnahme obsolet wird. Im Falle einer erhöhten Wahrscheinlichkeit eines solchen Szenarios sind die möglichen Konsequenzen vorab festzulegen und vertraglich zu beschreiben.

Fragestellungen zu Mängelansprüchen und deren Verjährung, zu Haftungsfragen und zu erforderlichen Haftpflichtversicherung sind in den AVB F-StB [44] beschrieben und geregelt.

Im Rahmen des Vorhabens sind für beide in Kapitel 4.3 beschriebenen Leistungspakete Checklisten für Vertragsgestaltung und für haftungsrelevante Fragestellungen in Zusammenhang mit Monitoringaufträgen erstellt und im Anhang der Broschüre veröffentlicht worden.

4.5 Haftung

Haftungsfragen im Zusammenhang mit Monitoring sind vielschichtig und bedürfen einer differenzierten Betrachtung. Im Rahmen der Leitfadenerstellung werden daher Grundsätze der Verantwortung und Haftung, wie sie im Rahmen von Bauwerksprüfungen angewendet werden, auf ihre Übertragbarkeit auf das Brückenmonitoring hin untersucht.

Nach § 3 Abs. 1 der geltenden Musterbauordnung [45] sind bauliche Anlagen u. a. so instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden. Entsprechend trägt der Eigentümer bzw. der Verfügungsberechtigte die Verantwortung für die ordnungsgemäße Instandhaltung, d. h. die Wartung, Überprüfung und ggf. Instandsetzung, sowie die Verkehrssicherheit der baulichen Anlage. Das gilt gleichermaßen für bauliche Anlagen von privaten Eigentümern/Verfügungsberechtigten wie von Bund, Ländern oder kommunalen Körperschaften [46].

Prinzipiell sind die Baulastträger für die Erfüllung der ihnen zugewiesenen Bauaufgaben einschließlich aller erforderlichen Kontrollaufgaben und Instandsetzungsmaßnahmen verantwortlich. Verantwortlichkeit bedeutet im Ergebnis aktives Handeln, da ein Unterlassen im Zweifel zu einem Organisationsverschulden führen würde. Diese Verantwortlichkeit der Baulastträger kann sowohl im Geltungsbereich des Zivilrechts als auch im öffentlichen Recht grundsätzlich auf Dritte übertragen werden. So haben einzelne Länder ihre Bauaufgaben auf unterschiedliche Einrichtungen, vor allem Landesbetriebe, verlagert. In diesen Fällen sind diese Behörden und Einrichtungen verpflichtet, die Aufgaben des Baulastträgers entsprechend den gesetzlichen Vorgaben zu erfüllen [47].

Die Fragen der Verantwortung und der Haftung sind nach Möglichkeit in den Besonderen Vertragsbedingungen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer zu regeln. Das HVA F-StB Teil 1 [42] regelt für planende Ingenieure und Prüfindenieure Ausschreibung, Vergabe und Vergütung von Leistungen im Bereich des Ingenieurbaus an Verkehrswegen [42]. Dort sind im Kapitel 1.4 Vertragsbedingungen Verpflichtungen seitens des freiberuflich tätigen Auftragnehmers zum Vorhalten einer Haftpflichtversicherung mit im Verhältnis zu Baukosten erforderlichen Deckungen für Sach- und Personenschäden beschrieben. Zusätzlich schreibt die AVB F-StB [44] in §16 eben diese Berufshaftpflichtversicherung vor. Die Deckungssummen sollten für die Erbringung von Monitoringleistungen an Bestandsbauwerken angepasst werden. Dies kann über eine Zeitwertermittlung für das entsprechende Bauwerk bspw. auf Basis der aktuellen Wiederherstellungskosten mit

Berücksichtigung einer linearen Abschreibung über die normative Nutzungsdauer gemäß Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV) [48] erfolgen.

Eine besondere Problematik betrifft den Umstand, dass in den AVB F-StB [44] Mängelansprüche und deren Verjährung festgelegt sind und entsprechend Mängelansprüche nach Ablauf von fünf Jahren verjähren. Dies kann im Rahmen von langzeitlichem Monitoring nur sehr eingeschränkt sinnvoll sein. Insbesondere bei Monitoringmaßnahmen mit der Aufgabenstellung der Überwachung des baulichen Zustands. Hier kann es vorkommen, dass die Auswirkung mangelhaft erbrachter Leistungen bei Planung, Installation und Betrieb von Monitoringsystemen so sind, dass im Verlauf der Maßnahme entstandene Zustandsänderungen erst wesentlich später erkannt werden können und so einen weit mehr als fünf Jahre zurückliegenden ursächlichen Mangel bei der Leistungserbringung offenbaren. Hier sollte, sofern das die AGB des Baulastträgers zulassen, konkrete Verlängerungen der in AVB F-StB § 14 verankerten Verjährungsfristen für Mängelansprüche formuliert und vertraglich verankert werden.

Im Rahmen des Vorhabens sind für beide in Kapitel 4.3 beschriebenen Leistungspakete Checklisten für Vertragsgestaltung und für haftungsrelevante Fragestellungen in Zusammenhang mit Monitoringaufträgen erstellt und im Anhang der Broschüre veröffentlicht worden.

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

5.1 Allgemeines

Prinzipiell werden Monitoringmaßnahmen durchgeführt, um Informationen über das Bauwerksverhalten, den Bauwerkszustand, dessen Entwicklung und/oder die tatsächlichen Einwirkungen bzw. Beanspruchungen zu gewinnen. Diese zusätzlichen Informationen erlauben besser informierte Bauwerksbewertungen und Zustandsprognosen und somit besser informierte Entscheidungen über Art, Umfang, Zeitpunkte und Priorität von Maßnahmen zur Gewährleistung der Bauwerkssicherheit und -verfügbarkeit. Oft ist es möglich, Bestandsbrücken durch eine monitoringgestützte Erhaltungsstrategie für einen längeren Zeitraum weiterzubetreiben. Des Weiteren besteht ein erhebliches Potenzial, Monitoring ergänzend zu den herkömmlichen Bauwerksprüfungen als Grundlage für eine effizientere, prädiktive Erhaltung einzusetzen.

Monitoringmaßnahmen sind mit Kosten verbunden und Straßenbauverwaltungen müssen grundsätzlich nachweisen, dass der potenzielle Nutzen einer Monitoringmaßnahme in einem günstigen Verhältnis zu den eingesetzten Ressourcen steht, da ihr Handeln stets nach dem Grundsatz der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit ausgerichtet sein muss. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen dienen der Bewertung, ob diese Anforderungen erfüllt sind.

Für die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken steht den Straßenbauverwaltungen die Richtlinie RI-WI-BRÜ [49] zur Verfügung. Hierin werden – vereinfacht ausgedrückt – die direkt bei den Straßenbauverwaltungen anfallenden Kosten der Entscheidungsalternativen (bzw. Varianten) Instandsetzung und Erneuerung verglichen. Zu diesen Kosten gehören die Investitionskosten für die Baumaßnahmen und die Folgekosten für die Bauwerkserhaltung innerhalb eines betrachteten Bewertungszeitraums. Zusätzlich wird in der Untersuchung der Restwert der Brücke am Ende des Bewertungszeitraums berücksichtigt. Da die Investitions- und Folgekosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen und der Restwert für einen Zeitpunkt in der Zukunft abgeschätzt werden muss, werden alle anfallenden Kosten und der Restwert mittels der Kapitalwertmethode auf ein Referenzjahr bezogen (diskontiert) und zu einem Gegenwartswert summiert. Durch dieses Vorgehen werden die Gesamtkosten der untersuchten Entscheidungsalternativen vergleichbar gemacht.

Derzeit steht den Straßenbauverwaltungen jedoch noch keine gesonderte Richtlinie für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen zur Verfügung, insbesondere weil (a) Monitoring im Erhaltungsmanagement von Straßenbrücken noch keine Standardkomponente ist bzw. Monitoring aktuell vorrangig anlassbezogen eingesetzt wird, wenn Schäden/Defizite vorhanden sind und es oftmals die einzige Alternative darstellt, um eine Brücke unmittelbar (ggf. eingeschränkt) verfügbar zu halten und (b) solche Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen nicht trivial sind und stark vom Kontext abhängen.

Prinzipiell kann die Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen – entsprechend dem auch in der RI-WI-BRÜ [49] verankerten Grundsatz – durch die Untersuchung und den Vergleich der Kosten der relevanten Entscheidungsalternativen (bzw. Varianten), wie z.B. Betrieb der Brücke ohne Monitoring und Betrieb der Brücke mit Monitoring, nachgewiesen werden (siehe auch Kapitel 5.3). Die Wissenschaft und Praxis wird sich in diesem Zusammenhang zunehmend einig, dass es bei der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen notwendig ist, sowohl die direkt bei den Straßenbauverwaltungen anfallenden Kosten als auch sämtliche Wirkungen einer Brücke auf das Verkehrsnetz, die Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu berücksichtigen [6], [7], [50].

Im Folgenden wird zunächst das aktuelle, in der Praxis etablierte bzw. vorgeschlagene Vorgehen bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen dargestellt. Dieses Vorgehen bezieht sich auf aktuell relevante Anwendungsfälle (AwF 010 bis 070 sowie AwF 100 und 110, siehe Kapitel 2.4). Anschließend wird in Kapitel 5.3 der Stand der Wissenschaft zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen, die insbesondere im Rahmen zukünftiger Anwendungsfälle eingesetzt werden sollen (AwF 080 und 090, siehe Kapitel 2.4), als Ausblick zusammengefasst.

5.2 Aktuelle Situation

Momentan existiert in der Praxis noch kein einheitliches, vorgeschriebenes Vorgehen bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen. Aktuell wird Monitoring vorwiegend als anlassbezogene (reaktive) Maßnahme zur Überwachung von bekannten lokal verorteten Schäden (AwF 010) oder bekannten Defiziten aus Konstruktion oder Nachrechnung (AwF 020) eingesetzt (siehe Kapitel 2.4 und Bild 1), weswegen solche Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen derzeit tatsächlich eine weitgehend untergeordnete Rolle in der Praxis spielen. Dies ergibt sich aus folgendem Umstand: Eine Sanierung, Instandsetzung oder Erneuerung einer Brücke ist im Allgemeinen kurzfristig nicht möglich. Kann in diesem Fall die Brücke mit Monitoring bis zur Durchführung der Erhaltungshaltungs-/Erneuerungsmaßnahme sicher weiterbetrieben werden, wird diese Lösung generell als einzige relevante Alternative vom Entscheidungsträger angesehen, um die Verfügbarkeit der Brücke weiterhin zu gewährleisten und die negativen Auswirkungen von Sperrungen bzw. Nutzungseinschränkungen zu vermeiden. Das Monitoring wird i.d.R. auf die individuelle Aufgabenstellung vom Betreiber gemeinsam mit Tragwerks- und/oder Monitoringexperten (sukzessive) zugeschnitten. Falls verschiedene Monitoringkonzepte existieren, die die gleiche Aufgabenstellung erfüllen, werden die direkt beim Betreiber anfallenden Investitions- und Folgekosten der unterschiedlichen Monitoringkonzepte durch eine einfache Kostenvergleichsrechnung [51] oder Kapitalwertberechnung [49] verglichen.

Neben der Überwachung der Wirksamkeit von Instandsetzungs-/Verstärkungsmaßnahmen (AwF 060) wird Monitoring, das für die Ermittlung von Einwirkungen (AwF 030), Belastungsversuche/dynamische Versuche (AwF 070), bauzeitliche Messungen (AwF 100), den Schutz von Bauwerken bei umliegenden Baumaßnahmen (AwF 110), die Unterstützung der Bauwerksprüfung (AwF 040) oder der Begleitung bedeutender Bauwerke (AwF 050) ausgerichtet ist (siehe Kapitel 2.4 und Bild 1), in der Praxis ebenfalls vornehmlich als anlassbezogene Maßnahme vom Betreiber i.d.R. in enger Abstimmung mit den verantwortlichen Tragwerksexperten definiert und beauftragt. Auch in diesen Anwendungsfällen werden die direkt beim Betreiber anfallenden Investitions- und Folgekosten von unterschiedlichen Monitoringkonzepten, die die definierten Anforderungen erfüllen, durch eine Kostenvergleichsrechnung oder Kapitalwertberechnung gegenübergestellt, sofern unterschiedliche Monitoringkonzepte vorhanden sind.

Der Einsatz von Monitoring im Rahmen von Referenzzertifikaten (AwF 090) und vom prädiktiven Lebenszyklusmanagement (AwF 080) spielt in der Praxis noch eine sehr untergeordnete Rolle. Modelle, Methoden und Verfahren zur Bewertung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses von Monitoringmaßnahmen, die in diesem Zusammenhang – aber auch im Rahmen der anderen möglichen Anwendungsfälle – eingesetzt werden sollen, werden aktuell gemeinsam von der Wissenschaft und Praxis entwickelt (siehe Kapitel 5.3).

Weitere Beispiele aus der Praxis, die den Nachweis der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Monitoringmaßnahmen aufzeigen, sind im DBV-Merkblatt Brückenmonitoring [2] enthalten.

Im ersten Beispiel wird das in der RI-WI-BRÜ [49] verankerte Verfahren zum Vergleich der direkt beim Betreiber anfallenden Investitions- und Folgekosten unterschiedlicher Instandsetzung- und Erneuerungsmaßnahmen einer ermüdungsbeanspruchten Brücke angewendet. Hierbei wird auch eine Variante untersucht, bei der Messungen zur Ermittlung von Ermüdungsbeanspruchungen eingesetzt werden sollen. Als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wird der Einfluss der Messungen auf die nachweisbare Restnutzungsdauer der Bestandsbrücke vorab abgeschätzt.

Im zweiten Beispiel wird der Nutzen einer Monitoringmaßnahmen durch einen Vergleich von Folgekosten, die durch Nutzungseinschränkungen einer geschädigten Brücke entstehen, bewertet. In der Untersuchung wird berücksichtigt, dass Mithilfe des Monitorings die Verkehrseinschränkungen und somit die Nutzungsausfallkosten reduziert werden können. Die Nutzungsausfallkosten durch Verkehrseinschränkungen können beispielsweise auf der Grundlage des Methodenhandbuchs zum Bundesverkehrswegeplan 2030 abgeschätzt werden [52], [7], [50]. Ein solcher Vergleich von Nutzungsausfallkosten bietet derzeit eine praktisch umsetzbare Möglichkeit, um den Vorteil von Monitoring gegenüber von Varianten ohne Monitoring quantitativ darzustellen bzw. verschiedene Monitoringkonzepte, die unterschiedlich starke Reduktionen von Verkehrseinschränkungen ermöglichen, miteinander zu vergleichen.

Im letzten Beispiel wird eine Möglichkeit zum Umgang mit dem Umstand, dass das Ergebnis einer Messung vor der Durchführung nicht feststeht, gezeigt. Hierbei werden die Erfolgsaussichten einer Monitoringmaßnahme zur Vermeidung einer Verstärkungsmaßnahme in Form von einer Erfolgswahrscheinlichkeit abgeschätzt. Auf der Grundlage dieser Wahrscheinlichkeit kann der Erwartungswert der Kosten für die Verstärkung (d.h. die Risikokosten) berechnet und zusammen mit den Monitoringkosten den vollen Kosten für die Verstärkung, die ohne Monitoring anfallen würden, gegenübergestellt werden. Dieses Vorgehen findet u. a. auch Anwendung, um Risikokosten von potenziellen Nachträgen in Bauprojekten abzuschätzen.

5.3 Stand der Wissenschaft

Monitoring kann im Kern als Werkzeug zur Unterstützung von Entscheidungen angesehen werden. Ein solches Werkzeug hat genau dann einen Nutzen, wenn es zu effizienteren Entscheidungen führt. Dies ist z. B. der Fall, wenn (a) eine bestehende Brücke mit Monitoring für einen längeren Zeitraum sicher weiterbetrieben werden kann, anstatt sie mit größerem Ressourcenaufwand gekoppelt mit erheblichen Nutzungseinschränkungen zu erneuern oder (b) eine neue Brücke während ihrer geplanten Nutzungszeit effizienter betrieben werden kann im Vergleich zur herkömmlichen Erhaltungsstrategie

In der jüngsten Vergangenheit hat sich die Messtechnik, Datenübertragung und -verarbeitung merklich weiterentwickelt, so dass Monitoring immer häufiger angewendet wird. Obwohl es gemeinhin akzeptiert ist, dass Monitoring ein nützliches Werkzeug zur Unterstützung des Erhaltungsmanagements von Ingenieurbauwerken ist, wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis von Monitoring selten explizit quantifiziert (siehe auch Kapitel 5.2). Aus diesem Anlass wurde die europäische COST-Action TU1402 initiiert (siehe hierzu Ausgabe 28, Nr. 3 der Zeitschrift Structural Engineering International aus dem Jahr 2018), die Forschende aus den Bereichen Structural Health Monitoring (SHM), Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse sowie technische Entscheidungsfindung erstmals gezielt zusammengeführt hat. Im Zuge dieses Projektes wurde anhand idealisierter Anwendungen gezeigt (siehe z. B. [53]), dass die Bayes'sche Entscheidungstheorie [54] eine konsistente, wissenschaftlich fundierte Basis für die Bewertung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses von Monitoring unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten und Risiken bildet.

Im Folgenden wird anhand eines einfachen Beispiels die Grundidee dieses Ansatzes skizziert. Zu diesem Zweck wird ein Szenario mit den zwei Entscheidungsalternativen Betrieb einer Brücke ohne Monitoring und Betrieb einer Brücke mit Monitoring betrachtet. Um in diesem allgemeinen Fall das Nutzen-Kosten-Verhältnis des Monitorings bewerten zu können, müssen für beide Entscheidungsalternativen die zu erwartenden direkten und indirekten Kosten aus dem Betrieb der Brücke während eines bestimmten Nutzungszeitraums ermittelt werden. Für den Fall, dass die Brücke ohne Monitoring unter Anwendung einer herkömmlichen Erhaltungsstrategie (z. B. durch regelmäßige Zustandserfassung und -bewertung gemäß

DIN 1076 [1] und RI-EBW-PRÜF [20]) betrieben wird, fallen folgende direkte und indirekte Kosten an (siehe auch [7], [50]):

- Kosten für die Erhaltungsmaßnahmen inklusive Bauwerksprüfungen,
- monetarisierte Auswirkungen eventueller Nutzungseinschränkungen und
- Kosten eines eventuellen Bauwerksversagens.

Falls die Brücke unter Anwendung einer monitoringgestützten Erhaltungsstrategie betrieben wird, entstehen folgende Kosten (siehe auch [7], [50]):

- Kosten für Installation, Betrieb und Wartung des Monitoringsystems,
- Kosten für die auf der Grundlage des Monitorings eventuell durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen inklusive Bauwerksprüfungen,
- monetarisierte Auswirkungen eventueller Nutzungseinschränkungen und
- Kosten eines eventuellen Bauwerksversagens.

Jegliche Kosten, die während der Betriebszeit der Brücke anfallen, werden mit Hilfe der Kapitalwertmethode [49] auf einen Referenzzeitpunkt bezogen (diskontiert) und summiert.

Bei der Bestimmung der zu erwartenden (diskontierten) Kosten bzw. des Erwartungswerts der (diskontierten) Kosten der jeweiligen Entscheidungsalternative muss beachtet werden, dass diese von

- der zukünftigen Entwicklung des Bauwerkszustands und der Bauwerkszuverlässigkeit,
- den Fähigkeiten des Messsystems/der Prüfverfahren und der Datenanalyse,
- den möglichen Prüf- und Monitoringergebnissen, und
- den an diese Ergebnisse angeschlossenen Entscheidungen über Erhaltungsmaßnahmen, wie z. B. weitere Bauwerksprüfungen und Monitoringmaßnahmen, Nutzungseinschränken, Instandsetzungen und Erneuerung

abhängen.

Die zu erwartenden (diskontierten) Kosten der jeweiligen Entscheidungsalternative werden auf der Grundlage von einer Reihe von probabilistischen Modellen bestimmt. Dies umschließt Modelle (a) der Alterungs-/Schädigungsprozesse, (b) des Tragwerksverhaltens, (c) der Einwirkungen, (d) der Prüfverfahren/Monitoringsysteme, (e) der Erhaltungsmaßnahmen und (f) der Kosten sowie vorab festgelegten Regeln für Maßnahmen, die auf der Grundlage von Prüf- und Monitoringergebnissen und deren Bewertung sowie den Vorhanden Informationen über bisherige Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden [55], [56], [57].

Falls die zu erwartenden Kosten des Brückenbetriebs ohne Monitoring größer sind als die zu erwartenden Kosten des Brückenbetriebs mit Monitoring, ist das Monitoring wirtschaftlich. Die Differenz der zu erwartenden Kosten der beiden Entscheidungsalternativen wird auch als Value of SHM (VoSHM) bezeichnet [58], [59], [60], [61]. Nur wenn der VoSHM positiv ist, sollte ein Monitoring umgesetzt werden.

In der aktuellen Forschung werden diese Verfahren beispielsweise zur Optimierung von Sensorplatzierungen eingesetzt [62]. Darüber hinaus wurde kürzlich ein praktisch anwendbares Konzept zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit eines Schwellwertmonitorings für vorgeschädigte Bestandsbrücken entwickelt und in einem Excel-Tool implementiert [50].

6 Datenmanagement für Monitoringdaten

6.1 Aktuelle Situation

Die Straßenbauverwaltungen stehen vor der ständigen Herausforderung, eine sichere und effiziente Infrastruktur für den öffentlichen Verkehr zu gewährleisten. Angesichts des stetigen Anstieges des Verkehrs und der Alterung bestehender Infrastrukturen ist die Anwendung von ergänzenden Konzepten zur bisherigen Brückenüberwachung notwendig. Damit ist eine Standardisierung der Vorgehensweisen und

die Etablierung von Datenmanagementsystemen für die anfallenden Daten von zentraler Bedeutung, wenn im zunehmenden Maße Monitoringanwendungen für diverse Anwendungsfälle (s. Kapitel 2.34) umgesetzt werden. Während die bisherige Bauwerksprüfung zu einem Bericht in Papierform oder einem PDF-Dokument geführt hat in denen auch im geringen Maße Messergebnisse (z. B. Lagerverschiebungen und Lagerspaltmaße) dokumentiert sind, werden bei Monitoringanwendungen Daten zum Bauwerk generiert, die nicht dem typischen zyklischen Ablauf und der Herangehensweise der aktuellen Bauwerksprüfung nach der bisher gültigen DIN 1076 entsprechen. Es stellt sich die Frage, welche organisatorischen und technischen Möglichkeiten den Straßenbauverwaltungen aktuell zur Verfügung stehen, um Ergebnisse aus dem Monitoring zu verarbeiten. Dieser Frage wurde u. a. durch eine Online-Umfrage nachgegangen. In der Umfrage, s. Bild 34 links, zeigte sich, dass nach Einschätzung der Teilnehmer aus den Straßenbauverwaltungen, in den häufigsten Fällen nur der Messbericht als PDF-Dokument auf einem Dateiserver abgelegt wird. Nur bei etwas mehr als 40 % der Teilnehmer, die den Messbericht auf einem Dateiserver ablegen, sind auch die Monitoringdaten zusammen mit diesem Messbericht abgelegt. Häufig werden die Messberichte in ein oder mehrere Datenbanksysteme importiert, jedoch ist es eher die Ausnahme, dass sich die Monitoringdaten in den aktuell verfügbaren Datenbanksystemen ebenfalls speichern oder zuordnen lassen. In der Umfrage stimmen unter 10 % der Teilnehmer zu, dass die Daten in einer Datenbank liegen während über 50 % den Messbericht in solchen Systemen hinterlegen. Die Speicherung der Monitoringberichte und Daten in einer Cloud ist nur in einem geringen Maße realisiert, hier liegt die Zustimmung zur Aussage bei 13 %.

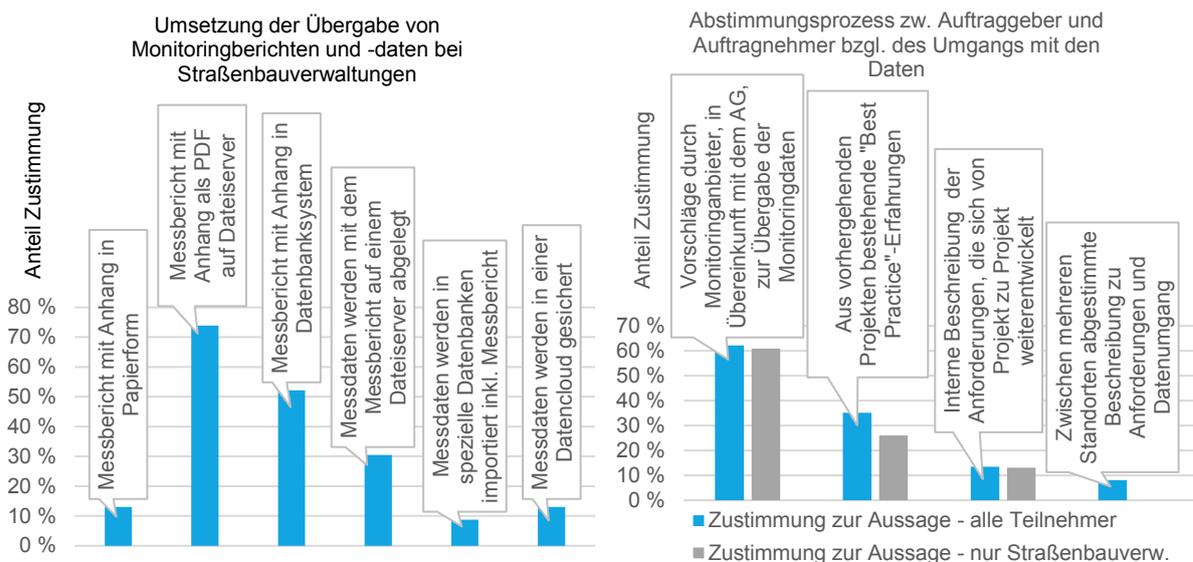


Bild 34: Ergebnisse der Online-Umfrage zur Umsetzung des Datenmanagements von Monitoringergebnissen: aktuell angewendete Verfahren / Systeme zur Übergabe von Monitoringberichten und -daten (Mehrfachantworten) (links) und Abstimmungsprozess zur Datenübergabe zwischen den Straßenbauverwaltungen und den Monitoringdienstleistern (Mehrfachantworten) (rechts) (eigene Darstellung)

Für die Straßenbauverwaltungen ist es aktuell schwierig, neben den Monitoringberichten, auch die Monitoringdaten als aufbereitete Rohdaten entgegenzunehmen. Diese Hürden resultieren u.a. aus IT-Sicherheitsanforderungen, die an den sicheren Betrieb eines Behördennetzwerks gestellt werden. Dem gegenüber steht jedoch der große Wert in der Entgegennahme der Rohdaten, um eine Nachvollziehbarkeit und auch im späteren eine mögliche Validierbarkeit der Daten zu haben. Zudem wird eine weitere Nutzung in den späteren Inspektionen oder im Rahmen der prädiktiven Instandhaltung möglich. Den Zugriff auf die Daten in möglichst schlanken Prozessen bereitzustellen ist außerdem im Sinne der Datensouveränität und der Data Governance wertvoll und sollte im Hinblick auf eine bauwerkslebensdauerübergreifende Speicherdauer auch an eine robuste Organisationsstruktur übertragen werden.

Die aktuelle Verfahrensweise bei der Entgegennahme ist ein im geringen Maßstab automatisierter Prozess und entspricht zum großen Teil nicht den FAIR Prinzipien enthalten, s. Kapitel 6.3.2. Bei periodischer Datenlieferung in kurzer Folge und einer steigenden Anzahl an umgesetzten Monitoringanwendungsfällen entsteht zwangsläufig die Notwendigkeit der Automatisierung und Vereinheitlichung von

Datenübergabeprozessen. Das Daten so aufbereitet und vereinheitlicht sind, dass diese nachgenutzt werden können, ist ein Balanceakt zwischen Flexibilität, erprobter Vorgehensweise und technischen Möglichkeiten, der insbesondere die Nutzerinnen und Nutzer mit ihrem jeweiligen Arbeitsauftrag einschließt. Laut der Umfrage, s. Bild 34 rechts, erfolgt die Abstimmung zu den Details der Datenübergabe der Monitoringergebnisse auf Vorschlag und Anraten des Monitoringanbieters bzw. Spezialdienstleisters für Bauwerksmessungen in Übereinkunft mit dem Auftraggeber. Dieser Aussage stimmen ca. 60 % zu. Der Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen kennt den sich fortlaufend weiterentwickelnden technischen Stand der Monitoringsysteme und weiterführenden Komponenten. Er kann so die Daten möglichst effizient bereitstellen, wie seine Systeme zur Datenerfassung und Auswertung dies anbieten und ist daher auch Ausgangspunkt und Treiber für Neuerungen und Änderungen, die sich auf das Datenmanagement auswirken. Die Umfrageergebnisse bei ausschließlicher Betrachtung der Antworten der Straßenbauverwaltungen im Vergleich zu allen Teilnehmern ergibt hier keine Unterschiede. Es stimmten ca. 30 % der Teilnehmer zu, dass es eine Grundlage für die Datenübergabe gibt, die bei der bisherigen Projektabwicklung erarbeitet wurde und nun in Form der best practice-Lösung Anwendung findet. Nur etwas mehr als 10 % stimmten zu, dass es interne Anforderungen gibt, die im Rahmen der Projektdurchführung als Grundlage herangezogen oder verbessert werden können. Keine Straßenbauverwaltung stimmte zu, dass es abgestimmte Anforderungen für das Datenmanagement von Monitoringdaten gibt, die über eine Abteilung / Standort / Beteiligten hinausgehen und übergreifend Anwendung finden. Dieses Problem soll mit diesem Bericht adressiert werden.

Bei der generellen Frage nach der Zuständigkeit für die Datenhaltung zeigt sich unter den 37 Teilnehmenden bei dieser Teilfrage mit Mehrfachantwort ein heterogenes Bild, dass entweder der Bauherr mit 21 Nennungen (56 %), der Fachplaner Monitoring mit 14 Nennungen (38 %) oder der Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen mit 28 Nennungen (76 %) diese Aufgabe umsetzen sollte. Als späteren Nutzer der Daten eines Datenmanagement für Monitoring sehen schwerpunktmäßig 30 Teilnehmende (81 %) den Bauherrn, 24 Teilnehmende (65 %) den Fachplaner Monitoring und 23 Teilnehmende (62 %) den Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen. Weniger als 30 % sehen den Ausführungsplaner / Aufsteller der Nachrechnung als Nutzer. Vergleichbare Werte ergeben sich, wenn nur die Antworten der Straßenbauverwaltungen betrachtet werden.

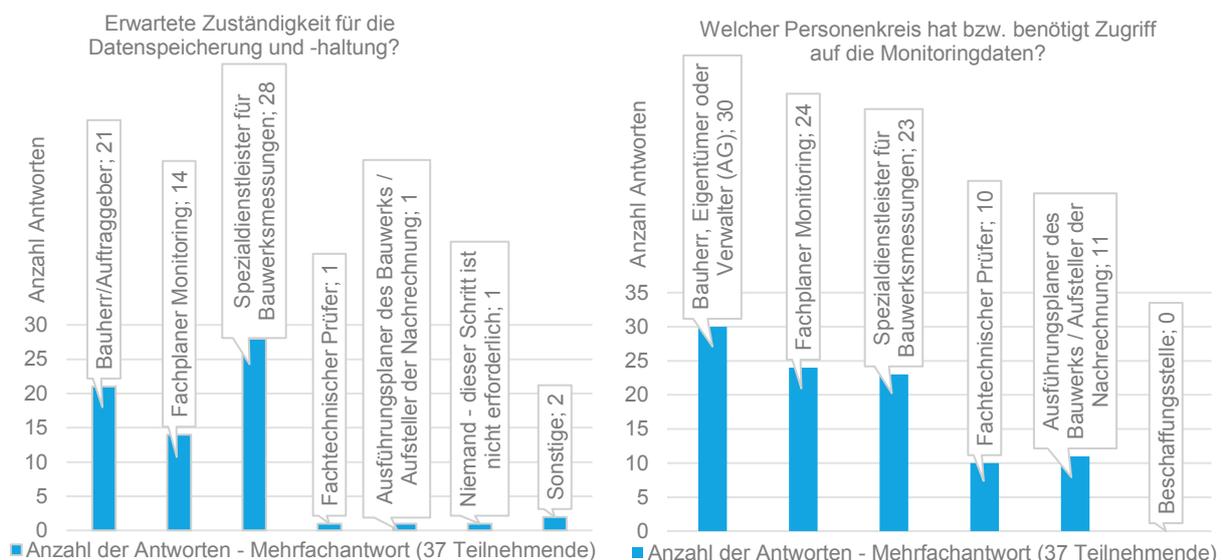


Bild 35: Ergebnisse der Online-Umfrage zur Zuständigkeit für die Datenspeicherung (Mehrfachantworten) (links) und zu den Bedarfsträgern der Monitoringdaten (Mehrfachantworten) (rechts) (eigene Darstellung)

Bei Betrachtung der Freitextantworten der Umfrage, zur grundsätzlichen Notwendigkeit, ob die Daten in ein Datenmanagement bei der Straßenbauverwaltung übertragen und Zugriff ermöglicht werden sollte, zeigt sich jedoch eine stärkere Tendenz, dass die Straßenbauverwaltungen früher oder später in der Lage

sein wollen, die Monitoringdaten entgegenzunehmen. Monitoringdienstleister schätzen in diesem Zusammenhang eher ein, dass die Straßenbauverwaltungen den Zugriff auf Projektinformationen, reduzierte Messdaten und Auswertungen benötigt, jedoch das Datenmanagement als Plattformlösung gut durch den Anbieter bzw. den Verantwortlichen für den Betrieb des Monitoringsystems realisiert werden kann. Zu differenzieren ist dabei, dass auch die Art des Monitorings bzw. der Monitoringanwendungsfall stark den Umfang der Rohdaten bzw. die Stufe der Datenaggregation beeinflusst und damit die Frage, welche Daten sinnvoll übergeben werden können bzw. sollten. Diese Fragen sind jedoch für viele Monitoringanwendungsfälle schwer zu beantworten. Die resultierenden Datenbestände von z. B. verteilten faseroptischen Dehnungsmessung, Acoustic Emission Messungen oder Verformungsüberwachung über hochauflösende photogrammetrische Modelle können höchst unterschiedlich ausfallen, je nachdem ob umfangreiche Rohdaten oder höchst aggregierte Ergebnisse betrachtet bzw. gespeichert werden. Zielführend ist ein Weg, der sich am schnell entwickelnden Stand der Technik orientiert und möglichst vollständige und hochwertige Datensätze umfasst.

6.2 Zielvorstellungen

Es entsteht für die Straßenbauverwaltung die Aufgabe, dass neben den dokumentierten und visuell dargestellten Ergebnissen als PDF-Dokument auch die aufbereiteten Messdaten in maschinell verarbeitbarer Form gespeichert werden mit dem Ziel, diese Daten sowohl als Grundlage einer erneuten Auswertung als auch als Datengrundlage für zukünftige intervallmäßige Auswertungen zu nutzen. Die Daten, die über die Lebensdauer eines Bauwerks, über mehrere Technologiezyklen des Monitorings und des Datenmanagements hinweg zusammengetragen werden, sollten mit einem besonderen Anspruch an die Nachvollziehbarkeit und die langfristige Archivierbarkeit und Lesbarkeit abgelegt werden. Zur Erfüllung dieses Anspruchs ist das Datenmanagement ein konkreter Leistungsbaustein der für die Durchführung des Monitorings verantwortlichen Stelle und muss in die Geschäftsprozesse der Straßenbauverwaltung integriert werden. Durch ein hier vorgeschlagenes Abstimmungsinstrument soll erreicht werden, dass ein zukunftsfähiger Abstimmungsprozess zur Datenübergabe zwischen der Straßenbauverwaltung und den Spezialdienstleistern für Bauwerksmessungen im Rahmen der Angebotsabgabe und Vergabe etabliert wird. Die Daten sollen damit in Form, Umfang, Beschreibung und Datenqualität validiert und vollständig im Datenmanagement aufgenommen werden. Die Ausgestaltung der Vereinbarung kann auch auf die fachtechnische Prüfung erfolgen. Es kann die Erfüllung der Datenbereitstellung in vereinbarten Intervallen erfolgen und der damit ggf. verknüpften Bestätigung der Leistungserbringung.

Das Datenmanagement fungiert als Datenquelle zur Bereitstellung von Monitoringdaten und Metadatenbeschreibungen für jedes einzelne Bauwerk für autorisierte Benutzer oder Anfragen über Schnittstellen zum automatisierten Abruf. Es muss spätestens in der Nutzungsphase gewährleistet sein, dass eine eindeutige und zweifelsfreie Zuordnung zwischen den Datenbeständen der laufenden und ehemaligen Bauwerksmessungen sowie den Metadaten hergestellt werden kann. Die in den Metadaten hinterlegten direkten Abhängigkeiten zu ggf. externen Ressourcen, wie Bauwerksplänen, BIM-Modellen, Messstellenplänen und Installationsdokumentationen müssen auflösbar und aktuell sein. Außerdem sollte das Datenmanagement einen Überblick über den Datenbestand hinsichtlich des Umfangs, der Datenqualität und zu aggregierten Informationen und Ergebnissen liefern.

