

# Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 190

**bast**

# Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

von

Guido Morgenthal  
Sebastian Rau  
Norman Hallermann

Guido Morgenthal Technologien im Bauwesen

Kristian Schellenberg,  
Henar Martín-Sanz

Equi Bridges AG

Matthias Schubert  
Oliver Kübler

Matrisk GmbH

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 190**

**bast**

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

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

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

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

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

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

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

## Impressum

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerks „Wissen – Können – Handeln“ wurde durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) finanziert.

**Bericht zum Forschungsprojekt 69.0006**  
Potentiale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

**Fachbetreuung**  
Iris Hindersmann

**Referat**  
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

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

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-735-8

Bergisch Gladbach, Juni 2023

Das BMDV-Expertennetzwerk ist ein verkehrsträger- und behördenübergreifendes Forschungsformat in der Ressortforschung des BMDV. Unter dem Leitmotiv „Wissen – Können – Handeln“ haben sich sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) 2016 zu einem Netzwerk zusammengeschlossen. Ziel ist es, drängende Verkehrsfragen der Zukunft in den Bereichen Klimawandel, Umweltschutz, zuverlässige Infrastruktur, Digitalisierung, erneuerbare Energien und verkehrswirtschaftliche Analysen zu erforschen.

## Kurzfassung – Abstract

### Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

Brücken sind als wichtiger Teil der Verkehrsinfrastruktur über die gesamte Lebensdauer kontinuierlich hohen Beanspruchungen ausgesetzt. Eine dauerhafte Sicherstellung ihrer Leistungsfähigkeit mit dem Ziel minimaler Ausfallzeiten stellt eine große Herausforderung dar. Nur durch eine effektive Bauwerkserhaltung kann die Nutzungsdauer maximiert werden. Hierfür werden regelmäßige Inspektionen durchgeführt, welche die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Verkehrssicherheit der Bauwerke gewährleisten. Ein kontinuierliches Monitoring wird derzeit meist nur anlassbezogen eingesetzt und nur an konkreten Fragestellungen orientiert ausgewertet. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Konzeptes zur Unterstützung eines Lebenszyklusmanagements (LZM) von Brücken mit Monitoringdaten. Durch Clusterbildung sind über den gesamten Brückenbestand die relevanten Bauteile und die dazugehörigen Grenzzustände zu definieren. Es werden die Potenziale von Monitoringverfahren zur Gewinnung von Zustandsinformationen ermittelt. Das Monitoring einer Brücke führt nicht nur dann zur Verbesserung des LZM auf Netzebene, wenn die Restnutzungsdauer verlängert wird, sondern auch, wenn der Zeitpunkt einer Instandsetzungsmaßnahme frühzeitig erkannt werden kann. Die Auswertung von Monitoringdaten liefert gezielt Informationen über relevante Bauteilzustände, die wiederum mithilfe von zielgerichtet definierten Key Performance Indikatoren (KPI) zu Aussagen über den Zustand des Bauwerkes aggregiert werden können. In diesem Zusammenhang erfolgt auch eine Verknüpfung mit typischen Erhaltungsmaßnahmen zur Berücksichtigung im LZM. Beispielhaft wird für typische Brückenschädigungen der Einsatz von sensor- und bildbasierten Monitoringsystemen erläutert, welche die Entscheidungsgrundlage für eine zustandsbasierte prädiktive Erhaltungsplanung von Brücken liefern können. Dies kann dann durch Aussagen zu Restnutzungsdauern und der Wirksamkeit von Erhaltungsmaßnahmen über die Gesamtheit aller Brückenbauwerke in eine fortschrittliche Erhaltungsplanung überführt werden.

### Potentials of monitoring data in a life cycle managements for bridges

Bridges are an important part of the transportation infrastructure and continuously subjected to increasing loads throughout their lifetime. To ensure they meet the required performance levels with a minimum of traffic disturbances represents a significant challenge. Only by implementing effective maintenance strategies the service life can be maximised. To this end, regular inspections are carried out, which ensure structural reliability, serviceability and traffic safety. The implementation of continuous monitoring is currently limited to special circumstances and data is analysed with respect to specific problems. The aim of this project is to develop a concept to support a lifecycle management (LCM) of bridges by utilising monitoring data. Employing clustering the relevant components and their limit states shall be identified at network level. The potential of monitoring methods, to obtain relevant information on the condition state of structures, is determined. The monitoring of a bridge will not only improve LCM at network level if the remaining lifetime is extended, but also if required maintenance works are being identified at an early stage of damage. The analysis of monitoring data using system identification techniques provides information on the condition of target components. Such information can then be aggregated to condition state information by defining Key Performance Indicators (KPI). In this respect, typical maintenance measures are set in the context of LCM. For typical bridge damage scenarios, the application of sensor and image-based monitoring systems is being described in relation to the decisions required in condition-based predictive maintenance strategies. Monitoring can substantially support to estimate the remaining service life and the effectiveness of maintenance measures at a network level, leading to an advanced bridge asset management.



## Summary

### Potentials of monitoring data in a life cycle managements for bridges

#### 1 Scope of work

Ensuring the long-term performance of the transport infrastructure under continuously increasing loads due to e. g. traffic growth, higher axle loads, and more frequent extreme weather events represents an enormous challenge for the German economy. The social obligation to conserve resources further requires the extension of service life through strategic and efficient asset management.

The main basis for an effective maintenance is a thorough condition assessment by means of regular inspections, which evaluates and documents the deterioration of the structure and allows for identifying of necessary rehabilitation measures. Inspections are traditionally carried out visually and link their findings to maintenance measures. Today, predictions of the further development of damage with time are not yet considered sufficiently in planning future works. This is mainly due to the temporally discrete condition assessment and the analogue recording, evaluation and management of condition information.

Modern methods of digital condition assessment enable the transition to predictive methods of maintenance by means of monitoring, digital and automatable data evaluation and damage detection as well as the forecast of condition indicators (key performance indicators – KPI) using parameterised condition development models. The prediction of condition developments and of necessary interventions enables a new type of life cycle management (LCM), which assures meeting the requirements by systematic planning of the investment and measures. Infrastructure operators can extend their strategies from the individual structure to the entire bridge portfolio in order to achieve a modern asset management, e. g. including digital building management systems.

The overall objective of this project was the development of a concept for life cycle management taking into account the results of BAST project FE 69.0002/2019. In particular, the potentials of monitoring and the data to be generated with it in life cycle management were to be evaluated in

reference to KPIs. The task was to show how decisions in a modern LZM can be improved by information from monitoring activities. For this purpose, a concept was developed in which the potentials of monitoring data become quantifiable and realisable in an LCM. This included integrating the results from previous projects, incorporating LCM concepts, taking into account the specifics and advantages of monitoring procedures as well as the requirements of the stakeholders involved in maintenance and developing pilot studies with which the concepts can be tested and transferred into practice.

#### 2 Methodology

The project work was carried out in five main steps:

- 1) Presentation of the basics of monitoring, key performance indicators (KPI) and life cycle management (LCM) as well as existing relationships,
- 2) Development of the target concept and decision theory as well as implementation examples in life cycle management,
- 3) Development of a monitoring-based life cycle management,
- 4) Conceptualisation of pilot studies to demonstrate the applicability of the concept to practice and to other transport carriers and
- 5) Summary of the project results and identification of further need of research.

In the project, existing results from completed as well as ongoing topic-related research projects were considered.

#### 3 Results

For an effective LCM, the relevant condition information must be available at a point in time that allows the timely triggering of individual measures and the estimation of the scope of work over the entire bridge stock, so that the necessary financial resources can be budgeted and allocated. Where the available budget limits the feasible measures, prioritisation and limitation to the most critical structures must take place. As long as the available funds are less than the effective financial needs,

life-cycle cost cannot be minimised. Furthermore, network considerations apply when implementing measures. Maintenance planning for complete route sections allows for increasing the efficiency as well as reducing traffic obstructions. In addition, it must be considered whether the construction industry can cope with the amount of construction activities (capacity of planning, execution and public administration). In the end, supply and demand are also cost-relevant parameters.

Cost optimisation can be achieved most effectively if the degradation which will trigger structural measures are identified and addressed as early as possible. Likewise, costs are reduced if these measures can be prepared with sufficient lead time such that they can be optimised and implemented. Therefore, the first step is to identify the major cost items for the upcoming years and link them to the reason for the respective measure. There are primarily two different situations in which monitoring as a method for assessing the condition generates added value:

- I) to reduce the uncertainties of/in the assumptions made in the assessment of the structure or its condition with additional information, such that safety as well as serviceability can be ensured and the implementation of measures can be delayed in a controlled manner without exceeding the existing and future capacities of the construction industry and the responsible authorities,
- II) to be able to trigger relatively small measures to slow down or stop individual damage processes such that the structure can be strengthened or, if necessary, replaced at a later, more favourable point in time.

Dealing with both cases requires (I) knowledge of the safety-relevant structural specifics of the respective type of bridges and their weak points/flaws with respect to condition development, (II) understanding the nature of the change in properties of the affected component due to the damage process and the definition when a limit is reached, and (III) knowing how to detect these property changes by measurements.

In addition, knowledge of the methods for repairing the damage is necessary for defining the basic condition. Often, not only the structural safety is relevant, but also the question at which point in time a major intervention will be required because the

previously appropriate repair method is no longer applicable.

Besides regular condition assessment through structural inspections (according to DIN 1076), a variety of modern digital methods/procedures of monitoring have been established, which can provide accurate data in real time, but have so far only been used selectively and mostly on occasional basis. The meaningful, and potentially increased, use of monitoring methods requires the specification of target parameters in the context of an LCM, which are to be provided by the monitoring system.

The following is a summary of the results of the five main areas of research.

### **1) Presentation of the basics of monitoring, key performance indicators (KPI) and life cycle management (LCM) as well as existing relationships**

A comprehensive overview of structural health monitoring has been developed. Besides the acquisition of measurement data, the report also includes detailed information on the sensors typically applied to monitor the load-bearing and deformation behaviour as well as the loading of infrastructure buildings/structures as well as on the evaluation of monitoring data to determine meaningful parameters. An overview of recent occasion-related monitoring projects was compiled. Thereby, occasions, objectives, measurement concepts and achieved results were summarised. Furthermore, typical damages of ageing infrastructure structures are described briefly. Typical attributes such as year and type of construction are thereby assigned, which can subsequently be used as a performance indicator and for clustering.

- The main objective of using monitoring systems is (I) the recording of loading situations and resulting stress levels, (II) the determination of load-bearing and deformation behaviour, (III) the identification/detection, localisation and quantitative characterisation of degradation processes, and (IV) the definition of maintenance measures on the basis of condition predictions.
- Monitoring is almost exclusively used on occasional basis on ageing bridge structures, as a consequence of occurring damages, structural or technological deficits, uncertainties about the load-bearing behaviour, in case of prescribed traffic-related compensation measures or if

verifications could not be provided within the scope of the recalculation and remedial action can be taken with the monitoring.

- The potential of monitoring lies less in the quantification of the absolute condition of the structure but arises primarily from the possibility to monitor the system continuously or frequently and regularly over long periods of time and to detect changes in the system. The following potentials were identified: (I) the determination of the structural condition and the quantification of the structural reliability, (II) the characterisation of the structural behaviour with the target of anomaly detection and (III) ensuring the remaining/residual service life.

Information extracted from monitoring applications and measurements can provide insights into the condition of structures, their components or damage mechanisms. This information is also referred to as Performance Indicator (PI). In order to generate “knowledge”, this data needs to be linked to other data and enable predictions about KPIs to finally generate value for the LCM in the overall context.

- KPIs were defined and mathematically described so that they can later be applied in the utility/cost function.
- It has been described how information for PI can be obtained through monitoring and used to identify and update KPIs. The potential of information-giving measures such as monitoring lies in reducing the uncertainties during condition assessment in order to identify appropriate maintenance measures for structures.
- With the updated KPIs and the utility/cost function, optimal measures can be identified at the structure level within the LCM framework. This in turn forms the basis for optimising the LCM at network level.

The life cycle of a bridge can be understood as a cycle from construction to dismantling including the measures of maintenance and repair. The connections between the life cycle of an individual bridge and the LCM of a bridge portfolio were explained

- The condition of bridges changes over time and the damage mechanisms dictate which measures are appropriate at which point in time. The prognosis of the condition development is the basis for any maintenance planning and the

necessary financial budget is directly connected to it. Different maintenance strategies are possible, whereby a trade-off between costs (incl. traffic disruption) and risks must be made.

- For each structure, it is necessary to assess when the right time for maintenance, repair or replacement is, and which alternative is most beneficial (for the time being) for this structure in the context of the road network. The decisions at each structure depend on the resulting KPI of the road section. An iterative approach, that constantly improves the planning and coordination between the different construction projects, is required. This involves assessing the remaining service life up to a significant intervention, which is one of the KPIs at the network level.

## **2) Development of the target concept and decision theory as well as implementation examples in life cycle management**

LCM is a process in which decisions are regularly made aiming to maximise the performance of an infrastructure network under given (or to be determined) resources. At the same time, many important influencing variables are not known and (are) subjected to uncertainties or natural variation (e. g. actions from traffic or environment). Therefore, LCM is an applied topic/subject/field of decision theory in civil engineering.

- The theoretical basis on which this practical implementation is based is presented. Further, the target concept for LCM is defined and a summary on risk-based decision theory in structural engineering is given. The utility/cost function for risk-based decision making in LCM is then formulated as a function of KPI.
- The basic principles presented apply across the board to the road, rail and waterway modes of transport.

An LCM is based on informed decision-making. Monitoring data can positively influence decision-making and information extracted from this data can be linked to PIs and KPIs.

- The logic of the connections/relationships between measures and decisions in LCM, monitoring and KPIs are explained. Thereby, the following aspects are addressed in more detail: clustering, relevant components, damage

mechanism, measures up to limit state, monitoring and derived KPIs.

- Clustering of structures with similar issues/questions/problems, initial situation and relevant components is a main tool for LCM to gain the overall picture on network level. The decisive damage mechanism must be specified for each cluster. Limit states must be defined for the remedial measures, at which point a particular measure is no longer appropriate. Furthermore, the monitoring method for detecting the limit states must be determined.
- Nine examples show how monitoring data is linked to PIs and KPIs and influences decision-making in LCM.

### 3) Development of a monitoring-based life cycle management

In LCM, monitoring data can significantly support decision-making at different starting points. The optimisations at the network level can raise questions about the quantification of risks for individual structures. By combining obtained monitoring data from similar structures of different ages or damage stages, forecast uncertainties can be reduced and the multi-year planning with investment needs becomes more reliable. This requires a target-oriented analysis of monitoring data, the definition of decision-making bases and the derivation of KPIs as well as an optimisation of structural maintenance along a route section.

- In particular, the optimisation of the LCM is realised by executing the measures together with the road section. The synchronisation of the condition of all bridges on a road section leads to a substantial reduction in traffic obstructions and a great increase in maintenance efficiency. The condition limits/boundaries/thresholds can be monitored in order to keep other structures of the same cluster in service for a longer period of time.
- Monitoring can be used to identify the risk of structural failure or further damage progress/development. For this purpose, three entry points for the application of monitoring are explained. These are in each case the same monitoring methods, which are triggered with different objectives. The remaining service life of bridges can be extended in compliance with the KPI reliability if the relevant measured quantities

are recorded and do not exceed the defined limit values.

- Assistance for the implementation of a monitoring-based LCM is prepared and the requirements for the operators are explained by analysing personnel resources, professional competences and technical tools/means/instruments with reference to the processes within the building authorities. This includes the competences and decisions at the interfaces between those responsible for different infrastructure components.
- In particular, the data basis, condition assessments, condition prognoses/forecasts/predictions, route sections and maintenance planning for the implementation of a monitoring-based LCM are addressed.

### 4) Conceptualisation of pilot studies to demonstrate the applicability of the concept to practice and to other transport carriers

In order to demonstrate the practical benefits and transferability to other modes of transport, first, an application study for image-based monitoring was designed and carried out, and secondly three further pilot study concepts were developed based on the presented principles/fundamentals of monitoring and the PI as well as the proposed concept for a monitoring-based LCM.

- The application study covers the monitoring of concrete surfaces damaged by the alkali-silica reaction with the aim of detecting damage and its progress development through visual (image-based) monitoring. In this context, the determination of the KPI remaining useful life from the PI crack width as well as questions from the perspective of the LCM are also dealt with in detail.
- The three pilot study concepts address typical issues (type of structure, damage mechanism, etc.) of bridge maintenance and include specific monitoring and investigation concepts. These comprise the selection of suitable reference objects with corresponding damage patterns, definition of the monitoring concept and instrumentation as well as the specification of information to be extracted as KPI for the LCM.
- The proposed LCM concept involves the application of monitoring data to improve decision-making in maintenance planning, first

and foremost by ensuring that the time for a cost-effective intervention measure is not missed. In a second step, the monitoring of individual structures will allow to postpone the time of intervention to a later combined measure within the framework/scope of a higher-level project, while ensuring the required reliability. The resulting advantages are relevant for all modes of transport and the concept can be transferred directly. The transferability of the concept to the rail and waterway modes of transport is presented in conclusion.

#### **5) Summary of the project results and identification of further need of research**

The project results were summarised and based on the findings, further need of research was identified.

## **4 Conclusions for practice**

Cost savings in structural maintenance are achieved in particular if necessary maintenance measures on bridges can be coordinated with the maintenance measures of a road section. A higher-level planning is therefore a necessity, which should be iteratively prepared on the basis of the remaining service life of the individual structures. In practice, this type of planning is currently not yet given sufficient weight or is not carried out consistently due to a lack of resources. Once maintenance plans are established, condition forecasts and associated predictions of KPI can be used to optimise the LCM. In practice, this means that for each structure and ideally each road section, an expected time of the next intervention (maintenance measure) must be defined. On this basis, a cost and risk reduction as well as an increase in availability in the network can be achieved with the introduction of monitoring measures. In that way, a transition from reactive to condition-based predictive maintenance management can be achieved. For the introduction (of predictive maintenance?), greater human resources are required until the structural data and condition forecasts are available.

The proposed methodology and existing models for condition forecasts can be applied in the LCM decision-making process with monitoring data on selected road sections, even before the LCM has been rolled out across the country. However, finding solutions and optimising planning requires knowledge and in-depth understanding of portfolio-

specific needs. The proposed application of monitoring within LCM will give timely notice of future maintenance measures and the technical advances in data transmission and data management with digital twins of the infrastructure will simplify the implementation/application/introduction through automatisisation of analysis processes. An intensive exchange of information between those responsible for similar bridges is recommended for the introduction, so that conclusions can be drawn from the monitoring data of other bridges for the estimation of the remaining service life of one's own structures and thus improve the forecasts of the network condition.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b> .....	13	3.3.1	Überblick .....	47
<b>2</b>	<b>Bauwerksmonitoring</b> .....	17	3.3.2	Aussagekraft und Potenzial von Monitoringsystemen.....	49
2.1	Einführung.....	17	<b>4</b>	<b>Definition und Quantifizierung von Key Performance Indikatoren</b> .....	50
2.2	Überblick Bauwerkserhaltung und Monitoring .....	17	4.1	Key Performance Indikatoren .....	50
2.3	Messungen, Messunsicherheit und Messwertverarbeitung.....	21	4.2	Key Performance Indikatoren im Monitoring .....	51
2.3.1	Definition Messung, Messfehler, Messunsicherheit.....	21	4.3	Quantifizierung von Key Performance Indikatoren .....	52
2.3.2	Messkette, Abtastung und AD-Wandlung.....	22	4.4	Quantifizierung des Nutzens von Key Performance Indikatoren für das LZM .....	57
2.4	Technologien des Monitorings .....	22	4.4.1	KPI Zuverlässigkeit .....	57
2.4.1	Bauwerksmonitoring: ein Kreislauf.....	22	4.4.2	KPI Verfügbarkeit.....	57
2.4.2	Messtechnik .....	23	4.4.3	KPI Restnutzungsdauer .....	58
2.4.3	Tragverhalten .....	23	4.4.4	KPI Wartungsfreundlichkeit.....	58
2.4.4	Umwelteinflüsse.....	26	4.4.5	KPI Finanzierungsbedarf .....	58
2.4.5	Faseroptische Sensoren .....	27	4.5	PI und KPI in Verbindung mit Monitoring ..	59
2.4.6	Optimale Sensorauswahl und Sensoranordnung .....	29	4.6	Modelle für KPI und Model Updating .....	59
2.4.7	Charakterisierung eines Ingenieurbauwerks: Beispiel .....	30	4.7	Modellierung von Monitoring.....	62
2.5	Auswertung von Monitoringdaten .....	31	4.8	Unsicherheit und Wert von Monitoring .....	63
2.5.1	Datenerfassung, -übertragung und -verwaltung .....	31	4.8.1	Einfluss der Messungengenauigkeit auf die a-posteriori Verteilung .....	63
2.5.2	Datenverarbeitung .....	33	4.8.2	Nutzen des Monitoring (Vol) .....	63
2.5.3	Etablierte Monitoring-Techniken.....	33	<b>5</b>	<b>Lebenszyklusmanagement</b> .....	65
2.6	Trends und zukünftige Entwicklungen .....	36	5.1	Einführung.....	65
<b>3</b>	<b>Monitoring – Anwendung, Aussagekraft und Potenziale</b> .....	37	5.2	Zustandsentwicklung und Zustandserfassung .....	68
3.1	Zielgrößen beim Bauwerksmonitoring .....	37	5.3	Erhaltungsstrategien .....	69
3.2	Anwendung von Monitoring in der Bauwerkserhaltung .....	38	5.4	Randbedingungen und Optimierung der Erhaltung.....	70
3.2.1	Aktuelle Anwendungen und Zielstellung ..	38	<b>6</b>	<b>Zielkonzeption und Entscheidungstheorie im Lebenszyklusmanagement</b> .....	71
3.2.2	Ausgewählte Monitoringprojekte.....	40	6.1	Zielkonzeption des Lebenszyklus- Managements .....	71
3.2.3	Typische Schäden und kritische Zustände.....	44	6.2	Entscheidungstheorie im Bauwesen.....	73
3.3	Aussagekraft und Potenzial von Monitoring .....	47	6.2.1	Entscheidungen unter Unsicherheiten .....	73
			6.2.2	Bayes'sche Entscheidungstheorie .....	74

6.3	Formulierung der Nutzenfunktion.....	74	<b>9</b>	<b>Implementierung des Konzeptes und Anforderungen an Betreiber</b> .....	94
6.3.1	KPI und Nutzenfunktion .....	74	9.1	Datengrundlage .....	95
6.3.2	Investitionsrechnung .....	76	9.2	Zustandsbeurteilungen .....	95
6.4	Lebenszyklus-Management unter Unsicherheiten .....	77	9.3	Zustandsprognosen .....	96
6.4.1	Prinzipien zum Lebenszyklusmanagement .....	77	9.4	Streckenabschnitte .....	96
6.4.2	LZM-Prozess (Risiko-Management-Prozess).....	77	9.5	Erhaltungsplanung .....	97
6.4.3	Managementwerkzeuge (Tools).....	78	9.6	Monitoring .....	97
<b>7</b>	<b>Implementierungsbeispiele von Monitoring im Lebenszyklusmanagement</b> .....	80	<b>10</b>	<b>Pilotstudien</b> .....	98
7.1	Zusammenhänge zwischen LZM, Monitoring und KPIs.....	80	10.1	Anwendungsstudie – bildbasiertes Monitoring zur Schadensdetektion und Überwachung der Schadensfortschrittentwicklung .....	98
7.1.1	Cluster.....	81	10.1.1	Bildbasiertes Monitoring an der Talbrücke Brunn .....	98
7.1.2	Relevante Bauteile .....	82	10.1.2	Ermittlung der Restnutzungsdauer auf Basis der Rissbreite .....	102
7.1.3	Schädigungsmechanismen.....	82	10.1.3	Mögliche Verwendung eines bildbasierten Monitorings im LZM .....	106
7.1.4	Grenzzustand für Maßnahmen .....	83	10.2	Pilotstudienkonzepte.....	107
7.1.5	Monitoring .....	85	10.2.1	Konzeption Pilotstudie „Straße“ – Sensorbasiertes Monitoring .....	107
7.1.6	KPIs .....	85	10.2.2	Konzeption Pilotstudie „Schiene“ – Detektion und Überwachung von Bauwerksverformungen .....	109
7.2	Beispiele .....	85	10.2.3	Konzeption Pilotstudie „Wasserstraße“ – Beispiel Schleusenanlage.....	112
<b>8</b>	<b>Konzept für ein Monitoring-basiertes Lebenszyklusmanagement</b> .....	88	<b>11</b>	<b>Übertragung des Konzeptes auf die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße</b> .....	115
8.1	Ansatzpunkte für Einsatz von Monitoring..	88	<b>12</b>	<b>Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf</b> .....	116
8.1.1	Beurteilung der Restnutzungsdauer pro Bauwerk .....	88	12.1	Zusammenfassung .....	116
8.1.2	Schädigungsmechanismen und Zustandsgrenzen eines Bauteils .....	90	12.2	Weiterer Forschungsbedarf .....	119
8.1.3	Quantifizierung des Risikos und der Nutzerkosten.....	90	<b>Literatur</b> .....		120
8.2	Optimierung des LZM im Streckenabschnitt.	91	<b>Bilder</b> .....		132
8.2.1	Aufbau des LZMs für Brücken .....	91	<b>Tabellen</b> .....		134
8.2.2	Lebenszyklusmanagement Brücken auf Netzebene.....	93	<b>Anhang</b> .....		135
8.3	Entscheidungsgrundlagen und Aufbereitung KPI .....	93			
8.3.1	KPI Zuverlässigkeit .....	94			
8.3.2	KPI Lebenszykluskosten.....	94			
8.3.3	KPI Verfügbarkeit.....	94			

## 1 Einleitung und Motivation

Die dauerhafte Sicherstellung der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur unter kontinuierlich steigenden Beanspruchungen durch z. B. Verkehrszunahme, höhere Fahrzeuglasten und häufigere Extremwetterereignisse stellt eine enorme Herausforderung für die deutsche Volkswirtschaft sowie für die Betreiber von Infrastrukturbeständen dar. Die gesellschaftliche Verpflichtung zur Ressourcenschonung erfordert zudem die Verlängerung von Nutzungsdauern durch eine strategische und effiziente Bauwerkserhaltung wo diese sinnvoll möglich ist.

Als wesentliche Grundlage für eine effektive Bauwerkserhaltung ist die Bauwerksprüfung etabliert. Sie realisiert eine Erfassung des Bauwerkszustandes und erlaubt die Identifikation notwendiger Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen. Die Bauwerksprüfung muss systematisch über die gesamte Betriebs- und Nutzungsphase des Bauwerks erfolgen, die den wesentlichen Teil im Lebenszyklus eines Bauwerks abbildet. Konventionelle Verfahren der Bauwerkserhaltung verknüpfen Prüfergebnisse und Erhaltungsmaßnahmen jedoch reaktiv, indem Prognosen über die bisherige und zukünftige zeitliche Entwicklung von Schädigungen kaum eine Rolle spielen. Dies ist hauptsächlich in der zeitlich diskreten Zustandserfassung und in der analogen Aufnahme, Auswertung und Verwaltung von Zustandsinformationen begründet.

Moderne Verfahren der digitalen Zustandserfassung mittels Monitoringverfahren, der digitalen und automatisierbaren Datenauswertung und Schadensdetektion sowie der Ableitung prognostischer Zustandsindikatoren mittels parametrisierter Zustandsentwicklungsmodelle erlauben zukünftig den Übergang zu prädiktiven Methoden der Erhaltung (Predictive Maintenance). Diese Vorhersage von Zustandsentwicklungen und von erforderlichen Interventionen ermöglichen ein neuartiges Lebenszyklusmanagement (LZM), das die Sicherstellung der an das Bauwerk gestellten Anforderungen mit der systematischen Planung von Investitionen und Maßnahmen verknüpft. Infrastrukturbetreiber können diese Strategien vom Einzelbauwerk auf den gesamten Bauwerksbestand ausweiten, um zu einer modernen Verwaltung ihres Infrastrukturbestandes, z. B. durch den Einsatz digitaler LZM-Systeme, zu gelangen.

Für ein LZM müssen die relevanten Zustandsinformationen zu einem Zeitpunkt vorliegen, der ein rechtzeitiges Auslösen von Einzelmaßnahmen und das Abschätzen des Umfangs der Arbeiten über den gesamten Brückenbestand ermöglicht, damit die erforderlichen Finanzmittel eingeplant und bereitgestellt werden können. Sofern die verfügbaren Haushaltsmittel die Menge an ausführbaren Maßnahmen beschränken, muss eine Priorisierung und Begrenzung auf die kritischsten Bauwerke erfolgen. Diese Priorisierung gemäß finanzieller Randbedingungen führt dazu, dass nicht die optimale Maßnahme mit den niedrigsten Lebenszykluskosten ausgeführt werden kann, solange die zur Verfügung gestellten Mittel geringer als der effektive Finanzbedarf sind. Ferner ist die Verknüpfung der Bauwerke im Verkehrsnetz bei der Durchführung von Maßnahmen zu beachten, was eine Behandlung von Streckenabschnitten zur Folge hat, und eine Effizienzsteigerung erlaubt. Zusätzlich sind weitere Daten zur optimalen Erhaltungsplanung erforderlich wie zum Beispiel: Traglastindex, Bauwerksalter sowie Lage im Netz des Bauwerks inkl. Verkehrsbelastung. Außerdem ist zu berücksichtigen, ob die ausgeschriebenen Leistungen von der Bauwirtschaft überhaupt durchgeführt werden können (Kapazität der Planung und Ausführung). Angebot und Nachfrage sind hierbei letztendlich auch kostenrelevante Größen. Für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Erhaltungsmaßnahmen steht in Deutschland mit der RI-WI-BRÜ [1] eine Richtlinie bereit.

Eine Kostenoptimierung kann am effektivsten erreicht werden, wenn die Zustandsveränderungen (Degradation bzw. fortschreitende Schädigung), welche bauliche Maßnahmen auslösen werden, möglichst frühzeitig erkannt und verlangsamt werden. Ebenso werden die Kosten reduziert, wenn diese Maßnahmen mit genügender Vorlaufzeit vorbereitet werden können, sodass sie optimiert für Teilabschnitte und mit den vorhandenen Kapazitäten der Bauwirtschaft umgesetzt werden können. Auf diese Weise kann die Effizienz der eingesetzten Mittel für den Bauwerksbestand gesteigert werden. Daher müssen zunächst die großen Kostenpositionen der kommenden Jahre identifiziert werden. Zusätzlich muss dokumentiert werden, aus welchem Grund die jeweilige Maßnahme erforderlich wird. Dabei gibt es primär zwei unterschiedliche Situationen, bei denen z. B. ein Monitoring als Methode zur Zustandsbewertung einen Mehrwert generiert:

- 1) Um die Unsicherheiten der in der Beurteilung des Bauwerkes bzw. Bauwerkszustandes getroffenen Annahmen mit zusätzlichen Informationen, d. h. durch zusätzlich generiertes Wissen, zu reduzieren, sodass die Umsetzung von Maßnahmen kontrolliert verzögert werden kann und dank einer konsistenten Priorisierung der Maßnahmen Belastungsspitzen verhindert werden, welche die vorhandenen Kapazitäten der Bauwirtschaft und der zuständigen Behörden übersteigen.
- 2) Um verhältnismäßig kleine Maßnahmen auslösen zu können, damit das Bauwerk zu einem späteren, günstigeren Zeitpunkt ertüchtigt oder wenn erforderlich ggf. ersetzt werden kann.

Der Umgang mit beiden Fällen setzt die Kenntnis des Folgenden voraus:

- 1) tragsicherheitsrelevante Eigenheiten der jeweiligen Brückentypen und deren Schwachstellen bezüglich der Zustandsentwicklung,
- 2) Art der Veränderung von Eigenschaften des betroffenen Bauteils durch den Schädigungsprozess und die Definition, wann ein Grenzwert erreicht ist, sowie
- 3) Möglichkeiten der messtechnischen (physikalisch/chemisch) oder visuellen Detektion dieser Eigenschaftsveränderung.

Für die Definition des Grenzzustandes ist zudem Kenntnis über die Methoden zur Behebung des Schadens erforderlich. Oft ist nicht nur die Tragsicherheit relevant, sondern die Frage, ab welchem Zeitpunkt eine größere Maßnahme erforderlich sein wird, weil die zuvor geplante Instandsetzungsmethode nicht mehr einsetzbar oder zielführend ist.

Wie bereits erwähnt, erfordert der sichere Betrieb und die dauerhafte Erhaltung von Bauwerken eine regelmäßige und zuverlässige Bewertung des Bauwerkszustandes als Grundlage für Prognosen zur Zustandsentwicklung und die frühzeitige Ableitung optimierter Erhaltungsmaßnahmen. Als Folge dessen werden Zustandsdaten im Rahmen von Bauwerksprüfungen erhoben, die in Deutschland durch die DIN 1076 [2] geregelt sind. Darüber hinaus haben sich vielfältige moderne digitale Verfahren des Bauwerksmonitorings etabliert, die genaue Daten in Echtzeit liefern können, jedoch bisher nur punktuell und meist anlassbezogen eingesetzt werden. Die Herausforderung besteht darin, die notwendige

Qualität der Daten mit den erforderlichen zeitlichen Intervallen zu definieren, damit mit einem möglichst geringen Monitoringaufwand die Entscheidungen rechtzeitig gefällt werden können. Dies ist nicht Inhalt dieses Projektes und muss in weiteren Forschungsvorhaben und Pilotstudien untersucht und in Form von bindenden Handlungsanweisungen festgeschrieben werden. In diesem Projekt wird das Vorgehen im Rahmen einer Pilotstudie vorgestellt. In dieser wird ein Vorschlag zur Verwendung von qualitativ hochwertigen Bilddaten für ein bildbasiertes Monitoring vorgelegt.

Der sinnvolle, und potenziell zukünftig verstärkte, Einsatz von Monitoringmethoden erfordert zwingend die Spezifikation von Zielkenngrößen im Kontext eines LZMs, die durch das Monitoringsystem zu liefern sind. Diese Erkenntnis wurde aus vielfältigen Monitoringprojekten gewonnen, bei denen zwar umfangreiche und teilweise kostenintensive Technik verbaut und vielfältiges Datenmaterial generiert wurde, ein Mehrwert und konkrete belastbare Aussagen jedoch nicht ohne Weiteres erzeugt werden konnten. Dies war u. a. Anlass für die europäische COST-Action TU1406 (Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level (BridgeSpec)), die sich damit beschäftigt hat, wie sich die Zustandsbewertung von Straßenbrücken quantitativ beschreiben lässt [3], [4]. Als zentrale Zielsetzung wurde die Entwicklung von Qualitätsmaßstäben in Form von Zustandsindikatoren (Performance Indikator) verfolgt. Parallel dazu beschäftigte sich die COST-Action TU1402 (Quantifying the value of structural health monitoring) mit der Frage, wie der „Wert der Information“, der aus bestimmten Erfassungs- und Bewertungssystemen resultiert, quantifiziert werden kann, siehe dazu die Zeitschrift Structural Engineering International (Ausgabe 28, 3/2018) - The Value of Health Monitoring in Structural Performance Assessment. Im BAST Projekt FE 89.0331 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen - Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten [5] wurden bereits erste Aspekte dazu bearbeitet, die bei der Bearbeitung dieses Projektes Berücksichtigung fanden.

Im Ergebnis der vielfältigen Aktivitäten lässt sich konstatieren, dass das Erhaltungsmanagement von Verkehrsinfrastrukturbauwerken im Allgemeinen und von Brücken im Besonderen durch Monitoring effizienter, zielgerichteter und zuverlässiger gestaltet werden kann. Dies erfordert ein auf den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes ausgerichtetes

nachhaltiges LZM, das indikatorgestützte Auswertungs-, Bewertungs- und Entscheidungsprozesse vorsieht.

Ziel dieses Projektes ist es, aufzuzeigen, mit welchen Informationen aus kostenwirksamen Monitoringmaßnahmen die Bauwerkszustandsdaten und Prognosen, welche mehrheitlich aus den konventionellen Bauwerksprüfungen stammen, ergänzt werden können, um die Entscheidungen in einem modernen LZM verbessern zu können. Hierfür wurde ein Konzept entwickelt, mit dem die Potenziale von Monitoringdaten in einem LZM quantifizierbar und realisierbar werden. Dabei standen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Aufbereitung und Integration der Ergebnisse aus der COST TU1402 und 1406 in das neue Konzept.
- Berücksichtigung der Vorschläge und Methoden aus dem BAST-Projekt FE 69.0002 Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden indikatorgestützten Lebenszyklusmanagementsystems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur [6] und dem BAST-Projekt FE 89.0331 „Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten“ [5].
- Berücksichtigung einer automatisierbaren Generierung, Aufbereitung, Auswertung und konsistenten Speicherung digitaler Daten und der daraus extrahierten Informationen. Aussagekräftigen Indikatoren wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Hierzu wurden Konzepte des digitalen Zwillings bzw. BIM genutzt, um die Provenienz der Daten über den Lebenszyklus systematisch umsetzen zu können und proprietäre Datenentitäten und herstellereigentliche In-sellösungen zu vermeiden.
- Besondere Berücksichtigung der Anforderungen der in der Praxis tätigen Personen, d. h. vor allem der mit der Zustandserfassung betrauten sowie für erhaltungsbezogene Entscheidungen verantwortlichen Mitarbeiter.

Aus den o. g. Projekten ist klar ersichtlich, dass viele der relevanten Zustandsinformationen und Schädigungseffekte sehr unterschiedlicher Natur sind. Je nach Brückentyp, Lebenszyklusabschnitt und Fragestellung (Schadensbild und -grad) können unterschiedliche Monitoringmethoden im Vordergrund stehen. Der überwiegende Anteil der Zustandsveränderungen an einem Bauwerk kann rein visuell er-

fasst und geometrisch charakterisiert werden. Aufbauend auf den speziellen Kompetenzen der Projektpartner wurde das entwickelte Konzept prototypisch auf digital, z. B. mit Drohnen, erfasste Bilddaten und darin detektierte Schadensmerkmale angewendet. Dabei wurde u. a. auf die Ergebnisse des BAST-Projektes FE 89.0334/2017 „Unterstützung der Prüfung gemäß DIN 1076 durch (halb-) automatisierte Bildauswertung u. a. mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicles)“ [7] zurückgegriffen. Aus parallelen Projekten, wie z. B. dem mFUND-Vorhaben „nVisDa – Strukturen für eine konsistente Bauwerksprüfung mit digitalen Bildern und Data Analytics“ (FKZ: 19F2156A) [8], in die die Projektpartner eingebunden waren, konnten ebenfalls wichtige Ergebnisse zur Betrachtung einer digitalen Bauwerkprüfung, u. a. auf Basis von Bilddaten, genutzt werden.

Die Motivation zu diesem Forschungsvorhaben ist zunächst in den möglichen monitoringbasierten Effizienzsteigerungen im Prozess der Bauwerkserhaltung mit Bezug zum LZM und einer Kostenoptimierung begründet. Ein wesentlicher Faktor ist aber auch der aktuelle Zustand und die prognostizierte Zustandsentwicklung der Bestandsinfrastruktur. Die Altersstruktur, die zeitliche Entwicklung der Zustandsnoten und die Verteilung des Traglastindex in Abhängigkeit der Zustandsnoten ist in Bild 1-1 und Bild 1-2 für Bestandsbrücken entsprechend dem aktuellen Bericht zum Stand der Modernisierung von Brücken der Bundesfernstraßen [9] dargestellt. Es wird deutlich das mit ca. 25 % (Anteil an Brückengesamtfläche) ein wesentlicher Teil der Bauwerke älter als 50 Jahre ist und sich damit bereits in der zweiten Hälfte der zu erwartenden Lebensdauer befindet. Von besonderem Interesse sind insbesondere die Bauwerke mit einer Zustandsnote schlechter 3,0, die häufig bereits strukturelle Mängel aufweisen. Hier kann ein gezieltes Monitoring zur Substanzerhaltung beitragen, da eine weitere Verschlechterung des Bauwerkszustandes schnell erkannt und zielgerichtet mit Blick auf die mögliche Umsetzung von Maßnahmen der baulichen Unterhaltung bewertet werden kann.

### **Aufbau des Forschungsberichtes**

Der vorliegende Forschungsbericht gliedert sich in 12 Kapitel. In den Kapiteln 2 bis 4 werden zunächst die erforderlichen Grundlagen für das erarbeitete Konzept für ein Monitoring-basiertes Lebenszyklusmanagement erläutert. Dabei wird in Kapitel 2 genauer auf das Bauwerksmonitoring eingegangen

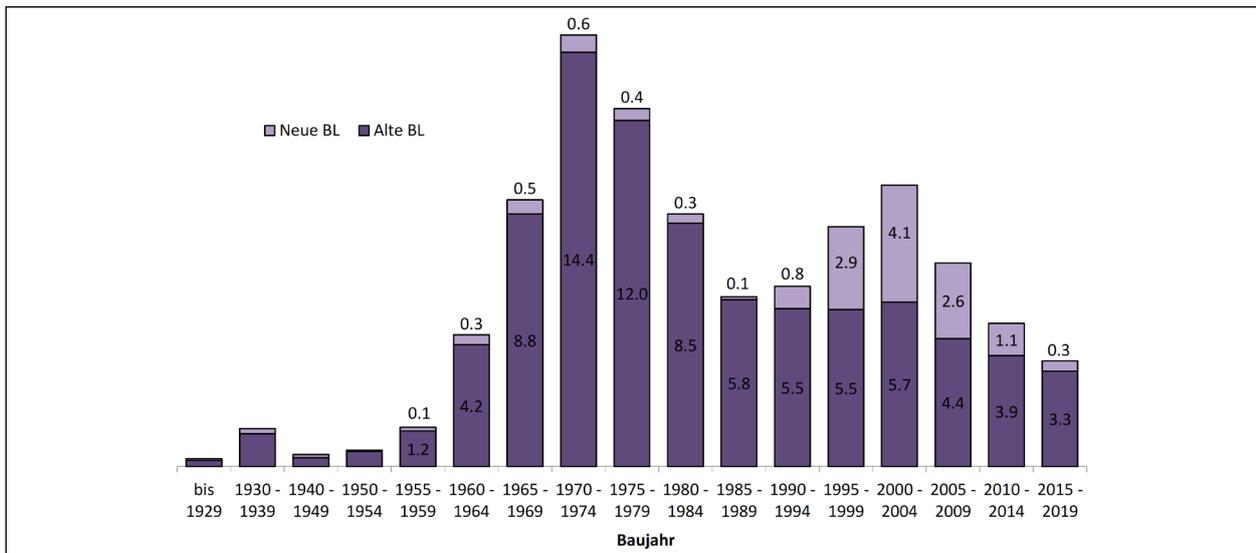


Bild 1-1: Altersstruktur der Bestandsbrücken der Bundesfernstraßen nach dem Anteil an der Gesamtbrückenfläche in % mit Stand 01.09.2020 [9]

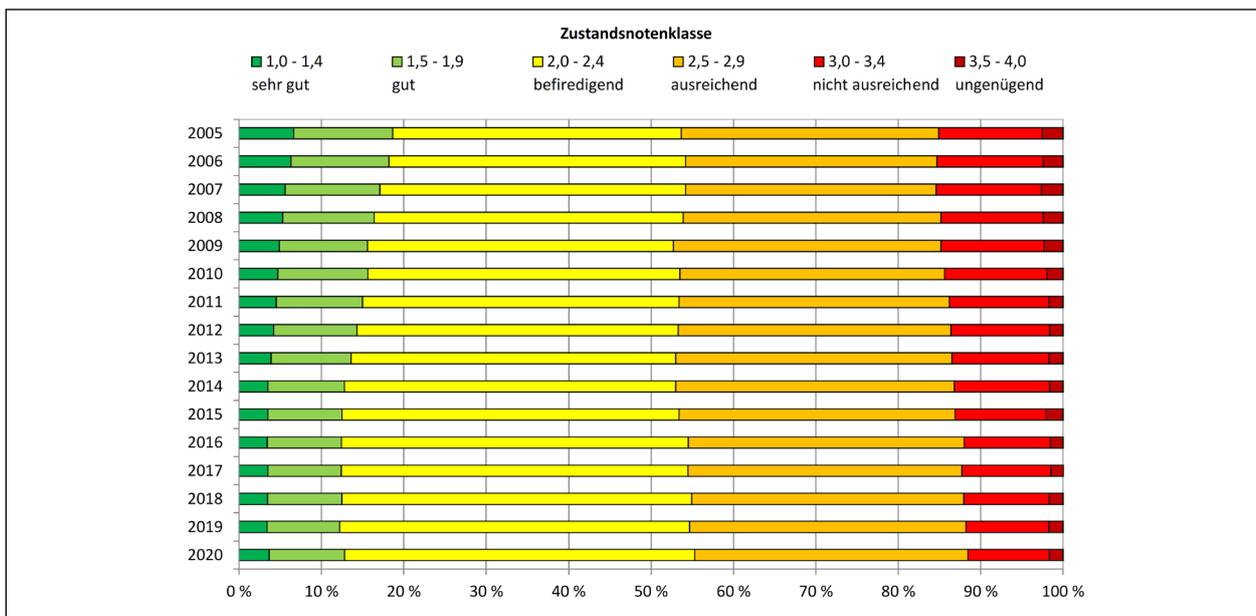


Bild 1-2: Verteilung der Zustandsnoten für Bestandsbrücken der Bundesfernstraßen nach dem Anteil an der Gesamtbrückenfläche in % mit Stand 01.09.2020 [9]

und in Kapitel 3 ein Überblick zum Einsatz von anlassbezogenem Monitoring in der Praxis und deren Aussagekraft gegeben. In Kapitel 4 wird auf die Konzeption, Definition, Quantifizierung und Nutzung von Indikatoren (PI und KPI) eingegangen. In den sich anschließenden Kapiteln wird auf den eigentlichen Begriff des Lebenszyklusmanagements (Kapitel 5) sowie die Zielkonzeption und Entscheidungstheorien im LZM (Kapitel 6) eingegangen und anhand von Implementierungsbeispielen von Monitoring im LZM (Kapitel 7) dargestellt. Kern dieses Vorhabens bildet die Erarbeitung eines Konzeptes für ein Monitoring-basiertes Lebenszyklusmanagement, das in Kapitel 8 eingehend beschrieben wird.

Die erforderlichen Ansätze zur Implementierung des Konzeptes sowie die Anforderungen an den Betreiber werden in Kapitel 9 zusammengefasst. Kapitel 10 umfasst die Erarbeitung und Konzeption von drei anwendungsnahen Pilotstudien, die die Umsetzbarkeit des in Kapitel 8 entwickelten Konzeptes demonstrieren sollen. In diesem Kapitel wird zudem auf Basis vorhandener Datensätze in einer eigenen Anwendungsstudie das Potenzial eines bildbasierten Monitorings im LZM vorgestellt. Die inhaltliche Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens wird mit der Auseinandersetzung bezüglich der Übertragbarkeit des entwickelten Konzeptes auf die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße in Kapi-

tel 11 abgeschlossen. In Kapitel 12 werden die Forschungsarbeiten und erzielten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf benannt.

## 2 Bauwerksmonitoring

Dieses Kapitel gibt einen umfassenden Überblick zum Thema Bauwerksmonitoring. Dazu wird das Monitoring nach einer kurzen Einführung von der traditionellen handnahen Bauwerksprüfung und -überwachung nach DIN 1076 [2] abgegrenzt. Anschließend wird auf die Erfassung von Messdaten und deren Einflussgrößen im Zusammenhang mit Messunsicherheiten eingegangen. Den Hauptteil des Kapitels bilden die umfangreichen Darstellungen zu verfügbarer Messtechnik und der Auswertung von Monitoringdaten. Der Überblick typischer Sensorik zur Überwachung von Infrastrukturbauwerken orientiert sich dabei an den verschiedenen Messgrößen zur Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens sowie der Umwelteinflüsse. Auf den Aspekt der optimalen Sensorauswahl und -anordnung wird kurz eingegangen. Neben der sensorbasierten Datenerfassung wird auch die Auswertung der Monitoringdaten ausführlich betrachtet.

Kapitel 2 bildet die Grundlage für den Überblick anlassbezogener Monitoringprojekte und deren systematischer Auswertung in Kapitel 3.

### 2.1 Einführung

Wesentliche Ziele des Einsatzes von Monitoringssystemen sind einerseits die Erfassung der tatsächlich am Bauwerk auftretenden Einwirkungen und andererseits die Detektion, Lokalisierung und quantitative Charakterisierung von Degradationsprozessen als Ergänzung konventioneller Bauwerksprüfungsmethoden [10]. Aus den rohen Messdaten sind Informationen zu extrahieren, die eine Identifizierung und Dokumentation von Veränderungen des Trag- und Verformungsverhaltens und ggf. Schäden am Bauwerk mit dem Ziel der Zustandsbewertung ermöglichen.

Während mit modernen Verfahren der Datenauswertung heute vielfältige Informationen zuverlässig ermittelt werden können, bleiben die höheren Ebenen – insbesondere die probabilistisch abgesicherte Standsicherheitsbewertung – noch sehr speziali-

sierten Einzelfallproblemen vorbehalten, d. h. dies wird nur äußerst fokussiert und anlassbezogen umgesetzt. Für eine allgemeine Standsicherheitsbewertung auf Basis digitaler Monitoringdaten sind der komplementäre Einsatz verschiedener Erfassungsmethoden nötig, wie dies zum Beispiel im aktuellen Großforschungsvorhaben AISTEC [11] erforscht wird [12],[13].

Die begrenzten Einsatzszenarien des Monitorings in Bezug auf eine Tragwerksbewertung lassen sich auch in aktuellen Regelwerken wie der Nachrechnungsrichtlinie sowie dem DBV-Merkblatt Brückenmonitoring erkennen. Hier werden Konzepte von Monitoringsystemen und Strategien zur Berücksichtigung von Monitoringdaten benannt, aber keine allgemeingültigen Methoden zur quantitativen Sicherheitsbewertung von Tragwerken zur Verfügung gestellt.

### 2.2 Überblick Bauwerkserhaltung und Monitoring

#### Konventionelle Bauwerksüberwachung und -prüfung

Ingenieurbauwerke und kritische Infrastrukturbauwerke mit erhöhtem Gefahrenpotenzial werden in Deutschland normativ geregelten Überprüfungen unterzogen. Mit der DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung [2] existiert für das Ressort Straße ein Regelwerk zur kontinuierlichen Überwachung von Ingenieurbauwerken hinsichtlich der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. Mit einer einheitlichen Begriffsdefinition wurde die Grundlage für die Erfassung von Bauwerks- und Prüfdaten geschaffen, die vergleichende Betrachtungen über die Zeit und somit eine Ermittlung der Zustandsentwicklung ermöglichen. Die Dokumentation dieser Daten erfolgt im Programmsystem SIB Bauwerke (Straßeninformationsbank) [14]. Darauf aufbauend wurde auch durch die RI-EBW-PRÜF [15] die Grundlage für die Bewertung der Prüfergebnisse, die in Zustandsnoten mündet, geschaffen. Die DIN 1076 schreibt eine visuelle, handnahe Prüfung der Bauwerke vor und regelt darüber hinaus deren Inhalt und die Prüfintervalle. Grundsätzlich erfolgt die eingehende Hauptprüfung von Ingenieurbauwerken alle 6 Jahre. Einfache (Sicht-) Prüfungen innerhalb dieses Zeitraumes unterstützen die Zustandsüberwachung. Die Prüfmethodik ist für die Standardaufgaben geregelt. Darüber hin-

ausgehende Sachverhalte zur Zustandsermittlung sind im Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA) in der RI-ERH-ING [16] empfohlen. Der Leitfaden OSA sieht keine Regelung für die Auswahl der zur Anwendung kommenden Methoden und Werkzeuge vor, sodass dieselbigen in der Verantwortung des Bauwerksprüfers bzw. des Baulastträgers liegt. Mit der Broschüre Bauwerksprüfung [17] und den Lehrfilmen zur Bauwerksprüfung [18] wird die verantwortungsvolle Aufgabe dargestellt. Für die Bauwerksprüfung wird ausschließlich speziell geschultes und zertifiziertes Fachpersonal eingesetzt. Dies gilt für Prüfer, die bei den Bauverwaltungen eingesetzt sind ebenso, wie für Prüfer, die in Ingenieurbüros tätig sind und diese Aufgaben im Auftrag der Bauverwaltungen erfüllen.

### **Bauwerksmonitoring – Structural Health Monitoring**

Parallel zur konventionellen Bauwerksprüfung haben sich inzwischen weitere Methoden der Bauwerksüberwachung in der Praxis etabliert. Hier ist primär das Bauwerksmonitoring zu nennen. Mit dem DBV-Merkblatt Brückenmonitoring [19] vom August 2018 sind bereits Handlungsanweisungen für die Planung und Ausschreibung von Monitoringmaßnahmen veröffentlicht. Im DBV-Merkblatt wird Monitoring als Gesamtprozess einer systematischen Überwachung von Bauwerksreaktionen und / oder Einwirkungen definiert, welcher durch ein Monitoringkonzept festgelegt und auf die Erfassung einer zeitlichen Entwicklung einer aussagkräftigen physikalischen Größe abzielt.

Alle bisher genannten Sachverhalte sind aktuelle praxisrelevante und erprobte Methoden. Es ist zusätzlich eine Vielzahl von theoretischen Entwicklungen auf diesem Gebiet in Arbeit. Diese reichen von Applikatoren Forschungen (Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn) [20] bis zu Grundlagenforschungen (CoolCarbon Concrete). Hinzu kommt die rasante Entwicklung der unterstützenden Hard- und Software, die Methoden der künstlichen Intelligenz, Machine Learning und der Virtual und Augmented Reality. Technologien, die sich mit Big Data und Smart Data beschäftigen, gehören als intelligente Auswertemethoden in diese Kategorie, siehe [21]–[29].

Das Bauwerksmonitoring hat in der Regel die Aufgabe, den strukturellen Zustand des Tragwerks und bzw. oder die Einwirkungen über längere Zeiträume zu erfassen. Im Allgemeinen bezieht sich der Begriff Structural Health Monitoring (SHM) auf den Pro-

zess der kontinuierlichen oder regelmäßigen messtechnischen Überprüfung einer Struktur, um Veränderungen im Zustand oder in der Umgebung der Struktur zu überprüfen und festzustellen [30]. Nachfolgend wird der Begriff Monitoring verwendet. Der übergeordnete Zweck des Monitorings ist die Feststellung der strukturellen Gesundheit, d. h. Abweichungen vom angenommenen oder erwarteten strukturellen Verhalten, welches durch Verschlechterung, Beschädigung, Umweltbedingungen oder eine andere Quelle verursacht werden. Diese Abweichung wird als Schaden verstanden. Dabei ist die Schadensidentifikation der Schlüssel zum Monitoring. Sie beinhaltet die Feststellung des Vorhandenseins, der Lage, der Art und des Schweregrades eines Schadens [31]. Darüber hinaus beinhaltet das Monitoring auch die Prognose der zukünftigen Entwicklung des Schadens und das Datenmanagement, wie nachfolgend in Bild 2-4 in Kapitel 2.4.1 dargestellt.

Ursprünglich wurden Monitoringsysteme an Brücken installiert und eingesetzt, um zur Lösung spezifischer Probleme (z. B. Überlastung, Ermüdung) beizutragen oder um Defekte zu überwachen, die sich selbst manifestieren oder durch andere Mittel identifiziert wurden (z. B. Sichtprüfung, Größenänderung und / oder Lastmuster).

In den letzten Jahren gibt es jedoch einen zunehmenden Trend, von diesem reaktiven Ansatz für Monitoring zu einem eher prädiktiven und ganzheitlichen Ansatz überzugehen, der Monitoring in eine Gesamtmethodik für bestehende Strukturen integriert (siehe auch [32], [33] und [34]). Monitoring ermöglicht die Überwachung einer großen Anzahl von Brücken über ihren gesamten Lebenszyklus, um ihre Unterhaltung und Instandsetzungen besser zu planen und Schäden und Defekte zu vermeiden, bevor sie tatsächlich auftreten. Dieser Trend spiegelt sich in den jüngsten Großforschungsprojekten wie Sustainable Bridges [35], MAINLINE [36], SMARTRAIL [37] oder Intelligente Brücke [38], [39], [40] wieder und ermöglicht die Nutzung dieser Informationen in einem LZM.

Der Einsatz digitaler Technologien erweitert die konventionelle Bauwerksinspektion um die Möglichkeit einer permanenten oder semi-permanenten dauerhaften Erfassung von Zustandsdaten. Hierzu können vor allem kabelgebundene oder drahtlose Sensorsysteme sowie bildgebende Verfahren eingesetzt werden.

### Sensorbasiertes Monitoring

Moderne Sensorsysteme erlauben die hochgenaue und zuverlässige Messung verschiedenster physikalischer Größen. Das Bauwerksmonitoring mit Fokus auf den Bauwerkszustand hat in den vergangenen 20 Jahren einen enormen Aufschwung erfahren, insbesondere da Hardware und Datenspeicherung günstiger sowie Auswertelgorithmen leistungsfähiger geworden sind. Aktuelle Weiterentwicklungen, z. B. der Autoren, fokussieren auf Messungen mit mobilen Sensorsystemen oder permanent installierten drahtlosen Sensornetzwerken [25], [41].

Digitale Monitoringstrategien beruhen fundamental auf der Extraktion von zustandsbezogenen Kenngrößen, die sich aus den rohen Sensordaten extrahieren lassen. So lassen sich beispielsweise aus Zeitreihen von Schwingungen, aufgenommen mit Beschleunigungssensoren am Überbau einer Brücke, eine Vielzahl der charakteristischen Eigenfrequenzen durch Spektralanalyse ermitteln. Unter höherwertigen Systemidentifikationsverfahren wie der Stochastic Subspace Identification (SSI) können aus mehreren verteilt aufgenommenen Zeitreihen auch zugehörige Eigenformen extrahiert werden. Durch Verknüpfung mit numerischen Modellierungs- und Simulationsmethoden wie der Finite Elemente Methode (FEM) können dann unter Anwendung von Modell-Update-Verfahren Veränderungen im mechanischen System, z. B. durch Rissbildung hervorgerufene Steifigkeitsdegradationen, aus den Veränderungen des Eigenschwingungsverhaltens identifiziert werden. Dieses Beispiel soll illustrieren, wie mathematische Algorithmen und parametrisierte modellbasierte Ansätze verwendet werden, um aus rohen Daten (Datenreihen des Sensors) Zustandsinformationen (Stärke der Rissbildung, Anzahl ausgefallener Spannglieder) gewonnen werden können. Gleichwohl muss konstatiert werden, dass die genannten Verfahren noch vielfältiger wissenschaftlicher Arbeiten bedürfen, um für allgemeine Degradationsphänomene zuverlässige Aussagen über den aktuellen Systemzustand liefern zu können. Mehrere Systeme werden entwickelt, um diesen Prozess zu automatisieren [42].

### Bildbasiertes Monitoring

In den vergangenen Jahren sind neben sensorbasierten Monitoringverfahren auch digitale bildgebende Verfahren zur Zustandsermittlung in den Fokus gerückt. Sie können konventionelle visuelle Inspektionen unterstützen und durch mobile Roboter-

systeme [43] und Drohnen (UAS) [44] zur automatisierten Bilderfassung eingesetzt werden. Neben der Reduzierung von Einsatzrisiken für speziell ausgebildete Kletterer und Ingenieure an schwer erreichbaren Bauteilen, erfassen UAS dabei Bilddaten der gesamten Oberfläche großer Bauwerke hochauflösend und hocheffizient. Die Bilder können anschließend mittels photogrammetrischer 3D-Rekonstruktion zur Berechnung der georeferenzierten 3D-Geometrie des Bauwerks genutzt werden und somit Ausgangspunkt für hochwertige 3D-Zustandsermittlung und -modellierung werden. Erfasste Bilddatensätze können mit modernen Analyseverfahren automatisch klassifiziert und semantisch segmentiert werden, um Schadensinformationen zu extrahieren. Insofern besteht eine direkte Parallele zu den Systemidentifikationsmethoden klassischer sensorbasierter Monitoringansätze. Ein großes Augenmerk liegt aktuell auf der Erkennung und Bewertung von Rissen z. B. mit KI-basierten Ansätzen wie Convolutional Neural Networks (CNN) [45]–[48]. Im BAST-Projekt FE 89.0334/2017 Unterstützung der Prüfung gemäß DIN 1076 durch (halb-) automatisierte Bildauswertung u. a. mittels UAV (Unmanned aerial vehicles) [7] stand die Konzeption und Evaluierung einer Verarbeitungskette zur signifikanten Beschleunigung und Unterstützung der visuellen Prüfung von Bauwerken im Fokus der Untersuchung. Die Kombination einer geometrischen und bildbasierten Zustandsbewertung [49] und die Anwendung von Bildanalysemethoden [50] erlaubt dabei die automatische Detektion von Zustandsänderungen wie Rissbildungen und deren Abbildung in 3D-Modellen. Diese Entwicklung ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Entwicklung Digitaler Zwillinge des realen Bauwerkes [51]. Das Konzept des Digitalen Zwillinges hat dabei das Potenzial, erstmals eine lebenszyklusbezogene Zustandserfassung und -bewertung systematisch zu realisieren.

### Bauwerkserhaltung im Lebenszyklus – Erhaltungsbedarfsprognose

Mit SIB-Bauwerke [14] steht in Deutschland seit nunmehr über 20 Jahren ein System zur Verfügung, das eine systematische, einheitliche und regelkonforme Dokumentation von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen ermöglicht und daher, vor allem auch in Form der Weiterentwicklungen in SIB-BW 2.0, eine wichtige Basis für ein LZM darstellen kann. In SIB-BW können für die erkannten Schäden schadensbeschreibende Daten standardisiert eingepflegt werden. Über eine Bewertungsmatrix kann der Gesamtzustand des Bauwerks beschrieben

werden. Das Werkzeug ist hilfreich, erspart aber dem Bauwerksprüfer nicht das vorbereitende Studium der Bauwerksakte, inklusive der Zustandsentwicklung und der bisherigen Erhaltungsmaßnahmen, vor der Prüfung sowie die Bauwerksbeurteilung vor Ort. FORKERT [52] entwickelte ein Instandhaltungskonzept, mit dem es möglich ist, die Dringlichkeit von Instandhaltungsmaßnahmen zu beurteilen, die Dauerhaftigkeit von Bauteilen und Sanierungen zu bewerten, die zeitliche Bewertung des Schadensfortschritts und die Kosten für eine optimale Instandhaltung zu beurteilen. Mit dem Modell zur Prognose der Veränderung von Bauwerks- und Schadenszuständen, welches auf den Aussagen von Bauwerksprüfungen aufbaut, entstand erstmals ein Strategiemodell für die Instandhaltungsmaßnahmen, das eine Optimierung der Instandsetzung des Einzelbauwerks zulässt. Grundlage ist die systematische Speicherung von Bauwerkschäden, durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen und anfallenden Instandsetzungskosten. Solche konsistenten Grundlagendaten sind allerdings nur bedingt digital auswertbar.

Zusätzlich zum objektbezogenen Instandhaltungskonzept ist es notwendig eine übergeordnete Sicht zu entwickeln. So kann es sozioökonomisch besser sein, Maßnahmen an allen Brücken eines Autobahnabschnitts zusammenzufassen und gleichzeitig durchzuführen, als die Umsetzung von Einzelmaßnahmen. Dazu müssen Maßnahmen für einzelne Brücken eventuell vorgezogen werden, wodurch mögliche Beeinträchtigungen des Verkehrsflusses im betroffenen Autobahnabschnitt über die Zeit minimiert werden können. Eine digitale Schadensmodellierung auf Objektebene ist gegenwärtig Gutachtern und wissenschaftlichen Untersuchungen vorbehalten. Dem Bauwerksprüfer vor Ort liegen in der Regel nicht die vollständigen Informationen zur übergeordneten Maßnahmenplanung in einem Abschnitt vor, sodass dieser keine umfassenden Angaben zu kleinen und großen Maßnahmen machen kann.

Eine Zusammenführung der Schadensmodellierung mit Monitoringergebnissen und eine stringente Nutzung dieser Monitoringdaten zum Aktualisieren der Schadensmodelle wird ebenfalls wissenschaftlichen Untersuchungen meist bei Schadensfällen in Einzelfällen angewendet. Konzepte hierfür haben sich im Bereich Offshore (Stahlbau) mittlerweile zum Stand der Technik entwickelt [53]–[55]. Bei Brücken, bei denen andere Schadensmodelle und Schadensmechanismen relevant sind, fehlen die

entsprechenden Modelle und Methoden für die Praxis teilweise oder werden nicht angewendet.

Für einige Schadenskategorien sind Verlaufsfunktionen [56] in Abhängigkeit der relevanten Parameter entwickelt worden, die auch bei der Zustandsnotenvergabe, die nach Schadensbeschreibung ohne Eingriff des Bauwerksprüfers erfolgt, Anwendung fanden. Als unterstützendes Werkzeug zur Beurteilung einer sinnvollen und wirtschaftlichen Instandsetzung stehen sie aber nicht zur Verfügung. Digitale Schadensmodellierungen, die mit experimentell gewonnenen Daten gestützt Verläufe prognostizieren, sind nur aus wissenschaftlichen Bereichen mit Laborergebnissen bekannt [57].

Arbeiten auf diesem Gebiet sind in umfangreicher Form zu finden. Zum Beispiel arbeiteten Wissenschaftler der Bauhaus-Universität Weimar zusammen mit weiteren Forschungs- und Industriepartnern von September 2018 bis Dezember 2022 an Methoden zur digitalen Bauwerksüberwachung. Im vom BMBF geförderten Verbundprojekt Bewertung alternder Infrastrukturbauwerke mit digitalen Technologien – AISTEC ([www.uni-weimar.de/aistec](http://www.uni-weimar.de/aistec)) wurden digitale Methoden und Technologien entwickelt, die einen komplementären Einsatz des klassischen sensorbasierten und des bildbasierten Monitorings zur Zustandserfassung und Standsicherheitsbewertung vorsehen [11].

In der Praxis steht den Bauverwaltungen der Länder mit EPING (Erhaltungsbedarfsprognose für Ingenieurbauwerke), welches unter Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Probst, den Bauverwaltungen der Länder und der BASt entwickelt wurde, bereits ein erstes Prognosetool zur Verfügung, das die Berechnung und Simulation von Lebenszykluskosten für Ingenieurbauwerke der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht [58]. Mit EPING können auf Basis der Daten aus SIB-Bauwerke die Gesamtheit der zu erwartenden Erhaltungskosten inklusive der Bau-, Planungs- und Verwaltungskosten in Verbindung mit den zu erwartenden Zustandsentwicklungen und Leistungsfähigkeiten der Bauwerke ermittelt werden.

## 2.3 Messungen, Messunsicherheit und Messwertverarbeitung

### 2.3.1 Definition Messung, Messfehler, Messunsicherheit

Eine Messung ist die Bestimmung eines Wertes einer bestimmten Messgröße. Dabei findet eine quantitative Zuordnung einer Zahl mit Einheit zu einem bestimmten Objekt oder Ereignis statt. Eine Messung kann daher als die Abbildung einer physikalischen Größe als Messgröße verstanden werden. Der Messwert repräsentiert die physikalische Größe, stellt jedoch nicht den „wahren“ Wert dar. Der „wahre“ Wert ist das Resultat einer perfekten Messung unter Idealbedingungen und somit lediglich ein qualitativer Begriff. Messungen sind Unsicherheiten unterworfen, die nicht exakt quantifiziert werden können und zu Abweichungen vom „wahren“ Wert führen.

Diese Abweichungen können allgemein in systematische und zufällige Fehler unterschieden werden. Systematische Fehler, beispielsweise aus schlechter Kalibrierung, sind vermeidbar. Zufällige Fehler hingegen, entstehen bei wiederholten Messungen durch nicht vorhersehbare Ereignisse und Prozesse unbekannter Ursache und führen zu einer Streuung der Messwerte. Mit einer entsprechend hohen Anzahl an Messungen kann die zufällige Abweichung verringert werden.

Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit sind verknüpfte Begrifflichkeiten, die die quantitative Abwei-

chung von wiederholten Messungen derselben Messgröße, die unter gleichen bzw. unterschiedlichen Bedingungen erzielt werden. Die Unsicherheit des Messergebnisses wird über die Messunsicherheit in Form von Konfidenzintervallen angegeben, die einen möglichen Wertebereich, innerhalb dessen der wahre Wert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt, eingrenzt.

Der Messprozess ist vielfältigen Einflüssen unterworfen, die prinzipiell in Einflüsse aus dem Messprozess und dem Messsystem unterschieden werden können. Einflussfaktoren des Messprozesses sind der Bediener, das Messobjekt, die Auswertemethode und die Umwelt. Die Messmethode, das Messmittel, die Aufnahmevorrichtung und die Referenz (das Normal) sind Einflüsse des Messsystems. In Bild 2-1 sind die verschiedenen Einflüsse in Form eine Ishikawa-Diagramms dargestellt.

Für weitere Begriffsdefinitionen und die Quantifizierung der erweiterten Messunsicherheit wird an dieser Stelle auf den Leitfaden zur Angabe der Unsicherheiten beim Messen (GUM – Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement) [60], [61] verwiesen.

Bei der Betrachtung von wiederholten Messungen ist unbedingt zwischen den Begriffen Genauigkeit und Präzision zu unterscheiden. Zur Veranschaulichung sind die beiden Termini schematisch in Bild 2-2 dargestellt. Die Genauigkeit beschreibt dabei die Abweichung des Messwertes vom „wahren“

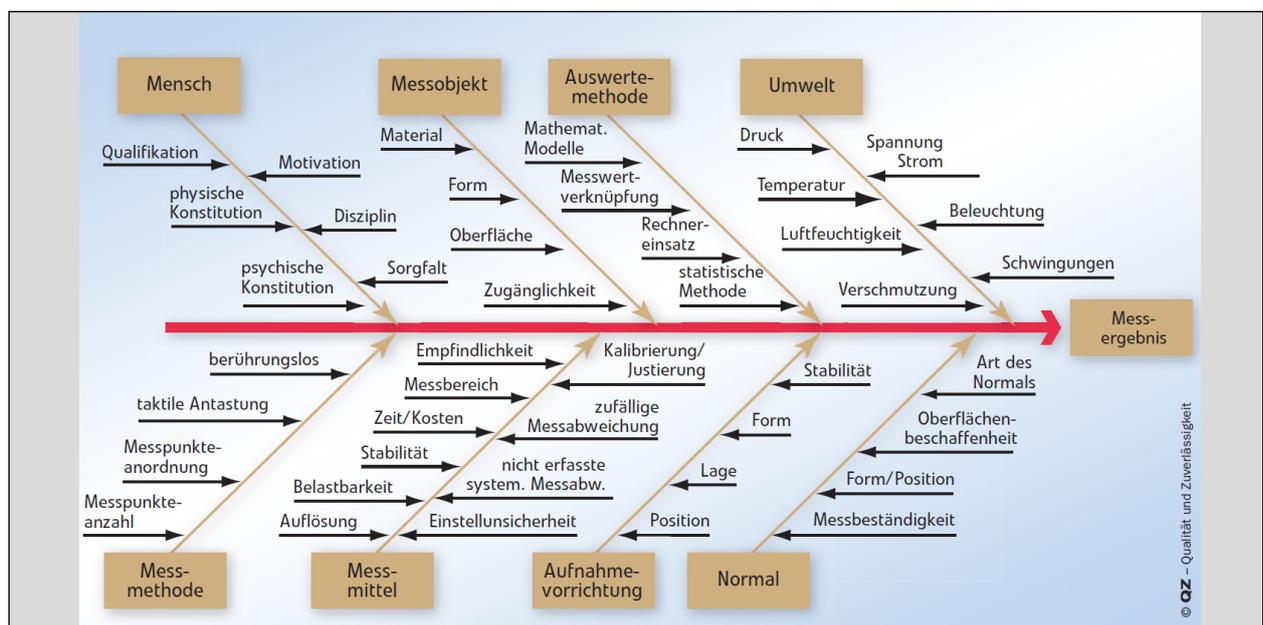


Bild 2-1: Ishikawa-Diagramm: Einflüsse auf die Unsicherheit von Messungen (oben: Einflüsse des Messprozesses, unten: Einflüsse des Messsystems) [59]

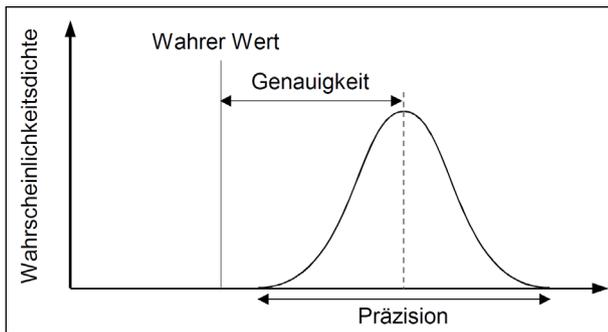


Bild 2 2: Schematische Darstellung von Präzision und Genauigkeit (eigene Darstellung)

Wert und bezieht sich somit auf den Grad der Übereinstimmung mit einem bekannten Referenzwert (Erwartungswert). Die Präzision hingegen ist der Grad, mit welchem bei Messreihen dieselben Ergebnisse unter denselben Bedingungen erzielt werden, und bezieht sich somit auf die Streuung der einzelnen Messwerte. Zur Beschreibung einer Messung in Bezug auf die Gesamtheit der Messwerte werden statistische Kenngrößen wie Mittelwert, quadratischer Mittelwert, Standardabweichung, Varianz verwendet.

### 2.3.2 Messkette, Abtastung und AD-Wandlung

Mithilfe einer Messkette kann die Verarbeitung eines Messsignals von der Messgröße zum Messwert in einer Messeinrichtung dargestellt werden. Am zu untersuchenden Objekt ist eine physikalische Größe (Messgröße) zu erfassen. Diese Eingangsgröße wird durch einen Sensor aufgenommen und ggf. durch einen Messumformer in ein elektrisches Signal umgewandelt. Gegebenenfalls wird das Signal während der Konditionierung (Aufarbeitung) verstärkt oder gefiltert. Das analoge Signal wird nachfolgend durch einen Analog-zu-Digital-Wandler (A/D-Wandler) in ein maschinenlesbares, zeitdiskretes Signal zu überführt. Anschließend wird durch einen Interpreter das elektrische Signal in die physikalische Größe zurücktransformiert. Der Messwert kann dann an einer Anzeige oder in der Software dargestellt und abgespeichert werden.

Der Übergang von einem zeit-kontinuierlichen Signal in ein zeit-diskretes Signal wird dabei als Abtastung (Sampling) bezeichnet. Dabei wird das Signal durch baueitige Abtast- bzw. Halteglieder zu einem bestimmten Zeitpunkt erfasst und für die Dauer des Abtastzyklus gehalten. Durch den A/D-Wandler wird dann ein Messwert mit endlicher Auflösung zugewiesen. Wichtige Parameter für den Prozess der Abtastung und Wandlung sind die Abtastrate (Sam-

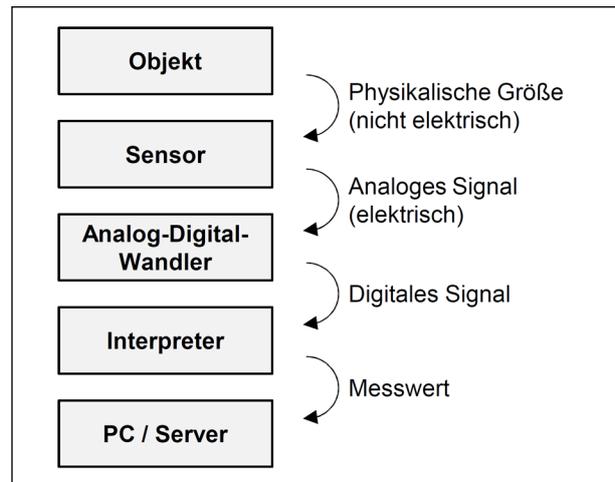


Bild 2-3: Schematische Darstellung der Messkette (eigene Darstellung)

pling rate) und die Auflösung des Wandlers. Die Abtastrate wird dabei entsprechend der Messaufgabe (quasi-statisch oder dynamisch) in Abhängigkeit der zu untersuchenden Phänomene, respektive der Einwirkungsdauer gewählt.

Der Zusammenhang zwischen der physikalischen Größe und dem elektrischen Signal, meist einer Spannung, kann mithilfe einer Übertragungsfunktion dargestellt werden. Dieser Zusammenhang wird mithilfe der Sensorkalibrierung für den entsprechenden Messbereich (bspw. Spannungsbereich) ermittelt. Für einen linearen Zusammenhang sind dabei Nullpunktverschiebung und Sensitivität festzustellen. In der Regel werden diese Parameter sowie das Temperaturverhalten gemeinsam mit anderen typischen Sensoreigenschaften durch den Hersteller zur Verfügung gestellt.

## 2.4 Technologien des Monitorings

### 2.4.1 Bauwerksmonitoring: ein Kreislauf

Bauwerksmonitoring umfasst die Vorgänge der Datenerfassung inklusive der Übertragung und Verwaltung von Daten, der Analyse der Messdaten, welche eine Datenauswertung, -bewertung und -plausibilisierung beinhaltet sowie der Prognose des zukünftigen Bauwerksverhaltens oder -zustandes.

Dieser scheinbar sequenzielle Prozess kann auch zyklisch zirkulär erfolgen (siehe Bild 2-4), indem dem System ständig Daten zugeführt werden und an einem beliebigem Zeitpunkt Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden. Es ist wichtig festzuhalten, dass Monitoringprojekte nicht nur die

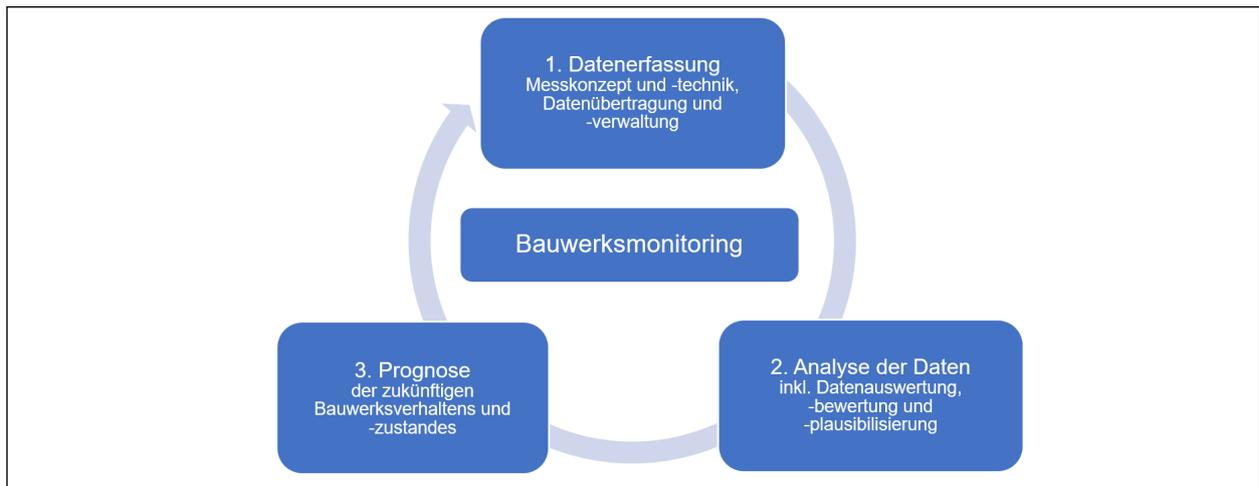


Bild 2-4: Schema Bauwerksmonitoring (eigene Darstellung)

ersten beiden Schritte – Erfassung und Analyse der Daten – umfassen, sondern auch die Interpretation der Ergebnisse und Bewertung des Tragwerkes unter Einbezug der künftigen Maßnahmen zur Bauwerkserhaltung beinhalten.

In den Kapiteln 2.4.2 bis 2.4.7 werden die verschiedenen Komponenten für die erfolgreiche Durchführung von Monitoringmaßnahmen beschrieben.

### 2.4.2 Messtechnik

Um Daten an einem Bauwerk zu erfassen, setzen Ingenieure Instrumente ein, die üblicherweise als Sensoren bezeichnet werden und bestimmte Informationen liefern, die für die Analyse des Bauwerks, dessen Trag- und Verformungsverhalten und der Einwirkungen relevant sind [62]. Es gibt eine Vielzahl von Sensortypen, die nach verschiedenen Kriterien kategorisiert werden können, wie z. B. a) die eingesetzte Messtechnologie, z. B. piezoelektrische, elektromagnetische, faseroptische Sensoren oder b) die Eigenschaft, die sie messen, z. B. Temperatur, Verschiebung, Beschleunigung, etc. Innerhalb jeder Kategorie können Ingenieure zwischen verschiedenen Arten von Auflösung, Messbereich, Genauigkeit, Zugänglichkeit (kabelgebundene oder drahtlose Sensoren), Preis und Lebensdauer wählen. Der Markt entwickelt sich rasant und bietet jedes Jahr neue Produkte. Außerdem sind einige Technologien, die ursprünglich teuer waren, dank ihrer Verbreitung und Massenproduktion mittlerweile erschwinglich geworden.

Da das Ziel dieses Abschnittes darin besteht, einen Überblick über die Möglichkeiten für das Monitoring von Infrastrukturbauwerken wie Brücken zu geben, wird eine Kategorisierung auf der Grundla-

ge typischer technischer Messgrößen vorgenommen. Eine einfache Beschreibung der jeweils zu Grunde liegenden Messtechnologie und -prinzipien, die die verschiedenen Sensoren nutzen, wird im Sinne der Vollständigkeit dargestellt. Im Fall der Faseroptik wird detaillierter darauf eingegangen. Die Messgrößen sind ebenfalls in drei Kategorien unterteilt:

- strukturelles Verhalten,
- Umweltparameter und
- Betriebsgrößen.

### 2.4.3 Tragverhalten

Die wichtigsten Strukturreaktionen, die bei Infrastrukturbauwerken gemessen werden müssen, sind Verschiebung, Dehnung, Spannung, Kraft, Druck, Neigung, Geschwindigkeit und Beschleunigung.

#### Dehnungen

Die Dehnung ist eine Messgröße, die in der Statik häufig verwendet wird, um die maximale Kapazität von Elementen wie Stahlträgern, Betondecken oder -fundamenten und Bewehrungsstäben zu bestimmen. Sensoren, die Dehnungen messen, folgen demselben Prinzip und verwenden den Wert zur Berechnung der Tragfähigkeit kritischer Elemente. Allerdings müssen zwei wichtige Aspekte berücksichtigt werden. Zunächst ist zu beachten, dass der Messwert der Dehnung nicht der im Bauteil wirkenden Dehnung entspricht, sondern eine Differenz zwischen der Dehnung im Ausgangszustand, als der Sensor angebracht wurde, und dem Zeitpunkt der Messung darstellt. Daher sollte, wenn ein realer Dehnungswert benötigt wird, eine Ausgangsdehnung

mithilfe eines FE-Modells oder einer Testbelastung festgelegt werden. Zweitens wirken sich Temperaturschwankungen nicht nur auf die Dehnungen in der Struktur, sondern auch auf die Messwerte selbst aus, weshalb eine Temperaturkompensation der Messwerte notwendig ist.

Typische Dehnungssensoren sind:

- piezoelektrische Dehnungssensoren [63],
- Dehnmessstreifen [64],
- demontierbare Dehnungsmesser [65],
- Schwingsaiten-Dehnungssensor [66] und
- faseroptische Sensoren.

Piezoelektrische Dehnungssensoren funktionieren, indem sie die elektrische Ladung erfassen, die am piezoelektrischen Kristall entsteht, wenn eine Dehnung erzeugt wird. Im Gegensatz dazu wird mithilfe von Dehnmessstreifen und entsprechenden Brückenschaltungen die Änderung des elektrischen Widerstands erfasst, die durch eine elastische Verformung hervorgerufen wird. Die Messungen mit letzteren sind langfristig stabiler, haben aber Probleme kleine Verformungen zu messen. Beide Messgeräte sind in Monitoring-Projekten sehr verbreitet, da sie relativ kostengünstig sind, besitzen jedoch verrauschte Signale und sind aufwändig bei der Installation. Schwingsaiten-Dehnungssensoren, die die Dehnung aus der Resonanzfrequenz eines schwingenden Drahtes ermitteln, sind teurer, aber robuster. Die faseroptischen Sensoren werden ausführlich in Kapitel 2.4.5 erläutert. Einer der Hauptvorteile dieser Technologie besteht darin, dass diese eine verteilte Dehnungsmessung entlang des Messkabels ermöglicht anstelle eines einzelnen Messwertes an einer bestimmten Stelle zu liefern, wie es der Fall für die anderen Dehnmesssensoren ist.

Je nach Anwendung und Art der zu messenden Dehnung gibt es verschiedene Konfigurationen von Dehnmessstreifen, um Biege- und Längsdehnungen oder Poisson-Effekte zu messen (Halbbrücken- oder Vollbrücken-Dehnmessstreifen), um Dehnungen in 2 oder 3 Richtungen zu messen (45° Rosette bzw. 90° Rosette) oder um Scherung zu messen (Scher-Dehnmessstreifen).

### Spannungen

Im Allgemeinen sind Sensoren, die einen direkten Messwert für die Spannung liefern, unüblich. Einige

Beispiele finden sich in [67], wo Spannungszellen für Tunnelauskleidungen und für Hohlkastenbrücken aus Beton verwendet wurden. Eine Variante eines Sensors, der elasto-magnetische Effekte nutzt, wurde beispielsweise in [68] zur Überwachung von Kabelkräften verwendet.

### Kraft

Das gebräuchlichste Gerät zur Kraftmessung ist eine Wägezelle. Diese Vorrichtungen können mechanisch (hydraulisch oder pneumatisch), mit Dehnmessstreifen und anderen Wägezellen (z. B. faseroptisch und piezoresistiv) sein. Die derzeit am häufigsten verwendeten Wägezellen sind Aufnehmer, die auf Dehnmessstreifen und deren Prinzipien basieren. Mithilfe von Wägezellen können Zug- und Druckkräfte sowie Auflasten erfasst werden. Wägezellen können eingesetzt werden, um Auflagerkräfte zu ermitteln oder, wie in der Studie zur Bundesbrücke [69], um die Eiskraft direkt zu messen, die zur Kalibrierung von Belastungsmodellen für Offshore-Anlagen verwendet wird. Kräfte können auch mithilfe verschiedener Kraftmessdosen aufgenommen werden. Je nach Ausführung können Kraftmessdosen Kräfte in mehreren Raumrichtungen aufnehmen, teilweise können auch Momente erfasst werden.

### Druck

Drucksensoren folgen den gleichen Prinzipien wie Kraftsensoren. Dynamische Messungen können mit piezoelektrischen Drucksensoren durchgeführt werden, während vibrierende Drucksensoren für statische Zwecke eingesetzt werden [70]. Bei Windkanaltests wird der Druck auf Oberflächen bei hohen Geschwindigkeiten häufig mit Druckmessgeräten gemessen [71], obwohl Messungen des Winddrucks in großem Maßstab relativ selten sind, wie z. B. beim Projekt der Great Belt Bridge (Wirbelablösung- Vortex shedding) [72]. In Staudämmen wird die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Bauwerk mithilfe von dynamischen Wasserdruckmessungen untersucht [73], die meisten Messungen werden jedoch statisch durchgeführt, z. B. mit Piezometern zur Wasserstandsmessung oder Manometern zur Erfassung des Bauwerksniveaus [74].

### Verschiebung

Strukturelle Bewegungen umfassen sowohl dynamische als auch quasi-dynamische Effekte. Dynamische Verschiebungen können durch seismische, Wind- oder Fahrzeugbelastungen verursacht werden, während quasi-statische Verschiebungen durch

thermische Effekte, Setzungen und Veränderungen der statischen Belastung verursacht werden können. Wie bei den Dehnungen handelt es sich bei den Verschiebungen in der Regel um relative Werte, die die Festlegung eines Bezugspunkts erfordern. Daher werden sie in der Regel in Bezug auf einen unbelasteten oder unverformten Zustand bestimmt. Dynamische, schwingungsbedingte Verschiebungen können aus Beschleunigungen durch Doppelintegration nach Hochpassfilterung berechnet werden. Zu den Messverfahren gehören herkömmliche Vermessungstechniken und neuere Methoden [74], wie z. B.:

- Vermessung mit Totalstation (elektronische Tachymeter) oder Laserscanner,
- berührende Wegmessung, z. B.:
  - induktive Wegaufnehmer (IWT),
  - LVDT Wegaufnehmer (linear variable differential transformers),
  - lineare Potentiometer,
  - lineare magnetische Hall-Sensoren,
  - Seilzug-Sensoren,
- Laser- und LED-Geräte, z. B. Laser-Doppler-Vibrometer (LDVM) [75],
- GPS-Sensoren (Globales Positionsbestimmungssystem),
- Bildsensoren in Verbindung mit unbemannten Luftfahrzeugen (UAV - Unmanned Aerial Vehicles) [76],
- Bildverfolgung über CCD-Arrays [77],
- Photogrammetrie und Bildsensoren (DIC - Digital Image Correlation) [78],
- Mikrowelleninterferometrie, z. B. Radarsystem,
- pneumatisches System.

Laser-Doppler-Vibrometer sind für die dynamische Prüfung von Brücken nützlich, da sie sowohl Verschiebungen als auch Geschwindigkeiten messen können. Bei der Anwendung in der Modalprüfung sind sie jedoch eingeschränkt anwendbar, da sie nicht mehrere Stellen gleichzeitig messen können und für die Langzeitüberwachung nicht gut geeignet sind [74]. GPS-Sensoren wurden erfolgreich zur Messung von Verschiebungen an großen zivilen Infrastrukturen wie Brücken mit großer Spannweite, Hangrutschungen und Hochhäusern eingesetzt

[79]. Diese Technologie ermöglicht Messungen mit einer Genauigkeit von einigen Millimetern und Abtastraten von 20 Hz, obwohl 50- und 100-Hz-GPS-Empfänger auf den Markt kommen und bald für Monitoringzwecke eingesetzt werden können [80]. In den letzten Jahren gewinnen bildverarbeitungsbaasierte Systeme an Bedeutung, was auf die zunehmend wettbewerbsfähigeren Preise der hochauflösenden Kameras, den Einsatz von Drohnen und die Entwicklung von Technologien für maschinelles Lernen zurückzuführen ist. Diese Sensoren werden für die berührungslose Fernmessung struktureller Reaktionen eingesetzt, bei der die Verschiebungen durch Verfolgung der Bewegung von Zielen aus Bildverbänden oder Videobildern extrahiert werden.

Alternativ zu den oben genannten Sensoren können Verschiebungen auch aus anderen Messungen abgeleitet werden, z. B. aus Beschleunigungs-, Geschwindigkeits-, Dehnungs- oder Rotationssignalen.

### **Geschwindigkeit**

Bei seismischen Untersuchungen werden in der Regel Geschwindigkeitszeitreihen erfasst, da Seismometer diesen Parameter in der Regel über den durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Spule und Magneten erzeugten Strom messen [81]. Die bereits erwähnten Laser-Doppler-Vibrometer (LDVM) messen die Geschwindigkeit über die Doppler-Verschiebung von Lichtfrequenzen. Ihr Vorteil besteht darin, dass sie berührungslos arbeiten und sowohl bei kurzen als auch bei großen Entfernungen eingesetzt werden können, aber sie sind im Allgemeinen teuer und können jeweils nur die Geschwindigkeit an einem einzelnen Messpunkt erfassen.

### **Beschleunigungen**

Es gibt mehrere Arten von Sensortechnologien zur Messung der Beschleunigung. Einige der gängigsten Typen für Monitoring sind:

- piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer [82],
- Servo-Beschleunigungssensoren [82],
- kapazitiver Beschleunigungssensor [83],
- Dehnmessstreifen-/ DMS-Beschleunigungsaufnehmer,
- MEMS-Beschleunigungsaufnehmer (kapazitiv und piezoresistiv),
- FBG (Faser-Bragg-Gitter) Beschleunigungsmesser [84],

- Laser-Vibrometer [85],
- Bildsensor [86].

Diese Typen unterscheiden sich in Bezug auf Kosten, Frequenzbereich, Auflösung, Rauschen, Stromverbrauch und Kabelanforderungen. Beschleunigungssensoren, zur Anwendung im Bauwerksmonitoring, müssen aufgrund der ambienten Anregung aus der Umgebung (Verkehrs- oder Windeinwirkungen) geringe Amplituden der aufzunehmenden Schwingungen bei gleichzeitig niedrigen Frequenzen erfassen können. MEMS-Sensoren entwickeln sich rasch weiter und stellen eine kostengünstige Lösung dar [87].

### Neigung

Der Sensor zur Messung der Neigung ist ein Neigungsmesser, der elektrisch oder hydraulisch betrieben werden kann. Letztere sind einfacher, aber nicht für dynamische Messungen geeignet. Diese Art von Sensor kann zur Beurteilung der Festigkeit von Brückenträgern an den Auflagern und zur Überwachung der langfristigen Bewegungen von Brückenpfeilern, Widerlagern und Trägern verwendet werden [88].

### Schallpegel

Schallemissionssensoren erkennen Geräusche im Bauwerk und ordnen diese Geräusche einer möglichen Beschädigung zu. Sie funktionieren nach folgendem Prinzip: Ein entstehender Fehler im Material, z. B. ein Riss in Beton, Stahl oder Spannstahl, sendet Energiestöße in Form von hochfrequenten Schallwellen aus. Diese breiten sich im Material aus und werden dann von den Sensoren empfangen. Diese Technologie kann zur Erkennung von lokalem oder globalem Verhalten eingesetzt werden [30]. Besonders vielversprechend ist ihr Einsatz zur Erkennung von Schäden in Spanngliedern [89].

#### 2.4.4 Umwelteinflüsse

Bei den meisten zivilen Infrastrukturprojekten sind Parameter wie Temperatur und Feuchtigkeit von grundlegender Bedeutung. Andere zu berücksichtigende Parameter sind chemische Konzentrationen (wichtig für die Korrosion) und Wind, auch wenn letzterer als Last berücksichtigt werden kann.

### Temperatur

Viele Strukturreaktionen, wie Dehnungen, Verschiebungen und Frequenzen, sind temperaturabhängig. Um geeignete Korrelationen zwischen dem gemessenen Wert und dem thermischen Effekt herzustellen oder sogar die durch Umweltveränderungen verursachten Effekte vollständig zu beseitigen, werden häufig Temperatursensoren eingebaut. Auf dem Markt gibt es mehrere Technologien zur Temperaturmessung:

senen Wert und dem thermischen Effekt herzustellen oder sogar die durch Umweltveränderungen verursachten Effekte vollständig zu beseitigen, werden häufig Temperatursensoren eingebaut. Auf dem Markt gibt es mehrere Technologien zur Temperaturmessung:

- Temperatursensoren für Biomaterialien,
- elektrische Widerstandsthermometer,
- Thermoelement-Thermometer,
- pyroelektrische Thermometer,
- Faseroptische Temperatursensoren und
- Infrarot-Thermometer.

Darüber hinaus finden sich Thermometer in anderen Messgeräten zur Temperaturkompensation, z. B. in schwingenden Dehnungsmessstreifen und faseroptischen Dehnungsmessstreifen.

### Feuchtigkeit

Ähnlich wie die Temperatur kann auch die Luftfeuchtigkeit bestimmte strukturelle Reaktionen wie Dehnungen oder Frequenzen beeinflussen, indem sie die Steifigkeit der Struktur beeinträchtigt. Darüber hinaus werden bestimmte chemische Prozesse wie Korrosion durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ausgelöst, wenn die Feuchtigkeit einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Einige Arten von Feuchtigkeitssensoren sind optische, gravimetrische, kapazitive, resistive, piezoresistive und magnetoelastische Sensoren [90].

### Korrosion und chemische Konzentrationen

Eines der Hauptprobleme bei Stahlbauteilen, sei es Baustahl, Bewehrungsstahl oder Vorspannungen, ist die Korrosion. Aus diesem Grund sind verschiedene Methoden zur Messung der vorhandenen Korrosion in einem Bauteil und ihrer zunehmenden Geschwindigkeit entstanden, die in ihrer Komplexität und ihrem Umfang variieren, z. B. von der Verwendung des Polarisationswiderstandes bis hin zur Verwendung der Zeitbereichsreflektometrie. Einige Korrosionsmessverfahren basieren auf Potenzialmessungen (offener Stromkreis, Halbzellen- und Oberflächenverfahren), Polarisation, elektrochemischer Impedanzspektroskopie oder Faseroptik sowie auf traditionelleren Methoden wie der Messung der Chloridkonzentration im Beton [91]. Eine beliebte Methode ist die Halbzellentechnik, aufgrund ihrer Einfachheit und leichten Durchführbarkeit [92]. Sie weist jedoch einige Nachteile auf, da sie keine Mes-

sungen in vorgespannten Strukturen erlaubt und keine Informationen über die Korrosionsrate liefert. Faser-Bragg-Gitter-Sensoren wurden kürzlich mit vielversprechenden Ergebnissen eingesetzt [93]. Eine weitere Möglichkeit zur Messung der Korrosion besteht in der Verwendung von Ground Penetrating Radar (GPR, Bodeneindringradar), einer zerstörungsfreien Methode, die einem Scanner ähnelt. Das Gerät sendet elektromagnetische Wellen aus, die innerhalb der untersuchten Struktur reflektiert werden und eine Karte der Chloridzonen erstellen, allerdings sind für eine Kalibrierung Bohrproben erforderlich. In Deutschland werden aktuell drahtgebundene Sensoren und Anodenleiter eingesetzt [94], [95].

### Wind

Verschiedene Formen von Anemometern sind bei der Prüfung von Strukturen im Maßstab 1:1 weit verbreitet, darunter Schalen- und Flügelrad-, Windmühlen-, Propeller- und Schallanemometer sowie Anemometer, die eindeutig aus der Luft- und Raumfahrt stammen. Andere Formen (die nicht für Strukturmessungen in Originalgröße verwendet werden) sind Hitzdraht- und Laser-Doppler-Anemometer (für Windkanäle) und Doppler-Sonar für die Meteorologie. Schalen- und Fahnenegeräte sind der herkömmliche Standard zur Messung der horizontalen Komponente der Windgeschwindigkeit und der Kompasspeilung, obwohl sie bei hohen Strukturen ungenau sein können [96]. Für die Messung aller drei Windkomponenten sind Geräte mit Propellern in drei Achsen oder Schallanemometer erforderlich [97]. Die Wahl des Anemometers hängt von praktischen Faktoren wie Kosten, Qualität der beweglichen Teile, Anfälligkeit für elektromagnetische Störungen und Möglichkeiten der Datenausgabe ab. Bei der Langzeitüberwachung sollte die Zuverlässigkeit der Schlüsselfaktor sein, da einige Forscher in dieser Hinsicht Probleme erlebt haben.

### Verkehrsbelastung

Weigh-in-Motion (WIM)-Systeme ermitteln das Gewicht eines Fahrzeugs während dessen Überfahrt. WIM kann mit einer breiten Palette von Sensoren realisiert werden [98], von den ersten Systemen mit Wägesystemen in einer Reihe auf der Straße ([99]) bis hin zu piezoelektrischen Sensoren, kapazitiven Matten, Biegeplatten, Wägezellen und, in den letzten 10 Jahren, Faseroptik [100].

Bei WIM-Systemen mit Biegeplatten werden Platten mit Dehnungsmessstreifen auf der Unterseite ver-

wendet. Bei Asphaltbelägen ist ein Betonfundament erforderlich, um die Platte zu stützen, während bei Betonbelägen nur ein flacher Aushub erforderlich ist. Bei WIM-Systemen mit Wägezellen wird eine einzelne Wägezelle mit zwei Waagen verwendet, um eine Achse zu erfassen und die rechte und linke Seite der Achse gleichzeitig zu wiegen. Für diese Installation ist ein Betongewölbe erforderlich. Im Falle von Glasfaserkabeln werden die Kabel in einem Spalt quer zur Straße verlegt und mit elastischem Gummi ausgefüllt. Die Breite der Lücke kann zwischen 3 und 5 cm variieren.

### 2.4.5 Faseroptische Sensoren

In den letzten Jahren haben faseroptische Sensoren (FOS) in Monitoringanwendungen an Popularität gewonnen, da sie dank ihrer Verbreitung in verschiedenen Disziplinen erschwinglicher geworden sind.

Sie bieten mehrere Vorteile im Vergleich zu anderen herkömmlichen Sensoren:

- Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen, Radiofrequenzen und Mikrowellen,
- werden nicht durch elektrische Maschinen in der Nähe beeinträchtigt,
- sicher und explosionsgeschützt,
- in kleinen Größen erhältlich (125-500  $\mu$ ),
- Messungen über große Entfernungen (Kilometer) möglich, ohne dass ein aktives elektrisches Bauteil erforderlich ist,
- mehrere Messpunkte können entlang einer einzigen optischen Faser gemultiplext werden, was vollständig verteilte Messungen ermöglicht.

Faseroptische Sensoren sind spezielle Sensoren für optische Messverfahren auf Basis von Lichtwellenleitern. Sie bestehen aus Glas- oder Kunststoffsträngen, die durch eine Polymerbeschichtung geschützt sind. Das Licht bewegt sich durch den Kern, indem es wiederholt an den Wänden des Kabels abprallt und dabei wie in einem Spiegel reflektiert wird. Im Gegensatz zu den meisten anderen Sensoren wird mit faseroptischen Sensoren keine elektrische, sondern eine optische Messgröße erfasst.

Es gibt verschiedene Arten von Faseroptischen Sensoren, die nach ihrer räumlichen Verteilung (punktförmig, integriert, quasi-verteilt und ver-

teilt, [101]) oder nach dem Parameter des modulierten Lichts (interferometrisch, polarimetrisch, intensitätsmoduliert und spektrometrisch) klassifiziert werden können. Bei Projekten im Bauwesen sind die gebräuchlichsten Sensortypen SOFO-interferometrische, Fabry-Pérot-interferometrische, Faser-Bragg-Gitter (FBG) und verteilte Brillouin- und Raman-Streuungssensoren [102].

- SOFO interferometrische Sensoren

Das Hauptmerkmal der SOFO-Sensoren (Surveillance d'ouvrages par Fibres Optiques) besteht darin, dass sie über eine relativ lange Strecke (200 mm bis 10 m) messen und die Ergebnisse über diese Entfernung mitteln. Sie können in statischen und dynamischen Kampagnen eingesetzt werden. Das SOFO-System nutzt die Interferometrie mit geringer Kohärenz, um den Längenunterschied zwischen zwei optischen Fasern zu messen, die an der zu überwachenden Struktur installiert sind. Da die Messung des Längenunterschieds zwischen den Fasern absolut ist, muss keine permanente Verbindung zwischen der Leseinheit und den Sensoren bestehen. Die Messungen können manuell oder automatisch mithilfe eines Schalters durchgeführt werden. Beispiele finden sich in Dämmen, Pfählen oder Brücken [103], [104], [105].

- Fabry-Pérot

Fabry-Pérot (FP)-Hohlräume messen die Veränderungen in einem ihrer Hohlraumparameter. Ein Extrinsisches Fabry-Perot-Interferometer (EFPI) besteht aus einem Kapillarrohr aus Siliziumdioxid, das zwei gespaltene Glasfasern enthält, die einander gegenüberliegen, aber einen mit Luft gefüllten Zwischenraum lassen. Das Licht, das die Glasfaser durchläuft, erzeugt eine Reflexion im Übergang Kabel-Luft-Kabel. Diese Interferenz kann mit kohärenten oder schwach kohärenten Techniken demoduliert werden, um die Änderungen des Faserabstands zu rekonstruieren. Die Abstandsänderung entspricht der durchschnittlichen Dehnungsänderung zwischen zwei Punkten.

- Faser-Bragg-Gitter (FBG) Sensoren

Bragg-Gitter sind periodische Änderungen des Brechungsindex des Faserkerns, die durch eine adäquate Bestrahlung der Faser mit intensivem ultraviolettem Licht im Bereich von 244-248 nm erzeugt werden. Wenn das Licht durch

das Gitter fällt, werden nur bestimmte Wellenlängen reflektiert. Die Periode (Länge) des Gitters variiert mit der Temperatur und der Dehnung und ermöglicht die Messung beider Parameter. Eines der wichtigsten Merkmale eines FBG-Sensors ist seine Fähigkeit zur Selbstreferenzierung, was bedeutet, dass für diese Art von Sensor keine Neukalibrierung oder Neuinitialisierung erforderlich ist, da die Messwerte in der Wellenlänge kodiert sind, die ein absoluter Parameter ist. Der Hauptvorteil von FBG-Sensoren ist ihr Multiplexing-Potenzial: Innerhalb desselben Kabels können mehrere diskrete Punkte gemessen werden, da mehrere Gitter in derselben Faser an den gewünschten Stellen eingebaut werden können, die so abgestimmt sind, dass sie unterschiedliche Wellenlängen reflektieren. Die Genauigkeit der Messung hängt vom Demodulator ab und liegt in der Größenordnung von  $1 \mu\epsilon$  und  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Erfolgreiche Beispiele für diese Technologie finden sich in [106], [107], [108], [109].

- Verteilte Brillouin- und Raman-Streuungssensoren

Die Phänomene der Brillouin- und Raman-Streuung wurden in den letzten Jahren für Anwendungen der verteilten Sensorik genutzt. Wenn ein intensives Licht mit einer bekannten Wellenlänge in eine Faser eingestrahlt wird, wird ein sehr kleiner Teil des Lichts von jeder Stelle der Faser selbst zurückgestreut. Neben der ursprünglichen Wellenlänge (der so genannten Rayleigh-Komponente) enthält das gestreute Licht Komponenten mit Wellenlängen, die höher und niedriger sind als das ursprüngliche Signal (die so genannten Raman- und Brillouin-Komponenten). Das detektierte Signal (Rayleigh) weist einen ursprünglichen zeitlichen Abfall auf, der direkt mit der linearen Dämpfung der Faser zusammenhängt. Die Brillouin- und die Raman-Streuung führen zu völlig unterschiedlichen spektralen Eigenschaften, da sie mit unterschiedlichen dynamischen Inhomogenitäten in den Quarzfasern verbunden sind. Die Brillouin-Streuung ist ein Rückwärtsprozess, während die Raman-Streuung ein Vorwärts- und Rückwärtsprozess ist. Mit der Raman-Streuung können Temperaturmessungen über eine maximale Länge von 8 km vorgenommen werden, wobei jedoch keine Dehnungsmessung möglich ist. Mit der Brillouin-Streuung können Temperatur und Dehnung gemessen werden. Ist der Messbe-

reich mehr als 25 km entfernt, können Lichtverstärker eingesetzt werden.

FOS werden zur Messung aller Arten von Größen wie Risszustand, Dehnung und Temperatur eingesetzt. Andere Größen können abgeleitet werden, wie z. B. Korrosion (Ausdehnung des korrodierten Bewehrungsstabs), Neigung, Vibration (Beschleunigung), Kraft durch Verwendung von FBG-Kraftmessdosens, Eiserkennung auf Fahrbahnen und Verkehrsbedingungen auf Brücken [110]. Eine Zusammenfassung der Möglichkeiten, die diese Sensoren bieten, ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

**2.4.6 Optimale Sensorauswahl und Sensoranordnung**

An Ingenieurbauwerken ist die Größe der zu messenden Bauteile im Vergleich zu anderen Disziplinen, wie dem Maschinenbau oder der Luftfahrttechnik, erheblich. Oftmals muss die Anzahl der Sensoren zur Abdeckung eines relativ großen Bereichs auf ein Minimum reduziert werden, und der Ingenieur muss Prioritäten setzen, welche Informationen am wichtigsten sind. Der am besten geeignete Sensortyp für den jeweiligen Überwachungseinsatz kann anhand der folgenden Checkliste bestimmt werden, die sich an den Erkenntnissen aus [111] orientiert.

- **Projektziele:**  
Die Ziele können z. B. Zustandsbewertung, Forschung, Validierung von Auslegungsannahmen, Kostenimplikationen und gefahrenspezifische Sicherheit sein.

- **Art der Struktur:**  
Ein wichtiger Parameter, der die Entscheidung für einen bestimmten Sensortyp beeinflussen kann, ist das Material, in dem der Sensor platziert wird. Ein weiterer zu berücksichtigender Punkt ist die Lebensdauer des Bauwerks, die Lage des Standorts (z. B. unterirdisch, unter Wasser) und die Zugänglichkeit.
- **Messgrößen:**  
Manchmal ist die Messgröße eindeutig, z. B. wenn man den Versatz eines Lagers wissen muss: Oftmals kann die Zustandsbewertung jedoch aus verschiedenen Messungen abgeleitet werden (Dehnungen, Änderungen der modalen Eigenschaften usw.). Der Ingenieur muss festlegen, welche Messgröße(n) besser zu den Projektzwecken passen.
- **Sensoreigenschaften:**  
Zu den wichtigen Eigenschaften von Sensoren gehören Bandbreite, Empfindlichkeit, Reichweite, Messauflösung und Stromverbrauch (insbesondere bei drahtlosen Installationen). Sensoren mit einem hohen Frequenzbereich sind in der Regel empfindlicher gegenüber lokalen Reaktionen, was einen Sensor mit einer großen Bandbreite erfordert. Im Allgemeinen nimmt die Empfindlichkeit ab, wenn die Bandbreite zunimmt. Der Messbereich muss vor der Sensorauswahl abgeschätzt werden, und die Auflösung ist oft mit dem Messbereich gekoppelt.
- **Physikalische Eigenschaften des Sensors:**  
Zu den physikalischen Eigenschaften von Sensoren gehören Größe, Gewicht, Robustheit und Wechselwirkungen mit der Struktur. Diese Ei-

	<b>SOFO</b>	<b>Fabry-Perot</b>	<b>FBG</b>	<b>Raman- Streuung</b>	<b>Brillouin-Streuung</b>
Sensortyp	langer Dehnmessstreifen	punktuell	punktuell	verteilt	verteilt
Messgröße	Verformung, Dehnung, Neigung, Kraft	Dehnung, Temperatur, Druck	Dehnung, Temperatur, Beschleunigung	Temperatur	Dehnung, Temperatur
Messpunkte pro Zeile	1	1	10-50	10'000	30'000
Genauigkeit					
Verformung (µm)	1	100	1		
Dehnung (µε)	1	1	1		20
Neigung (µrad)	30				
Temperatur (°C)		0.1	0.1	0.1	0.2
Druck (% d. Vollskala)		0.25			
Bereich	20 m Messgerät			8 km	30-150 km

Tab. 2-1: Vergleich faseroptischer Sensortypen [102]

genschaften können die Genauigkeit der Prüfergebnisse und die Platzierung des Sensors beeinflussen.

- **Betriebsumgebungen:**  
Sensoren, die an Ingenieurbauwerken eingesetzt werden, sind härteren Umgebungsbedingungen ausgesetzt als Sensoren, die in Laboreinrichtungen verwendet werden. Daher muss der Sensor angemessen gegen Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen und chemische Angriffe geschützt werden.
- **Kosten:**  
Die Gesamtkosten für ein Bauwerksüberwachungssystem umfassen die Kosten für Sensoren, zusätzliche Hardware, Arbeitskräfte, Wartung und Fachwissen für die Datenanalyse und Berichterstellung. Die Gesamtkosten hängen auch von der Dauer der Überwachung ab.
- **Anzahl der Sensoren und Redundanz:**  
Wie bereits erwähnt, sind die Anzahl und der Standort der Sensoren wichtig, da sie auf ein Minimum beschränkt werden sollten. Dennoch sollte man den möglichen Ausfall von Sensoren berücksichtigen und eine gewisse Redundanz im System vorsehen.

### Optimale Sensorplatzierung

Die optimale Sensorplatzierung hängt neben dem übergeordneten Messziel auch von der Anzahl der verfügbaren Sensoren ab, was wiederum direkt mit den Kosten des Einsatzes zusammenhängt. Was die Platzierung der Sensoren betrifft, so gibt es zwei Arten von Anlagen: solche, die das globale Verhalten der Struktur messen, und solche, die den lokalen Schaden untersuchen. Bei der ersten Variante wird das Verhalten der Struktur als Ganzes untersucht und die Sensoren werden nicht unbedingt an Stellen angebracht, an denen die höchste Amplitude oder der höchste Sensorwert erreicht wird, sondern an Stellen, an denen diese Werte leicht zu überprüfen sind und ein normales Verhalten belegen. Umgekehrt werden lokale Schäden erkannt, indem die Sensoren auf einen kleinen Bereich konzentriert werden und starke Abweichungen von den normalen Daten beobachtet werden. Die Platzierung der Sensoren hängt also letztlich vom technischen Urteilsvermögen und der Kenntnis der Struktur ab.

Der Entscheidungsprozess der Sensorplatzierung sollte in drei Schritten erfolgen: Anzahl der Sensoren, Platzierung der Sensoren und Leistungsbewertung [112]. Am Beispiel eines schwingungsbasier-

ten Überwachungsprojekts muss die Anzahl der Sensoren höher sein als die Anzahl der zu identifizierenden Eigenformen. In der Praxis ist es mit mehr Sensoren einfacher, die Modalformen zu identifizieren und voneinander abzugrenzen [113]. Der nächste Schritt besteht darin, die geeigneten Positionen für diese begrenzte Anzahl von Sensoren auszuwählen und die Informationen zu optimieren, die aus ihnen gewonnen werden können, wobei mögliche Einschränkungen (Messbereich, Geräuschpegel usw.) berücksichtigt werden müssen. Es können mehrere Sets untersucht werden, um schließlich die Platzierung mit der besten Leistung auszuwählen.

In der Literatur finden sich mehrere Optimierungsstrategien, die bei diesem Entscheidungsprozess helfen sollen. Diese Methoden vergleichen in der Regel eine definierte „Menge“ von Sensoren mit einer Zielfunktion, behalten die Mengen mit der besten Leistung und eliminieren den Rest. Zu den üblichen Ansätzen für das Optimierungsproblem gehören:

- Methoden der effektiven Unabhängigkeit (EI),
- Kinetische Energie (KE)-Methoden,
- Eigenwert-Vektor-Produkt (EVP)-Methoden,
- Average Driving-Point Residue (ADPR)-Methoden,
- Effective Independence Driving-Point Residue (EIDPR) Methoden,
- Dehnungsenergie-Verteilungsmethoden,
- Modal Assurance Criterion (MAC) basierte Methoden,
- Gemischte Variable Programmierung (MVP) Formulierung,
- Generische Algorithmen (GA),
- Neuronale Netze (NN).

Die Einzelheiten der oben genannten Ansätze sind in [112] und [114] beschrieben.

### 2.4.7 Charakterisierung eines Ingenieurbauwerks: Beispiel

Als Beispiel von möglichen Anwendungen werden in Tabelle 2-2 Sensoren und Messgrößen für verschiedene Parameter aus Sicht des konstruktiven Ingenieurs zusammengestellt. Die Übersicht dient der Veranschaulichung der zuvor beschriebenen Zusammenhänge.

## 2.5 Auswertung von Monitoringdaten

### 2.5.1 Datenerfassung, -übertragung und -verwaltung

Neben der Sensorik umfassen Monitoringeinrichtungen eine Reihe von Komponenten, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Stromversorgung,
- Datenerfassungsgeräte (DAQs, von engl. data acquisition), einschließlich Signalaufbereitungsgeräten, Verstärkern und Analog-Digital-Wandlern (A/D),
- Netze für die Datenübertragung, entweder über Kabel oder über drahtlose Lösungen,
- Geräte zur Datenverarbeitung,

- Speichergeräte zur Speicherung der erfassten Daten und zur Verwaltung der Dateien und
- Werkzeuge zur Kontrolle der Entwicklung des Bauwerkszustands.

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Auswahlprozess für Sensoren und die optimale Position beschrieben. Der nächste Schritt besteht in der Auswahl eines Messgerätes, das die erforderliche Auflösung und Messfrequenz ermöglicht. Oftmals erfolgt dieser Schritt zusammen mit der Sensorauswahl, da gerade bei preiswerten Sensoren der DAQ einen hohen Anteil am Überwachungsbudget darstellt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Konnektivität zwischen Sensoren und DAQ. Sobald die Daten den DAQ erreichen, können sie vor Ort gespeichert oder an einen anderen Ort gesendet werden.

Parameter	Sensor	Messgröße	Anwendung
Geometrie	Laser Scan	Entfernung	Abgleich zwischen Plan und bestehenden Bauwerksabmessungen
	GPS	Standort	Überwachung von Verformungen,
	Digital Image Correlation (DIC)	Kreuzkorrelation zwischen Punkten	Überwachung von Setzungen und/oder Verschiebungen
Ermüdung	Dehnmessstreifen (dynamisch)	Dehnung	Schätzung der Ermüdungslebensdauer
	Faseroptik		Abschätzung der Ermüdungslebensdauer
	Dynamische Waage	Kraft/Druck	Verkehrslasten, Vergleich mit Normen und realen Werten
Spannungsverteilung	Dehnmessstreifen	Dehnung und Kreuzkorrelation zwischen den Punkten	Lokale Spannungen
	Faseroptik		Verteilte/lokale Spannungen,
	DIC		Lokale Spannungen
Rissmuster	DIC	Kreuzkorrelation zwischen Punkten	Risserkennung
	UAV mit Kameras	Bild	Risserkennung
Spannkräfte	Kraftmesszellen	Druck	Zustand der Spannglieder und Vorspannung
	Dehnmessstreifen	Dehnung	
Korrosion	Faseroptik	Verformungen in korrodiertem Stahl	Zustand des Betons aufgrund von Korrosion, Korrosionsvorschub
	Korrosionszellen	Potenzialveränderungen und Polarisationswiderstand	
	Hygrometer	Relative Luftfeuchtigkeit	
	Chlorid-Sonden	Chloridkonzentration	
	Bodeneindringradar	Differenz (Frequenz und Phase) zwischen Sendee- und Empfangssignal	
Verkehrsbelastung	Dynamische Waage	Gewicht	Achslast
	Dehnmessstreifen	Mit dem Gewicht korrelierte Dehnungsänderungen	Achslast
	Kameras	Bild	Verkehrsverteilung, Fahrzeugtyp
Modale Eigenschaften	Beschleunigungssensoren	Vibration	Änderungen der Steifigkeit aufgrund von Beschädigungen
	UAV montiert mit Kamera	Bild	
Wind	Anemometer	Geschwindigkeit/Richtung	Windgeschwindigkeit und -richtung
Temperatur	Temperatursensor	Temperatur	Temperaturschwankungen innerhalb von Bauteilen/ Umgebungstemperaturen
	Faseroptik	Temperatur	

Tab. 2-2: Zuordnung von Sensorik, Messgrößen und Beispielanwendungen zu verschiedenen Untersuchungsparametern

Bei der Durchführung von Sortierkampagnen werden die Daten normalerweise gespeichert und im Nachhinein analysiert. Bei der Langzeitüberwachung und bei Echtzeit-Kampagnen können die Daten jedoch online übertragen werden, so dass das Bauwerk nicht mehr besucht werden muss, um die Daten wiederherzustellen.

In den folgenden Abschnitten wird jeder dieser Schritte und die dafür erforderlichen Elemente näher erläutert.

### **Datenerfassungssysteme**

Datenerfassung ist das Verfahren zur Umwandlung analoger oder digitaler Signale, die von Sensoren über drahtgebundene oder drahtlose Netze übertragen werden, in digitale Daten. Diese Daten können lokal dauerhaft gespeichert werden (z. B. auf einem Computerlaufwerk) oder lokal zu einer reduzierten Menge von Daten höherer Ebene verarbeitet werden, um eine einfachere Übertragung zu ermöglichen. Die Abtastrate der einzelnen Sensoren kann variieren und damit auch die Menge der erfassten Daten. Bei der Auswahl eines Messgeräts sind die Anzahl der Kanäle, die es erfassen kann, die Speicherkapazität und die Abtastrate einige Einschränkungen. Bei statischen Anwendungen kann die Abtastrate von stündlichen Messungen (z. B. Temperatur in einer Brücke) bis hin zu Messungen im Minutentakt (z. B. Dehnung eines Bewehrungsstahls) variieren. Bei dynamischen Signalen z. B. für Frequenzanalysen und für die Auswirkungen aus Verkehr sind höhere Abtastraten erforderlich. Die Abtastrate hängt von der Größe des Bauwerkes und dem Frequenzbereich der externen Belastung ab. Zur Untersuchung der globalen Antworten von Brücken mit großer Spannweite ( $> 500$  m) sollte eine Bandbreite von 10 Hz ausreichen, um Fehler in der Signalanalyse infolge höherer Frequenzanteile (Aliasing) zu vermeiden. Gemäß dem Nyquist-Theorem muss die Abtastrate mindestens dem zweifachen der höchsten Frequenzkomponente des Signals entsprechen. Bei Brücken mit kurzer Spannweite ist eine Bandbreite von bis zu 40 Hz ausreichend. Bei Seismometern wird die Bandbreite normalerweise auf 100 Hz festgelegt.

Allzweck-Logger-Systeme verfügen in der Regel über eine reine Datenerfassungsfunktion. Diese Funktion kann so konfiguriert werden, dass sie eine breite Palette von Sensortypen (z. B. Schwingsaiten und Thermoelemente) mit langsamen Abtastraten, manchmal aber auch mit Hochgeschwindigkeitserfassung erfassen kann. Seismometer und

die Logger oder Schnittstellen für Glasfaserkabel, GPS und andere Signaltypen haben oft eine begrenzte Funktionalität. Solche Logger können vernetzt und direkt abgefragt oder von einem Computer gesteuert werden [115].

### **Datenübertragungssysteme**

Die Verbindung zwischen den Sensoren und der DAQ kann über kabelgebundene oder drahtlose Systeme hergestellt werden.

Bei kabelgebundenen Systemen kann die Technologie die Daten fernmessen und die Stromversorgung der Sensoren über eine direkte Kabelverbindung vom Messwertempfänger zur zentralen Datenanalyseeinrichtung übertragen. Bei kleinen Bauwerken stellt die Verkabelung kein Problem dar, bei großen Bauwerken können Kabel mit einer Länge von über 100 m jedoch Signalprobleme verursachen. Mit zunehmender Länge der Signalübertragungsstrecke wird das analoge Signal verrauschter und verschlechtert sich durch eingekoppelte Rauschquellen in der Nähe des Kabelwegs [116]. Alternativen sind die Verwendung von Glasfaserkabeln zur Herstellung der Verbindung zwischen Sensor und DAQ oder die Verwendung von kabellosen Sensoren.

Mit drahtlosen Sensornetztechniken können die lokalen Erfassungs- und Verarbeitungseinheiten mit einer zentralen Verarbeitungseinheit und untereinander kommunizieren. Ein drahtloses Sensornetz besteht aus einem Netzwerk von mehreren miteinander kommunizierenden, kleinen Computern, die mit einem oder mehreren Sensoren ausgestattet sind [117], die einen Sensorknoten darstellen. Die Kommunikation innerhalb des Netzes erfolgt über Funkübertragungstechniken. Ein Sensor wird als Basisstation ausgewählt, die alle innerhalb des Netzwerks gewonnenen Daten sammelt. Diese Basisstation stellt eine Kommunikationsverbindung zu einer Protokollierungseinheit oder einem entfernten Standort her, wobei standardmäßige drahtgebundene oder drahtlose Kommunikationstechnologien wie Wireless Local Area Network (WLAN) oder Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) verwendet werden.

### **Speicherung von Daten**

Zur Speicherung der Messdaten gibt es verschiedene Optionen. Neben der häufig genutzten Möglichkeit die Daten im ersten Schritt in der DAQ bereitzustellen, sind folgende Optionen möglich:

- dedizierter Speicher im DAQ oder Computer,

- externer Festplattenspeicher,
- Cloud-basierter Speicher.

Die Wahl hängt von der Menge der Daten, der Häufigkeit der Messungen und den Anforderungen des Projekts ab. Für eintägige Kampagnen könnte die einfache Speicherung der Daten im DAQ effektiver und weniger zeitaufwändig sein. Für die Langzeitüberwachung hingegen ist ein Cloud-Speicherplatz, auf dem die Daten leicht abgerufen werden können, von Vorteil. Wenn große Datenmengen zu erwarten sind, sind Kompressionsalgorithmen erforderlich. Darüber hinaus kann vor dem Hochladen eine Vorverarbeitung durchgeführt werden, bei der alle Rohdaten lokal gespeichert werden und nur bestimmte ausgewertete Parameter übermittelt werden.

### 2.5.2 Datenverarbeitung

Die aus dem Monitoring stammenden Daten erfordern eine Vorverarbeitung, bevor Ingenieure diese für weitere Analysen nutzen können. In der Regel sind die folgenden Vorverarbeitungsschritte erforderlich: Validierung, Normalisierung, Bereinigung und Synchronisierung [118], [119].

Während des Validierungsprozesses werden beschädigte oder unvollständige Daten verworfen. Es ist wichtig, diesen Schritt zu Beginn der Vorverarbeitung durchzuführen, um eine Verunreinigung der Datensätze zu vermeiden (Plausibilisierung). Die Datennormalisierung wird durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Datensätze unter den gleichen Bedingungen gemessen werden. Im Allgemeinen müssen die Datensätze im Hinblick auf Umwelt- und Betriebsbedingungen normalisiert werden [119], um falsche Ergebnisse zu vermeiden. Es werden verschiedene Strategien angewandt, die normalerweise die Eigenschaften der Messhardware mit einem Vorverarbeitungsalgorithmus kombinieren. Die Wahl hängt von der Kenntnis des Eingangs ab, da der betriebliche Einfluss oft nicht gemessen wird. Die Datenbereinigung besteht in der Auswahl der Informationen, die für die Nachbearbeitung wesentlich sind. Im Gegensatz zur Validierung sind hier zwar alle Daten korrekt, aber nicht alle werden für eine effiziente Bewertung benötigt. In anderen Fällen führt der Bereinigungsprozess zu einem bereinigten Datensatz, wie bei der Filterung oder Dezimierung.

Wenn alle Datensätze den oben beschriebenen Prozess durchlaufen haben, können sie schließlich miteinander synchronisiert werden. Zu diesem

Zweck sollten alle Daten aus verschiedenen Anlagen oder Messgeräten einen Zeitstempel tragen. Idealerweise werden dann alle Daten in denselben Dateityp konvertiert.

### 2.5.3 Etablierte Monitoring-Techniken

Obwohl einige der oben vorgestellten Sensoren einen direkt ablesbaren Wert liefern können, wie z. B. Sensoren zur Erfassung der Umwelteinflüsse, erfordern die meisten Sensoren zunächst eine Aufbereitung und Analyse der Messwerte, um das Tragwerk beurteilen zu können. Mit der Datenanalyse kann ein direktes Bild des Bauwerkzustands erzeugt werden. Ebenso kann mit der Analyse des zeitlichen Verlaufes der Messwerte eine Vorhersage über die Zustands- und Schadensentwicklung gemacht werden. Einige der wichtigsten Techniken werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### Schwingungsbasierte Überwachung

Schwingungsbasierte Überwachungstechniken beruhen auf der Erkennung von Eigenschaften in der Dynamik des Bauwerkes, welche mit der Integrität der Tragstruktur im Zusammenhang stehen: Dies kann entweder im Zeit- oder im Frequenzbereich erreicht werden. Im Zeitbereich werden die Veränderungen eines Signalwertes über den Zeitraum sichtbar, während man im Frequenzbereich den Anteil der Signale innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes beobachtet. Wie von FAN und QIAO [120] erläutert, sind Änderungen der physikalischen oder strukturellen Eigenschaften, wie Dämpfung oder Steifigkeit, mit Änderungen der Eigenfrequenzen, der modalen Dämpfung und der Modalformen verbunden. Häufig sind diese Veränderungen mit Schäden am Tragwerk verbunden, z. B. ungewöhnliche Steifigkeitsminderung eines Betontägers aufgrund ausgedehnter Risse oder einer Veränderung der Seilkräfte in Schrägkabelbrücken. Die schwingungsbasierte Überwachung umfasst eine breite Palette von Methoden und Möglichkeiten. So werden in der Literatur mehrere Klassifizierungen angeboten, die auf a) dem extrahierten Merkmal, b) der Systemidentifizierungsmethode oder c) dem Niveau des maschinellen Lernens basieren. Die meisten der Techniken können auch auf andere Arten von Messgrößen angewandt werden und werden häufig kombiniert, z. B. Temperatur- und Dehnungsmessungen an Brücken.