Erst durch die Nutzung der Inhalte des Datenmanagementsystems wird dessen Mehrwert validierbar und dient effektiv einem objektiven Zweck. Eine reine archivarische Datenhaltung ist meist ineffizient und wegen des fehlenden Feedbacks aus der Nutzererfahrung auch meist effektivlos. Im schlimmsten Fall entstehen isolierte Datensilos. In der Umfrage haben über 80 % der Teilnehmenden zugestimmt, dass ein standortunabhängiger Zugriff auf die Monitoringdaten im Normalfall erforderlich ist.

Die Herausforderungen bei Daten aus Monitoringanwendungen sind ihre starke Heterogenität, die meist notwendige Korrelation der reinen Daten zu Metainformationen (Sensorik, Setup, Verarbeitung) und die kontinuierlichen bzw. in kurzen Intervallen anwachsenden Datenbestände, die meist als Zeitreihen, aber auch als andere Datenarten auftreten. Besonders das Spektrum, das der Datenumfang in Abhängigkeit der Messaufgabe hat, reicht von ein paar wenigen Einzelmessungen einer Messgröße bis zu zeitlich hochaufgelösten Dauermessungen eines umfassenden Sensorsetups mit hunderten Sensoren. Daraus resultiert eine große Bandbreite an Anforderungen, die der Anwender an ein Datenmanagement stellen kann und stark unterschiedliche Anforderung an die dahinterliegenden IT-Systeme. Bereits vermeintlich

kleine Datenmengen sind zu beherrschen, allein schon um eine möglichst automatisierte fachtechnische Prüfung (u.a. Qualität, Aussagekraft, Vollständigkeit und Richtigkeit) auf Seite des AG vorzunehmen, selbst ohne die Daten fachlich auszuwerten.

Es besteht daher je nach Anwendungsfall mehr oder weniger Abstimmungsbedarf zwischen dem Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen und der Straßenbauverwaltung bzw. dem Bauherrn, um eine Nachnutzung der Monitoringdaten über die gesamte Bauwerkslebensdauer zu erreichen. Anhand der Praxiserfahrungen der Ingenieurbüros hat sich gezeigt, dass Monitoringdaten insbesondere auf niedrigen Aggregationsstufen (z. B. Zeitreihen von Dehnungsmessungen) nicht ohne weiteres von einem unbeteiligten Dritten ausgewertet werden können. Häufig sind Detailwissen und Rücksprache mit dem Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen notwendig, wenn es sich um nicht standardisierte Monitoringanwendungsfälle handelt. Je zentraler dabei das Datenmanagement für Monitoringdaten im Gesamtprozess der Bauwerksprüfung bei einem vorliegenden Monitoringanwendungsfall aufgestellt ist und ggf. auch die Datenquelle für die Auswertungen unterschiedlicher Akteure bereitstellt, desto eher kann sichergestellt werden, dass alle notwendigen Informationen hinterlegt werden und nicht am Datenmanagement vorbei kommuniziert wird. Aktuell fehlen den Straßenbauverwaltungen durchgehende Möglichkeiten für die strukturierte Ablage zur langfristigen Archivierung und Bereitstellung von Monitoringdaten und deren Visualisierung. Um dies zukünftig zu ermöglichen, sollen die Straßenbauverwaltung u. a. mit diesem Bericht in die Lage versetzt werden Schnittstellen zum Datenaustausch und die Möglichkeit zur persistenten Ablage von Monitoringdaten zu schaffen. In der Onlinebefragung waren die drei relevantesten Funktionalitäten, die ein Datenmanagement realisieren soll:

- Überblick über den Datenbestand liefern,
- Einblick in Metadaten, aggregierte Informationen und Ergebnisse geben
- Datensätze abrufbar vorhalten

6.3 Methodik bei der Konzeption eines Datenmanagements für Monitoringdaten

6.3.1 Grundlagen für die Anforderungsanalyse an ein Datenmanagement

Ein Datenmanagement nimmt eine zentrale Stelle zwischen unterschiedlichen Stakeholdern im Monitoringprozess ein, da es Schnittstellencharakter besitzt. Das folgende Vorgehen soll den Straßenbauverwaltungen als Werkzeug dienen, um ihren Bedarf an ein Datenmanagement formal beschreiben und priorisieren zu können, für die Auswahl des passenden Systems bzw. passender Erweiterungen. Die Konzeption, Entwicklung und nachhaltige Wartung einer Software ist eine dynamisch, organisatorisch, lizenzrechtlich und technisch anspruchsvolle Aufgabe, deren Implikationen zu einer Reihe von z. T. tiefgreifenden Strukturanpassungen führen. Daher haben sich aktuell lose gekoppelte Softwaresysteme, die über Application Programming Interfaces (APIs) technisch miteinander interagieren, etabliert. Das Spektrum, um einen umfassenden Anforderungskatalog zu erfüllen ist meist eine Kopplung von vielen Teillösungen, die im Zusammenwirken die Gesamtlösung darstellen. Teile der Gesamtlösung können generische Softwaretools sein, mit denen sich bestimmte Teilaspekte abdecken und lösen lassen. Die Adaption kann auf Seite des Nutzers, aber auch des Dienstleisters erfolgen. Das andere Ende des Spektrums stellt eine anforderungsspezifische Implementierung von Softwareanforderungen dar, die gemäß eines Leistungsverzeichnisses umgesetzt wird. Für viele Entwicklungen kommen sog. Softwareplattformen zum Einsatz, welche in ihrer Systemarchitektur eine Vielzahl von wiederverwendbaren und konfigurierbaren Komponenten enthalten, die für unterschiedliche Produkte eingesetzt werden können. Auch die Erweiterung von bestehender Softwarelösungen über Plug-Ins, Add-Ons oder Erweiterungen, um neue oder spezifisch angepasste Funktionalität zu realisieren ist eine Möglichkeit.

Der typische Prozess der Entwicklung bzw. Evaluierung solcher Systeme folgt modernen agilen Softwareentwicklungsprozessen, die auf definierten Prinzipien beruhen, die als Leitsätze für die agile Arbeit dienen. Die höchste Priorität ist es, dass der Nutzer in einem sehr frühen Entwicklungsstadium eingebunden und fortan durch kontinuierliche Auslieferung passender Software an die Entwicklung angeschlossen wird. Die Prinzipien spiegeln sich in den konkret praktizierten Arbeitsformaten, wie *Scrum* oder *Extreme Programming* (XP) wider.

Eine Methode, um die Anforderungen nutzernah und im Dialog zwischen den Akteuren zu einem Datenmanagement-System zu beschreiben, stellt die Formulierung von Anwendungsfällen dar (engl. Use-Cases). Die Sammlung von textlich beschriebenen Nutzungszielen können sowohl auf hoher Abstraktionsebene als auch bei der detaillierten fachtechnischen Umsetzungsebene angelegt werden. Bei dieser Vorgehensweise wird zwischen zwei Sichten auf die Anforderungen unterschieden: 1) Die Anwendungsfälle beschreiben, was vom System im Austausch mit der Umwelt erwartet wird und 2) die Geschäftsprozesse beschreiben, die einzelnen Tätigkeiten, die nacheinander schrittweise ausgeführt werden, um ein geschäftliches Ziel oder einen Verwaltungsauftrag zu erreichen. Beide Sichtweisen müssen im Zusammenhang betrachtet und analysiert werden.

Eine formalisierte Möglichkeit zur Beschreibung eines Use Case stellen die User Stories dar. Dabei stellt der Use Case den Kontext dar, in dem die jeweiligen User Stories formuliert werden. Während ein Use Case den Anwendungsfall umfassend beschreibt, so sind User Stories immer nur Teilanforderungen die aus einer nutzerzentrierten Sichtweise formuliert sind. In Alltagssprache werden sie in der Form gebildet:

„Als <Rolle> möchte ich <Ziel/Wunsch>, um <Nutzen>“

Die einzelnen User Stories können von konkreten Domänenexperten (Straßenbauverwaltung, Prüfsingenieure, Fachplaner Monitoring, Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen) in Workshops formuliert bzw. in einem iterativen Prozess ergänzt werden. Die Zusammenstellung der User Stories in einer graphischen Übersicht wird als User Story Map bezeichnet. In dieser Darstellungsweise werden horizontal die aufeinanderfolgenden Aktivitäten eines Anwenders (Rolle) dargestellt. Die Aktivitäten/Aufgaben werden detailliert in sog. Epics beschrieben, welche sich aus den zugehörigen User Stories zusammensetzen, die alle Einzelziele des Anwenders für die Aktivität, Aufgabe bzw. des Epics beschreiben.

Im Rahmen eines Workshops können die User Stories als Klebezettel oder Postkarten erstellt und am Flipchart visualisiert werden. In digitaler Form ist die Darstellung und Organisation der User Stories ebenfalls möglich, vgl. Bild 36.

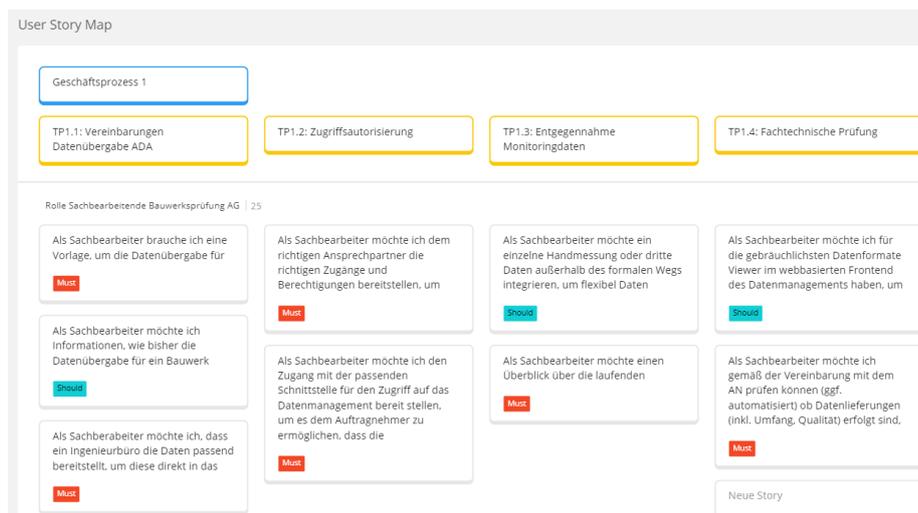


Bild 36: Visualisierung von User Stories auf einer User Story Map (eigene Darstellung)

Das Ziel dieser Darstellungsweise ist es, dass eine leicht vermittelbare und weniger missverständliche Beschreibung der Anforderung entsteht, die in unterschiedlichen Situationen von Nutzen sein kann:

- a) Bei der Entscheidungsfindung über die Bedarfe für die Straßenbauverwaltung
- b) Bei der Evaluation und Vergleich von marktverfügbaren Softwaresystemen auf Seite der Straßenbauverwaltungen

- c) Zur Kommunikation der Bedarfe bei der Weiterentwicklung von Roadmaps auf der Seite der Softwareanbieter
- d) Bei der Konzeption eines individuellen Softwarezusatzes (Plug-in, Add-on, Erweiterung, Modul) zur Beauftragung durch die Straßenbauverwaltung

Mit der User Story Map haben die Stakeholder jederzeit einen Komplettüberblick über die Bedarfe und können Softwareprodukte oder Entwicklungsstände hinsichtlich der erreichten Ziele evaluieren. Je nach Plattform lassen sich User Story Maps historisch in der Versionsreihenfolge zurückverfolgen und so Anforderungsänderungen erkennen (Reversionierung). Damit könnten jederzeit aus dem aktuellen oder dem historischen Stand abgeleitete User Story Maps dupliziert werden (Branching), um diese weiterzuentwickeln.

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine User Story Map initial erstellt, die über die Projektbearbeitung hinaus für die Stakeholder, sowohl AG-seitige als auch AN-seitig als Werkzeug zur individuell angepassten Weiterentwicklung der Anforderungen an ein Datenmanagement dienlich sein soll. Als Ziel soll damit eine Einbindung adäquater Konzeptionswerkzeuge durch die Bedarfsträger erreicht werden, die den heutigen Innovations- und Entwicklungstempo entsprechen und breite Möglichkeiten der inhaltlichen Weiterentwicklung und nutzerspezifischen Anpassung bieten (Tailoring).

Die User Stories stellen die Wunschanforderungen des involvierten Personenkreises, hier z. B. aus der Umfrage und dem Workshop im Projektrahmen. Die im Rahmen des Forschungsprojekts zusammengetragenen User Stories sollen als Datenveröffentlichung digital zur weiteren Nutzung bereitgestellt werden. Über den Link kann die User-Story-Map aufgerufen werden: <https://bit.ly/bast-leitfaden>.

In diesem Bericht sollen, nach dem aktuellen Stand der Technik und dem technischen Stand der Beteiligten Stakeholder Anforderungsvarianten an ein Datenmanagement im Kapitel 6.4 herstellerneutral und unabhängig beschrieben bzw. diskutiert werden. Diese erarbeitete Sammlung von Einzelanforderungen in Form von User Stories bietet die Möglichkeit, dass diese nach Einschätzung der Autoren in Kapitel 6.5 priorisiert und deren Umsetzungsgrade beispielhaft an typischen Systemen, die in Forschungs- und Ingenieurbürokontext angewendet werden. Anhand dieser Beispiele kann eine Erweiterung der User Stories und die Beurteilung von Umsetzungsvarianten in der Straßenbauverwaltung erfolgen.

6.3.2 Grundlagen für die Konzeption eines Datenmanagements

Die FAIR-Prinzipien für Monitoringdaten

Die FAIR-Prinzipien stellen ein Konzept für die wissenschaftliche Datenverwaltung und das Data Stewardship (engl. Datenadministration - umfasst das Management und die Kontrolle der verschiedenen Datensätze in einer Abteilung bzw. Einrichtung) dar und können auf ein Datenmanagement für Monitoringdaten der Straßenbauverwaltungen adaptiert werden. Es sind Leitlinien, die dazu dienen, Datenmanagement und -austausch zu verbessern, sodass Daten auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar sind. FAIR steht dementsprechend für Findable, Accessible, Interoperable und Reusable:

- **Findable (Auffindbar):** Daten sollten leicht auffindbar sein, sowohl für Menschen als auch für Computer. Dies erfordert eine klare Kennzeichnung und Indizierung der Daten.
- **Accessible (Zugänglich):** Nachdem Daten anhand ihrer persistent verfügbaren Metadaten gefunden wurden, sollte es klar definierte Mechanismen geben, um darauf zuzugreifen, wobei Datenschutz und Sicherheit berücksichtigt werden müssen.
- **Interoperable (Interoperabel):** Daten sollten so strukturiert sein, dass sie problemlos mit anderen Daten kombiniert und gemeinsam genutzt werden können. Dies erfordert oft den Einsatz von Standards und Normen.
- **Reusable (Wiederverwendbar):** Daten sollten für zukünftige Bauwerksprüfungen bzw. monitoringgestützte Nachrechnungen und Analysen wiederverwendet werden können. Dies setzt voraus, dass sie gut dokumentiert und qualitativ hochwertig sind.

Die Umsetzung dieser Prinzipien sind eng an die zur Verfügung stehenden Technologien geknüpft und verbessern die Datenqualität von Monitoringdaten in der Zugriffsqualität [63].

Die Integration der FAIR-Prinzipien in den Kontext des Monitorings gewährleistet, dass die gesammelten Daten einen nachhaltigen Wert für die Straßenbauverwaltung und andere Stakeholder haben. Die Kriterien bei der Beschreibung der Anforderungen an ein Datenmanagement sollten jeweils unter diesen Gesichtspunkten betrachtet und dementsprechend Entscheidungen getroffen werden.

Trennung von Daten und Software

Ein Prinzip in Softwareentwicklung ist die Trennung von Daten und Anwendung bzw. Software. Es stellt sich die Frage wie viel Software nötig ist, um die Daten überhaupt interpretieren zu können. Jede notwendige Software hat Abhängigkeiten zum Betriebssystemen, Softwareversionen und ggf. Lizenzen. Wenn Daten von Anwendungen (und deren Anwendungsdaten) getrennt sind, können Änderungen oder Aktualisierungen erfolgen, ohne die zugrunde liegenden Datenstrukturen zu beeinflussen. Dieses erleichtert die Wartung und das Hinzufügen neuer Funktionen. Verschiedene Anwendungen können auf denselben Datenbestand zugreifen und ihn nutzen. Dies ermöglicht es, dass unterschiedliche Programme oder Dienste für verschiedene Zwecke oder Benutzergruppen erstellt werden können, ohne dass die Daten dupliziert werden müssen.

Durch die Trennung kann die Sicherheit der Daten erhöht werden, da Zugriffskontrollen und andere Sicherheitsmaßnahmen direkt auf die Datenebene angewendet werden können, unabhängig von den Anwendungen, die darauf zugreifen. Daten können auf Servern gespeichert werden, die für die Speicherung und Verarbeitung großer Datenmengen optimiert sind, während Anwendungen auf Servern laufen können, die für eine hohe Rechenleistung optimiert sind. Dies erleichtert die Skalierung von Anwendungen und Daten unabhängig voneinander. Bei einer Trennung können Datenbanken und Anwendungen auf unterschiedlichen Servern oder in unterschiedlichen Umgebungen gehostet werden, was die Ausfallsicherheit erhöht. Wenn eine Anwendung ausfällt, bleiben die Daten unberührt und umgekehrt. Die Trennung erleichtert das Backup und die Wiederherstellung von Daten, da diese Prozesse unabhängig von der Anwendung durchgeführt werden können.

Die Leistung von Datenbanken und Anwendungen kann unabhängig voneinander optimiert werden. So können beispielsweise Datenbanken für schnelle Lese- und Schreibvorgänge optimiert werden, während Anwendungen auf die effiziente Ausführung von Geschäftslogik ausgerichtet werden können. Daten können von mehreren Anwendungen oder in unterschiedlichen Kontexten wiederverwendet werden, ohne dass sie für jede neue Anwendung neu erstellt oder angepasst werden müssen. Anwendungen und Daten können unabhängig voneinander getestet werden, was zu einer höheren Qualität der Software und der Datenintegrität führt. Es ist einfacher, rechtliche und regulatorische Anforderungen zu erfüllen, wenn Daten separat verwaltet werden, da Richtlinien zur Datennutzung und -speicherung zentral durchgesetzt werden können.

Vorgehensweisen beim Building Information Modelling (BIM)

Der Begriff „AIA“ im Kontext des Building Information Modelling (BIM) steht für "Auftraggeber-Informationsanforderungen" (englisch: Employer's Information Requirements, EIR). Diese Anforderungen sind ein wesentlicher Bestandteil bei der Implementierung von BIM in Bauprojekten. Die AIA definieren, welche Informationen der Auftraggeber (also der Bauherr oder der von ihm beauftragte Vertreter) zu welchem Zeitpunkt im Verlauf eines Bauprojektes benötigt. Sie sind ein zentrales Dokument, das bereits in der Anfangsphase eines Projektes erstellt wird und als Teil der Ausschreibungsunterlagen dient.

Die AIA legen fest, wie das BIM-Modell aufgebaut sein soll, welche Daten es enthalten muss und wie diese Daten ausgetauscht werden sollen. Die *Projektziele* definieren, was mit der Implementierung von BIM erreicht werden soll. Der *Detaillierungsgrad* (Level of Detail, LOD) beschreibt, wie genau Bauteile und Systeme im BIM-Modell abgebildet werden. Durch Vereinbarungen zu *Informationslieferungen* wird festgelegt, welche Informationen zu welchen Zeitpunkten im Projektverlauf benötigt werden. Dies umfasst Pläne, Modelle, Berichte und andere Dokumente, die zu bestimmten Meilensteinen geliefert werden müssen, um den Projektfortschritt zu unterstützen und Entscheidungen zu ermöglichen.

Um eine effiziente Zusammenarbeit und Datenkonsistenz zu gewährleisten, müssen *Standards und Protokolle* festgelegt werden. Diese können nationale oder internationale BIM-Standards, firmeninterne Richtlinien oder projektspezifische Vereinbarungen umfassen. Sie regeln, wie Daten strukturiert, gespeichert und ausgetauscht werden. Für den *Datenaustausch* zwischen verschiedenen Beteiligten und Softwareanwendungen ist es wichtig, einheitliche Datenformate zu verwenden. Offene Formate wie IFC ermöglichen es, dass Daten plattformunabhängig ausgetauscht und genutzt werden können. Es muss klar

geregelt sein, wer *Zugriff* auf welche Daten und Informationen hat. Dies dient dem Schutz sensibler Informationen und der Vermeidung von Missverständnissen oder Fehlern. Zugriffsrechte und Sicherheitsmaßnahmen müssen definiert und durchgesetzt werden, um die Integrität des Projekts zu gewährleisten. Für die Umsetzung und Erfüllung der AIA wird diese in den BIM-Abwicklungsplan (BAP) überführt. Diese Methodik zur Abstimmung soll im Folgenden als Vorschlag auf die Anwendung bei der Abstimmung des Datenmanagements zwischen dem Auftraggeber und dem Monitoringdienstleister bzw. Fachplaner Monitoring übertragen werden.

Die o.g. Inhalte der AIA lassen sich auf das Monitoring prinzipiell übertragen. Als eigenständiges Dokument soll es in der Abgrenzung als Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA) für Monitoringdaten bezeichnet werden. Gleichzeitig soll das ADA-Konzept kompatibel zum BIM sein, so dass im Neubau auch Teil der AIA sein kann, s. Kapitel 6.3.3.

Föderierte Informationssysteme

Neben der inhaltlichen Bedeutung sowie der Strukturierung und Anreicherung der Monitoringdaten mit Meta-Daten ist für die Konzeption des Datenmanagements auch die technische und administrative Struktur des technischen Datenmanagementsystems zu betrachten. Bei der Konzeption eines Datenmanagements für die Straßenbauverwaltung sind deren föderale Gliederung in Landesstraßenbauverwaltungen und für die Autobahnen die Autobahn GmbH des Bundes relevant. Dies sollte sich in der Architektur des Datenmanagements widerspiegeln und ausreichend Flexibilität ermöglichen, um bedarfsgerecht skalierbare Lösungen zu nutzen. Dabei wird unterschieden zwischen der vertikalen Skalierung durch Leistungssteigerung von einzelnen Systemkomponenten und der horizontalen Skalierung, also der Leistungserweiterung durch Vervielfachung der Anzahl der im Verbund arbeitenden Systeme. Durch Virtualisierung und Containerbetrieb wird die Anpassung im Rechenzentrum oder in der Cloud dynamisch vorgenommen und die Systeme können in der Leistungsfähigkeit und im Speicherplatz mitwachsen. Ein Container ist ein Softwarepaket, das alles Wichtige zum Ausführen von Software enthält: Code, Laufzeit, Konfiguration und Systembibliotheken, damit das Programm auf jedem Computersystem ausgeführt werden kann. Der Betrieb eines Datenmanagementsystems mit intensivem Austausch über vielfältige Schnittstellen im Behördennetzwerk ist undenkbar, um Forderungen an IT-Sicherheit (z. B. BSI-Standard) realisieren zu können. Ein Datenaustauschsystem kann nicht in Verbindung mit einem geschützten behördeninternen Netzwerk realisiert werden. Daher sollte der Betrieb der Datenaustauschplattform unabhängig erfolgen, bezogen auf die Aufgabe des Datenaustausch zwischen internen und externen Stakeholdern. Vergleichbare Ansätze werden z. B. beim digitalen Datenaustausch von Passfotos zwischen Dienstleistern und Meldebehörden genutzt [64]. Die Unabhängigkeit von einer zentralen Lösung, die alle Aufgaben der Bauwerksprüfung umfasst, ist auch für die Anforderungen im Umgang mit Monitoringdaten sinnvoll. Es wird als Entwurfsansatz unter dem Begriff „Separation of Concerns“ zusammengefasst. Das System soll genau die Aufgabe gut lösen für die es vorgesehen ist. Es beinhaltet das eigenständige Problemstellungen losgelöst von anderen Problemstellungen betrachtet werden, ohne eine zu enge funktionale Abhängigkeit zu schaffen. Die Verknüpfung zu anderen Systemen kann über geeignete Schnittstellen selbstverständlich hergestellt werden.

Eine Möglichkeit des verteilten Datenmanagements ist ein föderiertes Informationssystem. Es besteht aus mehreren autonomen IT-Systemen, die an getrennten Standorten operieren und sich von den Ressourcen (Speicherplatz, Dienste, Bandbreite) flexibel und unabhängig gestalten und erweitern lassen. Durch die Autonomie können die einzelnen Systeme in unterschiedlichen Umgebungen, also im eigenen Rechenzentrum, im externen Rechenzentrum oder in der Cloud realisiert werden und damit den Anforderungen des Betreibers (Straßenbauverwaltung oder Dienstleister) entsprechen. Die Systeme bilden jedoch im Zusammenwirken ein großes kohärentes Gesamtsystem, das den übergreifenden Zugriff auf verteilte Datenbestände und die Interaktion ermöglicht. Dabei wird weder die Kontrolle an das Gesamtsystem abgegeben noch greift das Gesamtsystem in das Teilsystem steuernd ein. Das Ziel ist die Integration von Daten aus verschiedenen Quellen, um eine einheitliche Sicht auf die Informationen zu ermöglichen, ohne die Daten physisch zu zentralisieren.

Diese Strukturierung eignet sich sowohl für die föderale Gliederungsstruktur der Landesstraßenbetriebe, die Aufteilung der Niederlassungen der Autobahn GmbH, aber auch für die Beziehung zwischen der Auftraggeber- und der Auftragnehmerseite. Es ist jedoch nicht zwingend, dass auch Auftragnehmer ein föderiertes Informationssystem selbst einsetzen. Typischerweise lassen sich konventionelle

Datenzugriffsoptionen, wie z. B. WebDAV-Verbindungen oder browserbasierte Dateifreigaben realisieren, jedoch mit Einschränkungen bzgl. der o.g. Vorteile.

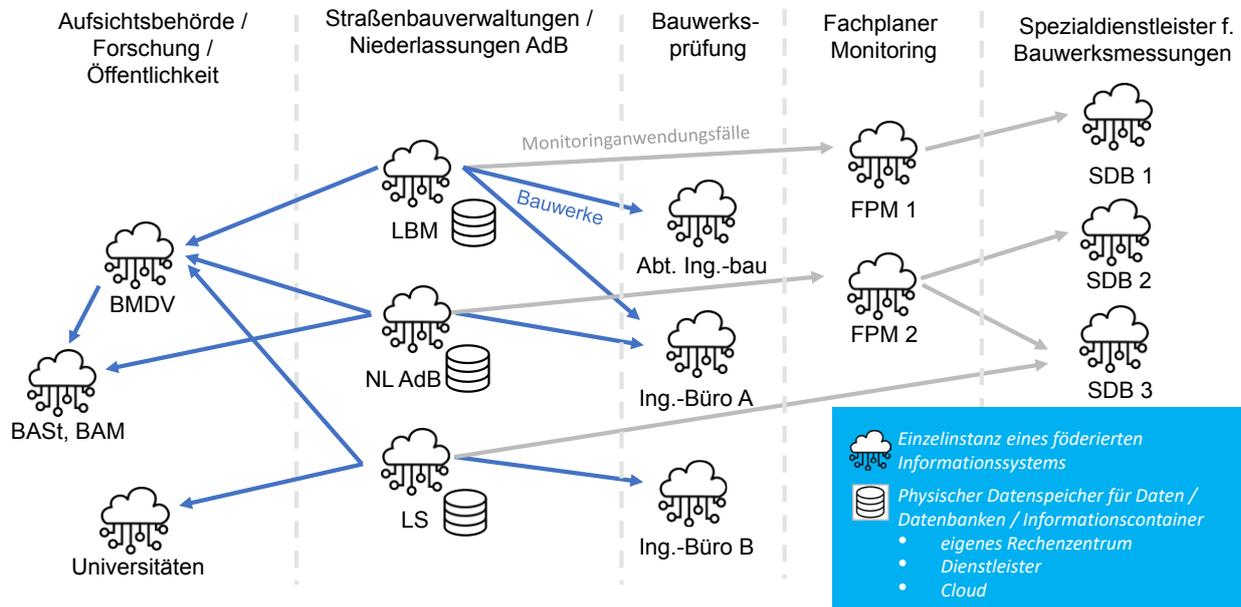


Bild 37: Möglichkeit einer Struktur für ein verteiltes Datenmanagement als föderiertes Informationssystem (eigene Darstellung)

Bei dem in Bild 37 dargestellten Konzept sind die nach Bundesländern aufgeteilten Straßenbauverwaltungen (beispielhaft hier bezeichnet als Landesbetrieb Mobilität (LBM) und Landesbetrieb Straßenwesen (LS)), sowie die Niederlassungen der Autobahn GmbH (NL AdB) die Betreiber der Einzelinstanzen, die den physischen Speicherplatz für die Monitoringdaten bereitstellen bzw. organisatorisch verantwortlich sind, aufgeführt. Die Ausgestaltung des Betriebs kann je nach Möglichkeiten durch die eigenen IT-Ressourcen oder externe Dienstleister bzw. in der Cloud unter Berücksichtigung der jeweiligen Vorgaben erfolgen. Jede Straßenbauverwaltung organisiert dabei die Struktur nach den einzelnen Bauwerken (bzw. den Hauptbauwerken), die in den eigenen Zuständigkeitsbereich fallen. Für jedes Bauwerk mit einer Monitoringanwendungen sind alle in der Vergangenheit realisierten und aktuell betriebenen Monitoringanwendungsfälle zusammengestellt.

Durch diese Hierarchie lässt sich ein Datenraum für den jeweiligen Fachplaner Monitoring (FPM) und/oder Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen (SDB) einrichten und strukturiert freigeben. In diesem Datenraum lassen sich nach konventionellem Verständnis Ordner und Dateien, als auch zukünftig Informationscontainer ablegen. Ziel ist es die Monitoringdaten für jeden Monitoringanwendungsfall, der sich aus zeitlichen, inhaltlichen oder organisatorischen bzw. vergaberechtlichen Gründen ergibt, vorerst getrennt und unabhängig zu erfassen und zu strukturieren mit eindeutiger Zuordnung zum jeweiligen Auftragnehmer. Ob dieser Auftragnehmer der Fachplaner Monitoring und im Unterauftrag der Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen ist oder die Beauftragungen direkt erfolgen, kann mit einem föderierten Informationssystem ebenfalls abgebildet werden. Somit bekommt der Monitoringdienstleister Datenzugang zu den für ihn relevanten Monitoringanwendungsfällen und Bauwerken mit entsprechenden Zugriffsrechten, um Daten abzulegen.

Für die Bauwerksprüfung erfolgt die Bereitstellung des Datenzugriffs auf Bauwerksebene. Damit ist der Zugriff auf alle Monitoringanwendungsfälle des betreffenden Bauwerks gegeben und auf „lesenden“ Zugriff eingeschränkt. Diese Zugriffsarchitektur ermöglicht es den Straßenbauverwaltungen einen Datenzugriff gegenüber den Auftragnehmern und weiteren Nutzern einzurichten. Die Auftragnehmer können diesen Datenzugriff durch das föderative Informationssystem auf ihre interne Mitarbeiterstruktur, technischen Datenübertragungssysteme oder Subunternehmer weiterübertragen und behalten dabei volle administrative Kontrolle über ihre erteilten Freigaben. So können unternehmensspezifische Sicherheitsstandards, wie beispielsweise Zwei-Faktor-Authentisierung, dezentral umgesetzt werden und es brauchen so keine individuellen Benutzerkonten bei den Straßenbauverwaltungen angelegt werden und keine personenbezogenen Daten verwaltet werden. Die Daten liegen dennoch physisch bzw. organisatorisch immer bei den Straßenbauverwaltungen vor.

Der Gesamtüberblick über die Bauwerke mehrerer Straßenbauverwaltungen kann gegenüber dem BMDV ermöglicht werden, indem die Freigaben über die Bauwerke insgesamt oder auch einzelne Freigaben, z. B. für Wissenschaft und Forschung, autorisiert werden.

6.3.3 Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA)

In Anlehnung an die AIA bei BIM soll eine Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA) als Werkzeug der Abstimmung der Datenübergabe und dem Datenmanagement mit diesem Bericht vorgeschlagen werden. Diese Neuerung lässt sich sowohl als fortlaufender Prozess während der Ausschreibung der initialen Monitoringkonzeption als auch während des angepassten Weiterbetriebs von Monitoring verstehen. Die Inhalte der ADA sind eine Anforderungsbeschreibung, die jeweils konkret an den bestehenden Rahmenbedingungen der beauftragenden Straßenbauverwaltung spezifiziert wird. Sie sollte bei der Ausschreibung des zweiten Pakets (Monitoringausführung) beiliegen. Wie am Beispiel der bereichsübergreifenden Muster-AIAs¹ von BIM können für die wesentlich einfacheren und reduzierten ADA ebenfalls Muster-ADA für die Monitoring-Anwendungsfälle erarbeitet und zur Verfügung gestellt werden. Diese führen jeweils für einen Monitoringanwendungsfall zu einer bauwerksübergreifenden Vereinheitlichung. Die Auftraggeber-Daten-Anforderung wird als eigenständiges Dokument oder Teil des Monitoringkonzepts in das umgesetzte Datenmanagement integriert und dokumentieren so in Ergänzung zum Monitoringkonzept, der Installationsplanung und der Installationsdokumentation die gespeicherten bzw. bereitgestellten Daten. Daher darf das Dokument keine geschützten vertragsrechtlichen Vereinbarungen bzw. datenschutzbezogenen Informationen (z. B. personenbezogene Daten) enthalten. Die Versionsstände der ADA werden revisionssicher im Datenmanagement abgelegt und sollen von allen späteren Nutzern nachgelesen werden können.

Die Inhalte der ADA sind z. B.:

- Bezug zum Bauwerk und Projektüberblick
- Revisionsstand und Revisionshistorie des Dokuments
- Referenz zu den zugrundeliegenden bzw. bereitgestellten Dokumenten (z. B. Monitoringkonzept, Leistungsbeschreibung, Installationsdokumentation, Messstellenübersichten, Datenblätter, Pläne, BIM-Modellen, Kalibrierprotokolle, Koordinatensysteme etc.)
- Kurzbeschreibung des Datenbestands und Einordnung in den Monitoring-AwF
- Rollen / Verantwortlichkeiten bei der Datenübergabe, Freigabe, Kuration, Rückfrage, Fehlermanagement
- Festlegung der Datenumgebung, verwendete technische Schnittstellen und deren Spezifikation (ggf. als Anhang)
- genutzte Datenformate, einschließlich Dokumentation oder Verweise auf beschreibende Normen, Community Standards, RFCs
- Hinweise zu verfügbaren (freien) Software (Links, Code, Packages) zum Lesen und Konvertieren der Datenformate in unterschiedlichen Programmiersprachen
- Schemas für die Benennung von Kennzeichnungen von Messstellen und Dateien
- Bezug und die Referenzierung von Positionen in BIM Modellen
- Strukturierung von Ordner-Hierarchien oder Datenbanktabellen
- Beschreibung der übergebenen Monitoringdaten und Zeitpunkte der Datenübergabe mit ggf. Fristen
- Vereinbarungen zur Bereitstellung von Auswertungsdaten (ggf. gemäß Messkonzept)
- Vereinbarungen zur Speicherung von Visualisierungen der Daten
- Vereinbarungen zur Dokumentation der Vollständigkeit und der Bewertung der Datenqualität
- Vereinbarungen zur Bereitstellung weiterer Metadaten
- Hinweise auf die Berücksichtigung von Datenschutzbestimmungen und Urheberrechtseinschränkungen, Markenrechtseinschränkungen (Logos, personenbezogene Daten, etc.)
- Hinweise zu den Nutzungsrechten der Daten und Zitierungsvorschlag bei Nutzung der Daten

¹ <https://www.bimdeutschland.de/leistungen/muster-auftraggeber-informationsanforderungen> [02.02.2024]

Dabei sollte immer darauf geachtet werden, dass persistente Verlinkungen oder möglichst die referenzierten Dokumente und Metadaten selbst hinterlegt werden, damit diese über die lange Archivierungsdauer nicht verloren gehen und die Einhaltung und Dokumentation der Rechte Dritter gewährleistet ist.

6.3.4 Geschäftsprozesse der Straßenbauverwaltung in Bezug auf Datenmanagement von Monitoringdaten

Die Konzeption soll zielgerichtet erfolgen, im Sinne eines *Minimal Viable Product (MVP)*, also der Eingrenzung auf die Aufgabe, die dem beabsichtigten Zweck am dienlichsten ist. Es soll vermieden werden die Anforderungen durch die Einbeziehung von Funktionalitäten außerhalb des eigentlichen Anwendungszwecks aufzublähen. Die Straßenbauverwaltungen haben je nach Bundesland eine individuelle Struktur und Ausrichtung bei der Bauwerksprüfung. Daher unterscheiden sich die Geschäftsprozesse und Rollenverständnis ggf. sehr stark. Im Folgenden wird die Straßenbauverwaltung als Auftraggeber eines Monitoringkonzeptes bzw. eines Anwendungsfalls gesehen und die Auftragnehmer können sowohl ein privatwirtschaftliches Ingenieurbüro bzw. Monitoringdienstleister sein als auch interne Abteilungen, die die vergleichbaren Aufgaben (Fachplaner Monitoring und Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen) erfüllen und so als Organisationseinheit ggf. zum Auftraggeber gehören und IT-Systeme im Behördennetz teilen. Die betrachteten Geschäftsprozesse zum Datenmanagement von Monitoringdaten umfassen daher rein die im Rahmen der Leistungsbeschreibung und Leistungsvergabe anfallenden Prozesse, die Entgegennahme mit entsprechender fachlicher Prüfung der Richtigkeit und Bereitstellung der Daten an externe bzw. interne Nutzer im Bereich der Bauwerksüberwachung.