### Klassifizierung auf der Grundlage extrahierter Merkmale

Die wichtigsten Merkmale, die bei der Anwendung schwingungsbasierter Techniken extrahiert werden können, sind Eigenfrequenzen, Modalformen und modale Krümmungen. Die einfachsten und am häufigsten verwendeten Merkmale bei schwingungsbasierten Methoden sind Eigenfrequenzen, wie sie von CAWLEY und ADAMS [121] und SAMMAN und BISWAS [122] beschrieben wurden. Einer der Vorteile von Eigenfrequenzen ist die begrenzte Anzahl der benötigten Sensoren, was die Installation und die nachträgliche Analyse vereinfacht [123]. Bei dieser Methode können die Beschleunigungsaufnehmer an den Stellen angebracht werden, an denen die Amplitude der Hauptschwingungsformen (z. B. der ersten, zweiten und dritten Schwingungsform) des Bauwerks am stärksten zu erwarten ist. Dann wird die Studie über einen Zeitraum z. B. von einem Jahr durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur zu erfassen. Die Frequenzen der einzelnen Modi sollten innerhalb eines bestimmten Bereichs liegen und für jede Modalform sind Schwellenwerte festzulegen. Wenn diese Schwellenwerte überschritten werden, deutet dies auf eine Beschädigung hin: Die Frequenzen hängen mit der Steifigkeit zusammen und eine Verringerung der Steifigkeit kann auf ein Problem hindeuten. Viele Steifigkeitsänderungen sind die Folge einer zulässigen Rissbildung infolge einer Biegung- oder Torsionsbeanspruchung aus einer seltenen Lastkombinationen, welche das Rissmoment übersteigen. Steifigkeitsänderungen aus zulässigen Rissbildung und aus Schäden müssen unterschieden werden. Diese Möglichkeiten sind bei der Definition der Schwellenwerte (insbesondere bei jungen Bauwerken mit einer kurzen Belastungsgeschichte) richtig zu erfassen. Dies setzt eine sorgfältige Auseinandersetzung mit dem Bauwerksverhalten voraus. Einfacher ist die Interpretation bei Bauteilen, welche im intakten Zustand überdrückt und ungerissen bleiben sollen. So deutet die Steifigkeitsänderung auf den Verlust der Kompression (z. B. Schädigung an der Vorspannung) hin.

Änderungen der Frequenzen ermöglichen eine Identifikation von Schäden, nicht aber deren Lokalisierung. Die Lokalisierung kann mit modalform- und krümmungsbasierten Methoden erfolgen, wie in [124] und [125] beschrieben. Die modalform- und krümmungsbasierten Methoden benötigen eine größere Anzahl Sensoren, werden aber im Vergleich zur Frequenzanalyse weniger von den Umgebungsbedingungen beeinflusst. In diesem Zu-

sammenhang sind auch auf Dehnungsenergie basierende Methoden ([126], [127], [128]) oder Methoden der modalen Flexibilität ([129], [130], [131]) entstanden. Diese Parameter lassen sich mithilfe mathematischer Modelle bestimmen. Anhand der Parameter können Abweichungen der Eigenschwingmerkmale von der Normalform erfasst werden. Dies lässt nicht nur eine Aussage über den Ort des Schadens zu, sondern auch über die Schadensart. Die Schadenserkenkung ist jedoch noch nicht automatisiert und erfordert Expertenwissen über das Tragwerksverhalten.

Sobald spezifische Parameter definiert sind, kann die Analyse mit einem Tragwerksmodell gekoppelt werden, um die physikalischen Eigenschaften abzurufen und den Zustand des Bauwerkes zu bewerten. Dieses Thema wird im Abschnitt Digitaler Zwilling und Finite-Elemente-Modellaktualisierung (siehe unten) näher erläutert.

### Klassifizierung auf der Grundlage von Systemidentifizierungsmethoden

Der Prozess der Systemidentifikation (SI) besteht in der Modellierung eines unbekanntes Systems auf der Grundlage einer Reihe von Input-Output-Parametern. Im Bauwesen wird das Bauwerk als System identifiziert. Der Input ist die Anregung und die aus Messungen gewonnenen Daten entsprechen dem Output.

Die Anregung kann entweder experimentell (Experimental Modal Analysis [EMA]) oder aus den Betriebsbedingungen (Operational Modal Analysis [OMA]) erzeugt werden. Der Vorteil der EMA besteht darin, dass man in einem kontrollierten Aufbau die Erregung nach Bedarf modulieren kann. Allerdings ist ein Schwingungserreger mit ausreichender Leistung erforderlich und ggf. eine Sperrung des Verkehrs notwendig. Deshalb werden bei der Messung an Bauwerken in der Regel OMA-Methoden bevorzugt. Diese haben den Nachteil, dass der Verkehr als häufigste Betriebsbedingung oft nicht gemessen wird und eine weitere Unbekannte in die Gleichung einbringt. Beispiele von erfolgreichem Einsatz der OMA-Techniken sind in [123], [124] und [125] gegeben.

In der Literatur wird zwischen zwei Klassen von SI-Methoden unterschieden, die parametrische und die nicht-parametrische Identifizierung. Bei den nicht-parametrischen Methoden werden die Leistungsspektraldichte, die Übertragungsfunktionen und die Impulsantworten geschätzt, ohne eine Mo-

dellstruktur auszuwählen. Sie liefern nur begrenztes Wissen über die Antwort, obwohl ihre Implementierung einfach und rechnerisch effizient ist. Beispiele für diese Methoden sind die Leistungsspektraldichte (PSP) oder die Frequenzantwortfunktion (FRF) ([132], [133], [134], [135]).

Parametrische Methoden basieren auf einer Reihe von strukturierten Parametern und bieten eine höhere Genauigkeit bei der Schätzung, sind aber mit einem höheren Rechenaufwand verbunden. Diese Methoden beschreiben ein Modell in der Regel entweder in einer autoregressiven Form oder mittels einer Zustandsraumdarstellung und wurden ausführlich untersucht ([136], [137], [138], [139]).

### **Klassifizierung auf der Ebene des maschinellen Lernens**

Im Zusammenhang mit Monitoring zielt der Ansatz des maschinellen Lernens darauf ab, Wissen aus Sensordaten zu gewinnen und über Analysen neue Informationen zu generieren, welche beispielsweise Informationen zur verbleibenden Lebensdauer des Bauwerks geben sollen. Diese Aufgabe kann mit überwachtem, unüberwachtem oder halbüberwachtem Lernen durchgeführt werden.

Überwachtes Lernen basiert auf dem Prinzip der Kennzeichnung und Paarung von Input-Output-Datensätzen indem bestimmte Regeln oder Verbindungen festgelegt werden. Dieser Ansatz umfasst Techniken wie Support Vector Machines (SVM), lineare und logistische Regression, statistisches Lernen (wie naive Bayes-Klassifikatoren und Bayes'sche Netze) oder Convolutional Neural Networks (CNN) [140], [141], [142]). Unter gekennzeichnete (gelabelten) Daten werden sowohl unabhängige Variablen (Features) als auch abhängige Variablen (Label) verstanden. Das Label fließt mit in das Modelltraining ein, damit das trainierte Modell bei neuen Daten (ohne Label) das Label vorhersagen kann.

Unüberwachte Verfahren teilen die Daten in einen Trainings- und einen Erkennungssatz auf. Der Trainingssatz wird als Basislinie verwendet und der Erkennungssatz wird zur Validierung verwendet. Bei diesem Verfahren ist eine vorherige Kennzeichnung nicht erforderlich. Methoden wie die Hauptkomponentenanalyse ([143], [144]) und tiefe neuronale Netze ([145], [146]) gehören zu den unüberwachten Verfahren.

In Bezug auf das Monitoring können unüberwachte Verfahren das Vorhandensein von Schäden erken-

nen, während überwachte Verfahren zusätzlich Art und Schwere von Schäden erkennen können. Das halbüberwachte Lernen oder Online-Lernen ist ein gemischter Ansatz, welcher in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat. Hierbei wird der Trainingssatz (Basislinie) sowohl mit gelabelten (unabhängige Variablen) als auch mit nicht gelabelten Daten trainiert werden, wobei davon ausgegangen wird, dass letztere Verteilungsinformationen liefern können, um einen stärkeren Klassifikator zu erstellen. Beispiele für seine Anwendung finden sich in [147] und [148].

### **Finite-Elemente-Modellaktualisierung**

Mithilfe numerischer Modelle (Finite-Element-Modell – FEM) kann das reale Verhalten des Tragwerkes während seiner Lebensdauer simuliert werden. Ein FEM ermöglicht die Simulation von Belastungsszenarien und verschiedenen Arten von Spannungen und bietet gleichzeitig die Möglichkeit, über die genauen Punkte, an denen die Sensoren installiert wurden, hinaus Rückschlüsse auf das Verhalten der restlichen Struktur zu ziehen. Zur Kalibrierung des FEMs anhand gemessener Daten werden Modellaktualisierungstechniken eingesetzt. Die meisten dieser Verfahren beziehen sich auf dynamische Eigenschaften, obwohl auch andere Messgrößen einbezogen werden können. Diese Methoden bestehen darin, eine Reihe von Parametern des Modells zu ändern, um eine gute Übereinstimmung zwischen dem FE-Modell und den von den Sensoren kommenden Informationen zu erreichen. Im Allgemeinen kann eine a priori Kenntnis der Struktur die Aufgabe erleichtern und die Auswahl der Kalibrierungsparameter fokussieren. Wenn z. B. ein bestimmter Bereich einer Betonstruktur Risse aufweist, wird der Elastizitätsmodul dieses Bereichs in die Parameter einbezogen, aber nicht unbedingt für die gesamte Struktur. Es ist jedoch möglich, die Modalaktualisierung ohne tiefes Wissen über die Struktur durchzuführen, nur auf der Grundlage von Informationen aus den Bauwerksplänen.

Die interessantesten Verfahren sind heutzutage Bayes'sche Methoden, Sensitivitätsmethoden und dynamische Störungsmethoden. Bei Bayes'schen Methoden werden die gemessenen Daten (z. B. Schwingungen, Dehnungen und Temperatur) verwendet, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Hypothese (z. B. Schäden in der Struktur) abzuleiten [149], [150]. Sensitivitätsmethoden verwenden die Sensordaten innerhalb einer abgeschnittenen Taylorreihe als Funktion der unbe-

kannten Aktualisierungsparameter. Diese Beziehung ist in der Regel nichtlinear, so dass auch eine Linearisierung verwendet wird [149]. Sensitivitätsmethoden funktionieren gut, wenn der Unterschied zwischen dem ursprünglichen Modell und den Messungen nicht wesentlich ist. Wenn dieser Unterschied größer wird und die lineare Annäherung erster Ordnung nicht ausreicht, wird eine exakte Beziehung durch dynamische Störungsmethoden gesucht. Die Störungsexpansionsmethode ist eine mathematische Technik, die kleine Änderungen am dynamischen Ausgangssystem vornimmt, die zur Lösung konvergieren [151]. Bei der Erkennung von Schäden auf der Grundlage von Modalformen bieten Finite-Elemente-Modellaktualisierung eine niedrige Fehlerquote bei der Identifizierung der richtigen Formen und eine hohe Genauigkeit in der Erkennung von Schäden [152].

## 2.6 Trends und zukünftige Entwicklungen

Sowohl die Sensortechnologien als auch die Monitoring-Techniken entwickeln sich weiter, wobei häufig Systeme aus anderen Bereichen, z. B. aus dem Maschinen- und Anlagenbau übernommen und an die Anforderungen an Ingenieurbauwerken angepasst werden. So können beispielsweise dank der Entwicklungen im Bereich Big Data größere Datenmengen verarbeitet werden. Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren immer genauere, kleinere, präzisere und kostengünstigere Sensoren entwickelt.

Einige interessante aktuelle Trends sind:

- die Verwendung von Smartphones zur Erfassung von Informationen [153] oder zur Ermittlung von Kabelkräften an Schrägkabelbrücken [154], [155],
- die Verwendung kostengünstiger Mikrocomputer als Datenlogger in drahtlosen Sensornetzwerken [25],
- der Einbau von Sensorik in Fahrzeuge und Züge zur Überwachung der Infrastruktur [156],
- der Einsatz bildgebender Verfahren (Computer Vision),
- der Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) bzw. Verfahren des maschinellen Lernens sowie

- die Verknüpfung von Monitoring, BIM und digitaler Zwilling (Building Information Model) [157].

Die Entwicklung intelligenter Sensorsysteme, die neben der reinen Datenerfassung auch eine Datenauswertung und -analyse übernehmen, wird auch zukünftig noch deutlich mehr an Bedeutung gewinnen. Als aktuelle Beispiele sind hier das Intelligente Lager und die Intelligente Fahrbahnübergangskonstruktion zu nennen, die im Rahmen des BAST-Forschungsfeldes „Intelligente Infrastrukturen“ innerhalb des Digitalen Testfeldes Autobahn entwickelt wurden. [171]

Der Einsatz bildgebender Verfahren bzw. die Verwendung qualitativ hochwertiger Bilddaten zur Unterstützung der konventionellen Bauwerksprüfung ist an dieser Stelle besonders herauszuheben, da dieses Verfahren bei allen Verkehrsträgern zunehmend an Bedeutung gewinnt und in zahlreichen Forschungsprojekten untersucht und umfangreichen Pilotstudien praxisnah getestet wird. Moderne Computer-Vision-Verfahren und der Einsatz von Verfahren des Maschinellen Lernens als Teilgebiet der künstlichen Intelligenz (KI) ermöglichen die automatische Detektion von visuell erkennbaren Schäden auf der Bauwerksoberfläche und können darüber hinaus bei entsprechender Datenerfassung wichtige geometrische Informationen liefern. So können aus zusammenhängenden Bildverbänden georeferenzierte 3D-Bauwerksmodelle, die die tatsächliche IST-Geometrie abbilden, erzeugt werden, die zur Untersuchung und Überwachung von geometrischen Veränderungen (Verformungen) des Bauwerks genutzt werden können. Diese As-Built-Modelle können auch die Grundlage für weitere Modellierungsprozesse bilden, wie z. B. die Erstellung von FE-Simulationsmodellen oder BIM-Modellen, die für eine modellbasierte und kontextbezogene Speicherung aller relevanten Daten im Prozess der Bauwerksprüfung genutzt werden können. Digitale Bilddaten können an Bauwerken teilweise bereits automatisiert erfasst werden und ermöglichen eine computergestützte Auswertung. Dadurch kann ein hoher Grad der Automatisierung erzielt werden, so dass zukünftige Prozesse der Bauwerksüberwachung, insbesondere die Erfassung, Dokumentation und Prognose zur Zustandsentwicklung, auch zunehmend effizienter umgesetzt werden können. In Kapitel 10.1.1 werden die möglichen Potenziale einer bildbasierten Bauwerksprüfung dargestellt.

### 3 Monitoring – Anwendung, Aussagekraft und Potenziale

Kapitel 3 gibt einen umfassenden Überblick über aktuelle Monitoringprojekte an Brückenbauwerken. Dabei werden insbesondere Anwendungen des anlassbezogenen Monitorings betrachtet und systematisch aufbereitet. Ziel dabei ist die Ableitung des Anwendungspotenzials und der Aussagekraft von Monitoring.

Für die einzelnen Monitoringanwendungen werden unter anderem der Anlass und das Ziel, das Messkonzept und die Ergebnisse mit den relevanten Bauwerksinformationen erfasst und zusammenfassend dargestellt. Vier ausgewählte Monitoringprojekte, die sich ihrem Anlass unterscheiden, werden detailliert dargestellt. Mithilfe dieser Fallbeispiele werden in den nachfolgenden Kapiteln Rückbezüge geschaffen.

Weiterhin werden typische Schäden der alternden Infrastrukturbauwerke zusammenfassend dargestellt. Dabei werden eindeutige Charakteristika, wie Baujahr und Bauart, benannt, die nachfolgend als Performance Indikator genutzt und zur Clusterbildung herangezogen werden können (siehe Kapitel 4 und 7).

#### 3.1 Zielgrößen beim Bauwerksmonitoring

Bei der Anwendung von Bauwerksmonitoring zur Ermittlung des strukturellen Trag- und Verformungsverhaltens ist zwischen Messgrößen und Zielgrößen zu unterscheiden. Messgrößen, wie beispielsweise Beschleunigungen, können, ungeachtet des Messprinzips, direkt mit der Sensorik erfasst werden und bedürfen keiner zusätzlichen Prozessierung und Interpretation. Typische Zielgrößen des

Monitorings sind oftmals nicht direkt messbar, sondern müssen über Modellbeziehungen aus den Messgrößen ermittelt werden. So sind mechanische Spannungen nicht direkt messtechnisch erfassbar, können aber zum Beispiel über die Messung einer Dehnung und unter Ansatz eines Materialmodells ermittelt werden. Gleiches gilt für die Zielgröße Eigenfrequenz, welche erst unter Anwendung von Methoden der Signalverarbeitung (siehe Kapitel 2.5) aus Beschleunigungsmessungen bestimmt werden kann. Nachfolgend wird daher zwischen Messgrößen und Zielgrößen unterschieden.

In Tabelle 3-1 sind typische Messgrößen für die drei Kategorien zur Erfassung von Bauwerksreaktionen, einwirkenden Lasten und Umwelteinflüssen gegeben. Bauwerksreaktionen können dabei unter statischer oder dynamischer Beanspruchung erfasst werden. Für den Fall der dynamischen Beanspruchung ist insbesondere bei der Planung des Messsystems auf die Auswahl geeigneter Sensorik und Datenlogger zu achten. Neben der Bauwerksantwort werden oftmals auch die einwirkenden Lasten erfasst. Dazu zählen insbesondere Achslasten und deren zeitlicher Abstand, welche der Ermittlung von Fahrzeuggeschwindigkeiten und deren Verteilung dienen. Darüber hinaus werden Umgebungseinflüsse wie Lufttemperatur, -feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit erfasst, da diese einen Einfluss auf die Messergebnisse haben können (siehe Kapitel 2.4.4).

Die typischen Zielgrößen variieren je nach Anwendungsszenario. Im einfachsten Fall stimmen Zielgrößen mit Messgrößen überein. Ein Beispiel dafür wäre die Ermittlung der maximalen Durchbiegung oder der Lagerverschiebung an einer Brücke, bei der die Verschiebungen direkt durch Sensorik erfasst werden. Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich im Kontext des Bauwerksmonitorings typischerweise die Zielgrößen von den Messgrößen.

Statische und dynamische Bauwerksreaktionen	Einwirkende Lasten	Umgebungseinflüsse (Effekte aus der Umwelt)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verformungen / Verschiebungen</li> <li>• Verdrehungen / Neigungen</li> <li>• Dehnungen</li> <li>• Beschleunigungen</li> <li>• Schwinggeschwindigkeiten</li> <li>• Schallemissionen</li> <li>• ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achslasten und zeitlicher Abstand</li> <li>• Überfahrtereignisse</li> <li>• Temperaturlasten               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauteiloberflächentemperatur</li> <li>- Bauteilinnentemperatur</li> </ul> </li> <li>• ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lufttemperatur</li> <li>• Luftfeuchtigkeit</li> <li>• Windgeschwindigkeit</li> <li>• Windrichtung</li> <li>• Regenmenge</li> <li>• Strahlung</li> <li>• ...</li> </ul>

Tab. 3-1: Typische Messgrößen für statische und dynamische Bauwerksreaktionen, einwirkende Lasten und Umgebungsbedingungen (siehe auch Kapitel 2.4)

Typische Zielgrößen des Bauwerksmonitoring sind beispielsweise:

- Verformungen bzw. Verschiebungen an definierten Positionen,
- einwirkende Lasten,
- Beanspruchungen: Spannungen und Schnittgrößen an definierten Stellen,
- Bauteilsteifigkeiten bzw. Schädigungsinformationen,
- Materialparameter,
- modale Eigenschaften (Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfung) und deren Änderung,
- Standsicherheit,
- Zuverlässigkeit und
- Restnutzungsdauer.

Typische Einflussgrößen auf die Messungen sind die Temperatur und die Verkehrsbeanspruchung, diese Einflüsse müssen bei der Bestimmung von Zielgrößen kompensiert werden.

Die Temperaturbeanspruchung kann je nach Art und in Abhängigkeit des Tragsystems zu unterschiedlichen Beanspruchungen führen. Neben der temperaturbedingten Längenänderung können Zwangsbeanspruchungen auftreten, die zu inneren Schnittgrößen führen. Darüber hinaus ist der Einfluss der Temperatur auf Materialeigenschaften zu beachten. So ist beispielsweise bei schwingungsbasierten Untersuchungen der Einfluss von Temperaturänderungen auf die ermittelten Eigenfrequenzen zu beobachten [87]. Für die Verwendung extrahierter Eigenfrequenzen zur Schadenskorrelation sind entsprechende Auswertemethoden anzuwenden, die den Einfluss von Temperaturänderungen kompensieren bzw. die temperaturbedingte Änderung der Eigenfrequenz getrennt betrachten.

Auch die Verkehrslasten haben in der Form von sich bewegenden Lasten einen Einfluss auf Messgrößen. Im statischen Lastfall führt die Beanspruchung zu einer Formänderung, die durch die Sensorik zu erfassen ist. Bei der Betrachtung einer dynamischen Belastung ist die Änderung in der Messgröße nicht die Zielgröße. Die sich bewegenden Lasten, die in Abhängigkeit der Lastposition in Längs- und Querrichtung einen unterschiedlichen Einfluss auf die verschiedenen Messgrößen haben, führen eher zu einer Art Unschärfe, die als eine Art

Rauschen betrachtet werden kann. Überfahrten von Krafffahrzeugen führen neben der Anregung des Bauwerks auch zu einer Veränderung der Masse. Im Fall dynamischer Messungen zur Ermittlung modaler Eigenschaften kann dies zu einer geringfügigen Variation der ermittelten Eigenfrequenzen führen, da sich die Masse bei gleichbleibender Steifigkeit des Bauwerks ändert.

## 3.2 Anwendung von Monitoring in der Bauwerkserhaltung

### 3.2.1 Aktuelle Anwendungen und Zielstellung

Das Monitoring des Trag- und Verformungsverhaltens von Bestandsbrücken findet in den letzten Jahren vermehrt Anwendung. Gründe dafür sind unter anderem das Alter von Ingenieurbauwerken (siehe Bild 1-1: Altersstruktur der Bestandsbrücken der Bundesfernstraßen nach dem Anteil an der Gesamtbrückenfläche in % mit Stand 01.09.2020 [9]), beobachtete Schädigungen und die im Vergleich zur Planung gestiegenen Anforderungen an die Tragfähigkeit bei gleichzeitiger Begrenztheit von Investitionsmitteln für die Ertüchtigung von Infrastrukturbeständen. Die Ziele für den Einsatz von Monitoring sind vielfältig. Um beispielsweise Einschränkungen des Verkehrsflusses bis hin zu Sperrungen von Ingenieurbauwerken zu verhindern oder zur Sicherstellung der Restnutzungsdauer (bis zum Neubau), werden zum aktuellen Zeitpunkt hauptsächlich anlassbezogene Monitoringmaßnahmen ergriffen.

Eine Übersicht über verschiedene Monitoringprojekte an Straßenbrücken innerhalb Deutschlands wurde erarbeitet und ist in Anhang A gegeben. Dabei werden folgende Merkmale für ausgewählte Beispiele des anlassbezogenen Monitorings erfasst:

- Name und Standort,
- Baujahr / Jahr der Inbetriebnahme,
- Brückentyp (Bauweise und Konstruktion),
- Anlass bzw. beobachtetes Problem,
- Ziel,
- Monitoringkonzept,
- Messgrößen,
- Messtechnik,

- Ergebnisse und
- Potenzial.

Die erarbeitete Zusammenstellung mit Fokus auf den Standort Deutschland bildet nur einen Teil durchgeführter Monitoringmaßnahmen an Bestandsbauwerken ab und erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Weiterhin ist zu beachten, dass einige Datensätze unvollständig sind, da nicht alle Informationen in den verschiedenen Quellen angegeben wurden.

In Bild 3-1 ist die Verteilung der Baujahre der untersuchten Brückenbauwerke mit anlassbezogenem Monitoring dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Konzentration für Brücken mit Baujahr zwischen 1970 - 1974. Die überwiegende Mehrheit der überwachten Brücken befindet sich in einem Baujahresbereich von 1955 - 1980.

Im Folgenden werden die Ergebnisse anhand von Steckbriefen für verschiedene Anlässe, verfolgte Ziele und Monitoringkonzepte zusammengefasst. Anschließend werden vier anlassbezogene Monitoringprojekte, die sich in ihrem Anlass unterscheiden, detaillierter vorgestellt. Diese Fallbeispiele werden in den nachfolgenden Kapiteln aufgegriffen, um Zusammenhänge und Konzepte zu erläutern und zu illustrieren.

Zwischen den beschriebenen Anlässen und den verfolgten Zielstellungen wurde in den Veröffentlichungen teilweise nicht unterschieden. Im Folgenden wird zwischen beiden unterschieden, auch wenn Dopplungen auftreten.

#### Anlässe für Monitoringmaßnahmen an Bestandsbrücken:

- auftretende Schädigungen:
  - an Koppelfugen,

- infolge unbekannter Ursache,
- infolge fehlerhafter Konstruktion,
- bei Schadenszunahme trotz vorangegangener Sanierungsmaßnahmen,
- Gefahr des plötzlichen Versagens infolge Spannungsrissskorrosion (SpRK),
- nicht zu erbringende Nachweise bei Nachrechnung der Bestandsbrücke,
- zustandsbedingte oder nachrechnungsbedingte verkehrstechnische Kompensationsmaßnahmen (Lkw-Überholverbot, Abstandgebot, Geschwindigkeitsbegrenzung, Spersperrung, ...),
- Unsicherheit über das Tragverhalten oder die Restnutzungsdauer,
- Unsicherheit über die Effizienz ausgeführter Verstärkungsmaßnahmen,
- erforderliche (aufwändige) Sonderprüfungen in geringen Abständen oder an schwer zugänglichen Stellen.

#### Zielstellungen für Monitoring an Bestandsbrücken:

- Sicherung bzw. Gewährleistung der Restnutzungsdauer,
- Detektion von plötzlichen Schadensereignissen und der Größe der Schädigung (ggf. Anbindung eines Alarmsystems),
- Identifikation realer Beanspruchungen zum Ansatz bei der Nachweisführung (Nachrechnung):
  - Verkehrslasten: Achslasten, -verteilungen, Geschwindigkeiten,
  - Identifikation von Lastüberschreitungen,
  - mechanische Beanspruchungen, wie Schnittgrößen und Spannungen,

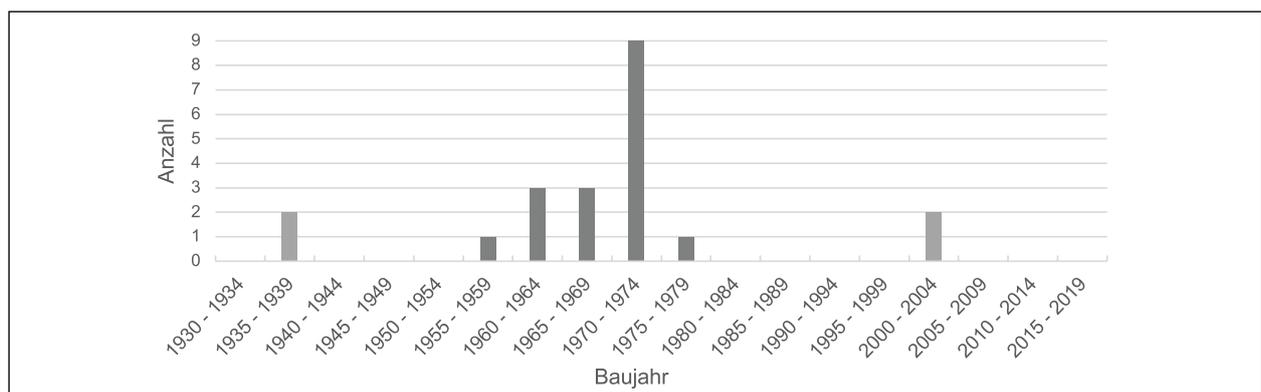


Bild 3-1: Verteilung der Baujahre der untersuchten Brückenbauwerke mit anlassbezogenem Monitoring (eigene Darstellung)

- Überwachung des Trag- und Verformungsverhaltens:
  - bei benachbarten Bauarbeiten: Abriss, Tiefgründungen von Neubauten,
  - bei neuartigen Bauweisen,
- Reduzierung von Sonderprüfungen und aufwendigen Sichtprüfungen an ggf. schwer zugänglichen Stellen,
- Überwachung von Teilkomponenten und neuralgischen Punkten des Tragwerks (bspw. Endverankerungen, Gerbergelenk),
- Verifizierung von:
  - Wirksamkeit bzw. Effizienz von Verstärkungsmaßnahmen,
  - geplantem Ausbaukonzept,
- Erprobung „neuer“ bzw. alternativer Messverfahren,
- Validierung statischer Berechnung und Update eines FE-Modells / Parameteridentifikation,
- Überprüfung normativer Festlegungen (bspw. Lagerverschiebungen Brücken),
- Ermittlung modaler Eigenschaften,

#### **Messkonzepte für das Monitoring an Bestandsbrücken:**

- Schallemissionsmessung zur Detektion von Spanndrahtbrüchen bei spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brücken,
- Beschleunigungsmessung zur Identifikation von Kabelkräften,
- Neigungsmessung zur abschnittswise Ermittlung von Bauteilkrümmungen und -steifigkeiten,
- Verschiebungsmessung an Koppelfugen zur Ermittlung realer Spannstahldehnungen,
- Belastungsversuche zur Kalibrierung der Messergebnisse,
- Ermittlung der Überbauverformungen:
  - aus Dehnungsmessungen,
  - mittels Schlauchwaage,
  - Laserscanner.

#### **Ergebnisse und Erfolge von Bauwerksmonitoring an Bestandsbrücken:**

- Abschätzung und Gewährleistung der Restnutzungsdauer,
- Beobachtbarkeit der Schädigungsprozesse und Identifikation von Schadensereignissen,
- Aufhebung von Beschränkungen des Verkehrsflusses möglich (Abstandsgebot, Überholverbot und Geschwindigkeitsbegrenzungen),
- sofortige Alarmierung bei Grenzwertüberschreitungen infolge kontinuierlicher Überwachung,
- Dauermonitoring als Alternative zu aufwändigen Sonderprüfungen,
- Ermittlung interner Beanspruchungen und Nutzung dieser zur Nachweiserbringung, wie Temperaturlasten (Temperaturgradient), Seilkräfte, Längsdruckkräfte im Überbau.

### **3.2.2 Ausgewählte Monitoringprojekte**

Nachfolgend werden vier ausgewählte Monitoringprojekte ausführlicher beschrieben. Diese unterscheiden sich in Anlass, Schadensproblematik, Messtechnik und der Tiefe der Auswertung. Diese Projekte sollen zu einem späteren Zeitpunkt aufgegriffen werden, um das Konzept der Ableitung von Indikatoren (PI und KPI), bis hin zur Verknüpfung mit einem LZM darzustellen.

#### **Fallbeispiel 1 – Spannbetonbrücke über die DB, Waren**

Standort:

Waren (Müritz)

Brückentyp:

3-feldrige Spannbeton-Plattenbrücke (schiefwinklig); 2 Teilbauwerke

Inbetriebnahme:

1973

Brückenklasse:

BK 60/30

Überführung:

B 192 (hohe regionale Bedeutung insb. für Schwerlastverkehr)

Unterführung:

DB AG (wichtige N-S-Strecke, hohe überregionale Bedeutung, TEN-Netz), Strecke 6325 Neustrelitz-Rostock

Problem:

- stark SpRK-gefährdeter Spannstahl (BSG 25 und BSG 100 Henningsdorfer Spannstahl)
- Nachweis über ausreichendes Ankündigungsverhalten (Nachrechnung 2011)

- Weiterbetrieb der Brücken nur unter Voraussetzung verkürzter Inspektionsintervalle zulässig
- verkehrliche Kompensationsmaßnahmen (Abstandgebot und Überholverbot)

#### Anlass:

- erforderliche regelmäßige handnahe Prüfung in kurzen Zeitabständen nur eingeschränkt möglich (Gleisperrungen notwendig)
- Monitoring als technische und wirtschaftliche Alternative zur handnahen Prüfung mit Gleisperrungen

#### Ziel:

- prognostizierte Vorankündigung bezüglich Versagens einzelner Spanndrähte infolge SpRK sicherzustellen (Detektion von Biegerissbildung infolge Spanngliedausfall)
- Reduzierung der handnahen Prüfung (jährliche Sonderprüfung) auf ereignisabhängige visuelle Begutachtung als Alternative zu jährlicher Sonderprüfung
- kontrollierte Sicherung der Restnutzungsdauer (keine Lebensdauererlängerung)

#### Messkonzept:

- keine ganzheitliche Überwachung des Tragwerks, sondern zielgerichtet auf Biegerissbildung
- Erfassung der Überbauverdrehung an 6 Positionen entlang des Überbaus zur Ermittlung der mittleren Krümmungen (abschnittsweise) sowie des geschädigten Bereichs
- zusätzliche Messung von Dehnungen zur Erfassung von Fahrzeugüberfahrten und Temperaturen zur Kompensation
- Kalibriermessungen / Probelastungen mit Lkw-Überfahrten (40t)
- 6-monatige Lernphase zur Ermittlung des „normalen“ Bauwerksverhalten

#### Messgrößen:

- Neigungen, Dehnungen, Temperaturen
- Zielgrößen:
- Kurzzeitverformungen, irreversible Verformungsanteile

#### Messsystem:

- 7 (6) Neigungssensoren entlang der Längsachse (jeweils Nord-/ Südteilbauwerk)

- 1 (1) Dehnungssensor in Feldmitte
- 5 (5) Temperatursensoren

#### Ergebnisse:

- allmähliche Schädigung konnte durch Vergrößerung der Krümmungen (unter gleicher Last) durch Monitoring und Belastungsversuche erkannt werden: Biegeriss unter Gebrauchslasten detektiert und das tatsächliche Eintreten des Riss-vor-Bruch-Kriterium bestätigt
- Bereich der Schädigung konnte ermittelt werden
- der Biegeriss wurde in Sonderprüfung aufgefunden
- Vorankündigung des Versagens SpRK-gefährdeter Brücken konnte bestätigt werden, hier war Riss-vor-Bruch-Kriterium vorher rechnerisch ausreichend nachgewiesen

#### Potenzial:

- unter den ggb. Randbedingungen ist Monitoring eine Alternative zu Sonderprüfung
- Rissbildung rein visuell an Spannbetonbrücke nur unter sehr großer Belastung erfassbar, dem gegenüber ist der Steifigkeitsverlust messtechnisch identifizierbar und konnte durch Biegeriss bestätigt werden
- kritische Veränderung im Verformungsverhalten messtech. deutlich eher erfassbar
- Ursache für kurzzeitige Überbelastung oder fortschreitende SpRK konnte nicht erklärt werden

#### Literatur:

BOLLE et al.: Messtechnische Dauerüberwachung zur Absicherung der Restnutzungsdauer eines spannungsrissskorrosionsgefährdeten Bauwerks. Beton- und Stahlbetonbau (112), 2017. [159]

### Fallbeispiel 2 – Köhlbrandbrücke, Hamburg

#### Standort:

Hamburg

#### Brückentyp:

zweihüftige Schrägkabelbrücke mit Stahlhohlkasten-Überbau; 1 Teilbauwerk

#### Inbetriebnahme:

1974

#### Brückenklasse:

BK 60

#### Überführung:

B 3 sehr hohe Bedeutung für regionalen und über-regionalen Verkehr, >30.000 Fahrzeuge pro Tag

Unterführung:  
Elbe

Problem:

- Nachrechnung 2016: Nachweis gegen Beulen der Steg- und Bodenbleche des Stahlhohlkastens nach NRR für LM1 nach DIN FB 101 nicht erbracht (Überschreitungen im Pylonbereich bis max. 30 %)
- verkehrliche Kompensationsmaßnahmen: Lkw-Überholverbot

Anlass:

- im Rahmen von Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie wurden Seilkräfte unter ständigen Lasten messtechnisch ermittelt, jedoch konnte der Nachweis mit geringeren Längsdruckspannungen weiterhin nicht erbracht werden
- zusätzliche verkehrliche Kompensationsmaßnahmen: Lkw-Abstandsgebot, die zu erheblichen Verkehrsstaus führen

Ziel:

- Feststellen, ob unter der vorhandenen Belastungssituation mit Abstandsgebot eine Gefährdung durch Beulen für den Überbau vorliegt und ob ggf. ausreichende Tragreserven für eine Aufhebung vorhanden sind
- dynamisches Monitoring der Zuverlässigkeit (Beulgefahr) als Zustandsindikator

Messkonzept:

- Erfassung der Dehnungen an Steg- und Bodenblechen zur Spannungsermittlung
- Erfassung von Beschleunigungen an 22 Schrägseilen zur Bestimmung der Seilvorspannung und Ermittlung der Längsdruckkraft im Überbau
- Erfassung der Bauwerkstemperatur und meteorologischen Daten
- Erfassung von Achslasten
- Belastungsversuche mit Schwerlastüberfahren (180t) zur Modellkalibrierung

Messgrößen:

- Dehnungen, Beschleunigungen, Temperaturen, Achslasten

Zielgrößen:

- Spannung in den Steg- und Bodenblechen an ausgewählten Messstellen

Messsystem:

- 94 Dehnmessstreifen an 7 Überbauquerschnitten (jeweils Mess-DMS und Kompensations-DMS)
- 44 Beschleunigungssensoren an Schrägseilen
- 20 Temperatursensoren
- Weigh-In-Motion (WIM)-Anlage
- Wetterstation: Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Strahlung
- Dehnungen: Messrate 100 Hz und Erfassung von min., max. und Mittelwerten

Ergebnisse:

- Beulnachweis konnte durch probabilistischen Nachweis erbracht werden
- Bemessungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelt für entsprechenden Bezugszeitraum
- dynamisches Monitoring via Zustandsindikator: Zuverlässigkeitsindex (Beulsicherheit) mit wöchentlichem Update
- Lkw-Abstandsgebot konnte aufgehoben werden und damit das Staupotenzial verringert werden

Potenzial:

- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen / Beanspruchung, nicht zu erbringen sind

Literatur:

HERBRAND et al.: Beurteilung der Bauwerkszuverlässigkeit durch Bauwerksmonitoring: Probabilistischer Beulnachweis der Hamburger Köhlbrandbrücke. Bautechnik (98), 2021. [160]

### **Fallbeispiel 3 – Köhlbrandbrücke – Rampe Ost, Hamburg**

Standort:  
Hamburg

Brückentyp:

15-feldriger Spannbetonträger mit zweizelligem Hohlkasten, Spannweite 50 / 65 m, 1 Teilbauwerk, abschnittsweise hergestellt

Inbetriebnahme:  
1974

Brückenklasse:  
BK 60

Überführung:

B 3, sehr hohe Bedeutung für regionalen und über-regionalen Verkehr, >36.000 Fahrzeuge pro Tag

Unterführung:  
Hafenanlagen

Problem:

- 100 % Spanngliedkoppelstöße in 14 Arbeitsfugen: Kopplung oder Verankerung
- Ermüdungsbruchgefahr der Spannstähle
- Beanspruchung deutlich über Bemessungsniveau (33 % mehr Kfz/Tag, 4000 Sondertransporte über 100t)
- gerissener Querschnitt: größere Schwingbreiten

Anlass:

- Nachrechnung: Ermüdungsbruchgefahr kann rechnerisch (Stufe 3) nicht ausgeschlossen werden
- deutlich offene Risse im Bereich der Koppelfugen in den Stegen und Fahrbahnplatte

Ziel:

- Identifikation konservativ angenommener Parameter (Spannkraftverluste, Temperaturgradient)
- Quantifizierung der Abweichung im Grundmoment durch eine bauwerksbezogene Erfassung der ermüdungsrelevanten Beanspruchung aus Verkehr und Temperaturgradient

Messkonzept:

- Erfassung der Temperaturen in Bodenplatte, Stegen, Fahrbahnplatte zur Ermittlung des Temperaturgradienten
- Erfassung von Längsverformungen an 3 Koppelfugen
- Beurteilung der Ermüdungsbruchgefahr auf Basis der ermittelten Rissdoppelamplituden

Messgrößen:

- Temperatur, Verformungen (längs)

Zielgrößen:

- Temperaturgradient, Grundmoment, Spannstahlschwingbreiten

Messsystem:

- 12 Temperatursensoren (Bauteiltemperatur) + 1 x Hohlkasten + 1x Außenluft
- 14 Wegaufnehmer (Rissensoren) an den Koppelfugen

Ergebnisse:

- Temperaturgradient deutlich geringer als normativ anzusetzen

- Gesamtquerschnitt reagiert träge auf Temperaturänderungen

- Beobachtung deutlich geringere Spannungsschwingbreiten als nach Norm

- Ermittlung Rissöffnungsmoment / Grundmoment → Grundlage für Nachweis Stufe 3

Potenzial:

- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen sind

Literatur:

WEIHER et al.: Monitoring an den Koppelfugen der Köhlbrandbrücke (Rampe Ost) in Hamburg. 1. Kolloquium Brückenkolloquium – Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken. Bautechnik (98), 2021. [161]

#### **Fallbeispiel 4 – Chillon Viadukt, Vertaux, CH**

Standort:

Vertaux, Waadt, CH

Brückentyp:

23-feldrige Spannbetonbrücke mit unterschiedlichen Stützweiten, gevouteter Hohlkasten-Querschnitt aus Segmentfertigteilen, 2 Teilbauwerke

Inbetriebnahme:

1969

Brückenklasse:

-

Überführung:

A 9, sehr hohe Bedeutung für überregionalen Verkehr, > 50.000 Fahrzeuge pro Tag

Unterführung:

-

Problem:

- AKR in Fahrbahnplatte

Anlass:

- Verstärkung der Brücke mit ultrahochleistungs-Faserbeton-Platte auf der Fahrbahnplatte
- Untersuchung der Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme

Ziel:

- Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme via Monitoring bestätigen (quantitative Bewertung)
- Untersuchung des Einflusses von Umweltparametern und deren Bereinigung in den Messdaten
- Ableitung von Performance Indikatoren (PI)

**Messkonzept:**

- Messungen an einem der 23 Felder
- Erfassung von Dehnungen an Bewehrungsstäben der Fahrbahnplatte zur Ermittlung von Spannungen und Schwingbreiten
- Erfassung der Temperaturen in Bodenplatte, Stegen, Fahrbahnplatte zur Ermittlung des Temperaturgradienten an ausgewählten Querschnitten
- Erfassung der Luftfeuchtigkeit im Hohlkasten
- Erfassung der Beschleunigungen innerhalb eines Feldes zur Ermittlung modaler Eigenschaften und deren Abhängigkeit von Temperatur und Belastung

**Messgrößen:**

- Beschleunigungen, Dehnungen, Lufttemperatur und -feuchtigkeit

**Zielgrößen:**

- Modale Eigenschaften (von Temperatureffekten bereinigt)
- Spannungsschwingbreiten in den Bewehrungsstäben (Schadensakkumulation)

**Messsystem:**

- 4 Dehnmessstreifen (2 x längs, 2 x quer)
- 7 Temperatursensoren (Bauteiltemperatur)
- 1 Luftfeuchtigkeitssensor (in Hohlkasten)
- 11 MEMS-Beschleunigungsaufnehmer
- HBM DAQ (100 Hz); Gantner DAQ (200 Hz für Beschleunigungen)

**Ergebnisse:**

- Identifizierte Parameter durch Modell-Updating (E-Moduli, Lagersteifigkeiten)
- Ableitung von datenbasierten Performance Indikatoren basierend auf:
  - Vorhersage und Verfolgung der modalen Frequenzentwicklung
  - Ermüdungsberechnung auf Basis der Dehnungsmessung an den Bewehrungsstäben (Schadensakkumulation)
  - Gegenüberstellung von Performance Indikatoren aus Zuverlässigkeitsanalyse vor und nach Verstärkung (Versagenswahrscheinlichkeiten)
- Nachweis Schubversagen Fahrbahnplatte
- Nachweis der Verformungen Fahrbahnplatte

**Potenzial:**

- Aufzeigen der Wirksamkeit von Monitoringmaßnahmen auf Basis quantifizierbarer Verbesserung des Tragverhaltens / Verringerung Versagenswahrscheinlichkeiten

**Literatur:**

MARTÍN-SANZ et al.: Monitoring of the UHPFRC strengthened Chillon viaduct under environmental and operational variability. Structure and Infrastructure Engineering 16 (2020), S. 138-168. [87]

Weiterhin wird auf eine Zusammenstellung weltweiter Monitoringprojekte in Webb et al. [162] verwiesen. Darin werden 30 verschiedene Monitoringstudien aus Nordamerika (USA und Kanada), Europa (Großbritannien, Portugal, Italien, Norwegen, Österreich, Belgien) und sowie Ost- und Südostasien (Südkorea, Hong Kong, Taiwan, China, Malaysia, Singapur) unter der Angabe von Zielstellung, verwendeter Sensorik und der Ergebnisse (u. a.) aufgelistet. Dabei findet auch eine Einordnung der Zielstellung anhand der folgenden fünf Kategorien statt:

- Erkennung von Anomalien
- Überprüfung der Überschreitung von Grenzwerten
- Schadenserkenkung
- Validierung von Modellen bezüglich der Belastungsannahmen oder der Tragwerksantwort
- Studien zum Einsatz von (neuer) Sensortechnologie

Für die Betrachtungen im Zusammenhang des Potenzials von Monitoring im LZM sind insbesondere die ersten vier Kategorien von Interesse.

In [163] sind die Ergebnisse, die im Rahmen einer Abfrage des BMVI bei den Straßenbauverwaltungen der Länder zum Einsatz von Monitoring im Bereich der Bundesfernstraßen erzielt wurden, zusammengetragen. Darin wird bestätigt, dass der Einsatz von Monitoringsystemen selten und auf bekannte Defizite beschränkt ist, obwohl der Nutzen bei den Bauverwaltungen in vielen Fällen belegt ist. Monitoring ist eine Möglichkeit die Restlebensdauer von Brücken zu verlängern.

**3.2.3 Typische Schäden und kritische Zustände**

Typische Schädigungen, die bei den oben beschriebenen anlassbezogenen Monitoringprojekten beobachtet wurden, sind:

- Chlorid-induzierte Korrosion,
- Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR),
- Spannungsrissskorrosion,
- Schäden an Koppelfugen und
- Risse in Stahlhohlkästen (Steg- und Bodenbleche, Schweißnähte).

Schädigungsprozesse können dann messtechnisch erfasst werden, wenn die Schädigung zu einer Änderung der Formänderungsgrößen, wie beispielsweise der Änderung der Dehnung infolge von Längskräften, der Krümmung oder der Durchbiegungen infolge von Biegemomenten, führt. Rissbildung im Querschnitt des Feldbereiches führt zu einer Verringerung der Steifigkeit, die wiederum durch eine Vergrößerung der Verformung oder Neigung messbar wird.

Erfassbare Formänderungsgrößen können in lokale und globale Formänderungsgrößen unterschieden werden. Lokale Formänderungen, wie beispielsweise Dehnungen, liefern lediglich Informationen für den erfassten Bereich des Tragwerks und sind somit nur sinnvoll zu erfassen, wenn die maßgebende Stelle a priori bekannt ist. Dieser Nachteil traditioneller Dehnmessstreifen kann mithilfe von faseroptischen Sensoren überwunden werden (siehe Kapitel 2.4.5), jedoch werden diese bisher nur selten an Ingenieurbauwerken eingesetzt.

Globale Formänderungsgrößen, wie beispielsweise die Durchbiegung, liefern Informationen zum Verformungsverhalten des Gesamttragwerks. Lokal begrenzte Prozesse wie Rissbildung sind damit nur bedingt erfassbar. Weiterhin ist zu beachten, dass bei der Messung mit Wegaufnehmern eine feste Messbasis erforderlich ist, was bei Brückenbauwerken in der Regel nicht realisierbar ist. Die Messung von Verdrehungen entlang der Stabachse bildet eine Möglichkeit der Erfassung des globalen Verformungsverhaltens ohne eine feste Messbasis. Neigungen sind ein integrales Maß, aus denen die Durchbiegung unter der Annahme von Randbedingungen ermittelt werden kann. Durch abschnittsweise Erfassung der Neigungen kann den einzelnen Bereichen eine Krümmung und somit eine vorhandene Biegesteifigkeit zugeordnet werden. Auf diese Weise konnte in Fallbeispiel 1 ein Steifigkeitsverlust des Überbaus ermittelt werden.

Die oben genannten typischen Schäden werden nachfolgend beschrieben und mit den betroffenen

Konstruktionen und Herstellungsverfahren sowie den kritischen Baujahren in Zusammenhang gebracht.

### **Rissbildung an Koppelfugen von abschnittsweise hergestellten Spannbetonbrücken**

Die Querschnitte abschnittsweiser hergestellter Spannbetonbrücken mit einem hohen Anteil von Spanngliedkopplungen in den Arbeitsfugen besitzen ein erhöhtes Ermüdungspotenzial des Spannstahles [161], [164]. Insbesondere in Verbindung mit geringer Bewehrung und einer großen Querschnittbelegung durch die Koppelanker wird eine Rissbildung in den Koppelfugen begünstigt. Infolge der geringeren Ermüdungsfestigkeiten der Koppelanker werden Ermüdungsprobleme hervorgerufen. Von dieser Problematik sind hauptsächlich Spannbetonbrücken mit Hohlkastenquerschnitten aus den Baujahren 1950 bis 1970 betroffen, die im Takt-schiebeverfahren oder auf Lehrgerüst erstellt wurden. Das Baujahr und der Brückentyp können hier als Indikatoren für zu erwartende Schäden dienen.

### **Spannungsrissskorrosion**

Bestimmte vergütete Spannstähle der Jahre 1950 bis 1993 weisen eine erhöhte Gefahr von Spannungsrissskorrosion auf. Eine Einordnung findet auf Basis der „Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahl erstellt wurden“ [165], [166] statt. Eine Übersicht mit zeitlicher Einordnung verschiedener Spannstähle der BRD und DDR wird mit den entsprechenden Handelsnamen in Bild 3-2 dargestellt.

### **Strukturelle Defizite infolge normativer Unzulänglichkeiten**

Schädigungen entstehen, wenn die durch Eiwirkungen hervorgerufene Beanspruchung größer wird als die entsprechende Widerstandsgröße. Die Ermittlung des Widerstands ist für die Nachweisführung und Bemessung der Tragwerke normativ geregelt. Die Bestandsbrücken haben ein unterschiedliches Bauwerksalter (siehe Bild 1-1) und wurden auf Basis unterschiedlicher Normen bemessen. Eine Darstellung der verschiedenen Normengenerationen für Stahlbeton- und Spannbetonbauwerke ist in Bild 3-2 gegeben.

Unter Beachtung des heutigen Stands der Technik besitzen Bestandsbrücken bestimmter Normengenerationen strukturelle Defizite. Bestimmte Aspekte,

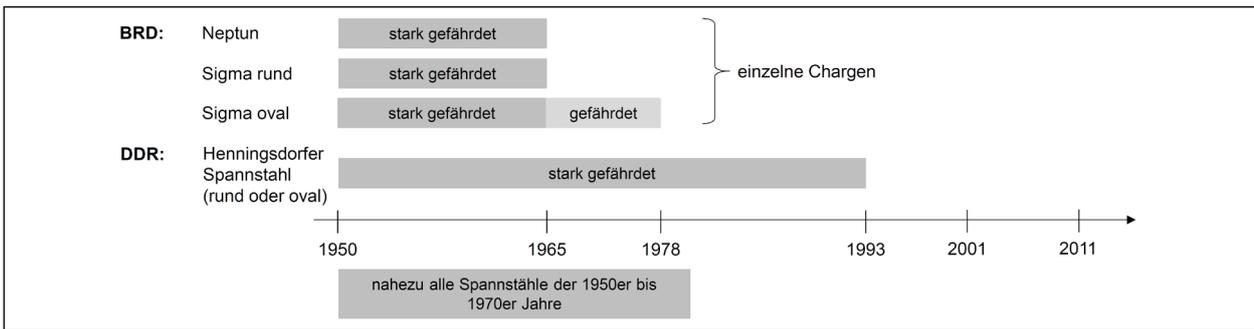


Bild 3-2: Zeitliche Einordnung des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahls nach Handelsnamen (eigene Darstellung)

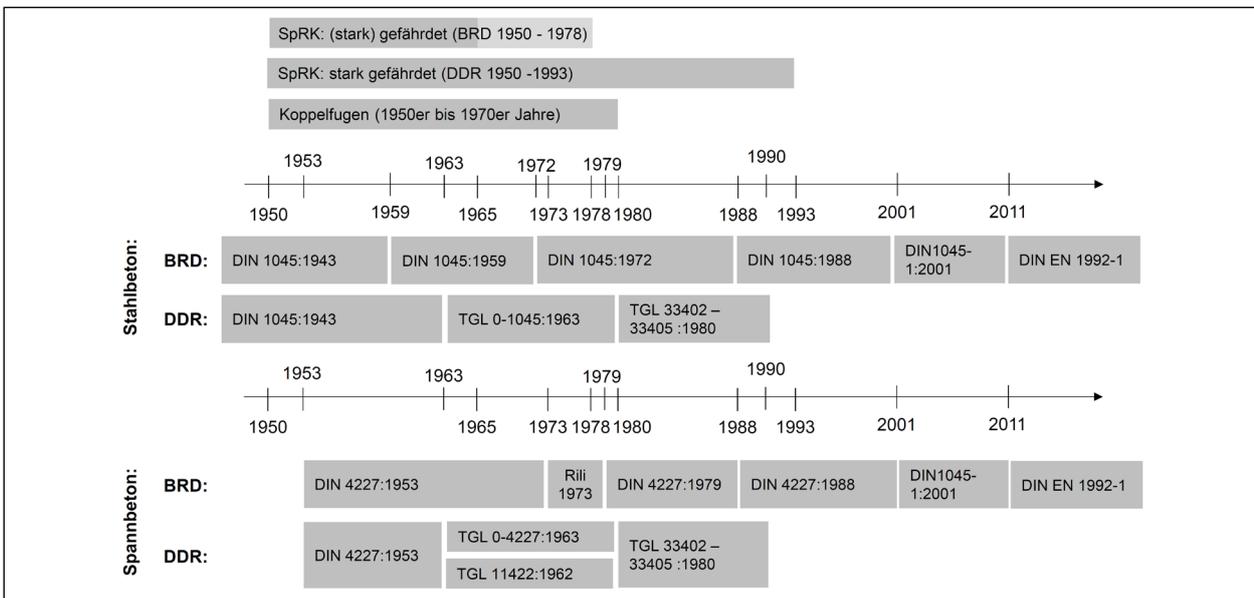


Bild 3-3: Zuordnung von Normengenerationen zu Spannungsrissskorrosion- und Koppelfugenproblematik (eigene Darstellung)

wie Mindestbewehrung, waren in früheren Normen noch nicht, wie heute, abgebildet. So wurde beispielsweise vormals bei den statischen Nachweisen nur ein konstanter Temperaturanteil berücksichtigt, aber kein linearer-veränderlicher Anteil (Temperaturgradient), der zusätzliche Biegemomente hervorrufen kann. Darüber hinaus sind auch Probleme mit dem Schubnachweis bei der Nachrechnung von Bestandsbrücken bekannt.

Analog zu den beschriebenen Aspekten sind die normativen Regelungen zu den anzusetzenden Verkehrsbeanspruchungen zu sehen. Die Bemessung erfolgte beispielweise für die Brückenklassen 60/30 und 60 nach DIN 1072 [167], mit dem Lastmodell 1 nach DIN-Fachbericht 101 [168] oder dem Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2 [169]. Die Brückenklassen bestimmen daher die Ist-Tragfähigkeit der Bestandsbrücke. Durch den Vergleich mit der Soll-Tragfähigkeit (Ziellastniveau) wird auf Basis der Lastniveaus der Traglastindex definiert, der ei-

nen guten Performance Indikator für das LZM darstellt. [170]

**Schädigungsrelevante Eiwirkungen, Schadenspotenzial und Schädigungsmodelle**

Weiterhin soll in Bezug auf typische Schäden auf das BAST Heft B 110 [171] verwiesen werden. Hier wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton“ die Beurteilung von schädigungsrelevanten Einwirkungen und Schädigungspotenzialen von Betonbrücken sowie deren Erfassung am Bauteil mithilfe aussagekräftiger Parameter und geeigneter Sensoren untersucht. Basis dafür war die Auswertung von knapp 100.000 Schäden an 3474 Betonbrücken.

Typische Schadensbilder werden darin dargestellt und anhand von Baujahr, Brückenklasse, Brückenlänge, Schadensort und gemeinsam auftretenden Schäden kategorisiert. Als Schadensursachen wer-

den Planungs- und Entwurfsfehler, Fehler bei der Ausführung und einwirkungsbedingte Schäden genannt. Im Detail werden Schäden infolge Einwirkungen aus Verkehr, Spannungsrisikokorrosion, Koppelfugen, Schubtragfähigkeit, Temperatur, Mindestbewehrung und Dauerhaftigkeit betrachtet.

Darüber hinaus werden geeignete Schädigungsmodelle zur Beschreibung bekannter Schädigungsprozesse bei Brücken aus Stahl- und Spannbeton dargestellt und die modellspezifischen Einflussgrößen detailliert aufbereitet. Dies umfasst eine Vielzahl an Schädigungsmodellen, wie etwa Karbonatisierung, Chlorideintrag, AKR und Ermüdung. Die Schädigungspotenziale werden anschließend getrennt für die Widerstandsseite (auffällige Bauteile / Konstruktionen) sowie für die Einwirkungsseite (relevante Einwirkungen) dargestellt und bewertet.

Im beigefügten Handbuch werden für die Querschnittstypen Hohlkasten, Plattenbalken, Platten und Sonstige unter Berücksichtigung des statischen Systems, der Konstruktionsart (Stahl- oder Spannbeton) vier verschiedenen Baujahr-Zeiträumen geltende Vorschriften, typische Probleme der Einwirkungs- als auch der Widerstandsseite entsprechende Messgrößen und geeignete Sensoren zugeordnet.

### 3.3 Aussagekraft und Potenzial von Monitoring

#### 3.3.1 Überblick

Wesentliches Ziel des Einsatzes von Monitoringssystemen ist I) die Erfassung von Einwirkungs-, Beanspruchungs- und Widerstandsgrößen, II) die Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens, III) die Detektion, Lokalisierung und quantitative Charakterisierung von Degradationsprozessen sowie ggf. IV) die Ableitung von Instandhaltungsmaßnahmen auf Basis von Zustandsprognosen im Sinne des Monitorings.

Wie bereits zuvor beschrieben, sind aus den rohen Messdaten Informationen zu extrahieren, die eine Identifikation und Dokumentation von Veränderungen oder Schäden an einem Bauwerk mit dem Ziel der Zustandsbewertung ermöglichen. Diese Vorgehensweise ist im Kontext einer Bauwerksbewertung (z. B. Standsicherheit) in Form einer Wissenspyramide schematisch in Bild 3-4 dargestellt.

Die unterste Stufe der Wissenspyramide entspricht der reinen Erfassung von Messdaten. Durch Weiterverarbeitung der Rohdaten und Anwendung von Auswerteverfahren (siehe Kapitel 2.5) zur Extraktion von Informationen kann die zweite Stufe erreicht werden. Für ein sensorbasiertes und ein bildbasiertes Monitoring sind in Bild 3-4 beispielhaft Messdaten, Randbedingungen und Methoden zur Auswertung angegeben. Mithilfe der ersten beiden Stufen

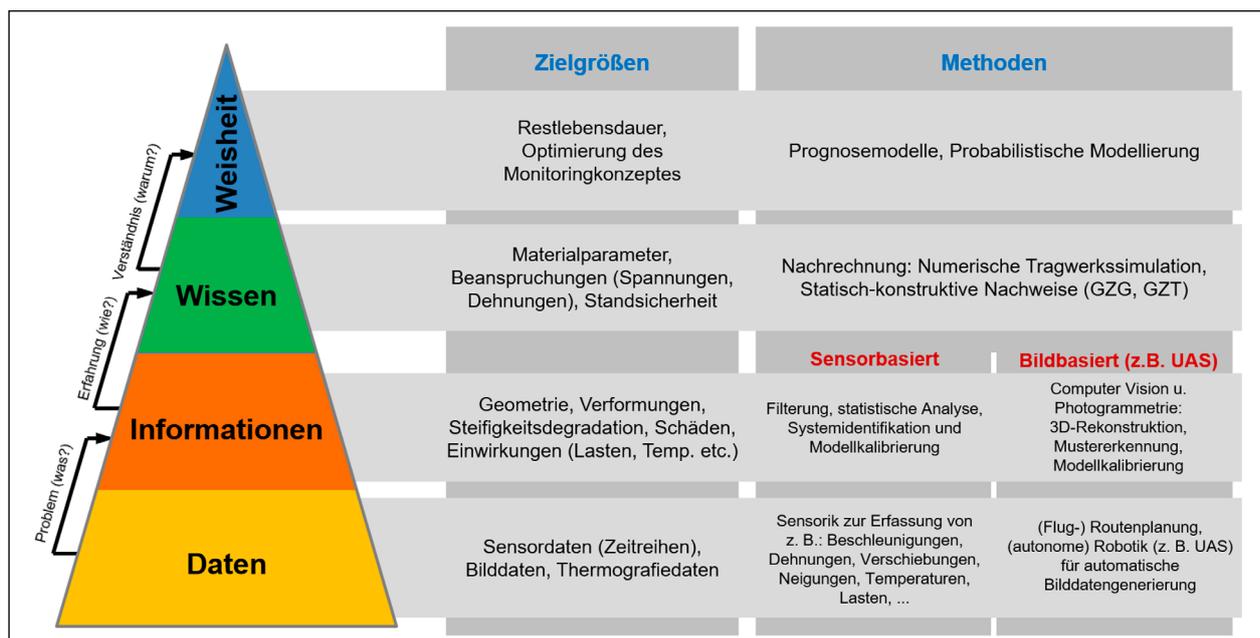


Bild 3-4: Schematische Darstellung der Informationsgewinnung aus Monitoringdaten für Sensorsysteme und bildbasierte Verfahren (z. B. mit Drohnen) (eigene Darstellung)

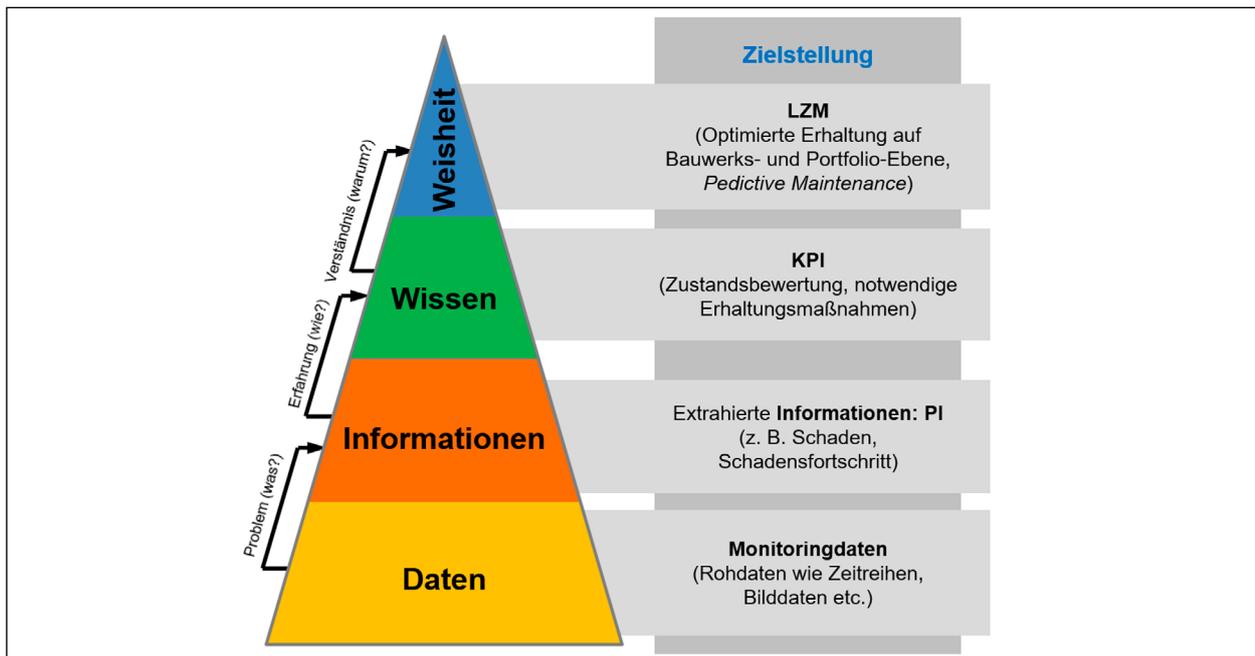


Bild 3-5: Schematische Darstellung der Integration von Monitoringdaten in ein KPI-basiertes LZM (eigene Darstellung)

kann ein erfolgreiches Monitoring von Zielgrößen betrieben werden. Zur Ermittlung höherwertiger Informationen, wie beispielsweise der probabilistisch abgesicherten Standsicherheitsbewertung, setzt die Anwendung höherwertiger Ansätze voraus, die zum aktuellen Zeitpunkt nur an wenigen Bauwerken anlassbezogen eingesetzt werden.