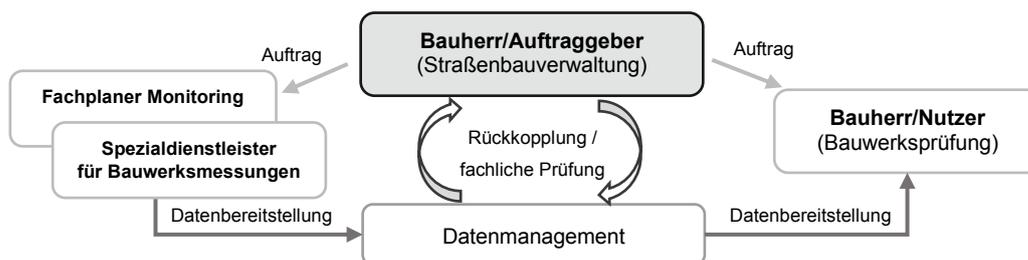


Bild 38: Position und Aufgabe der Straßenbauverwaltung in Bezug auf das Datenmanagement von Monitoringdaten (eigene Darstellung)

Die Straßenbauverwaltung schreibt das Monitoringkonzept in der Regel getrennt von der Installation, dem Betrieb und der Wartung der Monitoringsysteme aus. Im Ausschreibungsverfahren sollte die Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA) bereits vorliegen. Die Erstellung dieses Dokuments liegt im Aufgabenbereich des Auftraggebers, kann aber auch durch den Fachplaner Monitoring im Rahmen der Konzepterstellung übernommen werden. Die Ausarbeitung durch den AN ist von Vorteil, da dieser die technologische Weiterentwicklung verfolgt und die Kompatibilität der eigenen technischen Möglichkeiten mit den Rahmenvorgaben des AG harmonisieren muss. Die ADA ist Grundlage und Dokumentation, welche Daten, Metadaten, Vorauswertungen, Datenübergabezyklen, Zugänge und Schnittstellen zwischen AG und Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen vereinbart und genutzt werden. Typischerweise erfolgt die Datenübergabe durch den manuellen oder automatisierten Upload der Daten in ein für diesen Zweck von der Straßenbauverwaltung favorisiertes Datenmanagementsystem. Ob diese Datenmanagementsysteme, durch einen oder mehrere Dienstleister bzw. durch die Straßenbauverwaltung selbst betrieben werden ist je nach Verwaltungsstruktur zu entscheiden. Der Betrieb kann on-premis, also mit der eigenen betriebenen Hardware, aber auch bei einem Rechenzentrum mit angemieteter Hardware oder als Software-as-a-Service erfolgen. Durch den immanenten Datenaustausch eines Datenmanagements zwischen den einzelnen Anbietern des Monitorings und den Straßenbauverwaltungen kann dieses Datenmanagement nur außerhalb des Verwaltungsnetzwerks betrieben werden. Jedoch kann auch ein gemischter Ansatz verfolgt werden, z. B. durch eine permanente Synchronisation der Datenbestände zwischen einem öffentlich zugänglichen Server und einem internen Server. Wichtig ist, dass die in der ADA vereinbarten Datenschnittstellen und Datenstrukturen durch den Anbieter umgesetzt und eingehalten werden, damit auf die Daten gemäß der FAIR-Prinzipien zugegriffen werden kann.

Der Bedarf des Zugriffs auf die Inhalte im Datenmanagement besteht, wenn die Straßenbauverwaltung im Zuge der fachtechnischen Prüfung sicherstellen muss, dass die beauftragten Datenübergaben erfolgt sind. Um diese Aufgabe zu ermöglichen kann der Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen verpflichtet sein, dass er mit den Daten eine Statistik zur Vollständigkeit und zur Einhaltung der Datenqualität mit der Datenlieferung oder bezogen auf den Beginn des Leistungszeitraum übergibt, die die Straßenbauverwaltung in die fachliche Prüfung einbeziehen kann. Zur Prüfung dieser Statistiken kann die Straßenbauverwaltung auf die Monitoringdaten zugreifen und ebenfalls zur Sicherstellung weiterer Aspekte beitragen, die über die Vereinbarungen in der ADA hinausgehen.

Der Zugriff auf die Daten zum Zwecke der Nutzung und Nachnutzung erfolgt im Rahmen der Bauwerksprüfung durch beauftragte Ingenieurbüros oder die Ingenieure der Straßenbauverwaltungen. Dabei sollte das Datenmanagement bereits die Rolle der Austauschplattform zwischen dem Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen und dem Fachplaner Monitoring bzw. der Bauwerksprüfung ausfüllen, da damit die Validierung des Zugriffs auf die (Meta-)Daten und deren Vollständigkeit bereits bei der Erstnutzung bestätigt wird und fehlende Informationen nicht erst beim Versuch einer weiteren Nachnutzung der Daten zu Tage treten. Leider können diese Probleme verstärkt auftreten, wenn Synergien aus Datenerfassung und Bewertung aus einer Hand genutzt werden und die Datenübergabe nicht ausreichend geregelt ist. Dennoch kann das Ziel einer Nachnutzbarkeit der Monitoringdaten auch bei Lösungen aus einer Hand erreicht werden. Dazu sollte die Datenbereitstellung ein Bestandteil des Leistungsumfangs des Monitorings darstellen. Die Position, die ein solches Datenmanagement im Datenworkflow der Monitoringdaten einnimmt, ist in Bild 39 dargestellt.

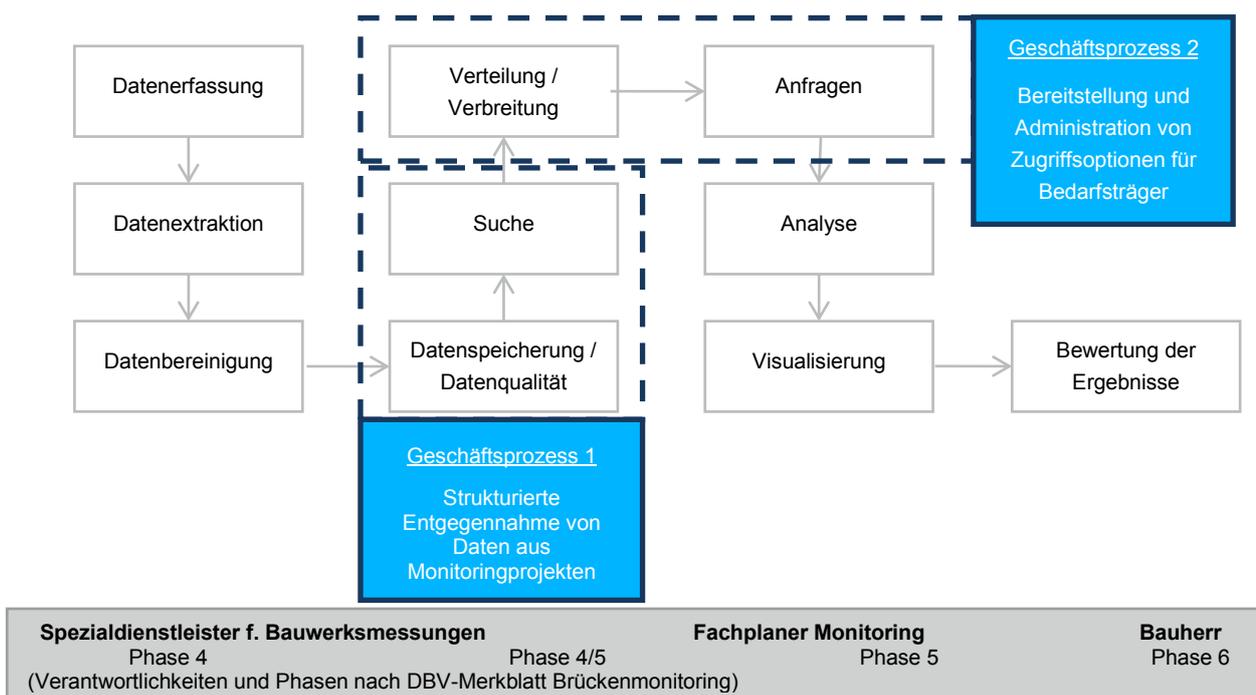


Bild 39: Datenworkflow für Monitoringdaten mit abgeleiteten Geschäftsprozessen für das Datenmanagement der Straßenbauverwaltungen (eigene Darstellung)

Gemäß dem DBV-Merkblatt Brückenmonitoring [2], liegt die Nutzung der Monitoringdaten vorrangig beim Fachplaner Monitoring und dem Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen. Der Bauherr wird demnach erst in der Phase 6 bei der Bewertung der Ergebnisse in der Entscheiderrolle federführend. Die aktive Einbindung der Straßenbauverwaltung in das langfristige Datenmanagement über viele Bauwerke bzw. Monitoringanwendungen unterschiedlicher Akteure hinweg, macht die Beschreibung neuer Geschäftsprozesse notwendig. Es wurden zwei getrennte Geschäftsprozesse identifiziert, die im Folgenden beschrieben werden.

Geschäftsprozess 1: Strukturierte Entgegennahme von Daten aus Monitoringprojekten

Der Geschäftsprozess 1 tritt im Rahmen der Konzeption und Umsetzung von Monitoringanwendungsfällen an einem Bauwerk auf und beschreibt formal die Abstimmung und Verfahrensweise, um die Datenübergabe, der im Rahmen des Monitorings anfallenden Datenbestände bedarfsgerecht und auf den aktuellen technologischen Stand bezogen umzusetzen.

Übersicht über die Teilprozesse



Bild 40: Teilprozesse des Geschäftsprozess 1 „Strukturierte Entgegennahme von Daten aus Monitoringprojekten“ (eigene Darstellung)

Im Folgenden werden die Geschäftsprozesse in Teilprozesse untergliedert und in einer festen Struktur beschrieben:

- Input
- Qualitätsanforderungen
- Prozessstufen
- Entscheidungsbedarfe
- Verantwortlichkeiten und Rollen
- Output des Teilprozesses
- Leistungsbewertung

Teilprozess 1.1 kontinuierliche Weiterentwicklung und Abstimmung einer Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA) zur Unterstützung des Ausschreibungsprozesses von Monitoringleistungen

Input:

Der Input zu diesem Teilprozess sind die Muster-ADAs für vergleichbare Monitoringanwendungsfälle, soweit diese bereits existieren (verwaltungsintern oder communityübergreifend) und den aktuellen Anforderungsstand dokumentieren. Weiterer Input sind die initialen Anforderungen, die sich aus den identifizierten Defiziten des betroffenen Bauwerks ergeben bzw. im Rahmen der Konzepterstellung des Monitoringkonzepts formuliert werden. Dies spiegelt die Erwartungen des Auftraggebers hinsichtlich der Monitoringdaten wider und definiert die technischen und logistischen Kapazitäten, die ein Auftragnehmer erfüllen muss.

Qualitätsanforderungen:

Die Qualität des Teilprozesses beeinflusst, wie effizient die Kommunikation zwischen den Parteien abläuft. Eine klare, präzise und dokumentierte Abstimmung basiert auf iterativen Verbesserungen und technologischen Anpassungen an den Stand der Technik, der für das Management der Monitoringdaten eingesetzten Systeme. Es sollten für die beschriebenen Systeme, Schnittstellen und Datenformate die Konzepte von FAIR-Data und Open Source angelegt werden. Die Qualität kann durch Nutzung von etablierten, offenen Datenbeschreibungen erhöht werden. Durch eine eindeutige Zuordnung und Bezeichnung der Monitoringdaten (Dateien, Tabellen, Informationscontainern, etc.) und einzelnen Datensätzen, die Beschreibung und Anwendung von Namensschemas von Messstellen und eindeutigen Positionen am Bauwerk möglichst mit Bezug zu BIM oder Plänen kann eine automatisierte Verarbeitung und eine zweifelsfreie Nachvollziehbarkeit gewährleistet werden. Der Bezug zu Monitoringkonzept, Messstellenplänen und Begleitdokumenten muss anhand der Benennungen und eingeführten Koordinatensysteme gegeben sein. Es sollte die Verwendung von möglichst einfachen und verständlichen, ggf. menschenlesbaren (human-readable) Datenstrukturen und -formate angepasst an den Monitoringanwendungsfall und den Datenumfang favorisiert werden. Durch die Nutzung von vorhandenen Muster-ADAs zur Etablierung eines flexiblen Community-Standards kann die Qualität und die Geschwindigkeit der Umsetzung wesentlich erhöht werden. Mit der ADA sollte eine detaillierte

Beschreibung der Datenstruktur bzw. ein persistenter Hinweis auf Standards bzw. Community Standards (z. B. RFC 4180 und RFC 7111 bei Daten im CSV-Format) gegeben werden, um Daten auch nach langer Zeit lesen zu können. Es sollte z. B. die Zeichencodierung mit vereinbart werden (z. B. ASCII, UTF-8, ISO 8859-1), um die saubere Darstellung von beschreibenden Texten sicherzustellen.

Die Einhaltung von Vorgaben aus der DSGVO, den Schutzrechten (z. B. Markengesetz, Urheberrecht, etc.) und den BSI-Datenschutzrichtlinien müssen sich auch in der Vereinbarung widerspiegeln, z. B. im Umgang mit personenbezogenen Daten (z. B. Namen von Beteiligten), Fotos und/oder Firmen-Logos z. B. in den Installationsdokumentationen des Spezialdienstleisters für Bauwerksmessungen. Ggf. sollten umfassende Nutzungsrechte an urheberrechtlich geschütztem Material bereits bei der Ausschreibung eingefordert werden, um eine spätere Veröffentlichung und unbeschränkte Weitergabe zu ermöglichen. Der AG kann sich unmittelbare, ausschließliche, unterlizenzierbare und übertragbare Nutzungsrechte einräumen, welche räumlich, inhaltlich und zeitlich nicht beschränkt sind oder legt direkt mit dem AN typische freizügige Lizenzvereinbarungen z. B. die creative commons Lizenzmodelle [65], für die spätere Nutzung und Veröffentlichung zugrunde. Für die reinen Monitoringdaten gibt es aktuell keinen urheberrechtlichen Schutz, nur für z. B. Datenbanken. Technisch gesehen entsprechen moderne Messdateiformate den Anforderungen einer Datenbank und könnten dem „Leistungsschutzrecht eines Datenbankherstellers“ unterliegen. Dies sollte vorsorglich Berücksichtigung finden und geprüft werden.

Im Sinne der FAIR Prinzipien ist die Referenzierbarkeit der Daten mittels Links oder semantischen Verknüpfungen wichtig, um die Zuordnung zu u. a. BIM-Modellen, RDS-PP Codes (Reference Designation System for Power Plants), COBie Tabellen (Construction Operations Building Information Exchange) oder UUIDs (Universally Unique Identifier) herzustellen. Das wichtigste Qualitätsmerkmal ist die technische Kompatibilität zwischen den Systemen von Auftraggeber und Auftragnehmer, damit die Datenübergabe über die Laufzeit zuverlässig und robust realisiert werden kann und auch Nichtverfügbarkeiten der Systeme (z. B. bei der Installation von Updates) nicht zu erhöhten Aufwänden führen. Das Dokument der ADA sollte so erstellt sein, dass es sowohl rechtlich als auch fachlich zur Dokumentation der Datenübergabe an das Datenmanagement in Ergänzung zum Monitoringkonzept genutzt werden kann.

Prozessstufen:

- 1.) **kontinuierlicher Diskussionsprozess:** Die Erfahrungen im Umgang mit dem Monitoringdaten müssen evaluiert werden und sich in den Anforderungen von zukünftigen Monitoringanwendungen widerspiegeln. Dies könnte mit Muster-ADAs und standardisierten Datenbeschreibungen für einzelne Monitoringanwendungen erreicht werden.
- 2.) **Erstellung des ADA-Entwurfs:** *Erstellung eines ADA-Entwurfs für die konkrete Aufgabenstellung: Je nach Möglichkeiten kann die Abstimmung der Datenübergabe in Form einer Auftraggeber-Daten-Anforderung durch die Straßenbauverwaltung selbst, im Rahmen der Erstellung des Monitoringkonzepts oder im Rahmen der Ausschreibung durch den AN erfolgen. Das Konzept ist kompatibel mit BIM und dem dazugehörigen Ausschreibungsprozess, so dass die Auftraggeber-Daten-Anforderung auch als Bestandteil des Monitorings ab Stunde „Null“ bzw. als Referenzzertifikat (AwF 090, siehe Kapitel 2.4) im BIM-Planungsprozess des Neubaus integriert werden kann. Die Rahmenbedingungen müssten dabei vom Auftraggeber anhand seiner technischen Möglichkeiten bzw. vorhandenen technischen Strukturen spezifiziert werden.*
- 3.) **Überprüfung und Feedback durch den AN:** Der Auftragnehmer erarbeitet oder überprüft den Entwurf und gibt Rückmeldungen bezüglich Machbarkeit und eventueller Optimierungen im Rahmen der Angebotserstellung.
- 4.) **Endgültige Zustimmung:** Beide Parteien stimmen der finalen ADA-Version zu.

Entscheidungsbedarfe:

Die ADA sollte den technischen Kapazitäten des Auftragnehmers und den Anforderungen des Auftraggebers entsprechen und Optionen enthalten, wie die Übertragung der Daten organisatorisch und technisch erfolgt. Die Anwendung der ADA wird vom Auftragnehmer vorgeschlagen und von der Straßenbauverwaltung geprüft und akzeptiert. Dabei müssen die Rahmenbedingungen erfüllt sein, die von der Straßenbauverwaltung gesetzt werden.

Verantwortlichkeiten und Rollen:

Auftraggeber: Durchführung der Ausschreibungsprozesse im Rahmen dessen die Anforderungen an die Datenübergabe gemäß dem aktuellen technischen Stand und der Monitoringanwendung als ADA entstehen.

Auftragnehmer: Erarbeitung der ADA auf Grundlage der Rahmenvorgaben aus Muster-ADAs, Standards und den Vorgaben des AG.

Output des Teilprozesses

Es entsteht eine detaillierte und umfassende Vereinbarung zur Datenübergabe bei der Umsetzung eines Monitoringanwendungsfalls an einem Bauwerk, die den Erwartungen des AG entspricht, von beiden Parteien befürwortet wird und im Rahmen der Auftragserteilung als verbindlich vereinbart wird.

Leistungsbewertung:

- Grad der Allgemeingültigkeit in Bezug auf den Monitoringanwendungsfall oder das Messverfahren
- Anzahl der Fragen zur ADA im Ausschreibungs- oder Abstimmungsprozess
- Anzahl der notwendigen Änderungen im Abstimmungsprozess
- Zeitdauer bis zum Abschluss der Vereinbarung
- Anzahl der Abweichungen von der vereinbarten ADA in der Umsetzung
- Anzahl der notwendigen Sonderlösungen mit Abweichungen von FAIR-Data und Open Data Prinzipien
- Zufriedenheit von Auftraggeber und Auftragnehmer in der Umsetzung
- Bereitschaft des ANs auf Rückfragen von späteren Nutzern zu den Monitoringdaten zu antworten

Teilprozess 1.2 Einrichtung des Zugangs zum Datenmanagement des Bauwerks zur Realisierung von Datenlieferungen aus dem Monitoringanwendungsfall

Input: Nach der Beauftragung der Monitoringumsetzung, werden die Vereinbarungen in der Auftraggeber-Daten-Anforderung benötigt, sowie die vom AN benannte Organisationseinheit/Abteilung bzw. Person anhand ihres Identifikationsmerkmals (z. B. Funktions-E-Mail-Adresse).

Qualitätsanforderungen:

Für die Realisierung des Teilprozesses muss geklärt sein, wer beim AG die Administration der Zugriffsberechtigung für das jeweilige Bauwerk übernimmt und mit welchen Sicherheitsanforderungen ein Login möglich ist (z. B. Passwort oder 2-Faktor-Authentisierung). Der AN kann den Zugang beantragen und verpflichtet sich, dass keine Störung und kein Zugriff außerhalb des beauftragten Leistungsumfang erfolgt. Die Bereitstellung des Zugangs ist formal mit der Beauftragung des AN abgesichert und ist ohne große Herausforderungen für die Bearbeiter bzw. die IT-Administration der Straßenbauverwaltung umsetzbar, folgt aber einem formalen Datenfreigabeprozess. Der AN kann den Zugang bei Verlust der Zugangsdaten wiederherstellen oder sperren. Ziel bei einem föderierten Informationssystem ist, dass es einen Zugriff auf mehrere autonome Informationsquellen bietet, ohne dass deren Daten kopiert werden. Es erlaubt eine autonome und trotzdem sichere Verwaltung der Zugangsdaten auf der Seite des Monitoringdienstleisters für dessen Mitarbeitende, ohne dass diese im Datenmanagementsystem der Straßenbauverwaltung registriert werden müssen. Damit bleibt der Datenschutz aber auch die Nachvollziehbarkeit des Zugriffs auf Unternehmensebene gewahrt. Für den AG besteht damit ein übersichtlicher Überblick über die erteilten Zugangsberechtigungen an die einzelnen ANs und es können bereits bestehende Zugriffsoptionen bezogen auf das betreffende Bauwerk identifiziert werden.

Prozessstufen:

- 1.) **Prüfung der aktuellen Zugangsoptionen, Vereinbarungen und der Datenschutzrichtlinien:** Anhand der Anfrage des AN wird überprüft, welche Zugriffsoptionen bereits für das Bauwerk bestehen, und ob die legitime Erteilung von weiteren Zugriffsberechtigungen gegeben ist. Es wird geprüft, unter welchen Bedingungen Zugangsdaten und welche Angaben vom AN noch bereitgestellt werden müssen.
- 2.) **Einrichtung/Anpassung bzw. Verlängerung der Datenzugriffsoptionen:** Einrichtung oder Verlängerung von spezifischen Zugängen mit Anpassung der ggf. bestehenden Limitierungen zur Übertragung der Monitoringdaten über Dateiuploads oder diverse Schnittstellen oder andere konkrete Protokolle.

- 3.) **Benachrichtigung:** Information an den AN über die Einrichtung einer Schnittstelle zusammen mit ggf. technischen Angaben (u. a. Zugangsdaten) und Beschreibungen, sowie ggf. Informationen zu den zeitlichen Befristungen, Limits, Quota (z. B. maximal übertragene bzw. gespeicherte Datenmenge je Monat), Beschränkungen (Schreib- und Leserechte) und anderen spezifischen Einschränkungen der Schnittstellen.

Entscheidungsbedarfe

Die Entscheidung, ob ein Auftragnehmer einen Zugang bzw. eine Verlängerung des Zugangs erhält, wird vom Auftraggeber geprüft anhand der Regelungen der Straßenbauverwaltung und der Nutzungsvereinbarung.

Verantwortlichkeiten und Rollen

Sachbearbeiter/ IT-Verantwortlicher Straßenbauverwaltung: Erhält die Anfrage zur Einrichtung eines Zugangs vom AN.

Entscheidungsträger Straßenbauverwaltung: Genehmigt die Einrichtung des Datenzugangs auf organisatorischer Ebene.

Auftragnehmer: Beantragt die notwendigen Zugangsberechtigungen für einen Monitoringanwendungsfall und für ein Bauwerk gemäß der Beauftragung und der ADA

Output des Teilprozesses

Als Ergebnis des Teilprozesses erhält der AN für die passenden vereinbarten Schnittstellen Zugriff auf das Datenmanagement der Straßenbauverwaltung und kennt alle organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen bzgl. der Datenübergabe an die Straßenbauverwaltung.

Leistungsbewertung

- Zeitdauer von der Anfrage bis zum endgültigen Zugriff über die gewählten Schnittstellen
- Anzahl der nachfolgenden Abstimmungsprozesse zur Nachvollziehbarkeit und Dokumentation der Schnittstellen
- Aufwand des Sachbearbeiters der Straßenbauverwaltung zur Bestimmung der Legitimität und der Authentizität des AN

Teilprozess 1.3 Entgegennahme von Monitoringdaten und weiteren Metainformationen für ein Monitoringprojekt eines Bauwerks

Input

Der AN muss gemäß der Vereinbarung die notwendigen Zugriffsoptionen haben, damit er die im Rahmen der Monitoringdienstleistung anfallenden kontinuierlichen Messdaten und Bewertungsergebnisse im Datenmanagement einmalig, periodisch oder kontinuierlich ablegen, übertragen oder bereitstellen kann. Die Spezifikationen und Übergabezeitpunkte ergeben sich aus der ADA.

Qualitätsanforderungen

Der Auftragnehmer sollte die Möglichkeit haben, den Zugang bereits vor der Inbetriebnahme des Monitorings und dem Anfall von realen Monitoringdaten zu erhalten. Häufig kommen im Falle von technisch noch zu evaluierenden Schnittstellen sog. Sandbox-Projekte bzw. Sandbox-Bauwerke zum Einsatz, die die gleichen Schnittstellen wie die reale Monitoringanwendungsfälle besitzen, welche jedoch kein aktives Bauwerk im Bestand der Straßenbauverwaltung darstellen. Mit diesen Sandbox-Projekten von nicht real existierenden Bauwerke (z. B. als ein temporäres Duplikat) können die Schnittstellen und Datenübergabeprozesse evaluiert werden, ohne dass eine Vielzahl von unbedeutenden Metadaten (im Hinblick auf Übertragungen, Änderungen und Löschungen) am realen Bauwerk auftreten. Die Datenübergaben sollten so terminiert sein, dass alle aktuellen Daten über einen festen Zeitraum (z. B. einen Tag, eine Woche, ein Monat, oder ggf. den gesamten Messzeitraum) vollständig und final übergeben werden, d.h. kein systematischer Bedarf an nachträglichen Änderungen, Ergänzungen oder Korrekturen besteht. Eine Datenübergabe sollte daher einen in sich geschlossenen Vorgang darstellen, der anhand der Datensätze (API-Calls, Dateien, Datenbankabfragen) und des Zeitpunkts in Bezug auf das Bauwerk eindeutig ist.

Für die optimale Übergabe der Daten sind viele Parameter relevant. Die technischen Systeme müssen eine entsprechend hohe Verfügbarkeit aufweisen und bei temporärem Ausfall muss eine robuste Wiederaufnahme der Datenübertragung sichergestellt sein. Die Übertragungsgeschwindigkeit und Zugriffskapazitäten sollten ausreichend hoch sein und mit steigender Anwendungszahl skaliert werden können.

Bei zunehmender Automatisierung der Datenübertragung und Nutzung der Daten in automatisierten Entscheidungsprozessen ist die Sicherstellung der IT-Sicherheit in Bezug auf den Zugriffsschutz und die Authentizität, sowie ggf. die Vertraulichkeit der Daten von großer Bedeutung. Eine verschlüsselte Übertragung ist unerlässlich, aber auch bei den meisten Systemen Standard. Die Schulung und Sensibilisierung der Beteiligten sind ein essenzieller Teil, um einen hohen Grad an IT-Sicherheit zu gewährleisten, entlang der gesamten Kette der Datenerfassung und -übertragung und Betriebsdauer.

Prozessstufen

- 1.) **Einlieferung oder Update von Metainformationen:** Bei der initialen oder im späteren Verlauf notwendigen inkrementellen Übertragung von Zusatzdokumenten (Monitoringkonzept, Ausführungsplanung, Installationsdokumentation, Messstellenplan, Kalibrierdokumente, ADA) zu den Monitoringdaten durch den AN sollten Revisionsstände der Dokumente gespeichert bleiben, um Änderungen verfolgen zu können. Außerdem sind Änderungen an den Konfigurationen der Messsysteme und Sensoren, den Wartungsarbeiten / Austausch von Sensoren, wie zeitlich zuzuordnende Störereignisse (Sensorüberprüfungen, Vandalismus, Ausfallzeiten, Stromunterbrechungen) zu sammeln und zu aktualisieren.
- 2.) **Einlieferung von Monitoringdaten, Visualisierungen und Auswertungen:** Über die festgelegten Schnittstellen werden die Monitoringdaten, ggf. getrennt nach einzelnen Datenquellen (z. B. unterschiedliche Datenakquisitionssysteme oder Aggregationsstufen) abgelegt, sowie die vereinbarten allgemeingültige Auswertungen in geeigneten Datenformaten und ggf. Visualisierungen (z. B. grafische Darstellungen von sinnvollen Zeitreihenverläufen der Rohdaten oder aggregierten Daten als z. B. Monatsübersicht oder Jahresübersicht) übergeben. Fachliche detaillierte Datenvisualisierung und Bewertungen der Messdaten erfolgen getrennt vom Datenmanagement in diversen Dashboards-Plattformen oder im Digitalen Zwilling. Unterschiedliche Varianten der Daten (Rohdaten, aggregierte Daten, statistische Daten) können über verschiedene Schnittstellen übergeben werden und mit unterschiedlichen Aktualitäten.
- 3.) **Einlieferung von Datenqualitätsangaben:** Zu den Daten sollte der Spezialanbieter Monitoring gemäß der ADA Vereinbarungen Angaben zur Datenqualität liefern, da ihm ggf. zusätzliche Informationen aus der Messtechnik zur Verfügung stehen (z. B. Signalqualitätsangaben bei optischen Sensoren, SNR-Werte) und Angaben zur Vollständigkeit der gemessenen Einzelmesswerte (bezogen auf jede Messstelle oder den Zeitraum) vorliegen oder berechnet werden können. Diese zusammenfassende Datei, sollte sich auf einen zeitlich definierten Umfang der Messdaten beziehen, oder die betreffenden Daten referenzieren.

Entscheidungsbedarfe

Es muss geklärt werden, wie mit Änderungen von bereits übertragenen Datenlieferungen umgegangen wird, wenn Nachforderungen umgesetzt werden, d.h. wie der existierende Datenbestand an Rohdaten und Metadaten dann überschrieben wird und ob eine Versionierung notwendig ist.

Verantwortlichkeiten und Rollen

Auftragnehmer: zeitgerechte Übergabe der Monitoringdaten über die definierten Schnittstellen

Output des Teilprozesses

Durch den Teilprozess liegen in dem Datenmanagement der Straßenbauverwaltung die im Rahmen des Monitoringanwendungsfalls für ein Bauwerk gemessenen, berechneten und visualisierten Daten vor und werden während der Laufzeit des Monitorings periodisch zu vereinbarten Zeitpunkten und unter Einhaltung der Fristen geliefert. Außerdem sind relevante Dokumente zu den Monitoringdaten mit einem revisions sicheren Stand enthalten.

Leistungsbewertung

- Anzahl der fehlgeschlagenen Zugriffsversuche
- Prozentsatz der Nichtverfügbarkeit der Schnittstellen des Datenmanagements
- Übertragungsgeschwindigkeit der Daten in das Datenmanagement

- Zeitliche Dauer der gesamten Datenübertragungen je Einlieferung
- Datenumfang des Overheads bei der Datenübertragung
- Anzahl der Abbrüche beim Datenupload
- Anzahl der parallel möglichen / genutzten Verbindungen mit der Schnittstelle

Teilprozess 1.4 kontinuierliche Prüfung der Datenqualität und -vollständigkeit im Zuge der fachtechnischen Prüfung und Freigabe

Input

Die Monitoringdaten und die weiteren vereinbarten Datenlieferungen eines Monitoringanwendungsfalls für ein Bauwerk liegen im Datenmanagementsystem der Straßenbauverwaltung vor.

Prozessstufen

- 1.) **Automatisierte Prüfung der Einlieferzeitpunkte und des Umfangs des aktuellen Datenbestands:** Die im Datenmanagementsystem hinterlegte Prüfung des Datenbestands kann z. B. durch „Document Classification und Policy Enforcement“ erfolgen oder entsprechende Möglichkeiten, die das Datenmanagement dazu bietet. Die Ergebnisse werden typischerweise aggregiert nach aktiven Monitoringanwendungsfällen und Bauwerke werden in einer Gesamtübersicht (z.B. Dashboard Bestandsbauwerke, Digitaler Zwilling der Stecke) dargestellt.
- 2.) **Automatische Prüfung der Datenqualität:** Die Qualität der Daten sollte in der Regel vom Spezialdienstleister Monitoring eingeschätzt und anhand einer bewertbaren Klassifikation (z. B. Data Quality Flags) für festgelegte Zeitabschnitte bzw. Dateien jedoch für jede einzelne Messstelle angegeben werden. Das Vorgehen ist in der ADA vereinbart. Der AG prüft die Datenqualität anhand der Metadaten, die vom AN mit eingeliefert werden. Strichprobenartig kann eine detaillierte Prüfung der Daten durch den AN anhand der Rohdaten erfolgen, als Teil der fachtechnischen Prüfung. Die Prüfungen lassen sich ebenfalls automatisieren.
- 3.) **Freigabevorbehalt der neu eingelieferten Monitoringdaten:** Für den Fall einer ungenügenden Datenqualität oder anderer Gründe können die eingelieferte Monitoringdaten nur ‚unter Vorbehalt freigegeben‘ oder ‚komplett gesperrt‘ werden. Ob die Notwendigkeit besteht und wie granular, dies auf Messstellenebene und für Zeiträume definierbar sein sollte, geht aus der Anforderungsanalyse bei Auswahl des Datenmanagements hervor. Pragmatisch ist die Umsetzung auf Dateiebene in Dateisystemen basierten Datenmanagementsystemen oder auf Tabellen-/Dokumentebene bei Datenbanken, da hier die Daten inhaltlich nicht interpretiert und gefiltert werden müssen.
- 4.) **Bestätigung der Dateneinlieferung:** Die Vollständigkeit der Datenlieferung kann dem AN bei Bedarf angezeigt werden und verwaltungsintern zu Zwecken der Prüfung der Auftragserfüllung bzw. Teilerfüllung genutzt werden. Es muss terminiert werden, bis wann die nächste Dateneinlieferung zu erfolgen hat, da fehlende Datenlieferung nur außerhalb hier beschriebenen Prozesses erkannt werden können.

Entscheidungsbedarfe

Von der Straßenbauverwaltung ist zu entscheiden, ob die vom AN übermittelten Angaben zur Vollständigkeit und zur Datenqualität den Vereinbarungen für das Monitoringprojekt entsprechen und ob eine Nachbesserung bzw. Nachforderung gestellt werden kann bzw. muss. Wenn andauernde bzw. wiederholte Auffälligkeiten auftreten, muss es zu einer Klärung zwischen AG und AN kommen.

Verantwortlichkeiten und Rollen

Straßenbauverwaltung: Durchführung der fachtechnischen Prüfung

Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen: Reaktion auf festgestellte Nachforderungen

Output des Teilprozesses

Nach diesem Teilprozess sind die Monitoringdaten fachtechnisch geprüft und freigegeben, und stehen damit dem berechtigten Nutzerkreis zur Verfügung.

Leistungsbewertung

- Zeitdauer zwischen der Datenlieferung und dem Abschluss der fachtechnischen Prüfung (ggf. automatisiert)
- Anzahl der notwendigen Forderungen zur Nachbesserung in den Monitoringdaten an den AN

Teilprozess 1.5 Strukturierte Verlinkung der Daten, Maßnahmen zur Pflege der Daten und Archivierung (Stewardship / Kuration der Daten)

Input

Es ist der Bestand an Monitoringdaten eines Monitoringanwendungsfalls eines Bauwerks im Datenmanagement verfügbar und für die Straßenbauverwaltung zugänglich.

Prozessstufen

- 1.) Sichtung des Datenbestands:** Spätestens mit Abschluss des Monitoringvorhabens ist es notwendig, dass der Datenbestand für alle durchgeführten Monitoringanwendungsfälle dies Bauwerk in Kombination gesichtet wird.
- 2.) Ableitung des Kurationsbedarfs:** Anhand des Gesamtüberblicks kann geprüft werden, welche Anforderungen zum jeweiligen Zeitpunkt an die Archivierung, Veröffentlichung und Speicherung von Daten gestellt werden und diese entsprechend überführt oder freigegeben werden.

Entscheidungsbedarfe

Wenn das Bauwerk abgerissen wird, dann sind bis auf wenige Ausnahmen die Monitoringdaten nicht mehr betriebsrelevant, sondern eher von wissenschaftlichem Interesse und könnten der Forschung zur Verfügung gestellt und archiviert werden.

Verantwortlichkeiten und Rollen

Straßenbauverwaltung: Sichtung des Datenbestands durch einen Data Steward (engl. für Datenadministrator – Rolle für das Management und die Kuration von Datenbeständen in einer Abteilung) und Nutzungsvorschläge

Output des Teilprozesses

Die Monitoringdaten sind zielführend archiviert, aktualisiert oder zur Verfügung gestellt.

Leistungsbewertung

- Anzahl der Stunden für den Arbeitsaufwand zur Pflege und sinnvollen Nachnutzung der Daten
- Anzahl der identifizierten Interessenten für die Monitoringdaten

Geschäftsprozess 2: Bereitstellung und Administration von Zugriffsoptionen für Bedarfsträger auf Monitoringdaten

Mit dem Geschäftsprozess 2 soll der Zugriff auf die Daten aus den Monitoringanwendungen bei den einzelne Straßenbauverwaltungen beschrieben werden.

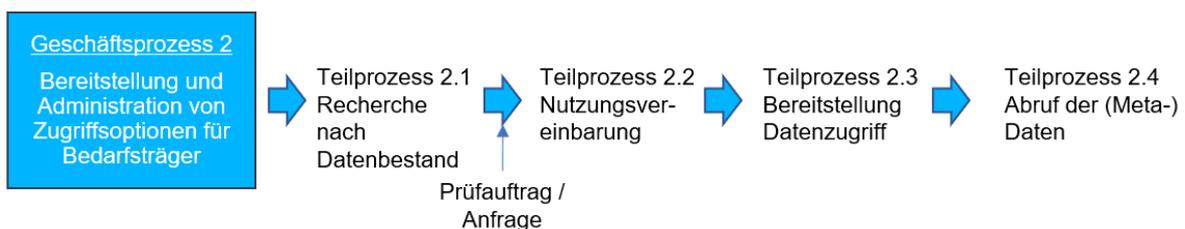


Bild 41: Geschäftsprozess 2 - Bereitstellung und Administration von Zugriffsoptionen für Bedarfsträger auf Monitoringdaten (eigene Darstellung)

Teilprozess 2.1 Recherche zu den vorhandenen Datenbeständen eines Bauwerks anhand der kuratierten Daten

Input

Es besteht eine Anfrage den Datenbestand der Straßenbauverwaltung zu nutzen.

Prozessstufen

- 1.) **Überblick zum Datenbestand:** Abhängig von der Aufgabenstellung sollte ein Überblick über die verfügbaren Monitoringanwendungen zum Bauwerk aktualisiert werden, der für mögliche Anbieter der Leistung zugänglich ist, z. B. SIB-Bauwerke, Webseite oder Datenportale.
- 2.) **Detailauskunft zu Rückfragen:** Sollte ein möglicher Anbieter Detailfragen zu den verfügbaren Daten der Monitoringanwendungen haben, um deren Nutzung prüfen zu können, sollten diese im Rahmen der Bieterfragen bei der Ausschreibung beantwortet werden.

Entscheidungsbedarfe

Es sollte geklärt werden welche Auswirkungen entstehen, wenn Anbieter der Nachrechnung aus vorhergehenden Projekten oder als zuständiger Fachplaner Monitoring bereits Datenzugriff für das Bauwerk haben.

Verantwortlichkeiten und Rollen

Straßenbauverwaltung: Liefert für die Ausschreibung einer Leistung, wie z. B. der Nachrechnung eines Bauwerks, bzw. die Anfrage nach verfügbaren Daten relevante Informationen zu den umgesetzten Monitoringanwendungsfällen des Bauwerks.

Output des Teilprozesses

Alle Anbieter können bewerten, welche Monitoringdaten im Rahmen der Nachrechnung oder anderen Aufträgen genutzt werden könnten und dahingehend ein Angebot für die Leistung abgeben bzw. die Interessenten können prüfen, ob die Nutzung der Daten zielführend scheint.

Teilprozess 2.2 Vereinbarung von Nutzungsrechten mit den Auftragnehmern bzw. Nutzern der Daten

Input

Es ist eine Vergabe einer Leistung erfolgt, die die Monitoringdaten nutzen möchte bzw. der Nutzung der Daten durch einen Bedarfsträger wurde entsprochen.

Prozessstufen

- 1.) **Vorlage und Diskussion der Nutzungsvereinbarung:** Mit dem Auftragnehmer der Leistung sollte eine Nutzungsvereinbarungen vereinbart werden. Für die Straßenbauverwaltung könnte die Vereinbarung nötig sein, um ggf. personenbezogene Daten vom AN zur Einrichtung des Datenzugriffs zu speichern.
- 2.) **Bestätigung der Nutzungsvereinbarung:** Sowohl von der Straßenbauverwaltung als auch dem Anbieter der Leistung werden die Nutzungsvereinbarungen bestätigt. Diese sorgen für Klarheit in Bezug auf die Datennutzung und Datenweitergabe.

Entscheidungsbedarfe

Es sollte untersucht werden, wie die größtmögliche Nutzungsfreiheit unter Wahrung der Interessen der Straßenbauverwaltung erreicht werden kann und welche Nutzung ausgeschlossen ist, z. B. die Übertragung der Daten an Clouds außerhalb der EU, etc..

Verantwortlichkeiten und Rollen

Straßenbauverwaltung: Erstellung und Vorlage der Nutzungsvereinbarung und Datenschutzbestimmungen

Auftragnehmer: Zustimmung und Einhaltung der Nutzungsvereinbarung und Akzeptieren der Datenschutzbestimmungen

Output des Teilprozesses

Die Nutzungsbedingungen und Datenschutzbedingungen sind im Interesse der Straßenbauverwaltung und des Anbieters abgestimmt.

Leistungsbewertung

- Grad der Allgemeingültigkeit und Anzahl der Wiederverwendungen der Nutzungsvereinbarung für vergleichbare Anfragen
- Anzahl der Abstimmungsrunden zwischen Straßenbauverwaltung und Anbieter
- Anzahl der Verstöße gegen die Nutzungsvereinbarung

Teilprozess 2.3 Bereitstellung des Datenzugriffs im Datenmanagement und Anpassung des Zugriffsbedarfs

Input

Es ist eine Vergabe einer Leistung erfolgt, die die Monitoringdaten nutzen möchte und die Nutzungsvereinbarung ist abgeschlossen.

Prozessstufen

- 1) **Abstimmung der Datenschnittstelle:** Die Straßenbauverwaltung stimmt die verfügbaren Datenschnittstellen mit dem Austragnehmer ab oder gibt eine bevorzugte Datenschnittstelle vor. Der AN teilt die Funktions-E-Mail-Adresse oder personenbezogene E-Mail-Adresse.
- 2) **Einrichtung des Zugriffsaccounts:** Von der Straßenbauverwaltung wird der Zugriffsaccount gemäß den IT-Richtlinien (Passwort, 2-Faktor-Authentisierung, etc.) im Datenmanagement eingerichtet und bei Bedarf die in der Nutzungsvereinbarung angegebenen Limitierungen (z. B. Abfragelimit, Abruflimit) umgesetzt.

Entscheidungsbedarfe

Je nach Nutzung des Datenmanagements können Anpassungen an den Limitierungen des Datenzugriff notwendig sein, insbesondere wenn verstärkt automatisierte Zugriffsprozesse in einer größeren Anzahl von Projekten aktiv sind, um Datenmengen sinnvoll zu steuern.

Verantwortlichkeiten und Rollen

Straßenbauverwaltung: Einrichtung des Zugangskontos und Weitergabe (z. B. über Registrierungscode oder Funktions-E-Mail-Adresse)

Auftragnehmer / Nutzer: Registrierung im Datenmanagement bzw. Zustimmung zu geteilten Ressourcen Anfragen

Output des Teilprozesses

Der Nutzer hat Zugang zu den Schnittstellen, über die die Daten des Bauwerks oder des einzelnen Monitoringanwendungsfalls abrufbar sind.

Leistungsbewertung

- Zeitdauer bis zum Zugriff auf die Daten
- Sicherheitsgrad bei der Auswahl der Authentisierungsmethode

Teilprozess 2.4 Abruf von Daten, Metainformationen, Identifikator und ggf. Darstellungen von aggregierten Daten (Dashboards)

Input

Der Nutzer kann sich mit seinen Zugangsdaten im Datenmanagement anmelden und hat Zugriff auf alle begleitenden Dokumente zu den Monitoringdaten.

Prozessstufen

- 1.) **Fachliche Einarbeitung:** Der Nutzer kann im Detail die Monitoringdaten des Monitoringanwendungsfalls bzw. des gesamten Bauwerks anhand der begleitenden Dokumentation und der ADA nachvollziehen.
- 2.) **Abruf der Daten:** Der Nutzer kann die relevanten Daten manuell einsehen und abrufen bzw. automatisiert in andere Systeme einbinden, z. B. dem Digitalen Zwilling.

Entscheidungsbedarfe

Es muss sichergestellt werden, welche Abhängigkeiten vom Auftragnehmer aufgebaut werden, die an dem Datenzugriff hängen, wie beispielsweise eine kontinuierliche prädiktive Instandhaltung und wie mit der Beendigung oder Einschränkung des Datenzugriffs umgegangen wird.

Verantwortlichkeiten und Rollen

Nutzer: Nutzung der Datenmanagements zum Abruf von Informationen und Daten

Output des Teilprozesses

Dem Nutzer stehen die aus dem Monitoringanwendungsfall hervorgehenden Monitoringdaten, Auswertungen und Visualisierungen zur Verfügung in einem Format, dass er mit den Informationen aus der ADA nachvollziehen und nutzen kann.

Leistungsbewertung

- Anzahl der Zugriffe auf das Datenmanagement
- Umfang der abgerufenen Datenmenge
- Anzahl der Rückfragen wegen der mangelnden Nachvollziehbarkeit der Monitoringdaten

6.4 Aspekte bei den Anforderungen an ein Datenmanagement

Für die Konzeption eines Datenmanagements für Monitoringdaten für die Straßenbauverwaltung ist es wichtig abzugrenzen welche Kernaufgaben ein solches System im Gesamtaufgabenfeld der nach DIN 1076 geregelten Bauwerksprüfung aktuell und zukünftig erfüllen soll und welche Anforderungen außerhalb des reinen Datenmanagements angesiedelt sind. Inhaltliche Parallelen ergeben sich zu Anforderungen für die Umsetzung eines Digitalen Zwillings, der das Datenmanagement als eine Teilkomponente realisieren muss [9].

An vielen Stellen des Datenmanagements ergibt sich aufgrund des Schnittstellencharakters eine enge Synergie zu anderen unternehmenszentralen Diensten bzw. Systemen, wie z. B. dem ERP-Systemen (Enterprise Resource Planning System – Software zur Planung, Steuerung und Verwaltung aller Aufgaben einer Organisation). Ein Beispiel ist die Benutzerverwaltung des Datenmanagements, die den Zugriff auf die Daten administriert. Sie kann durch eine Einbindung in eine behördenweite Nutzeradministration ebenso abgedeckt werden, wie die Realisierung innerhalb eines Datenmanagementsystems als Parallelstruktur. Ein Datenmanagementsystem kann daher hochgradig von der Software und Hardware, sowie der vorhandenen IT-Topologie abhängen. Die Darstellung und Visualisierung von Daten stellt für den jeweiligen Monitoringanwendungsfall meist eine individuelle Lösung dar, die in Abhängigkeit der genutzten Messverfahren (siehe Kapitel 2.3) , mit unterschiedlichen (ggf. proprietären) Softwarevarianten realisiert werden kann. Für ein allgemeingültiges Datenmanagement können ggf. nur vereinfachte Darstellungen realisiert werden. Das Datenmanagement ist als Datenquelle wesentlich für umfassende Spezialdarstellungen, wie Dashboards, Digitale Zwillinge, geometrische / photogrammetrische Bauwerksvisualisierungen, etc.. Die im Folgenden dargestellten Aspekte, sollen fachlich die Auswahl und Spezifikation eines Datenmanagements als Single-Source-of-Truth (SSoT) für Monitoringdaten unterstützen und Punkte ansprechen, die Beachtung finden sollten. Diese Punkte werden in der Konzeption berücksichtigt, müssen jedoch jeweils gegen die Anforderungen der einzelnen Straßenbauverwaltungen und deren technischen Möglichkeiten und Erfahrungswerten abgeglichen werden.

6.4.1 Arten von Messdaten

Die Unterteilung von Messdaten im Brückenmonitoring kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen, die sich aus den Zielen des Monitorings, den Eigenschaften der gemessenen Phänomene und den technischen Spezifikationen der Messsysteme ableiten. Im Folgenden sind einige Kriterien und Beispiele für Messdatenarten aufgeführt:

- Zeitbezogene Kriterien:
 - Kurzzeitdaten:
Daten, die über einen kurzen Zeitraum (Sekunden bis Stunden) erfasst werden, um dynamische Ereignisse wie Schwingungen oder schnelle Lastwechsel zu analysieren.
 - Langzeitdaten:
Erfassung von Daten über lange Zeiträume (Tage bis Jahre), um langsame Veränderungen wie Setzungen, Kriechen oder Korrosion zu überwachen.
- Frequenzbasierte Kriterien:
 - Niedrige Frequenz:
Zeitreihen, die mit geringer Abtastrate erfasst werden, geeignet für die Überwachung von langsamen Veränderungen oder Zuständen, die sich nur geringfügig über die Zeit ändern. Auch „statische Daten“ genannt.
 - Hohe Frequenz:
Messungen mit hoher Abtastrate, die für die Analyse von Vibrationen, Erschütterungen oder anderen dynamischen Reaktionen des Bauwerks notwendig sind. Auch „dynamische Daten“ genannt.
- Art der Messdaten:
 - Herkömmliche Zeitreihen: Klassische Zeitreihen von verschiedenen Sensoren, wo es zu jedem Zeitstempel einen Messwert des Sensors (z. B. Temperatur) gibt.
 - Bilddaten: Visuelle oder infrarote Aufnahmen zur Erkennung von Rissen, Deformationen oder anderen visuell identifizierbaren Merkmalen. Hier handelt es sich um mehrdimensionale Daten.
 - Schallemissionsdaten: Akustische Signale, die von Rissen, Brüchen oder Reibungsvorgängen innerhalb des Bauwerks erzeugt werden. Diese können auf Schadensereignisse oder Materialermüdung hinweisen.
 - Daten von faseroptischen Sensoren: Messungen der Dehnung, Temperatur oder Feuchtigkeit, die mit Hilfe von faseroptischen Sensoren durchgeführt werden. Diese Sensoren sind besonders nützlich für die Überwachung über große Distanzen oder in schwer zugänglichen Bereichen. Sie haben neben der zeitlichen noch eine räumliche Komponente.

Die beim Bauwerksmonitoring wahrscheinlich am häufigsten anfallenden Daten sind herkömmliche Zeitreihen mit niedriger oder hoher Frequenz.

Die Art der erfassten Daten wirkt sich direkt auf die Datenmenge, die Speicheranforderungen und die Komplexität der Datenverarbeitung aus. Große Datenmengen erfordern leistungsfähige Datenmanagement- und Analysewerkzeuge, um wertvolle Informationen effizient extrahieren und nutzen zu können.

6.4.2 Datenhaltung / Datenstruktur

Eine sich permanent in Entwicklung befindende Frage ist die Art der Datenhaltung als dateisystembasierter Speicher, in relationalen Datenbanken, in dokumentenorientierten Datenbanken, in Zeitreihendatenbanken, in Informationscontainern und vielen weiteren Varianten, für die es im Einzelfall der Anwendung spezifische Vorteile und Nachteile gibt.

Dateibasierte Datenhaltung

Werden Zeitreihendaten dateibasiert abgespeichert, sollte die Ordnerstruktur einheitlich und zeitlich strukturiert aufgebaut werden, sodass die alphanumerische Sortierungsreihenfolge der Ordner und Unterordner dem zeitlichen Verlauf der enthaltenen Messdaten entsprechen. Damit wird auch den FAIR-

Prinzipien Rechnung getragen. In der obersten Orderebene sollten die ggf. einzelnen Datenquellen (z. B. bei mehreren Messsysteme) unterschieden werden. Als am zweckmäßigsten hat sich gezeigt, dass auf der nächsten Orderebene das Jahr als vierstellige Angabe und darunter der Monat als zweistellige Angabe genutzt wird. Damit werden alle Messdaten für den Zeitraum von einem Monat in einem gemeinsamen Unterordner abgelegt und sind gruppiert mit einem festen Namensschema für den Ordnerpfad z. B. „.\Datenquelle_01\2024\03\“. Eine weitere Strukturierung durch Unterordner nach Tagen, Stunden, etc. ist im Allgemeinen nicht vorteilhaft, sondern im Weiteren sollte der Zeitpunkt des ersten Messwerts in der Datei aus dem Dateinamen ableitbar sein, z.B. D_2004-03-01_09-00-00.csv. Der Anfangsbuchstabe kann dabei unterschiedliche Aggregationen/Darstellungen der Daten (z. B. D entspricht dynamischen Daten und S entspricht statistischen Daten) ausdrücken. Die zeitliche Aufteilung der Messdaten in Einzeldateien ergibt sich aus zwei Gründen: 1) der Dateigröße und 2) der Häufigkeit der Datenbereitstellung. Die Dateigröße der Einzeldatei ist relevant, wenn Dateien geöffnet werden müssen, da diese dazu zumeist komplett übertragen werden und anschließend von möglichst vielen Viewer-Programmen (z. B. Texteditor, Daten-Visualisierungsprogramm) geöffnet werden sollen. Werden Monitoringdaten in regelmäßigen Abständen ergänzt, dann geht man in der Regel davon aus, dass übertragene Dateien abgeschlossen sind und prinzipiell nicht weiter verändert werden. Neue Monitoringdaten werden in der Regel in neuen zusätzlichen Dateien ergänzt und nicht an bestehenden Dateien angehängt und diese so abgeändert. Daher entsteht eine Abhängigkeit zwischen der periodischen Datenübertragung und der Länge des Messzeitraums, der in einer Datei gespeichert ist. Sollten z. B. stündlich Daten übertragen werden, dann kann die einzelne Messdatei entsprechend keinen längeren Zeitraum als eine Stunde umfassen. Zusammenfassungen über längere Zeiträume werden in der Regel im Rahmen der Auswertung erzeugt oder dynamisch über Dashboards angezeigt. Dateibasierte Datenübertragungen von Monitoringdaten eignen sich daher eher bei moderaten Zyklen der Datenübergabe ab einem Tag oder länger.

Bei der Einrichtung eines dateibasierten Datenspeichers kommt in der Regel ein Webserver zum Einsatz. Dieser Server kann sowohl im eigenen Haus oder über Drittanbieter bereitgestellt werden, wie beispielsweise Microsoft OneDrive, Google Drive, Dropbox oder Telekom MagentaCLOUD. Verschiedene Cloudanbieter können föderierte Informationssysteme als Software-as-a-service bereitstellen oder diese können selbst (On-Premises) betrieben werden. Beispiele für Open-Source Softwarelösungen für föderierter Informationssysteme sind OwnCloud und NextCloud. Diese sind als On-Premises-Open-Source Lösung in der öffentlichen Verwaltung im Einsatz.

Die Entscheidung zwischen der Selbstbereitstellung eines Servers für die Datenspeicherung und -verwaltung oder der Nutzung von Drittanbietern hängt von verschiedenen Faktoren ab. Jede Option hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile, die im Kontext der Anforderungen und Ressourcen einer Straßenbauverwaltung abgewogen werden müssen. Die folgende Auflistung der Vor- und Nachteile kann bei der Entscheidungsfindung behilflich sein:

Selbstbereitstellung eines Servers

Vorteile

- **Vollständige Kontrolle:** Volle Kontrolle über die Serverkonfiguration, Sicherheitsstandards und Datenmanagement
- **Anpassungsfähigkeit:** Möglichkeit, den Server und die Dienste genau auf die spezifischen Bedürfnisse und Anforderungen abzustimmen
- **Datenschutz:** Bessere Kontrolle über die Einhaltung von Datenschutzvorschriften, besonders relevant in Bereichen mit strengen Datenschutzgesetzen
- **Integration:** Einfachere Integration in bestehende interne Systeme und Netzwerke
- **Unabhängigkeit:** Keine Abhängigkeit von externen Dienstleistern, deren Geschäftspolitik oder Preismodellen

Nachteile

- **Hohe Anfangsinvestition:** Hohe anfängliche Kosten für Hardware, Software, Netzwerkinfrastruktur und Personal-/Administrationskosten
- **Wartungsaufwand:** Erfordert kontinuierliche Wartung, Updates und Sicherheitsüberwachung

- **Ressourcenbedarf:** Benötigt spezialisiertes IT-Personal für die Einrichtung, Betrieb und Management
- **Skalierbarkeitsgrenzen:** Möglicherweise begrenzte Skalierbarkeit im Vergleich zu Cloud-Lösungen
- **Ausfallrisiko:** Höheres Risiko von Datenverlusten bei Ausfällen, wenn keine ausreichende Redundanz und Backup-Strategien vorhanden sind
- **Datensicherheit:** Für Drittanbieter muss ein Zugang zu diesem Server freigegeben werden, wodurch möglicherweise ein Sicherheitsrisiko entsteht

Nutzung von Diensten Drittanbieter

Vorteile

- **Niedrigere Anfangskosten:** Keine oder geringere Investitionskosten für Hardware und Infrastruktur.
- **Wartung und Updates:** Wartung, Updates und Sicherheitsmanagement werden in der Regel vom Dienstleister übernommen.
- **Skalierbarkeit:** Einfache Skalierbarkeit der Speicher- und Verarbeitungskapazitäten.
- **Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit:** Oft hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit durch professionelles Management und mehrfache Redundanzen.
- **Einfache Einrichtung und Bedienung:** In der Regel benutzerfreundliche Interfaces und einfache Einrichtung.

Nachteile

1. **Datenschutz und Sicherheit:** Mögliche Bedenken bezüglich des Datenschutzes und der Datensicherheit, vor allem bei sensiblen Daten.
2. **Abhängigkeit von Drittanbietern:** Abhängigkeit von den Geschäftspraktiken, möglichen Änderungen durch Updates, der Stabilität und den Sicherheitsmaßnahmen des Anbieters.
3. **Potenzielle Kosten:** Laufende Abonnementkosten, die über die Zeit hinweg beträchtlich sein können.
4. **Eingeschränkte Kontrolle:** Geringere Flexibilität und Kontrolle über die Infrastruktur und Konfiguration.
5. **Compliance-Fragen:** Herausforderungen bei der Einhaltung spezifischer lokaler oder branchenspezifischer Vorschriften.

Zeitreihendatenbanken

Die Nutzung von Zeitreihendatenbanken für die Speicherung und Analyse von Messdaten im Bereich des Brückenmonitorings bietet gegenüber der traditionellen, dateibasierten Datenhaltung wesentliche Vorteile. Zeitreihendatenbanken sind speziell dafür konzipiert, sequenzielle Datenpunkte, die über die Zeit erfasst werden, effizient zu verwalten.

Einige bekannte Zeitreihendatenbanken sind:

- **InfluxDB:** Eine Open-Source-Datenbank, optimiert für schnelle, hochverfügbare Speicherung und Abfrage von Zeitreihendaten. InfluxDB ist für seine einfache Integration in bestehende Anwendungen und für seine leistungsstarke Abfragesprache bekannt.
- **Prometheus:** Ebenfalls eine Open-Source-Zeitreihendatenbank, die besonders in der Welt der Systemüberwachung und des Betriebs beliebt ist. Sie bietet ein einzigartiges Modell für Datenerfassung und -speicherung sowie eine flexible Abfragesprache.
- **TimescaleDB:** Eine Erweiterung von PostgreSQL, die speziell für die Arbeit mit Zeitreihendaten innerhalb der leistungsfähigen, relationalen Datenbank PostgreSQL entwickelt wurde. Sie kombiniert die Vorteile einer relationalen Datenbank mit den spezifischen Funktionen einer Zeitreihendatenbank.

- **Graphite:** Eine Open-Source-Monitoring-Tool, das auch als Zeitreihendatenbank fungiert. Es ist besonders für die Speicherung von numerischen Zeitreihendaten gedacht und bietet umfangreiche Möglichkeiten zur Visualisierung der Daten.

Vorteile gegenüber der dateibasierten Datenhaltung

- **Leistung und Effizienz:** Zeitreihendatenbanken sind für die Speicherung und Abfrage von großen Mengen sequenzieller Daten optimiert. Sie bieten deutlich bessere Leistung für zeitbasierte Abfragen als herkömmliche, dateibasierte Systeme.
- **Skalierbarkeit:** Sie sind darauf ausgelegt, mit der Zeit wachsende Datenmengen effizient zu verarbeiten, sowohl in Bezug auf die Speicherung als auch auf die Abfragegeschwindigkeit.
- **Integrierte Analysefunktionen:** Viele Zeitreihendatenbanken bieten eingebaute Funktionen zur Analyse und Aggregation von Daten, was die Entwicklung von Anwendungen zur Überwachung und zum Reporting vereinfacht.
- **Datenintegrität und -sicherheit:** Im Gegensatz zu Dateisystemen, die anfällig für Inkonsistenzen oder Datenverlust durch manuelle Fehler sein können, bieten Datenbanken Transaktionssicherheit und robuste Mechanismen zur Datensicherung.
- **Einfachere Datenzugriffsverwaltung:** Zeitreihendatenbanken unterstützen feingranulare Zugriffskontrollen und Berechtigungen, was die Verwaltung des Datenzugriffs in Teams und Organisationen erleichtert.
- **Visualisierung:** Einige Datenbanken bringen bereits GUIs (engl. f. grafische Benutzeroberfläche) mit sich, auf denen die Daten browserbasiert visualisiert werden können. Außerdem können sie von Drittprogrammen angesprochen werden, die die Visualisierung übernehmen.

Die Wahl der richtigen Datenhaltung hängt von den spezifischen Anforderungen des Brückenmonitorings ab, einschließlich der Datenmenge, der erforderlichen Analysekapazität und der Integrationsanforderungen in bestehende Systeme. Zeitreihendatenbanken bieten eine leistungsfähige und flexible Lösung für die Herausforderungen der Datenverwaltung in diesem kritischen Bereich.

6.4.3 Datenformate bei dateibasierter Datenhaltung

Die Auswahl des Datenformats wird in den meisten Fällen stark vom Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen geprägt, in Anhängigkeit der genutzten Messsysteme, die die Monitoringdaten in spezifischen, meist proprietären Datenformaten dateibasiert übertragen. Der Monitoringdienstleister kann auch die Zeitreihendaten aus seinem Datenmanagement (z. B. Zeitreihendatenbanken) in diversen Datenformaten exportieren. Eines der am häufigsten und am längsten verwendeten Datenformate ist die Speicherung von Zeitreihen im spaltenorientierten CSV-Format (comma-separated values) als Text (Variationen von RFC 4180 und RFC 7111). Diese Art der Speicherung ist mit beliebigen Texteditoren lesbar und erzwingt in geringem Maß eine Struktur in den Daten, die einer Tabelle entspricht. Es werden zeilenweise Daten eines Zeitpunkts und spaltenweise die einzelnen Messstellen angeordnet, so dass sich automatisch ein zeitlicher Index über die Datei anhand der Zeilennummer ergibt. Jedoch müssen dabei alle Messstellen in einer Datei prinzipiell gleiche Abstraten und -zeitpunkte aufweisen, um die Struktur einzuhalten. Der Vorteil von textbasierten Dateiformaten ist, dass die reguläre Volltextsuche des Datenmanagements die Dateien in den Suchindex aufnehmen kann. Der Nachteil ist, dass die Dateigröße durch die Zeichencodierung jeder einzelnen Ziffer nicht ideal ist. Dennoch können statische Daten meist problemlos gespeichert werden. Bei der Verwendung von CSV sollte in der Vereinbarung mit dem Auftraggeber eine einheitliche Konvention zur Zeichencodierung, zum Dezimaltrennzeichen, zum Spaltentrennzeichen, zur Kopfzeile, zur Angabe von fehlenden Werten und zum Format der Datum- und Uhrzeitangabe einschließlich der Zeitzoneangabe gemacht werden. Um den aus der Umstellung von Sommer-/Winterzeit resultierenden Problemen zu entgehen gibt es unterschiedliche Ansätze. So werden teilweise Zeitangaben ganzjährig in koordinierter Weltzeit (UTC) angegeben oder in lokaler Ortszeit. CSV ist weit verbreitet und ermöglicht eine einfache Handhabung großer Datenmengen. Alternativ können auch JSON (JavaScript Object Notation) oder XML (eXtensible Markup Language) verwendet werden, die eine

flexiblere Datenstruktur bieten und besonders nützlich sind, wenn die Datenkomplexität über einfache Tabellen hinausgeht.

Andere Datenformate sind meist ebenfalls möglich, jedoch sollte der Auftraggeber offene Datenformate bevorzugen und auf verfügbare Softwarepackages und Datenviewer/-konverter verweisen bzw. diese mitliefern, um die Daten langfristig lesen zu können. Ein in der Automobilindustrie gebräuchliches Datenformat ist das MDF4 Datenformat von ASAM e.V., ein im Data Science Bereich aktuell verbreitetes Format ist das Parquet Format der Apache Foundation. Diese Dateiformate für Zeitreihen speichern die Daten binär, sowie komprimiert und damit effizienter ab. Dies ist bei hochauflösenden dynamischen Daten, wie z. B. bei Zeitreihen von Vibrationsmessungen notwendig. Resultierende Auswertungsergebnisse mit geringerem Datenumfang und Datenaggregationen können meist auch wieder als CSV-Dateien gespeichert werden.

Aktuell werden bevorzugt Data Lake Ansätze in Datenmanagementsystemen verfolgt, d.h. die Messdaten werden im vereinbarten Datenformat gespeichert und erst beim Abruf und der Nutzung in ein spezifisches anderes Ziel-Datenformat konvertiert, dass zur Auswertung erforderlich ist. Der gegenteilige Entwurfsansatz ist es beim Import der Daten in das Datenmanagement eine Konvertierung in ein einheitliches Zielformat zu erreichen. Jedoch ist dieses Zielformat auch meist nur Ausgangspunkt weiterer Konvertierungen für die Nutzung und Visualisierung.

Bei den Datenformaten der beschreibenden Dokumente (ADA, Installationsdokumentation, Monitoringkonzept, etc.), sollten ebenfalls offene Datenformate, wie das Open Document Format for Office Applications (ODF) bevorzugt werden, welches auch für die öffentliche Verwaltung empfohlen wird, s. Architekturrichtlinie für die IT des Bundes. Zusätzlich zu den langfristig editierbaren Dateien kann ein finaler Versionsstand als PDF-Dokument mit ggf. digitaler Signatur die Version repräsentieren, die verbindlich genutzt wird. Einfache textliche Erläuterungen werden in der Regel mit vereinfachter Auszeichnungssprache, z. B. Markdown formatiert und als einfache Textdatei gespeichert. Diese sind damit als Textdatei mensch- und maschinenlesbar mit und ohne entsprechenden Texteditor.

Bei der Auswahl des geeigneten Formats sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- **Komplexität der Daten:** Für einfache, tabellarische Daten ist CSV oft ausreichend. Bei komplexeren Datenstrukturen oder wenn eine Integration in Webanwendungen erforderlich ist, können JSON oder XML vorteilhafter sein.
- **Verarbeitungs- und Analysetools:** Die Kompatibilität mit den vorhandenen Datenverarbeitungs- und Analysewerkzeugen ist entscheidend. Einige Tools können besser mit bestimmten Formaten umgehen.
- **Datenaustausch:** Die Wahl des Formats kann auch davon abhängen, wie und mit wem die Daten ausgetauscht werden. Einige Branchen oder Organisationen bevorzugen bestimmte Standards.
- **Lesbarkeit und Zugänglichkeit:** Die Einfachheit des Formats für Endnutzer, insbesondere für solche ohne spezialisierte technische Kenntnisse, kann ein wichtiger Faktor sein.

Die Wahl des Datenformats sollte also sowohl die technischen Anforderungen als auch die Benutzerfreundlichkeit berücksichtigen, um eine effiziente Datenübermittlung und -nutzung zu gewährleisten. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, keine proprietären (z.B. .xlsx, .tdm, .mat) Formate genutzt werden, damit die Interoperabilität und Zukunftssicherheit gewährleistet sind.

6.4.4 Datenverknüpfung

Semantic Linking

Die reinen Monitoringdaten allein sind in der Regel nicht ausreichend, um vollumfängliche Auswertungen zu ermöglichen. Weiterhin werden umfangreiche Beschreibungen zur zugrundeliegenden Messaufgabe, Messtechnik und im Rahmen der Qualitätssicherung erforderlichen Dokumentationen (z. B. Kalibrierprotokolle) notwendig, die sich auch über die Laufzeit verändern, aktualisieren, korrigieren und anpassen lassen. Daher ist eine Herausforderung die Messdaten inhaltlich, räumlich und zeitlich vollständig zu beschreiben (siehe Metadaten) und mit Zusatzinformationen zu verknüpfen. Die Zusatzinformationen können über semantische Verknüpfungen und Ontologien mit anderen Elementen, wie Sensorpositionen im BIM-Modell verknüpft werden. Eine Ontologie ist im Datenmanagement eine

formal geordnete Darstellungen von Begriffen und der zwischen ihnen bestehenden Beziehungen. Diese Verknüpfung erfolgt über Resource Description Framework Schemas (RDF-Schemas), die eine Beschreibung für eine Ontologie darstellen. Der Vorteil einer semantischen Verknüpfung ist, dass die lokal genutzten Ontologien sich auch stark unterscheiden dürfen und dennoch eine Beziehung zwischen den beschriebenen Prozessen und Objekten hergestellt werden kann. Eine Hinterlegung von RDF-Schemas im Datenmanagement als Dateien oder als Informationscontainer sollte möglich sein.

Schnittstellen

Für den Zugriff auf dateisystembasierte Systeme existieren eine ganze Reihe von Protokollen, wie http, FTPs/SFTP, WebDAV, SSH, SCP, S3. Es wird auch immer häufiger der Zugriff über Webbrowser in Form von Datenclouds verwendet, so dass die Dateien über ein Web-Frontend hoch- und heruntergeladen werden können. Für die Übertragung von Daten unabhängig von einer Dateistruktur, gibt es Schnittstellen wie MQTT, OPC-UA, XMPP, CoAP, REST, SOAP, API-Calls. Die Daten können z. B. als JSON oder XML strukturiert und formatiert sein oder binär übertragen werden. Es wird dabei zwischen Streaming und Skimming Datenübertragung unterschieden, während beim Streaming die Echtzeitdaten kontinuierlich übertragen werden, so dass möglichst aktuellen Datenwerte verfügbar sind, wird beim Skimming verstärkt Wert auf die lückenlose Datenübertragung auch bei instabiler Datenanbindung durch einen größeren und persistenten Datenzwischenspeicher gelegt. In beiden Fällen können Daten auch bei kurzzeitiger Unterbrechung der Datenverbindung nachträglich übertragen werden, jedoch sind die Ziele hinsichtlich der robusten und schnellen Datenübertragung unterschiedlich.

Die Auswahlkriterien bei der Wahl der geeigneteren Schnittstelle ist abhängig von der Art des Zugriffs, der Ladezeiten und der Zugriffsverwaltung, der Datenmenge und zusätzlicher Fähigkeiten, wie z. B. der Formulierung von Abfragen (Queries). So können über diese Schnittstellen vorgefilterte oder vorverarbeitete Daten abgerufen werden, die in dieser Form nicht gespeichert sind, sondern erst beim Abruf berechnet werden, z. B. Daten definierter Zeiträume oder anderer Abstraten.

6.4.5 Metadaten

Metadaten sind von großer Bedeutung, da sie Kontext und Bedeutung zu den gesammelten Messdaten hinzufügen. Ohne sie ist eine weitere Verarbeitung der Messdaten nicht möglich. In Bezug auf Sensordaten könnten Metadaten Informationen wie Sensor-ID, Positionskordinaten, Zeitstempel der Datenerfassung, Art des Sensors, Messbereiche, Messrichtung, Genauigkeit, Kalibrierungsdaten und möglicherweise auch Informationen über Umgebungsbedingungen (wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Datenaufnahme) umfassen. Grundsätzlich liefert die Installationsdokumentation (siehe Kapitel 3.2.3) alle zum Einbauzeitpunkt verfügbaren und notwendigen Informationen über die Messungen, damit eine eindeutige Interpretation der Messdaten ermöglicht wird. Die Monitoringdaten sollten außerdem durch die Dokumentation im Messkonzept, der Ausführungsplanung, Fotos sowie den Sensorinformationen und Kalibrierzertifikaten beschrieben sein. Da solche Metadaten oft als Dokument übergeben wird, sind sie in der Regel nicht maschinenlesbar. Um Metadaten maschinenlesbar abzulegen, gibt es z. B. den Dublin Core. Dies ist ein Metadatenchema zur Beschreibung von elektronischen Ressourcen. Genauer handelt es sich um eine Sammlung einfacher und standardisierter Konventionen zur Beschreibung von Dokumenten und anderen Objekten im Internet, um diese mit Hilfe von Metadaten einfacher auffindbar zu machen. Weitere Entwicklungen in diesem Bereich sollten spezifische Metadatenformate für Monitoringdaten liefern. Für die nachvollziehbare Zuordnung von Monitoringdaten z. B. zur Position und Messaufgabe ist deren eindeutige Benennung mit einem strukturierten, lesbaren Namensschema erforderlich, dass sich ebenfalls an den Bezeichnungen der Positionen am Bauwerk, an der Messmaßnahme und dem Sensortyp orientiert. Die Bezeichnungen müssen bezogen auf das Bauwerk einmalig sein und sollten sich über die Dauer des Monitorings nicht ändern. Über die eindeutige Bezeichnung jeder Messstelle, die eindeutig den Daten einer Zeitreihe des Monitorings (z. B. einem Messkanal eines Sensors) zugeordnet ist, lassen sich viele weitere Informationen referenzieren.