Eine Verknüpfung der durch Monitoring ermittelten Informationen mit einem LZM, findet ebenfalls nicht statt. Um diese Lücke zu schließen, müssen folgende Verknüpfungen geschaffen werden:

1. die Verbindung von Monitoringdaten mit Indikatoren (PI und KPI) im Sinne einer Tragwerksbewertung (bspw. quantitative Sicherheitsbewertung)
2. die Einbindung der Indikatoren (PI und KPI) im LZM.

In Anlehnung an 1. wird folgende Idee zugrunde gelegt: Monitoring erlaubt durch die kontinuierliche Überwachung die Erkennung von Veränderungen des Systems. Unter der Annahme eines hinreichend zuverlässigen Ausgangszustandes kann durch Monitoring sowie einer Auswertung in Form von Trendprognosen und der Anomaliedetektion ein Korridor des normalen Verhaltens identifiziert und außergewöhnliche, u. U. kritische, Zustände detektiert werden. Dieses Vorgehen ermöglicht die Definition von Kenngrößen, die einerseits für das Systemverhalten (z. B. dessen Zuverlässigkeit) eine hohe Aus-

gekräft haben und andererseits auch aus den Monitoringdaten ermittelt werden können. Als solche Kenngrößen sind die sogenannten Key Performance Indikatoren (KPI, siehe Kapitel 4) zu verstehen.

An dieser Stelle soll noch einmal bemerkt werden, dass eine Nullmessung als Referenz erforderlich ist. Dieser globale Referenzzustand sollte bei Inbetriebnahme der Bauwerke, d. h. bei Verkehrsfreigabe erfasst werden, um für folgende Monitoringkampagnen den Vergleich zum idealerweise ungeschädigten, voll funktionstüchtigen Bauwerk zu haben. Die Nullmessung muss dann das Trag- und Verformungsverhalten der Brücke im Ausgangszustand abbilden. Nullmessungen können auch verwendet werden, um existierende FE-Modelle der Tragstrukturen im Sinne eines Model Updating (siehe Kapitel 2.5.3) anhand der Messdaten und extrahierter Informationen zu kalibrieren. Die in diesem Zusammenhang erfassten Messdaten sowie die extrahierten Informationen müssen für Neubauten dann in zukunftssicheren Formaten beim Baulasträger in digitaler Form als eine Art Geburtszertifikat zusammen mit dem kalibrierten Strukturmodell hinterlegt werden. Bei Bestandsbauwerken kann die Nullmessung nicht nachgeholt werden, es kann nur ein Referenzzustand zu Beginn der Messungen ermittelt werden. Der Referenzzustand ist dann in der Regel eine geschädigte Struktur, an der die weitere Zustandsentwicklung zu beobachten ist.

In Bild 3-5 ist schematisch dargestellt, wie Monitoringdaten, daraus ermittelte schadenbezogene Informationen, KPIs und das darauf basierende LZM in Form einer Abwandlung der o. g. Wissenspyramide verstanden werden können. Dabei werden die aus den rohen Sensordaten extrahierten Informationen als Performance Indikator PI aufgefasst und durch Verknüpfung mit Schädigungsprozessen in den Bauwerkszustand bewertende KPI überführt.

### 3.3.2 Aussagekraft und Potenzial von Monitoringsystemen

Die Aussagekraft von Monitoring wird in erster Linie dadurch bestimmt, wie viel Informationsgehalt aus den Messungen oder Inspektionen extrahiert werden kann. Das gilt sowohl für Messungen mit Monitoringsystemen als auch bei visuellen Inspektionen (sowohl von Menschen als auch mit bildgebenden Verfahren).

Die Aussagekraft einer Monitoringmaßnahme ist auch durch das Messkonzept begrenzt. Durch eine gründliche Definition der Messaufgabe und sorgfältige Planung der Maßnahme ist der Erfolg der Maßnahme zu gewährleisten. Lediglich bei unvorhersehbar verändertem Strukturverhalten ist ggf. das Monitoringsystem entsprechend der veränderten Schädigung anzupassen.

Bei den Messungen muss eine hohe Messqualität erreicht werden, d. h. Messfehler und Rauschen (Messunsicherheit) sind möglichst gering und im besten Fall auch quantifiziert. Die Messdaten werden im Rahmen der Messdatenverarbeitung u. a. geprüft ggf. gereinigt (siehe Kapitel 2.5.2). Bei Simultanmessungen mehrerer Größen ist auf die Synchronisation der Daten zu achten. Bei der Durchführung eines bildbasierten Monitorings oder sensorbasierter Schwellwertmessungen von Zielgrößen sollte die Wahrscheinlichkeit der Detektion von Schäden (PoD - Probability of Detection) [172] beziehungsweise die Wahrscheinlichkeit für einen Fehlalarm [173] quantifiziert sein. Die genannten Aspekte sind bei der Verarbeitung der Daten zu berücksichtigen. Die algorithmische Verknüpfung der Monitoringdaten zu KPIs wird in Kapitel 4 und 7 systematisch beschrieben.

Das Potenzial von Monitoringsystemen liegt weniger in der Quantifikation des absoluten Tragwerkszustandes, sondern ergibt sich vornehmlich aus der Möglichkeit, das System über lange Zeiträume kontinuierlich oder oftmals und regelmäßig zu überwa-

chen und Veränderungen am System zu erkennen. Bei einem kontinuierlichen Dauermonitoring sind Veränderungen auch innerhalb kurzer Zeiträume zu überwachen. Langfristig sollen durch das Dauermonitoring Degradationsprozesse beobachtet werden, um die Entwicklung des Tragwerkszustandes in Form eines Trends zu ermitteln und ggf. eine Verstärkung oder Abschwächung derselben zu identifizieren. Kurzfristig sind Abweichungen von normalen Bauwerksverhalten zu überwachen, die sich infolge plötzlicher Schadensereignisse wie Fahrzeuganprall, Überbeanspruchungen, usw. als Anomalien ergeben.

Folgende Potenziale können abgeleitet werden:

1. 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.
2. Das „datenbasierte Begleiten“ der Nutzung des Bauwerkes mit dem Ziel der Charakterisierung des Bauwerksverhaltens und dem Ziel der Detektion von Schäden und Anomalien (automatisch erkannte Veränderungen in den Messdaten) als Anlass für detailliertere Untersuchungen (z. B. 1.). Typischerweise wird die Einhüllende des Zustands 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 oben).
3. Die Absicherung der Restnutzungsdauer nach der Erkennung wesentlicher Schädigungen, aber auch ggf. Aufhebung von auferlegten Einschränkungen. Typischerweise zur Überbrückung bis zur Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen bzw. der Realisierung eines Ersatzneubaus. Dieses Potenzial besteht insbesondere für Brücken mit entsprechend hohem Schadensgrad bzw. Tragfähigkeitsdefiziten.

Durch Monitoring inklusive Datenanalyse und -interpretation können Systemkenngrößen ermittelt werden, die einerseits für das Systemverhalten (z. B. auch dessen Zuverlässigkeit) eine hohe Aussagekraft haben und andererseits aus den Monitoringdaten auch ermittelt werden können. Auf diese

Performance Indikatoren wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

Das Potenzial von Monitoring wurde auch in BAST Heft B 163 [94] aufgezeigt. In dem Forschungsprojekt wurde untersucht, wie sich die Zuverlässigkeit und der Nutzen des Monitorings quantifizieren lassen. In den durchgeführten Pilotstudien konnte auch gezeigt werden, dass die Anwendung von Monitoring einen Gewinn für die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Ingenieurbauwerke darstellt, weshalb der Einsatz von Monitoring zukünftig verstärkt werden sollte.

## 4 Definition und Quantifizierung von Key Performance Indikatoren

Die vorangegangenen Kapitel haben in die Thematik Bauwerksmonitoring eingeführt und gezeigt, wie Informationen mittels Messungen gewonnen werden können. Extrahierte Informationen können Aufschluss über den Zustand von Bauwerken, ihren Bauteilen oder Schädigungsmechanismen geben. Diese Informationen werden auch als Performance Indikator (PI) bezeichnet. Um Wissen zu generieren (siehe Bild 3-5), müssen diese Daten mit anderen Daten verknüpft werden, um Vorhersagen über Key Performance Indikatoren (KPI) zu ermöglichen und um schließlich im Gesamtkontext einen Wert für das LZM zu generieren.

Dieses Kapitel definiert KPI und beschreibt sie mathematisch damit sie in der Nutzenfunktion (Kapitel 6) Anwendung finden können. Darüber hinaus wird beschrieben, wie beobachtbare Größen durch Monitoring gewonnen werden können. Diese werden als Performance Indikatoren (PI) bezeichnet. Mithilfe dieser PI können KPI ermittelt oder aktualisiert werden. Mit den aktualisierten KPIs und der Nutzenfunktion (Kapitel 6) können im Rahmen des LZMs optimale Maßnahmen auf Bauwerksebene identifiziert werden. Dies wiederum bildet die Basis, um das LZM auf Netzebene zu optimieren (Kapitel 5).

### 4.1 Key Performance Indikatoren

Die Abkürzung KPI steht für Englisch key performance indicator. Dies kann mit Leistungsindikator oder Schlüsselindikator übersetzt werden. Der Be-

griff kommt aus der Unternehmensführung und dient dem internen Steuern von Unternehmen, damit die Unternehmensziele erreicht werden. Ein Unternehmen ist in der Regel ein komplexes Gebilde, weshalb KPIs komplexe Zusammenhänge abstrahieren müssen. Dabei dürfen nicht zu viele KPIs definiert werden, da sonst die Übersichtlichkeit leidet und KPIs in Konkurrenz zueinanderstehen könnten. Zum Beispiel, wenn im Unternehmen KPI 1: Umsatzwachstum zu Lasten von KPI 2: der Wirtschaftlichkeit bevorzugt wird oder bei den Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasser eine Kostenminimierung zu Lasten der Dauerhaftigkeit geht.

Wichtig ist, dass KPIs einfach und verständlich sind [49], damit sie von allen verstanden werden und daher als Zielvorgabe akzeptiert werden. Mit KPIs kann in Unternehmen eingeschätzt werden, wie gut ein Prozess funktioniert, das Unternehmen oder die Abteilung auf Kurs ist und ob Justierungen notwendig sind. KPI dienen auch der Priorisierung von Aufgaben und enthalten Informationen, die ggf. in einer aggregierten reinen Kostenbetrachtung verloren gehen.

Das COST TU1406 Projekt [4] hatte sich zum Ziel gesetzt, eine in Europa allgemein gültige Richtlinie zur Erstellung von Qualitätskontrollplänen für Brückenbauwerke zu entwickeln und das Konzept der KPIs auf das Tragwerksmanagement zu übertragen. Das Ergebnis war eine Liste an KPIs und PIs, die für Qualitätskontrollpläne verwendet werden können.

Ein wichtiges Ergebnis dieses COST Projekts ist die gemeinsame europäische Definition des Zieles für Bauträger: „Jede Brücke sollte sicher und tragfähig, für den Benutzer verfügbar, günstig hinsichtlich der Gesamtkosten über die Lebensdauer und umweltfreundlich sein,“ [4], siehe auch Kapitel 6. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden eine Vielzahl von KPIs identifiziert, von denen einige wesentliche in Tabelle 4-1 zusammengestellt sind.

Des Weiteren wurden in [4] von zunächst 700 Begriffen 385 Performance-Begriffe erarbeitet, die auf weitere 108 Begriffe reduziert wurden. Diese wurden letztlich den KPIs zugeordnet. Dabei soll unterschieden werden, ob sich dieser Performance-Begriff auf die Komponenten-, Tragsystem- oder Netzebene bezieht. Generell stellt ein PI eine beobachtbare Größe dar, der Aufschluss über den Bauwerkszustand und schließlich die KPI gibt. So stellt bei-

Zuverlässigkeit	Reliability (R)
Verfügbarkeit	Availability (A)
Wartungsfreundlichkeit	Maintainability (M)
Sicherheit	Safety (S)
Dauerhaftigkeit	Durability (I)
Zugangsschutz	Security (Se)
Bewertung/ Inspektion	Rating/Inspection (I)
Umwelt	Environment (E)
Kosten	Costs (C)
Arbeitsschutz/Gesundheit	Health (H)
Politik	Politics (P)

Tab. 4-1: KPI gemäß COST TU1406 Projekt [4], die Begriffe werden in Kapitel 4.4 erläutert

spielsweise beim Monitoring eine Messgröße bzw. eine daraus extrahierte Information einen PI dar.

Zusätzlich wurde im COST TU1406 Projekt [4] zwischen Leistungsziel (Performance-Goal), Leistungsindikator (Performance-Indikator), und Grenzwert (Performance-Threshold) unterschieden. Hierbei beschreibt das Ziel, was erreicht werden soll und der Vergleich zwischen Leistungsindikator und Grenzwert gibt Auskunft, ob das Ziel erreicht wurde. Mit Indikatoren können auch sozioökonomische und umweltbezogene Aspekte über den gesamten Lebenszyklus hinweg berücksichtigt werden.

Die Liste der elf KPI in Tabelle 4-1 erscheint immer noch als zu umfassend für das LZM auf Bauwerkebene. Daher ergibt sich ein Bedarf diese zu schärfen, zu definieren und zu quantifizieren.

## 4.2 Key Performance Indikatoren im Monitoring

Die Größen in Tabelle 4-1 sind am Einzelobjekt zunächst nicht beobachtbar. Dies bedeutet, dass sie sich einem direkten Monitoring oder einer Inspektion entziehen. Für dieses Projekt ist es daher in Anlehnung an das Projekt COST TU1406 [4] wesentlich, die KPIs so zu schärfen, dass der Zusammenhang zwischen beobachtbaren Daten und PI (siehe Bild 3-5) hergestellt wird und auf KPIs geschlossen werden kann. Diese KPIs können im LZM berücksichtigt werden, so dass die Potenziale des Monitorings innerhalb des LZMs dargestellt werden können.

Generell ist die Definition von KPIs abhängig vom Detaillierungsgrad der Fragestellung. Übergeordnet

können die KPIs wie „strukturelle Zuverlässigkeit“ mit Performance-Goals verglichen werden, und Investitionen damit gesteuert werden. Zeitliche Verläufe und Prädiktionen zu diesen Indikatoren können helfen übergeordnet Entscheidungen zu treffen.

Im LZM auf Netzwerkebene ist die strukturelle Zuverlässigkeit ein KPI für die Verfügbarkeit des Bauwerks für das Verkehrssystem. Auf der Bauwerkebene können PI beispielsweise aber auch ausgewertete Messgrößen wie maximale Verschiebungen oder Dehnungen sein. Diese sind dann wiederum PI für die Zuverlässigkeit der Brücke, die wiederum ein KPI darstellt.

Der Detaillierungsgrad ist wiederum abhängig von der Entscheidungssituation und ist damit direkt mit dem LZM verknüpft. Damit sind in Abstimmung an das LZM-Konzept auch die KPI zu prüfen (siehe Kapitel 5).

KPIs sollen generell helfen Entscheidungen zu treffen (siehe Kapitel 6). Es muss entschieden werden, ob aufgrund der Veränderung des KPIs eine Aktion notwendig ist, eine Beobachtung ausreicht, oder ob kein Eingriff notwendig (bzw. sinnvoll) ist.

Der KPI kann bei Brückenbauwerken beispielsweise die strukturelle Zuverlässigkeit (lokales bzw. globales Versagen), die Verkehrssicherheit für die Verkehrsteilnehmer oder die Dauerhaftigkeit sein, wie in COST TU1406 definiert.

Wie zuvor schon festgehalten wurde, sind die KPIs nicht immer Eigenschaften, die direkt beobachtet werden können. Die meisten definierten KPIs entziehen sich beispielsweise dem direkten Bauwerksmonitoring. Die strukturelle Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit oder die Kosten lassen sich an einem Tragwerk nicht direkt beobachten. Es gibt jedoch beobachtbare Größen am Brückenbauwerk (Bild 3-5), die Informationen enthalten und mit deren Hilfe KPI abgeschätzt oder berechnet werden kann. Dies kann auch über Modelle erfolgen. PIs werden in diesem Projekt daher als messbare oder zuweisbare ordinale oder kardinale Größen verstanden, die Informationen über einen Zustand oder eine Eigenschaft (Key Performance Indikator) enthalten. Indikatoren können also als erklärende Variablen verstanden werden. Die Indikatoren sind diejenigen erklärenden Variablen, die die größte Aussagekraft in Bezug auf den KPI besitzen. In Bild 4-1 ist der Zusammenhang zwischen den be-

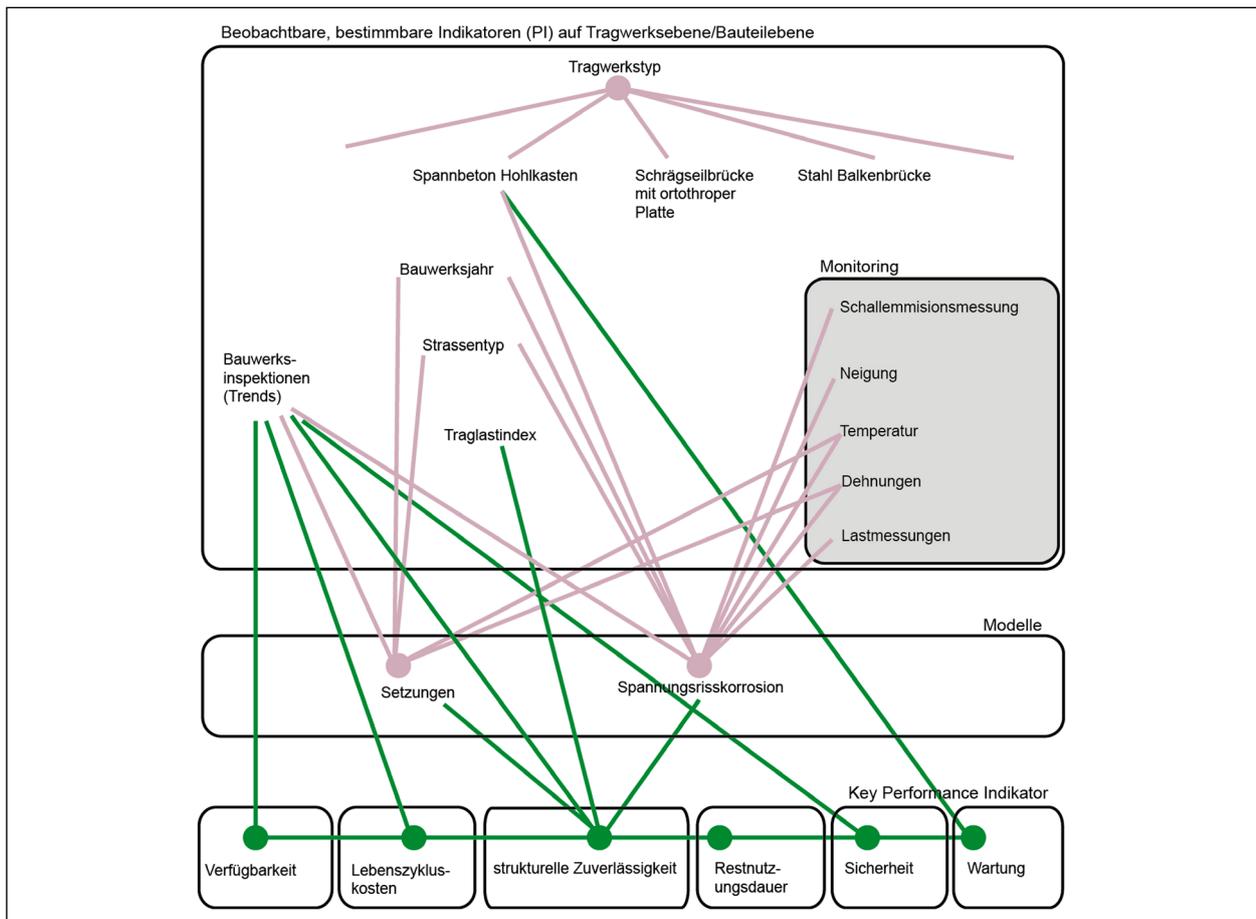


Bild 4-1: Beispielhafte Darstellung der Definition der KPI (eigene Darstellung)

obachtbaren Größen (PI, oben), den Messgrößen und den KPI (unten) beispielhaft dargestellt.

Der Informationsgehalt der Indikatoren wird in der Regel nur nutzbar, wenn man diese mit Modellen verknüpft und zu den KPIs in Verbindung setzt. Als Beispiel dienen Bild 3-2 und Bild 3-3 (Kapitel 3.2.3). Hier wird ersichtlich, dass die Indikatoren Baujahr, Tragwerkstyp und Normengeneration verknüpft einen Hinweis auf die Anfälligkeit einer Brücke auf Spannungsrissskorrosion oder die Koppelfugenproblematik geben können. Ein PI kann z. B. die Rissbreite am kritischen Bauteil sein. Mit Monitoring können Informationen über diesen PI gewonnen werden, der wiederum Hinweise auf den KPI Zuverlässigkeit gibt.

Sind die KPIs definiert, so können PIs identifiziert werden, die es ermöglichen KPIs zu quantifizieren. Zum Beispiel kann Bauwerkstyp und Baujahr als Indikator gelten, da hieraus Informationen bzgl. zu erwartenden statischen Schäden folgen, z. B. aufgrund von neuen Abdichtungsmethoden, welche Qualitätsmängel ausweisen (siehe hierzu auch [174]). Genauso kann auch die Verkehrsmenge in

Form der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) Aufschluss über die Wichtigkeit des Bauwerks innerhalb des Verkehrsnetzes geben.

### 4.3 Quantifizierung von Key Performance Indikatoren

Vergleicht man die KPIs nach Tabelle 4-1 mit der RI-EBW-PRÜF [175] so ergeben sich Schnittmengen. Die RI-EBW-PRÜF zielt auf die Bewertung von Einzelschäden bezüglich Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) ab. Es werden Noten zwischen 0 und 4 vergeben, wobei die Note 0 keinen Einfluss auf das Kriterium hat und die Note 4 eine sofortige Handlung erfordert. Die Noten geben einen ersten Aufschluss über den Zustand des Tragwerks. In [176] wurde geschlussfolgert, dass die Zustandsnoten jedoch nicht direkt verwendet werden können, um Aussagen in Bezug auf die Zuverlässigkeit eines Tragwerks zu machen. Die Bauwerksprüfung liefert aber trotzdem visuelle Inspektionsergebnisse, die im LZM verwendet werden sollten.

Einige der KPI in Tabelle 4-1 können mathematisch repräsentiert werden. Die KPI, die aus dem so genannten RAMS (steht für Reliability, Availability, Maintainability und Safety) Bereich (siehe [177]) kommen sind wie folgt definiert:

### Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit wird über die mittlere Zeit zwischen zwei Versagensereignissen (MTBF) über die (zeitabhängige) Versagensrate  $\lambda_F(t)$  beschrieben:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_F(t)}.$$

Der Zusammenhang zwischen der Versagensrate und der Versagenswahrscheinlichkeit kann wie folgt hergestellt werden:

$$\frac{f(t|\theta)}{1 - F(t|\theta)} = \lambda_F(t|\theta).$$

Hierin ist  $f(t|\theta)$  die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Versagenszeitpunktes  $t$  mit den Parametern  $\theta$ . Diese kann beispielsweise mit einer Weibullverteilung beschrieben werden. Bei Tragwerken wird in der Regel in der normalen Nutzungsdauer ohne Schäden von einer zeitinvarianten Versagensrate ausgegangen. Auch dieser Fall kann mit einer Weibullverteilung beschrieben werden.  $F(t|\theta)$  ist die kumulative Verteilungsfunktion des Versagenszeitpunktes.

Da bei Tragwerken, die in Betrieb sind  $F(t|\theta)$  sehr klein ist, gilt folgende Approximation:

$$f(t|\theta) \approx \lambda_F(t|\theta).$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit in einem spezifischen Jahr, repräsentiert durch den Zeitraum  $\Delta t$  wobei  $\Delta t = 1a$  gleich 1 Jahr ist, berechnet sich zu:

$$P_{F,[t,t+\Delta t]} = \int_t^{t+\Delta t} f(t|\theta) dt \approx f(t|\theta)\Delta t.$$

Und damit zu:

$$P_f(t) = f(t|\theta)1a \approx \lambda_F(t|\theta).$$

Somit erhält man die Approximation:

$$P_f(t) \approx \lambda_F(t|\theta).$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit kann damit bei Tragwerken, die eine ausreichend kleine Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen, durch die Versagensrate approximiert werden. Damit ist die mittlere Zeit zwischen Versagensereignissen, wie sie in [177] für Bahnanwendungen definiert ist, direkt überführbar in den Tragwerksbereich, in dem die

Zuverlässigkeit entweder über die Versagenswahrscheinlichkeit direkt oder über den Zuverlässigkeitsindex indirekt angegeben wird. Für den Indikator Zuverlässigkeit sind Performance-Goals direkt in den Tragwerksnormen [178] angegeben.

### Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit nach RAMS gibt an, inwieweit das technische System verfügbar, bzw. nicht verfügbar ist. Nach [177] ist die Verfügbarkeit wie folgt definiert: „Die Fähigkeit eines Produkts, in einem Zustand zu sein, in dem es unter vorgegebenen Bedingungen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt oder während einer vorgegebenen Zeitspanne eine geforderte Funktion erfüllen kann unter der Voraussetzung, dass die geforderten äußeren Hilfsmittel bereitstehen“.

Allgemein ist die Verfügbarkeit der Zeitanteil, in der das System die geforderten Funktionen erfüllen kann.

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT}$$

Mit  $MUT$  ist die Zeit, in der das System verfügbar ist (Mean Up Time) und  $MDT$  (Mean Down Time) ist die Zeit, in der das System nicht verfügbar ist. In der Elektrotechnik wird  $MUT$  häufig mit der Zeit zwischen zwei Versagen ( $MTBF$ ) substituiert und die  $MDT$  mit der Zeit, die zur Reparatur bzw. für den Unterhalt benötigt wird.

Die Verfügbarkeit eines Systems lässt sich in die geplante Nichtverfügbarkeit durch Instandhaltung, -setzung und Unterhalt und der ungeplanten Nichtverfügbarkeit aufteilen. Für Brückentragwerke wird der KPI „Verfügbarkeit“ auf die Funktionalität als Verkehrsweg bezogen. In diesem Kontext wird die geplante Nichtverfügbarkeit als PI interessant, wenn im Rahmen des LZMs von festen Unterhaltsintervallen abgewichen wird und über condition-based-Maintenance [179] Entscheidungen getroffen werden und somit die Verfügbarkeit als Zielgröße mitberücksichtigt werden kann.

Bei der geplanten Nichtverfügbarkeit wird in der Regel die Nachfrage (Verkehrsstärke) und das Angebot (Kapazität) der Verkehrswege in der Zielgröße mit einbezogen. Bei der geplanten Nichtverfügbarkeit ist bei Tragwerken selten eine Vollsperrung nötig und somit ist die  $MDT$  bei Brückentragwerken abhängig von einer Kapazitätseinschränkung.  $MDT$  könnte als Funktion der Kapazitätseinschränkung beispielsweise wie folgt definiert werden:

$$A(t) = \frac{MUT(t)}{MUT(t) + MDT(t) \frac{q_{max,red}}{q_{max,ist}}}$$

Hierin ist  $q_{max,ist}$  die maximale Leistungsfähigkeit der Straße bei optimaler Geschwindigkeit in Fzg./h im „Ist-Zustand“ und  $q_{max,red}$  die durch die Maßnahme maximal verfügbare Leistungsfähigkeit bei einer Einschränkung. Bei  $q_{max,red}$  ergibt sich dann auch eine Reduktion der Geschwindigkeit (und evtl. zusätzliche Stautunden) für die Verkehrsteilnehmer, die in den gesellschaftlichen Konsequenzen in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden sollte.

Bei der nicht-geplanten Nichtverfügbarkeit kann bei Brücken die  $MUT$  über die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt werden, wobei durch die regelmäßigen Bauwerkprüfungen sichergestellt ist, dass die Zuverlässigkeit in einem akzeptablen Bereich gehalten wird. Ist eine ausreichende Zuverlässigkeit des Tragwerks nicht mehr gegeben, so werden Sofortmaßnahmen eingeleitet. Diese können beispielsweise die Sonderprüfungen, die Installation eines Monitoringsystems sein und kann auch eine Limitierung des Verkehrs sein (Sperrung für Lkw, etc.).

Eine eingeschränkte Verfügbarkeit wird in der Praxis lediglich in wenigen Fällen durch eine zu niedrige Zuverlässigkeit verursacht. Einen weitaus größeren Anteil an den Einschränkungen haben Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sowie Schadenszustände, die die Dauerhaftigkeit als auch die Verkehrssicherheit beeinträchtigen, aber noch nicht für die Zuverlässigkeit relevant sind.

Somit ist die Approximation der  $MDT$  mit der Versagenswahrscheinlichkeit nicht ausreichend, um den Anteil der nicht-geplanten Nichtverfügbarkeit abzudecken.

### Sicherheit

Die Sicherheit wird in [177] als Anforderung definiert und als Zeit zwischen zwei sicherheitsrelevanten Ausfällen quantifiziert. Die Sicherheit ist bei Tragwerken auf Verkehrswegen direkt mit der Zuverlässigkeit verbunden, geht aber darüber hinaus. So ist auch die Verkehrssicherheit relevant für die Sicherheit. Um eine klare Trennung zu erreichen, wird hier die Sicherheit nur auf die Verkehrssicherheit bezogen und die Tragwerkszuverlässigkeit aus baustatistischer Sicht nur im Indikator Zuverlässigkeit abgebildet. Der KPI Sicherheit ist analog zum KPI Zuver-

lässigkeit zu verstehen und zu quantifizieren. Sicherheit bezieht sich lediglich auf Teile des Bauwerks, die z. B. die Verkehrs- oder Personensicherheit betreffen. Ein Performance Goal wie es bei der Zuverlässigkeit gibt, gibt es teilweise auch bei der Sicherheit, z. B. durch Anforderungen an die Fahrbahnrauigkeit oder durch Anforderungen an Fahrzeugrückhaltesysteme.

Die Sicherheit wird über die mittlere Zeit zwischen zwei sicherheitsrelevanten Ereignissen ( $MTBS$ ) über die (zeitabhängige) Ereignisrate  $\lambda_s(t)$  beschrieben:

$$MTBS = \frac{1}{\lambda_s(t)}$$

Daraus kann analog zur Zuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit eines sicherheitsrelevanten Ausfalls abgeleitet werden:

$$P_s(t) \approx \lambda_s(t|\theta)$$

### Wartungsfreundlichkeit

Der KPI der Wartungsfreundlichkeit wird in [177] mit der mittleren Dauer für die Reparatur abgebildet. Damit wird die Zeit abgedeckt, bis das System wieder die ihm zugeordnete Funktion erfüllen kann. Auf der Ebene der Komponenten eines technischen Systems ist das möglich, bezogen auf ein Brückenbauwerk jedoch erschwert, da es keine Größe ist, die der Brücke zugeordnet werden kann. Es ist eine Funktion des Schadens und eine Funktion der äußeren Randbedingungen, die nicht beeinflusst werden können (z. B. Geologie, Länge der Brücke, architektonische Aspekte, Topografie, etc.). Damit ist eine Vergleichbarkeit zwischen Brücken nicht direkt gegeben und ein Performance Goal kann nicht direkt tragwerksunabhängig und universal vorgegeben werden. Die Wartungsfreundlichkeit hat jedoch einen direkten Einfluss auf die Kosten. Hierbei ist es auch möglich, die Kosten, die durch Einschränkungen für den Verkehrsteilnehmer resultieren, mitzubewerten. Jedoch ist auch hier die Vergleichbarkeit von absoluten Kosten zwischen den Brücken aus oben genannten Gründen nicht unbedingt gegeben. Dabei muss in der Entscheidungsfindung darauf geachtet werden, dass die Abhängigkeiten richtig berücksichtigt werden und nicht zu einem überproportionalen Einfluss führen. Werden Kosten aus Verkehrseinschränkungen in der Wartungsfreundlichkeit berücksichtigt, dann muss beurteilt werden, inwiefern diese auch in der Verfügbarkeit berücksichtigt werden sollten (und umgekehrt). Ebenso sollte berücksichtigt werden, dass die Wartungsfreundlichkeit davon abhängig ist, welche Teile des

Tragwerks betrachtet werden. So kann die Wartungsfreundlichkeit für Komponenten, die sich eher auf die Sicherheit beziehen, signifikant andere Werte haben als die Wartungsfreundlichkeit, die sich auf Tragwerkskomponenten beziehen.

### Restnutzungsdauer

Die Restnutzungsdauer ist die Dauer bis zur nächsten Instandsetzung oder zum Ersatzneubau. Der prognostizierte Verlauf der KPIs kann im KPI Restnutzungsdauer zusammengefasst werden. Die Restnutzungsdauer ist ein Maß, das die Änderung der Materialeigenschaften und Geometrien über die Zeit durch äußere und innere Einflüsse abbildet. Tragwerke werden bei der Bemessung so ausgelegt, dass während der vereinbarten Nutzungsdauer die Materialien dauerhaft sind und am Ende der Nutzungsdauer die geforderten Eigenschaften noch erfüllen. Für verschiedene Teile der Tragwerke können unterschiedliche Nutzungsdauern definiert werden. Die Restnutzungsdauer ist durch die Zuverlässigkeit, die Sicherheit und der Verfügbarkeit beeinflusst. Die Restnutzungsdauer ist die Dauer bis zur nächsten Instandsetzung (siehe Bild 4-2) und ist ein wesentlicher KPI für Entscheidungen im LZM. Mit diesem Indikator kann auf Netzebene beurteilt werden, zu welchem Zeitpunkt wie viele Tragwerke instandgesetzt werden müssten. Es kann dann entschieden werden, wo sich beispielsweise Monitoring lohnt, um Zeit zu gewinnen, um die Instandsetzung ggf. hinauszuzögern. Es kann sinnvoll sein, eine Instandsetzung vor Erreichen des Performance-Goals durchzuführen und mit geringeren Kosten eine längere Lebensdauer zu erreichen. Das Performance-Goal ist dabei als Randbedingung zum Beispiel durch Normen gegeben. Bild 4-2 zeigt einen generellen Verlauf der Zuverlässigkeit über die Zeit und zeigt schematisch die Restnutzungsdauer als Zeit bis zur Instandsetzung.

### Lebenszykluskosten

Die Lebenszykluskosten (LZK) sind ein wichtiger KPI. Sie setzen sich aus allen monetären Kosten zusammen und schließen für die Maßnahmenwahl externe Kosten mit ein, siehe Kapitel 6. Kosten werden oft als wichtiger KPI genannt; so auch in Tabelle 4-1. Allerdings gehen die Kosten in die Lebenszykluskosten ein, die alle Kosten aggregiert berücksichtigen. Lebenszykluskosten können pro Bauwerk ermittelt werden und sind dann objektspezifisch. Sie können von Bauwerk zu Bauwerk stark variieren was den Randbedingungen (Geologie,

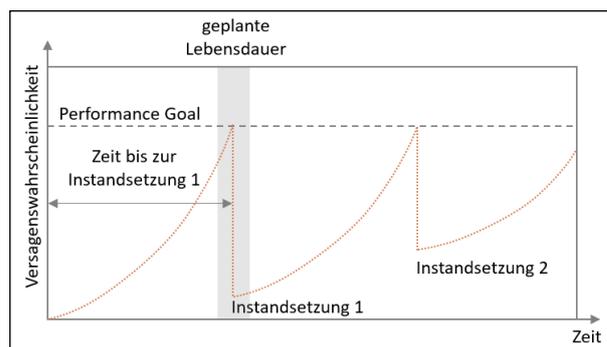


Bild 4-2: Schematische Darstellung der Bedeutung des KPI Restnutzungsdauer (eigene Darstellung)

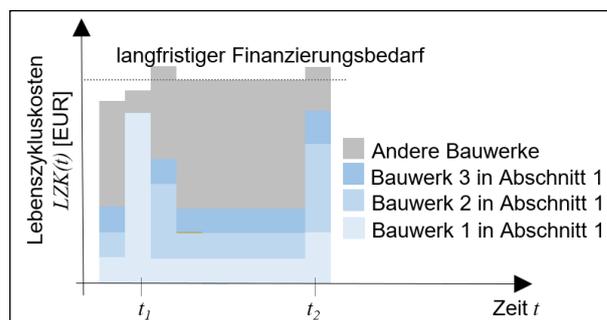


Bild 4-3: Aktueller und langfristiger Finanzierungsbedarf als Funktion der Lebenszykluskosten (eigene Darstellung)

Geografie, Nutzung, Bauweise, etc.) geschuldet sein kann.

Kosten können nicht am Bauwerk gemessen werden. Vielmehr leiten sie sich aus den Maßnahmen aus dem LZM und dem Bauwerkszustand ab. Im LZM werden aus dem Raum an möglichen Maßnahmen, die Maßnahmen so gewählt, dass sie die Lebenszykluskosten minimieren.

Bild 4-3 zeigt, wie der aktuelle als auch der zukünftige langfristige Finanzierungsbedarf als Funktion der Lebenszykluskosten ermittelt werden kann. Wenngleich externe Kosten (Kapitel 6.3.1) in die Entscheidungsfindung für Maßnahmen eingehen müssen, so gehen sie nicht in die Lebenszykluskosten ein, denn z. B. monetär bewertete Nutzerkosten (Staukosten) müssen nicht bezahlt werden. Des Weiteren gehen auch keine Risikokosten in die Lebenszykluskosten ein, es sei denn, sie treten bei Risikotransfer in Form von Versicherungsprämien auf.

Um die Maßnahmen, die im LZM als optimal identifiziert wurden, umzusetzen, werden Ressourcen in Form von Kapital, Personen, Ausrüstung, Material und Zeit benötigt. Diese gehen in die Entscheidungsfindung (Kapitel 6.3.1) ein, um optimale Maßnahmen auf Bauwerksebene zu identifizieren. Bei diesen Entscheidungen gehen die Zeiten (z. B.

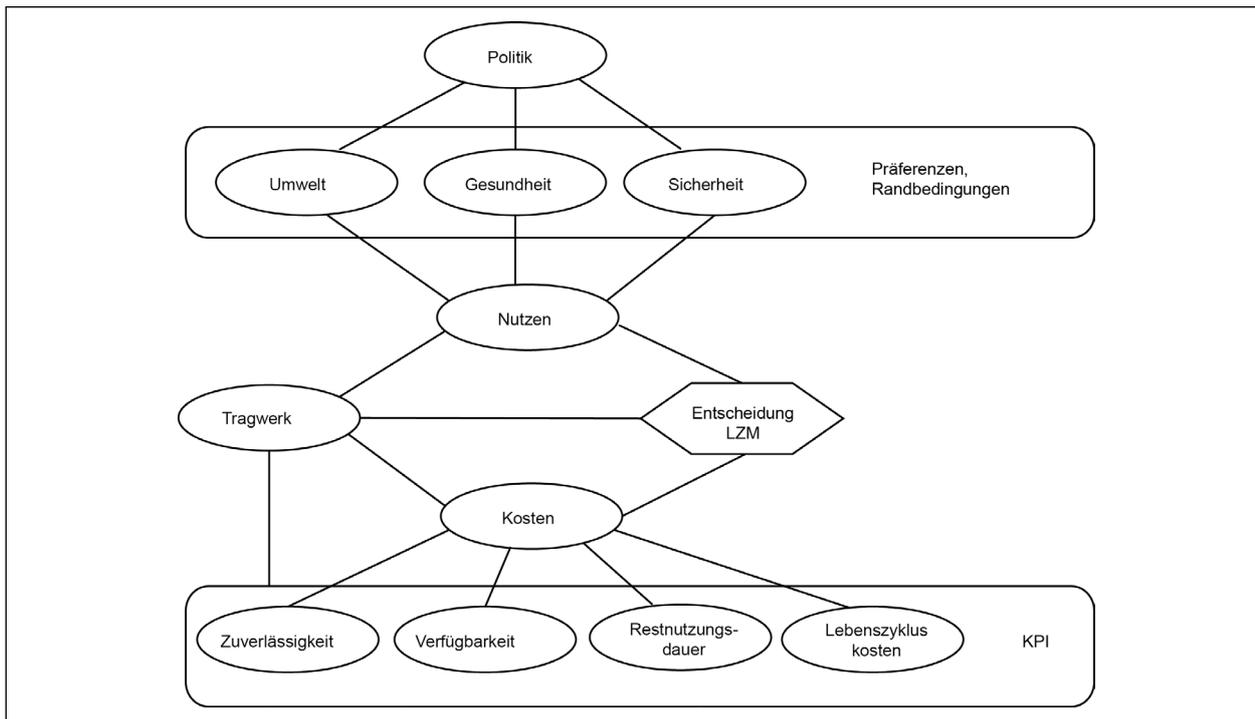


Bild 4-4: Einfluss der KPI und der Präferenzen/Randbedingungen auf die Entscheidungsfindung (eigene Darstellung)

Restnutzungsdauer) als Randbedingung ein. Zusätzlich müssen auch gesellschaftliche Kosten (z. B. Nutzerkosten / Staustunden) durch externe Kosten in diese Entscheidungen Eingang finden. Kapitel 4.4 formuliert wie diese Kosten quantifiziert werden können, damit sie in die risikobasierte Entscheidungsfindung (Kapitel 6.3.1) Eingang finden können.

Dabei ist anzumerken, dass eine direkte Vergleichbarkeit von Kosten nicht immer gegeben ist. So können 2 Mio. EUR für eine Teilinstandsetzung einer kurzen Brücke nicht mit 2 Mio. EUR für eine vergleichbare Instandsetzung einer langen Brücke verglichen werden. Denn die Größe der Brücke (Skalenproblem) als auch Randbedingungen (Geologie, Geografie, Nutzung, Bauweise, etc.) spielen eine zentrale Rolle und somit sind Kosten oft für jede Brücke spezifisch.

Die in Tabelle 4-1 aufgeführten Indikatoren Zugangsschutz und Bewertung / Inspektion sind für dieses Projekt weniger relevant. Die Zustandsbewertung bzw. -inspektion geht direkt übers Monitoring in die Entscheidungsfindung des LZM ein und wird in diesem Projekt als Indikator gesehen, der Informationen über die KPI enthält.

Die in Tabelle 4-1 aufgeführten KPIs Politik und Umwelt sind für das LZM und in Bezug auf Monitoringdaten für das vorliegende Projekt eine Randbedin-

gungen und werden wenngleich wichtig nicht als eigenständige KPIs verstanden. Allerdings wird in Kapitel 6.1 beschrieben, wie der Politik Rechnung getragen wird, weil die hier gewählten KPIs mit den Zielen des Bundesverkehrswegeplans 2030 (BVWP 2030) kongruent sind (siehe Tabelle 6-1). In dieser Tabelle 6-1 wird auch die Umwelt als wesentliches Ziel gesehen. In die Optimierung in Kapitel 6.3.1 gehen normative Randbedingungen für die Umwelt als mathematische Randbedingung ein. Zusätzlich gehen sie zukünftig als Randbedingung oder als direkte bzw. indirekte Kosten für CO<sub>2</sub>-intensives Bauen (Carbon Credits) ein.

In Bild 4-4 ist der Einfluss der KPIs und der Randbedingungen auf die Entscheidungsfindung dargestellt. Im politischen Prozess werden die gesellschaftlichen Präferenzen bezüglich Umwelt, Gesundheit und Sicherheit erörtert und definiert. Dies bildet die Basis zur Zielvorstellung des LZMs und wird als Nutzen formuliert. Dabei muss dieser Nutzen diese gesellschaftlichen Präferenzen abbilden, siehe auch Kapitel 6. Die KPIs werden auch durch das Tragwerk selbst beeinflusst. Der Tragwerkszustand hat z. B. Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Restnutzungsdauer und schließlich auf die Kosten. Maßnahmen beeinflussen sowohl das Tragwerk als auch die Kosten. Im LZM gilt es unter Einhaltung von Randbedingungen optimale Maßnahmen zu identifizieren und umzusetzen.

KPI	Quantitatives Maß	Bezeichnung
Zuverlässigkeit/Reliability (R)	Zuverlässigkeitsindex / Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Zeit bis zum Versagen <i>MTBF</i> .	<i>MTBF</i>
Sicherheit/ Safety (S)	Zeit bis zum Sicherheitsrelevanten Ausfall <i>MTBS</i> .	<i>MTBS</i>
Verfügbarkeit/Availability (A)	Zeitanteil in der das Tragwerk für den Verkehr Verfügbar ist <i>A</i> .	<i>A</i>
Restnutzungsdauer (D)	Mittlere Zeit bis zur Instandsetzung <i>MTTR</i> .	<i>MTTR</i>
Wartungsfreundlichkeit/ Maintainability (M)	Mittlere Zeit zur Instandsetzung <i>MTTI</i> .	<i>MTTI</i>
Lebenszykluskosten (LZK)	Die Lebenszykluskosten <i>LZK</i> ergeben sich aus allen Kosten die aggregiert über alle über die Zeit hinweg vorzuhalten sind, um das <i>LZM</i> zu ermöglichen. Die <i>LZK</i> können pro Bauwerk und aggregiert für den Gesamtbestand ermittelt werden, um den Finanzbedarf zu ermitteln. In die Maßnahmenwahl fließen auch externe Kosten mit ein.	<i>LZK</i>

Tab. 4-2: Vorgeschlagene Key Performance Indikatoren

Aus diesen Überlegungen ergeben sich für das LZM die in Tabelle 4-2 zusammengestellten KPIs. Die einzelnen KPI sind informativ, sind aber in [4] nicht direkt mit einer Entscheidungsfindung verknüpft. Sie geben Hinweise darauf, welche Maßnahmen (inkl. Monitoring) ggf. sinnvoll sein können, um die Performance gezielt zu verbessern.

#### 4.4 Quantifizierung des Nutzens von Key Performance Indikatoren für das LZM

Für das LZM sind die Lebenszykluskosten über alle Bauwerke des Netzes hinweg unter Einhaltung der Restnutzungsdauern zu optimieren. Darüber hinaus ergibt sich die Frage wie viel Nutzen das eingesetzte Kapital bringt und mit welchen Maßnahmen die Investition den größten Nutzen bringt (siehe auch Kapitel 5 und 6). Das LZM bezieht sich dann auf die Zielgröße Lebenszykluskosten und Restnutzungsdauer, um effiziente Maßnahmen zu identifizieren. Hierbei wird die Wahl der unterschiedlichen Maßnahmen als Optimierungsvariable verstanden.

Um effiziente Maßnahmen zu identifizieren, müssen die zeitbezogenen KPIs mit Kosten verknüpft werden, bzw. für die risikobasierte Entscheidungsfindung in erwarteten Kosten umgewandelt werden. Sind diese zeitbezogenen KPIs als Wahrscheinlichkeiten definiert, so können diese mit den Konsequenzen (monetäre und externe Kosten) verknüpft werden. Dabei werden die Wahrscheinlichkeiten als jährliche Wahrscheinlichkeiten definiert und zu erwartenden Kosten sind damit als jährliche Kosten zu verstehen. Diese zu erwartenden Kosten finden schließlich Eingang in die risikobasierte Entscheidung über die Nutzenfunktion (Kapitel 6.3.1).

##### 4.4.1 KPI Zuverlässigkeit

Der KPI Zuverlässigkeit kann mit den Kosten infolge eines Versagens  $C_{F,t_0}$  direkt in einen monetären Wert, hier als Nutzen  $u$  bezeichnet (siehe Kapitel 6.3.1), transferiert werden. Die Verzinsung und die Teuerung wird mit  $\gamma_d(t)$  und  $\gamma_i(t)$  berücksichtigt, die, wie auch die Versagenswahrscheinlichkeit, von der Zeit  $t$  abhängig sein können. Der Index  $t_0$  gibt dabei an, dass es sich um Kosten handelt, die sich auf einen Referenzzeitpunkt  $t_0$  beziehen. Die nominalen Kosten erhält man unter Berücksichtigung der Preissteigerung  $\gamma_i(t)$ , d. h.  $C_{Fn}(t) = C_{F,t_0} \gamma_i(t)$  und die realen Kosten erhält man mit dem Abzins- bzw. Diskontierungsfaktor  $\gamma_d(t)$ , d. h.  $C_{Fr}(t) = C_{F,t_0} \gamma_i(t) \gamma_d(t)$ .

Da zusätzlich die Verfügbarkeit als separater KPI berücksichtigt wird, werden hier nur die Versagenskosten und nicht die Nutzerkosten nach einem möglichen Versagen des Tragwerks berücksichtigt:

$$u_{KPI,R,r}(t) = P_f(t) \cdot C_{F,t_0} \cdot \gamma_i(t) \cdot \gamma_d(t).$$

##### 4.4.2 KPI Verfügbarkeit

Der KPI Verfügbarkeit als Funktion von der Zeit kann als Verhältniswert direkt als Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit interpretiert werden. Die Kosten für die Unverfügbarkeit eines Tragwerks  $C_u(t)$  sind mittels geeigneten Methoden zu bestimmen (siehe z. B. [176]). In diesen Kosten sind insbesondere die Nutzerkosten für die Umfahrungen und die Stausituationen zu berücksichtigen. Diese haben einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten und damit auf die Entscheidungsfindung:

$$u_{KPI,A,r}(t) = (1 - A(t)) \cdot C_u(t) \cdot \gamma_i(t) \cdot \gamma_d(t).$$

#### 4.4.3 KPI Restnutzungsdauer

Die Restnutzungsdauer ist die Zeit bis zur Instandsetzung  $MTTR$  (mean time to repair) und kann ebenfalls als jährliche Nutzenkomponente formuliert werden. Die Instandsetzung erfolgt zu diskreten Punkten deren Dichteverteilung mit  $f_T(t)$  beschrieben werden kann. Der Mittelwert von  $f_T(t)$  kann vereinfachend hier mit  $MTTR$  angegeben werden. Die Kosten für die Instandsetzung sind singuläre zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretende Kosten. Diese sind unter Verwendung der Annuitätenrechnung auf den Entscheidungszeitpunkt zu beziehen:

$$u_{KPI,D,r} = \int_{t_0}^{\infty} f_T(t) \cdot C_{I,t_0} \cdot \gamma_i(t) \cdot \gamma_d(t) dt \approx \frac{1}{MTTR} \cdot C_{I,t_0} \cdot \gamma_i(t = MTTR) \cdot \gamma_d(t = MTTR).$$

$MTTR$  ist auch eine Zufallsvariable und muss also entsprechend behandelt werden. Hier ist es aus Gründen der besseren Lesbarkeit verzichtet worden,  $MTTR$  als Zufallsvariable in der Gleichung zu berücksichtigen.

Analog zur Restnutzungsdauer kann der Nutzen für die Sicherheit formuliert werden.  $C_{S,t_0}$  sind die Kosten für die sicherheitsrelevante Instandsetzung:

$$u_{KPI,S,r} = \frac{1}{MTBS} \cdot C_{S,t_0} \cdot \gamma_i(t = MTBS) \cdot \gamma_d(t = MTBS).$$

Als einen der wichtigsten KPIs im LZM kann der KPI Restnutzungsdauer angesehen werden, da dieser Auskunft über den Zeitpunkt der nächsten Instandsetzung gibt.

Bisher ist hier nur der Nutzen für die einzelnen KPIs modelliert worden. Das LZM im Bereich des Bundesfernstraßennetzes betrifft jedoch den gesamten Bauwerksbestand und sollte nicht nur den Finanzbedarf auf der Nachfrageseite (z. B. Bauwerke die zu erstellen oder Instand zu setzen sind) betrachten, sondern auch beachten, dass die Angebotsseite (Leistungsfähigkeit der Bauwirtschaft) eine annähernd gleichmäßige Auslastung über die Zeit hat. Häufig beziehen sich die Betrachtungen nur auf ein einzelnes Tragwerk und die Ertüchtigung bzw. den Ersatzneubau, die einzeln keinen Einfluss auf die Marktsituation ausüben. Man spricht in diesem Fall von marginalen Entscheidungen. Bei Entscheidungen für einen Brückenbestand kann allerdings eine gesteigerte Nachfrage zu einer veränderten Marktsituation führen und einen Einfluss auf die Angebotsseite haben. In diesem Fall handelt es sich um nicht-marginalen Entscheidungssituationen.

Bei nicht-marginalen Entscheidungssituationen sollte die Angebotsseite (siehe Bild 4-3) in die Entscheidungssituation mit einbezogen werden. Es kann sinnvoll sein eine gleichmäßige Nachfragesituation zu generieren, um Preissteigerungen aufgrund eines beschränkten Angebots zu vermeiden. Konkret bedeutet dies, dass aufgrund der Restnutzungsdauer entschieden wird die Zeit bis zur Instandsetzung bei einzelnen Tragwerken zu verkürzen oder zu verlängern, damit für den Bauwerksbestand eine annähernd gleiche jährliche Nachfrage an Bauleistungen erreicht wird. Dies reduziert das Risiko von Preisspitzen und führt auch auf Seiten des professionellen Bauwerksverwalters zu einer nachhaltigen Auslastung seiner Ressourcen. In Kapitel 5 Lebenszyklusmanagement wird dieser Aspekt detailliert betrachtet.

#### 4.4.4 KPI Wartungsfreundlichkeit

Die Wartungsfreundlichkeit wird als notwendige Zeitdauer für die Instandsetzung bzw. Unterhalt definiert. Die Kostenkomponente  $C_{I,t_0}$  für die Zuverlässigkeit und  $C_{S,t_0}$  für die Sicherheit fließt dort direkt mit ein und ist berücksichtigt.

#### 4.4.5 KPI Finanzierungsbedarf

Sind für alle Brücken die effizientesten Maßnahmen zusammen mit alternativen Maßnahmen identifiziert, so kann für jede Brücke die Lebenszykluskosten über die Zeit als Cashflow berechnet und dargestellt werden. Die Lebenszykluskosten für den Gesamtbestand ergibt sich dann als Aggregat über alle  $n$  Bauwerke und kann über die Zeit dargestellt werden, siehe Bild 4-3. Der Cashflow  $C_i(t)$  für die Brücke  $i$  ist lediglich eine Komponente. Es kann daher über den gesamten Bauwerksbestand gesehen optimal sein, wenn für eine weniger bedeutende Brücke nicht die optimale Maßnahme, sondern eine Alternativmaßnahme umgesetzt wird.

Die nominellen Lebenszykluskosten für den Bauwerksbestand ergeben als Summe über alle  $n$  Bauwerke, die  $m$  Kostenkomponenten haben:

$$u_{KPI,LZK,n}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{i,j,t_0} \cdot \gamma_i(t)$$

und die realen Lebenszykluskosten zu:

$$u_{KPI,LZK,r}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{i,j,t_0} \cdot \gamma_i(t) \cdot \gamma_d(t).$$

Mit diesen quantitativen Formulierungen können die definierten KPIs direkt in der Entscheidungsfin-

dung des LZM, wie es konzeptionell in Kapitel 5 und mathematisch in Kapitel 6 formuliert wird, berücksichtigt werden.

#### 4.5 PI und KPI in Verbindung mit Monitoring

Ziel des LZM ist ein optimales Management, d. h. Verwalten eines Bauwerkbestandes. Dafür sind in der Umsetzung wichtige und teils schwierige Entscheidungen zu fällen und identifizierte Maßnahmen umzusetzen. Wichtige Maßnahmen sind Unterhaltsmaßnahmen, Instandsetzungen, Verstärkungen und Rückbau mit Erneuerung. Alternativ dazu können auch Maßnahmen ausgelöst werden, die zusätzliches Wissen über den Zustand von Bauwerken, Bauteilen oder Schädigungsmechanismen generieren. Darunter fallen kontinuierliche oder Einzelmessungen, Zustandsbeurteilungen als auch gezielte Inspektionen und zerstörungsfreie Prüfungen. Ziel dieser informationsgebenden Maßnahmen ist es die Unsicherheiten zu reduzieren. Denn jede Entscheidung im LZM ist mit Unsicherheiten behaftet. Informationsgebende Maßnahmen erlauben es Unsicherheiten zu reduzieren. Dies kann sich als Reduktion in der Variabilität (z. B. Einwirkungen die weniger stark variieren) manifestieren. Genauso kann eine falsche Tendenz / Bias (Einwirkungen oder Beanspruchungen, die tatsächlich kleiner bzw. grösser sind) erkannt werden.

Für ein spezifisches Bauwerk können gezielt Maßnahmen eingeleitet werden, die Informationen gewinnen, wenn die Fragestellung identifiziert und formuliert ist. Monitoring ist dabei eine mögliche Maßnahme. Aus den Messdaten können Informationen extrahiert und als PI angesehen werden. Sie erlauben den Zustand eines Schädigungsprozesses oder die Leistungsfähigkeit eines Bauteils besser zu beschreiben. Die PIs sind objektspezifisch festzulegen und unterscheiden sich bei der Betrachtung von Ermüdungsprozessen an Stahlbrücken oder bei chlorid-induzierter Bewehrungskorrosion an einer Stahlbetonbrücke.

Wurden für die Monitoringdaten Grenzwerte und Entscheidungsregeln festgelegt, dann können automatisch Entscheidungen ausgelöst werden. Darüber hinaus liefern PIs Informationen, mit denen Vorhersagemodelle beispielsweise für Schadensverläufe aktualisiert werden können.

Die Entscheidungsbasis kann verbessert werden, da Monitoringdaten die Aussagekraft von KPIs verbessern können. Monitoringdaten können helfen die Restnutzungsdauer für Stahl-, Stahlbeton- und Spannbetonbrücken besser einzuschätzen. Zeigen sie einen kritischen Zustand und somit eine Verkürzung der Restnutzungsdauer kann unmittelbar gehandelt werden. Alternativ können Monitoringdaten auch Zustände erkennen, die tatsächlich besser als erwartet sind. In diesem Fall kann sich die rechnerische Restnutzungsdauer eines Bauwerks erhöhen, wie Beispiele in Kapitel 3.2.2 zeigen. Die Information über eine rechnerisch erhöhte Restlebensdauer erhöht den Handlungsspielraum des Bauwerksverwalters. Denn so könnte z. B. eine teure Sofortmaßnahme ausgesetzt werden und die Instandsetzung zusammen mit anderen geplanten Maßnahmen im selben Streckenabschnitt ausgeführt werden.

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Informationen kann die optimale Maßnahme identifiziert und Lebenszykluskosten für das Bauwerk als auch für den Gesamtbauwerksbestand aktualisiert werden.

Das Potenzial informationsgebender Maßnahmen wie Monitoring liegt in der Reduktion von Unsicherheiten und der Identifikation optimaler Erhaltungsmaßnahmen für das LZM auf Netzwerkebene (siehe Kapitel 8). Auf dieser Grundlage können die Lebenszykluskosten für den Bauwerksbestand und somit der Finanzierungsbedarf für die Erhaltung ermittelt werden. Alternativ können bei gegebenen Finanzmitteln die Maßnahmen besser priorisiert und eingeordnet werden.

#### 4.6 Modelle für KPI und Model Updating

Um die Informationen aus dem Monitoring im LZM zu nutzen, sind diese Daten und die daraus gewonnenen Informationen mit dem Entscheidungsproblem zu verknüpfen. Konkret dienen die Informationen aus dem Monitoring dazu, die KPIs bestmöglich zu quantifizieren. Die aus dem Monitoring gewonnenen Informationen stellen PIs dar und müssen dazu mit Modellen zur Bestimmung der KPI verknüpft werden.

Aus übergeordneten PIs kann eine erste Abschätzung erfolgen, inwieweit welches Tragwerk im Bauwerksbestand von welchen potenziellen Schädigungsmechanismen betroffen ist oder welche Nichtkonformitäten (z. B. Nicht-Erfüllung von heutigen

Normen) wahrscheinlich vorhanden sind. Ein Modell hierzu lässt sich über einfache PIs (Baujahr, Brückentyp, etc.) basierend auf empirisch gewonnenen Erfahrungen für den Bauwerksbestand entwickeln (siehe z. B. Bild 3-3). Weitere verfügbare PIs sind: Zustandsnote, Substanzkennzahl und Traglastindex [170].

Monitoring kann an geschädigten oder ungeschädigten Tragwerken erfolgen. Tragwerke ohne beobachtbare Schädigungen sind der einfachere Fall. An einem ungeschädigten Tragwerk kann beispielsweise eine Nachrechnung des Tragwerks zeigen, dass die derzeitigen Normanforderungen oder andere spezifische Anforderungen (Performance Goals, siehe Kapitel 4.1) für das Tragwerk nicht mehr erfüllt sind. Der KPI Zuverlässigkeit ergibt sich direkt aus den Modellen der Bemessungsgleichungen, mit denen die Zuverlässigkeit und die *MTTF* abgeleitet bzw. berechnet werden kann.

Aus der Nichtkonformität im KPI Zuverlässigkeit ergibt sich zunächst ein Handlungsbedarf im LZM. Sind keine Schäden vorhanden, so kann Monitoring eingesetzt werden, um mehr Wissen über den KPI zu erlangen.

Schädigungsmodelle stehen für verschiedene Schadensmechanismen an Stahl- und Betontragwerken (siehe z. B. [171]) zur Verfügung. Um Schädigungsmodelle mit Monitoringdaten zu aktualisieren, ist diese Information wahrscheinlichkeitstheoretisch konsistent zu berücksichtigen. Dazu sind die Unsicherheiten in den Messgrößen als auch in deren Aussage zu berücksichtigen.

Dies wird nachfolgend beispielhaft für die chlorid-induzierte Bewehrungskorrosion an einer Stahlbetonbrücke als auch für eine ermüdungsbeanspruchte Stahlbrücke gezeigt.

### Chlorid-induzierte Korrosion bei Stahlbeton- bzw. Spannbetonbrücken

Im Winter werden Tausalze eingesetzt, um die sichere Nutzung der Straßen zu gewährleisten. Allerdings dringen diese Tausalze in den Beton ein, können die Bewehrung erreichen und deren passive Schutzschicht zerstören. Schließlich kann so Korrosion initiiert werden, die die Bewehrungsfläche reduziert, bis es zum Versagen kommt. Die chlorid-induzierte Korrosion wurde bei den ausgewählten Monitoringprojekten in Kapitel 3.2.2 als ein typischer Schadensmechanismus identifiziert. Um Information bezüglich des Korrosionszustandes der

Bewehrung zu erhalten, können Potenzialfeldmessungen (siehe Kapitel 2.4.4) durchgeführt werden. Dabei wird eine Spannungsdifferenz zwischen der Bewehrung und der Betonoberfläche gemessen.

Bild 4-5 zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Bewehrung einer Stahlbetonbrücke korrodiert ist, als Funktion der gemessenen Potentialdifferenz. Zusätzlich zeigt sie die Wahrscheinlichkeit, dass die Bewehrung noch passiviert und damit nicht korrodiert vorliegt. Anhand dieser Abbildung, die auf Messungen und tatsächlich observierten Korrosionszuständen beruht, kann für eine gemessene Potentialdifferenz von kleiner als  $U = -210\text{ mV}$  die Wahrscheinlichkeit  $P(I|K) = 0,95$  ermittelt werden, dass die Bewehrung korrodiert vorliegt. Gleichzeitig kann auch die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, dass bei nicht korrodierten Bewehrungen diese Potentialdifferenz gemessen wird. Diese ist mit  $P(I|\bar{K}) \approx 0,10$  gegeben [173].