Es gibt eine wachsende Anzahl von Ontologien, um Sensoren und in diesem Kontext stehende Daten zu beschreiben, z. B. [66]. Eine konkrete Sensor-Ontologie ist z. B. die SensorML-Ontologie, die selbst viele weitere Ontologien einbindet wie z.B. QUDT (Quantities, Units, Dimensions and Types), siehe [67], eine Ontologie für physikalische Maßeinheiten und Messgrößen. Für die Anwendungen der Beschreibung der Meta-Daten im Datenmanagement könnte eine eigene Ontologie in Ergänzung zu sehr technischen

Ontologien, die auch den systematischen Aufbau und die Struktur der Monitoring-Systeme beschreiben, wie z. B. die Semantic Sensor Network (SSN) Ontology, s. [68], notwendig sein.

Die maschinenlesbaren Metadaten, die für die meisten nachgelagerten Auswertungen erforderlich werden, können bei der dateibasierten Übergabe der Monitoringdaten entweder in einem separaten Abschnitt der Hauptmessdatendatei oder in einer eigenständigen Metadatendatei gespeichert werden:

1. Integration in Hauptdatendateien:

- Metadaten können direkt in den Hauptdatendateien gespeichert werden. Dies kann durch zusätzliche Spalten in einem CSV-Format oder als Teil der Datenstruktur in JSON oder XML erfolgen.
- Bei der Verwendung von modernen Formaten können Metadaten als Teil des Datei-Headers oder in speziellen Metadatenfeldern eingebettet werden.

2. Separate Metadatendateien:

- Eine alternative Methode ist die Speicherung der Metadaten in separaten Dateien. Dies kann sinnvoll sein, wenn die Metadaten umfangreich sind oder wenn sie unabhängig von den eigentlichen Messdaten aktualisiert oder abgerufen werden müssen.
- Diese Dateien könnten in einem standardisierten Format wie XML oder JSON sein, um eine strukturierte und lesbare Form der Metadaten zu gewährleisten.

Die erforderlichen Metadaten ergeben sich demnach aus der Installationsdokumentation, die wichtige Informationen zum Einbaupunkt enthält (Sensorposition, Messrichtung, Einbaupunkt, etc.) und ggf. weiteren Metadaten (in der Hauptdatei oder separat), die mit den Messdaten permanent übertragen werden, in der zusätzliche Informationen über den Betrieb enthalten sind (Sensorausfälle, Reparaturen, etc.).

Die effektive Handhabung von Metadaten ist ein wesentlicher Bestandteil des Datenmanagements in der Straßenbauverwaltung. Durch die sorgfältige Organisation, Speicherung und Sicherung dieser Daten können Straßenbauverwaltungen sicherstellen, dass sie den vollen Nutzen aus ihren Messdaten ziehen können, während sie gleichzeitig Datenschutzbestimmungen einhalten und die Langzeitintegrität der Daten sicherstellen.

Für die langfristige Speicherung und Archivierung der Daten ist es wichtig, regelmäßige Backups und eine nachhaltige Speicherstrategie zu etablieren, siehe Kapitel 6.4.9.

6.4.6 Datenqualität

Die unterschiedlichen Aspekte, die bei der Datenqualität betrachtet werden, sind die intrinsische Datenqualität, die repräsentative Datenqualität, die kontextuelle Datenqualität und die Zugriffsqualität [63]. Die Summe aller dieser Aspekte muss kontinuierlich über den gesamten Weg der Messung vom Sensor bis zur gespeicherten Datei sauber umgesetzt werden, um bei der Auswertung nachvollziehbare und qualitativ hochwertige Daten vorliegen zu haben. Auf jeden Teilschritt und über die Dauer des Monitorings besteht stets die Gefahr, dass sich die Datenqualität ungewollt verschlechtert. Der Grundstein für eine hohe Datenqualität wird mit der Formulierung der Messaufgabe und der Auswahl der Sensorik gelegt, aber auch weiterführende Prozesse der Qualitätssicherung, wie Kalibrierungen sind essenziell. Anhand der gespeicherten Monitoringdaten lassen sich unter Umständen teilweise Probleme bei der Messung identifizieren, jedoch sind wenig vertrauenswürdige Daten keine gute Ausgangsbasis für eine Auswertung. Aufgrund der teilweise hochempfindlichen Messtechnik lassen sich Störeinflüsse nicht vermeiden und es treten in den Messdaten Effekte, wie z. B. Peaks, nicht-kompensierbare Temperatureinflüsse oder verstärktes Rauschen auf. Diese Einflüsse können sowohl temporärer Natur sein als auch permanent und zu bestimmten Umweltbedingungen auftreten. Die einzelnen Messstellen des Monitoringsystems werden davon unterschiedlich beeinflusst. Um die Datenqualität anhand der Daten selbst zu beurteilen, muss dies für jeden einzelnen Zeitabschnitt und für jede einzelne Messstelle erfolgen. Typischerweise bietet es sich an die chronologische Gliederung der Messdateien dafür heranzuziehen und die einzelnen Messzeiträume zu betrachten.

Um die Bewertung der Datenqualität der Zeitreihe einer Messstelle zu realisieren eignen sich sog. Data Quality Flags, die die einzelnen Messstellen innerhalb einer Datei in Form eines Ziffernstrings, z. B. ‚00111000040301‘, bewerten [69]. Die Position einer Ziffer bewertet innerhalb dieses Ziffernstrings einen bestimmten Prüfaspekt hinsichtlich der Datenqualität und die Ziffer selbst stellt eine qualitative Bewertungsangabe, also eine Note oder Merkmalsausprägung, dar. Diese durch den Auftragnehmer bereitgestellten Angaben werden in einer zusätzlichen Datei zur jeweiligen Messdatei gespeichert. Wenn diese Data Quality Flags ausgewertet werden lässt sich ein Teil der fachtechnischen Prüfung automatisieren.

Da Monitoringdaten periodisch ergänzt werden und damit durchgeführte Auswertungen, ggf. nicht mehr auf allen verfügbaren Daten beruhen, ist es relevant, eine Möglichkeit zu haben den der Auswertung zugrunde liegenden Datenbestand benennen zu können. Im einfachsten Fall kann sich dabei auf die Zeitangaben in den Monitoringdaten bezogen werden. Das Spektrum der Möglichkeiten reicht von einer fortlaufenden Nummer der Datenübertragung durch den AN bis zu Block Chain-Anwendungen, die die Datenübergaben als Transaktionen ansehen und eindeutig nachvollziehbar machen.

6.4.7 Performance und Kosten

Die Leistungsfähigkeit des Datenmanagements sollte horizontal und vertikal skalierbar sein, sowohl hinsichtlich des Speicherplatzes, als auch der Rechenleistung und Übertragungsgeschwindigkeit der Datenanbindung. Dies wird heutzutage durch den professionellen Betrieb von Hardware in Rechenzentren und durch verteilte, virtualisierte Systeme ermöglicht. Die Bandbreite reicht dabei von privaten Clouds in der Straßenbauverwaltung über hybride Clouds bis zu Public Cloud Anbietern. Diese Anbieter können bei Bedarf zusätzliche Ressourcen bereitstellen, die jedoch mit laufenden Kosten verbunden sind, in Abhängigkeit des genutzten Speicherplatzes, des verursachten Datentraffics und der verwendeten CPU-Leistung und -Anzahl. Auch besondere Anforderungen, wie z. B. nach GPU oder TPU Prozessoren für KI-Anwendungen können dynamisch realisiert werden. Weitere Kosten ergeben sich aus der genutzten Software, die entweder lizenziert werden muss oder als Open Source Software Lösungen durch eine Community entwickelt und unterstützt oder durch kostenpflichtige Supportleistungen finanziert wird. Hohe Kosteneffizienz zeigen Commercial-Off-the-Shelf, (COTS) Produkte mit großem Nutzerkreis, also Standardanwendungen, die am Markt etabliert sind. In der Regel haben dies auch eine bessere Softwarequalität, höhere Datensicherheit und einen umfangreicheren Support.

6.4.8 Zugriffsadministration und -sicherheit

Der Zugriff auf die Daten muss sowohl für die jeweiligen Anwender als auch für einen automatisierten Zugriff durch eine Authentisierung erfolgen. Legitimationen durch Benutzernamen-Passwort-Kombinationen sind nicht mehr Stand der Technik und wurden durch neuere Methoden ergänzt oder ersetzt. In Fällen wo Benutzernamen und Passwörter nicht abgelöst werden können und unmittelbar keine Ersatzlösung umgesetzt werden kann, müssen Passwörter eine ausreichende Komplexität bzgl. der Zeichenanzahl, Nutzung von Groß- und Kleinbuchstaben, sowie Sonderzeichen aufweisen. Die aktuellen Lösungen sind die Anwendung einer Zwei-Faktor-Authentisierung. Ein zweiter Authentisierungsschritt ist die Eingabe eines zeit- oder ereignisabhängigen Codes, der als One-Time-Pad (OTP) bezeichnet wird. Diese Codes werden z. B. über ein zusätzliches gekoppeltes Gerät (z. B. Smartphone oder Hardware-Token) erzeugt, zu denen nur der jeweilige Nutzer Zugang hat. Der Vorteil ist, dass eine höhere Sicherheit erreicht wird und eine versehentliche Weitergabe der Zugangsinformationen sehr schwer möglich ist, da sich der OTP-Code stets ändert. Weitere fortschrittliche Authentisierungsmethoden sind der Einsatz von Zertifikaten in Verbindung mit Hardware-Token oder biometrischen Daten, wie z. B. nach den von der FIDO-Allianz (FIDO = Fast IDentity Online) entwickelten Konzepten, z. B. dem U2F Standard oder dem UAF Standard. Dieser Allianz ist auch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) beigetreten.

Die Zugriffsberechtigungen sollten immer auf Grundlage eines Auftrags oder einer Nutzungsvereinbarung mit einem Nutzer durch die Straßenbauverwaltung erteilt werden und nur Zugriff auf für die Fragestellung relevanten Bereiche erlauben, z. B. für das jeweilige Bauwerk oder den konkret umgesetzten Monitoringanwendungsfall und dabei je nach Bedarf zwischen lesenden und schreibenden Zugriff

differenzieren. Über die Definition von Nutzer-Rollen, können vereinheitlichte Nutzerrechte bei vergleichbaren Zugriffsanforderungen realisiert werden, z. B. Nutzerrolle „Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen-Datenlieferung“. Über einen zeitlichen Ablauf von einzelnen aufgabenbezogenen Berechtigungen sollte in einem zielführenden Umfang stets nachgedacht werden, und Fristen bereits zu Beginn festgelegt werden.

Bei automatisiertem Zugriff auf Schnittstellen über ein Application Programming Interface (API) kommen häufig API-Keys zum Einsatz. API-Keys funktionieren ähnlich wie Passwörter und können daher ähnlich schnell durch Sicherheitslücken oder weil sie statisch und unverschlüsselt hinterlegt werden für Fremdzugriffe ausgenutzt werden. API-Keys werden häufig im Quellcode gespeichert und gelangen über die Software-Quellcode-Verwaltung in den unternehmensinternen Umlauf oder sind in den Logdateien der Zugriffspartner sichtbar.

6.4.9 Backup und Wartung

Der Betrieb eines Datenmanagements sollte in einer professionellen IT-Umgebung erfolgen, so dass die Softwarekomponenten auf einer Hardware betrieben werden, die sich in einer abgesicherten Umgebung befindet. Grundprinzipien werden im Hochverfügbarkeits (HV)-Kompendium, Band G des BSI genannt und beschrieben [70]. Die grundlegenden Informationen sind in großen Teilen zum Stand der Technik geworden. Diese Prinzipien bei der Bereitstellung von IT-Dienstleistungen umfassen:

- Fehlertoleranz, Redundanz, Robustheit
- Separation, Virtualisierung, Transparenz
- Priorisierung, Skalierbarkeit
- Automatisierung, Autonomie

Für den praktischen Betrieb eines umfassenden Datenmanagements bedeutet dies, dass die Umsetzung durch entsprechende IT-Abteilungen oder Dienstleister erfolgen muss. Der Betrieb einer solchen Plattform wird z. B. auf zertifizierter Hardware mit redundanter Auslegung realisiert. Typischerweise sind Stromversorgungen resilient und ausfallsicher ausgelegt. Die Datenspeicher sind über RAID-Verbundsysteme (redundant array of independent discs) gespiegelt, um durch Mehrfachspeicherung die Zugriffsgeschwindigkeit und/oder die Anzahl der redundanten Kopien zu erhöhen. Meist werden Systeme in virtualisierten Umgebungen betrieben, die ein Backup des Gesamtsystems einschließlich aller Softwarekomponenten und des Betriebssystems als Backup oder Snapshot zu ermöglichen. Damit liegen Backup-Funktionalitäten immer weniger bei den einzelnen Softwareteilen verortet oder beim System als Ganzes. Virtuelle Systeme können ggf. dynamisch skaliert werden und an die Anforderungen hinsichtlich Datenspeicher und Rechenleistung im laufenden Betrieb angepasst werden. Typische Wartungsaufgaben werden häufig durch den IT-Dienstleister realisiert und ggf. automatisiert. Dennoch besteht der Bedarf, das System zu administrieren und zu warten. Ein Augenmerk ist auf die Migrationsfähigkeit, d. h. die Überführbarkeit der Inhalte des Datenmanagementsystems auf eine neue technologische Plattform, zu legen.

6.5 Vorstellung und Validierung des Konzepts

6.5.1 Vorgehen bei der Konzepterstellung und Validierung

Im Rahmen des Leitfadens wird ein Konzept für Straßenbauverwaltungen zum Datenmanagement skizziert, die auf den Geschäftsprozessen unter Nutzung der Auftraggeber-Daten-Anforderungen (ADA) aufbauen und die Aspekte bei den Anforderungen des Datenmanagements berücksichtigen. Die Vorstellung des Konzepts erfolgt dabei gleichermaßen mit der Validierung. Dabei wird zwischen zwei Stufen unterschieden:

- Grundkonzept - Einführung einer dateibasierten Datensense:
Diese erste Stufe soll den Einstieg in die Thematik mit möglichst einfachen Mitteln demonstrieren. Sie kann als Mindestanforderung bei Straßenbauverwaltungen zur Datenhaltung von Monitoringdaten angesehen werden. Es müssen dafür grundlegende Entscheidungen getroffen werden, die bei den Aspekten diskutiert werden. Die Vorstellung erfolgt über die Erstellung einer Beispiel-ADA, für die eine

Vielzahl an Entscheidungen der in Kapitel 6.4 aufgezeigten Aspekte beispielhaft getroffen werden musste. Die Umsetzung ist in Kapitel 6.5.2 gezeigt.

- Erweiterung: Datenintegration und -analyse:
Diese Erweiterung ermöglicht über die Nutzung von Zeitreihendatenbanken einfachere Zugänge zu den Daten für Dritte und einen permanenten Überblick über die Bauwerke und ihre Monitoringdaten durch darauf aufbauende Visualisierungsprogramme. Dieser Schritt ist in der Handhabung komplexer und erfordert mehr Fachwissen. Es stellt somit den Zielzustand dar.

Beide Schritte können von den Verwaltungen selbst organisiert oder über Ausschreibungen vergeben werden. Das Grundkonzept ist jedoch mit einfachen Mitteln zum Herantasten an die Thematik auch prototypisch sehr leicht selbst umsetzbar und wird für jedes Monitoringprojekt bei Straßenbauverwaltungen empfohlen.

6.5.2 Vorstellung und Validierung des Grundkonzepts: Einführung einer dateibasierten Datensenke

Die Validierung des Datenmanagementkonzepts für den dateibasierten Ansatz erfolgt anhand des im Kapitel 2.2 beschriebenen Praxisbeispiels der Nibelungenbrücke im Anwendungsfall 050: Begleitung bedeutender Bauwerke. Bei diesem Bauwerk wurden mehrere sich ergänzende Monitoringinstallationen von verschiedenen Akteuren realisiert, die im Monitoringprozess die Rolle des Fachplaners Monitoring und des Spezialdienstleisters für Bauwerksmessungen eingenommen haben. In diesem Validierungsbeispiel sollen zwei sich ergänzende Monitoringsetups, die im Rahmen von Forschungsprojekten umgesetzt wurde, fiktiv wie beauftragte Monitoringdienstleistungen der Straßenbauverwaltung betrachtet werden. Am Geschäftsprozess 1 wird das Konzept dargestellt.

Teilprozess 1.1 - Erstellung der Auftraggeber-Daten-Anforderungen

Für das fiktive Szenario wird durch den Fachplaner Monitoring im Auftrag des Bauherrn eine Beispiel-ADA erstellt, die im Rahmen des Projekts an alle Akteure (siehe Kapitel 3.2.1) übergeben wird. Die Erstellung kann beispielsweise mit der Vergabe des Messkonzepts zusammen ausgeschrieben und an den Fachplaner übergeben werden.

Die Beispiel-ADA hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie zeigt lediglich, die zu klärenden Punkte zwischen den Akteuren hinsichtlich der Datenübertragung bzw. der Projektkonstellation. Nicht alle Felder müssen dabei für jedes Projekt ausgefüllt und vorgedacht werden. Insbesondere wenn Inhalte noch nicht klar sind, kann mit Revisionen gearbeitet werden. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass die Straßenbauverwaltung (LBM) ein eigenes föderatives Informationssystem betreibt, dass über das Internet zu erreichen ist.

Beispiel-ADA (als eigenständiges Dokument zum Monitoringkonzept)

Bezug zum Bauwerk und Projektüberblick	Nibelungenbrücke Worms – Monitoring-AwF 050: Begleitung bedeutender Bauwerke – globales Strukturmonitoring				
	Auftraggeber: Beispiel Straßenbauverwaltung Landesbetrieb Mobilität (LBM)				
Auftragnehmer: Beispiel Fachplaner Monitoring (FM) mit Beispiel Unterauftragnehmer Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen (SDFBM)					
Monitoringzeitraum: August 2023 – Juli 2026					
Revisionsstand und -historie	Revision	Datum	Revisionsgrund	Name	
	0	07.02.2024	Muster-ADA für Monitoring Anwendungsfall AwF 50 des LBM, Version 0.1	LBM	

	1.0	26.02.2024	Anpassung der ADA auf Monitoringkonzept „Nibelungenbrücke“ v. 05.01.2024	FM	
Referenzen	<p>Monitoringkonzept: 2023_05_17_SPP_Monitoringkonzept_rev1.pdf vom 17.05.2023</p> <p>Bauwerksnummer nach SIB-Bauwerke: 6316873</p> <p>Pläne: [bei Bedarf angeben]</p>				
Kurzbeschreibung	<p>Bei diesem Monitoring wird im Zuge des Forschungsprojekts SPP100+ durch die BAM ein Strukturmonitoring nach dem Monitoringanwendungsfall AwF 050 durchgeführt, um die Nibelungenbrücke Worms als besonderes Bauwerk zu untersuchen. Es werden Beschleunigungen an den Stegwänden der beiden Hohlkästen im Brückenfeld der linksrheinischen Seitenöffnung (Seite Stadt Worms) gemessen. Über die Länge der beiden Kragarme der Brückenöffnung erfassen sieben Beschleunigungssensoren die Strukturdynamik des Bauwerks in drei orthogonalen Messrichtungen. Die einzelnen Sensoren sind zeitlich genau synchronisiert, so dass Auswertungen, wie z. B. Modalanalysen möglich sind. Außerdem sind die Messdaten zeitlich zum Strukturmonitoring des Zentralprojekts des SPP100+ synchronisiert.</p>				
Rollen / Verantwortlichkeiten	<p>Akteure:</p> <p>Bauherr/Auftraggeber: Landesbetrieb Mobilität</p> <p>Fachplaner Monitoring: FPM1</p> <p>Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen: SDB1</p> <p>Fachtechnischer Prüfer: FPM2</p> <p>[konkrete Benennung der Dienstleister]</p> <p>Verantwortlichkeiten:</p> <p>Zugangsverwaltung: Straßenbauverwaltung</p> <p>Datenübergabe: SDB1</p> <p>Freigabe der Daten: Straßenbauverwaltung</p> <p>Kuration: Straßenbauverwaltung</p> <p>Rückfragen zu den Messungen: SDB1</p> <p>Rückfragen zum Konzept: FPM1</p> <p>Fehlermanagement: SDB1 (Hinweise an: data_eval@beispiel-email.de)</p>				
Datenumgebung und Schnittstellen	<p>Für das Datenmanagement und die Datenübertragung wird ein föderiertes Informationssystem eingesetzt. Das von der Straßenbauverwaltung bereitgestellte System ist unter der URL:</p> <p>https://monitoringdaten.strassenbauverwaltung.de/ [Beispiel]</p> <p>erreichbar. In diesem Datenraum hat der Spezialdienstleister Lese- und Schreibberechtigung über folgende Schnittstellen:</p> <p>Schnittstelle 1: Browserbasierter Dateiupload – geteilter Link</p> <p>Der Zugriff auf die Daten kann manuell über den Webbrowser erfolgen. Dazu wird von der Straßenbauverwaltung ein Link an die der Funktions-E-Mail-Adresse (sdb1@beispiel-email.de) des Spezialdienstleisters für Bauwerksmessungen und das zugehörige Passwort übersendet. Die Zugangsdaten dürfen nicht weitergegeben werden. Mit dem Link kann der Datenbestand in einer strukturierten Ordnerstruktur angezeigt werden. Es können die Monitoringdaten gemäß den weiteren Vereinbarungen hier manuell hochgeladen und überprüft werden.</p>				

	<p>Schnittstelle 2: Föderierte Cloud Freigabe</p> <p>Für die Datenübergabe wird von der Straßenbauverwaltung ein föderierter Cloud Link bereitgestellt und an die Funktions-E-Mail-Adresse (sdb1@beispiel-email.de) des Spezialdienstleisters für Bauwerksmessungen gesendet. Mit dieser Verknüpfung kann der Spezialdienstleisters für Bauwerksmessungen entsprechende Zugangsberechtigungen unterverwalten und in seiner Cloudinstanz entsprechende Schnittstellen (z. B. eigenen WebDAV Server) anbinden.</p> <p>Schnittstelle 3: WebDAV Verbindung</p> <p>Die Straßenbauverwaltung kann direkten Zugriff auf die Datenmanagementplattform über die WebDAV Schnittstelle einräumen, um den bereitgestellten Datenraum zu erreichen. Der Spezialdienstleister erhält auf Nachfrage die URL des WebDAV Servers, den Benutzernamen und das Passwort an die Funktions-E-Mail-Adresse (sdb1@beispiel-email.de).</p>
<p>Datenformate</p>	<p>Die Monitoringdaten mit der Dateierweiterung „.csv“ werden als CSV-Dateien gespeichert gemäß RFC 4180 und RFC 7111. Als Zeichensatz wird UTF-8 verwendet. Die Trennzeichen werden wie folgt festgelegt:</p> <p>Spaltentrennzeichen: Semikolon (;) Dezimaltrennzeichen: Komma (,) Tausendertrennzeichen: Punkt (.)</p> <p>Formatierung der Datum-Zeit-Angabe erfolgt nach ISO-8601:</p> <p>YYYY-MM-DDThh-mm-ss,ffffff+zz YYYY ... vierstellige Jahresangabe MM ... zweistellige Monatsangabe DD... zweistellige Tagesangabe hh ... zweistellige Stundenangabe mm ... zweistellige Minutenangabe ss,ffffff .. zweistellige Sekundenangabe mit sechsstelliger Mikrosekundenangabe mit Komma (,) als Trennzeichen +/-zz ... Zeitdifferent der lokalen Ortszeitangabe zu UTC im Format (hh) T ... Trennzeichen zwischen Datums- und Zeitangabe nach ISO-8601</p> <p>Sind regulär keine Werte vorhanden, dann wird kein Eintrag vorgenommen und es folgt ein Spaltentrennzeichen dem nächsten. Für einen undefinierten oder nicht darstellbaren Wert wird nach IEEE 754 (Gleitkommadarstellungen) das Symbol NaN verwendet, z. B. bei einer Division durch die Zahl 0 oder einem Fehlerwert.</p> <p>Die Tabellen-Struktur der CSV-Dateien besteht aus zwei Kopfzeilen mit den eindeutigen Messstellenbezeichnungen (Spalten) in der ersten Zeile und der zugehörigen Einheit als SI-Einheit in der zweiten Zeile. Die Spalte mit der Datum-Zeitangabe ist mit Datetime bezeichnet. Ab der dritten Zeile folgen die Messwerte in chronologischer Reihenfolge, vom Messbeginn bis zum Messende der Datei zeilenweise mit fester Spaltenanzahl. Die Messdatei umfasst die Messdauer von 1 Tag von Mitternacht 00:00:00 Uhr bis Mitternacht des Folgetags 23:59:59 Uhr.</p> <p>Der Zeitstempel innerhalb einer Messdatei ist monoton steigend und umfasst immer die gesamte Messdauer von einem Tag, sodass jede vollständige Messdatei immer die exakt gleiche Anzahl an Zeilen und Spalten besitzt (außer bei Schaltsekunden und Zeitumstellung).</p>
<p>Hinweise zu Software</p>	<p>CSV-Dateien können mit jedem beliebigen Texteditor gelesen werden.</p> <p>Es eignen sich ebenfalls Tabellenverarbeitungsprogramme wie Microsoft Excel oder Programmiersprachen wie Python mit zugehörigen Packages (pandas).</p>

Benennung
Messstellen /
Dateien

In den CSV-Dateien sind die Messstellen gemäß der Installationsdokumentation bezeichnet. Das Namensschema setzt sich zusammen aus dem Bauwerkskürzel (NW = Nibelungenbrücke Worms), der Monitoringmaßnahme (MM), der Positionsangabe am Bauwerk (PB) mit grober Abstandsangabe vor (-) oder nach (+) dem bezeichneten Querschnitt in m, der Sensortyps (T) und einer laufenden Nummer (xx) innerhalb der Position. Ggf. angewendete Berechnungen (EV) sind nach einem Unterstrich angefügt.

Messstellenbezeichnung: NW.MM_PB+mm.Txx_EV

Es sind folgende Bezeichnungen für Monitoringmaßnahmen zu verwenden:

Monitoringmaßnahme	Bedeutung
SD	Monitoringmaßnahme Strukturdynamik
...	...

Es sind folgende Bauwerkspositionen zu verwenden:

Messquerschnitt	Bedeutung
AE	Achse E Hohlkasten Südseite
SG	Scheitelgelenk Hohlkasten Südseite
AF	Achse F Hohlkasten Südseite
SGN	Scheitelgelenk Hohlkasten Nordseite
...	...

Es sind folgende Bezeichnungen für Sensortypen zu verwenden:

Sensortyp	Bedeutung
B	Beschleunigungssensor
T	Temperatursensor
W	Wegsensor
D	Dehnungsmessstreifen (DMS)
...	...

Es sind folgende Bezeichnungen für angewendete Berechnungen zu verwenden:

Berechnung	Bedeutung
_AC	Anwendung eines Hochpassfilter, um den Gleichanteil der Erdbeschleunigung zu entfernen, die die verwendeten Sensoren erfassen.
...	...

Die Dateien werden tageweise mit der Angabe des Datentyps (statistisch (S), dynamisch (D)) und dem Tag bezeichnet: D_YYYY-MM-DD.csv und monatsweise in Ordner mit Jahres- und Monatsangabe sortiert, z. B.:

.\2024_01\D_2024-01-01.csv

Referenzierung in BIM Modellen	Keine [Entsprechend des Bedarfs anzupassen]
--------------------------------	--

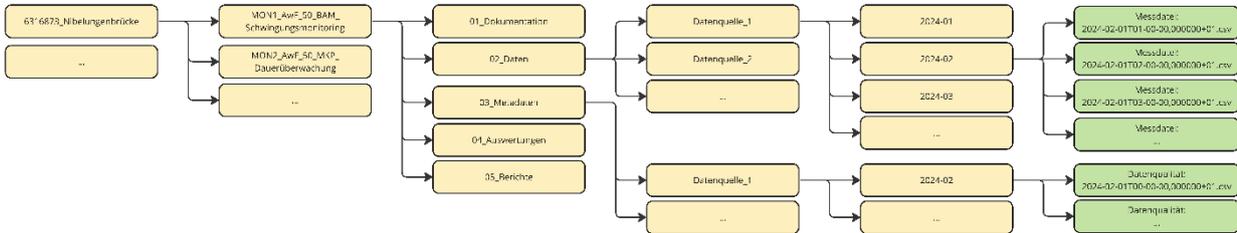


Bild 42: Beispielhafte Ordnerhierarchie / Aufbau des Informationscontainers (eigene Darstellung)

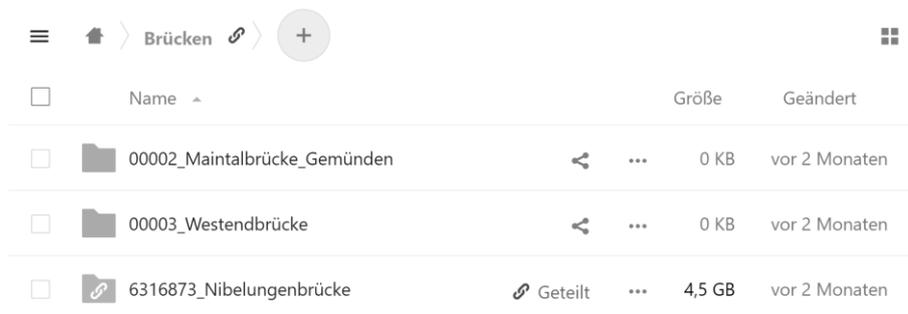
Beschreibung der Datenübergabe	<p>Der Straßenbauverwaltung werden folgende Daten übergeben:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Beschreibung</th> <th>Umfang</th> <th>Lieferzeitpunkt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stündliche Kurzzeitmessung (Datenquelle: DQ_01)</td> <td>Es werden die Zeitreihen der Beschleunigungssensoren in Richtung der Monitoringmaßnahme SD übertragen. Dazu werden zu jeder vollen Stunde die ersten 2 min aufgezeichnet mit einer konstanten Abtastrate von 250 Hz. [Bezug zum Monitoringkonzept]</td> <td>Datenübertragung erfolgt täglich an das Datenmanagement am Folgetag der Messung des jeweiligen kompletten Tags. Es ist eine Frist von max. 72 h zur Nachlieferung einzuhalten.</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Datenanlage erfolgt unter: ./MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonitoring/02_Daten/DQ_01/</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>[weitere Datenquellen, die z. B. von weiteren Bauwerksteilen, anderen Datenerfassungssystemen oder andere Erfassungs- bzw. Übermittlungsarten können hier ergänzt werden als weitere Datenquelle]</p>			Beschreibung	Umfang	Lieferzeitpunkt	Stündliche Kurzzeitmessung (Datenquelle: DQ_01)	Es werden die Zeitreihen der Beschleunigungssensoren in Richtung der Monitoringmaßnahme SD übertragen. Dazu werden zu jeder vollen Stunde die ersten 2 min aufgezeichnet mit einer konstanten Abtastrate von 250 Hz. [Bezug zum Monitoringkonzept]	Datenübertragung erfolgt täglich an das Datenmanagement am Folgetag der Messung des jeweiligen kompletten Tags. Es ist eine Frist von max. 72 h zur Nachlieferung einzuhalten.	Datenanlage erfolgt unter: ./MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonitoring/02_Daten/DQ_01/				
Beschreibung	Umfang	Lieferzeitpunkt																
Stündliche Kurzzeitmessung (Datenquelle: DQ_01)	Es werden die Zeitreihen der Beschleunigungssensoren in Richtung der Monitoringmaßnahme SD übertragen. Dazu werden zu jeder vollen Stunde die ersten 2 min aufgezeichnet mit einer konstanten Abtastrate von 250 Hz. [Bezug zum Monitoringkonzept]	Datenübertragung erfolgt täglich an das Datenmanagement am Folgetag der Messung des jeweiligen kompletten Tags. Es ist eine Frist von max. 72 h zur Nachlieferung einzuhalten.																
Datenanlage erfolgt unter: ./MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonitoring/02_Daten/DQ_01/																		
...																
...																		
Datenbereinigung	Der AN stellt nur fehlerbereinigte Daten zur Verfügung. Fehlerhafte Messungen werden durch den AN aus den Daten entfernt. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Vollständigkeit der Daten, s.u.																	
Bereitstellung von ausgewerteten Daten	In diesem Fall werden keine zusätzlichen Auswertungen basierend auf den Rohdaten übertragen. [Weitere Vereinbarung zur Übergabe von Ergebnissen von Auswertungen, wie bei „Beschreibung der Datenübergabe“]																	
Bereitstellung von	Der Spezialdienstleister stellt neben der regelmäßigen Übergabe der Monitoringdaten ein Online-System zur Visualisierung der Daten zur Verfügung:																	

Visualisierungen	<p>Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/></p> <p>[Müsste im Rahmen der Durchführung näher definiert werden. Als Beispiel siehe Kapitel 6.5.3]</p>
Bereitstellung Dokumentation Vollständigkeit und Bewertung Datenqualität	<p>Jeden Monat wird die Vollständigkeit des letzten Monats tages- und sensorweise als eigenständige Datei pro Monat übergeben. Die Vollständigkeit wird ausgedrückt als</p> $\frac{\text{Anzahl vorhandener Datenpunkte}}{\text{Anzahl möglicher Datenpunkte}} \cdot 100\%$ <p>Die Dateibezeichnung ist analog zu den Messdateien zu wählen.</p> <p>Der Ablageort für Datenquelle DQ_01 ist: ./MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonitoring/03_Metadaten/01_Datenqualität/01_Vollständigkeit/DQ_01/</p> <p>[Ergänzende Vereinbarungen sind für weitere Datenquellen und zu Statistiken zur Datenqualität zu treffen]</p>
Bereitstellung weiterer Metadaten	<p>Die folgenden Dokumentationen werden bereitgestellt unter:</p> <p>./MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonitoring/01_Dokumentation/</p> <ul style="list-style-type: none"> - Messstellenübersicht, PDF - Installationsdokumentation, PDF & DWG - Installationsplanung, PDF - Datenblätter der Sensoren, PDF - Kalibrierzertifikate, PDF - Monitoringtagebuch, Excel - Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA), PDF <p>Die folgenden Metadaten werden bereitgestellt unter:</p> <p>./MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonitoring/03_Metadaten/</p> <ul style="list-style-type: none"> - Referenzen (z. B. semantische Links) - Kalibrierinformationen (als maschinenlesbare Daten) <p>[Erweiterung zur Übergabe von Metadaten nach den Anforderungen]</p>
Datenschutzbestimmungen und Hinweise zu Urheberrecht	<p>In den Unterlagen dürfen keine personenbezogenen Daten aufgeführt werden. Geschützte Handelsnamen und Marken müssen gekennzeichnet werden. Rechtlich geschützte Logos müssen komplett entfernt werden. Für Abbildungen und Fotos ist der Urheber und die Lizenzvereinbarung konkret anzugeben. Bevorzugt wird die Nutzung der Lizenz creative commons CC BY-ND 4.0 für Dokumente, Abbildungen und Texte.</p> <p>[Anpassung gemäß den Erfordernissen]</p>
Hinweise zu Nutzungsrechten und Zitiervorschlag	<p>Die Nutzung der Daten erfolgt ohne Gewähr und unter Ausschluss von Haftung. Die Bereitstellung der Daten kann jederzeit ohne Ankündigung eingeschränkt oder komplett beendet werden. Bei Nutzung der Daten ist folgende Zitierangabe zu verwenden:</p> <p>LBM (2024): <i>Monitoringdaten der Schwingungsmessung an der Nibelungenbrücke Worms im Anwendungsfall AwF 50</i>. URL:</p> <p>https://monitoringdaten.strassenbauverwaltung.de/apps/files/?dir=/Brücken/6316873_Nibelungenbrücke/02_MAwF/MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonitoring, abgerufen am dd.mm.yyyy.</p>
	[weitere Punkte sind projektabhängig zu ergänzen]

Teilprozess 1.2 – Zugangsberechtigung für Schnittstellen

Mit dem Abschluss der Abstimmung der Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA) erhalten die Akteure die vereinbarten Zugriffsrechte für die Schnittstellen. In der Regel kann im Datenmanagementsystem von der Straßenbauverwaltung in Eigenverantwortung die Ordnerstruktur für ein Bauwerk angelegt werden, sofern diese noch nicht existiert. Die Anwendung einer Musterordnerstruktur unterstützt wesentlich die Datenqualität bei der Nutzung des Datenbestands im jeweiligen Datenmanagement der Monitoringdaten.