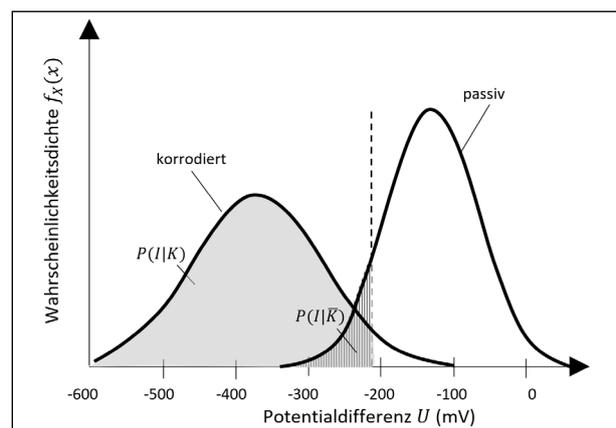


Bild 4-5: Darstellung der Wahrscheinlichkeit einer korrodierten Bewehrung bei einer Potenzialfeldmessung (eigene Darstellung)

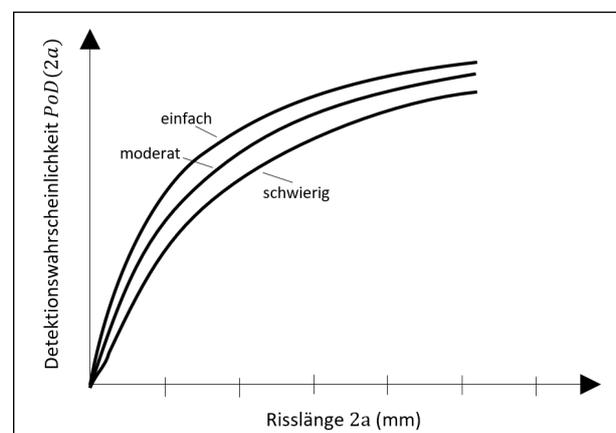


Bild 4-6: Darstellung der Detektionswahrscheinlichkeit eines Ermüdungsrissses als Funktion der Risslänge (eigene Darstellung)

## Ermüdung bei Stahlbrücken

Stahlbrücken sind Ermüdungsbeanspruchungen z. B. infolge des Straßenverkehrs ausgesetzt. Diese Belastung ist zyklisch und kann eine große Anzahl Spannungsdifferenzen erzeugen und ermüdungsbedingte Schäden generieren, die sich über die Lebenszeit akkumulieren. Als Resultat können sich Ermüdungsrisse bilden, die stetig bis zum Ermüdungsbruch wachsen. Bauwerksinspektionen können Aufschluss darüber geben, inwieweit schon ein Ermüdungsriss vorliegt. Dazu können visuelle Inspektionen durchgeführt werden. Allerdings besteht bei visuellen Inspektionen die Gefahr, dass tatsächlich vorhandene Risse nicht erkannt werden. In [173] wird gezeigt, dass die Detektionswahrscheinlichkeit mit der Risslänge zunimmt und dass Modelle dazu bereits aus dem Offshore-Bereich vorliegen. Bild 4-6 zeigt beispielhaft diese Detektionswahrscheinlichkeit für visuelle Inspektion bei Schiffsrümpfen. Hierbei kann unterschieden werden, ob die Risse einfach, moderat oder schwierig zu identifizieren sind.

Mit dieser Information aus Inspektion, Potenzialfeldmessung oder auch Monitoring können die Schädigungsmodelle (siehe z. B. [171]) aktualisiert werden und den Einfluss auf die KPIs berechnet werden. Dies kann zu einer Neueinschätzung der Zuverlässigkeit und damit auch der Restnutzungsdauer führen. Dies wiederum erhöht den Handlungsspielraum und sowohl Maßnahmen als auch die Kosten können optimiert werden.

### Aktualisierung von Modellen für KPIs

Bild 4-7 zeigt links beispielhaft, dass sich der akkumulierte Ermüdungsschaden  $D$  über die Zeit akkumuliert bis das Versagenskriterium  $\Delta$  erreicht wird und zu einem Versagen führt. Wenn gleich an dieser Stelle von Zuverlässigkeit und Versagenswahrscheinlichkeiten gesprochen wird, sei angemerkt, dass die DIN 1076 [15] sicherstellt, dass die Zuverlässigkeit der Brücke nicht in den unakzeptablen Bereich kommt. Dennoch sind diese Begriffe hilfreich, um die Restnutzungsdauer mitzubestimmen. Der grau schraffierte Bereich im Bild 4-7 zeigt, dass die Ermittlung des akkumulierten Schadens mit Unsicherheiten behaftet ist. Das Bild zur Rechten zeigt, wie eine Inspektion oder Monitoring die Unsicherheit des akkumulierten Schadens reduzieren kann, falls zum Zeitpunkt  $t_1$  kein Riss entdeckt wurde. Unter Berücksichtigung dieser reduzierten Unsicherheit kann dann die Zuverlässigkeit aktualisiert werden, die hier als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Zeitpunktes eines Ermüdungsversagens dargestellt ist. Dieses Bild stellt den positiven Fall dar, bei dem kein Riss entdeckt wurde. Der komplementäre Fall (Rissentdeckung) würde einen negativen Effekt auf die Zuverlässigkeit haben.

Ist die Zuverlässigkeit aktualisiert, so kann dann die Restnutzungsdauer unter Berücksichtigung aller anderen Bauteile und Schädigungsmechanismen aktualisiert werden. Dies findet schließlich Eingang in die Entscheidungsfindung des LZM.

Das vorherige Beispiel zeigt, dass Monitoring einen Mehrwert generieren kann. Dies zeigen auch die ausgewählten Monitoring Projekte, z. B. das Chillon Viadukt (Fallbeispiel 4 in Kapitel 3.2.2) bei dem neben anderen auch der akkumulierte Schaden besser eingeschätzt werden konnte. Darüber hinaus kann auch der Wert von Monitoringmaßnahmen ex ante mithilfe einer pre-posteriori Analyse bestimmt werden. Dies wird im Kapitel 4.8 beschrieben.

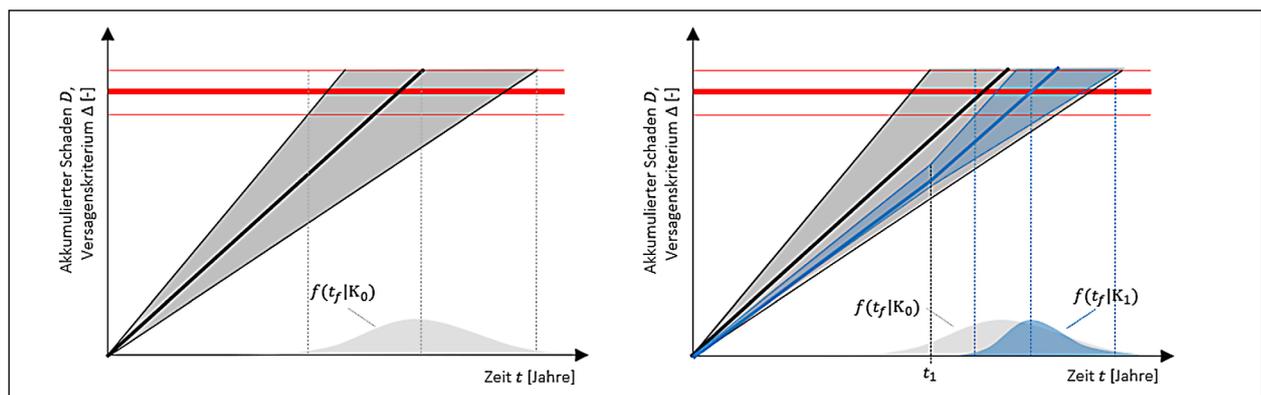


Bild 4-7: Schematische Darstellung zum Einfluss neuer Information auf den Zeitpunkt des Ermüdungsversagens ohne (links) und mit Monitoring (rechts) (eigene Darstellung)

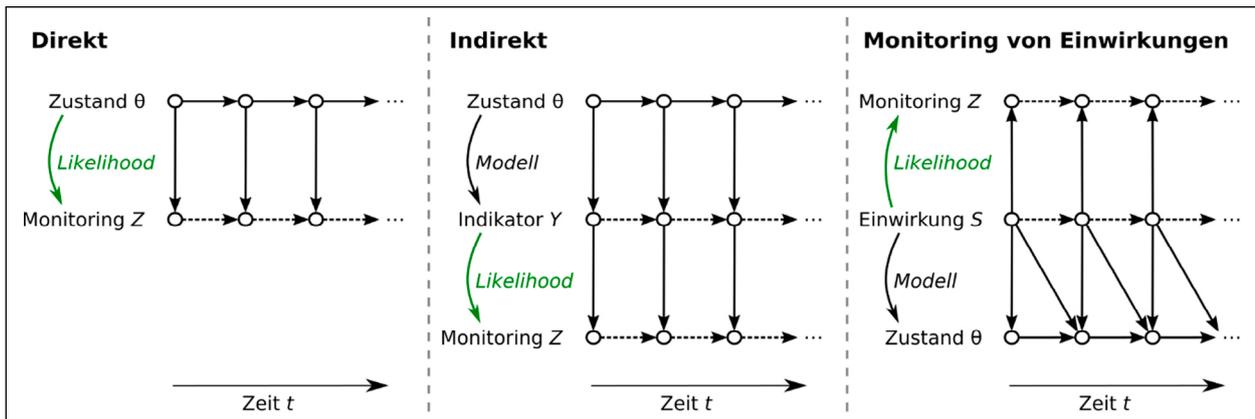


Bild 4-8: Unterschiedliche Situationen beim Einsatz von Monitoring [5]

## 4.7 Modellierung von Monitoring

Der Wert von Monitoring kann mit einem Modell beschrieben werden, wie es in [5] formuliert wurde. Dazu muss ein Zusammenhang zwischen den Monitoringergebnissen  $Z$  den Schädigungsindikatoren  $Y$  und dem unsicheren Bauwerkszustand  $\theta$  erstellt werden. Der mathematischen Notation folgend werden Zufallsvariablen wie der unsichere Bauwerkszustand  $\theta$  mit Großbuchstaben und Realisationen dieser Zufallsvariablen mit Kleinbuchstaben, z. B.  $\theta$ , beschrieben. Grundsätzlich können drei verschiedene Situationen des Monitoringereinsatzes unterschieden werden. Diese sind in Bild 4-8 dargestellt und nachfolgend aufgeführt:

1. Die mit dem Monitoringsystem beobachtbaren Größen  $Z$  sind direkt Parameter des Schädigungs- oder Zustandsmodells, d. h. Teil von  $\theta$  (Bild 4-8, links), etwa wenn ein Korrosionsabtrag gemessen wird, der direkt im Korrosionsmodell und dem Bauwerksmodell als Parameter verknüpft ist.
2. Die mit dem Monitoringsystem beobachtbaren Größen  $Z$  sind nur indirekt mit dem Schädigungs- oder Zustandsmodell verknüpft, d. h. über messbare Indikatoren  $Y$ , die mit dem Zustand korreliert sind (Bild 4-8, Mitte). Dies ist etwa der Fall beim Monitoring eines Risses, welcher auf Schäden an der Vorspannung hinweist.
3. Schließlich sind Monitoringsysteme im Einsatz, welche die Einwirkungen auf das Tragwerk messen, wie etwa Weigh-In-Motion (WIM) (Bild 4-8, rechts). Auf diesen letzten Fall wird nicht näher eingegangen.

### Fall 1

Das Ziel von Monitoring ist es, Informationen zu gewinnen, die die Unsicherheit über den Bauwerkszu-

stand reduzieren. Diese Information lässt sich mathematisch in allgemeiner Form über die sogenannte Likelihood-Funktion  $L(\theta)$  definieren. Für Fall 1 ergibt sich die Likelihood-Funktion zu

$$L(\theta) \propto \Pr(Z|\theta = \theta).$$

Dabei ist  $\theta$  der Vektor von Parametern, der den Zustand des Bauwerks beschreibt, etwa Parameter eines Schädigungsmodells (z. B. Rissbreite), und  $Z$  ist das Monitoring-Resultat. Die Reduktion der Unsicherheit im Zustand wird dann mittels einer Bayes'schen Analyse quantifiziert

$$f_{\theta|Z}(\theta) \propto L(\theta)f_{\theta}(\theta).$$

Hierbei ist  $f_{\theta|Z}(\theta)$  die aktualisierte Verteilung (a-posteriori Verteilung) der Bauwerkszustandsparameter gegeben für die Monitoringergebnisse  $Z$ .

### Fall 2

Im Fall 2 können über die Monitoringergebnisse  $Z$  Informationen zum unsicheren Indikator  $Y$  gegeben werden. Die Likelihood-Funktion ist dann gegeben durch

$$L(Y) \propto \Pr(Z|Y = y).$$

Dabei sind  $Y$  die Indikatoren, welche mit dem Zustand des Bauwerks korreliert sind, etwa die Rissgröße im Beton. Um den Einfluss der Messungen  $Z$  auf das Zustandsmodell  $\theta$  zu quantifizieren, ist die Verbindung zwischen Indikatoren  $Y$  und Zustandsparameter  $\theta$  notwendig. Auch dieser ist in aller Regel probabilistisch, und über eine weitere bedingte Wahrscheinlichkeit beschrieben:

$$\Pr(Y = y|\theta = \theta) \propto f_{Y|\theta}(y|\theta).$$

Im Beispiel-Fall handelt es sich etwa um die Wahrscheinlichkeit einer gewissen Rissgröße, bedingt

auf den Zustand des Bauwerks. Um in diesem Fall den Effekt des Monitorings auf den Bauwerkszustand zu quantifizieren, muss die Bayes'sche Analyse erweitert werden auf:

$$f_{\theta|Z}(\theta) \propto \int_{\mathbf{y}} L(\mathbf{y})f_{Y|\theta}(\mathbf{y}|\theta)f_{\theta}(\theta) dy.$$

Im nachfolgenden Kapitel werden die Gleichungen für Fall 1 mit einem Beispiel illustriert.

## 4.8 Unsicherheit und Wert von Monitoring

Um den Wert von Monitoringmaßnahmen und den Einfluss von Messungenauigkeiten zu quantifizieren, wird zunächst mit einem Beispiel der Einfluss der Messungenauigkeit auf die a-posteriori Verteilung quantifiziert und beschrieben. Anschließend wird ein Konzept zur Quantifizierung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen beschrieben. Dieses Konzept wurde in [5] entwickelt ist auch in [94] beschrieben.

### 4.8.1 Einfluss der Messungenauigkeit auf die a-posteriori Verteilung

In Kapitel 4.7 wird formal beschrieben, wie Monitoringergebnisse mit ihren Unsicherheiten benutzt werden können, um Wissen über einen Schädigungsindikator oder einen Bauwerkszustand zu gewinnen. Dieses Vorgehen einer Bayes'schen Analyse wird in Bild 4-8 exemplarisch dargestellt.

Bild 4-9 stellt in drei Diagrammen dar, wie Messungen  $Z$  Informationen über einen Schädigungszustand  $\theta$  geben können. Dieses Vorgehen entspricht Fall 1 aus Kapitel 4.7. Der Schädigungszustand  $\theta$ , ist hier die Rissbreite  $w$  in Millimeter und ist auf der

Abszisse aufgetragen. In den Abbildungen wird die a-priori Verteilung der Rissbreite mit einer Lognormalverteilung mit Mittelwert 0.5 mm und Standardabweichung 0.25 mm dargestellt. Diese Werte sind exemplarisch und dienen der Illustrierung der Bayes'schen Analyse. Des Weiteren werden in den Diagrammen drei mögliche Messungen dargestellt. Alle Messungen haben den Mittelwert 0.5 mm und sind lognormalverteilt. Sie unterscheiden sich allerdings in der Genauigkeit der Messung. Auch die Werte der Standardabweichung (0.03 mm, 0.10 mm und 0.25 mm) sind exemplarisch und abhängig von der Qualität der Messung.

Bild 4-9 zeigt, dass mit Messungen die Unsicherheit des Schädigungszustandes reduziert werden kann. Es wird auch gezeigt, dass Messungen mit kleinerer Standardabweichung, d. h. höherer Messgenauigkeit, die Unsicherheiten der a-posteriori Verteilung verkleinern. Darüber hinaus wird deutlich, dass Messungen mit großen Standardabweichungen dennoch Informationen liefern. Sind Messungen noch ungenauer, dann reduziert sich der Informationsgewinn weiter und wird vernachlässigbar. In diesen Fällen gleicht die a-posteriori Verteilung der a-priori Verteilung.

Unterscheiden sich zwei Messmethoden in der Genauigkeit und haben gleiche Kosten, so ist die genauere zu bevorzugen. Für den allgemeinen Fall müssen allerdings die Kosten mit dem Nutzen des Monitorings verglichen werden. Dies kann mit dem Value of Information (VoI) beschrieben werden und wird im nächsten Abschnitt erläutert.

### 4.8.2 Nutzen des Monitoring (VoI)

Der Nutzen des Monitorings kann mit dem Value of Information (VoI) formuliert werden. Um den Nutzen

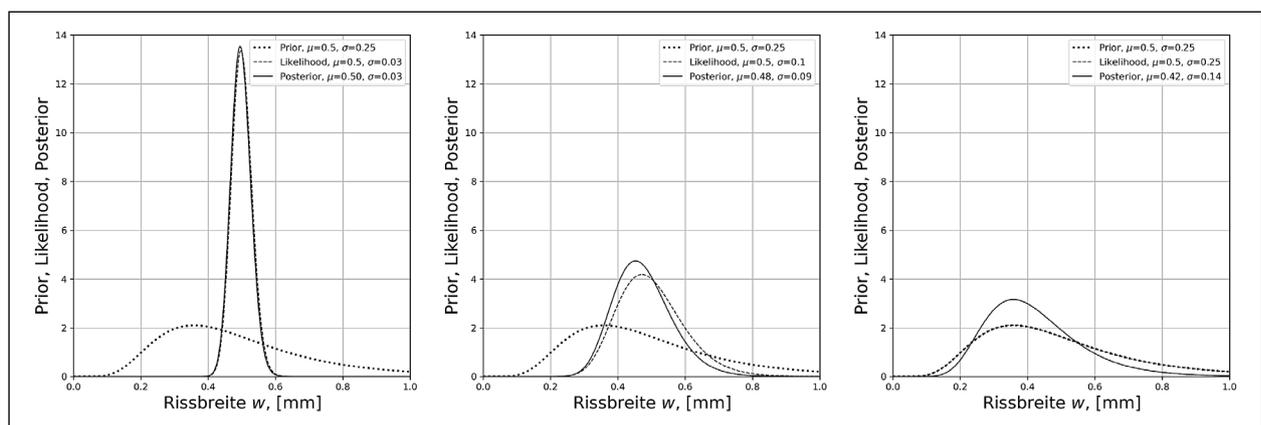


Bild 4-9: Beispielhafte Darstellung des Einflusses von Messunsicherheiten auf die a-posteriori Verteilung. (eigene Darstellung)

von Monitoring zu quantifizieren wurde in [5] ein Konzept auf Basis des *VoI* entwickelt. Es ist auch in [94] dargestellt.

In [5] wird der Value of Information von Monitoring definiert als die „Differenz zwischen dem Erwartungswert der Kosten für den Betrieb der Infrastruktur, wenn keine Monitoringüberwachung installiert ist, und dem Erwartungswert der Kosten für den Betrieb der Infrastruktur, wenn eine Monitoringmaßnahme durchgeführt wird. Der Value of Information kann als maximaler Preis verstanden werden, welchen der Infrastrukturbetreiber bereit ist für die Informationen aus dem Monitoring zu bezahlen“.

Der *VoI* kann also mit folgender Formel quantifiziert werden:

$$VoI = npv(a_0) - npv(a_1).$$

*VoI* ist also die Differenz der Gegenwartswerte (Net Present Value (vpn)) aus den Entscheidungen  $a_0$  und  $a_1$ . Hierbei ist  $a_0$  die Entscheidung kein Monitoring zu installieren und Unterhalts- und Instandhaltungsmaßnahmen werden nach heutiger Praxis durchgeführt (Fall 0: Brückenbetrieb ohne Monitoring).  $a_1$  ist die Entscheidung eine Monitoringmaßnahme einzuführen und die Unterhalts- und Instandsetzungsmaßnahmen werden als Funktion der messtechnisch überwachten Zustandsentwicklung ausgeführt (Fall 1: Brückenbetrieb mit Monitoring).

Sämtliche direkten und indirekten Kosten für den Betrieb der Infrastruktur müssen berücksichtigt werden, um den Nutzen von Monitoring zu bestimmen. Dies beinhaltet direkte Kosten für den Unterhalt und Instandsetzung als auch für Monitoring. Des Weiteren müssen externe Kosten für Verkehrsbeeinträchtigung und Konsequenzen für die Gesellschaft,

Wirtschaft und Umwelt berücksichtigt werden. [5] und [94] zeigen wie diese Kosten bestimmt werden können. Für die beiden Fälle werden die erwarteten Kosten ermittelt. Dies wird zuerst für Fall 0 durchgeführt und anschließend für Fall 1. Die Fälle sind in Bild 4-10 und Bild 4-11 dargestellt.

#### Fall 0: Brückenbetrieb OHNE Monitoring

Wenn kein Monitoring eingesetzt wird, berechnet sich der Erwartungswert aus der Summe der Kosten  $k_u$  für Unterhalt und Instandsetzung, die durch Unterhaltsmaßnahmen  $u$  ausgelöst werden. Diese hängen wiederum vom Zustand  $z$  ab.  $k_v$  sind die Kosten, die sich aus der Verkehrsbeeinträchtigung ergeben und eine Folge der Unterhaltsmaßnahmen sind. Die Kostenbeiträge werden als Funktion der Zeit  $t$  modelliert und werden mit dem Zins  $r$  diskontiert um den Gegenwartswert zu erhalten.

$$npv(a_0) = \sum_{\tau=0}^T \left( (k_{u,\tau} + k_{v,\tau}) \frac{1}{(1+r)^\tau} \right)$$

#### Fall 1: Brückenbetrieb MIT Monitoring

Die Berechnung des Erwartungswertes für den Betrieb mit Monitoring folgt demselben Prinzip wie ohne Monitoring. Allerdings liegen folgende Änderungen vor:

- Die Kosten für Installation und Betrieb des Monitoringsystems werden berücksichtigt.
- Die Kosten für ein mögliches Versagen werden berücksichtigt.
- Die Unsicherheiten in der Zustandsentwicklung werden modelliert und im Modell propagiert.
- Die Unterhalts- und Instandsetzungsstrategie wird als Funktion der Zustandsentwicklung dynamisch abgestimmt.

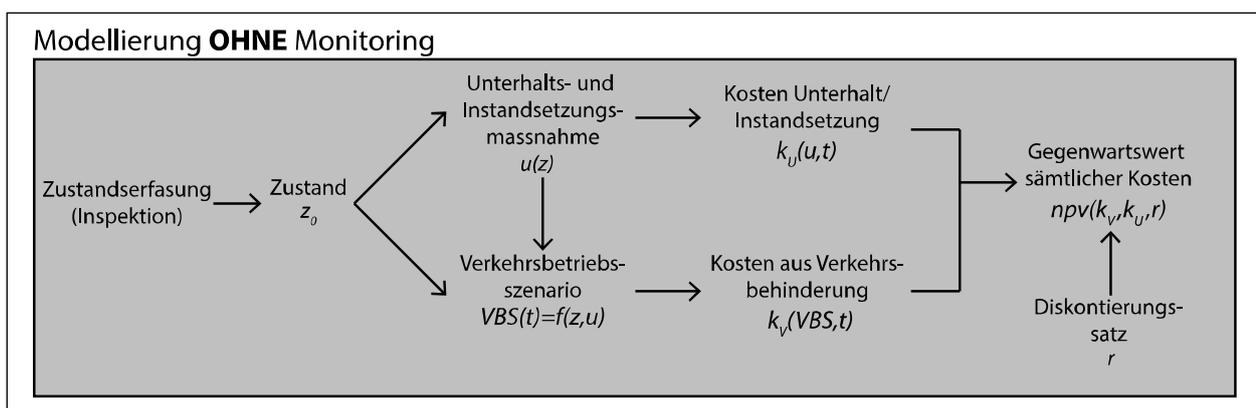


Bild 4-10: Schematische Darstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten, wenn kein Monitoringsystem installiert wird [5]

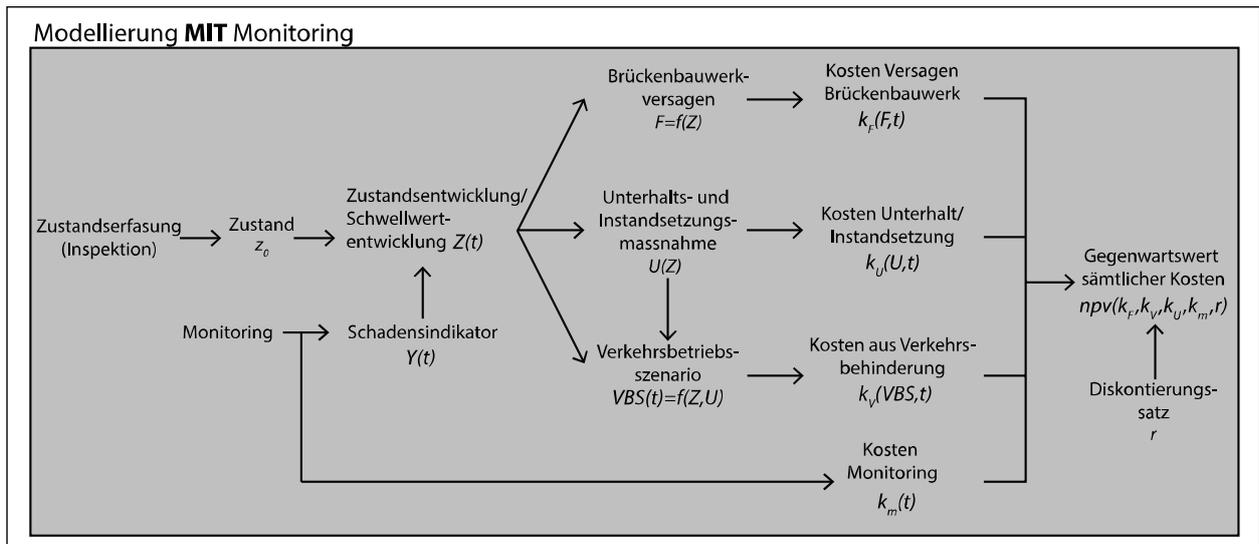


Bild 4-11: Schematische Darstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten, wenn ein Monitoringsystem installiert wird [5]

Der erwartete Gegenwartswert ergibt sich zu:

$$npv(a_1) = \sum_{\tau=0}^T \left( (k_{ut,\tau} + k_{vt,\tau} + k_{ft,\tau} + k_{mt,\tau}) \frac{1}{(1+r)^\tau} \right).$$

Hierbei sind  $k_F$  die Kosten, die sich durch ein Tragwerksversagen ergeben und alle direkten und indirekten Kosten berücksichtigt. Zusätzlich sind die Kosten für das Monitoring  $k_m$  zu berücksichtigen, die sich durch Installation und Betrieb des Monitorings ergeben.

Die Anwendbarkeit dieses Konzeptes wurde anhand zweier Autobahnbrücken gezeigt, siehe dazu [5] und [94].

Für die Unsicherheiten im Monitoring bedeutet dies, dass der Wert des Monitorings oder die erforderliche Genauigkeit sich nicht an einer einzelnen Kenngröße wie der Standardabhängigkeit festmachen lässt. So kann z. B. eine sehr genaue Monitoringmaßnahme dennoch ungünstig sein, wenn sie exaktes Wissen über einen Indikator liefert, der allerdings eine niedrige oder keine Prognosefähigkeit über den Bauwerkszustand hat.

## 5 Lebenszyklusmanagement

In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen dem Lebenszyklus einer einzelnen Brücke und dem Lebenszyklusmanagement Brückenbau innerhalb eines Brückenbestandes erläutert. Als Einführung ist der Lebenszyklus einer Brücke mit den Maßnahmen der baulichen Unterhaltung, Instandsetzung bis zum Rückbau und zur Erneue-

rung dargestellt. Die Zustände der Brücken ändern sich mit der Zeit und die Schädigungsmechanismen geben vor, welche Maßnahmen zu welchem Zeitpunkt durchzuführen sind. Die Prognose der Zustandsentwicklung ist die Grundlage für jede Erhaltungsplanung und damit verbunden ist der erforderliche finanzielle Haushalt zur Durchführung der Maßnahmen. Es sind unterschiedliche Strategien möglich, wobei darin eine Abwägung zwischen Kosten (inkl. Verkehrsbeeinträchtigungen) mit Risiken erfolgen muss. Dieses Kapitel gilt als Grundlage für Kapitel 7.

### 5.1 Einführung

Beim Lebenszyklusmanagement (LZM) müssen die betrieblichen Unterhaltsarbeiten, d. h. die leichten baulichen Instandhaltungsarbeiten, Bauwerksinstandsetzungen und der Ersatz von Brückenbauwerken, derart aufeinander abgestimmt werden, so dass das Gesamtsystem die niedrigsten möglichen Kosten unter Einhaltung der gestellten Anforderungen an die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit erfährt.

Eine Reduktion der Gesamtkosten wird oft in den Vordergrund gestellt, gleichzeitig ist eine Risikoreduktion für die Infrastrukturbenutzer und die Verfügbarkeit der Infrastruktur ebenfalls zu berücksichtigen. Diese Aspekte sind wesentliche Zielgrößen im LZM.

Bild 5-1 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen den streckenbezogenen PI und somit die Kosten und Risiken, welche mit der Strecke assozii-

iert sind. Das Gesamtsystem bestehend aus mehreren Brücken oder anderen Ingenieurbauwerken und verhält sich als Summe der Zustandsentwicklungen entsprechend den getroffenen Entscheidungen bei jedem einzelnen Bauwerk. Jedes Bauwerk ist dem Alterungsprozess ausgesetzt und durchläuft mit seiner Nutzung (mit blauen Pfeilen dargestellt) unterschiedliche Phasen. In diesen Phasen finden Schädigungen und Zustandsverschlechterungen statt (Pfeile mit farbigem Verlauf). Die Schädigung, welche auf Bauteilebene heruntergebrochen werden kann, hängt von der Exposition der einzelnen Bauteile oder Bauteilflächen und am stärksten von der konstruktiven Ausbildung und den Materialeigenschaften des Bauteils ab. Die Schädigungsgeschwindigkeit bestimmt die zeitliche Länge der

Restnutzungsdauer bis zur nächsten Intervention (Unterhaltung oder Instandsetzung), bis zum Rückbau und Ersatz des Bauwerkes.

Im LZM werden Infrastrukturen vom Entwurf bis zum Rückbau aktiv verwaltet. Damit ist explizit die jeweilige Entscheidung gemeint, welche Maßnahmen wann und an welchen Bauteilen jeder Brücke durchgeführt werden sollen. Die große Herausforderung dabei ist, rechtzeitig die relevante Schädigung zu erkennen und eine Prognose über die verbleibende Zeit bis eine weitere Zustandsgrenze erreicht wird und teurere Maßnahmen erforderlich würden, zu erstellen. Hierzu gehört, Informationen zu den Zielgrößen zu sammeln und diese Zielgrößen über die Lebensdauer hinweg zu optimieren.

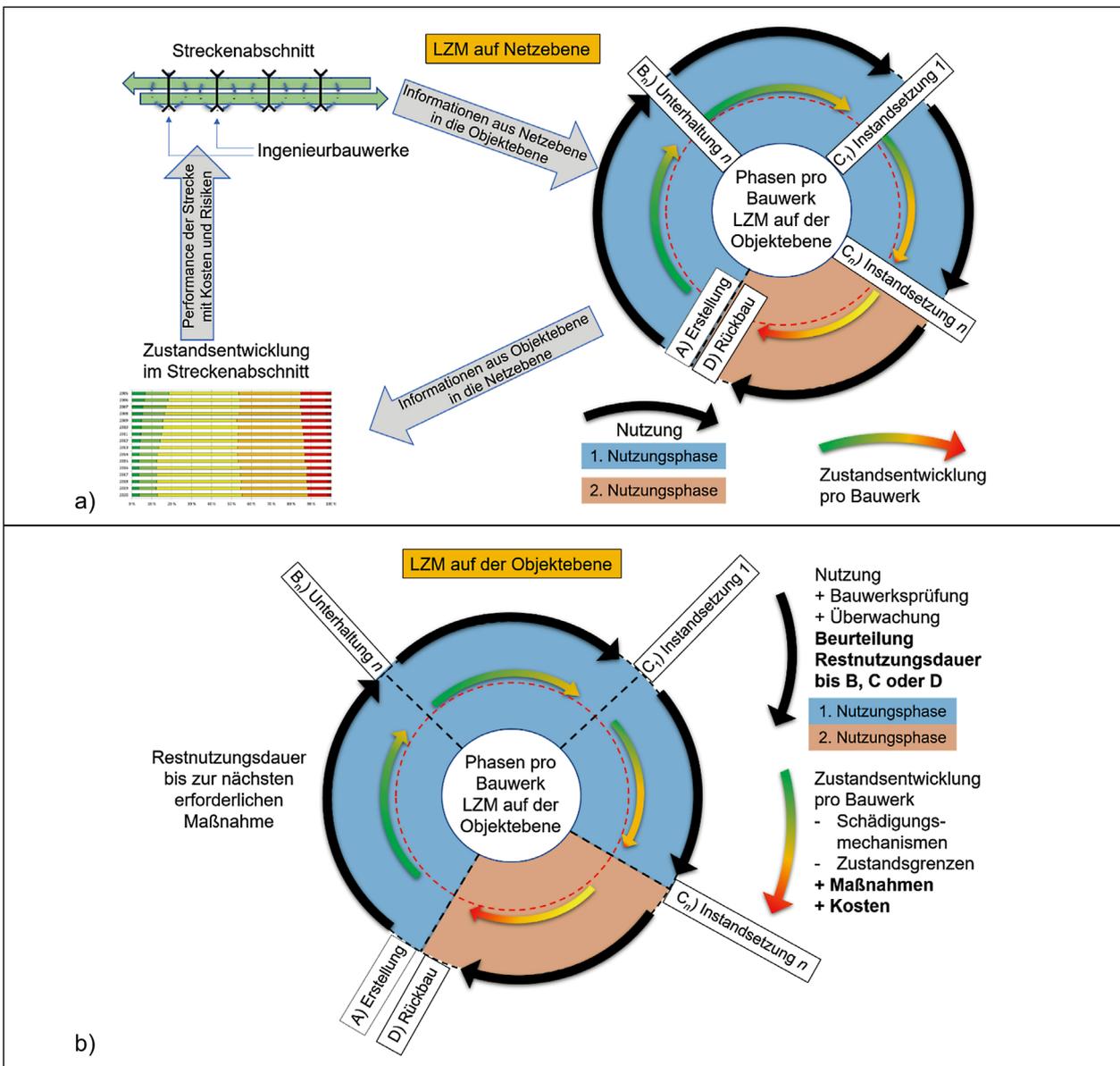


Bild 5-1: Schematische Darstellung des LZM Brückenbau im Zusammenhang mit Strecken-Performance und zu treffenden Entscheidungen [9] (eigene Darstellung)

Zielgrößen sind dabei u. a. Anforderungen an die Funktionalität der Infrastrukturen, die Sicherheit und Dauerhaftigkeit der Infrastrukturen sowie Kosten in Bezug auf mögliche Handlungsalternativen und Aspekte der Nachhaltigkeit [180]. Informationen über die Zielgrößen stehen schon in der Entwurfsphase als Vorhersagegrößen zur Verfügung. In der Ausführung und in der Nutzungsphase der Infrastrukturen werden mittels Indikatoren (PI und KPI) Informationen zu den Zielgrößen fortlaufend verfügbar und können in einem aktiven Lebenszyklusmanagement auch fortlaufend berücksichtigt werden.

Vor den 1960er Jahren lag der Fokus in der Erstellung der Straßeninfrastruktur, weshalb die Bauwerkserhaltung im Hintergrund stand und hauptsächlich reaktiv erfolgte [181], [182]. In der Nutzungsphase der Infrastrukturen haben Fragestellungen zu Inspektion und der Erhalt an Bedeutung gewonnen. Informationen zum Zustand der Infrastrukturen waren verstärkt zur Unterstützung der Erhaltungsentscheidung verfügbar. In den USA wurden in den 1970er Jahren die ersten Managementsysteme für Brücken eingeführt [182]. Anfang der 1990er Jahre wurden die Systeme BRIDGIT [183] und PONTIS [184], [185] eingeführt worden, die auf einer einfachen Markov-Kette für die Zustandsprognosen basierten. In der Folge wurden Infrastrukturmanagementsysteme international vermehrt eingeführt und die Forschung in diesem Bereich vorangetrieben. Es wurde offensichtlich, dass weitere Aspekte des LZMs zu berücksichtigen sind [186] und sie wurden in der Wissenschaft diskutiert [181], [186]. In der Folge wurden die Ansätze und Methoden des LZM fortlaufend verbessert [179].

In Deutschland wurden mit der Forschungs- und Entwicklungsstudie FE 69.0002/2017 Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden indikatorgestützten Lebenszyklusmanagementsystems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur [6] die Aspekte des LZM auf übergeordneter Ebene beschrieben. Die favorisierte Beschreibung für LZM ist eine „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit mit dem Ziel einer Lebenszyklusphasen-übergreifenden Nutzungs-, Ressourcen- und Informations-Optimierung“. Um dies zu erreichen, werden Ziele (z. B. Dauerhaftigkeit) definiert und zusammen mit Indikatoren (z. B. Karbonatisierungstiefe) und Kriterien (z. B. Grenzwert) überprüft. Das LZM wird als konti-

nuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) verstanden und eine Plan-Do-Check-Act-Wiederholung (PDCA) als Prozess (Kapitel 6.4.3) vorgestellt. Zusätzlich werden aus dem Unternehmensmanagement bekannte Werkzeuge empfohlen, wie die SWOT-Analyse, die das Erkennen von Stärken, Schwächen, Gefahren und Chancen unterstützt. Des Weiteren wird das Pareto-Prinzip propagiert, dessen Anwendung zu kosteneffizienten Maßnahmen und maximalem Nutzen bei niedrigsten Kosten führen kann. Darüber hinaus wird das Ishikawa-Diagramm vorgestellt, das kausale Zusammenhänge darstellt und die Kommunikation unterstützt. Die grafische Darstellung von Zusammenhängen ist äußerst wichtig und fördert nicht zuletzt eine Akzeptanz von Interessensvertretern. Allerdings werden oft Ereignisbäume oder Bayes'sche Netzwerke favorisiert, siehe auch Bericht des WP3 der COST ACTION TU1406 [4]. Zusätzlich zu den eingeführten Methoden kann auch das Eisenhower-Prinzip hinzugefügt werden, um wichtige und dringliche Aufgaben zu priorisieren.

In den letzten Jahren wurde die Definition des Infrastrukturmanagementprozesses zur Bestimmung optimaler Überwachungs- und Interventionsprogramme formuliert und zu dessen Standardisierung beigetragen. Durch Automatisierung von Teilen des Prozesses wird beispielsweise versucht, Algorithmen zur Vorbereitung von Netzinterventionsplänen zu entwickeln. Dabei fließen Abschätzungen der Risiken, der Intensität der Infrastrukturnutzung und des Infrastrukturnetzes ein [188].

Interventionsprogramme und Netzinterventionspläne müssen auf deren Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Die Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs- / Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ) [175] stellt in Deutschland wesentliche Grundlagen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Erhaltungsmaßnahmen zur Verfügung.

Im Zuge der Digitalisierung verändern sich die Möglichkeiten der datengestützten Erhaltungsplanung. Prüfergebnisse und Schäden können in Datenbanken verlinkt werden und liefern damit auch weitgreifende Möglichkeiten für die Zustandsbewertung der Bauwerke und letztendlich für das Lebenszyklusmanagement.

Die Konzeption und Implementierung einer Erhaltungsstrategie für alle Brücken im schweizerischen

Gebirgskanton Graubünden [189] zeigte, dass die Kostenoptimierung insbesondere durch Vorlaufzeit für die Projekte erreicht wird. Schäden und Situationen, welche die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes oder von einzelnen Bauteilen verringern, sind frühzeitig zu erkennen, sodass es für die Behebung keiner Sofortmaßnahmen bedarf und die Terminplanung der Arbeiten alle Ziele des Infrastrukturbetreibers abdecken kann. Sofortmaßnahmen kosten aufgrund der fehlenden Optimierungszeit immer ein Vielfaches von geordnet und rechtzeitig geplanten, gut projektierten und technisch korrekt ausgeschrieben Maßnahmen.

Deshalb ist die Vorlaufzeit in der Erkennung der Schäden von zentraler Bedeutung und senkt die Gesamtkosten. Die Entscheidungsfindung, ob Schäden lokal behoben werden sollen, das Bauwerk als Ganzes instandzusetzen ist oder ob das Bauwerk nach Ablauf der Restnutzungsdauer ersetzt werden soll, ist das wichtigste Instrument im Lebenszyklusmanagement. Eine Kostenreduktion wird zudem erreicht, wenn für die zu ersetzenden Bauwerke keine teuren nutzungsverlängernden Maßnahmen für die letzten Jahre notwendig werden. Finanzpolitische Randbedingungen sowie die Kapazitäten aller Baubeteiligten – Behörden, Planer und Bauunternehmungen – haben ebenfalls Einfluss auf die Entscheidungsfindung.

Monitoring ist bereits als geeignetes Mittel etabliert, um die Tragsicherheit beim Weiterbetreiben eines stark geschädigten Objektes zu gewährleisten. Das große Potenzial von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement von Brücken besteht in der Früherkennung von Veränderungen, welche die Entscheidungen unterstützen können, die ca. 10 Jahre vor dem Zeitpunkt der erforderlichen Maßnahme gefällt werden müssen.

Auf der Netzebene können probabilistische Instrumente verwendet werden, um aus den einzelnen Monitoringkampagnen die Zuverlässigkeit von Zustandsprognosen abzuschätzen. Abgesehen von der Analyse der Monitoringdaten muss die Zustandsbewertung mithilfe von Risikoanalysen und Zuverlässigkeitsmethoden vervollständigt werden, um präzise und kosteneffiziente Lösungen anzubieten [187]. Die Informationen (qualitativ und quantitativ), die im Rahmen des LZM zur Verfügung stehen und verwendet werden, sind mit Unsicherheiten behaftet und müssen richtig interpretiert werden. Ebenso unsicher sind Prognosen zukünftiger Entwicklungen. Der konsistente Umgang mit Unsi-

cherheiten und die praxisnahe Umsetzung in Methoden ist wesentlich, um Informationen richtig zu verarbeiten und die richtigen Schlüsse zu ziehen. Es müssen auch die geeigneten Werkzeuge verwendet werden, um Informationen zu verarbeiten und Entscheidungen zu treffen.

## 5.2 Zustandsentwicklung und Zustandserfassung

Unterschiedliche Bauwerkstypen und Bauteile haben unterschiedliche Schädigungsprozesse. Bei den Brücken in Deutschland handelt es sich hauptsächlich um Stahlbetonbrücken (52 % in Anzahl und 19 % der Brückenflächen) sowie die Spannbetonbrücken (39 % in Anzahl und 69 % der Brückenflächen), siehe Bild 5-2.

Die Zustandsentwicklung muss für unterschiedliche Schädigungsmechanismen gesondert betrachtet werden. Für Stahlbetonbrücken sind die vorkommenden Schädigungen relevant:

- Bewehrungskorrosion
  - durch Chlorideintrag (i. d. R. aus Undichtigkeiten in der Brückenentwässerung)
  - durch Karbonatisierung (Verlust der Passivität)
- Zwangsriss, z. B.
  - differenzielle Setzungen
  - Schwinden
- Statische Risse aus Überbelastung
  - Traglast
  - Ermüdung (eher selten bei Stahlbetonbrücken)

Für Stahlbrücken sind Korrosion aufgrund der beschädigter Korrosionsschutzsystems und die Ermüdung die relevanten Schädigungen. Die Ermüdung lässt sich grundsätzlich in der Planung beherrschen. Vorhandene Ermüdungsschäden können im Rahmen der Nachrechnung ermittelt und im Anschluss über Erhaltungsmaßnahmen zumindest teilweise behoben werden. Dies ist folglich eine Frage der Kosten und der personellen Ressourcen für Bearbeitung.

Für ein vorrauschauendes LZM muss für jedes Bauwerk der maßgebende Schädigungsmechanismus ermittelt werden. Aktuell findet dieses durch die Bauwerksprüfung statt über die Hauptprüfung alle 6

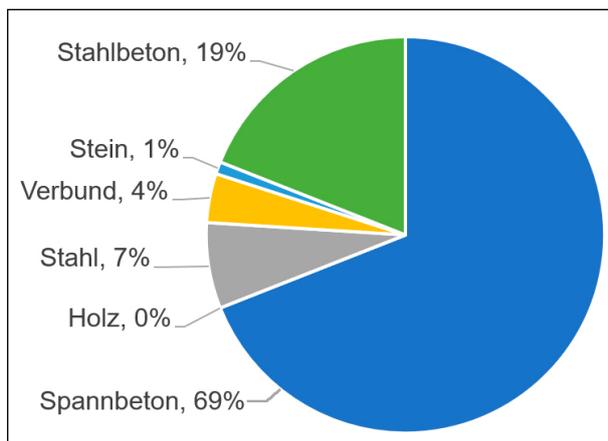


Bild 5-2: Verteilung der Bauweisen der Bestandsbrücken nach Fläche in 2015 gemäß Broschüre Erhaltungsplanung BAST [190] (eigene Darstellung)

Jahre statt. Da 6 Jahre oft für eine Instandsetzung, von der Projektinitiierung bis zur Umsetzung nicht genügen, ist mehr Vorlaufzeit für die Beurteilung erforderlich, ob eine Instandsetzungsmaßnahme erforderlich sein wird oder nicht. Deswegen wurde als Beispiel bei den 5-jährlichen Hauptinspektionen in Graubünden (Schweiz) eine Aussage vom Brückenprüfer verlangt, ob bauliche Maßnahmen in den nächsten 10 Jahren zu erwarten sind.

Jeder Schädigungsprozess kann in Phasen unterteilt werden, die unterschiedliche Instandsetzungsmaßnahmen erfordern, um den Schaden zu beheben und ab welchem Zustand keine Instandsetzung mehr möglich wird (z. B. Korrosion eines Spannglieds im Verbund). Für jede Phase des Schädigungsprozesses werden Instandsetzungskosten abgeleitet. Daraus muss eine Prognose erstellt werden, wann die jeweiligen Zustände erreicht werden. Rein monetär betrachtet, ist der Zeitpunkt vor einem Kostensprung (aufgrund eines Maßnahmenwechsel) der ideale Instandsetzungszeitpunkt. Diese Abschätzungen sind mit großen Prognoseunsicherheiten verbunden, weshalb diese Überlegungen zwar pro Bauwerk ermittelt werden sollen, die Information aber insbesondere für Entscheidungen auf Netzebene verwendet werden müssen. Dabei ist es wichtiger, den Zeitpunkt nicht zu verpassen als diesen Zeitpunkt genau zu treffen. So ist aus strategischer Sicht angebracht, 5 bis 10 Jahre davor die Instandsetzungen anzusetzen, um Flexibilität für die Optimierung des Maßnahmenzeitpunktes zu behalten.

Im weiteren Verlauf der Erhaltungsplanung müssen jene Bauwerke (in Projekte eingebunden) instandgesetzt werden, welche sich gegenüber den ande-

ren, ursprünglich gleich beurteilten Bauwerken, schlechter entwickelt haben.

### 5.3 Erhaltungsstrategien

Die Erhaltungsstrategien können während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks angewandt werden.

Während der Planungs- und Bauphase können bestimmte Details und Strategien dazu beitragen, ein robustes Bauwerk zu erhalten. In der Entwurfsphase spielen die Dauerhaftigkeit von Materialien und Systemen, die Robustheit, Resilienz und die Inspizierbarkeit eine entscheidende Rolle im zukünftigen LZM des Bauwerkes. Weiterhin sollten zukünftigen Anforderungen wie Tonnagen, Geometrien, Durchflussprofile und Einwirkungen durch Erdbeben mitbedacht werden. Bei der Konstruktion liegt der Fokus auf der Qualität, sowohl hinsichtlich Materialwahl als auch der Ausführung.

Nach der Fertigstellung des Bauwerks können drei Hauptstrategien für die Instandhaltung in Betracht gezogen werden:

1. Kontrollierte Zustandsverschlechterung bis zum Ende der Nutzungsdauer und Ersatzneubau
2. Zustandsbasierte Instandsetzung ab einer gegebenen Zustandsklasse, z. B. 10 Jahre nach der Zustandsnote 3,5
3. Präventive Instandsetzungen von Bauteilen mit geplanter kürzerer Nutzungsdauer

Die kontrollierte Zustandsverschlechterung kann für Infrastrukturen mit geringem Risiko angewandt werden, bei denen sich ein Ausfall nicht nachteilig auf das übrige Netz auswirkt. Zum Beispiel untergeordnete Über- und Unterführungen, die nur Anrainer betreffen.

Die zustandsbasierte Instandsetzung kann in kleinen Straßenkorridoren angewandt werden, um auf der Grundlage des Gesamtzustands aller Bauwerke in dem Gebiet zu ermitteln, wann der beste Zeitpunkt für Maßnahmen ist.

Die präventive Instandsetzung basiert auf der Identifikation der Bauwerke mit den schlechtesten Zuständen und der Instandsetzung dieser Bauwerke zur Verlängerung deren Lebensdauer. Einige Beispiele für Maßnahmen sind:

- Planmäßige Erhaltungsmaßnahmen
  - Abdichtungen nach 30 - 40 Jahren (i. d. R. beim zweiten Ersatz der Deckschicht mit Nutzungsdauer von je 15 - 20 Jahren)
  - Kappen und Fahrzeugrückhaltesysteme nach ca. 40 Jahren (jedoch i. d. R. zusammen mit der Abdichtung)
  - Fahrbahnübergänge nach 40 Jahren
  - Ersatz der Korrosionsschutzsysteme vor Eintreten der Querschnittsverluste der Tragelemente
- Kampagnen oder nutzungsdauerverlängernde Maßnahmen (korrektiv wirkend), z. B.:
  - Oberflächenschutzsysteme, insbesondere Hydrophobierung für Bauteile mit starker Exposition

Diese Strategien sind nicht unabhängig und können bei der Untersuchung einer großen Gruppe von Bauwerken kombiniert werden. Um die Auswirkungen der einzelnen Strategien zu bewerten, und um schließlich die beste Strategie pro Objekt auszuwählen, sollten die jeweiligen Randbedingungen für

den Einzelfall analysiert werden. Diese Entscheidung sollte für jedes Netzelement und zu jedem Zeitpunkt einzeln getroffen werden.

#### 5.4 Randbedingungen und Optimierung der Erhaltung

Im Idealfall sollte jedes Bauwerk in regelmäßigen Abständen so instandgesetzt werden, dass die Kosten aller Maßnahmen die Kosten für einen Ersatz nicht übersteigen. Die Festlegung dieser Kosten-grenze ist nicht definitiv, da oft andere Faktoren eine Rolle spielen. Zu nennen sind der Zustand der übrigen Elemente des Netzkorridors, die Notwendigkeit einer Erweiterung des Netzes (in Bezug auf die Anzahl der Fahrspuren, das Verkehrsaufkommen, Geschwindigkeits- oder Tonnagebeschränkungen, etc.), die Notwendigkeit der Erhaltung der historischen Elemente.

Ein Beispiel für eine Erweiterung der Anzahl Fahrspuren ist in Bild 5-3 dargestellt. Das Ziel des Monitorings besteht darin, den Zeitpunkt für einen Ersatzneubau so weit verschieben zu können, sodass er mit dem übergeordneten Zeitplan übereinstimmt.

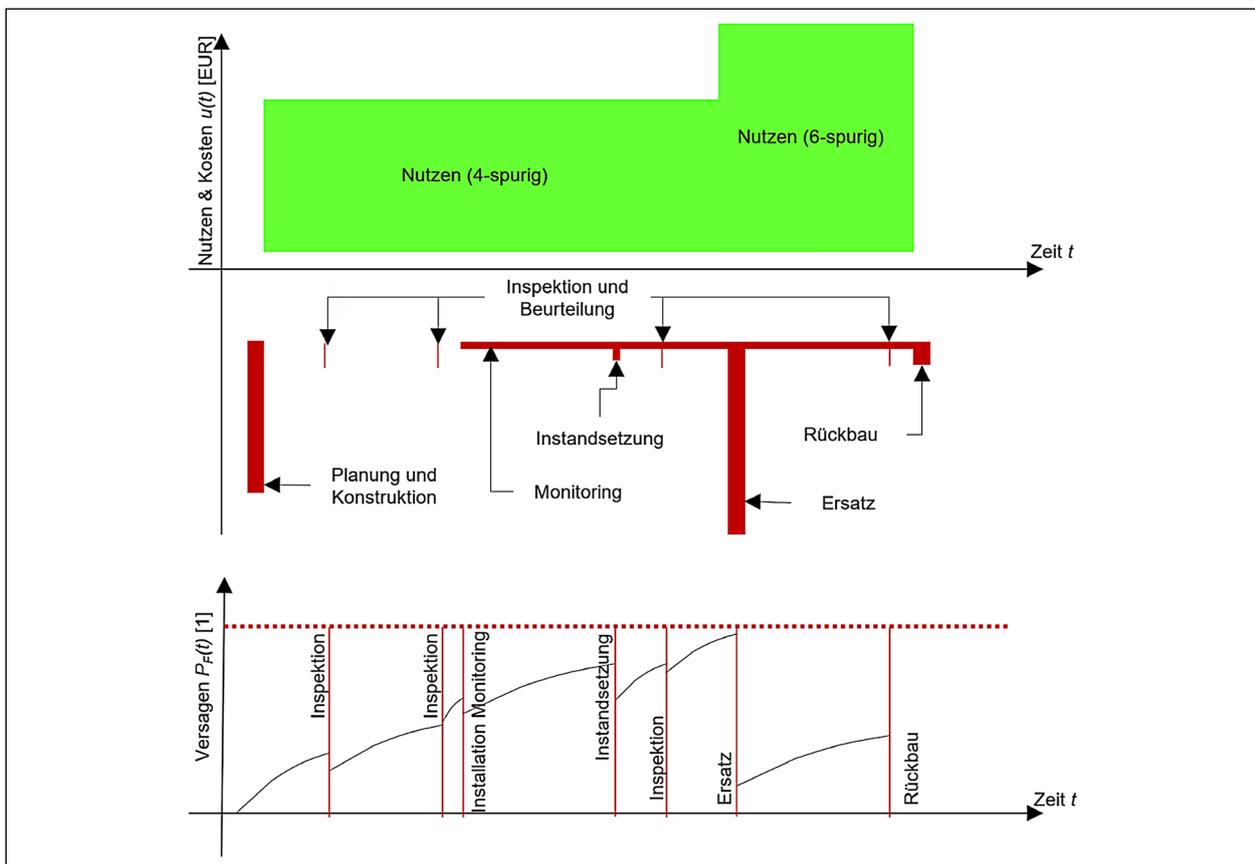


Bild 5-3. Beispiel für eine Erhaltungsstrategie, wenn eine Straßenverbreiterung zu einem bestimmten Zeitpunkt erforderlich ist

Bei einem Bauwerk mit 4 Fahrspuren in einem Korridor ist in Zukunft ein Ausbau auf 6 Fahrspuren vorgesehen. Das Bauwerk wird regelmäßig überwacht und inspiziert, und daraus der Zustand mit einer entsprechenden Ausfallwahrscheinlichkeit ( $P_f$ ) beurteilt. Dank der Schadensvorhersagen lässt sich erkennen, dass das Bauwerk eine Instandsetzung benötigt, um sicher den Zeitpunkt zu erreichen, zu welchem es ersetzt oder verbreitert werden soll.

Während visuelle Inspektionen einen allgemeinen Überblick über den Zustand des Bauwerks geben, ermöglicht die Überwachung eine Konzentration auf einen reduzierten Instandsetzungsumfang mit geringen Kosten.

Bei mehreren Bauwerken ist es erforderlich, die Eingriffe zeitlich so zu planen, dass die Kosten den vorhandenen finanziellen Mitteln entsprechen und dass die Verkehrsbeeinträchtigung durch die Bau-tätigkeit pro Strecke koordiniert werden können. Wichtig ist auch, dass möglichst alle Maßnahmen in einem gesperrten Bereich umgesetzt werden können, damit das Zeitintervall bis zur nächsten Verkehrsbeeinträchtigung maximiert werden kann.

## 6 Zielkonzeption und Entscheidungstheorie im Lebenszyklusmanagement

Das vorangegangene Kapitel betrachtet die praktische Umsetzung des LZMs aus der Sicht des praktisch operierenden Verwalters eines Bauwerksbestandes. Das LZM ist ein Prozess, bei dem regelmäßig Entscheidungen gefällt werden, mit dem Ziel die Leistungsfähigkeit des Infrastrukturnetzes bei gegebenen oder zu ermittelnden Ressourcen zu maximieren. Dabei sind viele wichtige Einflussgrößen nicht bekannt, unterliegen Unsicherheiten oder auch einer natürlichen Variation (z. B. Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt). Daher ist das LZM ein angewandtes Themenfeld der Entscheidungstheorie im Bauwesen. Dieses Kapitel fasst die theoretische Basis zusammen, auf der diese praktische Umsetzung beruht. In diesem Kapitel wird zuerst die Zielkonzeption für das LZM (Kapitel 5.1) basierend auf der Forschungs- und Entwicklungsstudie FE 69.0002/2017 [191] und SCHIERENBECK [192] definiert. Anschließend wird eine Zusammenfassung über die Entscheidungstheorie im Bauwesen (Kapitel 6.2) in Anlehnung an [193] gegeben. Ferner wird in Kapitel 6.3 die Nutzenfunktion für eine risiko-

basierte Entscheidungsfindung im LZM formuliert und Kapitel 6.4 beschreibt Prinzipien im LZM, den LZM als Prozess im Risiko-Management und Managementwerkzeuge, die in diesen Prozess unterstützen.

Die Grundlagen werden mit konkretem Bezug auf die Bauindustrie beschrieben. Sie gelten allerdings unabhängig von diesem Bezug auch für andere Bereiche. Daher gelten diese Grundlagen auch übergreifend für die drei Verkehrssysteme: Straße, Schiene und Wasserstraße.

### 6.1 Zielkonzeption des Lebenszyklus-Managements

Das LZM von Bauwerksbeständen ist eine unternehmerische Aufgabe, die von privaten oder öffentlichen Organisationen, Unternehmen, Institutionen oder Behörden wahrgenommen wird. Um die Ziele dieser Organisationen fokussiert zu erreichen, müssen zuerst das übergeordnete Ziel definiert werden damit zielgerichtet KPIs und Aufgaben abgeleitet werden können.

In Deutschland wurde mit der Forschungs- und Entwicklungsstudie FE 69.0002/2017 [191] (Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden indikator-gestützten Lebenszyklusmanagementsystems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur) die Aspekte des LZM auf übergeordneter Ebene beschrieben. Hier wird LZM folgendermaßen definiert:

#### Definition 1, Lebenszyklusmanagement:

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit mit dem Ziel einer Lebenszyklusphasen-übergreifenden Nutzungs-, Ressourcen- und Informations-Optimierung“.

SCHIERENBECK [192] beschreibt generell Ziele für Unternehmen und Organisationen. Diese Ziele sind auch relevant, um einen Infrastrukturbestand über den Lebenszyklus hinweg optimal zu verwalten. Diese Ziele bestehen im Wesentlichen aus drei Dimensionen:

- ökonomische Dimension,
- soziale Dimension und
- ökologische Dimension.

Die Ökonomische Dimension kann dann weiter unterteilt werden in

- Leistungsziele (z. B. Unterhalt-, Wartung- und Instandsetzungsarbeiten),
- Finanzziele (z. B. Investitions- und Finanzierungsziele) und
- Erfolgsziele (z. B. ermöglichtes Verkehrsaufkommen durch Vorhalten von Infrastruktur) oder Umsatz und Gewinn (z. B. durch Mauteinnahmen).

Die Beispiele in Klammern stellen die Verbindung zum LZM von Bauwerken her. Im COST-TU1406 Projekt wird das Ziel für LZM für Brücken in folgenderweise definiert:

**Definition 2, Ziel des Lebenszyklusmanagements:**

„Jede Brücke sollte sicher und tragfähig für den Benutzer verfügbar, günstig hinsichtlich Gesamtkosten über die Lebensdauer und umweltfreundlich sein“, [4, S. 130].

Diese Definition basiert auf einer Umfrage bei Experten und Betreibern aus allen beteiligten COST-Ländern und fußt somit auf einer breiten Basis.

Es ist gut erkennbar, dass diese Definition nach COST-TU1406 gut in die Klassifizierung nach Schierenbeck eingeordnet werden kann: z. B. sicher und tragfähig (soziale Dimension), umweltfreundlich (ökologische Dimension) günstig hinsichtlich der Gesamtkosten (ökonomischen Dimension). Diese Definition geht über Definition 1 aus [191] hinaus die lediglich von Nutzen-, Ressourcen und Informationsoptimierung spricht. Bei dieser Definition 1 kann die Umweltfreundlichkeit über die Ressourcen als inbegriffen interpretiert werden. Sie wird allerdings nicht explizit erwähnt. Auch die soziale Dimension wird nicht explizit erwähnt.

Das Ziel des LZMs ist also das ökologisch, soziale und ökonomisch nachhaltige Verwalten von Bauwerksbeständen, das einen sicheren Verkehrsfluss ermöglicht und auch für die Zukunft gewährleistet.

Die Gesamtheit aller Ziele wird auch als Zielkonzeption bezeichnet [192, S. 62]. Wobei auch Konflikte zwischen den Zielen nicht auszuschließen sind; z. B. kostengünstig vs. dauerhaft.

Sind die Ziele definiert, dann können Zielplanungsprozesse z. B. mittels S.M.A.R.T.en Zielen (siehe

Kapitel 6.4.3) formuliert werden. Dabei helfen KPIs, um Ziele spezifisch zu formulieren. Für das LZM sind die KPI in Kapitel 4 definiert. Im selben Kapitel wird auch beschrieben, wie man mit Monitoring Informationen zu PI erhält, die es erlauben KPIs besser zu beschreiben und schließlich die Zielerreichung unterstützen.

Wichtig ist, dass KPIs einfach und verständlich sind [194], damit sie von allen verstanden werden und daher auch als Zielvorgabe akzeptiert werden. Mit KPIs kann dann gemessen werden, wie gut ein Prozess funktioniert, und ob man auf Kurs ist oder Justierungen notwendig sind. KPIs dienen auch dem Priorisieren von Aufgaben.

Die KPIs, die für die Verwaltung von Bauwerksbeständen relevant sind, werden in Kapitel 4 detailliert beschrieben und deren Nutzen bzw. Kosten werden quantifiziert. In FE 69.0002/2017 [191] als auch in Tabelle 6-1 sind die Ziele des Bundesverkehrswegeplans 2030 (BVWP 2030) wiedergegeben. Darüber hinaus werden in Tabelle 6-1 diese Ziele des BVWP 2030 den KPI aus Kapitel 4 zugeordnet.

Der wichtige Schlüsselindikator Politik ist nicht aufgeführt. Allerdings stellt die Politik in der deutschen demokratischen Ordnung sicher, dass den Präferenzen der Gesellschaft in den staatlichen Organisationen Rechnung getragen wird und als Ziele so z. B. im Bundesverkehrswegeplan formuliert werden. Tabelle 6-1 zeigt, dass die KPIs des LZM mit den Zielen des BVWP 2030 zugeordnet werden können und somit kongruent sind. Somit wird einem wichtigen politischen Aspekt Rechnung getragen. Darüber hinaus sind die Organisationen, die im Namen der Gesellschaft Bauwerke verwalten, rechen-schaftspflichtig gegenüber der Gesellschaft und der

Ziel BVWP 2030	KPI
Mobilität im Personenverkehr ermöglichen	Verfügbarkeit
Sicherstellen der Güterversorgung, Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen	Verfügbarkeit (inkl. Leistungsfähigkeit des Verkehrsnetzes)
Erhöhung der Verkehrssicherheit	Sicherheit, Zuverlässigkeit, Zugangsschutz
Reduktion der Emissionen von Schadstoffen und Klimagasen	Umwelt
Begrenzung der Inanspruchnahme von Natur und Landschaft	Umwelt
Verbesserung der Lebensqualität einschließlich der Lärmsituation	Arbeitsschutz/Gesundheit

Tab. 6-1: Schnittstelle Ziele des Bundesverkehrswegeplans 2030 und der KPIs

Politik (Kapitel 6.4.1). In diese Rechenschaftspflicht fällt auch, die Gesellschaft und Politik über benötigte Ressourcen zu informieren und somit diese Information in den politischen Prozess einzubringen.

Darüber hinaus geht aus Tabelle 6-1 (Ziele des BVWP 2030) hervor, dass Verfügbarkeit inkl. Leistungsfähigkeit des Netzes als auch Sicherheit, Zuverlässigkeit, Zugangsschutz, Umwelt, Arbeitsschutz und Gesundheit von zentraler Bedeutung sind. Die KPI Wartungsfreundlichkeit, Dauerhaftigkeit, Inspektionen und Zustandsbeurteilungen werden nicht explizit zugeordnet, sind allerdings dadurch abgedeckt, dass es beim LZM gilt Kosten zu optimieren. Da es bei der Verfügbarkeit auch um die Leistungsfähigkeit des Verkehrsnetzwerkes geht, um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu erhöhen, ist die Quantifizierung der Konsequenzen für Nutzer auch zentral und soll in der Nutzenfunktion berücksichtigt werden. KPIs dienen der Entscheidungsfindung unterliegen allerdings Unschärfen. Daher bildet die Entscheidungstheorie im Bauwesen eine rationale Basis für die Entscheidungsfindung, siehe KÜBLER [193].

## 6.2 Entscheidungstheorie im Bauwesen

### 6.2.1 Entscheidungen unter Unsicherheiten

Die Entscheidungstheorie bildet ein Rahmenwerk für technische Entscheidungsfindung als auch für Risikobewertung und -management siehe Kübler [193] oder JCSS Probabilistic Model Code [195]. Für das Bauwesen stellt die Entscheidungstheorie eine rationale Grundlage für Entscheidungen und Lösung bezüglich praktischer ingenieurtechnischer Probleme, wie z. B. die optimale Bemessung von Bauwerken, die Beurteilung bestehender Bauwerke, die Optimierung von Inspektions- und Wartungsplänen oder die Kalibrierung von Normen und anderen Bemessungsgrundlagen dar.

Das Betreiben, Verwalten und Unterhalten technischer Infrastrukturbauten, z. B. die Planung und der Betrieb eines Kraftwerks, beinhalten Konsequenzen für den Eigentümer, den Betreiber und nicht zuletzt auch die Gesellschaft. Diese Konsequenzen können positiv sein, z. B. die Einnahmen für den Eigentümer, Steuern für die Gesellschaft, Nutzen der Energie für Wirtschaft und Haushalte. Allerdings können auch negative Konsequenzen damit verbunden sein, z. B. die Baukosten des Kraftwerks

oder Konsequenzen aus Unfällen. Die Entscheidungstheorie gewichtet die Konsequenzen entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers in einer konsistenten und transparenten Weise, und bietet somit eine rationale Entscheidungshilfe.

In Anlehnung an LUCE und RAIFFA [196] kann die Entscheidungstheorie auch unterteilt werden in Entscheidungsfindung unter: Gewissheit, Risiko oder Ungewissheit. Entscheidungsfindung unter Gewissheit untersucht Handlungen zu einem bestimmten bekannten Ergebnis führen und ist der triviale Fall der Entscheidung unter Risiko. Spricht man von Entscheidung unter Risiko, dann können Handlung mehrere Ereignisse nach sich führen, wobei die Wahrscheinlichkeiten quantifiziert werden können. Entscheidung unter Unsicherheit bezieht sich hingegen auf Situation, in der Handlungen zu Konsequenzen mit unbekanntem Wahrscheinlichkeiten führen können. Die Entscheidung unter Risiko stellt für das Lebenszyklusmanagement die wichtigste Grundlage, denn: Entscheidungen sollten rational und transparent sein. Und mehrheitlich betreffen die Fragestellungen Naturphänomene (z. B. Einwirkungen oder Kapazitäten) betreffen. Und wenn die Gesellschaft durch die Politik dem LZM einheitliche Präferenzen vorgibt, sind keine Entscheidungen für unterschiedliche Teile der Gesellschaft notwendig.

Die Entscheidungsfindung unter Risiko wird kurz eingeführt. Für ein einfaches Beispiel fasst Bild 6-1 die relevanten Parameter zusammen, die für die risikobasierte Entscheidungsfindung benötigt werden. Diese sind die Auftretenswahrscheinlichkeit verschiedener Zustände  $\theta_j$ , die in Form von Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt wird  $P(\theta_j|a_i)$ . Wenn diese Wahrscheinlichkeiten gegeben sind, dann kann der erwartete Nutzen  $E_{\theta}[u|a_i]$ , der mit einer Aktion  $a_i$  verbunden werden. Für das hier betrachtete einfache Beispiel ist diese tabellarische Form der Darstellung sehr nützlich; für praktische Zwecke sind jedoch Entscheidungsbäume und Bayes'sche Netze, weitaus übersichtlicher, siehe Bild 6-2.

Die heutige Entscheidungstheorie basiert auf Daniel Bernoullis Prinzip aus dem Jahr 1738: „Wenn man den Nutzen jeder möglichen Gewinnerwartung mit der Anzahl der Möglichkeiten, auf die sie eintreten kann, multipliziert und dann die Summe dieser Produkte durch die Gesamtzahl der möglichen Fälle teilt, erhält man einen mittleren Nutzen, und der Gewinn, der diesem Nutzen entspricht, ist gleich dem Wert des betreffenden Risikos“, (aus der engli-

schen Übersetzung von Bernoullis Text, D. BERNOULLI [197]). Mathematisch wird der erwartete Nutzen einer Alternative folgendermaßen (s. auch Bild 6.1 und 6.2) definiert:

$$E_{\theta}[u|a_i] = \sum_{j=1}^n P(\theta_j|a_i)u(a_i, \theta_j)$$

Der maximale Nutzen  $u^*$  erhält man dann durch die Alternative  $a_i$   $i \in \mathbb{N}$ , die den Nutzen maximiert.

$$u^* = \max ( E_{\theta}[u|a_i] )$$

Den Nutzen mit Bernoullis Prinzip zu optimieren deckt sich mit Definition 1 (siehe Kapitel 6.1) aus [191]. Dort wird von Nutzen-, Ressourcen- und Informationsoptimierung gesprochen. Können Ressourcen z. B. Baustoffe, Arbeitszeit, Verwaltungsaufwand, Unterhalt monetär quantifiziert werden, dann können sie auch in der Nutzenoptimierung Eingang finden. Andere Ressourcen z. B. Landnutzung können eine Randbedingung darstellen.

### 6.2.2 Bayes'sche Entscheidungstheorie

Die Bayes'sche Entscheidungstheorie ist die einfache Kombination von zwei Konzepten, der Entscheidungstheorie und dem Theorem von Thomas Bayes. Bayes Theorem erlaubt nicht nur die Einbeziehung neuer Informationen in den Entscheidungsprozess, wenn diese verfügbar sind. Sondern es erlaubt auch den Wert zusätzlicher Information zu bewerten, bevor diese verfügbar sind. Dies ermöglicht es die Wirtschaftlichkeit von Experimenten

		$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
$a_1$	$E_{\theta}[u a_1]$	$u(a_1, \theta_1)$	$u(a_1, \theta_2)$	$u(a_1, \theta_3)$	$u(a_1, \theta_4)$
		$P(\theta_1 a_1)$	$P(\theta_2 a_1)$	$P(\theta_3 a_1)$	$P(\theta_4 a_1)$
$a_2$	$E_{\theta}[u a_2]$	$u(a_2, \theta_1)$	$u(a_2, \theta_2)$	$u(a_2, \theta_3)$	$u(a_2, \theta_4)$
		$P(\theta_1 a_2)$	$P(\theta_2 a_2)$	$P(\theta_3 a_2)$	$P(\theta_4 a_2)$
$a_3$	$E_{\theta}[u a_3]$	$u(a_3, \theta_1)$	$u(a_3, \theta_2)$	$u(a_3, \theta_3)$	$u(a_3, \theta_4)$
		$P(\theta_1 a_3)$	$P(\theta_2 a_3)$	$P(\theta_3 a_3)$	$P(\theta_4 a_3)$

Bild 6-1: Nutzen und Eintretenswahrscheinlichkeit für 3 mögliche Entscheidungs-Alternativen  $a_i$  und vier möglichen Zuständen  $\theta_j$  [193]

oder Inspektionen zu bewerten, bevor sie tatsächlich durchgeführt werden. Somit kann dann z. B. die effizienteste Inspektionsmethode ausgewählt werden, mit der die zukünftigen Informationen gewonnen werden sollen. Und schließlich kann die neu gewonnene Information konsistent in den Entscheidungsrahmen integriert werden, siehe auch KÜBLER [193], RAIFFA und SCHLAIFER [198], BENJAMIN und CORNELL [199], FABER [200] und FE 89.0331/2017 [176].

Die Bayes'sche Entscheidungstheorie kann in drei unterschiedlichen Situationen verwendet werden. Diese unterscheiden sich vom Zustand der Informationen. Die einfachste ist die a-priori Analyse, wenn Wahrscheinlichkeiten quantifiziert und vorhanden sind. Wenn neue Informationen verfügbar sind, können diese in einer a-posteriori Entscheidungsanalyse berücksichtigt werden. Schließlich werden bei der pre-posteriori Entscheidungsanalyse Experimente (im Bauwesen z. B. Inspektionen von Bauwerken) analysiert, die zu unterschiedlichen Ereignissen (unterschiedliche Inspektionsergebnisse) bei unterschiedlichen Experimenten (unterschiedliche Inspektionsmethode) führen können. Schließlich kann so die effizienteste Inspektionsmethode identifiziert werden, siehe auch [176].

## 6.3 Formulierung der Nutzenfunktion

### 6.3.1 KPI und Nutzenfunktion

Ist die Zielkonzeption erstellt und somit die KPIs bekannt, dann kann die Zielkonzeption mittels der KPIs in eine Metrik formuliert werden, die es zu optimieren gilt. Diese Metrik wird Nutzenfunktion genannt. Die Nutzenfunktion, die es zu maximieren gilt, muss alle relevanten KPIs berücksichtigen. Dies ist für KPIs, die direkt über monetäre Kosten und Einnahmen quantifizierbar sind, leicht möglich. KPIs wie die Wartungsfreundlichkeit können über die benötigten Ressourcen (Zeit, Geld und Ausrüs-

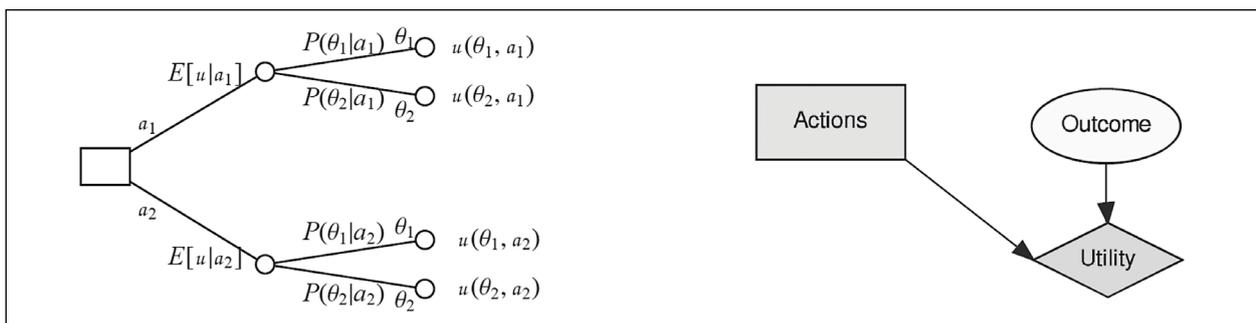


Bild 6-2: Darstellung von Entscheidungsproblemen. Links: der Entscheidungsbaum. Rechts: Bayes'sches Netz [193]

tung) mit monetären Kosten verknüpft werden. Darüber hinaus können auch die Inspektions- und Reparaturmaßnahmen monetär ausgedrückt werden, siehe Kapitel 4. Auch kann die verlorene Verfügbarkeit des Bauwerks monetär bewertet werden und in die Nutzenfunktion eingearbeitet werden.

Zusätzlich werden immaterielle Konsequenzen mit externen Kosten quantifiziert. Es ist wichtig, dass alle gesellschaftlichen Kosten berücksichtigt werden und in die Nutzenfunktion eingehen. Todesfälle auf Grund von Bauwerksversagen können beispielsweise über Lebensrettungskosten in die Nutzenfunktion Eingang finden. Lebensrettungskosten stellen einen Grenzwert dar, der es ermöglicht andere Möglichkeiten (z. B. effizientere Maßnahmen für andere Bauwerke oder effizientere Investitionen in andere Sektoren z. B. Gesundheitswesen) zu identifizieren, um noch effizienter Leben retten können. Andere gesellschaftliche immaterielle Kosten (z. B. Reisezeit) können auch quantifiziert werden und als Konsequenzen für Nutzer in der Nutzenfunktion Rechnung eingehen, siehe [176].

Im LZM sollen die gesamten Kosten der Lebenszeit des Bauwerks berücksichtigt werden. Nicht alle KPIs finden als monetäre Größe Eingang in die Nutzenfunktion, denn z. B. die Gesundheit der Menschen (z. B. Arbeitsschutz) ist eine Randbedingung, die eingehalten werden muss und nicht optimiert wird. Momentan stellt auch die Umwelt und Nachhaltigkeit eine Randbedingung dar. Zusätzlich können sie in Zukunft über das CO<sub>2</sub>-Budget (Carbon Credit), siehe [191], als Randbedingung oder als Kosten Eingang finden um der CO<sub>2</sub>-intensiven Bauweise Rechnung zu tragen. Dies könnte z. B. durch zugeteilte Karbonemissionen für das Netz und somit als Randbedingung eingehen oder über zusätzliche Kosten oder Steuern die direkt (Kosten pro Emission) oder indirekt (z. B. über den Zementpreis) monetär quantifiziert werden. Die konkrete Form dieser Umsetzung wird sich zeigen.

Ist die Nutzenfunktion definiert, so ergibt sich das Optimierungsproblem zu einem mathematischen Problem, in dem die monetären KPIs  $k_{m,n}$  in die Nutzenfunktion  $u()$  Eingang finden. Die KPIs, die Randbedingungen darstellen gehen hingegen als  $k_{rb,l}$  ein und  $k_{rb,l}^*$  sind die Grenzwerte (Performance Threshold), die sicherstellen, dass diese KPIs eingehalten werden. Das Optimierungsproblem ergibt sich somit zu:

$$u^* = \max \left( \sum_n E_\theta [u(a_i, \theta_j, k_{m,n})] \right)$$

mit den KPI-Randbedingungen

$$\bar{k}_{rb,l} \leq \overline{k_{rb,l}^*}$$

und zeitlichen Randbedingungen, die sicherstellen, dass die Grenzwerte der Restnutzungsdauern  $\bar{t}_{i,j}$  eingehalten sind:

$$\bar{t}_{i,j} \leq \overline{t_{i,j}^*}$$

Diese Gleichungen stellen die allgemeine mathematische Formulierung des Problems dar. Hierin ist  $u(a_i, \theta_j, k_{m,k})$  der Nutzen (Kosten) bezüglich des KPI  $k_{m,k}$ .  $\theta_j$  sind Parameter, die die Unsicherheiten berücksichtigen und  $a_i$  sind die Maßnahmen (Actions), die zur aus dem Maßnahmenraum  $A$  zur Verfügung stehen.  $E_\theta[\ ]$  ist schließlich der mathematische Operator für den Erwartungswert. Die Nutzenbeiträge für konkrete KPIs sind in Kapitel 4.4 schon formuliert und können in die vorgängige Formel eingefügt werden.

Diese Nutzenfunktion kann über einen hierarchischen Ansatz gelöst werden, siehe Bild 6-3. Zuerst werden für spezifische Bauwerke optimale und sinnvolle Maßnahmen ermittelt. Schließlich kann die Nutzenfunktion für das Netz optimiert und die Lebenszykluskosten ermittelt werden. Dabei kann eine Maßnahme, die auf Bauwerksebene als sinnvoll, aber suboptimal identifiziert wurde, auf Netzebene die bevorzugte Lösung sein.

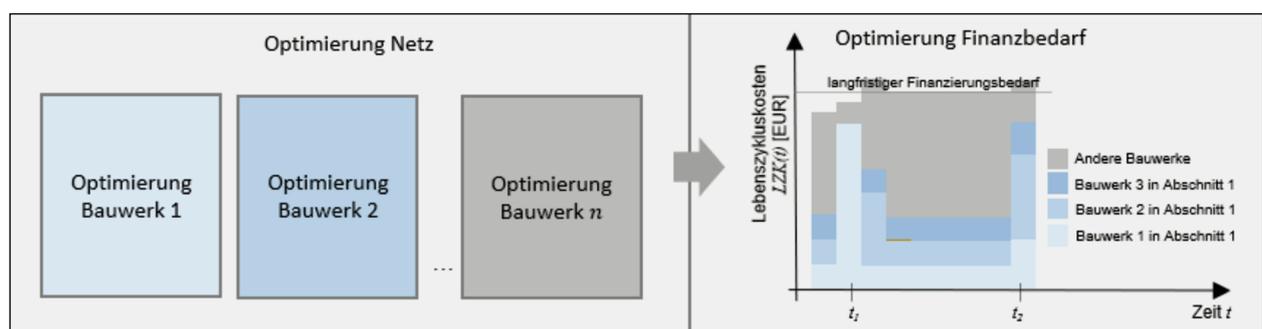


Bild 6-3: Hierarchische Optimierung (eigene Darstellung)

Mathematisch spricht man bei dem oben beschriebenen Optimierungsproblem von einer nichtlinearen Optimierung unter Kuhn-Tucker Randbedingungen [201]. In der Praxis spielt allerdings die Erfahrung der Ingenieure eine zentrale Rolle, um das Problem auch praxistgerecht zu formulieren und praxistgerecht zu lösen, siehe Kapitel 5 und 8. Ohne diese Erfahrung besteht bei einer rein mathematischen Herangehensweise die Gefahr, dass man durch eine mathematische Optimierung lediglich ein lokales Maximum als Lösung erhält, welches vom absoluten Maximum, die der Ideallösung entspricht, entfernt liegt und ggf. unrealistisch ist. Diese Gefahr ist gegeben, weil die Realität mit allen komplexen Zusammenhängen und Randbedingungen mathematisch nicht immer korrekt abgebildet werden können. In der Praxis wird dieses Problem mit der Erfahrung der Ingenieure iterativ gelöst.

Kapitel 7 beschreibt von praktischer Erfahrung abgeleitete Strategien, die helfen dieses komplexe Optimierungsproblem für der Praxis zu formulieren. Die Restnutzungsdauern spielen dabei eine wesentliche Rolle. Die Kosten-Optimierung wird durchgeführt und die Restnutzungsdauern  $\tilde{t}_{i,j}$  ( $i$  steht für die Art der Restnutzungsdauer, d. h. Inspektion, Reparatur oder Ersatz) des Bauwerks  $j$  gehen in die Optimierung als Randbedingung, damit die Grenzwerte der Restnutzungsdauer  $\overline{t}_{i,j}^*$  eingehalten werden.

Zusätzlich kann es, z. B. bei geografisch nahe beieinanderliegenden Bauwerken, für die Nutzer von Vorteil sein, wenn bei diesen Bauwerken Maßnahmen gleichzeitig durchgeführt werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Restnutzungsdauern vergleichbar sind und die Maßnahmen für die weiteren Bauwerke zeitlich etwas vorgezogen werden können. Über den Lebenszyklus hinweg reduzieren sich die Einschränkungen und somit die externen Kosten für die Nutzer. Darüber hinaus können Fixkosten für Aktivierung oder Installation (z. B. Baustelleneinrichtung) auf mehrere Bauwerke verteilt werden.

Darüber hinaus beschreibt Kapitel 5, dass es wichtig sein kann die Volatilität der Nachfrage an Bauleistungen zu reduzieren (siehe Bild 4-3) und sie der Leistungsfähigkeit der Bauwirtschaft anzupassen. Dadurch verringert man das Risiko von Preispitzen, welche aufgrund von Nachfrageschwankungen auftreten können. Theoretisch kann man diese Zusatzkosten mathematisch formulieren und sie formell in die obengenannte Formel als Zusatz-

kosten integrieren. Allerdings sind solche Kosten praktisch schwierig zu quantifizieren und weisen große Unsicherheiten in der Modellierung auf. Es erscheint effizienter zu sein, wenn die Verwalter der Bauwerke ihren Bedarf an Bauleistungen langfristig planen und somit nachhaltiger managen. Sie können einen nicht marginalen Einfluss auf die Nachfrage an Bauleistungen auslösen. Eine langfristige Planung ermöglicht auch jährlich eine gleichmäßige Anzahl an Projekten mit gleichmäßigen Ressourcen durchzuführen, siehe Kapitel 5.

### 6.3.2 Investitionsrechnung

Die Investitionsrechnung liefert Metriken für die Entscheidungsfindung, um mit deren Hilfe potentiell gewinnbringende Investitionen zu identifizieren. Generell werden in statische und dynamische Verfahren unterschieden [193] [192].

Bei der statischen Methode werden nominale Kosten in der Metrik berücksichtigt. Statische Methoden sind:

- Kostenvergleichsrechnung,
- Gewinnvergleichsrechnung,
- Rentabilitätsrechnung oder die
- Amortisationsrechnung.

Da Bauwerke über einen sehr langen Zeitraum Kosten und Nutzen erzeugen, ist die statische Methode nicht zweckmäßig und ein dynamisches Verfahren vorzuziehen. Die wesentlichen Methoden sind:

- Kapitalwertmethode,
- Interner Zinsfußmethode,
- Annuitätenmethode.

Die Kapitalwertmethode hat den Vorteil, dass alle nominalen monetären Kosten- und Nutzenposten der Nutzenfunktion  $u_n(t) = u_0 \gamma_i(t)$  lediglich direkt mit dem Abzinsfaktor  $\gamma_d(t)$  erweitert, um den realen Nutzen  $u_r(t)$  zu erhalten.

$$u_r(t) = u_n(t) \gamma_d(t)$$

Hierbei ist  $u_0$  der Nutzen zum Referenzzeitpunkt  $t=t_0$  und der Faktor  $\gamma_i(t)$  berücksichtigt die Preissteigerung bzw. Inflation.

## 6.4 Lebenszyklus-Management unter Unsicherheiten

### 6.4.1 Prinzipien zum Lebenszyklusmanagement

KÜBLER [193] fasst die Prinzipien von NATHWANI, LIND und PANDEY [202] zusammen, die darlegen wie gesellschaftliche Risiken zu managen sind. Die Prinzipien sind:

- Maximierung des Nutzens,
- Rechenschaftspflicht,
- Kompensation und
- Bezug zur Lebenserwartung.

Wie schon im vorangegangenen Kapitel 6.2 beschrieben stellt das Bernoulli-Prinzip, eine rationale Basis für die Entscheidungsfindung dar, das den zu erwartenden Nutzen maximiert. Es stellt ein wichtiges Prinzip dar und findet in Definition 1 (siehe Kapitel 6.1) explizit Eingang. Auch Definition 2 (Kapitel 6.1) spricht von günstigen Kosten, die mit dem Bernoulli Prinzip anvisiert werden.

Das Prinzip Rechenschaftspflicht beinhaltet, dass Risiken offen und transparent beschrieben und quantifiziert werden. Die Risiken sollen über Bauwerke und Gefahren hinweg konsistent erhoben und verwaltet werden. Somit können die damit verbundenen Entscheidungen transparent verteidigt werden. Die Rechenschaftspflicht beinhaltet auch die Aufgabe über benötigte Ressourcen zu informieren und sie somit in den politischen Prozess einzubringen.

Nicht alle Teile der Gesellschaft profitieren von gefährlichen Aktivitäten im gleichen Maß. Einige Teile der Gesellschaft tragen ein höheres Risiko. Die Aktivität ist gewinnbringend, wenn diese Teile der Gesellschaft kompensiert werden können und dennoch ein positiver Kapitalwert erwirtschaftet werden kann. Dieses Prinzip beschreibt, dass kompensiert werden soll, allerdings nicht wie diese Kompensation quantifiziert werden kann. Kompensationsmaßnahmen können z. B. auch Lärmschutzwände darstellen.

Der Bezug zur Lebenserwartung kann in der Nutzenfunktion für die Gesellschaft berücksichtigt werden. Dies kann mittels Lebensrettungskosten geschehen.

### 6.4.2 LZM-Prozess (Risiko-Management-Prozess)

Das Risikomanagement ist ein Prozess, der sich auf ein effizientes und effektives Management potenzieller Chancen und negativer Gefahren fokussiert. Das Risikomanagement umfasst alle Aspekte der Risikobewertung und lässt sich in ein allgemeines Format gliedern, das in Bild 6-4 dargestellt ist. Dieses Format wurde nicht spezifisch für eine bestimmte Branche oder Bauwerkstyp erarbeitet. Es gilt daher unabhängig von Bauwerkstyp und Verkehrsträger (Straße, Schiene bzw. Wasser). Es kann daher als allgemeiner Entscheidungs- und Managementrahmen betrachtet werden. Bild 6-4 ist der AS/NZS 4360:1999 [203] entnommen und zeigt die erforderlichen Schritte des Risikomanagements.

Die Definition des Kontextes ist der wichtigste Schritt. Der strategische und organisatorische Kon-

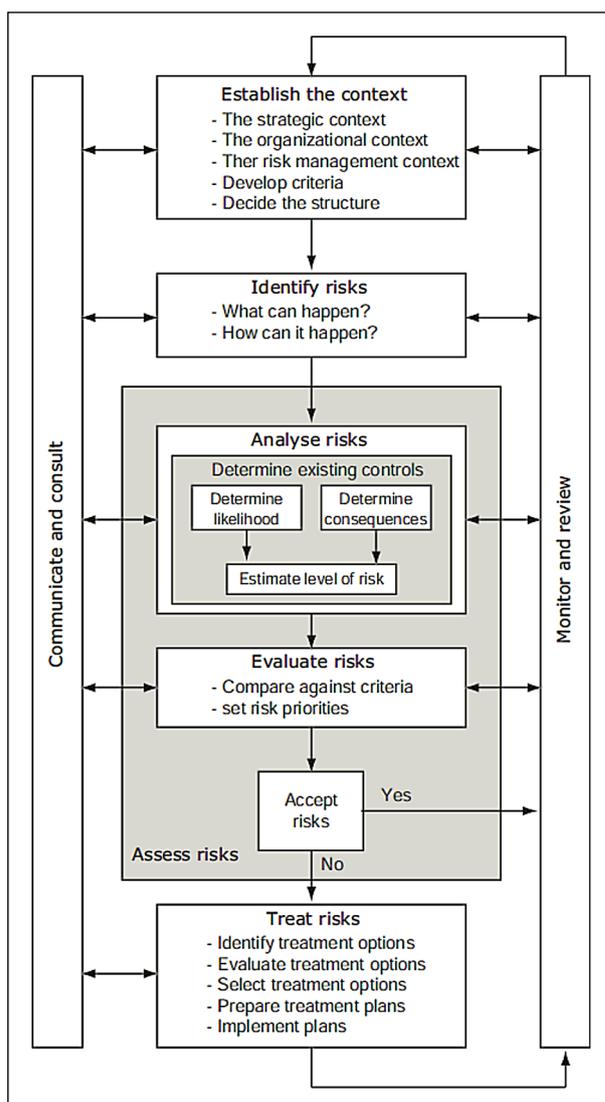


Bild 6-4: Risikomanagement-Prozess gemäß AS/NZS 4360:1999 [203]

text muss ermittelt oder definiert werden. Zum Beispiel müssen Antworten auf Fragen gefunden werden wie: Wer sind die Entscheidungsträger? Und welche anderen Parteien (Stakeholder / Interessensvertreter) sind von der Umsetzung möglicher Maßnahmen betroffen? Darüber hinaus muss das System identifiziert werden. Ein weiterer wichtiger Teil des ersten Schritts ist die Wahl der zu verwendenden Akzeptanzkriterien. Dann kann ein Risikoscreening dabei helfen, alle relevanten Risiken und Chancen zu identifizieren. Diese Risiken werden anschließend auf mögliche Konsequenzen und deren Wahrscheinlichkeit des Eintretens hin analysiert (Risikoanalyse). Das analysierte Risiko kann dann bewertet werden, ob es akzeptabel ist oder nicht (Risikobewertung). Ist es nicht akzeptabel, dann können geeignete risikoreduzierende Maßnahmen wie Risikovermeidung, -reduktion oder -transfer ergriffen werden. Die Überprüfung und Überwachung der einzelnen Schritte begleiten den gesamten Risikomanagementprozess ebenso wie die Kommunikation mit den Entscheidungsträgern und Beteiligten. Das Überprüfen und Überwachen kann dann als Teil des Plan, Do, Check und Act (PDCA) Prozesses, siehe Kapitel 6.4.3, verstanden werden.

Um das gewählte Akzeptanzkriterium in der Optimierung der Nutzenfunktion (Kapitel 6.3.1) zu berücksichtigen, kann man es in der mathematischen generellen Formulierung als Randbedingung einführen, dass es einzuhalten gilt.

Weitere Einzelheiten finden sich in AS/NZS 4360:1999 [203] oder FABER [200]. Das Monitoring von Bauwerken unterstützt besonders die Prüfungs- und Überwachungsaufgabe und ermöglicht es kontinuierlich Informationen zu gewinnen und in den Risikomanagementprozess einfließen zu lassen.

### 6.4.3 Managementwerkzeuge (Tools)

Das LZM des betrachteten Infrastrukturnetzes ist ein hoch komplexer Prozess, den es zu lenken und steuern gilt. Um das Verwalten dieses Prozesses zu unterstützen, stellen [191] und [2] Managementwerkzeuge vor und ausgewählte Managementwerkzeuge werden kurz vorgestellt.

#### PDCA Prozess

Der Plan, Do, Check und Act (PDCA) Prozess vor kann zum Steuern und Verwalten des LZM-Prozesses genutzt werden. Es ist ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess, der in Zyklen abläuft. Ein Zyklus

beginnt mit der Plan-Phase, d. h. dem Planen. In dieser Phase werden Ziele des Zyklus festgelegt und Schritte definiert, die dazu ausgeführt werden sollen. In der Do-Phase werden die Schritte umgesetzt, damit in der Check-Phase überprüft werden kann, ob die Ziele erreicht wurden. Die Act-Phase schließlich erlaubt es mit Korrekturen oder zusätzlichen Aktionen auf die Zielerreichung positiv einzuwirken. Das zyklische Wiederholen dieses Prozesses erhöht die Qualität des zugrundeliegenden Prozesses langfristig. Professionelle Verwalter von Infrastrukturbeständen können in regelmäßigen Abständen ihre Prozesse mit Hinblick auf den PDCA-Prozess überprüfen, um deren Qualität zu erhöhen.

#### Pareto Prinzip

Das Pareto-Prinzip besagt, dass 80 % der Ergebnisse mit 20 % des Gesamtaufwandes erzeugt werden. Diese Erkenntnis kann auch zumeist auf Ursachen von Problemen als auch auf Maßnahmen angewandt werden. So werden auch 20 % des Bestandes 80 % der Probleme generieren oder 20 % der möglichen Maßnahmen lösen 80 % der Probleme. Durch die gemeinsame Anwendung der Kenntnis des Pareto Prinzips und Kreativmethoden (z. B. Brainstorming) lassen sich für das LZM hoch effiziente Maßnahmen identifizieren. Das wiederholte Anwenden des Pareto-Prinzips ermöglichte es schließlich die 4 % der Maßnahmen zu identifizieren, die 64 % der Probleme lösen.

#### Grafische Darstellung

Um Problemstellungen, Prozesse oder kausale Zusammenhänge zu verstehen, ist es hilfreich diese mittels grafischer Darstellungen zu beschreiben. Komplizierte Zusammenhänge von Sachverhalten können damit besser kommuniziert und die Unterstützung von Interessensvertretern gewonnen werden.

Diese Veranschaulichung kann z. B. mithilfe von Ereignisbäumen oder Bayes'schen Netzwerke erzeugt werden, siehe auch Bericht des WG3 der COST ACTION TU1406 [3] oder Kapitel 6.2.1. Zusätzlich können auch Flussdiagramme oder Mindmaps hilfreich sein.

#### Brainstorming (Kreativmethode, Ideengewinnung)

SCHIERENBECK [192] beschreibt Brainstorming als ist eine Kreativmethode mit dem Ziel Ideen zu fördern und mögliche Probleme oder Lösungen zu identifizieren. Brainstorming soll in möglichst klei-

nen Gruppen (<12 Personen) in kurzer Zeit (<30 Minuten) stattfinden. Es soll keine Kritik oder Bewertung stattfinden. Qualität hat den Vorzug vor Quantität und möglichst unorthodoxe Ideen jenseits der Denkschablone sollen kreierte werden. Diese werden dann in späteren Sitzungen wieder aufgegriffen, verworfen oder weiterentwickelt.

**Pre-mortem (Kreativmethode, Risikoidentifikation)**

Die Pre-mortem Analyse hat zum Ziel, die Wahrscheinlichkeit unerwünschter Konsequenzen (z. B. Scheitern eines Projektes) zu reduzieren. In der Pre-mortem Analyse werden die Teilnehmer vom Leiter mit dem Szenario konfrontiert, dass ihr Projekt gescheitert ist. Sie sollen dann Gründe nennen oder Szenarien identifizieren, die zu diesem Scheitern führten. Anschließend werden die Gründe und Szenarien im Plenum gesammelt und der Projektmanager kann mit dieser Information seinen Plan aktualisieren [204]. Diese Methode erlaubt es Themen zu identifizieren, über die ungern gesprochen wird allerdings dennoch Projektrisiken darstellen.

**SWOT (Kreativmethode, Strategie)**

Die SWOT-Analyse erlaubt Stärken, Schwächen, Gefahren und Chancen zu erkennen und zu identifizieren. Sie bezieht sich auf die aktuelle und die zukünftige Situation und verbindet die interne Situation - Stärken (strength) und Schwächen (weakness) - mit der externen Situation - Chancen (opportunities) und Risiken (threats).

<b>SWOT Analyse</b>		Interne Analyse	
		Strength (Stärken)	Weakness (Schwächen)
Externe Analyse	Opportunities (Chancen)	S-O	W-O
	Threats (Risiken)	S-T	W-T

Bild 6-5: Grafische Darstellung der SWOT-Analyse. (eigene Darstellung)

Im Brainstorming werden diese 4 Punkte diskutiert und Ideen gesammelt, um sie dann in einer 2-dimensionalen Matrix, wie in Bild 6-5 dargestellt, gegenüberzustellen. Wie dieser Prozess aussehen kann wird in [191] skizziert.

**Eisenhower (Priorisierung)**

Die Eisenhower Matrix ist ein Werkzeug des Managements, das es erlaubt zu priorisieren. Alle identifizierten Handlungen und Aktionen werden nach Wichtigkeit und Dringlichkeit eingeordnet und in der Eisenhower Matrix dargestellt. Darauf basierend können diese priorisiert und Verantwortlichkeiten zugeordnet werden. Handlungen und Aktionen in Quadrant I (wichtig und dringlich) und II (wichtig und weniger dringlich) sind von Wichtigkeit und daher von dem Verantwortlichen selbst vorzunehmen. Handlungen in Quadrant IV (weniger wichtig allerdings dringend) können delegiert (intern oder extern) werden und Handlungen in Quadrant III sollten eliminiert werden.

**S.M.A.R.T. Ziele**

Der Zielplanungsprozess und die Zielerreichung kann mittels S.M.A.R.T.-er Ziele unterstützt werden. Hierbei steht das Akronym für:

- S: specific: Ziele müssen eindeutig definiert sein und dürfen nicht vage sein.
- M: measurable: Ziele sollen messbar sein, um den Erfolg messen zu können.

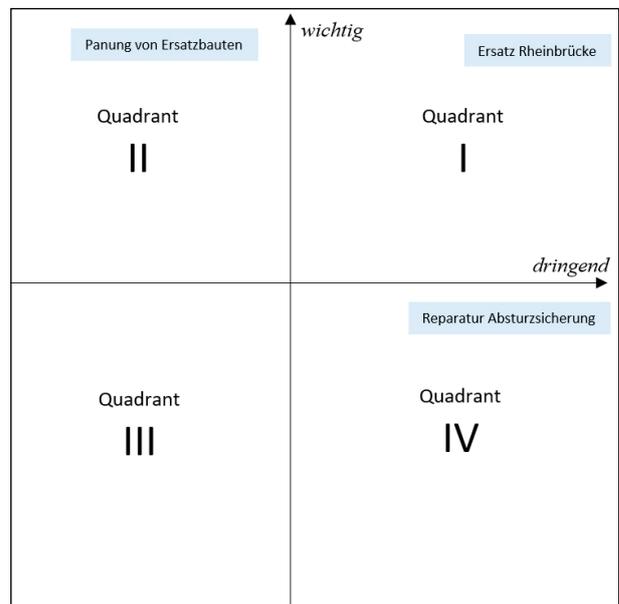


Bild 6-6: Eisenhower-Matrix. (eigene Darstellung)

- A: achievable: Ziele müssen erreichbar sein.
- R: realistic: Ziele müssen realistisch sein.
- T: time-bound: Ziele müssen mit einem Datum verbunden sein.

**Risikoanzeiger**

Risikoanzeiger helfen in Brainstorming-Sitzungen Risiken, Maßnahmen oder Ideen zu generieren [200].

Beispiele aufgezeigt, bei denen Monitoringdaten die Entscheidungsfindung positiv beeinflussen können. Diese Informationen werden möglichst in Verbindung mit PIs und KPIs gebracht und es wird aufgezeigt, welche Entscheidungen sie beeinflussen. Zunächst wird die Logik der Zusammenhänge zwischen Monitoringdaten, Maßnahmen, KPIs und den Entscheidungen des LZM erläutert. Die Eingliederung dieser Ideen in den Prozessablauf des LZM erfolgt in Kapitel 8.

## 7 Implementierungsbeispiele von Monitoring im Lebenszyklusmanagement

Lebenszyklusmanagement basiert auf informierter Entscheidungsfindung. In diesem Abschnitt werden

### 7.1 Zusammenhänge zwischen LZM, Monitoring und KPIs

Für die Erarbeitung der Beispiele sowie auch bei der späteren Entwicklung von Monitoringprogrammen zur Unterstützung des LZM, kann nach Bild 7-1 vorgegangen werden.

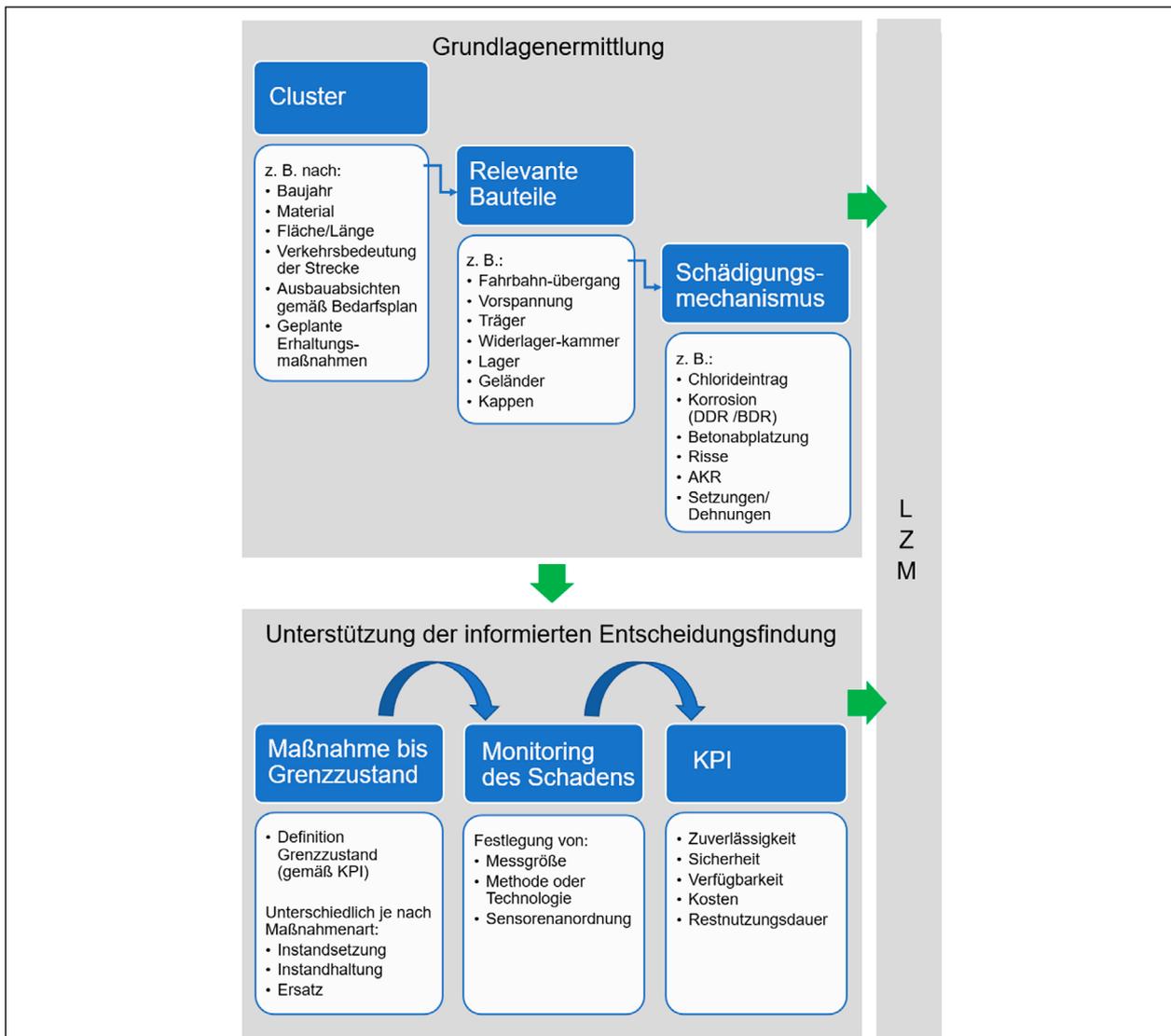


Bild 7-1: Zusammenhänge zwischen LZM, Monitoring und KPIs (eigene Darstellung)

### 7.1.1 Cluster

Der Brückenbestand kann in unterschiedliche Cluster aufgeteilt werden, welche Bauwerksgruppen mit spezifischen Bearbeitungsschwerpunkten entsprechen. Die Cluster werden für Brücken gebildet, die sich im Sinne der Erhaltungsplanung ähnlich verhalten werden. Auf der Netzebene können durch Analysen des Bestandes die künftigen Problemstellungen erkannt und mit der wahlweise spezifischen Erhaltungsstrategie entgegengewirkt werden. Die Projektion des Zustandes, der Verkehrsbehinderungen und der damit verbundenen Kosten und Risiken können idealerweise für die unterschiedlichen Cluster mittels Simulationen zukünftiger Entwicklungen der KPIs erfolgen. Der Detaillierungsgrad der Simulation muss pro Cluster situativ gewählt werden und kann von einfachen, durchschnittlichen Instandsetzungsintervallen bis hin zur Verwendung von Schädigungsmodellen pro Bauteil gehen. Eine bauwerksparkspezifische Optimierung der Erhaltungsplanung bedingt somit, dass die Bauwerke bekannt sind und die Gruppierung in Cluster entsprechend stattfindet. Die Erfahrung zeigt, dass die verantwortlichen Brückeningenieure Brücken mit schlechtem Zustand sowie die kostenrelevanten Schäden sehr gut kennen. Mithilfe von Brückenmanagementsysteme zur Bewirtschaftung der Bauwerksdaten können die zur Quantifizierung der Nutzungsfunktion erforderlichen Informationen und Kennzahlen (wie im Kapitel 6.3 beschrieben) systematisch erfasst und verwaltet werden. In Deutschland sind bisher keine standardisierten Brückenmanagementsysteme im Einsatz.

Cluster werden somit insbesondere für Brückentypen mit bestimmten Eigenschaften interessant, wo Einsparpotenziale abgeklärt werden müssen. Einsparpotenziale können sich auf Maßnahmenkosten, indirekte Kosten (wie beispielsweise Staustunden oder Emissionen) und Risikokosten beziehen und nehmen Bezug auf die ökonomische, soziale und ökologische Dimension. Der Fokus bei der Definition der Cluster kann ebenfalls auf unterschiedliches Verhalten im LZM gelegt werden, z. B.:

- Einzelbauwerke (Großbrücken, talquerende Brücken oder Rheinbrücken), welche z. B. ca. 1 % der Bauwerke abdecken und dennoch eine große Kostenposition bedeuten.
- Standardbrücken, kleinere, sehr häufig vorkommende Bauwerkstypen, welche die große Masse darstellt.

Für die Strukturierung der Cluster werden Größen verwendet, welche als PIs bezeichnet werden können, z. B. der Brückentyp inkl. verwendete Baustoffe, Brückenfläche, das Baujahr oder andere spezielle Eigenheiten. Die Cluster werden top-down von der Erhaltungsplanung definiert, um die zu erwartenden Problemstellungen vorausschauend bewältigen zu können. Regional können ebenfalls Cluster gebildet werden. Dabei muss im Voraus abgeschätzt werden, welche Ergebnisse mit den erwarteten Resultaten erzielt werden sollen (value of information, siehe auch Kapitel 4.8.2).

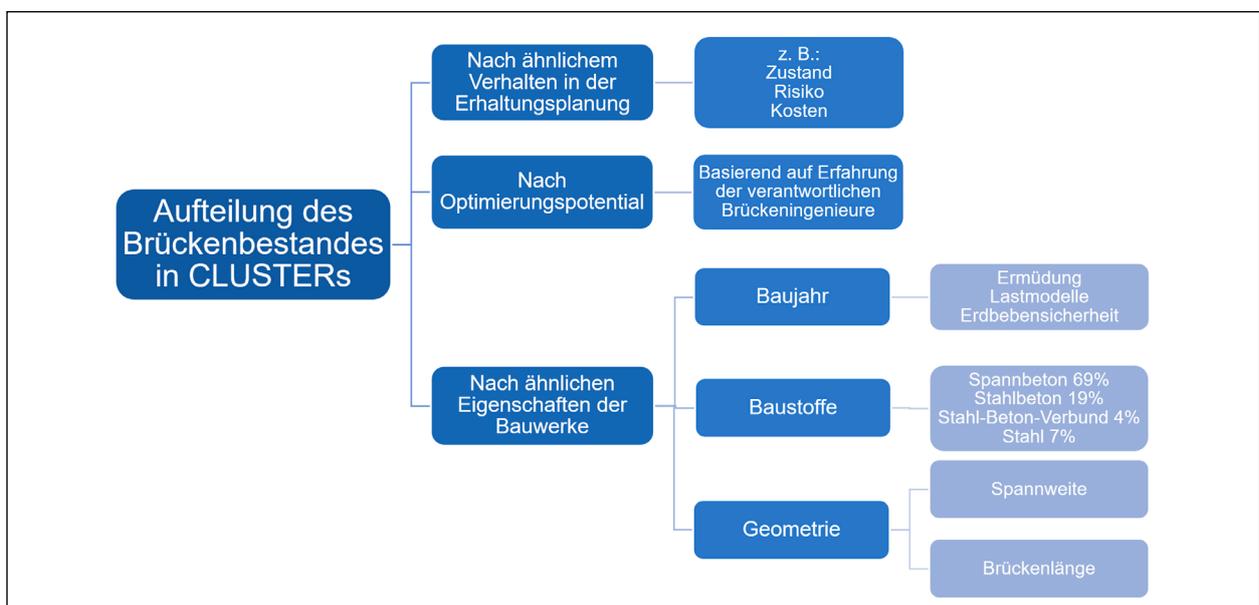


Bild 7-2: Clusterbildung (eigene Darstellung)

Beim Baujahr können die Normgenerationen mit neuen Anforderungen bezüglich Ermüdung, Erdbebensicherheit oder schwereren Lastmodellen als Unterteilung verwendet werden. Ebenso zweckmäßig können die Einführungsjahre bestimmter Systeme sein, bei denen sich fehlerhafte Anwendungen befinden können.

Bei den Bauweisen ist folgende Grundunterscheidung naheliegend, welche hier mit den Flächenprozenten angegeben werden: [190]

- Spannbeton 69 %,
- Stahlbeton 19 %,
- Stahl 7 %,
- Stahl-Beton-Verbund 4 %.

Die Spannweiten, Brückenlängen oder -breiten können in Kombination mit dem Bauwerkstyp ebenso herangezogen werden, wenn sie für die Fragestellung der Maßnahmen relevant werden, z. B.:

- Brückenlänge für Unterhaltsfragen von Fahrbahnübergängen oder Brückenentwässerungssystemen (60 % der Brückenfläche sind Bauwerke über 100 m Länge),
- Spannweiten für Risikoeinschätzungen bei integralen Bauwerken.

Ebenso sind die vorhandenen Lastklassen relevant, insbesondere bei Strecken, welche für eine Erhöhung vorgesehen sind.

### 7.1.2 Relevante Bauteile

Pro Cluster sind eine oder mehrere Bauteile zu bestimmen, welche für die Entscheidung der nächsten Maßnahmen relevant sein können, z. B.:

- Kabelverankerungen bei seilgestützten Brücken,
- orthotrope Fahrbahnplatten bei Strecken mit hohen Verkehrslasten,
- Fahrbahnübergänge für Brücken mit hohem Verkehrsaufkommen (siehe Bild 7-3 oben links),
- Abdichtungen im Allgemeinen und im Speziellen für vorgespannte Bauwerke (s. Bild 7-3 oben rechts),
- Vorspannungen für Bauwerke mit Koppelfugen (kann vom Ort abhängig von der üblichen Qualitätskontrolle bei der Herstellung variieren),

- Träger für Brücken mit niedrigeren Lastklassen,
- Widerlager oder Widerlagerkammern bei Brücken mit Fahrbahnübergängen (siehe Bild 7-3 unten links und rechts),
- Lager bei Brücken größerer Spannweite,
- Geländer oder Fahrzeugrückhaltesysteme für Brücken mit hohem Verkehrsaufkommen und Alter über 30 - 40 Jahre,
- Kappen für Brücken bei hoher Verwendung von Taumitteln.

Je nach Stand der Erhaltungsplanung und dem Fortschritt in der Umsetzung kann der Fokus ganz unterschiedlich ausfallen. In Regionen, welche den Unterhalt ihrer Infrastruktur über Jahrzehnte vernachlässigt haben, muss die Priorität klar in der Gewährleistung der Tragsicherheit liegen, wodurch die relevanten Bauteile primär diejenigen des Tragwerks selbst sind, das heißt insbesondere die Bauteile, welche durch einen Verlust der Bewehrungsquerschnitte schwerwiegendere Folgen mitbringen würden, z. B.:

- Gerbergelenke,
- Kraffteinleitungsstellen mit Einsatz der Oberflächenbewehrung als Spreizbewehrung,
- Kragplatten,
- zwängungsempfindliche Bauteile ohne Verformungsvermögen, wie z. B. kurze Stützen.

Die Abläufe sind dann häufig kurzfristig, da rascher Handlungsbedarf unumgänglich wird.

Im Gegensatz dazu, wenn die Erhaltungsplanung in der Größenordnung von 10 bis 20 Jahren sachgerecht durchgeführt und umgesetzt wurde, werden anstatt Tragelemente eher sekundäre Bauteile relevant, bei welchen präventive Maßnahmen getroffen werden, um eine Schädigung des Tragwerks erst gar nicht entstehen zu lassen. Die Möglichkeiten für eine übergeordnete Kostenoptimierung vergrößert sich maßgeblich, sobald präventive Maßnahmen angeordnet werden können, wodurch beim Bauwerk anschließend für Jahrzehnte keine Folgearbeiten erforderlich werden.

### 7.1.3 Schädigungsmechanismen

Für jedes zuvor definierte relevante Bauteil lassen sich die typischen Schäden mit den maßgebenden Schädigungsmechanismen und die dazu gehören-



Bild 7-3: Typische Schädigungen an Stahl- und Spannbetonbrücken (Fotos: Kristian Schellenberg)

den Einwirkungen oder Rahmenbedingungen eruieren, unter welchen die Schädigung fortschreitet. Aus den Mechanismen ist eine Zustandsentwicklung zu prognostizieren. Die Geschwindigkeit der fortschreitenden Schädigung ist in der Regel von den Einwirkungen resp. von der Exposition abhängig.

Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale zu verstehen ist die Voraussetzung dafür, mithilfe der ausgewählten Sensoren die Parameter am Bauteil zu erfassen, um über den Handlungsbedarf und deren Dringlichkeit beurteilen zu können. Schäden können neben der Exposition und der Nutzung ebenfalls infolge Planungs- oder Ausführungsfehler entstehen. Im Themenkreis „Intelligente Bauwerke“ wurden für Stahlbeton- und Spannbetonbrücken sowohl die relevanten Einwirkungen als auch auffällige Bauteile ausgewertet [171].

Folgende Schädigungsmechanismen stehen im Vordergrund:

- Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung oder Chlorideintrag bei Stahlbetonbrücken,

- Spannungsrisskorrosion oder durch Streustrom induzierte Korrosion bei Spannbetonbrücken,
- Korrosion und Ermüdung bei Stahlbrücken,
- Unterkolkung oder Beschädigung durch Hochwasser,
- Bauwerksüberlastung durch differenzielle Setzungen oder sogar Hangrutschungen bei Planungs- oder Ausführungsfehler,
- Statische Überlast durch Fahrzeug- oder Schiffsanprall,
- Überlast durch Erdbeben, oder gravitative Naturgefahren wie Murgänge, Lawinen oder Stein Schlag im Gebirge,
- Frost- / Frost-Tausalz-Angriff für sekundäre Bauteile im Gebirge,
- Alkali-Kieselsäure-Reaktion,
- Versprödung durch UV-Strahlung.

#### 7.1.4 Grenzzustand für Maßnahmen

Die Schädigungsmechanismen und die Prognose über den weiteren Verlauf der Schädigung können

in das LZM nur einfließen, wenn die sich daraus ergebenden Maßnahmen definiert werden können. Diese Betrachtung erfolgt auf der Stufe Bauteil. Kenntnis über die erforderliche Maßnahme zur Schadensbehebung, ist die Voraussetzung für Erhaltungsentscheidungen. Da bei den Maßnahmenkosten auf Stufe Bauteil in der Regel die Mobilisierungs- resp. Installationskosten einen beträchtlichen Anteil ausmachen, wird naturgemäß jeweils versucht, im gleichen Zug weitere Schäden an anderen Bauteilen zu beheben.

Im LZM muss entschieden werden, ob und falls ja, zu welchem Zeitpunkt eine Maßnahme eingeleitet werden soll. Die Maßnahmen sind:

- Bauliche Unterhaltung: Projektfreie Behebung von Schäden in der Regel zum Aufhalten des weiteren Schädigungsverlaufes.
- Teilinstandsetzung: Bauliche Maßnahmen zur Behebung des Schadens auf Stufe Bauteil.
- Gesamtinstandsetzung: Behebung aller Schäden, welche in der Regel eine weitere Nutzungsdauer von ca. 30 bis 40 Jahre ohne wesentliche zusätzliche Arbeiten an der Brücke ermöglicht.

Die technische Lösung zur Behebung des Schadens und damit der Umfang der Maßnahme hängt oft vom Schadensfortschritt ab. Am Beispiel der Bewehrungskorrosion sind mögliche Maßnahmen:

- Hydrophobierung oder Anbringen eines Oberflächenschutzsystems, falls kritische Chloridgehalte die Tiefe der Bewehrung noch nicht erreicht haben.
- Ersatz des Überdeckungsbetons bis zur Tiefe der Bewehrung, falls die Bewehrungskorrosion noch nicht initiiert wurde.
- Betonabtrag und Reprofilierung bis ca. 5 - 10 cm hinter der Bewehrung und Entrostung, falls Chlorid-induzierte Korrosion bereits fortgeschritten, der Querschnittsabtrag aus statischer Sicht aber noch unproblematisch ist.
- Einlegen zusätzlicher Bewehrung (inkl. Verankerungen), falls Querschnittsverluste statisch nicht annehmbar sind.

Sobald sich die Maßnahme ändert, ist in der Regel von einer überproportionalen Kostensteigerung auszugehen. Falls die Schädigungszunahme jedoch langsam ist, kann mit der Behebung beispielsweise bis zu einer Gesamtinstandsetzung gewartet

werden. Die Einleitung der Maßnahme ist auf Grundlage der Risikoeinschätzung möglich. Spezifische Kenntnis über die Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahme ist erforderlich, um eine Entscheidung für isolierte Maßnahmen oder eine Gesamtinstandsetzung einzuleiten. Im Grundsatz und abhängig vom Verkehrsaufkommen sind Maßnahmen mit Verkehrsbehinderungen (Spurreduktionen oder Umleitungen) möglichst als Gesamtinstandsetzungen vorzunehmen. Dies entspricht einer Optimierung auf Bauwerksebene, welche ebenfalls indirekte Kosten berücksichtigen sollte.

In die Entscheidungsfindung hat auch ein vordefinierter Zeitraum ohne weitere Eingriffe einzufließen. So ist sicherzustellen, dass beispielsweise das Bauwerk nach der Maßnahme ohne wesentliche Eingriffe 10, 20 oder 30 Jahre genutzt werden kann. Der Zeitraum ohne weitere Eingriffe ist im Hinblick auf die Erhaltungsplanung der gesamten Strecke zu definieren und kann für die Entscheidungsfindung des Umfangs der zu treffenden Maßnahmen maßgebend werden. Dieses Vorgehen ist eine Optimierung auf Netzebene, welche übergeordnet und über längere Zeiträume betrachtet, zu größeren Kosteneinsparungen führt, als wenn bei jedem Einzelbauwerk die Kosten minimiert werden.

Die Entscheidungsfindung könnte anhand der folgenden Schritte erfolgen:

1. Soll der festgestellte Schaden eines Bauteiles behoben werden? Diese Frage ist für alle Schäden am Bauwerk zu beantworten.
  - a. Welche Maßnahme ist erforderlich, was kostet sie und kann sie unter Verkehr umgesetzt werden?
  - b. Was sind die Folgen, wenn der Schaden nicht behoben wird?
    - I. Wie lange hat man Zeit, um die Maßnahme später einzuleiten, ohne dass dadurch größere Maßnahmen erforderlich werden?
    - II. Ist die Prognose des weiteren Verlaufes verlässlich?
    - III. Verschlechtert sich die Tragfähigkeit oder erhöht sich das Verfügbarkeitsrisiko mit der Zeit?
    - IV. Bei einem langsamen Schadensfortschritt ändert sich die auszuführende Maßnahme nicht wesentlich. Die Maßnahme wird

als nicht dringlich taxiert und entsprechend dem Mehrwert im Vergleich zu anderen Maßnahmen priorisiert. Wie ist die Maßnahmeneffizienz (Risikoreduktion pro eingesetzter finanzieller Mittel)?

2. Welcher wird der nächste Schaden an der Brücke sein und wann wird er erwartet?
  - a. Ist eine erneute Verkehrsbeeinträchtigung akzeptabel?
  - b. Können präventive Maßnahmen ergriffen werden, um den Zeithorizont zu verlängern?
3. Wann und welche Maßnahmen stehen auf dem Straßenabschnitt oder im Umfeld (betreffend Verkehrsumleitungen) an?

### 7.1.5 Monitoring

Das einzusetzende Monitoring muss den Zustand vor der Maßnahmenänderung mit einer genügenden Vorlaufzeit detektieren können, damit die Maßnahme rechtzeitig ausgelöst werden kann. Durch die Bestimmung der Messgröße werden unterschiedliche Monitoringmethoden aus dem Kapitel 2 eingesetzt.

Für die Beurteilung des Monitoringkonzeptes ist nicht nur der maßgebende Schädigungsmechanismus von Interesse, sondern auch die erwarteten Folgen, falls die Maßnahmen am Bauwerk aus Netzsicht-Überlegungen verzögert werden sollten.

Im Folgenden werden in Kapitel 7.2 Beispiele aufgeführt, die konkret zeigen, wie die geeignete Maßnahme für ein Cluster mit relevanten Bauteilen, welche Schädigungsmechanismen ausgesetzt sind, mittels Monitoring identifiziert werden kann. Dabei werden die gemessenen PIs angesprochen und mit den KPIs in Zusammenhang gesetzt.

### 7.1.6 KPIs

Die Messgröße aus dem Monitoring ist ein PI für die Entscheidung. Durch die Interpretation der Monitoringdaten kann mithilfe der zugewiesenen Maßnahme, welche mit dem Monitoring beurteilt wurde, auf die KPIs geschlossen werden: Kosten, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit. Die Dauerhaftigkeit beschreibt, wie lange die KPIs stabil bleiben, resp., ob sich die KPIs aufgrund der Zustandsveränderung verändern werden. Diese KPIs geben den Überblick für übergeordnete Priorisierungen.

## 7.2 Beispiele

In der Folge werden Beispiele für die Verkettung der relevanten Bauteile, Schädigungen, Maßnahmen und Monitoringmöglichkeiten mit den PIs/KPIs erläutert. Anschließend wird aufgezeigt, welche Überlegungen in Bezug auf das LZM einfließen.

Bestimmte Eigenschaften können flächendeckend für alle Brücken überwacht werden. Der Verlust eines Spannglieds kann schwerwiegende Folgen haben. Die damit verbundenen Risiken aufgrund des hohen Schadenpotenzials können eine Überwachung rechtfertigen. Eine Früherkennung von Schäden an der Vorspannung ist über die Erfassung der Durchbiegungen möglich. Bei der Erstellung der Brücke werden Nullmessungen durchgeführt und dienen später als Referenz. Zu Beginn ist ein enges Raster zur Erfassung der Kriechverformungen nötig. Danach kann die Taktung der Folgemessungen entsprechend den Risiken angeordnet werden.

Aus Sicht der Erhaltungsplanung geht es bei der Überwachung der Durchbiegung um das Auffinden von Anomalien, in der Regel verursacht durch Planungs- oder Ausführungsfehler. Werden Veränderungen in den Messwerten festgestellt, welche vordefinierte Schwellwerte überschreiten, so sind zunächst die Intervalle zu verkürzen. Eine mögliche Maßnahme beim Eintreten von Korrosion am Spannglied ist, zusätzliche externe Spannglieder anzubringen. Bauliche Maßnahmen bei der Montage von Umlenkpunkten können mit Betoninstandsetzungsarbeiten kombiniert werden. Ist im Sinne einer übergeordneten Koordination von Interesse, mit der Instandsetzung und dem Einbau der zusätzlichen Kabel zu warten, kann beispielsweise mit der Schallemissionsanalyse der Verlauf der weiteren Schädigung verfolgt werden.

Beispiel	1
Cluster	Hohlkastenbrücken in Spannbeton
Relevante Bauteile	Stege / interne Spannglieder
Schädigungsmechanismus	Korrosion der Spannglieder an schlecht ausinjizierten Stellen
Maßnahme bis Grenzzustand	Verstärkung durch zusätzliche externe Spannglieder
Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchbiegungen mit Schwellen- und Alarmwerten, Separieren von Langzeitverformungen</li> <li>• Schallemissionsanalyse</li> </ul>
PI	Durchbiegungen (unter Eigengewicht)
KPI	<b>Zuverlässigkeit</b>

Tab. 7-1: Beispiel 1 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

Aus dem LZM folgt die Frage, ob das bestehende Bauwerk die Anforderungen mindestens in den nächsten 30 - 50 Jahren bezüglich Straßengeometrie (Anzahl Fahrspuren) oder Tonnage erfüllt und ob deshalb anstelle einer Instandstellung ein Ersatzneubau vorteilhaft wäre. Dann müsste der Ersatz möglichst hinausgezögert werden, bis die Maßnahmen zusammen mit dem Streckenabschnitt umgesetzt werden können (Tabelle 7-1).