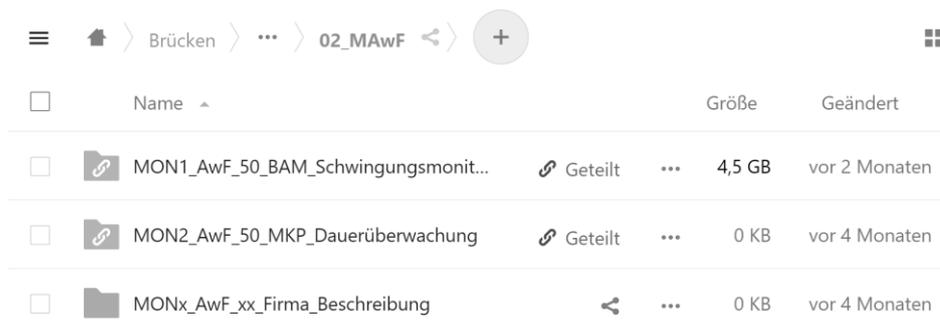
Die von der jeweiligen Straßenbauverwaltung organisierte Ordnerhierarchie könnte für das Monitoring auf der ersten Ordner-Ebene z. B. zwischen Brücken, Verkehrszeichenbrücken (VZB), Lärmschutzwänden (LSW), Stützwänden, Tunneln und Sonstiges unterscheiden, sofern für andere Bauwerke als Brücken ebenfalls Monitoringanwendungen umgesetzt werden. Auf der Ordner-Ebene *Brücke* werden für alle Brücken entsprechende Unterordner angelegt, die in der Zuständigkeit der Straßenbauverwaltung stehen und für die Monitoring Anwendung findet. Wichtig ist hier die Einheitlichkeit des Benennungsschemas für jedes Bauwerk z. B. mit der Bauwerksnummer und dem Bauwerksnamen, wie beispielhaft in Bild 43 dargestellt.



Name	Größe	Geändert
00002_Maintalbrücke_Gemünden	0 KB	vor 2 Monaten
00003_Westendbrücke	0 KB	vor 2 Monaten
6316873_Nibelungenbrücke	4,5 GB	vor 2 Monaten

Bild 43: Beispielhafte Übersicht über den Bauwerksbestand mit Monitoring einer Straßenbauverwaltung (eigene Darstellung)

Unterhalb eines jeden Bauwerks mit Monitoring werden die geplanten und umgesetzten Monitoringanwendungsfälle geführt, siehe Bild 44. Auch hier unterstützt eine standardisierte bauwerksübergreifende Namensgebung der Unterverzeichnisse die Zugriffsqualität auf die Datenbestände.



Name	Größe	Geändert
MON1_AwF_50_BAM_Schwingungsmonit...	4,5 GB	vor 2 Monaten
MON2_AwF_50_MKP_Dauerüberwachung	0 KB	vor 4 Monaten
MONx_AwF_xx_Firma_Beschreibung	0 KB	vor 4 Monaten

Bild 44: Beispielhafte Übersicht über die Monitoringanwendungsfälle, die an einem Bauwerk umgesetzt sind (eigene Darstellung)

Einem konkreten Monitoringanwendungsfall ist jeweils ein Hauptauftragnehmer zugeordnet, der für die Umsetzung zuständig ist, auch wenn mehrere Akteure beteiligt sein können. Über die Datenmanagementplattform kann vom Bearbeiter der Straßenbauverwaltung der Zugriff für den neu angelegten Monitoringanwendungsfall mit dem AN und ggf. weiteren Akteuren geteilt werden. Die Auswahl der vereinbarten Schnittstelle kann über ein Menü getroffen werden, ebenso wie die Spezifikation von Lese- und Schreibrechten und der zeitliche Ablauf von Berechtigungen. Über die Datenmanagementplattform sind alle erteilten Zugriffsberechtigungen für die Straßenbauverwaltung einsehbar und könnten auch bei Bedarf zurückgesetzt werden, um unberechtigten Zugriff zu verhindern oder ein neues Passwort zu vergeben. Durch ordnerbezogene Aktivitätsprotokolle können Änderungen, Freigabezeitpunkte und auf AN Seite akzeptierte Freigaben eingesehen werden.

Teilprozess 1.3 – Entgegennahme der Daten

Der Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen legt die Daten in regelmäßigen Abständen und in definierter Form in die ihm vorgegebene Datenstruktur. Für die Gliederung innerhalb des Monitoringanwendungsfalls wurden eine Untergliederung in Dokumentation, Daten, Metadaten, Auswertungen und Berichte angewendet, wie in Bild 45 dargestellt.

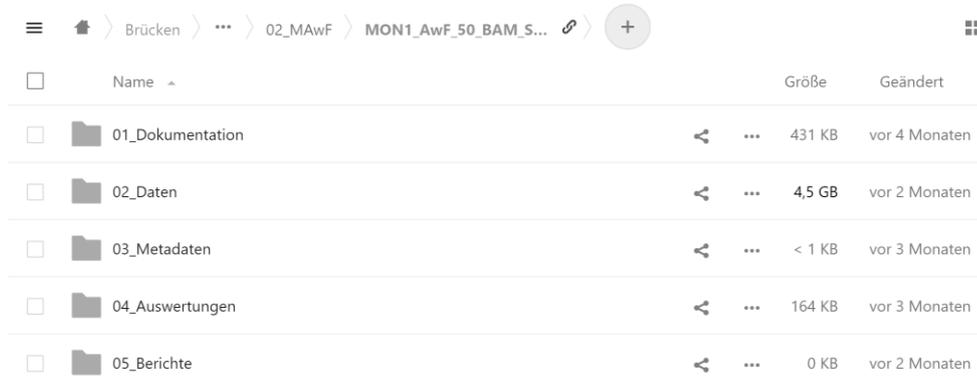


Bild 45: Beispielhafte Übersicht über die Ordnerstruktur des umgesetzten Monitoring-AwFs (eigene Darstellung)

Alle Randbedingungen zur Ablage der Daten und Metadaten werden in der ADA definiert. Die Monitoringdaten werden untergliedert nach den festgelegten Datenquellen im Ordner 02_Daten gesammelt. In diesem Beispiel ist in Bild 46 gezeigt wie eine CSV-Datei aussehen würden, wenn sie gemäß der Beispiel-ADA umgesetzt ist.

Datetime [YYYY-MM-DDThh-mm-ss,ffffff+zz]	NW.SD_AE+00.T01 [°C]	NW.SD_AE+00.T02 [°C]	NW.SD_AE+00.W01 [mm]	NW.SD_AE+00.D01 []
2024-02-01T00-00-00,000000+00	4,21		4,50	3,14159000
2024-02-01T00-10-00,000000+00	4,35	NaN		3,57695656
2024-02-01T00-20-00,000000+00	4,36	NaN		4,01262735
2024-02-01T00-30-00,000000+00	4,47		5,22	4,45966051
2024-02-01T00-40-00,000000+00	4,63		4,65	4,92279493
2024-02-01T00-50-00,000000+00	4,74		4,84	5,39696489
2024-02-01T01-00-00,000000+00	4,91		5,34	5,88841043
2024-02-01T01-10-00,000000+00	4,96		5,85	6,38485729
2024-02-01T01-20-00,000000+00	5,04		5,99	6,88893970
2024-02-01T01-30-00,000000+00	5,17		5,78	7,40583981
2024-02-01T01-40-00,000000+00	5,35		6,21	7,94084498
2024-02-01T01-50-00,000000+00	5,49		5,75	8,49029923

Bild 46: Beispiel einer CSV-Datei, wie sie in der Beispiel-ADA beschrieben ist (CSV geöffnet mit einem Tabellenprogramm) (eigene Darstellung)

Zusätzlich legt der AN bestimmte Metadaten in der vorgesehenen Struktur einmalig ab. Darunter zum Beispiel eine Messstellenübersicht als PDF oder die Installationsdokumentation. Auch hier definiert die ADA, welche Dateien an welcher Stelle zur Verfügung gestellt werden sollen. Weiterhin ist in der ADA geregelt, dass auch Informationen über die Vollständigkeit der Daten regelmäßig monatsweise übergeben werden sollen. In diesem Fall handelt es sich um weitere CSV-Dateien, die die Vollständigkeit der Messungen sensor- und tageweise als Wert zwischen 0 und 1 bzw. 0 % und 100 % beinhalten. Ein Beispiel für den Aufbau einer solchen Datei ist in Bild 48 enthalten.

Teilprozess 1.4 - Fachtechnische Prüfung

Die Straßenbauverwaltung hat über das Datenmanagement jederzeit Zugriff auf alle Bauwerke und damit alle Monitoringanwendungsfälle im eigenen Verantwortungsbereich. Über die Ordnerstruktur können die Daten sowohl eingesehen als auch heruntergeladen werden. Falls entsprechende Online-Viewer für die genutzten Datenformate zur Verfügung stehen, können die einzelnen Dateien online geöffnet werden. Für

CSV-Dateien gibt es eine Reihe von im Browser lauffähigen Onlineviewern, um die Dateien zu öffnen, s. Bild 47.



Bild 47: Beispielhafter Onlineviewer zur Anzeige einer CSV-Messdatei im Browser für eine Datei aus dem Datenmanagement (eigene Darstellung)

Die Funktionalitäten für die direkte Darstellung von Monitoringdaten im Browser sind jedoch ggf. stark eingeschränkt und decken in der Regel nicht die Anforderungen ab, um umfangreiche Monitoringdatenbestände visualisieren zu können. Z. B. können große CSV-Dateien ab einer bestimmten Größe nicht mehr geöffnet werden.

Über die vom Auftragnehmer bereitgestellten Statistiken zur Vollständigkeit der Daten, kann die fachtechnische Prüfung der Straßenbauverwaltung sowohl manuell, aber auch automatisiert erfolgen. In den übermittelten Dateien zur Vollständigkeit der Messung einer Datenquelle kann ein Überblick gewonnen werden, ohne die Daten im Detail zu betrachten, s. Bild 48.

Datetime	NW_SD_AE+00.T01	NW_SD_AE+00.T02	NW_SD_AE+00.W01	NW_SD_AE+00.D01
[YYYY-MM-DD_hh-mm-ss_ffffff+zz]	[]	[]	[]	[]
2024-02-01T00-00-00,000000+00	1	0,97854641	1	1
2024-02-02T00-00-00,000000+00	1	0,91458103	1	1
2024-02-03T00-00-00,000000+00	1	1	1	1
2024-02-04T00-00-00,000000+00	1	1	1	1
2024-02-05T00-00-00,000000+00	1	1	1	1
2024-02-06T00-00-00,000000+00	1	1	1	1
2024-02-07T00-00-00,000000+00	1	0,978635014	1	1
2024-02-08T00-00-00,000000+00	1	1	1	1
2024-02-09T00-00-00,000000+00	1	1	1	1
2024-02-10T00-00-00,000000+00	1	0,926850163	1	1
2024-02-11T00-00-00,000000+00	1	0,846669219	1	1
2024-02-12T00-00-00,000000+00	1	0,750195887	1	1

Bild 48: Übersicht über die Vollständigkeit einer Datenquelle eines Monitoringanwendungsfalls bei einem Bauwerk (CSV geöffnet mit einem Tabellenprogramm) (eigene Darstellung)

In diesem Fall wurden für jede Messstelle (Spalten) jeweils die Vollständigkeit in Prozent für jeden einzelnen Tag (Zeilen) angegeben. Dies stellt eine Umsetzungsvariante dar, die in vielfältigen Varianten angepasst werden kann. Die automatisierte Aggregation der Daten zu einem Gesamtüberblick ist durch das erweiterte Konzept möglich, siehe Kapitel 6.5.3.

Sollten bestimmte Berechnungen oder Bewertungen mit dem Auftragnehmer vereinbart sein, so können diese systematisch im Ordner *04_Auswertungen* abgelegt werden. Eine Art der Auswertung stellt die Visualisierung der Monitoringdaten als Zeitreihen in Form von PDF-Dokumente oder Bildern dar. Ob es

sinnvoll ist über fest definierte Zeiträume Daten als statische Darstellungen abzuspeichern hängt stark von der Messaufgabe und den Daten ab, kann aber für einen allgemeinen Überblick dienlich sein. Für die spätere Nachnutzung der Daten sind die ggf. im Rahmen des Monitorings erstellten Bewertungsberichte dienlich und könnten ebenfalls im Datenmanagement zusätzlich hinterlegt werden. Eine umfassendere Visualisierungsmöglichkeit von Monitoringdaten wird ebenfalls mit dem erweiterten Konzept in Kapitel 6.5.3 vorgestellt.

Teilprozess 1.5 - Verlinkung und Kuration

Durch die Strukturierung der Bauwerke und Monitoringanwendungsfälle als Ordner ergeben sich vielfältige Möglichkeiten diese Elemente durch eine jeweils individuell zugewiesene permanente URL zu verlinken und zu zitieren. Es konnten sowohl tabellarische Übersichten als auch geographische Verortungen auf einer Landkarte erstellt werden, die den Zugriff auf die Bauwerke bzw. Monitoringanwendungsfälle ermöglichen. In Bild 49 ist die Verortung von drei beispielhaften Bauwerken auf einer Landkarte dargestellt.

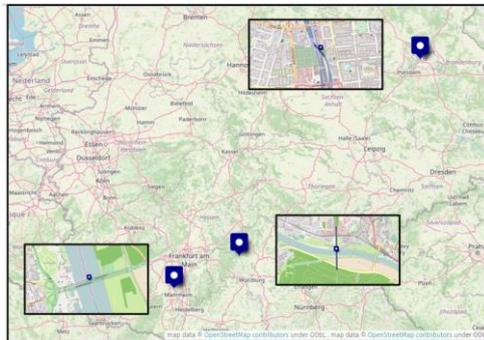


Bild 49: Auf einer geographischen Karte verortete Bauwerke mit Links zu den Monitoringdaten im Datenmanagement. (eigene Darstellung, Kartenmaterial: OpenStreetMaps)

Über die hinterlegten Links werden die Monitoringdaten einschließlich aller Dokumentationen und Metadaten im Datenmanagement direkt erreicht und können exploriert werden. Die Kartendarstellung erlaubt es auch bestimmte Bauwerkstypen zu filtern bzw. umgesetzte Monitoringanwendungsfälle räumlich zu visualisieren.

6.5.3 Erweiterung des Konzepts: Datenintegration und -analyse

Die Erweiterung zielt darauf ab, eine fortschrittlichere und effizientere Methode zur Datensammlung und -analyse zu implementieren. Sie hat einen höheren Implementierungs-, Entwicklungs- und Wartungsaufwand und stellt den Zielzustand dar. Die Mess- und Metadaten werden dabei nicht mehr, wie zuvor in einer Datensenke dateibasiert abgelegt und zur Verfügung gestellt, sondern über entsprechende Schnittstellen auf eine (Zeitreihen-)Datenbank, die diese Messdaten verwaltet. Wenn der Bauherr über ein solches System verfügt, kann die ADA in diesem Fall auch die Messdatenübertragung des Spezialdienstleisters direkt in diese Umgebung definieren. Dafür wäre die ADA im Gegensatz zur Beispiel-ADA aus Kapitel 6.5.2 möglicherweise anders aufgebaut. Eine Beispiel-ADA für die hier vorgeschlagene Erweiterung wird jedoch im Rahmen des Projekts nicht umgesetzt.

Wie in Kapitel 6.4.2 erwähnt, bieten Datenbanken die Möglichkeit, die enthaltenen Daten leicht abzurufen und somit zu bedarfsgerecht zu visualisieren. Außerdem können Systeme angebunden werden, die eine erweiterte Auswertung und Analyse der Daten ermöglichen. Nachfolgend wird dabei auf die vorteilhaften Datenvisualisierungs- und Analysemöglichkeiten eingegangen, mit denen Straßenbaubehörden einen permanenten Überblick über die Bauwerke und ihre Messdaten bekommen können.

Browserbasierte Webplattformen können an die Zeitreihendatenbanken angebunden werden und deren Daten visualisieren. Sie bieten die Möglichkeit, verschiedene Projekte anzulegen, die Nutzer zu verwalten, Zugriffsrechte zu definieren oder Alarmierungen auszulösen. Da die Einrichtung und Wartung solcher Systeme erhöhten Aufwand bedeuten, ist der Betrieb bei Straßenbauverwaltungen nicht immer möglich. Es gibt daher verschiedene Möglichkeiten, ein solches System zu nutzen:

- Eigene Einrichtung und Betrieb innerhalb der Straßenbauverwaltung für ein spezifisches Projekt oder projektübergreifend (Daten im eigenen Haus)
- Ausschreibung der Einrichtung und des Betriebs einer solchen Plattform an Dritte zur Nutzung innerhalb der Straßenbauverwaltung über alle Monitoringprojekte hinweg (Daten im eigenen Haus)
- Umsetzung und Betrieb im Rahmen eines Projekts durch den Fachplaner Monitoring oder den Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen. In diesem Fall liegen die Daten nicht direkt bei den Straßenbauverwaltungen vor, sodass diese Lösung als Zusatz zum Grundkonzept verstanden werden muss.

Bild 50 zeigt ein solches System, das für die Nibelungenbrücke eingerichtet wurde.

The screenshot shows a web interface for SHM monitoring of the Nibelungenbrücke. At the top, there is a navigation bar with 'General / Home' and a search icon. Below this is a large photo of the bridge over a river, with a 'MARX KRONAL PARTNER' logo overlaid. To the right of the photo is a sidebar menu titled 'Zugang zur Messstellenübersicht' containing links for 'Installationsdokumentation', 'Messstellenübersicht', 'Metadaten', and 'Monitoringkonzept', each with a star icon. Below the photo is a technical cross-section diagram of the bridge structure, labeled with various components like 'Landpfeiler', 'Scheitlgelenk I', 'Linker Strompfeiler', 'Scheitlgelenk II', 'Rechter Strompfeiler', 'Scheitlgelenk III', and 'Hessisches Widerlager'. Dimensions are provided for different sections: 23,22 m, 101,63 m, 114,22 m, and 104,25 m. Below the diagram is the title 'Worms, Nibelungenbrücke SHM Monitoring - Strombrücke Pilotbereich' and the ASB-Nr.: 6316-873 B im Zuge der B 47. At the bottom, there are three columns of dashboard links: 'Dashboards zu dynamischen konstanten Daten', 'Dashboards zu statistischen Daten', and 'Dashboards zur dynamischen ereignisgesteuerten Daten'. Each column contains two dashboard entries with their respective measurement rates.

Bild 50: Beispiel eines Online-Messdatensvisualisierungssystems (eigene Darstellung)

Das Bild 50 zeigt ein Dashboard, worauf dem Nutzer einige allgemeine Informationen zur Verfügung gestellt werden, wie z. B. ein Foto und eine Bauwerksübersicht. Darüber hinaus sind verschiedene weitergehende Daten verlinkt, wie der Zugang zur Installationsdokumentation oder eine Messstellenübersicht (oben rechts). An dieser Stelle wird eine Möglichkeit gezeigt, auch die Metadaten zu den Messungen niedrigschwellig zur Verfügung zu stellen. Weiter unten sind Links zu weiteren Dashboards enthalten, die die Messdaten darstellen. Bild 51 zeigt ein solches Dashboard für Temperaturmessungen an dem Bauwerk.

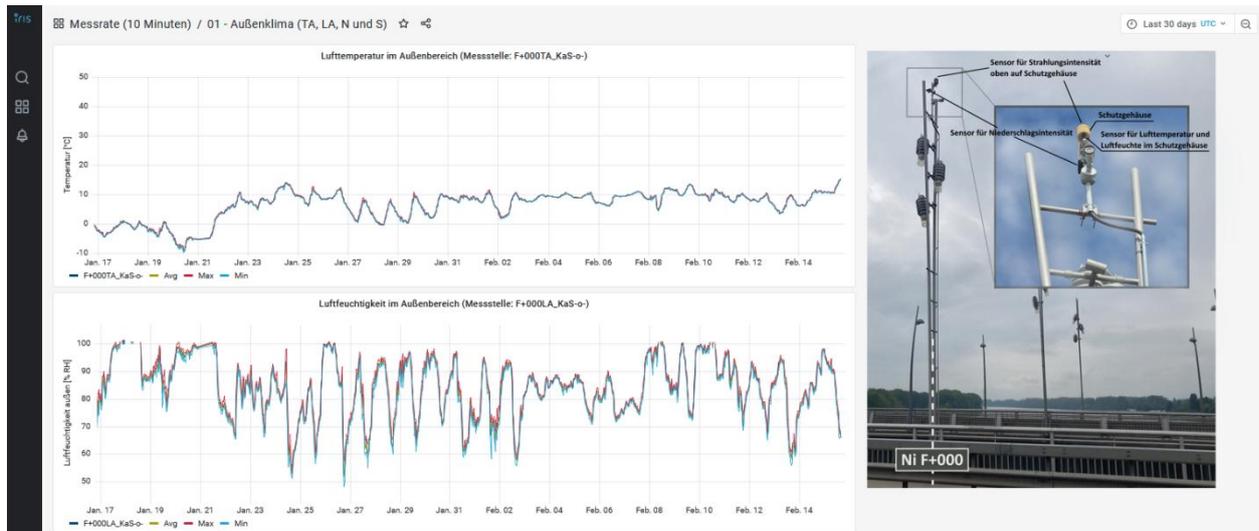


Bild 51: Visualisierung von Messdaten und zugehörigen Informationen zu den Messstellen (eigene Darstellung)

Der Nutzer kann sich die Daten verschiedener Sensoren über einen beliebigen Zeitraum anzeigen lassen. Für die Interpretation dieser Daten ist häufig Fach- und Domänenwissen erforderlich, sodass die bloße Darstellung von Zeitreihen nicht immer ausreichend ist. In diesem Fall können die Daten durch weiterführende Analysen zu Informationen verarbeitet und in aggregierter und leicht verständlicher Form dargestellt werden. Dieser Vorgang wird Data Analytics genannt und, sofern durch den Bauherren gewünscht, üblicherweise von erfahrenen Fachplanern Monitoring übernommen. Der Schritt der Data Analytics im Rahmen des Bauwerksmonitorings, insbesondere bei Brücken, umfasst die Aggregation, Analyse und Interpretation von Daten, um den Zustand und die Tragfähigkeit des Bauwerks zu bewerten und vorhersagende Einsichten für dessen Instandhaltung zu gewinnen [9]. Die analysierten und aggregierten Daten können dann wiederum in der Webplattform verfügbar gemacht und visualisiert werden. Bild 52 zeigt ein Beispiel.

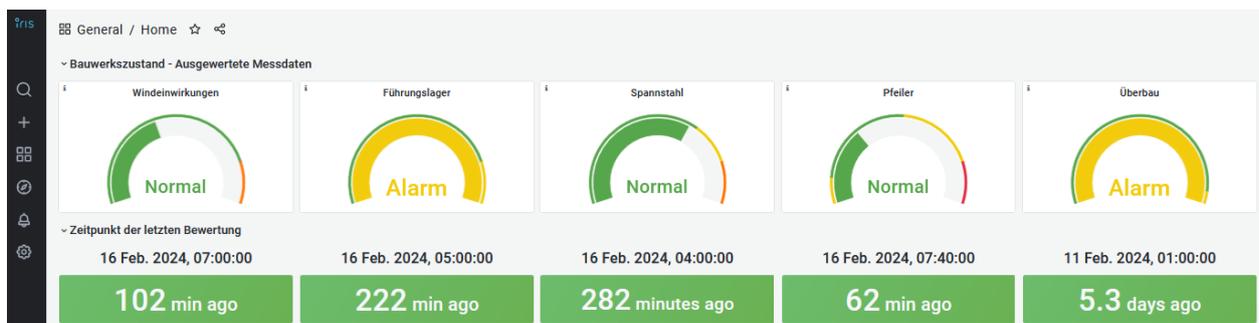


Bild 52: Visualisierung aggregierter Zustandsinformationen (eigene Darstellung)

Die Messdaten aus Bild 52 wurden so weit aggregiert, dass aus komplexen Zeitreihen einfache Zustandsindikatoren geworden sind, die durch Anklicken erklärt werden (hier nicht dargestellt). Somit ist es Bauwerksbetreibern möglich, permanent einen Überblick über die Bauwerkszustände auf Grundlage des Monitorings zu erhalten. Falls die Webplattform nicht durch den Bauherren zur Verfügung gestellt wird, müssen auch die aggregierten Daten mindestens nach Projektende einmal in definierter Form dateibasiert übergeben werden. Dafür sollte auch die ADA genutzt werden.

7 Zusammenfassung

Das Hauptziel des Forschungsprojekts bestand darin, den strategischen Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke, insbesondere Brücken, zu verbessern und zu systematisieren. Hierzu gehörte die Entwicklung eines Leitfadens, der die Planung, Durchführung, das Datenmanagement und die Wirtschaftlichkeit von Monitoringprojekten umfasst. Weiterhin wurden in einer Broschüre die Empfehlungen für das strategische Vorgehen bei der Abwicklung von Monitoringmaßnahmen zusammengefasst. Zusätzlich wurden Checklisten verfasst, die die praktische Arbeit im Umgang mit Ausschreibung, Vergabe und Vertragsgestaltung unterstützen sollen. Das Projekt zielte darauf ab, die Effizienz und Effektivität der Instandhaltung von Ingenieurbauwerken durch den Einsatz moderner Monitoringtechnologien zu steigern.

Die Herangehensweise des Projekts umfasste eine Kombination aus Literaturrecherche, Expertenbefragungen, Online-Umfragen und Workshops. Diese Ansätze dienten dazu, bestehende Praktiken und Herausforderungen im Bereich des Monitorings zu identifizieren und darauf aufbauend Empfehlungen für Ausschreibung, Vergabe und Vertragsgestaltung zu entwickeln.

Das Projekt baut dabei auf drei wesentlichen Dokumenten auf. Das DBV-Merkblatt „Brückenmonitoring“ enthält grundlegende Informationen zum Ablauf von Monitoringprojekten und seinen Akteuren. Dabei wird Monitoring als ganzheitlicher Prozess betrachtet und definiert, der die systematische Überwachung von Bauwerksreaktionen und/oder Einwirkungen einschließt. Dieser Prozess mit geregelten Schritten und definierten Akteuren basiert auf einem festgelegten Monitoringkonzept und zielt auf die Erfassung der zeitlichen Entwicklung aussagekräftiger physikalischer Größen ab. Das DBV-Merkblatt legte 2018 einen Grundstein für die Nutzung von Monitoring an Infrastrukturbauwerken und wird für eine tiefere Auseinandersetzung mit dem Thema empfohlen. Das Merkblatt B 09 „Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken“ der DGZfP diente mit seiner Hilfestellung für die Planung und technische Umsetzung von Monitoringmaßnahmen als weitere Grundlage für das Projekt. Das Merkblatt beschreibt die praktische Planung und Realisierung von Monitoringsystemen an Bauwerken und Bauteilen des Ingenieurbaus. Es beinhaltet zudem einen Überblick über technische Systeme und Sensoren, die geeignet sind, um ausgewählte Parameter über den geforderten Zeitraum zu überwachen. Außerdem beinhaltet das Merkblatt eine Sammlung zahlreicher aktuell oder kürzlich realisierter Monitoringmaßnahmen. Dabei werden je Praxisbeispiel Bauwerk, Aufgabenstellung, Monitoringsystem und Ergebnisse strukturiert vorgestellt. Als drittes wesentliches Dokument diente die derzeit in der Überarbeitung befindliche Neufassung der DIN 1076. Sie regelt die Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit mit dem Ziel der Erkennung und Beurteilung des Ist-Zustandes. Nach der Überarbeitung wird erstmalig der Einsatz von Monitoring an Ingenieurbauwerken geregelt. Monitoring kann dabei die reguläre Bauwerksprüfung ergänzen und sollte insbesondere bei außergewöhnlichen Ereignissen zum Einsatz kommen, um die Sicherheit des Bauwerks zu gewährleisten. Es wird dabei unterschieden zwischen „Monitoring zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung“ und „Monitoring aus besonderem Anlass“. Ersteres meint die kontinuierliche Überwachung des Bauwerks, um notwendige Daten zu erfassen und zu verarbeiten, sodass eine laufende Zustandsbewertung ermöglicht wird. Zweiteres beschreibt Fälle, in denen ein sofortiges Eingreifen notwendig ist, zum Beispiel nach außergewöhnlichen Naturereignissen oder bei signifikanten Veränderungen des Zustands, die eine Gefährdung darstellen könnten.

Weiterhin wurden die Potentiale und Grenzen von Monitoring erörtert, wobei die Vorteile einer kontinuierlichen Datenerfassung und -auswertung für die prädiktive Instandhaltung und Verlängerung der Lebensdauer von Bauwerken betont wurden. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die Herausforderungen hingewiesen, die mit der Implementierung solcher Systeme verbunden sind, insbesondere in Bezug auf die Kosten und den technischen Aufwand. Für einen besseren Überblick über die Praxis wurden 11 Anwendungsfälle definiert, die mit Monitoring abgedeckt werden können. Darunter die Anwendung bei Belastungsversuchen, bekannten Schäden oder bei bekannten Defiziten aus einer Nachrechnung, welche in der Praxis derzeit sicherlich die häufigsten Anwendungsfälle darstellen.

Zusätzlich erfolgte eine Zusammenstellung der gängigen Messtechnik. Diese umfasst eine Vielzahl von Sensoren und Systemen, die je nach Anwendungsfall und spezifischen Anforderungen ausgewählt werden. Dabei wird auf die Bedeutung eines sorgfältig erstellten und geprüften Monitoringkonzepts hingewiesen,

das alle relevanten Aspekte von der Zielsetzung über die technische Umsetzung bis hin zu den Anforderungen an die Messgenauigkeit berücksichtigt. Die Auswahl der Messtechnik wird von verschiedenen Kriterien beeinflusst, darunter die Art und Größe des zu überwachenden Bauwerks, die Dauer der Monitoringmaßnahme und spezifische Umweltbedingungen. Darüber hinaus wurden die technischen Komponenten eines Monitoringsystems detailliert beschrieben, von Sensoren über Datenübertragung und -verarbeitung bis hin zu den Möglichkeiten der Datenvisualisierung und -auswertung.

Durch eine Online-Umfrage und einen Workshop wurden im Rahmen des Projekts umfassende Einblicke in die Bedürfnisse und Herausforderungen der Stakeholder im Bereich des Bauwerksmonitorings gewonnen und die Mitwirkung von Vertretern der Straßenbauverwaltungen und Autobahn an dem Leitfaden wurde gewährleistet. Diese Aktivitäten trugen dazu bei, die praktischen Anforderungen an das Monitoring und die Datenverarbeitung besser zu verstehen und in den Leitfaden zu integrieren. Als wesentliches Ergebnis des Workshops wurde die geringe Akzeptanz von Monitoring und Merkblättern bei Baulastträgern durch den Mangel an offizieller Einführung und Mitwirkung der Länderverwaltungen erklärt. Als Lösung wurde die offizielle Einführung, Mitwirkung der Länder bei der Erstellung des Leitfadens und einer zugehörigen Broschüre (siehe unten), kostenlose Bereitstellung von Materialien und Öffentlichkeitsarbeit vorgeschlagen. Hervorgehoben wurde außerdem die Notwendigkeit eines eigenen Datenmanagementsystems für Infrastrukturbetreiber, um Daten langfristig zu speichern und zu nutzen. Weiterhin wurde auf die Wichtigkeit der Speicherung dieser Daten hingewiesen.

Der Monitoringprozess mit den verschiedenen Phasen von der Planung über die Durchführung bis hin zur Auswertung der Daten wird dargestellt. Besonderes Augenmerk lag auf den beteiligten Akteuren. Die Rolle verschiedener Akteure im Monitoringprozess wurde beschrieben, darunter Bauherren, Fachplaner, Spezialdienstleister und gegebenenfalls fachtechnische Prüfer. Jeder Akteur bringt spezifische Expertise ein, um die Integrität und Langlebigkeit kritischer Infrastrukturbauwerke zu gewährleisten. Dabei existiert auch die Möglichkeit einer Personalunion z.B. zwischen Fachplanern und Spezialdienstleistern sodass Schnittstellenverluste minimiert werden. Der Prozess selbst wird als mehrstufig dargestellt, beginnend mit der Definition der Fragestellung und Machbarkeitsüberprüfung, gefolgt von der Erstellung eines qualifizierten Monitoringkonzeptes, der Ausführungsplanung des Messsystems, der Installation, dem Betrieb und der Datenerhebung, der Datenverarbeitung und Auswertung, bis hin zur Bewertung der Messergebnisse. Jede Phase hat spezifische Zuständigkeiten und erfordert eine detaillierte Planung und Durchführung, um die Qualität und Genauigkeit der Daten sicherzustellen und fundierte Schlussfolgerungen über den Zustand der Brücke ziehen zu können.

Empfehlungen zur Ausschreibung, Vergabe und Vertragsgestaltung wurden entwickelt, um eine klare und effiziente Durchführung von Monitoringprojekten zu gewährleisten. Diese Empfehlungen sollen Transparenz schaffen und die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Beteiligten optimieren. Es wird erläutert, dass Monitoringleistungen nach verschiedenen Verfahren vergeben werden können, wobei die Art der Vergabe von der Komplexität und dem Umfang der Maßnahme abhängt. Aufgrund der spezialisierten Natur von Monitoring und den bisher begrenzten Erfahrungen in diesem Bereich besteht bei Baulastträgern oft Unsicherheit hinsichtlich der optimalen Ausschreibungs- und Vergabepaxis. Monitoring wird in Phasen gegliedert, um eine strukturierte Vorgehensweise zu ermöglichen. Die Ausschreibung von Monitoringkonzepten und -ausführungen erfolgt in der Regel separat, um die spezifischen Fachkompetenzen der beteiligten Akteure zu berücksichtigen und eine bessere Planbarkeit und Kalkulation zu gewährleisten. Die Vergabekriterien werden durch die Vergabeordnung und spezifische Richtlinien geregelt. Neben dem Preis spielt die Qualifikation der Anbieter eine entscheidende Rolle. Aufgrund der Neuartigkeit und Komplexität von Monitoringprojekten kann die Qualifikation sogar wichtiger als der Preis sein. Der Nachweis von Referenzprojekten dient beispielsweise als Beleg für die fachliche Eignung.

Die Verträge zwischen Bauherrn und Dienstleistern basieren auf Werkverträgen und beinhalten spezielle Vertragsbedingungen, die unter anderem Termine, Fristen und Haftpflichtversicherungen umfassen. Aufgrund der spezifischen Risiken, die mit Monitoringprojekten verbunden sind, wie der Ausfall von Komponenten oder fehlerhafte Messwerte, werden spezifische Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Messtechnik und das Risikomanagement gestellt. Die Verträge müssen klare Vereinbarungen zur Übergabe von Daten und Ergebnissen sowie zur Abrechnung enthalten.

Zusätzlich zu den Beschreibungen und Erläuterungen im Leitfaden wurden Checklisten als Anhang zur Broschüre erstellt, die Straßenbauverwaltungen als Auftraggeber von Monitoringleistungen in den Themen Ausschreibung und Vergabe sowie der Vertragsgestaltung unterstützen werden. Dies insbesondere vor dem Hintergrund derzeit noch begrenzter vorhandener Erfahrungen bzgl. Monitoring in den Verwaltungen in Verbindung mit der zum Teil signifikanten Komplexität der Aufgabenstellung.

Das Thema der Haftung ist komplex und erfordert eine juristische Betrachtung. Die Verantwortung für die Instandhaltung liegt bei den Eigentümern oder Verfügungsberechtigten, die sicherstellen müssen, dass ihre Bauwerke die öffentliche Sicherheit nicht gefährden. Die Verantwortlichkeit kann auf Dritte übertragen werden, wobei Vertragsbedingungen klare Regelungen zur Haftung und Versicherungsschutz enthalten sollten.

Es wurden Hinweise zu Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gegeben, um die Kosten und den Nutzen von Monitoring zu evaluieren. Ziel war es, ein geregeltes und möglichst einfaches Verfahren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Monitoring als Anleitung für Straßenbauverwaltungen vorzuschlagen. Es wird dargelegt, wie durch gezieltes Monitoring die Lebenszykluskosten von Bauwerken beeinflusst werden können, indem frühzeitige Instandhaltungsmaßnahmen ermöglicht werden, die teure Erhaltungsmaßnahmen oder gar den Ersatz von Bauwerken verhindern. Durch den Einsatz moderner Monitoringtechnologien können Zustandsänderungen und potenzielle Schäden früher erkannt werden, was nicht nur die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Bauwerke erhöht, sondern auch deren Nutzungsdauer verlängern kann. Diese frühzeitige Erkennung führt zu einer effizienteren Allokation von Ressourcen für Wartung und Instandhaltung, wodurch letztendlich Kosten eingespart werden können. Es wird weiterhin auf die Bedeutung der Integration von Monitoringsystemen in das Gesamtkonzept des Lebenszyklusmanagements von Bauwerken und die damit verbundene positive ökonomische Auswirkung hingewiesen.