Da Maßnahmen mit Verkehrsbeeinträchtigung einhergehen, ist die Durchführung der Maßnahmen gemeinsam mit anderen Maßnahmen im Streckenabschnitt anzustreben.

Solange keine Anzeichen für Schäden beispielsweise in Form von Feuchtstellen an der Plattenunterseite vorhanden sind, kann die Brücke regelmäßig beispielsweise über zerstörungsfreie Prüfmethode überwacht werden. Die Notwendigkeit von Eingriffen vor der geplanten Instandsetzung können so abgeschätzt werden und ein Eingriff ist ggf. früher möglich (Tabelle 7-2).

Bei Beispiel 3 (Tabelle 7-3) ist ein sofortiges Handeln vorteilhaft. Intervalle der Bauwerksprüfungen alle 6 Jahre genügen nicht, um die Tragstruktur vor einer längerfristigen Schädigung zu schützen. Das Anbringen der Sensoren ist dabei eine kostengünstige Methode. Die Datenablesung/-übertragung muss dabei im Verhältnis zur jährlichen visuellen (und dokumentierten) Inspektion des Hohlkastens stehen.

Die Früherkennung von reaktiven Betonsorten ist relevant, da wenig Möglichkeiten zur Instandstellung bestehen, sobald die Schädigung fortgeschritten ist. Aus Sicht des LZMs sollten die Brückenbetreiber Bauwerke mit gleicher Betonrezeptur verstärkt überwachen und vor betroffene Bauteile vor Wasserzutritt schützen. Die Informationen zur Betonrezeptur sind Teil der relevanten Informationen für ein LZM bei den Bauwerksakten bedingt ein funktionierendes Brückenmanagementsystem, welches entsprechend nachgeführt wurde (Tabelle 7-4).

Die Beispiele 5 und 6 (Tabelle 7-5 und 7-6) ermöglichen präventive Maßnahmen, bevor das Schadensausmaß höhere Kosten verursacht.

Der notwendige und regelmäßige Ersatz von Kappen ist oft ein wichtiger Faktor für eine Maßnahmenentscheidung. Eventuelle Maßnahmen an den Fahrzeugrückhaltesystemen auf den Brücken, sollten in die Gesamtentscheidung eingebunden bzw.

Beispiel	2
Cluster	Hohlkastenbrücke
Relevante Bauteile	Kragplatten
Schädigungsmechanismus	Korrosion der Kragplattenbewehrung infolge Chlorideintrag (Lochfrasskorrosion)
Maßnahme bis Grenzzustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abdichtungersatz bis Korrosionsinitiierung</li> <li>Reprofilierung der Fahrbahn bei Chlorideintrag auf die Tiefe der Bewehrung</li> <li>Ersatz der Bewehrungslage bei Querschnittsverlust</li> </ul>
Monitoring	Potenzialfeldmessungen auf Kragplattenunterseite (wiederkehrende Korrosionsstrommessung)
PI KPI	Korrosionsstrom <b>Lebenszykluskosten, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit</b>

Tab. 7-2: Beispiel 2 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

Beispiel	3
Cluster	Hohlkastenbrücke mit Entwässerungsleitung im Brückeninneren
Relevante Bauteile	Untere Kastenplatte
Schädigungsmechanismus	Eintrag von Chloriden durch undichte Entwässerungsleitungen
Maßnahme bis Grenzzustand	Reparatur der Entwässerungsleitungen
Monitoring	Feuchtesensoren
PI KPI	Feuchtegehalt <b>Lebenszykluskosten, Zuverlässigkeit</b>

Tab. 7-3: Beispiel 3 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

Beispiel	4
Cluster	Bogenbrücke
Relevante Bauteile	Bogen (in Beton)
Schädigungsmechanismus	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
Maßnahme bis Grenzzustand	Hydrophobierung vor Einsetzen der ersten Rissbildung, Bauwerkersatzneubau bei Festigkeitsverlust
Monitoring	Bildbasierte Verfahren zur Früherkennung von Rissen
PI KPI	Rissbreite und Anzahl an Rissen <b>Zuverlässigkeit, Lebenszykluskosten, Verfügbarkeit</b>

Tab. 7-4: Beispiel 4 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

eingepflanzt werden Die konstruktive Ausbildung des Kappenersatzes (Bewehrung geschnitten oder freigelegt) hat einen Einfluss auf die Ergänzung der Abdichtung. So ist bei einem Quergefälle zum Schrammbord hin die Überlappung der neuen Abdichtung eine künftige Schwachstelle bezüglich zu-

Beispiel	5
Cluster	Vorgespannte Brücken (70 % der Brückenflächen)
Relevante Bauteile	Brückenabdichtung
Schädigungsmechanismus	Unterläufigkeit der Abdichtungen an den Brückenrändern sowie bei den Entwässerungseinläufen
Maßnahme bis Grenzzustand	Präventiver Ersatz der Abdichtung
Monitoring	Feuchtesensoren
PI	Feuchtegehalt
<b>KPI</b>	<b>Lebenszykluskosten, Verfügbarkeit</b>

Tab. 7-5: Beispiel 5 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

Beispiel	6
Cluster	Brücken mit Fahrbahnübergängen
Relevante Bauteile	Widerlagerkammern
Schädigungsmechanismus	Chlorid-induzierte Bewehrungskorrosion
Maßnahme bis Grenzzustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrbahnübergang auswechseln, bevor kritischer Chloridgehalt erreicht wird</li> <li>Betoninstandsetzung bei Korrosionsschäden mit Abplatzungen</li> </ul>
Monitoring	Chloridsensoren
PI	Chloridgehalt
<b>KPI</b>	<b>Lebenszykluskosten, Verkehrssicherheit</b>

Tab. 7-6: Beispiel 6 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

Beispiel	7
Cluster	Kurze Brücken, Rahmen- oder Plattenbrücken in Stahlbeton
Relevante Bauteile	Kappen
Schädigungsmechanismus	Chlorid-induzierte Korrosion
Maßnahme bis Grenzzustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydrophobierung vor Chlorideintrag</li> <li>Betonabtrag bei Erreichen des kritischen Chloridgehaltes auf Höhe der Bewehrung</li> <li>Ersatz der Kappen in Kombination mit einem Abdichtungsersatz</li> <li>Erneuerung des Fahrzeugrückhaltesystems</li> </ul>
Monitoring	Bohrkernentnahmen Chloridsensoren Bildbasierte Verfahren
PI	Rissbreiten, Vorhandensein von Abplatzungen
<b>KPI</b>	<b>Verfügbarkeit, Verkehrssicherheit</b>

Tab. 7-7: Beispiel 7 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

künftiger Schädigung. Der Ersatz der Abdichtung ist in Abhängigkeit der Verkehrsbeeinträchtigungen abzuwägen. Bedingung für den Abdichtungsersatz ist, dass keine statischen Verstärkungen erforderlich sind, was bei Plattenbalkenbrücken oder bei

Beispiel	8
Cluster	Lange Brücken
Relevante Bauteile	Brückenlager
Schädigungsmechanismus	Abrasion
Maßnahme bis Grenzzustand	Ersatz der Gleitflächen
Monitoring	Lagerwege
PI	Prozentuale Lagerwege zu Lebensdauer der Lager, Spaltmass
<b>KPI</b>	<b>Lebenszykluskosten</b>

Tab. 7-8: Beispiel 8 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

Beispiel	9
Cluster	Brücken mit differenziellen Setzungen
Relevante Bauteile	Träger
Schädigungsmechanismus	Statische Überbeanspruchung aufgrund aufgezwungener Verformungen
Maßnahme bis Grenzzustand	Nachjustieren der Auflager
Monitoring	Lagerkraftmessungen
PI	Auflagerreaktionen / Ausnutzungsgrad
<b>KPI</b>	<b>Zuverlässigkeit</b>

Tab. 7-9: Beispiel 9 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

schlanken Hohlkastenbrücken der Fall sein kann. In solchen Fällen benötigt die Projektierung etwas größere Vorlaufzeiten und die entsprechende Beauftragung, welche auch bauherrnseitig personelle Ressourcen bindet (Tabelle 7-7).

Brückenlager können relativ kostengünstig instandgesetzt werden. Für unterhaltsfreundliche Lagermodelle können die Gleitflächen aus PTFE ohne wesentliche Brückenhebungen ausgetauscht werden. Kostenintensive Instandsetzungen können erforderlich werden, wenn die Gleitflächen abgenutzt wurden. Die visuelle Inspektion mit Spaltbreitemessungen genügt in der Regel, um rechtzeitig eine Lagerrevision anzuordnen. Ist bei langen Brücken die Zugänglichkeit der Lager schlecht, so kann ein Monitoring der Lagerwege, dazu beitragen, die Lagerinspektionen richtig zu terminieren (Tabelle 7-8).

Differenzielle Setzungen können die Zuverlässigkeit stark beeinträchtigen und teilweise sprödes Querkraftversagen verursachen. Die Nachjustierung der Auflager ist keine kostenintensive Maßnahme, erfordert jedoch, dass das Problem im Voraus erkannt wurde. Das Monitoring der Auflagerkräfte kann periodisch oder kontinuierlich erfolgen, je nach Risiko und Geschwindigkeit der Setzungen (Tabelle 7-9).

## 8 Konzept für ein Monitoring-basiertes Lebenszyklusmanagement

Im LZM, wie es im Kapitel 5 erläutert wurde, können Monitoringdaten an unterschiedlichen Ansatzpunkten wesentlich bei Entscheidungsfindungen unterstützen. Die Optimierungen auf der Netzebene können Fragestellungen zur Quantifizierung der Risiken bei einzelnen Bauwerken hervorrufen. Bei der Kombination der gewonnenen Monitoringdaten von ähnlichen Bauwerken unterschiedlichen Alters oder Schädigungsstadien, lassen sich Prognoseunsicherheiten reduzieren und die Mehrjahresplanung mit Investitionsbedarf wird zuverlässiger.

### 8.1 Ansatzpunkte für Einsatz von Monitoring

Drei unterschiedliche Situationen können Anlass geben, eine Monitoringmaßnahme umzusetzen. Dies kann zum einen die Verbesserung der Beurteilung der Restnutzungsdauer eines Einzelobjektes sein, die jeweils für die bestimmte Interventionsart (Instandhaltung, Instandsetzung oder Rückbau) zu bestimmen ist. Zum Zweiten kann auf der deskriptiven Ebene die Auswirkung einer spezifischen Schädigung überwacht werden. Und zuletzt können Messdaten zur Einschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Zustandes verwendet werden. Letzteres, eine Quantifizierung des Risikos gemäß Kap. 6.4.2, ist die Voraussetzung für eine risikobasierte Priorisierung zwischen unterschiedlichen Bauvorhaben.

Bild 8-1 zeigt drei Ansatzpunkte für ein Monitoring im LZM.

#### 8.1.1 Beurteilung der Restnutzungsdauer pro Bauwerk

Die Beurteilung der Restnutzungsdauer erfolgt individuell pro Brücke und der Detaillierungsgrad der Beurteilung hängt davon ab, welche Folgen die Entscheidung haben wird. So wird zunächst pro Bauwerk die Restnutzungsdauer mithilfe der Zustandsnote oder des Traglast-Indexes abgeschätzt. Wenn das Ergebnis eine der nächsten Entscheidungen auf Netzebene beeinflussen wird, so ist eine genauere Ermittlung der Restnutzungsdauer erforderlich.

Für die Restnutzungsdauer gibt es zwei Betrachtungsweisen:

- 1) Tragsicherheit: Wie lange kann das Bauwerk sicher betrieben werden, bis der KPI Zuverlässigkeit einen Wert erreicht, der nicht akzeptierbaren Risiken entspricht.
- 2) Lebenszykluskosten: Wie lang kann mit der Instandsetzung gewartet werden, bis die Kosten überproportional steigen (KPI Kosten).

Als Restnutzungsdauer ist die kürzere Dauer dieser zwei Betrachtungen zu verwenden. Somit ist der KPI Restnutzungsdauer hauptsächlich von der zeitlichen Weiterentwicklung der KPIs Zuverlässigkeit und Kosten abhängig.

Monitoringmaßnahmen können die Beurteilung der Restnutzungsdauer unterstützen, indem bessere Informationen zum Zustand und der daraus folgenden Maßnahme zur Behebung vorliegen.

Für beide Betrachtungen stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, um auf die weiteren KPIs Sicherheit, Verfügbarkeit der Brücke und Kosten mit jeweiligen Performance-Threshold (Grenzwerten) zu schließen.

Beispiele von Monitoringanwendungen, welche auf die Ermittlung oder Verlängerung der Restnutzungsdauer abzielen, sind:

- Bis zur Instandhaltung: Feuchtigkeit, undichte Fahrbahnübergänge, Fugen, Entwässerungsleitungen in Brückenhohlkästen.
- Bis zur Instandsetzung: Feststellung der Korrosionsinitiierung durch Messen der elektrochemischen Prozesse (Potenziale).
- Bis zum Rückbau: z. B. Verformungen (Durchbiegungen). Voraussetzung sind Kraftumlagerungen, die vom Tragsystem abhängig sind.

Wenn das Risiko bezüglich Tragsicherheit (KPI Zuverlässigkeit) als hoch eingestuft wird, sind neben den periodischen Bauwerksprüfungen insbesondere kontinuierliche Monitoringmaßnahmen vorzusehen (Bild 8-2). Benachrichtigungen sind bei vordefinierten Schwell- oder Alarmwerten zu organisieren. Gemeinsam mit der Festlegung dieser Grenzwerte sind ebenfalls die voraussichtlichen Maßnahmen bei Eintritt einer Überschreitung derselben aufzuzeigen. Mit kontinuierlichen Monitoringmaßnahmen kann eine neue Zuverlässigkeit ermittelt werden, indem die Versagenswahrscheinlichkeit mit den

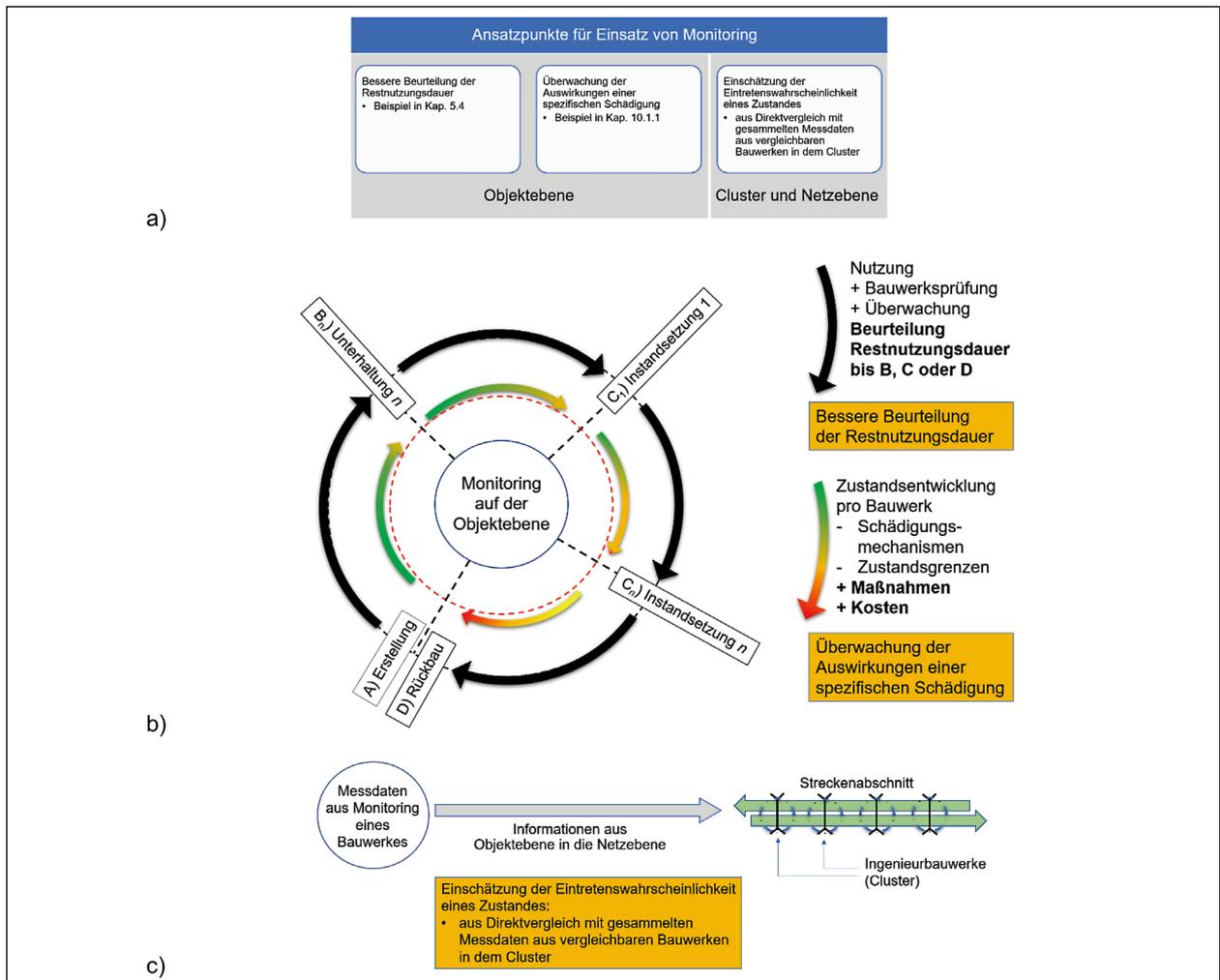


Bild 8-1: Ansatzpunkte für Monitoring: a) Überblick, b) Erweiterung der schematischen Darstellung des LZM auf Objektebene aus Kap. 5.1 sowie c) LZM auf Netzebene (eigene Darstellungen)

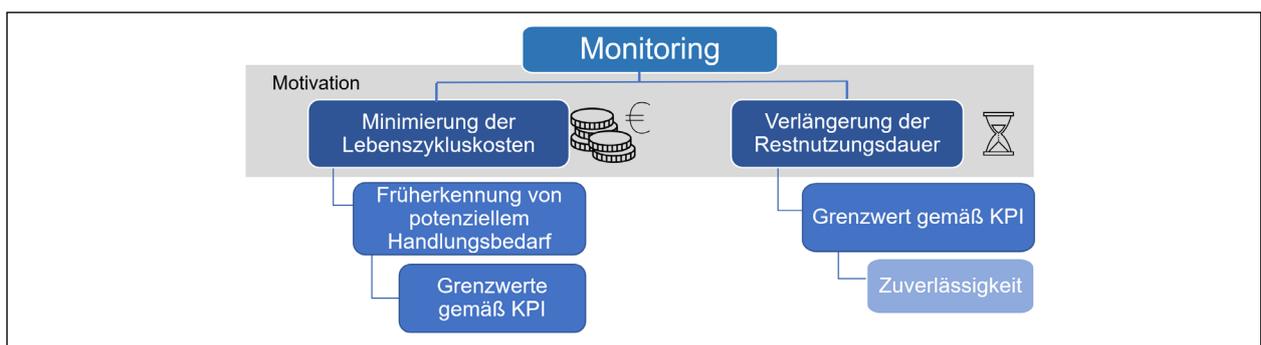


Bild 8-2: Einsatz von Monitoring zur Verlängerung der Restnutzungsdauer oder zur Senkung der Lebenszykluskosten

Messwerten verknüpft wird. Die gemessenen Daten können z. B. zur Aktualisierung oder Verfeinerung von statischen Modellen verwendet werden.

Gelingt es die Restnutzungsdauer mit dem Monitoringsystem um mehrere Jahre zu verlängern, kann wertvolle Zeit für koordinierte Maßnahmen mit geringeren Verkehrsbeeinträchtigungen gewonnen werden. Unter Umständen kann ein permanentes Monitoring aufrechterhalten werden, sodass das

Monitoring bauliche Maßnahmen zeitweise gänzlich ersetzt.

In dieser Kategorie zur Beurteilung der Restnutzungsdauer pro Bauwerk fallen auch jene Monitoringmaßnahmen, die ausgelöst werden, um bei Bauwerken in gutem oder annehmbarem Zustand rechtzeitig Anomalien festzustellen. Ein Beispiel kann wie folgt illustriert werden: Eine eher jüngere Spannbetonbrücke (Alter < 20 Jahre) ist visuell in einem guten

Zustand. Die Restnutzungsdauer wird auf z. B. 30 Jahre geschätzt, mit dem planmäßig erwarteten Ersatz der Abdichtung. Eine Überwachung der Durchbiegungen in Form eines Präzisionsnivelement wird alle 5 Jahre wiederholt und die Durchbiegungen werden überwacht. Somit wird die Annahme einer intakten Vorspannung bestätigt, welche zur Einschätzung der Restnutzungsdauer geführt hat.

### 8.1.2 Schädigungsmechanismen und Zustandsgrenzen eines Bauteils

Monitoringmaßnahmen können im Lebenszyklusmanagement angeordnet werden, um den Fortschritt von Schädigung festzustellen, welche wiederum den Zeitpunkt der Intervention voraussichtlich vorgeben wird. Diese Monitoringmaßnahmen können die gleichen Methoden oder die gleichen Anwendungen sein, wie bei der Ermittlung der Restnutzungsdauer. Der Unterschied liegt in der Motivation, resp. in der Begründung aus Sicht des Lebenszyklusmanagements, das Monitoring auszulösen. So steht im Vordergrund, die Schädigungsmechanismen und die Geschwindigkeit des Schädigungsfortschrittes zu bestimmen sowie die Zustandsgrenzen zu ermitteln, ab wann eine Maßnahme überproportional teurer wird.

Eine detaillierte Analyse erfolgt schadens- und bauwerksspezifisch. Ausgehend vom Brückencluster werden pro Brückentyp für typische konstruktive Details oder speziell eingesetzte Produkte und Werkstoffe jene Mechanismen ermittelt, welche den Alterungsprozess des maßgebenden Bauteils bestimmen.

Das Hauptaugenmerk in dieser Gruppe ist die Früherkennung von potenziellem Handlungsbedarf, indem die Schädigungsgeschwindigkeit für repräsentative Bauwerke bei unterschiedlichem Schadensfortschritt überwacht werden. Ziel ist es die Grenzzustände für die unterschiedlich umfangreichen Maßnahmen zu definieren. Diese Monitoringmaßnahmen bezwecken nicht die Auswirkungen des Schadens auf das Tragwerksverhalten, sondern den Prozess der Schädigung selbst zu erfassen, damit bessere Prognosen und Extrapolationen von Ergebnissen auf den Rest des Brückenbestandes gemacht werden können.

Beispiele dafür sind die Fließstrommessungen zur Identifizierung von Korrosionsinitiation oder die bildbasierte Risserfassung bei AKR-gefährdetem Beton.

### 8.1.3 Quantifizierung des Risikos und der Nutzerkosten

Im Lebenszyklusmanagement wird ein optimiertes System angestrebt. Die Optimierung erfolgt primär in der Bestimmung der Umsetzungsreihenfolge der anstehenden Maßnahmen. Erst im zweiten Schritt erfolgt die optimierte Festlegung des Maßnahmenumfangs, welche stark vom Ausführungszeitpunkt abhängig ist. Für den Vergleich der Projekte sind Strecken-KPIs (Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Kosten) erforderlich. Diese müssen Prognosen für deren Veränderung über die Zeit beinhalten. Dabei sind ebenfalls Szenarien zu erstellen, bei denen die Maßnahmen nicht umgesetzt werden. Bei der Nutzenfunktion (siehe Kap. 6.3.2) werden auch die Verkehrsmenge DTV, die Verkehrszusammensetzung und die Umfahrungsmöglichkeiten berücksichtigt.

Ziele der Quantifizierung des Risikos und der Nutzerkosten:

- Priorisierung zwischen Abschnitten durch Quantifizierung der Risiken oder Nutzerkosten,
- Einflussfaktoren aus Trasse für Entscheidungen bei den Bauwerken,
- Die Kosten müssen mit dem jährlichen Budget übereinstimmen,
- Verbleibende Zeit pro Abschnitt ermitteln.

Eine risikobasierte Priorisierung der Maßnahmen bedeutet, dass die Kosteneffizienz der erzielten Risikoreduktion beurteilt werden soll. Zur Quantifizierung der Risiken können ebenfalls Monitoringmaßnahmen eingesetzt werden, welche einen vergleichbaren Charakter aufweisen oder welche zur Quantifizierung eines bestimmten Risikos beitragen:

- Hangrutschungen in bergigem Gelände oder Baugrundsetzungen,
- Früherkennung von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR),
- Chlorideindringung in Tragwerksteile im Sprühnebelbereich,
- Kraftmessungen in Verankerungen und Auflagern,
- Überwachung von Kolkbildung bei Fundamenten im Gewässerraum.

## 8.2 Optimierung des LZM im Streckenabschnitt

Die Optimierung des LZM im Streckenabschnitt hat auf die Terminierung der Maßnahmen und somit auch auf den Umfang der Arbeiten den größten Einfluss. Da diese Optimierung sich als stetiger Prozess mit laufenden Anpassungen der Reihenfolge der Gesamtinstandsetzungen darstellt, hängt die Effizienz der gesamten Planung von der Qualität der Entscheidungsgrundlagen ab. Dabei sind für die erste Planung mehrere Iterationen erforderlich, bis jedem Straßenabschnitt ein Zeitfenster für die nächste Gesamtinstandsetzung zugewiesen werden kann. Idealerweise wird davor für jede Brücke die Restnutzungsdauer ermittelt und mit den voraussichtlichen Maßnahmen die Kosten abgeschätzt.

Die gemeinsamen Installationen, das Einrichten einer temporären Verkehrsführung für die Bauphasen sowie Synergien in der Planung und Genehmigung von Projekten, sprechen dafür, die Projektumsetzung der Bauwerke zusammen mit dem Straßenabschnitt abzuwickeln. Obwohl der Zeitpunkt der Brückeninstandsetzung nicht dem finanziellen Optimum der Lebenszykluskosten der Brücken entspricht, lassen sich mit den Gesamtinstandsetzungen von Bundesstraßenabschnitten bedeutende Einsparungen erzielen. Zudem werden die Verkehrsbeeinträchtigungen minimiert.

Das klassische Vorgehen in der Entscheidungsfindung der nächsten Maßnahmen bei einer Brücke durchläuft das in Bild 8-3 dargestellte Ablaufschema.

Voraussetzung für ein LZM ist der Zugriff auf die Bauwerksdaten inklusive Pläne und Dokumentation aller bisher durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen. Von besonderem Interesse sind das Maßnahmenjahr, eingesetzte Produkte sowie die Dokumentation der letzten Bauwerksprüfungen.

### 8.2.1 Aufbau des LZMs für Brücken

Bei jedem Bauwerk ist eine aktualisierte Zustandserfassung erforderlich. Die Zustandserfassung erfolgt aktuell zumeist auf Grundlage der Bauwerksprüfung. Die Qualität der Bauwerksprüfung hat einen enormen Einfluss auf alle künftigen Entscheidungen. Einerseits, weil weitere Iterationen in der Erhaltungsplanung entstehen und andererseits, weil unentdeckte Schäden zu einem späteren Zeit-

punkt unter Dringlichkeit behoben werden müssen. Die Häufigkeit der Bauwerksprüfung kann dem Risiko des Bauwerkes angepasst werden.

Bei der Bauwerksprüfung sind nicht nur die Schäden aufzunehmen, sondern die Schadensursachen zu eruiieren und eine Zustandsprognose zu erstellen. Mit der Prognose ist die Weiterentwicklung der KPIs abzuschätzen. Der Zeithorizont für diese Prognose muss den Zeitraum abdecken können, welcher erforderlich wird, um das Projekt mit den anderen Anliegen des Infrastrukturbetreibers koordiniert umzusetzen. Nicht selten sind dafür 10 Jahre erforderlich, weshalb als Zeitvorgabe für die Inspektion die doppelte Periodizität der Bauwerksprüfung (12 Jahre) angebracht sein kann.

Bei einem laufenden System können Monitoringmaßnahmen die Qualität der Bauwerksprüfungen verbessern oder Teile der Zustandserfassung abdecken. Zu Beginn, resp. beim Einstieg in ein LZM sind Monitoringmaßnahmen punktuell einzuführen, wenn sich die Zustandsprognose als schwierig herausstellt oder mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Der KPI Zuverlässigkeit kann unter Berücksichtigung der Unsicherheiten auch mit probabilistischen Methoden ermittelt werden. Mit Monitoringmaßnahmen können die normalen Unsicherheiten reduziert werden, um aufzeigen zu können, dass die Zuverlässigkeit genügt.

Die weiteren erforderlichen KPIs, sind die Kosten und die Verfügbarkeit mit den erwarteten Veränderungen in der Zeit. Die Entwicklung der KPIs kann abgeschätzt werden, indem der Bauwerksprüfer mit den Maßnahmen vertraut ist, welche zur Behebung der Schäden erforderlich sind. Die Erfahrung in der Projektierung von Bauwerkserhaltungsmaßnahmen, resp. Brückeninstandsetzungen, erhöht die Qualität der Maßnahmenempfehlung.

Der prognostizierte zeitliche Verlauf der KPIs kann als KPI Restnutzungsdauer zusammengefasst werden und beschreibt die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes oder ausgewählter Bauteile. Die Dauerhaftigkeit beeinflusst die Entscheidungsfindung der Erhaltungsplanung stark, sobald präventive Erhaltungsmaßnahmen ohne Verkehrsbehinderungen ausgelöst werden können. Dies erfolgt in der Regel, wenn das LZM über mehrere Jahre operativ erfolgreich betrieben wurde. Beim Einstieg oder bei der Einführung eines LZM genügt für die erste Iteration die Entscheidung, wann eine Gesamtinstandsetzung erfolgen soll, um die Bausubstanz erhalten zu

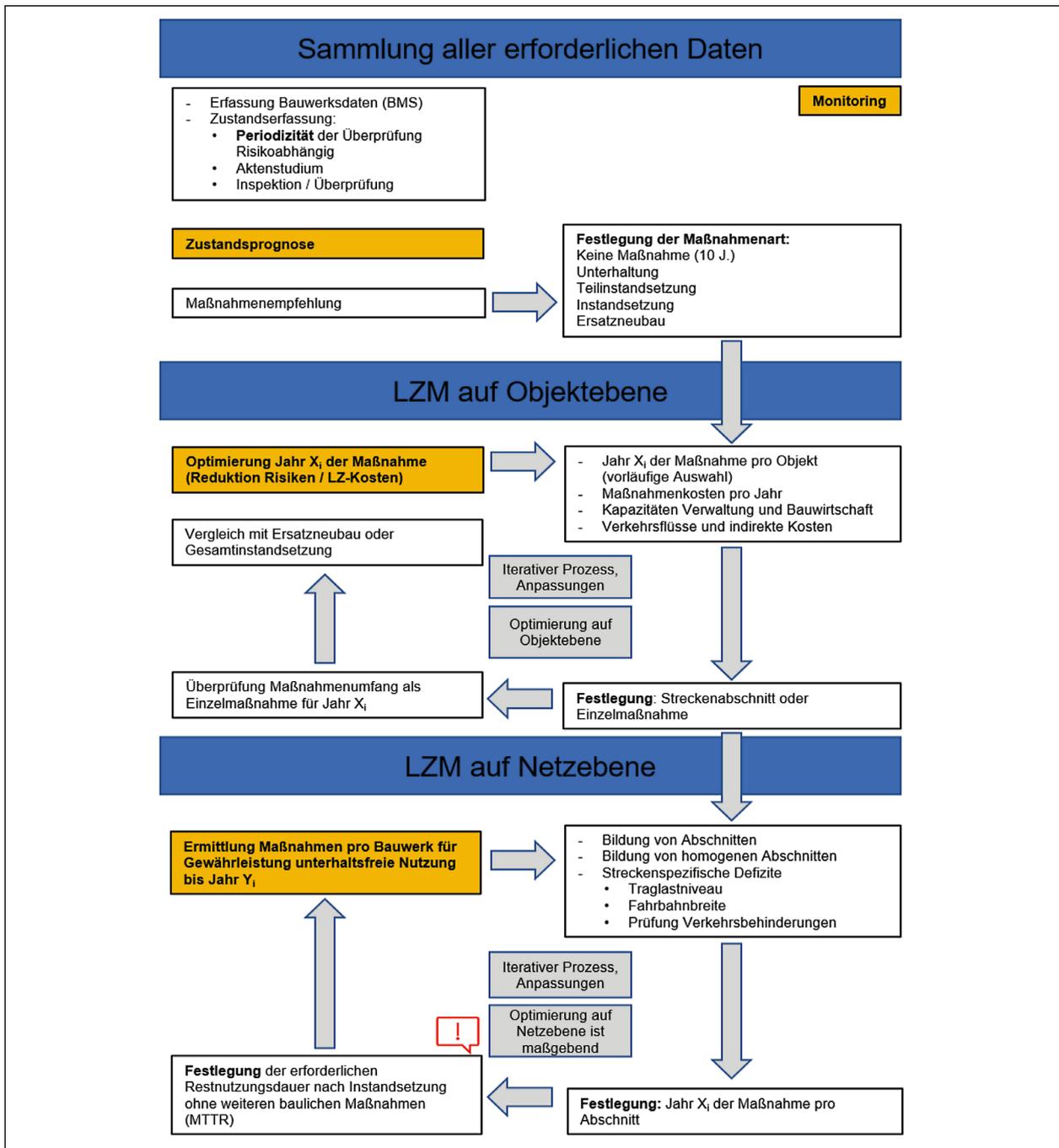


Bild 8-3: Schematischer Ablauf der Entscheidungsfindung bei Brücken im Zusammenhang mit Maßnahmen am Straßenabschnitt (eigene Darstellung)

können oder ob das Bauwerk einem Ersatzneubau weichen soll.

Das Resultat der bisherigen Schritte, welche z. B. jährlich nach den Bauwerksprüfungen an einem Sechstel des Brückenbestandes gemacht werden sollten, ist die Angabe eines Jahres für die nächste Maßnahme mit den erwarteten Maßnahmenkosten pro Bauwerk. Die Summe aller Maßnahmenempfehlungen ergibt den Finanzbedarf für die Bauwerkserhaltung.

Aus Sicht des LZMs sind die Jahre mit Kostenspitzen und einer hohen Anzahl an zugewiesenen Bauwerken in einer nächsten Iteration zu prüfen, bei welcher die Zustandsbeurteilung und -prognose mit einem größeren Detaillierungsgrad wiederholt werden sollen. Diese Wiederholung ist eine wichtige Vorarbeit, um die knappen personellen Ressourcen innerhalb der Bauverwaltung und in den projektierenden Ingenieurbüros vor Belastungsspitzen zu schützen und deren Unterlassung eine direkte Ursache von Projektverzögerungen darstellt, da die

Erhaltungsplanung schlussendlich nicht geordnet umsetzen werden kann.

Mit den ermittelten Angaben muss entschieden werden, ob das Bauwerk in einem Gesamtinstandsetzungsprojekt des Straßenabschnittes umgesetzt werden kann oder ob es als Einzelobjekt, d. h. gesondert, instandgesetzt werden muss.

### 8.2.2 Lebenszyklusmanagement Brücken auf Netzebene

Mit den Angaben des Zeitpunktes der Instandsetzung pro Bauwerk ist ein Instandsetzungsprogramm für die Straße zu erstellen, das mit den Bedürfnissen / Anforderungen der Straße abgeglichen ist. Dieses ist größtenteils durch den Zustand der Straßenbeläge im Spielraum eingeschränkt, da die Unterhaltskosten ab einer fortgeschrittenen Schädigung des Belages sehr stark steigen. Ebenso können die Erneuerung der Straßenentwässerung, der Fahrzeugrückhaltesysteme oder der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen den erforderlichen Zeithorizont mitbeeinflussen. Daraus sollte die Bildung von Straßenabschnitten erfolgen, welche mit einer konzentrierten Baumaßnahme mit einer den Verkehrsteilnehmern zumutbaren Baustellenlänge effizient instandgesetzt werden können.

Falls die streckenspezifischen Anforderungen, wie das Traglastniveau oder die Fahrbahnbreite, nicht erfüllt sind, können notwendige Verstärkungen oder Verbreiterungen dazu führen, dass ein Brückenersatzneubau anstelle einer Brückeninstandsetzung in Betracht gezogen werden muss. Steht dies nicht im Einklang mit den Annahmen, welche bei der Terminierung der Maßnahmen (Instandsetzungsjahre) der einzelnen Brücken getroffen wurden, so ist der Zeitpunkt der Straßenabschnittsinstandsetzung neu zu beurteilen und mit den finanziellen Ressourcen abzustimmen. Die Änderung der Instandsetzungsjahre eines Straßenabschnittes bringt enorme koordinative Aufwendungen mit sich, da Umleitungen auf Nachbarprojekte abgestimmt werden müssen und sich sogar der Umfang der geschätzten baulichen Anpassungen ändern kann. Diese verdeutlicht die Notwendigkeit, dass diese Abklärungen in der Größenordnung von ca. 10 Jahren im Voraus erfolgen sollten. Eine zuverlässige Planung wird erst erreicht, sobald alle Bedürfnisse der unterschiedlichen Infrastrukturbestandteile und alle Streckenabschnitte untersucht und koordiniert wurden. Was wie eine unmögliche Aufgabe aussieht, kann nach ca. 10 bis 20 Jahren Erhaltungsplanung

erreicht werden, indem sukzessive der Detaillierungsgrad gesteigert wird und die Prioritäten risikobasiert gesetzt werden.

Ist der Zeitpunkt für die nächste Instandsetzung des Straßenabschnittes definiert, muss als nächstes ein Zeithorizont nach der Instandsetzung definiert werden, der ohne weitere wesentliche bauliche Arbeiten auskommen soll. Die Maßnahmen pro Bauwerk können dann definiert und sowohl die Kosten als auch die Verkehrsbehinderungen neu ermittelt werden. Somit steht der Plan fest, dass die Brücke zum Jahr  $X_i$  instandgesetzt (oder ersetzt) wird und mit den Maßnahmen bis zum Jahr Y auskommen muss. An dieser Stelle sind Monitoringmaßnahmen wieder in Erwägung zu ziehen, um den Umfang der baulichen Maßnahmen möglichst zu reduzieren, z. B. indem ein Brückenersatz erst zum Jahr Y angestrebt und entsprechend möglichst auf Maßnahmen im Jahr  $X_i$  verzichtet wird. Zusätzlich kann ein Monitoring zum Einsatz kommen, wenn die Zuverlässigkeit der Brücke gering ist, um mit den Maßnahmen bis zum Jahr  $X_i$  zu warten.

Wenn immer möglich, sollten alle Brücken innerhalb eines Straßenabschnitts instandgesetzt werden. Waren bei einer Brücke keine Maßnahmen vorgesehen, sollten eventuell anstehende Maßnahmen durchgeführt werden, um diese Brücke zeitlich mit den anderen Objekten auf dem Abschnitt „gleichzuschalten“, damit die nächste Instandsetzung kombiniert erfolgen kann. Dies erfolgt, indem die unterhaltsfreie Zeit mit präventiven Maßnahmen gewährleistet wird. Dies können z. B. das Aufbringen von Oberflächenschutzsystemen oder bauliche Unterhaltungsmaßnahmen sein, um beispielsweise die Dichtigkeit von Fugen oder Entwässerungsleitungen zu garantieren. Instandsetzungsprojekte eignen sich auch, um die Installationen von Monitoringsystemen vorzunehmen. An dieser Stelle wird angeraten, jene Monitoringmaßnahmen vorzusehen, welche für die Datengewinnung zur besseren Beurteilung der Schädigungsmechanismen geeignet sind und innerhalb des Clusters für die anderen Brücken wertvolle Informationen liefern können.

## 8.3 Entscheidungsgrundlagen und Aufbereitung KPI

Kann die bauliche Maßnahme für eine Brücke auch mit einem Monitoringsystem nicht bis zum Zeitpunkt der Straßenabschnittsinstandsetzung warten, muss

sie vorgezogen werden. Dann sind entweder Überbrückungsmaßnahmen oder eine Einzelmaßnahme vorzusehen. Um Synergien zu nutzen, können mehrere Brücken zu einem Projekt zusammengefasst werden. Dies kann entweder über den Brückentyp oder aufgrund ihrer geografischen Nähe erfolgen.

Die Maßnahmentiefe ist auch hier vom Maßnahmenjahr abhängig. Die Maßnahmen sind aber in der Regel aufgrund des schlechten Zustandes eher dringlich. Nach der Festlegung der Maßnahme werden erneut die Kosten und die Verkehrsbeeinträchtigungen ermittelt und das Projekt ausgelöst. Einzelmaßnahmen binden verhältnismäßig viel Kapazitäten in der Bauverwaltung und der Bauwirtschaft, weshalb auf Teilinstandsetzungen, wenn möglich verzichtet werden sollte.

### 8.3.1 KPI Zuverlässigkeit

Die Definition der Zuverlässigkeit eines bestehenden Brückenbauwerkes ist mit großem Aufwand verbunden, weshalb Vereinfachungen erforderlich sind. Auf Netzebene ist der KPI Zuverlässigkeit auf andere Indikatoren zurückzuführen, welche auch von der Bauwerksdokumentation abgeleitet werden können.

Folgende Fragestellungen können für die Beurteilung der Zuverlässigkeit herangezogen werden:

- Was war der relevante statische Nachweis?
- Wie viele konservative Annahmen sind in den durchgeführten Nachweisen enthalten?
- Welche Monitoringmaßnahmen würden das Erreichen des Grenzzustandes (statisch gesehen) detektieren (Einwirkungen, Schnittkräfte oder Reaktionen)?
- Führt der Verlust der Vorspannung zu erkennbaren Deformationen?
- Können differenzielle Setzungen oder Hangverschiebungen zu sprödem Bauteilversagen führen (z. B. durch eine unzulässige Erhöhung der Querkraft in einem Steg)?

Es wird klar ersichtlich, dass mit Monitoringmaßnahmen eine bessere Beurteilung des KPI Zuverlässigkeit erreicht werden kann. Aus den Entscheidungsprozessen heraus, kann deshalb ein ungenügender Wert des KPI Zuverlässigkeit dazu führen, dass ein Monitoringsystem ausgelöst wird.

### 8.3.2 KPI Lebenszykluskosten

Für das LZM genügen in der Regel grobe Kostenschätzungen, die sich über Einheitspreise pro Brückenfläche ermitteln lassen. Die Einheitspreise sind jedoch vorsichtig anzuwenden und müssen auf Projektgröße und Komplexität der Maßnahmen angepasst werden. Bei den Vergleichen von Optionen müssen die Gesamtkosten über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Die Erfahrung zeigt, dass die Kosten von präventiven Maßnahmen klein gehalten werden können, wenn die gleichen Arbeitsarten in Kampagnen der baulichen Unterhaltung zusammengelegt werden können. Sobald die Abläufe eingespielt sind, kann damit die Schädigung sehr kosteneffizient verlangsamt werden. Die Teil- oder Gesamtinstandsetzungen, dank Monitoring, verzögert werden können. Diese Verzögerung der Instandsetzungen erzeugt größere Einsparungen als die Kosten der präventiven Maßnahmen, sodass die Lebenszykluskosten sinken.

### 8.3.3 KPI Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit der Infrastruktur kann häufig höher gewichtet werden als die Lebenszykluskosten. Beim KPI Verfügbarkeit sind ebenfalls die Risiken einer möglichen Sperrung und die Verkehrsbehinderung infolge von Instandsetzungsarbeiten enthalten.

## 9 Implementierung des Konzeptes und Anforderungen an Betreiber

In diesem Kapitel wird eine Hilfestellung zur Umsetzung eines Monitoring-basierten LZMs erarbeitet, welche folgenden Inhalt hat:

- Datengrundlagen: Generierung einer geeigneten Ausgangslage,
- Zustandsbeurteilungen: Verbesserung der Aussagekraft des Handlungsbedarfes,
- Zustandsprognosen: Abschätzung der Restnutzungsdauer pro Bauwerk,
- Streckenabschnitte: Schnittstelle mit Streckenabschnitten oder Zusammenzug von Einzelobjekten,
- Erhaltungsplanung: konzeptionelle Maßnahmenempfehlungen mit Kosten und Zeitpunkt,

- Monitoring: Einführung des Monitorings.

Die Anforderungen an den Betreiber werden erläutert, indem beziehungsweise auf die Prozesse innerhalb der Bauherrenschaft, personelle Ressourcen, fachliche Kompetenzen und technische Hilfsmittel analysiert werden. Dazu gehören die Kompetenzen und Entscheidungen an den Schnittstellen zwischen den Verantwortlichen unterschiedlicher Infrastrukturbestandteile. Der Einsatz von Monitoringdaten setzt voraus, dass ein rascher Zugriff auf die vorhandenen Bauwerksinformationen gewährleistet wird.

## 9.1 Datengrundlage

Als Grundlage müssen minimale Prozesse eines LZMs eingeführt sein, welche mit der Zeit weiter verfeinert werden können. Da in der Koordination von Maßnahmen der größte Nutzen aus dem LZM erzielt werden kann, wird eine Auslegeordnung benötigt. In einem iterativen Ablauf wird im LZM sichergestellt, dass der Zeitpunkt für die Instandsetzung und der Umfang der Arbeiten sowohl mit der Zustandsentwicklung des Bauwerkes als auch mit den zulässigen Verkehrsbeeinträchtigungen im Einklang sind.

Die größte Herausforderung besteht dabei in der Datenbewirtschaftung und in der raschen Zugänglichkeit der relevanten Bauwerksdaten. Für alle Brücken müssen nicht nur die Pläne und Prüfberichte vorliegen, sondern auch die Dokumentationen der Bauwerkshistorie mit allen relevanten baulichen und betrieblichen Maßnahmen an der Brücke. Idealerweise sind vorhandene und ausgewertete Monitoringdaten in aussagekräftiger Form verfügbar. Die Aktualität der Daten entscheidet über die Effizienz des ganzen Prozesses. Die Aufwendungen zur Bereitstellung dieser Datengrundlage und zum Führen eines vollständigen Archivs sind groß und es verleitet oft dazu, darauf zu verzichten. Die Mehraufwendungen zur Aktualisierung von veralteten Daten und der Abgleich mit dem Bestand, durch Laserscans zur Erfassung der Geometrien oder Georadarmmessungen zur Ortung und Definition von Bewehrungen und Vorspannungen sowie Fehlentscheidungen infolge Falscheinschätzungen aufgrund von ungenügend dokumentierten Erhaltungsmaßnahmen sind in jedem Projekt enorm. Ein Vielfaches der Archivkosten wird in den Projekten ausgegeben, wenn die Unterlagen nicht komplett sind. Entsprechend vielversprechend ist im Rahmen der Di-

gitalisierung die Einführung eines Systems zum Datenmanagement im Speziellen an der Schnittstelle zum Monitoring. Die Einführung eines Datenmanagements allein genügt jedoch als solches nicht. Das Betreiben und aktuell Halten der Brückeninformationen in einem Datenmanagement mit zentraler Datenablage kann als Grundanforderung für ein LZM und die Entscheidungsfindungen betrachtet werden. Eine maßgebende Anforderung an die Daten ist, dass die Semantik der zu erfassenden Daten im Voraus definiert ist und dass der Aufwand für die Datengewinnung im Verhältnis zum Nutzen der Daten steht. Die Definition der Datenstruktur und des erforderlichen Detaillierungsgrads der Daten muss durch erfahrene Erhaltungsplaner und Spezialisten in der Brückenerhaltungsplanung definiert werden. Schlecht erfasste Daten würden den Nutzen der Datenmanagementsystems wieder aufheben. Es ist zu erwarten, dass im Verlauf dieses Jahrzehntes die Fortschritte in BIM (Building Information Modelling) und auch in den digitalen Zwilling die Anforderungen an die Datenlage verändern werden, sobald die Aufwendungen der Datenerfassung respektive der Input in das Datenmanagementsystem automatisierter erfolgt.

## 9.2 Zustandsbeurteilungen

Im Anschluss erfolgt im Turnus der Bauwerksprüfungen von 6 Jahren eine Zustandsbeurteilung (Bewertung) jeder Brücke auf deren Basis eine Abschätzung der Restnutzungsdauer erstellt werden kann. Bei Bauwerken, für welche beispielsweise in den nächsten 10 Jahren eine bauliche Maßnahme empfohlen wird, ist eine Bauwerksüberprüfung mit einer konzeptionellen Maßnahmenempfehlung auszulösen.

Die Zustandsbeurteilung ist in einem funktionierenden LZM das Hauptwerkzeug. Idealerweise ist jährlich eine konstante Anzahl von Bauwerken zu beurteilen und die Ergebnisse werden dazu verwendet, leichte Korrekturen der Planung im LZM vorzunehmen. Die fachliche Kompetenz der Bauwerksprüfer ist ein Schlüsselfaktor für das rechtzeitige Erkennen einer Schädigung in frühem Stadium. Bei der Implementierung sind insbesondere die beschränkten verwaltungsinternen Ressourcen kritisch, aus drei Gründen:

1. Die Resultate der unterschiedlichen Bauwerksprüfer und Bauwerksprüfungen müssen gegeneinander abgeglichen werden, um die Bedeu-

tung der Befunde relativ zueinander anzugleichen, und in einheitliche PIs und KPIs überführt werden, da nur eine einheitliche Beurteilung das Ziehen der richtigen Schlüsse gewährleistet.

2. Neu entdeckte Schäden werden teilweise dringliche Maßnahmen erfordern, welche in diesem Ausmaß nicht erwartet wurden. Die reaktiven Maßnahmen binden in der Regel ein Vielfaches der Ressourcen von Maßnahmen, welche im Rahmen eines normalen Workflows umgesetzt werden können.
3. Die Festlegung von kleineren präventiven Erhaltungsmaßnahmen, welche eine lokale Schädigung verlangsamen, ist mit einer überordneten Planung abzugleichen. Diese Planung ist zu Beginn bei der Implementierung des LZM aufgrund der noch anstehenden Iterationen nicht immer zuverlässig. Das Anordnen der Reparaturarbeiten und die Aktualisierung der Datenlage bindet zu Beginn viele Kapazitäten.

Die Organisation der Zustandsbewertungen und die Beauftragung von fachkundigen Bauwerksprüfern erfordert genügend Kenntnis des eigenen Brückenbestandes, um bei der Paketbildung der Aufträge Synergien nutzen zu können und die Kapazitäten des Ingenieurmarktes nicht zu übersteigen. Die wichtigste Anforderung an den Betreiber ist, dass die Verantwortlichen für die Zustandsbeurteilungen über genügend Entscheidungs- und Vergabekompetenzen verfügen, damit nur qualifiziertes Fachpersonal die Bewertungen in hoher Qualität vornehmen.

Die Prüfberichte müssen nach DIN 1076 die wesentlichen Schädigungen dokumentieren. Aus den Berichten soll es möglich sein, die Schadensentwicklung durch den Vergleich der Berichte abzuleiten und zu beurteilen. Der Betreiber stellt sicher, dass die für das LZM erforderlichen Informationen des Bauwerkszustandes durch die Bauwerksprüfungen abgedeckt werden.

### 9.3 Zustandsprognosen

Bei der Einführung der Zustandsprognosen erfolgt dies zunächst mit der Bewertung des Bauwerksprüfers, welcher vor Ort handnah und spezifisch für die Umgebung den zeitlichen Verlauf des gefundenen Schadens beurteilen soll. Nur mit genügend Erfahrung können Bauwerksprüfer den zeitlichen Verlauf

der weiteren Schädigung richtig einschätzen. Dies ist durch die Ausschreibungsverfahren sicherzustellen.

Pro Brücke ist im Anschluss ein Planungszeitpunkt für die nächste Maßnahme und die Größenordnung der Kosten abzuschätzen. Bauwerke, für die keine Maßnahmen im Zeitraum der nächsten 10 Jahre erwartet werden, können mithilfe von Daten aus den Clustern (Extrapolation aus Nutzungsdauer von ähnlichen Bauwerken) approximativ festgelegt werden.

Für die Zustandsprognosen sind erfahrene Fachpersonal sowie der vollumfängliche Zugriff auf die Bauwerksdaten und die früheren Inspektionsberichte erforderlich.

### 9.4 Streckenabschnitte

Für jeden Streckenabschnitt ist ein Zeithorizont für die Erneuerung der Straße vorzusehen. Dies erfordert eine verwaltungsinterne Koordination der unterschiedlichen Fachbereiche. Bauwerke, welche nicht bis zur Instandsetzung gemeinsam mit der Straße warten können, sind genauer zu untersuchen:

- Welches sind die maßgebenden Schädigungsmechanismen?
- Wie groß sind die Prognoseunsicherheiten und können diese durch ein Bauwerksmonitoring reduziert werden?
- Besteht das Potenzial, dass mit dem Monitoring längere Nutzungsdauern ermöglicht werden können, um mehr Flexibilität bei der Maßnahmenplanung und -optimierung zu erhalten?
- Einleiten von vorgezogenen Maßnahmen: Gibt es weitere Bauwerke im gleichen Streckenabschnitt, für welche ebenfalls gleichzeitige Vorausmaßnahmen erforderlich sind und zusammengefasst in einem Projekt umgesetzt werden können?

Die Erneuerung von Straßenabschnitten im Fall von Asphaltbelägen erfolgen im Groben ca. alle 15 bis 30 Jahre und wird vom Belagszustand ausgelöst. Um in einen festen Zyklus hineinzukommen, müssen die einzelnen Infrastrukturteile eingetaktet werden. Dies kann erst zuverlässig erfolgen, wenn eine übergeordnete Planung vorliegt. So muss mindestens die Reihenfolge der Straßenabschnittssanie-

rungen definiert werden. Die größte Schwierigkeit besteht darin, dass die Maßnahmen mit der Finanzplanung übereinstimmen. Bei der Implementierung ist zu erwarten, dass die Kosten der zuvor definierten Maßnahmen die zur Verfügung gestellten finanziellen Ressourcen übersteigen.

Da eine Reduktion der Lebenszykluskosten sowohl durch Koordination als auch durch die Tatsache, dass die Maßnahmen an den Brücken nicht „zu spät“ umgesetzt werden, erreicht wird, besteht die Gefahr, dass eine Priorisierung aus finanztechnischen Gründen in der Bauwerkserhaltung die Lebenszykluskosten insgesamt steigern. Als Anforderung an den Betreiber ist deshalb festzuhalten, dass ein Verständnis dafür aufgebaut werden muss, dass eine temporäre Erhöhung der Erhaltungsausgaben in der Regel zu tieferen Gesamtausgaben führt und umgekehrt, dass sich kurzfristiges Einsparen durch eine Reduktion des Unterhaltes auf lange Dauer als teurer herausstellt da umfanglichere Instandsetzungsmaßnahmen oder sogar häufigere Brückenersatzneubauten erforderlich werden.

Ausbau und Netzverbesserungen (Modernisierungsnetz) sind im Hinblick auf das LZM von Brücken zentrale Eckpunkte einer Erhaltungsstrategie. Da an Bauwerken, welche ohnehin ersetzt werden müssen, keine Instandsetzungen während ca. 20 Jahren vor dem Abbruch umgesetzt werden sollen. Mögliche Verzögerungen bei Ausbauprojekten stellen aber ein großes Risiko dar und sind heute entsprechend ein Hauptanwendungsfeld des Monitorings.

## 9.5 Erhaltungsplanung

Sobald die beabsichtigten Instandsetzungszeitpunkte der Straßenabschnitte und die Zustandsprognosen bekannt sind, kann die Maßnahmenplanung pro Brücke erfolgen.

Die KPIs Verfügbarkeit, Lebenszykluskosten und Zuverlässigkeit sowie deren erwartete Entwicklung, sprich die Restnutzungsdauer, werden für die Entscheidungsfindung abgewogen. Sicherlich werden während einem Implementierungszeitraum die Mittel dort eingesetzt, wo der Nutzen gegenüber den Kosten maximiert wird, respektive die Risiken am stärksten reduziert werden. Eine mathematische oder automatisierte Entscheidungsfindung über den Zeitpunkt und die Schwere der Maßnahmen darf nicht erwartet werden. Vielmehr sind die Simu-

lationen für Zustandsprognosen auf Netzebene (z. B. EPING) Indikatoren dafür, wo eine weitere Koordination und Optimierung angestrebt werden sollen.

Die Mittel für diese Maßnahmen müssen bereitgestellt werden. Unterschiedliche Finanzierungsquellen, z. B. aus Förderprogrammen für bestimmte Schädigungen, dürfen trotz administrativen Schwierigkeiten nicht zur Splittung von Maßnahmen führen, weil dies zu Mehrkosten und größeren Verkehrsbeeinträchtigungen führt.

Sobald ein LZM eingeführt ist, indem die Mehrheit der Projekte größtenteils umgesetzt werden, kann die Optimierung unter Verwendung von aus Monitoringdaten extrahierten Zustandsinformationen erfolgen. Davor kommen Monitoringanwendungen zum Einsatz, insbesondere bei Problembrücken, wie in den Fallstudien in Kapitel 3.2.2 erläutert wurde.

## 9.6 Monitoring

Die Implementierung des Monitorings als Grundlage für das LZM bedingt, dass bekannt ist, bei welchen Brücken und Brückentypen konkret eine Optimierung stattfinden soll. Daher muss ein LZM bereits operativ sein.

Im Hinblick auf die Verwendung der Monitoringdaten zur Verbesserung der Schädigungsmodelle oder zur Verbesserung der Zustandsprognosen sollte ein Datenaustausch zwischen den Objekten mit vergleichbarem Umfeld und idealerweise unterschiedlichem Schädigungsgrad stattfinden. Diese technische Organisation würde ebenfalls die Semantik für die Datenauswertung definieren, damit die Schädigungsprozesse und deren Entwicklungsgeschwindigkeit auf breiter Basis beurteilt werden können. Der fachliche Austausch sollte über die Verwaltungseinheiten hinweg organisiert werden.

Die Anforderungen an den Betreiber für die Einführung des Monitorings müssen von Fall zu Fall aufgestellt werden. Grundsätzlich können alle Monitoringsysteme und -auswertungen ausgelagert werden, respektive von beauftragten Fachingenieuren durchgeführt werden. Effizienter wird es, wenn der Betreiber im Rahmen der Erhaltungsplanung mit den Daten direkt arbeiten kann, weil dadurch Schnittstellen zwischen den Systemen entfallen, welche die Prozesse verlangsamen. Die Schnittstellen zwischen den Systemen sollten möglichst

vermieden werden. Eine Modernisierung der Monitoringinfrastruktur, welche beispielsweise mit den Arbeiten in Betriebsleitzentralen kombiniert werden kann, würde zu einem schnelleren Fortschritt führen.

Optimal ist, wenn ein Brückenmanagementsystem (BMS) eingeführt ist, welches allen Beteiligten Zugriff auf alle aktuellen Bauwerksinformationen inklusive Pläne, Berichte, Zustandsdaten, die Maßnahmenhistorie und die vorgesehenen nächsten Maßnahmen mit der Zusammenfassung der Monitoringdaten zulässt.

## 10 Pilotstudien

Auf Basis der erarbeiteten Grundlagen zum Monitoring und zu den KPIs sowie dem Grobkonzept für ein Monitoring-basiertes LZM wurde eine Anwendungsstudie für ein bildbasiertes Monitoring und drei Pilotstudien konzipiert. Die Anwendungsstudie beinhaltet dabei das Monitoring von durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigten Betonoberflächen mit dem Ziel der Erkennung von Schäden und deren Fortschrittsentwicklung durch visuelle (bildbasierte) Überwachung. Die Pilotstudien greifen typische Fragestellungen (Bauwerksart, Scha-

densmechanismus, etc.) der Brückenerhaltung auf, die in konkrete Untersuchungskonzepte überführt werden. Dies umfasst die Auswahl von geeigneten Referenzobjekten mit entsprechenden Schadensbildern, konkrete Monitoring-Instrumentierungen und anzuwendende Datenauswertemethoden sowie die Benennung der zu extrahierenden Informationen als KPI für das LZM.

### 10.1 Anwendungsstudie – bildbasiertes Monitoring zur Schadensdetektion und Überwachung der Schadensfortschrittentwicklung

#### 10.1.1 Bildbasiertes Monitoring an der Talbrücke Brunn

Aktuelle Forschungsergebnisse und die Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich Computer Vision haben gezeigt, dass qualitativ hochwertige Bilddaten in Kombination mit Methoden und Verfahren der automatischen Bildanalyse ein enormes Potenzial bieten, die konventionelle visuelle handnahe Bauwerksprüfung zu unterstützen. Bild 10-1 verdeutlicht, wie umfangreich die visuelle Inspektion bei der Ermittlung der diversen Schadensarten eingesetzt wird. Daraus kann direkt abgeleitet werden, welchen großen Beitrag die visuelle Inspektion zur

SCHADENSART	SCHADENS-INDIKATOR	SCHADENS-ERHEBUNG	SCHADENSGRENZE	SCHADENS-EVALUIERUNG
Abplatzungen	Betroffene Fläche [m²] + Tiefe [cm]	Visuelle Inspektion + Direkte Messung	Klassen/Maximalwert	Noten gemäß Schadenshandbuch
Korrosion	Betroffene Fläche [m²]	Visuelle Inspektion + Direkte Messung	Klassen	Noten gemäß Schadenshandbuch
	Chloridgehalt [%]	Laboruntersuchung von Betonproben	kritischer Wert	Quantitative Analyse
	Prozentanteil des beschädigten Querschnitts der Bewehrung [%]	spezielle, detaillierte Inspektion	Obere Grenzwerte der Phase + Dauer der Schadensphasen	Noten gemäß Handbuch für Überwachung
Risse	Rissweite [mm]	Visuelle Inspektion + Direkte Messung	Klassen/Maximalwert	Noten gemäß Schadenshandbuch
Durchbiegung	langfristige Durchbiegung	Visuelle Inspektion + Direkte Messung	obere Grenze	Überwachung der Entwicklung der Durchbiegung
unzureichende Betondeckung	Betroffene Fläche [m²]	Visuelle Inspektion + Direkte Messung	Klassen	Noten gemäß Schadenshandbuch
unzureichende Betonqualität	Physikalische Parameter	Probenahme		Probenanalyse
Ermüdung	Schadensgrad	Visuelle Inspektion	Klassen	Schadenskatalog

Bild 10-1: Kategorisierung von Performance-Indikatoren und Bewertungsprozessen von Schäden an Brückentragwerken [4]

quantitativen Ermittlung der Schadensindikatoren leistet, die zur Bewertung des Bauwerkszustandes herangezogen werden.

Basierend auf den Vorarbeiten aus dem BAST-Projekt FE 89.0334/2017 "Unterstützung der Prüfung gemäß DIN 1076 durch (halb-) automatisierte Bildauswertung u. a. mittels UAV (Unmanned aerial vehicles)" [7] sowie weiteren aktuellen Forschungsergebnissen aus dem BMBF-Projekt „Bewertung alternder Infrastrukturbauwerke mit digitalen Technologien – AISTEC“ [11] zu dieser Thematik wird demonstriert, wie digitale Bilder am Beispiel der automatischen Rissdetektion eine Schadenserfassung und -lokalisierung sowie eine hochgenaue quantitative Ermittlung von Risslängen und -weiten gewährleisten und damit einen wichtigen Beitrag zu einem verlässlichen Schadensfortschrittsmonitoring und einer Zustandsbewertung des Bauwerks leisten können. Dies erlaubt wiederum genauere Prognosen zur Zustandsentwicklung und eine höhere Sicherheit bei der langfristigen Kostenplanung im Erhaltungsmanagement.

Anhand eines Referenzbauwerks wird demonstriert, wie die in der konventionellen Zustandsermittlung (handnahe Bauwerksprüfung) zur Schadenserhebung genutzte visuelle, vorwiegend manuelle, Inspektion und damit auch die Ermittlung der Schadensindikatoren durch qualitativ hochwertige Bilddaten und automatische Bildanalysenmethoden unterstützt und deutlich in ihrer Qualität und Effizienz gesteigert werden kann.