Das Datenmanagement, insbesondere die im Rahmen des Projektes entwickelte Auftraggeber-Daten-Anforderung (ADA), spielt eine zentrale Rolle für die Effizienz und Effektivität von Monitoringprojekten. Durch die Definition klarer Datenanforderungen und die Schaffung eines strukturierten Datenmanagementsystems können die gesammelten Daten besser genutzt und integriert werden. Die aktuelle Situation in den Straßenbaubehörden und -verwaltungen ist durch einen heterogenen Umgang mit Monitoringdaten gekennzeichnet. Häufig liegen die Messdaten bei den Verwaltungen nicht vor oder es mangelt an standardisierten Prozessen für das Datenmanagement, was die Effizienz in der Nutzung und Analyse dieser Daten beeinträchtigt. Die Daten liegen gar nicht oder in unterschiedlichen Formaten vor und sind über verschiedene Systeme verteilt, was den Zugang und die Nutzung erschwert. Ziel des Projekts hinsichtlich des Datenmanagements war die Schärfung des Bewusstseins für den Wert der Daten und, dass diese unbedingt bei den Straßenbaubehörden gespeichert werden müssen. Dazu wurden Hinweise für ein einheitliches, effizientes Datenmanagementsystem, das die zentrale Speicherung, leichte Zugänglichkeit und systematische Auswertung von Monitoringdaten ermöglicht, gegeben. Die Bedeutung der Daten wird besonders hervorgehoben. Monitoringdaten sind essenziell für die Bewertung und Vorhersage des Zustands von Ingenieurbauwerken. Ihre verlässliche Speicherung bei den Straßenbaubehörden ist unerlässlich, um langfristige Trends analysieren, sofortige Maßnahmen bei Auffälligkeiten einleiten und die historische Datenintegrität für zukünftige Analysen gewährleisten zu können. Dazu wurde die ADA, ein innovatives Werkzeug, entwickelt, um die Schnittstelle zur Datenübergabe zwischen den Monitoringdienstleistern und den Straßenbaubehörden klar zu definieren. Es legt fest, welche Daten in welchem Format, in welcher Qualität und zu welchem Zeitpunkt zu liefern sind, um die Kompatibilität und Nutzbarkeit der Daten zu gewährleisten. Die Validierung des Konzepts erfolgt durch die Implementierung einer Beispiel-ADA. Dies dient dazu, die Praktikabilität und Effizienz des Werkzeugs zu überprüfen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. In einem einfachen Beispiel wird erklärt, wie die Daten durch die Straßenbauverwaltungen entgegengenommen werden können. Darauf aufbauend wurde eine Erweiterung des Konzepts als Zielvorstellung vorgeschlagen, welche die automatisierte Datenvisualisierung umfasst. Damit wurde die Interpretation der Daten erleichtert und eine intuitive Darstellung von Zustandsänderungen und Trends ermöglicht. Dies unterstützt die Entscheidungsfindung und trägt zur Effizienzsteigerung bei der Überwachung und Instandhaltung von Straßeninfrastrukturen bei. Diese Erweiterung kann als Zielzustand des Datenmanagements angesehen werden.

Die Ergebnisse des Projekts werden neben diesem Schlussbericht in gekürzter Fassung mit grundlegenden Hinweisen zur Durchführung von Monitoringprojekten als Arbeitshilfe in Form einer Broschüre mit Checklisten zu den Themen Ausschreibung und Vergabe sowie der Vertragsgestaltung zur Verfügung gestellt. Die Broschüre dient als Orientierung zur Durchführung von Monitoringprojekten und kann bei Bauherren als Grundlage genutzt werden.

Literatur

- [1] *DIN 1076:1999-11, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung.*
- [2] Deutscher Beton- und Bautechnikverein, „Merkblatt: Brückenmonitoring,“ 2018.
- [3] DGZfP, „Merkblatt B 09 - Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken,“ 2022.
- [4] F. Lehmann und F. Hille, „Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken - Das neue Merkblatt B 09 der DGZfP,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 118, Nr. 4, pp. 275-280, 2023.
- [5] G. Marzahn, K. Anwander, M. Mertens, G. Morgenthal und R. Pinnel, „Bauwerksprüfung nach DIN 1076 - Aktueller Stand der Überarbeitung der Norm,“ *Bautechnik 100*, pp. 699-706, 2023.
- [6] G. Morgenthal, S. Rau, N. Hallermann, K. Schellenberg, M. Schubert, O. Kübler und H. Martín-Sanz, „Potentiale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken - Schlussbericht,“ 2022.
- [7] I. Hindersmann, „Heft B 163 - Dauerüberwachung von Bestandsbrücken Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2021.
- [8] M. Wenner, M. Käding und S. Marx, „Messtechnische Überwachung bei Brückenbaumaßnahmen,“ *Bautechnik 95, Heft 1*, pp. 44-52, Januar 2018.
- [9] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), „Digitaler Zwilling - Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen,“ 2023.
- [10] A. Lehardt, D. Seiler, A. Gerdes, A. Bombeck und K. Lennerts, „Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur - Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2020.
- [11] A. Strauss, A. M. Ivancović, L. Mold, K. Bergmeister, J. C. Matos und J. R. Casas, „Performance-Indikatoren für die Bewertung von Strukturen aus Konstruktionsbeton auf europäischer Ebene nach COST TU1406,“ *Bautechnik 95 (Heft 2)*, pp. 123-138, 2018.
- [12] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVI, Hrsg.), „BIM4Infra Handreichung und Leitfäden - Teil 6 - Streckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle,“ 2019.
- [13] I. Hindersmann, „Anwendung von Monitoring bei Brücken der Bundesfernstraßen und zukünftige Monitoringstrategien,“ *Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur: Tagungshandbuch 2021*, 2021.
- [14] I. Hindersmann, M. Müller und F. Kaplan, „Monitoring von Ingenieurbauwerke - aktuelle und zukünftige Anwendungsfälle,“ *2. Fachkongress Digitale Transformation der Verkehrsinfrastruktur - Tagungsband 2023*, 2023.

- [15] I. Hindersmann, M. Müller und F. Kaplan, „Strategischer Einsatz von Monitoring bei Ingenieurbauwerken mit Anwendungsbeispielen,“ *12. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (SEUB)*, 2023.
- [16] S. Nieborowski, S. Windmann, J. Bednorz, I. Hindersmann und T. Zinke, „Digitaler Zwilling Brücke im Betrieb,“ *Bautechnik*, Bd. 100, Nr. 2, pp. S. 86-93, 2023.
- [17] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.), „Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion),“ Ausgabe 2011.
- [18] M. Käding, S. Marx und G. Schacht, „Schallemissionsmonitoring zur Spanndrahtbruchdetektion,“ in *Beton-Kalender 2023: Wasserundurchlässiger Beton, Brückenbau*, Wilhelm Ernst & Sohn, 2023, pp. 745-777.
- [19] M. Käding, G. Schacht, G. Bolle und S. Marx, „Überwachung von Brücken mit Gefährdung durch Spannungsrissskorrosion,“ *10. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (SEUB)*, pp. 97-108, 11 März 2019.
- [20] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)*, Ausgabe 2017.
- [21] C. Ullerich, M. Grabe, M. Wenner und M. Herbrand, „smartBridge Hamburg - prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings,“ *Bautechnik* 97, Heft 2, pp. 118-125, Februar 2020.
- [22] C. Kang, C. Voigt, C. Eisermann, N. Kerkeni, J. Hegger, W. Hermann, A. Jackmuth, G. Marzahn und S. Marx, „Die Nibelungenbrücke als Pilotprojekt der digital unterstützten Bauwerkserhaltung,“ *Bautechnik*, Volume 101, Heft 2, pp. 76-86, Februar 2024.
- [23] R. de Vries, E. O. L. Lantsoght, R. D. J. M. Steenbergen and M. Naaktgeboren, "Proof Load Testing Method by the American Association of State Highway and Transportation Officials and Suggestions for Improvement," *Transportation Research Record*, vol. 2677, no. 11, pp. 245-257, 2023.
- [24] B. u. S. (. B. f. S. Bundesministerium für Verkehr, „Bauwerksherlatung - Bauwerksprüfung, Erhaltungsplanung, Ausführung“, 2015. [Online]. Available: https://www.bast.de/DE/Publikationen/Medien/Dokumente/B-Flyer-bauwerkserhaltung.pdf?__blob=publicationFile. [Zugriff am 29 11 2023].
- [25] M. Schnellenbach-Held, M. Peeters und G. Miedzinski, „Heft B 110 - Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2015.
- [26] M. Wenner, M. Meyer-Westphal, M. Herbrand und C. Ulerich, „The Concept of the Digital Twin to Revolutionise the Infrastructure Maintenance: the Pilot Projekt smartBRIDGE Hamburg,“ *27th ITS World Congress*, 11-15 Oktober 2021.
- [27] A. Lazoglu, F. Wedel, J. Müller und S. Marx, „Der Digitale Zwilling zur Überwachung der Filstalbrücken,“ *Der Eisenbahningenieur*, p. ERGÄNZEN NACH ERSCHEINUNG, Februar 2024.
- [28] S. Marx, M. Wenner, M. Käding und F. Wedel, „Vom Rechnen und Wissen - Monitoring an den Talbrücken der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle,“ in *Tagungsband des 28. Dresdner Brückenbausymposiums. Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken.*, M. Curbach, Hrsg., Dresden, Technische Universität Dresden, 2018, pp. 41-56.
- [29] „DIN 1319:1995-01, Grundlagen der Messtechnik, Teil 1: Grundbegriffe“.

- [30] H. Wenzel, *Health Monitoring of Bridges*, John Wiley & Sons, 2009.
- [31] K. Zilch, H. Weiher und C. Gläser, „Monitoring im Betonbau,“ in *Betonkalender 2009 Teil 2*, 183, Ernst und Sohn, 2009, p. 136.
- [32] Y. Lu, H. Ma und Z. Li, „Civil Infrastructures Connected Internet of Things,“ *Current Advances in Civil Engineering*, Bd. 1, Nr. 2, pp. 16-19, 2014.
- [33] A. Fraundorfer und C. Dauberschmidt, „Korrosionsmonitoring in ungerissenem Stahlbeton in der Schädigungsphase – neue Forschungserkenntnisse,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 12, Nr. 117, pp. 956-967, 2022.
- [34] DGZfP, „Merkblatt B 12 - Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken“.
- [35] DGZfP, „Richtlinie SE 05 Detektion von Spanndrahtbrüchen mit Schallemissionsanalyse (Veröffentlichung in Vorbereitung),“ 2024 .
- [36] M. Nowak, O. Fischer und A. Müller, „Realitätsnahe Verkehrslastansätze für die Nachrechnung der Gänstorbrücke über die Donau,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 2, Nr. 115, pp. 91-105, 2020.
- [37] B. Novák, F. Stein, A. Farouk, L. Thomas, J. Reinhard, G. Koster und T. Zeller, „Monitoring für Brückenbauwerke - Erfahrungssammlung Dokumentation 2021,“ 2021.
- [38] M. Nowak, O. Fischer, T. Tepho und U. Willberg, „Verkehrsmonitoring an einer Autobahnbrücke – Datenerfassung zur lokalen Verkehrscharakteristik als Grundlage für objektspezifische Verkehrslastmodelle,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 9, Nr. 118, pp. 636-648, 2023.
- [39] P. Haardt, S. Dabringhaus, W. D. Friebel, R. Bayerstorfer, T. Bäumlner und U. Freundt, „Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn,“ *Bautechnik*, Bd. 7, Nr. 94, pp. 438-444, 2017.
- [40] Bundesministerium für Justiz (BMJ), „Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge (Vergabeverordnung - VgV),“ 2016.
- [41] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE), „Verfahrensordnung für die Vergabe öffentlicher Liefer- und Dienstleistungsaufträge unterhalb der EU-Schwellenwerte (Unterschwellenvergabeordnung – UVgO) – Ausgabe 2017 –,“ 2017.
- [42] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), „Handbuch für die Vergabe und Ausführung von freiberuflichen Leistungen im Straßen- und Brückenbau - HVA F-StB - Teile 1 bis 3,“ 2022.
- [43] U. Willberg und M. Zimmermann, „Erfahrungsbericht Open-House für Bauwerksprüfungen,“ in *1. Fachwerktagung Bauwerksprüfung nach DIN 1076, Tagungsband*, Würzburg, 2023.
- [44] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), „Allgemeine Vertragsbedingungen für freiberufliche Leistungen im Straßen- und Brückenbau - AVB F-StB - Ausgabe 2022,“ 2022.
- [45] „MBO - Musterbauordnung Fassung November 2022 - zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 22./23.09.2022,“ 2022.
- [46] Bauministerkonferenz, „Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten,“ 2006.
- [47] M. Halstenberg und J. Naumann, „Bauwerksprüfung nach DIN 1076 — Verantwortung, Haftung und Vergütung,“ 2021.
- [48] Bundesministerium für Justiz (BMJ), „Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung - ABBV),“ 2010.

- [49] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), „Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ),“ Ausgabe 2007.
- [50] M. Schubert, M. H. Faber, W. Betz, D. Straub, E. Niemeier, D. Ziegler, C. Walther und M. Majka, „Heft B 156 - Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2020.
- [51] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, „Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei der Vorbereitung, Planung und Durchführung von Baumaßnahmen,“ Berlin, Ausgabe 2007.
- [52] A. Dahl, A. Kindl, C. P.-M. D. Walther, A. W. V. Roos, F. Weinstock, W. Röhling und M. H.-U., „Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030,“ Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVD), 2016.
- [53] D. Straub, E. Chatzi, E. Bismut, W. Courage, M. Döhler, M. H. Faber, J. Köhler, G. Lombaert, P. Omenzetter, M. Pozzi, S. Thöns, D. Val, H. Wenzel and D. Zonta, "Value of information: A roadmap to quantifying the benefit of structural health monitoring," *12th International Conference on Structural Safety & Reliability (ICOSSAR 2017)*, 2017.
- [54] H. Raiffa und R. Schlaifer, *Applied statistical decision theory*, Division of Research, Havard Business School, Havard University, 1961.
- [55] A. Kamariotis, E. Chatzi and D. Straub, "A framework for quantifying the value of vibration-based structural health monitoring," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 184, p. 109708, 2023.
- [56] J. Luque und D. Straub, „Risk-based optimal inspection strategies for structural systems using dynamic Bayesian networks,“ *Structural Safety*, Bd. 76, pp. 68-80, 2019.
- [57] E. Bismut und D. Straub, „Optional adaptive inspection and maintenance planning for deteriorating structural systems,“ *Reliability Engineering & System Safety*, Bd. 215, p. 107891, 2021.
- [58] M. Pozzi und A. Kiurghian, „Assessing the value of information for long-term structural health monitoring,“ in *SPIE Conference on Health Monitoring of Structural and Biological Systems*, San Diego, California, USA, 2011.
- [59] S. Thöns, „On the value of monitoring information for the structural integrity and risk management,“ *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Bd. 33, Nr. 1, pp. 79-94, 2018.
- [60] D. Straub, „Value of information analysis with structural reliability methods,“ *Structural Safety*, Bd. 49, pp. 75-85, 2014.
- [61] D. Zonta, B. Glisic und S. Adriaenssens, „Value of Information: impact of monitoring on decision making,“ *Structural Control and Health Monitoring*, Bd. 21, Nr. 1, p. 1043–1056, 2014.
- [62] L. Eichner, R. Schneider und M. Baeßler, „Optimal vibration sensor placement for jacket support structures of offshore wind turbines based on value of information analysis,“ *Ocean Engineering*, Bd. 288, p. 115407, 2023.
- [63] R. Herrmann, J. Rabe, G. Bolle und S. Marx, „Konzepte für Datenqualität und Datenablage bei Entwurf und Umsetzung von Monitoringsystemen,“ *Bauingenieur*, Bd. 92, Nr. 12, pp. 537-545, 2017.
- [64] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, „Technische Richtlinie TR-03170,“ Eigenverlag, Bonn, 2023.
- [65] Creative Commons, „About CC Licenses,“ 2019. [Online]. Available: <https://creativecommons.org/share-your-work/cclicenses/>. [Zugriff am 05 Februar 2024].

- [66] Botts Innovative Research, „SensorML,“ 2013. [Online]. Available: <http://sensorml.com/ontologies.html>. [Zugriff am 02 Februar 2024].
- [67] FAIRsharing.org, „QUDT; Quantities, Units, Dimensions and Types,“ 6 Mai 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.25504/FAIRsharing.d3pqw7>. [Zugriff am 2 Februar 2024].
- [68] W3C, „Semantic Sensor Network Ontology,“ 08 Dezember 2017. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/2017/REC-vocab-ssn-20171019/>. [Zugriff am 02 Februar 2024].
- [69] M. Wilms und K. Herklotz, „Real-Time Data Quality Control (DQC) - In Situ Surface Waves,“ Eigenverlag Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie, Hamburg, 2022.
- [70] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), „HV-Kompendium Band G, Kapitel 7: Prinzipien der Verfügbarkeit,“ Eigenverlag, Bonn, 2013.
- [71] BMVBS, „Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken RI-ERH-ING Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse OSA,“ 2007.
- [72] C. Siegert, A. Holst, M. Empelmann und H. Budelmann, „BASt Heft 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2015.
- [73] J. Wimmer, T. Braml und R. Martinez, „Digitale Zwillinge für Brücken mittlerer Stützweite – Pilotprojekt Brücke Schwindegg – Teil 1: Sensorik,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 118, Nr. 12, pp. 889-896, 12 2023.
- [74] M. Vill, M. Vospernig, M. Reiterer, A. Hüngsberg und H. Kari, „Langzeitmessungen an einer vorgespannten integralen Rahmenbrücke mit bewehrten Betongelenken - Vergleich Messergebnisse mit numerischen Simulationen - eine Gegenüberstellung nach 8 Jahren Messdauer,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 117, Nr. 10, pp. 772-785, 22.
- [75] W. R. Habel und F. K. Brunner, „Faseroptische Sensoren für den Einsatz im Monitoring: ein Überblick,“ *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, Nr. 6, pp. 204-211, 2011.
- [76] M. Krüger und C. Große, „Einsatz von Sensorik an Brückenbauwerken,“ Stuttgart, 2010.
- [77] K. Worden, C. R. Farrar, G. Manson und G. Park, „The fundamental axioms of structural health monitoring,“ *Proceedings of the royal society A*, pp. 1639-1664, 03 April 2007.
- [78] H. Wenzel und D. Pichler, Ambient Vibration Monitoring, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [79] M. Schnellenbach-Held, M. Peeters, A. Brylka, S. Fickler und I. Schmidt, „Heft B 116 - Überwachungskonzepte im Rahmen des tragfähigkeitsrelevanten Verstärkungen von Brückenbauwerken aus Beton,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2015.
- [80] U. Freundt, R. Vogt, S. Böning, D. Michael, C. Könke und H. Beinersdorf, „Heft B 106 - Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustandes von Brückenbauwerken,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2014.
- [81] M. Seitner, R. Probst, A. Borrmann und S. Vilgertshofer, „Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau - BASt Heft B 182,“ 2022.

Bilder

- Bild 1: Anwendungsfälle Monitoring (eigene Darstellung)
- Bild 2: Gänsebachtalbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 3: Wegaufnehmer zur Erfassung der Rissbreite (Foto: MKP GmbH)
- Bild 4: Oelzetalbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 5: Induktiver Wegaufnehmer mit Extensometerstab zur Erfassung der Betonoberflächendehnung (Foto: MKP GmbH)
- Bild 6: Stennertbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 7: Schallemissionssensor (Foto: MKP GmbH)
- Bild 8: Brücke in Waren/Müritz (Foto: MKP GmbH)
- Bild 9: Köhlbrandbrücke Strombrückenteil (Foto: MKP GmbH)
- Bild 10: Itztalbrücke und Installationsplan der DFOS an den Pfeilern unter Einhaltung der Biegeradien (eigene Darstellung)
- Bild 11: EÜ Itztal (Foto: MKP GmbH)
- Bild 12: Strombrücke der Köhlbrandbrücke mit Schallemissionssensoren an der rechten Seilharfe (Foto: MKP GmbH)
- Bild 13: Nibelungenbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 14: Blick ins Innere des Stahl-Hohlkastens mit Querrahmen vor Sanierung (Foto: MKP GmbH)
- Bild 15: Belastungsfahrzeuge auf der Fuldabrücke mit temporärer Messstation (Foto: MKP GmbH)
- Bild 16: Messung der Durchbiegung des Überbaus mittels Wegaufnehmer (Foto: MKP GmbH)
- Bild 17: Betonpumpen als Belastungsfahrzeuge auf der Köhlbrandbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 18: Die Filstalbrücken im Bau (Foto: MKP GmbH)
- Bild 19: Federlamelle zur Längsfesthaltung (Foto: MKP GmbH)
- Bild 20: EÜ Oder im Bau (Foto: MKP GmbH)
- Bild 21: Scherkondetalbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 22: Gänsebachtalbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 23: Unstruttalbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 24: Stöbnitztalbrücke (Foto: MKP GmbH)
- Bild 25: Schleibrücke Lindaunis (Foto: MKP GmbH)
- Bild 26: Zuständigkeitsbereich bzw. Herkunft des Teilnehmers/Infrastrukturbetreibers bei der Online-Umfrage (eigene Darstellung)
- Bild 27: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Auf welche Prozessschritte bezogen sich eventuelle Probleme? (eigene Darstellung)
- Bild 28: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Nutzung bestehender Merkblätter (eigene Darstellung)
- Bild 29: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Nutzung bestehender Merkblätter (eigene Darstellung)
- Bild 30: Ergebnisse der Online-Umfrage bei dem Thema: Wichtigkeit der Inhalte der Broschüre (eigene Darstellung)
- Bild 31: Der Monitoringprozess inkl. der üblichen Zuständigkeiten in Anlehnung an [2] (eigene Darstellung)
- Bild 32: Beispiel für die Detailtiefe eines Monitoringkonzepts hinsichtlich Sensorpositionen (eigene Darstellung)
- Bild 33: Beispiel für die Detailtiefe einer Ausführungsplanung hinsichtlich Sensorlage und -montage und Redundanzmessungen (eigene Darstellung)
- Bild 34: Ergebnisse der Online-Umfrage zur Umsetzung des Datenmanagements von Monitoringergebnissen: aktuell angewendete Verfahren / Systeme zur Übergabe von Monitoringberichten und -daten (Mehrfachantworten) (links) und Abstimmungsprozess zur Datenübergabe zwischen den Straßenbauverwaltungen und den Monitoringdienstleistern (Mehrfachantworten) (rechts) (eigene Darstellung)

- Bild 35: Ergebnisse der Online-Umfrage zur Zuständigkeit für die Datenspeicherung (Mehrfachantworten) (links) und zu den Bedarfsträgern der Monitoringdaten (Mehrfachantworten) (rechts) (eigene Darstellung)
- Bild 36: Visualisierung von User Stories auf einer User Story Map (eigene Darstellung)
- Bild 37: Möglichkeit einer Struktur für ein verteiltes Datenmanagement als föderiertes Informationssystem (eigene Darstellung)
- Bild 38: Position und Aufgabe der Straßenbauverwaltung in Bezug auf das Datenmanagement von Monitoringdaten (eigene Darstellung)
- Bild 39: Datenworkflow für Monitoringdaten mit abgeleiteten Geschäftsprozessen für das Datenmanagement der Straßenbauverwaltungen (eigene Darstellung)
- Bild 40: Teilprozesse des Geschäftsprozess 1 „Strukturierte Entgegennahme von Daten aus Monitoringprojekten“ (eigene Darstellung)
- Bild 41: Teilprozesse des Geschäftsprozess 2 (eigene Darstellung)
- Bild 42: Beispielhafte Übersicht über den Bauwerksbestand mit Monitoring einer Straßenbauverwaltung (eigene Darstellung)
- Bild 43: Beispielhafte Übersicht über den Bauwerksbestand mit Monitoring einer Straßenbauverwaltung (eigene Darstellung)
- Bild 44: Beispielhafte Übersicht über die Monitoringanwendungsfälle, die an einem Bauwerk umgesetzt sind (eigene Darstellung)
- Bild 45: Beispielhafte Übersicht über die Ordnerstruktur des umgesetzten Monitoring-AwFs (eigene Darstellung)
- Bild 46: Beispiel einer CSV-Datei, wie sie in der Beispiel-ADA beschrieben ist (CSV geöffnet mit einem Tabellenprogramm) (eigene Darstellung)
- Bild 47: Beispielhafter Onlineviewer zur Anzeige einer CSV-Messdatei im Browser für eine Datei aus dem Datenmanagement (eigene Darstellung)
- Bild 48: Übersicht über die Vollständigkeit einer Datenquelle eines Monitoringanwendungsfalls bei einem Bauwerk (CSV geöffnet mit einem Tabellenprogramm) (eigene Darstellung)
- Bild 49: Auf einer geographischen Karte verortete Bauwerke mit Links zu den Monitoringdaten im Datenmanagement. (eigene Darstellung, Kartenmaterial: OpenStreetMaps)
- Bild 50: Beispiel eines Online-Messdatensvisualisierungssystems (eigene Darstellung)
- Bild 51: Visualisierung von Messdaten und zugehörigen Informationen zu den Messstellen (eigene Darstellung)
- Bild 52: Visualisierung aggregierter Zustandsinformationen (eigene Darstellung)

Anhänge

Anhang A: Glossar | Abkürzungen

In diesem Bericht gelten die folgenden Begriffe.

Glossar

Abtastfrequenz	Häufigkeit, mit der Messdaten zeitlich äquidistant erfasst werden, also, wie oft ein analoges Signal in einem bestimmten Zeitraum abgetastet wird, um es in ein digitales Signal umzuwandeln.
Aggregierte Daten	Aggregierte Daten sind Zeitreihen, die durch Zusammenfassung von hochaufgelösten Zeitreihen über definierte Zeiträume anhand von charakteristischen Wertermittlungen (z. B. Summe, Mittelwert, Einzelwert des Zeitraums) zu einer Zeitreihe wesentlich geringeren Datenumfangs führen.
Auftraggeber-Daten-Anforderungen (ADA)	Abgestimmtes Dokument zwischen AG und AN, das die organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen und Vereinbarungen für die Umsetzung der Übergabe der Monitoringdaten, zusätzlicher Auswertungsdaten und aller relevanten Metadaten an das Datenmanagement beschreibt und für die spätere Nutzung dokumentiert.
Baulastträger (BLT)	Juristische Person, die im Rahmen des öffentlichen Baurechts öffentliche Lasten auf einem Grundstück übernimmt und dafür verantwortlich ist, diese zu tragen und zu erfüllen. Auch: Infrastrukturbetreiber (insbesondere für Brücken), Bauherr.
Bauwerksprüfung	Eine nach DIN 1076 sachkundige und regelmäßige Prüfung eines Ingenieurbauwerks zur Erfassung des aktuellen Zustands unter den Kriterien der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. [1]
Condition Indicator (CI)	Kenngrößen im Rahmen des prädiktiven Lebenszyklusmanagements, die für das Systemverhalten eine hohe Aussagekraft haben. Siehe auch Kapitel 2.3.3.
Datenerfassungssystem	Siehe Kapitel 2.5.2.
Datenmanagementsystem	Siehe Kapitel 2.5.2.
Dauermonitoring	permanente Überwachung über die gesamte (Rest-) Nutzungsdauer des Bauwerks ohne geplantes Ende, z. B. Windmessung auf Großbrücken
Dynamische Daten	Siehe Messdaten
Echtzeit	Der Begriff Echtzeit (englisch: real-time) charakterisiert den Betrieb eines Systems, das bestimmte Ergebnisse zuverlässig (garantiert) innerhalb einer vorbestimmten Zeitspanne, zum Beispiel in einem festen Zeitraster, liefert.
Empfindlichkeit	Die Empfindlichkeit beschreibt den Ausschlag des Ausgabewerts eines Messaufnehmers in Bezug zum Wert einer normierten physikalischen Messgrößenverkörperung

	oder eines Normals. Sie wird durch den Sensor und das Messsystem bestimmt.
Erfassen	zeitlich diskrete Aufnahme von Daten
Key Performance Indikator (KPI)	Siehe Condition Indicator
Kurzzeitmonitoring	Datenerfassung über mehrere Minuten bis Tage, z. B. während Probelastungen oder kritischer Zustände in Bauphasen
Langzeitmonitoring	Datenerfassung über mehrere Wochen, Monate oder Jahre, z. B. für die Ermittlung von Kriechverformungen oder zur Schadensüberwachung, Last- bzw. Beanspruchungsermittlung für Restnutzungsdaueranalysen
Messaufnehmer	Siehe Kapitel 2.6.2
Messbereich	Der Messbereich beschreibt den gültigen physikalischen Wertebereich der Messgröße, bei dem das System innerhalb festgelegter Messabweichungen arbeitet [29].
Messdaten	Messdaten sind Daten, die im Prozess des Messens gewonnen werden. Es wird unterschieden zwischen statischen (Langzeit-) Messdaten, die die langzeitlichen Entwicklungen der gemessenen Größen abbilden und bspw. in Intervallen von 10 Minuten gespeichert werden. Dynamische (hochfrequente) Messdaten werden mit erhöhten Frequenzen gespeichert, um besondere Ereignisse zu erfassen. Der Start der Erfassung wird dabei i. d. R. durch ein Ereignis (Trigger) ausgelöst. Siehe auch Kapitel 6.4.1.
Messen	Messen ist das Beobachten einer physikalischen Größe ggf. zum quantitativen Vergleich mit einer Einheit.
Messgenauigkeit	Die Messgenauigkeit der zu wählenden Messtechnik setzt sich aus Richtigkeit und Präzision zusammen [3] und erfordert eine gesonderte Aufmerksamkeit. Angaben zur Messgenauigkeit von Sensoren werden im Allgemeinen vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Durch Kalibrierung kann die Richtigkeit von Sensoren eingestellt werden. Die Präzision ist eine zufällige Messabweichung und abhängig von Randeinflüssen wie bspw. Temperatur, Luftfeuchte oder elektromagnetische Störungen sowie ggf. von weiteren physikalischen Effekten.
Messkonzept	(auch Monitoringkonzept) siehe Kapitel 3.2.3
Messrechner	Siehe Kapitel 2.5.2.
Messwertauflösung	Als Messwertauflösung wird die kleinste unterscheidbare Darstellungsweise des gemessenen Wertes bezeichnet [29].
Monitoring	Siehe Kapitel 3.2.1
Monitoringkonzept	(auch Messkonzept) siehe Kapitel 3.2.3
Monitoringmaßnahme	Als Monitoringmaßnahme wird eine konkrete Anwendung von Monitoring zur Erlangung einer vorab definierten Zielstellung bezeichnet. Innerhalb einer Monitoringanwendung können mehrere Monitoringmaßnahmen stattfinden, bspw. das lokale Überwachen von Rissbreiten und die globale Überwachung des Schwingverhaltens einer Brücke.

Objektbezogene (OSA)	Schadensanalyse	Verfahren zur Erfassung, Auswertung und Bewertung von Schäden, die zusätzliche Untersuchungen erfordern, sowie für Empfehlungen von Maßnahmen einschließlich Kostenschätzungen [71].
Performance Indikator		Am Bauwerk beobachtbare Größen, die Informationen enthalten und mit deren Hilfe KPI abgeschätzt oder berechnet werden können. Siehe auch Kapitel 2.3.3.
Prädiktives Lebenszyklusmanagement		Siehe Kapitel 2.4.2
Sensor		Siehe Kapitel 2.6.2
Speicherfrequenz		Die Speicherfrequenz bestimmt, wie oft die digitalisierten Daten im Speicher aktualisiert werden.
Statische Daten		Siehe Kapitel 6.4.1
Statistische Daten		Statistische Daten sind aus der Zeitreihen durch statistische Verfahren (Mittelwert, Varianz, Quantilwerte, Extremalwerte) ermittelte Kenngrößen über definierte Zeitabschnitte und können aggregierte Daten sein.
Temperatureinsatzbereich		Temperaturbereich, in dem ein spezifischer Sensor eingesetzt werden kann.
Überwachen		zielgerichteter Vergleich der erfassten Daten nach einer ggf. erforderlichen Umrechnung der Messwerte mit Erwartungs- oder Grenzwerten

Abkürzungen

AG	Auftraggeber (für Monitoringleistungen); auch: Bauherr oder Baulastträger (BLT)
API	Application Programming Interface
AUS	Unmanned Aircraft System (Flugdrohne)
AVB StB	Allgemeine Vertragsbedingungen für freiberufliche Leistungen im Straßen- und Brückenbau
AwF	Anwendungsfall
B-WIM	Bridge Weigh-in-Motion-Systeme
BLT	Baulastträger
CI	Condition Indicator (Zustandsindikator)
DBV	Deutscher Beton- und Bautechnik Verein
DFOS	Distributed Fiber Optical Sensing
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
DMS	Dehnungsmessstreifen
FBG	Fiber-Bragg-Grating (Faser-Bragg-Gitter), diskreter Interferenzfilter in einer Glasfaser als faseroptischer Punktsensor, einzeln oder mehrfach in diskreten FOS eingearbeitet.
FOS	Fiber Optical Sensing (Faseroptische Sensorik)
FPM	Fachplaner Monitoring

FP	Fachtechnischer Prüfer
GNSS	Global Navigation Satellite Systems, satellitengestützte Navigationssysteme wie GPS (USA) oder Galileo (Europa)
HVA StB	Handbuchs für die Vergabe und Ausführung von freiberuflichen Leistungen im Straßen- und Brückenbau
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indikator
LGFBG	Long Gauge FBG, Glasfasersensor mit mehreren FBG-Punktsensoren
LZM	Lebenszyklusmanagement
OSA	Objektbezogene Schadensanalyse
PI	Performance Indikator
PG	Performance Goal (festgelegtes Leistungsziel)
PT	Performance Threshold (Grenzwert)
SHM	Structural Health Monitoring
SDB	Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen
UVgO	Unterswellenvergabeordnung
SDB	Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen
SpRK	Spannungsrissskorrosion
VgV	Vergabeverordnung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Anhang B: Sensortechnik

Anhang B1: Weg- bzw. Distanzsensoren

B1.1: Induktive Wegsensoren (LVDTs)

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Überwachung von Relativbewegung zwischen zwei Bauteilen mit geringem Abstand zwischen den Messpunkten,
- Riss- und Koppelfugenbreiten,
- Lagerbewegungen,
- Dehnungen (integriert) in umgerissenen Bauteilen.

Messprinzip:

Die durch die Verschiebung hervorgerufene Bewegung eines gekoppelten ferromagnetischen Kerns in festen mit Wechselfeldspannung versorgten Spulen verändert deren Induktivität. Die sich daraus ergebene Impedanzänderung wird je nach Bauart in ein elektrisches Spannungs- oder Stromsignal umgewandelt. LVDTs messen zumeist mit einem beweglichen Taster, der per Federkraft auf das Messobjekt drückt.

Bemerkungen:

Sehr gebräuchlich, insbesondere für Riss- und Koppelfugenmonitoring sowie Überwachung von Überbauverschiebungen und -verdrehungen an Lagern

Vorteile: robust, nicht windanfällig, für dynamische Messungen geeignet,

Nachteile: benötigt Stromversorgung?

Quellen: [3], [37]

B1.2: Seilzugsensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Überwachung von Relativbewegungen zwischen zwei Bauteilen mit mittlerem Abstand zwischen den Messpunkten,
- Durchbiegung von Bauteilen bei mäßigem Abstand des Bauteils zur Messbasis,
- Lagerbewegungen.

Messprinzip:

Ein flexibles Stahlseil ist auf eine Trommel gewickelt und über eine Feder vorgespannt. Die durch die Verschiebung hervorgerufene Bewegung des Seils dreht sich die Messeinheit eines Potentiometers. Die Widerstandsänderung wird in eine elektrische Spannung umgewandelt.

Bemerkungen:

Sehr gebräuchlich, insbesondere für größere Entfernungen der Messpunkte. Die Seile können verlängert werden, dabei sind Störeinflüsse aus Wind und Temperatur zu berücksichtigen.

Vorteile: robust, größere Abstände zwischen den Messpunkten sind realisierbar

Nachteile: Störeinflüsse durch Temperatur und Wind proportional zur Länge des freien Seils

Quellen: [3], [37]

B1.3 Linearpotentiometer

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

<ul style="list-style-type: none"> • Überwachung von Relativbewegungen zwischen zwei Bauteilen mit mittlerem Abstand zwischen den Messpunkten, • Lagerbewegungen, • Dehnungen (integriert) in umgerissenen Bauteilen.
<p>Messprinzip: Die durch die Verschiebung hervorgerufene Bewegung eines gekoppelten Gleitkontakts über die Widerstandsbahn eines Potentiometers. Die Widerstandsänderung wird in eine elektrische Spannung umgewandelt.</p>
<p>Bemerkungen: weniger gebräuchlich</p>
<p>Quellen: [3]</p>

B1.4 Laserdistanzsensoren

<p>Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Überwachung von Relativbewegungen zwischen zwei Bauteilen mit großem Abstand zwischen den Messpunkten, • Durchbiegung von Bauteilen, • Lagerbewegungen, • Setzungen und vergleichbare Größen in der Bauphase und danach.
<p>Messprinzip: Der Laser sendet einen kurzen Laserimpuls in Richtung des zu messenden Objekts aus und wird von ihm reflektiert. Der Sensor erfasst den reflektierten Lichtstrahl. Die dafür benötigte Zeit wird erfasst und geht in die Berechnung der Entfernung ein.</p>
<p>Bemerkungen: Sehr gebräuchlich für die Überwachung von Durchbiegungen bzw. Bauteilbewegungen, auch bei großem Abstand der Messpunkte. <u>Vorteile:</u> berührungslos, sehr große Abstände zwischen den Messpunkten sind realisierbar, temperatur- und windunabhängig <u>Nachteile:</u> Störeinflüsse durch Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Nebel,</p>
<p>Quellen: [3], [37]</p>

B1.5 Wegaufnehmer auf DMS-Basis / Elastomersensoren

<p>Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Überwachung von Relativbewegung zwischen zwei Bauteilen mit geringem Abstand zwischen den Messpunkten, • Riss- und Koppelfugenbreiten,
<p>Messprinzip: Der Sensor besteht aus einem Träger, der beidseitig an den beiden Punkten befestigt wird, zwischen denen die Bewegung gemessen werden soll. Gemessen wird die Dehnung des sich elastisch verformenden Trägers (z.B. Metall, Elastomer) mittels applizierten Dehnungsmessstreifen aufgenommen und über die Länge des Trägers integriert.</p>
<p>Bemerkungen: Sehr gebräuchlich, insbesondere für Riss- und Koppelfugenmonitoring. Typisches Trägermaterial kommerzieller Sensoren dieser Art ist sind Elastomere (Elastomersensoren), prinzipiell können aber alle Materialien mit linear-elastischen Verhalten im Arbeitsbereich des Sensors</p>

genutzt werden. Unter Umständen ist eine Kalibrierung erforderlich, um die Beziehung zwischen der Verformung des elastischen Trägers und der Weggröße zu bestimmen.

Quellen: [3]

Anhang B2: Dehnungssensoren

B2.1 Dehnungsmessstreifen

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Messung bzw. Überwachung von Veränderungen von Beanspruchungs- und Verformungszuständen an der Oberfläche eines Bauteils,
- Nutzung zur indirekten Messung von Wegen als über die Länge des Trägerbauteils integrierte Dehnung.

Messprinzip:

Ein Dehnungsmessstreifen (DMS) ist ein dünnes, zumeist mäandrisch angeordnetes Metallband, das an der Oberfläche des zu messenden Bauteils mittels vollflächiger Klebung appliziert wird. Bei Dehnung verlängert sich der DMS, was zu einer der Dehnung proportionalen Änderung des elektrischen Widerstands führt. Die Widerstandsänderung wird mithilfe einer Wheatstone-Brückenschaltung oder eines speziellen Dehnungsmessstreifen-Messgeräts erfasst.

Bemerkungen:

Temperaturänderungen haben einen Einfluss auf den Dehnungsmessstreifen selbst als auch auf das zu messende Bauteil. Eine Temperaturkompensation ist daher zwingend erforderlich.

Quellen: [3], [37]

B2.2 Schwingsaitensensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Schwingsaitensensoren sind eine Art von Sensorsystem, die zur Messung verschiedener physikalischer Größen, wie Druck, Beschleunigung, Spannung oder Masse, verwendet werden können.
- Messung bzw. Überwachung von Veränderungen von Beanspruchungs- und Verformungszuständen an der Oberfläche eines Bauteils, [72], [73], [74]
- Messung von Riss- und Koppelfugenbreiten [72]
- Messung von Schubverformungen
- Messung von Schwingungskenngrößen (Beschleunigung)
- Messung von Betondehnungen im Bauteilinneren [74]

Messprinzip:

Das Messprinzip basiert darauf, dass sich vorgespannte schwingende Saiten in ihrer Resonanzfrequenz ändern, wenn sie mehr oder weniger stark beansprucht sind.

Die Änderung des Ankerabstands zwischen beiden Sensorenden, die durch die Verformung des gemessenen Baukörpers verursacht wird, führt zu einer Bewegung des frei gleitenden Elementes innerhalb der äußeren Hülle, wodurch sich die Spannung der schwingenden Saite ändert, und sich die Resonanzfrequenz des Drahtes verändert [37]. Ein Detektor in Form einer Magnetspule im Sensor misst die Änderung der Resonanzfrequenz, die in direktem Zusammenhang mit der auf den Sensor ausgeübten Weggrößenänderung steht.

Bemerkungen:

Der Schwingungsaufnehmer kann einen eigenen Temperatursensor zur Kompensation der Sensortemperatur enthalten.

Quellen: [3], [37]

B2.3 Diskrete faseroptische Sensoren - FBG (Fiber Bragg Grating) / LGFBG (Long Gauge FBG)**Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:**

- Messung bzw. Überwachung von Veränderungen von Beanspruchungs- und Verformungszuständen an der Oberfläche eines Bauteils
- Temperaturmessung
- Rissüberwachung (insbesondere LGFBG)
- Schwingungsmessungen

Messprinzip:

FBG-Sensoren (Fiber Bragg Grating) sind (faser-) optische Sensoren, die das Prinzip der Bragg'schen Gitterinterferenz nutzen. Der Aufnehmer besteht aus einem kurzen Stück Glasfasermaterials, in das Strukturreflectoren, auch Bragg-Gitter genannt, als Punktsensoren eingebracht werden. Diese punktförmigen Sensoren werden einzeln (FBGs) oder mehrfach in begrenzter Anzahl (Long Gauge FBGs) entlang einer Glasfaser eingearbeitet.

Eine Lichtwelle wird in die Faser gesendet und trifft auf das Bragg-Gitter eines Punktsensors. Dabei interferiert sie mit den reflektierten Wellen, die vom Gitter erzeugt werden. In Abhängigkeit von der Gitterperiode interferiert das Licht nur bei einer bestimmten Wellenlänge. Bei äußerer Einwirkung, wie Dehnung oder Temperaturänderung ändert sich die Gitterperiode des Bragg-Gitters, was zu einer Verschiebung der Wellenlänge führt, bei der die Interferenz auftritt. Diese Wellenlängenverschiebung ist direkt proportional zur Kenngröße, die gemessen werden soll. Zur Messung der Wellenlänge des reflektierten Lichts wird ein Interrogator eingesetzt, die die Wellenlängenverschiebung in die Messgröße umwandelt.

Long Gauge FBG-Sensoren (LGFBG) enthalten mehrere Bragg-Gitter-Punktsensoren in einer einzigen Faser haben. Dabei erhält jeder Punktsensor eine eigene charakteristische Interferenzwellenlänge. LGFBGs sind darauf ausgelegt, größere Messbereiche abzudecken.

Bemerkungen:

Faseroptische FBG-Sensoren sind aufgrund ihrer kompakten Bauweise, der vergleichsweise hohen Empfindlichkeit und der geringen Anfälligkeit durch elektromagnetische Störeinflüsse in Monitoringanwendungen weitverbreitet.

Neben den FBG-Sensoren kommen gelegentlich auch interferometrische faseroptische Sensoren wie das Fabry-Perot Interferometer, das Michelson Interferometer oder das Mach-Zehnder Interferometer für die messtechnische Überwachung von Dehnungs- und Temperatur zum Einsatz, insbesondere bei geringen Dehnungsamplituden und hohen Messfrequenzen [75].

Quellen: [3] [75]

B2.4 Verteilte Faseroptische Sensoren (DFOS – Distributed Fiberoptical Sensing)**Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:**

- Messung bzw. Überwachung von Veränderungen von Beanspruchungs- und Verformungszuständen über große Messbereiche
- Temperaturmessung über große Messbereiche

Messprinzip:

Im Unterschied zu FBG-Sensoren fungiert bei verteilten faseroptischen Sensoren die Glasfaser in ihrer gesamten Länge als Messaufnehmer. Dies ermöglicht die quasi-kontinuierliche Überwachung von Dehnung oder Temperatur bzw. weiterer Messgrößen.

Aufgrund natürlicher Inhomogenitäten und darauf basierender Brechzahlsschwankungen besitzt jede optische Faser ein charakteristisches Muster entlang der Faser. Diese Charakteristik kann als gleichmäßige Verteilung lokaler Reflektoren genutzt werden. Bei einer Messung wird ein Lichtsignal in die Faser eingeleitet, das rückgestreute Licht erfasst und hinsichtlich Laufzeit und Dämpfung ausgewertet.

Zur Berechnung der Dehnung können unterschiedliche optische Komponenten des Lichts analysiert werden. Neben dem OTDR-Verfahren (Optical Time Domain Reflectometry), das die Raman- oder Brillouin-Rückstreuung auswertet und mit dem nur eine relativ geringe Ortsauflösung realisiert werden kann, kommt für Anwendungen an Brückenbauwerken vor allem das OFDR-Verfahren (Optical Frequency Domain Reflectometry) zum Einsatz, das die Rayleigh Rückstreuung auswertet.

Bemerkungen:

Die eigentlichen Glasfasern sind kostengünstig und können u.U. bereits bei der Herstellung von baulichen Komponenten flächendeckend eingebaut werden. Das zur Messanwendung erforderliche Auslesegerät kann bei Bedarf an die fest verlegten Fasern angeschlossen und für einen eingeschränkten Zeitraum Messungen durchführen.

Quellen: [3], [37] [75]

Anhang B3: Neigungssensoren

B3.1 Neigungssensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Überwachung von absoluten Drehbewegungen von Bauteilen
- Überwachung von Biege- und/oder Torsionsbeanspruchungen von Bauteilen
- Lagerverdrehungen
- Setzungsbedingte Verdrehungen
- Bestimmung von Lastanteilen bei der Verkehrslastcharakterisierung

Messprinzip:

Neigungssensoren, auch Inklinometer genannt, messen die Verdrehung einer Messachse in Relation zu einer Bezugsachse über die Schwerkraftverschiebung. Die Bezugsachse kann entweder für eine relative Neigung beliebig ausgerichtet sein oder für eine absolute Neigung der Wirkungsrichtung der Schwerkraft entsprechen. Für gewöhnlich werden bei Messungen an Brücken absolute Neigungen mit elektrischen Sensoren gemessen. Die Bezugsachse wird dabei innerhalb des Sensors über ein Pendelsystem, ein Flüssigkeitssystem oder ein seismisches System hergestellt. Je nach Sensortyp wird die Neigung mit der Ausschlagmethode oder der Rückführungsmethode (Kompensationsmethode) optisch, induktiv, kapazitiv, resistiv oder magnetisch ausgewertet.

Neben diesen analogen Sensorarten verwenden MEMS-Neigungssensoren (MEMS = Micro-Electro-Mechanical Systems) kleine mechanische Strukturen auf einem Siliziumchip, die sich unter Einfluss der Gravitation verformen. Die Verformung wird dann elektrisch erfasst und in einen Neigungswinkel umgerechnet. Die Wahl des Messprinzips hängt von den Anforderungen der spezifischen Anwendung ab.

Bemerkungen:

keine

Quellen: [3], [37]

Anhang B4: Schwingungssensoren

B4.1 Beschleunigungssensoren - piezoelektrisch und kapazitiv

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Bestimmung von Eigenschwinggrößen sowie sich indirekt daraus ergebender Größen (z.B. Zugkräfte in Vorspannelementen und Seilen),
- Überwachung des Eigenschwingverhaltens über die Zeit; messtechnisch erfasste Änderungen sind u.U. auf strukturelle Schädigungen zurückzuführen,
- Bestimmung des Eigenschwingverhaltens zum Vergleich mit numerisch ermittelten Größen mit dem Ziel des Anpassens des numerischen Modells.

Messprinzip:

Das piezoelektrische Prinzip basiert auf der Fähigkeit bestimmter Materialien, bei mechanischer Verformung eine elektrische Ladung zu erzeugen. Der Kern des Sensors besteht aus einem piezoelektrischen Material, wie zum Beispiel Quarz oder einem piezoelektrischen Keramikwerkstoff. Die dadurch generierten Ladungen werden als elektrisches Signal über die Elektroden des Sensors abgegriffen, welches direkt proportional zur auf den Sensor einwirkenden Beschleunigung steht.

Bei kapazitiven Beschleunigungsaufnehmern variiert die Kapazität eines Kondensators abhängig von der Beschleunigung einer Masse.

Bemerkungen:

Piezoelektrische Beschleunigungssensoren sind aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit und schnellen Reaktionszeit in vielen Anwendungen zur Messung von Schwingbeschleunigungen weit verbreitet. Sie werden hauptsächlich als Bauart von Beschleunigungsaufnehmern für das Monitoring von Brücken eingesetzt.

Quellen: [3], [37]

B4.2 Geophone

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Siehe B4.1

Messprinzip:

Geophone messen die Schwinggeschwindigkeit. Das Messprinzip basiert auf der Umwandlung der Massebewegung eines Masse-Feder-Dämpfer-Systems in ein elektrisches Signal. Durch die Bewegung eines magnetischen Kerns, der sich in einer am Geophon-Gehäuse befestigten Spule befindet, wird ein elektrischer Strom induziert, der auf die Schwingungsgeschwindigkeit kalibriert ist. Das resultierende elektrische Signal wird anschließend verstärkt und aufgezeichnet.

Bemerkungen:

Es ist zu beachten, dass Geophone nur Frequenzen zwischen ihrer Eigenfrequenz und einer bestimmten Störfrequenz überwachen können. Diese Einschränkung ermöglicht eine begrenzte Anzahl von Anwendungen. Trotzdem werden Geophone häufig zur Überwachung des Schwingverhaltens von Bauwerken eingesetzt.

Seismometer sind eine Form von Geophonen, die speziell zur Messung seismischer Schwingungen entwickelt wurden und eine sehr niedrige Eigenfrequenz besitzen. Im Gegensatz zur in Bewegung befindlichen Masse im Geophon wird hier die Kraft gemessen, die zur Aufrechterhaltung der Ruhelage einer Masse benötigt wird.

Quellen: [3]

B4.3 MEMS - Beschleunigungssensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Siehe B4.1

Messprinzip:

MEMS-Beschleunigungssensoren messen Beschleunigungskräfte durch kleinste mechanische Strukturen, welche auf einem Silizium-Chip integriert sind. Das Messprinzip beruht auf der Trägheitsmessung, wodurch die Bewegung dieser mikromechanischen Strukturen die Beschleunigung eines Objektes erfasst. Zwei grundlegende Messprinzipien sind im Einsatz, piezoresistiv und kapazitiv. In piezoresistiven MEMS-Sensoren werden Dehnungssensoren in die mechanischen Strukturen des Sensors integriert. Diese werden bei Beschleunigungen verformt, was zu Änderungen des elektrischen Widerstandswertes führt. Dieser ist proportional zur Beschleunigung und wird gemessen.

In kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensoren befinden sich winzige Kondensatoren, die durch eine bewegliche Masse getrennt sind. Die Masse, die durch die Beschleunigung des Sensors beeinflusst wird, ändert den Abstand zwischen den Kondensatorplatten. Diese Abstandsänderung führt zu einer Kapazitätsänderung des Kondensators, welche direkt mit der auf den Sensor wirkenden Beschleunigung in Beziehung steht. Das elektrische Signal wird dann durch die Messung dieser Kapazitätsänderung erzeugt.

Bemerkungen:

keine

Quellen: [3], [37]

B4.4 Laser-Doppler-Vibrometer

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- siehe B4.1, aber berührungsfreie Schwingungsmessung aus der Entfernung

Messprinzip:

Das Messprinzip basiert auf dem Doppler-Effekt, nach dem sich die Frequenz eines sich bewegenden Objekts für einen Beobachter, der sich relativ dazu bewegt, verschiebt. Ein Laserstrahl wird zweigeteilt. Einer dieser Teilstrahlen wird als Referenzstrahl verwendet, während der andere auf die Oberfläche des Objekts gerichtet wird. Der Referenzstrahl und der auf die Oberfläche gerichtete Strahl erzeugen ein Interferenzmuster, wenn sie wieder zusammengeführt werden. Aufgrund der Schwingungen des Objekts erfährt das Interferenzmuster eine Doppler-Verschiebung, die proportional zur Geschwindigkeit der Oberflächenbewegung ist. Das Interferenzmuster wird mittels Fotodetektor bestimmt und Änderungen in ein elektrisches Signal umgewandelt.

Bemerkungen:

Das Laser-Doppler-Vibrometer ermöglicht Schwingungsmessungen, bei denen es nicht möglich ist, Sensoren auf dem sich bewegenden Objekt zu applizieren.

Quellen: [37]

Anhang B5: Kraft- und Drucksensoren

B5.1 Kraftmessdosen

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Messung der auf ein Bauwerk oder Bauteil einwirkenden statischen und dynamischen Lasten, z.B. aus Verkehr,
- Überwachung von Vorspannkräften in Spannkabeln, Seilen und Schrauben,
- Überwachung von Kraftzuständen beim Vorspannen von Ankern und Vorspannsystemen.

Messprinzip:

Kraftmessdosen werden auch als Wägezellen bezeichnet. Das Messprinzip beruht auf dem Hooke'schen Gesetz, das besagt, dass die elastische Verformung eines Materials direkt proportional zur auf das Material ausgeübten Kraft ist. Hauptkomponenten einer Kraftmessdose sind Dehnungsmessstreifen (DMS), die auf oder in das Material der Dose appliziert sind. Wirkt eine externe Kraft auf die Kraftmessdose, verformt sich dessen Material, die Dehnung wird mittels DMS aufgezeichnet (siehe Messprinzip Dehnungsmessstreifen). Die gemessenen Widerstandsänderungen werden in eine Kraft umgerechnet.

Bemerkungen:

Kraftmessdosen müssen regelmäßig mithilfe bekannter Referenzkräfte kalibriert werden.

Quellen: [3]

B5.2 Kapazitive Drucksensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Messung der auf ein Bauwerk oder Bauteil einwirkenden statischen und dynamischen Lasten, z.B. aus Verkehr.

Messprinzip:

Kapazitive Drucksensoren basieren auf dem Prinzip der Änderung der Kapazität in Abhängigkeit von der auf sie ausgeübten mechanischen Belastung oder dem Druck. Das grundlegende Messprinzip besteht darin, dass sich die Kapazität eines Kondensators ändert, wenn sich der Abstand zwischen den Elektroden ändert. In diesem Fall bilden die Sensoroberfläche und eine bewegliche Membran mit dazwischen liegendem Dielektrikum die beiden Elektroden des Kondensators.

Bemerkungen:

Keine

Quellen: [3]

B5.3 Piezoelektrische Drucksensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Siehe B5.2

Messprinzip:

Piezoelektrische Drucksensoren nutzen als Messprinzip den piezoelektrischen Effekt, bei dem bestimmte Materialien (wie beispielsweise Quarz) ihre elektrische Ladung ändern, wenn sie mechanisch verformt werden. Die Verformung des Materials aufgrund äußeren Drucks erzeugt eine Ladungsverschiebung im Inneren des piezoelektrischen Elements. Diese Ladungsänderung erzeugt eine elektrische Spannung, die proportional zur auf den Sensor ausgeübten Kraft oder zum Druck ist.

Bemerkungen:

keine
Quellen: [3]

B5.4 Optische Drucksensoren
Anwendungen, Mess- und Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none"> • Siehe B5.2
Messprinzip: Optische Drucksensoren basieren zumeist auf Faser-Bragg-Gittern (FBG), welche auf einer Membran verklebt sind. Durch den anliegenden Druck ändert sich die Membranauslenkung, wodurch eine Dehnung im FBG induziert wird. Eine andere Möglichkeit sind Fabry-Pérot-Interferometer (FPI) – Drucksensoren, bei denen Membranauslenkungen zu optischen Interferenzmustern führen, die ausgelesen werden. Für genauere Beschreibungen der FBG und FPI siehe B.2.
Bemerkungen: Keine
Quellen: [3]

B5.5 Magnetoelastische Hohlsensoren
Anwendungen, Mess- und Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none"> • Für die Langzeitüberwachung der Vorspannkraft von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund oder von Schrägseilen können Hohlsensoren nach dem elastomagnetischen Prinzip verwendet werden.
Messprinzip: Elastomagnetische Sensoren basieren auf dem magnetoelastischen Effekt. D.h., bei mechanischer Belastung des elastischen Materials ändert sich die räumliche Ausrichtung der Atome im ferromagnetischen Material. Dies führt zu einer Änderung der magnetischen Eigenschaften des Materials, die mittels Magnetsensoren (Hall-Sensoren oder GMR (Giant Magneto-Resistance) Sensoren) erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Für die Langzeitüberwachung der Vorspannkraft von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund oder von Schrägseilen können Hohlsensoren bei der Bauwerkserrichtung fest eingebaut werden. Nach Kalibrierung liefern die Sensoren die Absolutwerte der Spannkraft.
Bemerkungen: Gleichzeitig muss über einen Temperatursensor der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Kraft beobachtet und anschließend kompensiert werden. Ein nachträglicher Einbau ist bei externen Spanngliedern nur bei einem Ersatz des Spannkabels möglich.
Quellen: [3]

Anhang B6: Temperatursensoren

B6.1 Widerstandsthermometer
Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

<ul style="list-style-type: none"> • Messung bzw. messtechnische Überwachung der ambienten und der Bauteiltemperatur • Temperaturmessungen sind im Rahmen von Monitoringmaßnahmen zur Kompensation der temperaturbedingten Effekte auf Sensorik und Messtechnik erforderlich und ratsam.
<p>Messprinzip:</p> <p>Widerstandsthermometer nutzen das Prinzip der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von Materialien, insbesondere von Platin. Sie sind auch als Pt100-Sensoren oder Platin-Widerstandsthermometer bekannt. Platin hat einen Temperaturkoeffizienten für den elektrischen Widerstand, der bewirkt, dass sein Widerstand mit steigender Temperatur über einen großen Temperaturbereich weitestgehend linear ansteigt. Die Kalibrierung erfolgt bei bekannten Temperaturpunkten.</p>
<p>Bemerkungen:</p> <p>Keine</p>
<p>Quellen: [3], [37]</p>

B6.2 Thermoelemente

<p>Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Siehe B6.1
<p>Messprinzip:</p> <p>Thermoelemente basieren auf dem thermoelektrischen Effekt, auch Seebeck-Effekt genannt. Dieser besteht darin, dass, sind zwei unterschiedliche Metalle oder Legierungen an einem Ende miteinander verbunden, und wenn am anderen Ende eine Referenztemperatur gehalten wird, bei Temperaturunterschieden zwischen diesen beiden Punkten eine elektrische Spannung an den Metallen entsteht. Diese Spannung ist direkt proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der Messstelle und dem Referenzpunkt. Die Wahl der Metalle oder Legierungen für ein Thermoelement hängt von der gewünschten Temperaturmessung und anderen Faktoren ab. Es gibt verschiedene Thermoelementtypen mit unterschiedlichen Metallkombinationen, die jeweils unterschiedliche Temperaturbereiche und Genauigkeiten aufweisen.</p>
<p>Bemerkungen:</p> <p>Keine</p>
<p>Quellen: [3]</p>

B6.3 Faseroptische Sensoren

<p>Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Siehe B6.1
<p>Messprinzip:</p> <p>Temperaturen können sowohl mit diskreten faseroptischen Sensoren (z.B. FBGs) als auch verteilten faseroptischen Sensoren gemessen werden. Die Messprinzipien sind in B.2 erläutert. Bei verteilten faseroptischen Sensoren werden im Vergleich zu den Dehnungsmessungen zusätzliche Rückstreuungsspektren (Rayleigh-, Raman- oder Brillouin-Streuung) genutzt.</p>
<p>Bemerkungen:</p> <p>keine</p>
<p>Quellen: [3]</p>

Anhang B7: Weitere Sensoren zur Messung von Umgebungsbedingungen

B7.1 Hygrometer
Anwendungen, Mess- und Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none">• Messung der Luftfeuchte
Messprinzip: <p>Der gebräuchlichste Typ bei Hygrometer ist das Adsorptionshygrometer, dessen Arbeitsweise darauf beruht, dass sich die elektrischen Eigenschaften der Sensormaterialien durch Wasseraufnahme aus der Umgebungsluft ändern. Mögliche Bauarten sind kapazitive Sensoren und Impedanzsensoren. Bei kapazitiven Sensoren ändert sich die elektrische Kapazität eines Kondensators durch die Wasseraufnahme des Dielektrikums. Bei Impedanzsensoren ändert sich die elektrische Leitfähigkeit je nach Feuchtegehalt. Mittels geeigneter Messelektronik und Umrechnung anhand spezifischer Kalibrierkurven können daraus entsprechende Feuchtwerte ermittelt werden.</p>
Bemerkungen: <p>Keine</p>
Quellen: [3]

B7.2 Anemometer
Anwendungen, Mess- und Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none">• Messungen von Windrichtung und Winddruck
Messprinzip: <p>Windrichtung und Winddruck können mit verschiedenen Prinzipien gemessen werden. Eine traditionelle Bauform sind das Flügelrad- und das Schalen-Anemometer, bei dem die Windgeschwindigkeit aus der Rotation eines Flügelrads ermittelt wird. Sie benötigen eine Windrichtungsnachführung zur Ausrichtung des Sensors im Wind. Neuartige Anemometer nutzen das Ultraschall-Messprinzip. Dies erlaubt gegenüber den oben genannten Sensoren eine trägheitsfreie Messung. Die Messgrößen können hierdurch auch bei hohen Änderungsraten mit hoher Genauigkeit gemessen werden, weshalb sie besser für die Böen- und Spitzenwertmessung geeignet sind. Zusätzlich kann der Wind in allen Raumrichtungen gemessen werden.</p>
Bemerkungen: <p>Sensoren mit integrierter Heizung sind empfehlenswert, um Messfehler aus Eisbildung im Winter zu vermeiden.</p> <p>Für Windkraftanlagen und anderen Bauwerken mit großer Höhe kommen zunehmend auch Lidar-Systeme zum Einsatz.</p>
Quellen: [3]

B7.3 Pyranometer
Anwendungen, Mess- und Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none">• Messungen Sonnenstrahlung
Messprinzip: <p>Ein Pyranometer besteht aus einem Hohlraumstrahler, der von einer Glaskuppel bedeckt ist. Der Hohlraumstrahler enthält ein Absorptionsmaterial, das die eingehende solare Strahlung absorbiert und in Wärme umwandelt. Diese Wärme verursacht eine Temperaturerhöhung im Hohlraum und die</p>

<p>Temperaturdifferenz zur Umgebung wird anschließend in eine elektrische Spannung oder einen elektrischen Widerstand umgewandelt, die/der gemessen werden kann. Das Ausgangssignal des Pyranometers ist direkt proportional zur solaren Einstrahlung, die auf die Glaskuppel trifft. Pyranometer sind so konstruiert, dass sie Strahlung im sichtbaren Bereich (kurze Wellenlängen) und im nahen Infrarotbereich (längere Wellenlängen) erfassen, da dies den Spektralbereich der Sonnenstrahlung abdeckt.</p>
<p>Bemerkungen: keine</p>
<p>Quellen: [3]</p>

Anhang B8: Sensoren zur Verkehrscharakterisierung

B8.1 Weigh in Motion (WIM) – Systeme

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Direkte Messung der Radlast, Achslast- und/oder Gesamtlastkomponenten über in / bzw. auf der Fahrbahn integrierte Messsysteme
- Ableitung von Kenngrößen bzgl. Fahrzeugparameter (Achslasten, Achsabstände, Fahrzeuggesamtlast), Verkehrsfluss (Fahrspuraufteilung, Geschwindigkeit, Fahrzeugabstand) sowie Verkehrszusammensetzung (Fahrzeugtypen, Verkehrsaufkommen).

Messprinzip:

Weigh-in-Motion (WIM) bezeichnet eine spezielle Methode zur Kraftmessung und bezieht sich auf Technologien zur Messung der Gewichtskraft eines sich auf einer Oberfläche bewegenden Objekts. Hierbei wird in der Regel die vertikale Komponente der dynamischen Reifenkräfte eines fahrenden Straßenfahrzeuges gemessen, um das Gesamtgewicht des Fahrzeugs und den Anteil der Gewichtskraft abzuschätzen, der durch das passierende Rad, die Achse oder Achsgruppe erzeugt wird, wobei auf das entsprechende statische Fahrzeug verwiesen wird. WIM-Anlagen sind im Asphalt eingelassene Streifen- oder Plattensensoren, die auf verschiedenen Sensortechnologien beruhen können, wie beispielsweise piezoelektrischen und kapazitiven Sensoren, Dehnungsmessstreifen oder faseroptische Sensoren. Zur genaueren Erfassung der Überfahrten werden Induktionsschleifen eingebaut.

Außerdem kommen Magnetfeldsensoren in WIM-Systemen zum Einsatz. Magnetfeldsensoren finden zusätzlich zu anderen Technologien in WIM-Systemen Anwendung. Das Prinzip beruht darauf, dass metallische Fahrzeuge das Magnetfeld beeinflussen, das der Sensor erzeugt. Durch die Erkennung dieser Änderungen kann der Sensor ein elektrisches Signal erzeugen, dessen Größe von verschiedenen Faktoren abhängig ist. Diese umfassen die Größe und Zusammensetzung des Fahrzeugs, die Geschwindigkeit sowie die Position des Fahrzeugs in Bezug auf den Sensor. Mit diesen Informationen kann das System das Gewicht des Fahrzeugs sowie andere relevante Daten, wie z.B. die Geschwindigkeit, ermitteln.

Bemerkungen:

Die Verwendung von Magnetfeldsensoren für die Verkehrslastmessung auf Brücken bietet den Vorteil, dass sie nicht direkt mit den Fahrzeugen in Kontakt kommen und daher nicht abgenutzt werden.

Quellen: [3], [37], [76]

B8.2 Bridge Weight in Motion (BWIM) – Systeme

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Indirekte Messung der Radlast, Achslast- und/oder Gesamtlastkomponenten über in / bzw. auf der Fahrbahn integrierte Messsysteme,

- Ableitung von Kenngrößen bzgl. Fahrzeugparameter (Achslasten, Achsabstände, Fahrzeuggesamtlast), Verkehrsfluss (Fahrspuraufteilung, Geschwindigkeit, Fahrzeugabstand) sowie Verkehrszusammensetzung (Fahrzeugtypen, Verkehrsaufkommen).

Messprinzip:

Bei Bridge Weigh-in-Motion (BWIM) Systemen werden über applizierte Dehnungssensoren und ggf. Beschleunigungssensoren an der Fahrbahnplatte bzw. in unmittelbarer Nähe am Tragsystem die Tragwerksreaktionen aus den Fahrzeugüberfahrten erfasst. Über eine ausführliche Datenanalyse und auf Basis einer gewissenhaften und umfangreichen Kalibrierung können aus den gemessenen Größen der Bauwerksantwort (Wirkung) die Kenngrößen der Verkehrslastcharakteristik berechnet werden.

Bemerkungen:

Umfangreiche Kalibrierung über Belastungsversuche ist zwingend erforderlich. Weiterhin ist die Integration einer web-basierten Kamera zur Qualitätskontrolle zielführend.

Quellen: [3], [37] [76]

Anhang B9: Korrosion

B9.1 Korrosionssensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Die Messung der Korrosion und des Korrosionszustands ist von großer Bedeutung, da Korrosion insbesondere bei Stahlbeton- und Spannbetonbrücken als Hauptursache für Zustandsverschlechterung gilt.
- Erfassung kann erfolgen über Messung korrosionsbeeinflusster elektrochemischer Größen (Potential, Impedanz (Widerstand) und Strom).
- Erfassung kann erfolgen über Messung korrosionsbeeinflussender Parameter, wie Feuchte, pH-Wert, Chloridkonzentration und Temperatur, Korrosionszuständen.

Messprinzip:

Es gibt verschiedene Verfahren und Sensoren, die zur Messung der Korrosion eingesetzt werden können. Hier sind einige typische Ansätze:

Korrosionspotentialmessung: Dies ist eine einfache Methode zur Messung des elektrochemischen Potentials an der Oberfläche des Stahlbetons. Eine Referenzelektrode wird auf der Betonoberfläche platziert, um das elektrochemische Potenzial zu messen. Bei einer weiteren Sensorart wird die Referenzelektrode an der Bewehrung appliziert. Die über die Zeit gemessene Verschiebung des elektrochemischen Potentials verweist auf aktive Korrosion. Bei Anodenleitern werden mehrere Einzelanoden im festem Abstand zwischen der äußeren Bewehrung und der Bauteiloberfläche angeordnet. Korrosion ist durch Messung des Korrosionspotentials und des Korrosionsstroms von außen messbar.

Linear Polarization Resistance (LPR): Dieses elektrochemische Verfahren misst den Widerstand gegen den Stromfluss in der Bewehrung. Änderungen in der Polarisierung können auf Korrosion hinweisen.

Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS): EIS ist ein elektrochemisches Verfahren, bei dem Wechselstrom angelegt wird, um die Reaktionsgeschwindigkeit an der Oberfläche der Bewehrung zu analysieren. Änderungen in der Impedanz können auf Korrosion hinweisen.

Chloridionenkonzentration: Chloridionen sind eine Hauptursache für Korrosion von Bewehrungsstahl. Die Messung der Chloridionenkonzentration im Beton kann Hinweise auf potenzielle Korrosion geben.

Korrosionssensoren: Es gibt auch spezielle Korrosionsindikatoren, die in den Beton eingebettet und am Bewehrungsstahl appliziert werden können. Die Korrosion wird über einen Referenzdraht gemessen,

der durch korrosive Einflüsse zerstört wird (Stellvertreterkorrosion). Diese Indikatoren übermitteln den Korrosionszustand zumeist über RFID-Technologie.

Bemerkungen:

Die vorgestellten Methoden und Sensoren werden regelmäßig und systematisch eingesetzt, um den Korrosionszustand von Brücken zu überwachen und frühzeitig Maßnahmen zur Instandhaltung und Reparatur zu ergreifen. Die Wahl der Methode hängt oft von der spezifischen Situation und den Erfordernissen des Brückenbauwerks ab.

Quellen: [3], [7], [34], [37]

Anhang B10: Materialfeuchte

B10.1 Feuchtesensoren

Anwendungen, Mess- und Zielgrößen:

- Die Messung der Feuchte ist für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von großer Bedeutung,
- Zielgrößen sind sowohl der Grad der Durchfeuchtung als auch die Feuchtigkeitsmenge

Messprinzip:

Die Feuchte kann direkt oder indirekt gemessen werden. Direkte Feuchtemessverfahren beruhen in der Regel auf der Abtrennung der Wassermenge vom Material und deren direkte Bestimmung. Diese Methode ermöglicht eine sehr genaue Bestimmung, ist aber zerstörend und daher bei Brücken nur bedingt anwendbar. Indirekte, zerstörungsfreie Verfahren werden bevorzugt. Dabei erfassen Sensoren den Feuchtegehalt über die Messung von Stoffeigenschaften des Wassers, die in einem funktionalen Zusammenhang stehen. Beispielsweise wird die Leitfähigkeit des Wassers bestimmt und über spezifische Kalibrierkurven auf den tatsächlichen Feuchtegehalt geschlossen.

Multiringelektroden: Das Messprinzip beruht auf der Bestimmung des Wechselstromwiderstandes zwischen zwei benachbarten Ringen.

RFID-Feuchtesensoren: Mit diesen Sensoren werden Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit im Beton gemessen und per RFID-Technologie ausgelesen.

Kernspinresonanzsensoren: Der Wassergehalt im Beton kann über die Resonanz bestimmt werden, die an den Wasserstoffkernen im Baustoff entstehen, wenn ein Magnetfeld und zusätzliche Bestrahlung bei definierten Frequenzen angelegt werden.

Bemerkungen:

keine

Quellen: [3], [7], [37]

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2023

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, Schubert, 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.

B 194: Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

Taffe, Vonk

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

B 195: Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2

Geißler, Kraus, Freundt, Böning

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

2024

B 196: Zukünftige Einwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken

Hajdin, Schiffmann, Blumenfeld, Tanasić

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

B 197: Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke – Dokumentation 2021

Novák, Stein, Farouk, Thomas, Reinhard, Zeller, Koster

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

B 198: Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Moormann, Kugler

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

B 199: Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Feinkonzept

Hajdin, Fastrich

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

B 200: Konzeption zur Bestimmung von Lage und Anzahl asbesthaltiger Abstandhalter in Betonbrücken – Handlungsanweisung für den Umgang mit asbesthaltigen Hilfsbauteilen in Brückenbauwerken aus Stahlbeton

Hönig, Bossemeyer, Sanio, Thome

€ 16,00

B 201: Blockhinterlegung und Verpressverfahren zur Abdichtung von Tunnelinnenschalen

Thienert, Kessler, Brummermann, Tintelnot, Matsini, Handke, Lis, Schmidt

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

B 202: 10. BAST-Tunnelsymposium

€ 19,00

2025

B 203: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Betonbrücken im Bestand

Hegger, Dommies, Adam, Fischer, Lamatsch, Thoma, Maurer, Lavrentyev, Stakalies, Kerkeni, Teworte, Sharei, Stettner, Zilch(+), Tecusan

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

B 204: Erarbeitung eines Prüfverfahrens zur Feststellung der inneren Standsicherheit von Gabionen aus punktgeschweißten Drahtgittern

Heimbecher, Lengers, Thünemann

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

B 205: Einfluss des Pannenbuchtenabstands auf die Tunnelsicherheit

Mayer, Brennberger, Haack, Zimmermann

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

B 206: Erfahrungsbericht zur Innenbeschichtung nach TL-Blatt 50 an der Brücke über den Petersdorfer See

Rüters, Schröder, Windmann, Lebelt

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

B 207: Entwicklung eines leistungsorientierten Prüfregimes für Brückenseilverfüllmittel

Hübscher

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

B 208: Korrosionsschutz von Brückenseilen

Friedrich, Windmann

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

B 209: Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens in Straßentunneln unter Berücksichtigung von Gruppeneffekten

Thienert, Leismann, Kaufmann, Jenki, Stuehler, Hahn-Klimroth, Oetinger, Czudnochowski, Galler, Wenighofer

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

B 210: Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke

Wedel, Pitters, Hille, Herrmann, Schneider

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

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

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.



ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-864-5
<https://doi.org/10.60850/bericht-b210>

www.bast.de