### Referenzbauwerk und Schadensbild

Als Referenzbauwerk wurde die in Bild 10-2 in einer Luftbildaufnahme dargestellte 696 m lange Talbrücke

Brünn der BAB 73 ausgewählt. Die 2007 fertiggestellte und 23 m hohe Spannbetonhohlkastenbrücke verfügt über insgesamt 14 Felder. Die Brücke besteht aus zwei Teilbauwerken, einem Teilbauwerk je Richtungsfahrbahn, die sich direkt nebeneinander befinden. Die maximal 20 m hohen Pfeiler sind als Vollquerschnitt und nach oben hin V-förmig ausgebildet.

Das noch sehr junge Bauwerk verfügt über ein ausgeprägtes Schadensbild an den Brückenpfeilern in Form einer starken und sehr dynamischen Rissbildung, die sehr wahrscheinlich auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) zurückzuführen ist. Die eingehenden Materialuntersuchungen hierzu laufen derzeit noch. Bild 10-3 zeigt eine Originalaufnahme der Risse auf einem Pfeiler und beispielhaft eine zugehörige Schadensskizze, die im Zuge einer Bauwerksprüfung zur Dokumentation der Risse auf dem Pfeiler angefertigt wurde. Die Risse verlaufen überwiegend vertikal, teilweise durchlaufend vom Pfeilerfuß bis Pfeilerkopf und sind bis zu 2 mm breit. Im Zuge der regelmäßigen Bauwerksprüfung und Besichtigungen wurde festgestellt, dass es in kurzer Zeit zu einer deutlichen Zunahme und Verbreiterung der Risse kam.

Aufgrund des erhöhten Feuchteintrags in den Herbst- und Wintermonaten und der damit verbundenen zunehmenden sehr dynamischen Rissbildung wird das Bauwerk konventionell in kürzeren Abständen geprüft und zusätzlich mit analogen Rissmarken an ausgewählten Stellen überwacht. Die Ablesung der Rissbreiten erfolgt dazu manuell zu bestimmten Zeitpunkten, jedoch nicht kontinuierlich. Bild 10-4 zeigt eine auf der Betonoberfläche



Bild 10-2: Talbrücke Brünn der BAB 73 (Foto: Norman Hallermann)

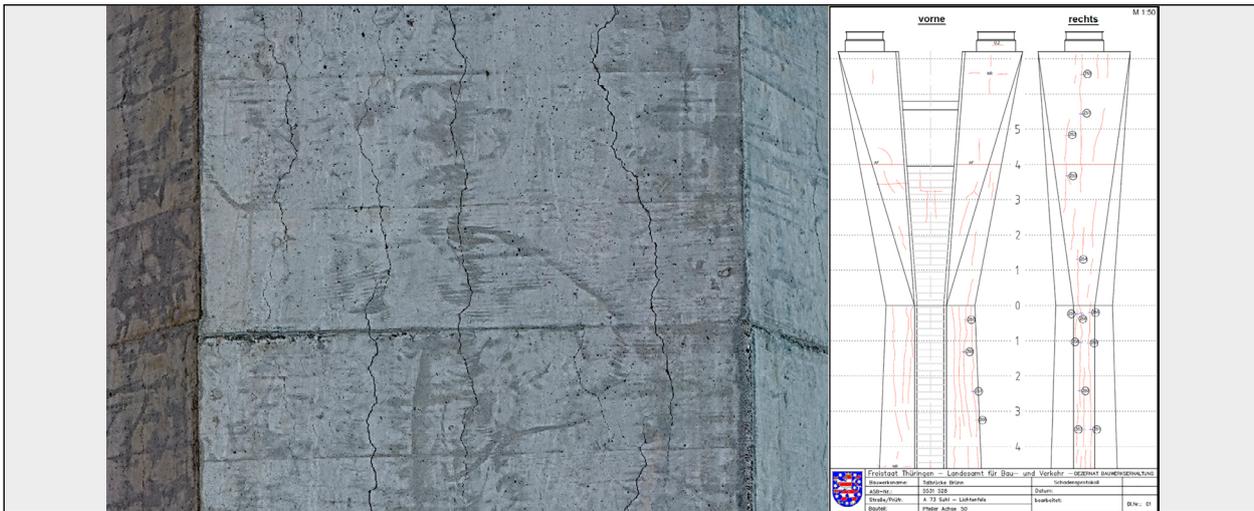


Bild 10-3: Pfeileroberfläche an der Talbrücke Brünn: Originalaufnahme mit Rissen (links) und beispielhafte Schadensskizze mit der Lage der Risse auf dem Pfeiler (rechts) (Foto: Norman Hallermann)

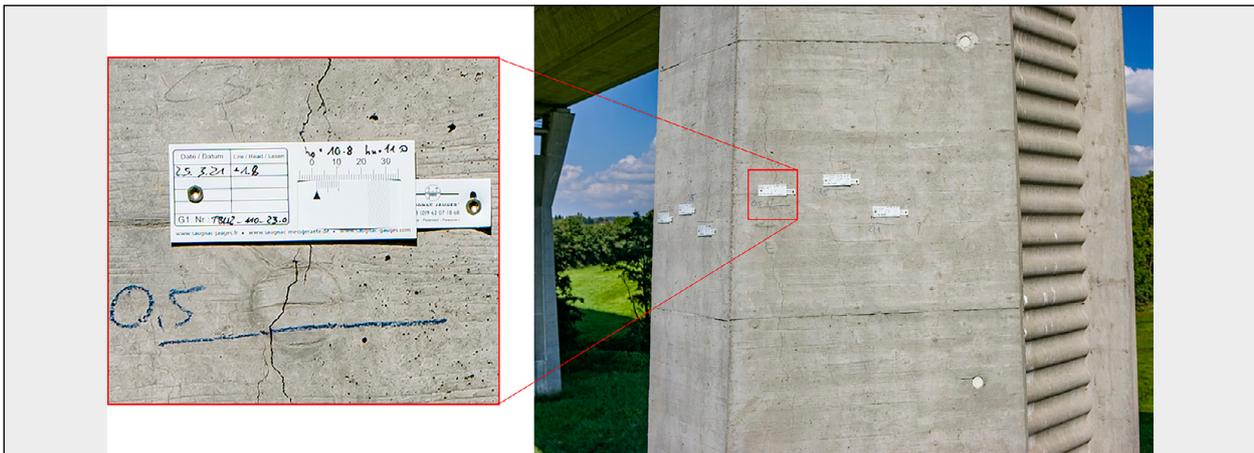


Bild 10-4: Rissmarken zur Überwachung der Rissbreiten am Pfeiler der Talbrücke Brünn (Fotos: Norman Hallermann)

angebrachte Rissmarke auf dem Pfeiler zur Überwachung der Rissbreiten.

Die dargestellten Risse treten an nahezu allen Seiten, insbesondere auf der Westseite, der Pfeiler auf. Es ist davon auszugehen, dass alle Pfeiler des Bauwerks von der AKR-Problematik betroffen sind, auch wenn noch nicht alle Pfeiler über dieses Schadensbild verfügen.

### Monitoringkonzept – Datenerfassung, -auswertung und Schadensanalyse

Die enorme Anzahl der Risse an bis zu 26 Pfeilern und insbesondere die starke Zunahme von Rissen sowie die Schwankungen der Rissbreiten erfordert ein flächenhaftes Monitoring der Bauwerksoberfläche, in möglichst kurzen Abständen, sodass auch Einflüsse aus Temperatur und Feuchtigkeit bei der Schadensbewertung mitberücksichtigt werden können. Ein flächenhaftes Monitoring zur Identifikation und exakten Lokalisierung von Rissen auf Beton-

oberflächen mit zugehörigen Schadensinformationen, wie Rissbreite, -länge und -orientierung, ist mit herkömmlichen Verfahren nicht bzw. nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich.

Auf Basis qualitativ hochwertiger Bilddaten mit entsprechender Auflösung kann ein flächenhaftes Monitoring umgesetzt werden. Dabei können die aufgenommenen Bilddaten einerseits für die automatische Bildanalyse zur Rissdetektion und andererseits zur 3D-Rekonstruktion des Bauwerks und somit auch zur Verortung aller detektierten Risse genutzt werden. Im Ergebnis liegt eine vollständige Erfassung, Analyse und Dokumentation der Schadensbilder über das gesamte Bauwerk, hier beispielhaft für einen Pfeiler, vor. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades und des vergleichsweise geringen Aufwandes bei der Datenerfassung und -analyse, kann solch ein Monitoring auch in kurzen Zeitabständen erfolgen.

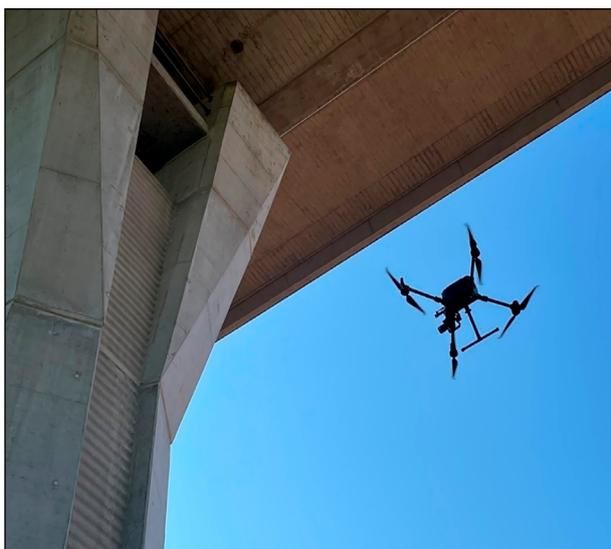


Bild 10-5: Drohnenbasierte Aufnahme eines Pfeilers der Talbrücke Brünn, durchschnittliche Aufnahmeentfernung ca. 2 m (Foto: Norman Hallermann)

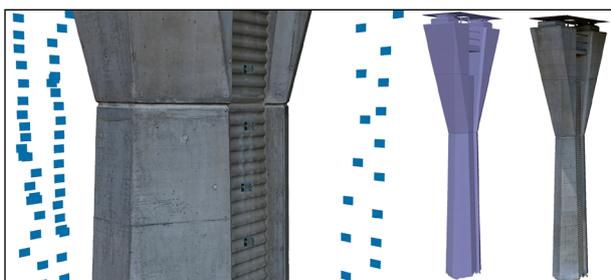


Bild 10-6: Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion eines Pfeilers der Talbrücke Brünn, Ausschnitt des farbcodierten 3D-Oberflächenmodells mit den Bildaufnahme-positionen (links), untexturiertes (Mitte) und texturiertes (rechts) 3D-Bauwerksmodell (eigene Darstellung)

Für die hier vorgestellte Anwendungsstudie wurde das Bauwerk zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten (Sommer, Herbst, Winter) bildbasiert aufgenommen. Dabei kamen leistungsfähige Drohnen zum Einsatz, die über hochwertige Kameras verfügen und Aufnahmen aus sehr kurzer Distanz zum Bauwerk ermöglichen (siehe Bild 10-5), sodass eine möglichst hohe Bild- / Objektauflösung erzielt werden kann. Dies ermöglicht neben der exakten Verortung aller Risse und der erforderlichen 3D-Rekonstruktion des Bauwerks, auch eine automatische Bildanalyse zur verlässlichen Detektion der Risse und Extraktion von notwendigen Schadensinformationen.

Parallel zur drohnenbasierten Aufnahme wurden im Zuge einer konventionellen Schadensaufnahme durch einen erfahrenen Bauwerksprüfer am Bauwerk eine Vielzahl an Stellen markiert, an denen die Rissbreiten manuell mittels einer Risschablone gemessen wurden. Somit wurde eine Vergleichbarkeit

zwischen dem analogen und digitalen Verfahren hergestellt. Vor der drohnenbasierten Erfassung wurde das Bauwerk mit Zielmarken und Maßstäben versehen, um eine möglichst genaue Georeferenzierung bzw. Skalierung der Daten zu gewährleisten. Darüber hinaus dienten die Zielmarken als Fixpunkte für die lokale Registrierung der einzelnen Aufnahmekampagnen, 3D-Modelle und Schadensanalysen, wobei man davon ausgegangen ist, dass sich die Pfeiler nicht global verformen oder verschieben.

In den drei Aufnahmekampagnen wurde der Brückenpfeiler mit jeweils ca. 1.300 Bildern erfasst. Die Überlappung der Einzelbilder ermöglicht die Erzeugung eines georeferenzierten 3D-Bauwerksmodells durch photogrammetrische 3D-Rekonstruktion. Bild 10-6 zeigt das erzeugte 3D-Modell des Pfeilers, das für die exakte Verortung der detektierten Risse genutzt wird.

Für die Schadensanalyse, hier speziell die Detektion von Rissen an der Betonoberfläche, wurde auf Bildebene Machine Learning mit speziell trainierten und sehr robusten neuronalen Netzen (CNN) verwendet. Über die Referenzierung der Bilddaten mit eingemessenen Zielmarken (Maßstäben) am Bauwerk können die Bilddaten mit einer Metrik versehen werden und die detektierten Risse exakt im Raum an einem 3D-Bauwerksmodell verortet werden. Darüber hinaus können auch direkt Schadensinformationen, wie die Lage und Orientierung sowie die Länge bestimmt und die Rissbreite entlang eines detektierten Risses an definierten Stützpunkten abgeschätzt werden. Bild 10-7 zeigt die Projektion respektive der Verortung automatisch detektierte Risse im 2D-Bild und auf der 3D-Bauwerksoberfläche der Talbrücke Brünn.

Der hier untersuchte Pfeiler wurde in mehreren Aufnahmekampagnen auf die gleiche Art und Weise bildbasiert erfasst, sodass vergleichbare Datensätze vorlagen, aus denen die erforderlichen Zustandsinformationen automatisiert abgeleitet wurden, die in einem speziell dafür entwickelten und leicht auswertbarem Format gespeichert werden. Dazu zu zählen u. a.:

- Lage des Risses anhand von Koordinaten entlang des Risses an definierten Stützstellen,
- Länge des Risses,
- Rissbreite entlang des Risses an definierten Stützstellen,

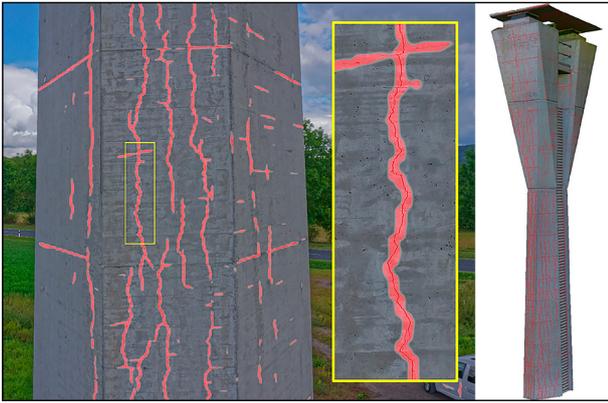


Bild 10-7: Beispielhafte Projektion / Verortung detektierter Risse im 2D-Bild (links) und auf der 3D-Bauwerksoberfläche (rechts)

- Detektionswahrscheinlichkeit auf Basis des verwendeten Erkennungsalgorithmus.

Das Hauptaugenmerk bei der Schadensdetektion liegt auf der Rissbreite, die auch als wesentliches Kriterium zur Zustandsbewertung und Ableitung von gezielten Instandsetzungsmaßnahmen herangezogen wird. Für jeden detektierten Riss wird eine eigene ID vergeben, sodass dieser als eigenständiges 3D-Objekt eindeutig der jeweiligen Aufnahmekampagne und am Bauwerk zuordenbar ist. Über einen visuellen Abgleich der Bilder und einen geometrischen Abgleich der detektierten Risse erfolgt die Identifikation und Zuordnung der einzelnen Risse aus den einzelnen Kampagnen. Erst dadurch können einzelne Risse miteinander verglichen aber auch Zusammenhänge zur Fortschrittsentwicklung der Risse über größere Flächen bzw. über Bauwerksteile oder sogar das gesamte Bauwerk hergestellt werden. Abgeleitet werden dafür:

- Anzahl und Eigenschaften neu detektierter Risse,
- Änderungen der Risslänge vorhandener Risse,
- Änderungen der Rissbreite vorhandener Risse.

Die Auswertung der einzelnen Messkampagnen ermöglicht die Extraktion von objektiven Messwerten, die den aktuellen Zustand des Bauwerks zuverlässig beschreiben. Basierend auf diesen Messwerten kann die Beschreibung der Zustandsentwicklung bis zum aktuellen Zeitpunkt erfolgen und darüber hinaus eine Prognose zur weiteren Zustandsentwicklung abgeleitet werden, was die Grundlage zur Einleitung geeigneter Maßnahmen im LZM bildet. Für zuverlässige Prognose der Zustandsentwicklung sind die erfassten Messdaten mit geeigneten Schadensmodellen zu verknüpfen. Die ermittelten Rissbreiten sowie die Anzahl der Risse können dabei als PI angesehen werden, die somit auch di-

rekte Rückschlüsse auf die KPI Zuverlässigkeit, Lebenszykluskosten und Verfügbarkeit ermöglichen (analog zu Beispiel 4 AKR-geschädigte Bogenbrücke in Kapitel 7.2).

### 10.1.2 Ermittlung der Restnutzungsdauer auf Basis der Rissbreite

Im folgenden Abschnitt wird anhand des Beispiels eines bildbasierten Monitorings von AKR-geschädigten Bauwerken und Bauteilen gezeigt, wie mithilfe von Monitoringergebnissen Rückschlüsse auf PIs gezogen werden können. Diese wiederum geben Hinweis auf die Restnutzungsdauer, die einen wichtigen KPI darstellt.

Für Betontragwerke ist AKR ein typischer Schädigungsmechanismus [173]. Allerdings ist bis heute kein mathematisches Schädigungsmodell bekannt, das diesen Schädigungsmechanismus beschreibt, siehe [174] und [205]. In diesem Abschnitt wird dennoch ein AKR-Beispiel vorgestellt, das illustriert, wie die Restnutzungsdauer mit bildgebenden Verfahren besser eingeschätzt werden kann und folglich Maßnahmen zeitlich besser geplant werden können, wenn ein solches AKR-Modell vorhanden wäre.

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist eine chemische Reaktion zwischen den Alkalien im Zementstein mit der Kieselsäure aus dem Zuschlag. Die Reaktionsprodukte sind hygroskopisch und führen zur Volumenzunahme des sich bildenden Gels. Dies führt zu Druckspannungen im Beton, die durch Rissbildung abgebaut werden.

Ist ein Betonbauwerk bereits durch eine AKR geschädigt, so stehen je nach Ausmaß vier Maßnahmen zur Auswahl:

- **Hydrophobierung:**  
Die Hydrophobierung versiegelt die Oberflächen der betroffenen Bauteile. Der Wassereintritt zu den Schadstellen wird reduziert und die AKR verläuft mit einer geringeren Geschwindigkeit.
- **Teil- bzw. Vollinstandsetzung:**  
Die betroffenen Bauteile werden teilweise bzw. voll instandgesetzt.
- **Ersatzneubau:**  
Das Bauwerk ist so stark geschädigt, dass es durch einen Neubau ersetzt werden muss.
- **Monitoring:**  
Darüber hinaus besteht die Möglichkeit eine Mo-

onitoringmaßnahme einzuleiten, um den Zeitpunkt für eine Maßnahme besser zu bestimmen.

Für das Beispiel wird angenommen, dass die Schädigung so weit fortgeschritten ist, dass ein Ersatzneubau geplant wird. Es wird weiter angenommen, dass eine Monitoringmaßnahme ausgelöst wird, um die Restnutzungsdauer für das AKR-geschädigte Bauwerk besser einzuschätzen.

Bild 10-8 zeigt den Lebenszyklus eines AKR-geschädigten Bauwerks. Dieses Bild wurde analog zu [34] erstellt, siehe auch [94]. Es zeigt die Phasen des AKR-geschädigten Bauwerks, die durch die Zeitpunkte  $t_1$  bis  $t_8$  definiert sind. Darüber hinaus zeigt es die ersten Phasen des Ersatzbauwerkes. Um den Verkehrsfluss – ggf. mit Einschränkungen – zu gewährleisten muss zum Zeitpunkt  $t_{1,ENB}$  mit der Planung des Ersatzneubaus begonnen werden damit das Bauwerk zum Zeitpunkt  $t_{3,ENB}$  zur Verfügung steht. Liegt der Zeitpunkt  $t_{3,ENB}$  vor  $t_4$  bzw.  $t_5$ , dann hat man eine zeitliche Reserve  $\tau_R$ .

Die Dauer vom Entscheidungszeitpunkt  $t_0$  bis zu  $t_4$  respektive  $t_5$  ist die Restnutzungsdauer  $\tau_{RND}$ . Kann diese zuverlässig eingeschätzt werden, dann liefert sie eine wichtige Information, um rechtzeitig mit der Planung und Ausführung des Ersatzbauwerkes zu beginnen. Dies stellt sicher, dass sich die Ersatzbaumaßnahme bestmöglich in das LZM der Netzebene einbindet und ermöglicht gegebenenfalls die Lebenszykluskosten zu optimieren.

Von Zeitpunkt  $t_3$ , dem Anfang der Nutzungsphase, bis zum Zeitpunkt  $t_4$  kann das Bauwerk uneingeschränkt genutzt werden. Ab  $t_4$  hat sich der Bau-

werkszustand so weit verschlechtert, dass lediglich eine eingeschränkte Nutzung möglich ist. Zum Zeitpunkt  $t_5$  erlaubt der Bauwerkszustand keine Nutzung mehr und das Bauwerk muss zurückgebaut werden. Hierbei hat sich der Bauwerkszustand so verschlechtert, dass ein KPI, z. B. die Zuverlässigkeit, unter einen Schwellwert (Performance Threshold) fällt und so die Entscheidung auslöst den Verkehr bei  $t_4$  zu beschränken oder die Nutzung bei  $t_5$  einzustellen.

Wichtig ist, dass die Zeitpunkte  $t_4$  und  $t_5$  ermittelt werden können, um die Restnutzungsdauer  $\tau_{RND}$  zu bestimmen. Dies erfordert Wissen über den Bauwerkszustand, der unbekannt und unsicher ist. Damit man Wissen über diesen erhält, können z. B. Rissbreiten gemessen werden. Dies kann konventionell durchgeführt werden oder mit bildgebenden Verfahren. Bei häufigen und regelmäßigen Messkampagnen gleichen dieser einer Monitoringmaßnahme.

Mit den gemessenen Rissbreiten möchte man auf den Zustand der Bewehrung und auf die Tragwerkszuverlässigkeit schließen. Dazu sind spezifische Modelle nötig, die in diesem Beispiel nicht erläutert werden. Es wird angenommen, dass es mithilfe von Modellen möglich ist eine kritische Rissbreite zu definieren. Es wird postuliert, dass bei einer Rissbreite  $w_{crit}$ , die zu einem unbekanntem Zeitpunkt  $t_{crit}$  auftreten wird, die Dauern  $t_4 - t_{crit}$  (bzw.  $t_5 - t_{crit}$ ) zuverlässig bestimmt werden können. Somit erhält man den KPI Restnutzungsdauer als Funktion der Rissbreite  $w$ , die einen PI darstellt und  $w_{crit}$  ist der dazugehörige Grenzwert (Performance Threshold).

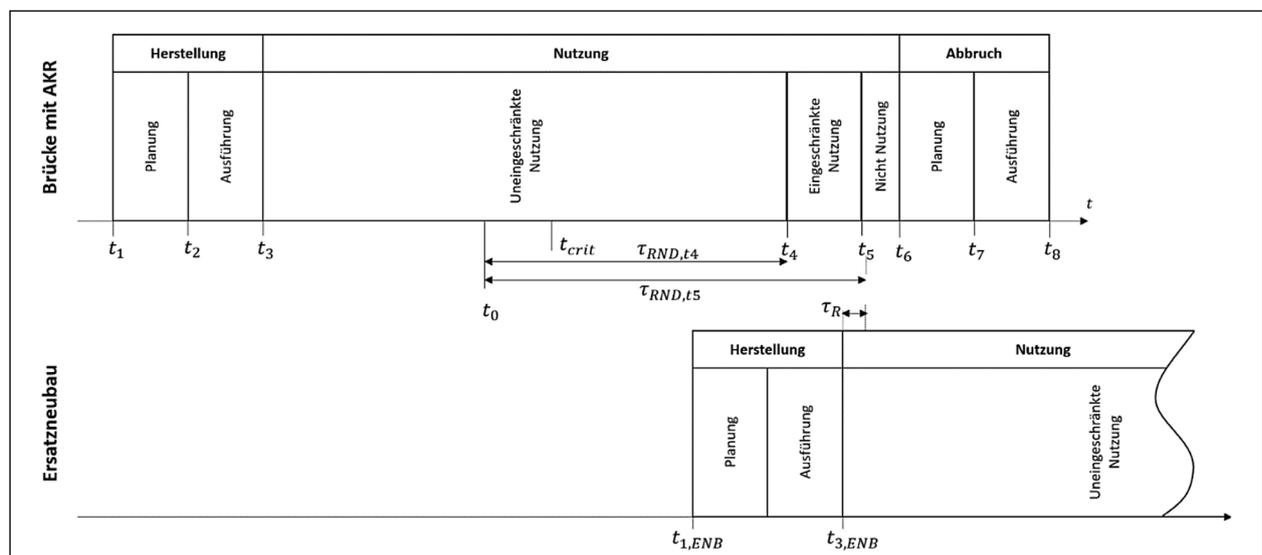


Bild 10-8: Lebenszyklus einer Brücke, die durch einen Neubau ersetzt wird (eigene Darstellung)

Die Aufgabe des Monitorings in diesem Beispiel ist, Informationen zum PI Rissbreite  $w$  zu gewinnen, damit der Zeitpunkt  $t_{crit}$  und somit die Restnutzungsdauer ermittelt werden können. Dazu benötigt man ein Schädigungsmodell für die AKR.

Es wird ein fiktives Schädigungsmodell für Rissbreite infolge einer AKR angenommen. Die Rissbreite ist eine Funktion der Zeit  $t$  und zweier Parameter  $a$  und  $b$ .  $b$  wird als Skalar mit Wert 2.0 angenommen und  $a$  wird als normalverteilte unsichere Größe modelliert. Der Mittelwert von  $a$  wird so gewählt, dass Werte erhalten werden, die in Größenordnung den Werten der Talbrücke Brunn entsprechen. Die AKR-Schädigung ist auch witterungsabhängig. Die gewählte Funktion wird daher nicht den exakten Verlauf der Schädigung darstellen. Dennoch wurde diese Vereinfachung für dieses Beispiel gewählt.

$$w(t) = a t^b$$

Für das Beispiel wird dieses fiktive AKR-Schädigungsmodell verwendet, um das Vorgehen zu illustrieren, wie bildgebende Verfahren helfen können die Restnutzungsdauer besser zu bestimmen. Dieses Schädigungsmodell ist nicht belastbar und darf nicht für reale Bauwerke verwendet werden. Als Konsequenz dürfen auch Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus diesem Beispiel nicht für reale Fälle verwendet werden.

Die Rissbreitenermittlung mithilfe bildgebender Verfahren ist mit Unsicherheiten verbunden. Diese Unsicherheiten sind eine Funktion vieler Einflussparameter. Dies sind z. B. technische Parameter, wie Kamerasensor, Objektiv, ISO-Wert und Parameter, die die Aufnahmebedingungen beschreiben (Winkel zur Oberfläche und Rissrichtung, Abstand zur Oberfläche, Beleuchtung, etc.). Darüber hinaus ergibt sich die Unsicherheit dadurch, dass für eine Rissmessung eine Mindestanzahl an Pixeln benötigt wird. Dies definiert gleichzeitig die minimale Rissbreite, die detektiert werden kann, als auch die Standardabweichung, die einer Messung zugewiesen werden kann.

Bild 10-9a zeigt die Rissbreite  $w$  über die Zeit  $t$ . Die graue Kurvenschar stellt mögliche Realisationen dar, die sich mit der a-priori Information ergeben. Darüber hinaus wird zum Zeitpunkt 12 Jahre die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (grau punktiert) aufgezeigt, die sich mit dem Schädigungsmodell ergibt. Des Weiteren wird in Bild 10-9b eine

Messung von 0.28 mm (Standardabweichung 0.1 mm) zum Zeitpunkt  $t = 12$  Jahre dargestellt. Sie ist durch die Likelihood-Funktion (orange gestrichelt) gegeben. Mit dieser Messung und der a-priori Verteilung erhält man die a-posteriori Verteilung der Rissbreite. Sie ist durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (gelb durchgezogen) gegeben, siehe Bild 10-9c. Darüber hinaus sind mögliche Realisationen der a-posteriori Verteilung als Kurvenschar dargestellt, siehe Bild 10-9d.

Für dieses Beispiel wurde  $w_{crit}$  zu 1.0 mm gewählt. Um den Zeitpunkt  $t_{crit}$  zu ermitteln, benötigt es noch ein weiteres Kriterium. So kann  $t_{crit}$  als Zeitpunkt definiert werden an dem die Rissbreite  $w$  die kritische Rissbreite  $w_{crit}$  mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit  $P(w \geq w_{crit})$  überschreitet. Für dieses Beispiel wurde diese Wahrscheinlichkeit zu 50 % (Schraffur) gewählt. Bild 10-9e zeigt, dass mit der a-priori Verteilung zum Zeitpunkt  $t = 15$  Jahre im Mittel die kritische Rissbreite  $w_{crit}$  gerade noch eingehalten wird. Mit der zusätzlichen Information aus der Messung mittels bildgebender Verfahren erhält man diesen Zeitpunkt zu  $t = 20$  Jahre, siehe Bild 10-9f. Die Restnutzungsdauer kann in diesem Fall um 5 Jahre erhöht werden.

Generell sind nach einer Messung drei Fälle denkbar:

- Fall 1:  
Die Messung bestätigt die a-priori Information und die Restnutzungsdauer bleibt gleich (Bild 10-9).
- Fall 2:  
Die Messung zeigt, dass die Schädigung größer ist als angenommen und somit die Restnutzungsdauer kleiner ist. Das Monitoring liefert eine bessere Einschätzung der Restnutzungsdauer, wenngleich diese kleiner als angenommen ist. Diese Information hilft Maßnahmen angemessen zu priorisieren.
- Fall 3:  
Die Messung zeigt, dass die Schädigung kleiner ist und die Restnutzungsdauer erhöht werden kann. Dies ermöglicht zusätzliche Optionen im LZM. So können Verkehrsbeeinträchtigung im Gesamtnetz ggf. reduziert werden, Maßnahmen auf einem Streckenabschnitt zusammengelegt werden oder die Lebenszykluskosten optimiert, d. h. minimiert werden.

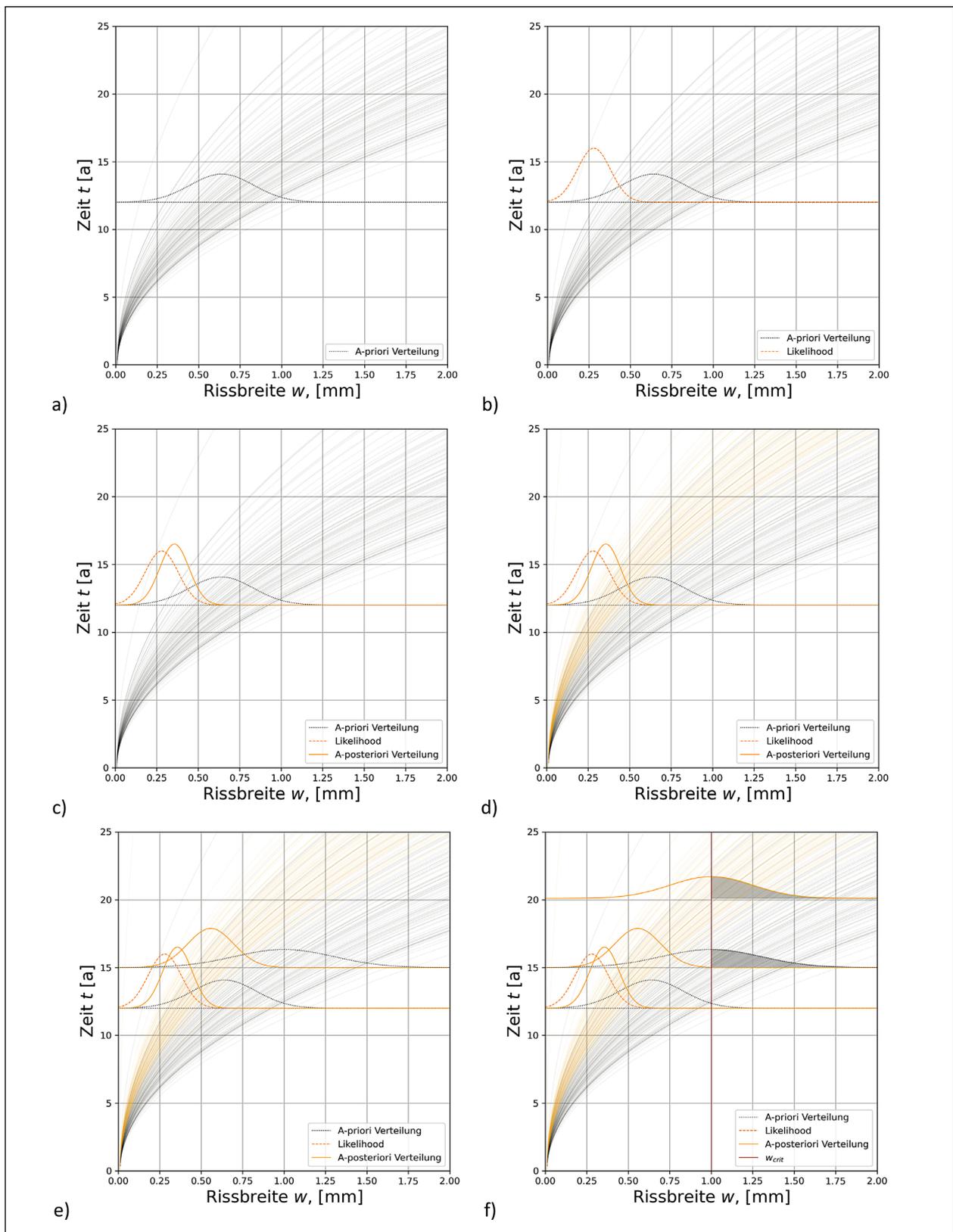


Bild 10-9: Illustration des Wertes von Monitoring bei einer AKR-Schädigung (eigene Darstellung)

Dieses Beispiel stellt die Messung einer Rissbreite dar. In realen Fällen gibt es immer mehr als einen Riss. In diesen Fällen sind weitere Überlegungen notwendig.

### 10.1.3 Mögliche Verwendung eines bildbasierten Monitorings im LZM

Zur Einbindung eines bildbasierten Monitorings von AKR-geschädigten Bauwerken oder Bauwerksteilen in das LZM stellen sich folgende Fragen:

- a) Welche weitere Schädigungsentwicklung ist zu erwarten?

Relevant wird, ob die treibenden Reaktionen abklingen und ob sich ein dauerhaft konstanter Zustand (abgeschlossene Reaktion) einstellen wird. Letzteres ist hier nicht zu erwarten und hängt primär auch von der chemischen Zusammensetzung sowie vom Feuchteeintrag am Bauteil ab. Unter der Annahme, dass die Reaktionen fortschreiten, muss beurteilt werden, wie schnell diese fortschreiten und wann ein Zustand erreicht wird, der die Dauerhaftigkeit und Tragsicherheit beeinträchtigt und / oder bestimmte Maßnahmen, z. B. nur die Überwachung der Schadensentwicklung, nicht mehr angebracht sind.

- b) Welche Maßnahmen zur Behebung der Schäden kommen in Frage und wie hängen diese mit dem weiteren Schädigungsverlauf des Bauwerkes zusammen? Zu welchem Zeitpunkt müssten welche Maßnahmen erfolgen?

In einem frühen Stadium kann eine AKR-Reaktion durch das Fernhalten von Feuchte verlangsamt werden. Bei geringer Rissbildung können dafür Systeme zur Hydrophobierung der Bauwerksoberfläche eingesetzt werden, die einen weiteren Feuchteeintrag in das Bauwerk verhindern (siehe Kapitel 10.1.2).

Bei stark geschädigten Bauwerken, die bereits tragfähigkeitsgefährdet sind, sind weiterführende Maßnahmen erforderlich. Als kurzfristige Überbrückungsmaßnahmen könnte eine Umschnürung der Stützen erstellt werden, um die Tragfähigkeit der Stützen zu gewährleisten. Das Monitoring kann darauf abzielen, diese Umschnürung so lange zu vermeiden, bis andere permanente Lösungen folgen, da die Umsetzung der Umschnürung aufwendig sein kann.

Ein Betonersatz und Reprofilierung der Stützen sind ebenfalls aufwendige Maßnahmen, die nötig sind, sobald die Brücke für den sicheren Betrieb zusätzlich unterstützt werden müsste (z. B. durch Hilfsstützen). Ob die Maßnahme erfolgsversprechend ist, hängt davon ab, ob die Abmessungen des zu erhaltenden Stützenkerns für

den Bauzustand genügen und ob sich der Stützenkern gleichzeitig im weiteren zeitlichen Verlauf nicht weiter AKR-bedingt aufweitet, um den neuen Betonmantel nicht zu beschädigen.

Letztlich stellt sich die Frage, ob die Stützen ersetzt werden sollen oder ob das Bauwerk mit zusätzlichen Stützen neben den bestehenden zu ertüchtigen ist.

Für eine übergeordnete Entscheidung auf der Stufe Bauwerk muss untersucht werden, ob der Brückenüberbau ebenfalls mit einer AKR-empfindlichen Betonrezeptur erstellt wurde. Falls dies der Fall ist, so ist ein Ersatzneubau am Ende der Nutzungsdauer zu prüfen. Das Monitoring der Oberflächen hilft insbesondere beim Erkennen der Grenzwerte, bis wann die Brücke in Betrieb bleiben darf, d. h. bis festgelegte Grenzwerte erreicht werden. Dies bringt aber wenig Informationen für die Entscheidung, welche Maßnahme im Sinne des LZMs die vorteilhafteste ist.

- c) Können diese Maßnahmen ohne Beeinträchtigung des Verkehrs durchgeführt werden? Sind weitere externe Kosten mit der Maßnahme verbunden?

Alle erläuterten Maßnahmen können grundsätzlich unter Verkehr erfolgen. Dadurch sind die Abhängigkeiten von anderen Maßnahmen auf der Strecke klein. Welche weiteren Maßnahmen am Überbau durchgeführt werden sollen, hängt beispielsweise vom Alter der Abdichtung und der Brückenentwässerung ab. Weitere externe Kosten in Bezug auf die Nachhaltigkeit wie Ökologie, Klimaschutz, Lärmbelastungen oder baukulturelle Aspekte spielen in diesem Anwendungsbeispiel für die Maßnahmenwahl eine untergeordnete Rolle.

- d) Welche KPIs lassen sich ableiten und wann ist ein Zustand erreicht, bei dem die Entscheidungsfindung beeinflusst wird?

Es sind die Kosten und die Zuverlässigkeit in Abhängigkeit der Zeit zu berücksichtigen. Die Verfügbarkeit wird maßgebend, wenn keine Lösung bis zum Erreichen eines Zustandes erreicht wurde, an dem die Zuverlässigkeit einen Grenzwert erreicht.

- e) Koordination mit dem Straßennetz

Falls ein Ausbau der Straße während den nächsten 20 Jahren erforderlich ist, hat dies Einfluss auf die Maßnahmenwahl.

Bezugnehmend auf Kap. 8.1 können die Monitorings in drei Zwecken-Gruppen eingeteilt werden:

### 1) Beurteilung der Restnutzungsdauer

Für die Beurteilung der Restnutzungsdauer müssen Grenzwerte definiert werden. Häufig sind auch Grenzwerte mit Sicherheitsfaktoren behaftet. Wenn mit dem Monitoring sichergestellt ist, dass die relevante Stelle rasch und zuverlässig gefunden wird, kann dies bei der Bestimmung der Schwell- und Alarmwerte berücksichtigt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die Maßnahmen nicht ohnehin schon vorbereitet werden und weshalb in diesem Fall gewartet werden soll. Dies ist interessant, wenn die Möglichkeit besteht, ohne Maßnahme auskommen zu können.

### 2) Schädigungsmechanismen und Zustandsgrenzen in Bauteilen erkennen

Interessant ist nun, die Daten der Talbrücke Brunn dazu zu nutzen, um eine Früherkennung von ähnlichen Schäden an anderen Brücken zu ermöglichen, bei welchen eine Hydrophobierung der Bauteile einen großen Einfluss auf die Restnutzungsdauer hätte und die Rissbildung andere Schädigungsmechanismen wie beispielsweise Bewehrungskorrosion mit oder ohne Chlorideintrag auslöst. So müssten Bauwerke mit ähnlicher Betonrezeptur in einem vom Risiko abhängig definierten Intervall (z. B. alle 2 Jahre) überwacht werden.

### 3) Quantifizierung des Risikos und der Nutzerkosten

Der Hauptnutzen dieses Monitorings ist die flächendeckende Überwachung und Lokalisierung, wo ein Riss einen vordefinierten Grenzwert erreicht, bei dem die Risiken quantifiziert werden können.

## 10.2 Pilotstudienkonzepte

### 10.2.1 Konzeption Pilotstudie „Straße“ – Sensorbasiertes Monitoring

Innerhalb des Themenschwerpunktes „Intelligente Infrastrukturen“ im Rahmen des Digitalen Testfelds Autobahn wurde am Autobahnkreuz Nürnberg (BAB A3/A9, Richtungsfahrbahn Regensburg) eine als Ersatzneubau errichtete Spannbetonbrücke mit moderner Messtechnik zur Überwachung des zeitabhängigen Trag- und Verformungsverhalten ausgestattet. Das Messsystem umfasst dabei die fol-



Bild 10-10: Intelligente Brücke (Ersatzneubau) am Autobahnkreuz Nürnberg (Foto: Marko Friedel)

genden elementaren Bausteine der intelligenten Brücke: „System zur Einwirkungsüberwachung und -analyse“, „Instrumentierte Fahrbahnübergänge“ und „Intelligente Sensornetze“. Während der fünfjährigen Pilotstudienphase wurde dabei die Funktionsweise der Bausteine nachgewiesen. Darüber hinaus war es das Ziel ein, objektbezogenes Lastmodell abzuleiten und die Restnutzungsdauer der Brücken und Einzelbauteile fortlaufend zu analysieren.

Die vierfeldrige Spannbeton-Hohlkastenbrücke (BW 402e) wurde im Oktober 2016 für den Verkehr freigegeben. Die Brücke ist durch externe Kabel vorgespannt. Da es sich um einen Neubau handelt, der noch keine altersbedingten Schwachstellen oder Schädigungen aufweist, ist das Monitoring nicht wie sonst üblich auf die Defizite der überwachten Brücke ausgerichtet, sondern auf das Sammeln von relevanten Informationen zur ganzheitlichen Bewertung des Brückenzustandes in Echtzeit mit Beginn der Nutzung. Werden die Daten von Beginn an aufgenommen werden, gibt es einerseits ein „Geburtszertifikat“, andererseits lassen sich im Betrieb jederzeit Veränderungen feststellen, welche unter Umständen auf eine Schädigung hindeuten (siehe auch Kapitel 3.3.2).

### Monitoringsysteme und Monitoringkonzept

Die intelligente Brücke ist mit folgenden Messsystemen ausgestattet:

- Instrumentiertes Kalottenlager bzw. „Intelligentes Lager“,
- Instrumentierter Fahrbahnübergang bzw. „Intelligenter Fahrbahnübergang“,
- Instrumentierter Fahrbahnübergang (RTMS),
- optisches Messsystem zur Fahrzeugerkennung,

- drahtloses Sensornetz zur Erfassung von Temperaturen, Rissveränderungen und Bewegungen (iBAST),
- Beschleunigungssensoren an den externen Spannkabeln.

Mit diesen Systemen werden die folgenden Messgrößen erfasst und Zielgrößen abgeleitet:

Kategorie Umgebungsbedingungen:

- Klimadaten (Temperaturen).

Kategorie Verkehrseinwirkungen:

- Verkehrsdaten (Fahrzeuggeschwindigkeit, Achsabstände, Achslasten, Anzahl der Fahrzeugachsen, dynamische Achslast, Fahrzeuggewicht, Fahrspur, Fahrzeugtyp, Fahrzeugabstände, Fahrzeuglänge, Verkehrszusammensetzung, ...),
- objektspezifisches VerkehrslastBild inklusive DTV und DTV-SV.

Kategorie Bauwerksreaktionen und -verhalten:

- Spannkraftverlauf der externen Spannglieder,
- Auflasten, Verdrehungen und Gleitweg des Kallottenlagers sowie der Temperatur-Lagerwegverlauf,
- Eigenschwingverhalten und Spaltmaß der Fahrbahnübergangskonstruktion,
- objektspezifische Ermüdung,
- Zeitverlauf der globalen Steifigkeit,
- Eigenfrequenzen.

### Indikatoren

Die eingesetzten intelligenten Lager haben die Möglichkeit der Selbstüberwachung. So werden beispielsweise die aus Verkehrs- und Temperaturbeanspruchung resultierenden akkumulierten Lagerwege ermittelt, die ein Maß für die Beanspruchung der Lager und Indiz für kritischen Verschleiß des Gleitmaterials sind [206]. Auch aus den ermittelten Lagerverformungen (Verschiebungen und Verdrehungen) ist es möglich bei Abweichungen zum „Normalverhalten“ Indikatoren für ein Erreichen der Lebensdauer zu erhalten. Die Abweichung von Standardverhalten kann dann ggf. auf Steifigkeits- oder Systemänderungen (bspw. eine Stützensenkung) zurückgeführt werden. Des Weiteren liefern die Lager auch die ersten beiden Ei-

genfrequenzen, mithilfe derer man auf eine Änderung der Überbausteifigkeit oder des Lagersystems schließen könnte.

Sowohl das intelligente Lager als auch der intelligente Fahrbahnübergang liefern zuverlässig Informationen über die Verkehrsbeanspruchung. Der Mehrwert liegt hierbei in der automatischen Messdatenauswertung und -analyse zur Bereitstellung von Achslasten, Gesamtgewichten, Spurbelegung, durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV), etc. (siehe oben), die wiederum als objektspezifische Verkehrslastbilder in einer zukünftigen Nachrechnung Eingang finden können.

Mithilfe der Beschleunigungssensoren an den externen Spannkabeln im Überbau kann die aktuelle Spannkraft ermittelt werden. Spannkraftverluste an diesen wichtigen Systemkomponenten können somit identifiziert werden. Der vorhandene Spannkraftverlust kann PI für die Tragsicherheit sein.

Mit den eingesetzten Systemen wird sowohl die Einwirkungsseite (Verkehrs- und Temperaturlasten u. a.) als auch die Widerstandsseite (Steifigkeit und Spannkraften u. a.) betrachtet. Ziel ist es, alle gesammelten Informationen zu fusionieren und mittels eines zuverlässigkeitsbasierten Expertensystems unter Einbeziehung verfügbarer Informationen aus bestehenden Datenbanken ganzheitlich zu bewerten, sodass online Aussagen über Zustand, Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit und Restnutzungsdauer abgeleitet werden können. [158]. Dazu werden auch probabilistische Modelle zur Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex zum Einsatz kommen.

Es werden sowohl tragsicherheitsrelevante Zielgrößen wie beispielsweise der Vorspannung, als auch Größen, die Aufschluss über den Verschleiß und die Lebensdauer der Lager und der Fahrbahnübergangskonstruktion geben, überwacht, die auf Bauwerksebene in Form von Kosten, Verfügbarkeit und Eingriffszeitpunkt der durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen innerhalb des LZMs relevant sind.

Mit den PI akkumulierte Lagerwege und -verformungen, Eigenfrequenzen, Überbausteifigkeit und Vorspannkraftverlust kann eine Verbindung zu den verschiedenen KPI Lebenszykluskosten, Restnutzungsdauer, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit hergestellt werden. Analog zu Beispiel 8 in Kapitel 7.2 wird für die Brückenlager über das Monito-

ring der Lagerwege der KPI Lebenszykluskosten dargestellt.

### **Betrachtung zum LZM**

An diesem Ersatzneubau können im Rahmen der Pilotstudie die erwartete Schädigung mit den optimalen Maßnahmen eruiert werden, welche zu optimierten Lebenszykluskosten führen. Mit den bereits durchgeführten Messungen liegt ein Geburtszertifikat der Brücke mit Vergleichswerten für die spätere Erkennung von Schäden vor. Nun stellt sich die Frage, ob Grenzwerte definiert werden können, welche ein rechtzeitiges Auslösen der vorzusehenden Maßnahme erlaubt.

Der Ersatz der PTFE-Gleitschicht der Brückenlager ist kostengünstig und muss ausgelöst werden, sobald die Gleitschicht aufgebraucht ist, respektive das Spaltmaß klein ist, und die Lager aus behinderter Verformung Schaden nehmen könnten. Bei kurzen Brücken kann es durchaus sein, dass die Gleitschicht über die gesamte Nutzungszeit der Brücke (80 Jahre) ohne den Ersatz der Gleitschicht auskommt. Die Abnutzung der Gleitschicht hängt vom Grad der Verschmutzung ab.

Solange das Entwässerungssystem oder die Fahrbahnübergänge nicht undicht werden, ist mit keiner Schädigung der Tragstruktur zu rechnen. Von der Erhaltungsplanung aus wird entsprechend nach 15 bis 20 Jahren entschieden, ob präventive Maßnahmen an der Entwässerung und oder Fahrbahnübergängen vorgenommen werden müssen. Falls die Sammelleitung der Entwässerung im Hohlkasten verläuft, so müssen diese Maßnahmen aufgrund des Schadenspotenzials durchgeführt werden. Wie in Beispiel 3 im Abschnitt 7.2 erläutert, kann dieses Schadenspotenzial durch Monitoring mittels Feuchtesensoren abgemindert werden.

Die nächste planmäßige Instandsetzung der Brücke müsste der Ersatz der Abdichtung sein. Je nach verbautem System könnte dies nach ca. 30 bis 40 Jahren anfallen, spätestens aber, wenn die Tragschicht des Belages ersetzt wird. Dies entspricht der Erhaltungsstrategie der präventiven Instandsetzungen, und die weiteren Fragestellungen zum Umfang der Maßnahmen sind in Kapitel 5.3 erläutert.

### **10.2.2 Konzeption Pilotstudie „Schiene“ – Detektion und Überwachung von Bauwerksverformungen**

Talbrücken der Deutschen Bahn sind in der Regel als Einfeldträgerketten und mit großen und sehr robusten Querschnitten ausgeführt. Entlang der Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – München wurde eine Vielzahl neuartiger Bauwerke errichtet, die deutlich schlanker ausgeführt sind als in der herkömmlichen Bauweise. Solche Konstruktionen werden durch die integrale bzw. semi-integrale Bauweise ermöglicht, die sich allerdings auch sehr sensitiv gegenüber äußeren Einflüssen, wie Temperaturänderungen oder Setzungen des Baugrundes verhalten und mit größeren Verformungen des Tragwerks sowie Zwangsbeanspruchungen einhergehen. Daher bedarf es einem besonderen Augenmerk bei der Bauwerksprüfung, um etwaige Schäden (kritische Rissbildung), die aus übermäßigen Verformungen resultieren, frühzeitig zu erkennen und effizient zu überwachen. Über die gemessenen Verformungen des Tragwerkes lässt sich beurteilen, ob die Zwängungen im zulässigen Bereich liegen und ob die vorgespannte Brücke sich wie erwartet verhält.

#### **Referenzbauwerk und Schadensbild**

Als Referenzbauwerk für die Pilotstudie „Detektion und Überwachung von Bauwerksverformungen“ dient die 576,5 m lange Scherkondetalbrücke auf dem Streckenabschnitt VDE 8.2, siehe Bild 10-11, die 2011 fertiggestellt wurde. Diese semi-integrale Eisenbahnbrücke wurde in Spannbetonbauweise hergestellt und verfügt über 14 Felder mit Stützweiten von 27,0 m, 3 × 36,5 m und 10 × 44,0 m. Die längsten Brückenpfeiler haben eine Stärke von 1,5 m und eine Breite am Pfeilerkopf von 5,5 m mit einem Anzug von 1:40 und sind mit einer maximalen Höhe von 31 m sehr schlank. Von den 13 Pfeilern sind die Pfeiler 1-11 monolithisch mit dem Überbau verbunden während Pfeiler 12 und 13 in herkömmlicher Bauweise mit Gleitlagern ausgebildet sind. Die Längsverschiebungen des Überbaus müssen somit nur von den Pfeilern 1 bis 11 aufgenommen werden. Das Widerlager West bildet den Festpunkt des semi-integralen Bauwerks.

Ziel der Pilotstudie ist die Überwachung der temperaturbedingten Verformungen der Pfeiler und der Längsverschiebungen des Überbaus, die bei Überschreitung bestimmter Grenzwerte zu einer Rissbildung an den Pfeilern führen können. Für die Tragsicherheit ist die Festhaltekraft am Widerlager West



Bild 10-11: Scherkondetalbrücke VDE 8.2 (Foto: Norman Hallermann)

von Interesse und diese entspricht der Summe der Rückhaltekräfte der Pfeiler. Dieser Wert lässt sich in der Projektierungsphase aufgrund der Steifigkeitsannahmen der Gründung und des Baugrundes sowie gerissener Bereiche der Stützen nur ungenau respektive mit oberen und unteren Grenzwerten bestimmen.

Messungen am Bauwerk haben gezeigt, dass sich deutliche Pfeilerkopfverschiebungen bei hohen Temperaturen einstellen. Mit Blick auf die klimatischen Veränderungen und teilweise sehr hohen Temperaturen in den Sommermonaten können diese Verschiebungen noch größer werden, sodass eine Überwachung dieser sinnvoll erscheint. Die Pfeiler verfügen aktuell über ein ausgeprägtes netzartiges Rissbild (Schwindrisse), das aber nicht auf die möglichen temperaturbedingten Pfeilerkopfverschiebungen zurückzuführen ist.

Zur Überwachung der Grenzverformungen sollen insbesondere die Pfeiler in ihrer Geometrie erfasst werden.

### Monitoring und Monitoringsystem

Das Brückenbauwerk verfügt bereits über ein Monitoringsystem. Dies wurde als Auflage für die erste semi-integrale Talbrücke der DB AG gestellt: Dieses Messsystem erfasst insbesondere Temperaturen im Brückenüberbau und die Längsverformungen des Überbaus an den Widerlagern. An einem ausgewählten Pfeilerkopf wird die Krümmung mittels Verformungsmessung bestimmt. Das vorhandene Messsystem ist darauf ausgelegt, das Verhalten des schlanken, zwangungsempfindlichen Systems zu überwachen. Die entsprechenden Längsver-

schiebungen des Überbaus, die von den einzelnen, monolithisch angeschlossenen Pfeilern aufgenommen werden müssen, werden daraus nicht bekannt. Es wird vorgeschlagen das Rahmensystem mit den schlankesten Pfeilern (9 und 10) zu überwachen. Zur Überwachung der Grenzverformungen sollen insbesondere die Pfeiler möglichst in ihrer Geometrie erfasst werden. Zur eindeutigen Ermittlung des Tragwerksverhaltens inklusive des Temperatur-Verformungs-Zusammenhangs ist neben der Erfassung der Verformungen auch die Messung der vorhandenen Temperaturen an der Bauwerksoberfläche und im Bauwerksinneren erforderlich.

Das Monitoringsystem sollte folgende Messgrößen erfassen:

- Temperaturen:
  - Umgebungstemperaturen,
  - Bauwerksoberfläche Überbau (Oberseite, Unterseite, Nord- und Südseite),
  - Kerntemperatur Überbau (durch bereits installierte Sensorik),
  - Bauwerksoberfläche Pfeiler (umlaufend über alles Seiten),
  - Kerntemperatur Pfeiler,
- Verformungen des Rahmensystems:
  - Durchbiegung des Trägers in Feldmitte,
  - etwaige Setzungen der Brücke bei jedem Pfeiler,
  - Längsverformung jedes Stützenkopfes,

- Dehnungen:
  - entlang des Brückenträgers vom Widerlager West bis zu Pfeiler 11.

Die Erfassung der Verformungen des Rahmensystems kann dabei durch die folgenden drei Verfahren erfolgen:

- tachymetrisch (punktuelle Messung),
- laserscanbasiert (flächenhafte Messung),
- bildbasiert (flächenhafte Messung inkl. Textur der Oberfläche).

Die tachymetrische Aufnahme erfordert das Anbringen und Einmessen einzelner Punkte (Reflexmarken oder Prismen) entlang der Pfeiler und des Überbaus. Zwischen den aufgenommenen Messpunkten können die Verformungen dann durch Interpolation ermittelt werden. Die Genauigkeit hängt dann von der Anzahl der aufgenommenen Messpunkte und dem Grad der Interpolation ab. Mit einem Laserscanner kann automatisiert eine Vielzahl an Punkten innerhalb des Rahmens aufgenommen werden, sodass eine flächenhafte Messung möglich wird. Da das Längsverformungsverhalten von Interesse ist, reicht an dieser Stelle ein Profilscan in der Pfeiler- und Überbaumittelachse. Mit dem bildbasierten Verfahren, z. B. mittels Drohnenaufnahme, kann das Rahmensystem in seiner kompletten Geometrie und Oberfläche mit sehr hoher und konstanter Auflösung bildbasiert aufgenommen werden. Unter Berücksichtigung von Bedingungen bei der Aufnahme (Registrierung, usw.) und einer entsprechenden Rekonstruktion kann ein 3D-Bauwerksmodell erzeugt werden (siehe auch Kapitel 10.1.1), welches neben den Informationen in der Rahmenebene (Längsverschiebung und Pfeilerbiegung um die schwache Achse) auch Informationen in den anderen Ebenen liefert, d. h. auch Querschnittsverdrehungen des Pfeilers oder Biegung um die starke Pfeilerachse werden somit detektierbar. Hauptvorteil ist jedoch die flächenhafte Abdeckung der Pfeileroberflächen. Die Bildinformationen können bei Bedarf zusätzlich für die Detektion und Dokumentation von Schadstellen, hier z. B. Rissbildung in kritischen Bereichen, verwendet werden (siehe auch Kapitel 10.1.1). Dies ist insbesondere unter der Betrachtung der Schadensentwicklung interessant. Somit kann auch das vorhandene Schad-Bild der Netzrisse parallel mit überwacht werden.

Die Längsdehnungen können z. B. mit faseroptischen Sensoren, welche an der Betonoberfläche angebracht werden, überwacht werden.

Das Monitoring liefert folgende Ergebnisse:

- Längsverschiebungen am Pfeilerkopf,
- Verformung der Pfeiler über die gesamte Pfeilerhöhe (in Rahmenebene),
- Verformung des Überbaus über die betrachtete Feldlänge,
- Spannungsberechnung / -werte aus der Simulation mit einem FE-Modell mit realer Geometrie und temperaturbedingten Verformungen als Grenzwert für die Rissbildung und mit den Dehnungen (aus Faseroptik kalibriert),
- bildbasiertes Monitoring: zusätzliche Pfeilerverformung aus der Rahmenebene, Position und Charakteristika von Schadstellen.

Die Ermittlung der Verformungsentwicklung aus den verschiedenen Aufnahmemethoden erfolgt dann über Differenzbildung zwischen der aktuellen Messkampagne und der Aufnahme zum Referenzzeitpunkt.

#### **Ableitung von KPIs aus den Messgrößen**

Die Spannungen, die Verformungen oder die daraus ermittelten Krümmungen können inklusive zu bestimmender Grenzwerte (Performance Threshold) als Performance Indikatoren dienen und über entsprechende Modelle mit dem KPI Zuverlässigkeit verknüpft werden.

Aktuell wird die Brücke nur von Hochgeschwindigkeitspersonenzügen befahren. Auf den Lebenszyklus der Brücke betrachtet, besteht ein Szenario, dass in ca. 50 Jahren die Achslasten höher sein könnten als heute, zum Beispiel unter der Annahme, dass zukünftig auch Güterverkehr auf der Strecke zugelassen wird. Die Erfassung der Verformungen und modellbasierten Ermittlung der Spannungen wäre dann wichtig, da der Güterverkehr deutlich höhere Lasten auf das Brückentragwerk aufbringt. So wäre es interessant vorbeugend zu klären, ab welchem Grenzwert Betonermüdung relevant werden könnte.

In Anlehnung an das Beispiel 9 „Brücke mit differentiellen Setzungen“ in Kapitel 7.2, kann hier der KPI Zuverlässigkeit verknüpft werden, für den Fall der Gefahr einer statischen Überbeanspruchung aufgrund aufgezwungener Verformungen.

### Betrachtungen zum LZM

Eine Hauptgefährdung für als längere Durchlaufträger ausgebildete Bauwerke sind differenzielle Setzungen. Darauf ist insbesondere zu achten, wenn ein inhomogener Baugrund vorliegt oder wenn setzungsempfindliche Schichten variabler Stärke vorhanden sind. Es stellt sich die Frage, ob die getroffenen Annahmen des Baugrundmodells einen großen Einfluss auf die Statik des Bauwerks haben. Mittels einer Sensitivitätsuntersuchung lässt sich beurteilen, welches Risiko vom Baugrund für das Bauwerk ausgeht.

Zwangsschnittgrößen sind bei duktil ausgebildeten Querschnitten für Biegung nicht tragsicherheitsrelevant. Falls die Zwängungen die Querkräfte am maßgebenden Querschnitt erhöhen, geht dies zulasten der Traglast. Bautechnisch lassen sich die Beanspruchungen nur durch eine nachträgliche Justierung der Brückenlager reduzieren. Dies ist bei dieser Brücke aufgrund der monolithischen Verbindung zwischen Pfeiler und Überbau in Brückenmitte nur teilweise möglich. Bevor eine Anpassung der Lagerhöhen oder eine Nutzungseinschränkung ausgelöst werden würde, würden zunächst detaillierte Nachweismodelle eingesetzt werden. Die Modellannahmen können dann mit Monitoringdaten überprüft werden.

Die bereits festgestellte Rissbildung der Stützen kann relevant werden, wenn sie materialbedingt ist. Eine etwaige AKR-Reaktion müsste möglichst rasch eingedämmt werden.

Beim LZM muss versucht werden, den wahrscheinlichsten Zeitpunkt der nächsten Ertüchtigungsmaßnahme vorauszusagen. Ebenso ist eine Prognose zu erstellen, welches die Bauwerksteile sind, die als nächstes eine Maßnahme auslösen könnten und durch welche Schädigungsmechanismen sie herbeigeführt werden. Für die Scherkondetalbrücke wurden zwei Szenarien identifiziert, welche eine vorzeitige Ertüchtigung auslösen würden: Schäden am Festpunktwiderlager und Schäden an der Vorspannung. Beide Schädigungen können durch Monitoring frühzeitig erkannt werden:

- Maßnahmen an den Widerlagern würden eine bedeutende Einschränkung des Bahnverkehrs zur Folge haben. Die Widerstände der einzelnen Bauteile des Widerlagers und insbesondere der Gründung dürfen von der Festhaltekraft nicht überschritten werden. Die Reaktionskräfte am Festpunkt-Widerlager sind somit eine mögliche

Schadensursache für die Widerlagerkonstruktion. Dieselben können mit einem Monitoring der Längsdehnungen am Brückenende überprüft oder dauerhaft überwacht werden. Die Reaktionskraft selbst ist ferner ein guter Indikator dafür, ob sich das Tragwerk wie vorgesehen verhält, da sie von den Steifigkeiten der Pfeiler abhängig ist.

- Die andere mögliche Schädigung betrifft die Vorspannung. Schäden an den Spanngliedern sind lediglich zu erwarten, wenn seitens der Ausführung die geforderte Qualität nicht überall eingehalten werden konnte. Die Schäden werden aber nicht unmittelbar auftreten, sondern könnten unter Umständen erst in einem Zeithorizont von 40 - 60 Jahren zum Vorschein kommen. Sie machen sich durch einen Zuwachs der Durchbiegungen bemerkbar und sind einfacher auszumachen, wenn die Langzeitverformungen abgeklungen sind. Dazu ist es wichtig, Vergleichswerte für die Durchbiegungen vor Eintreten des Schadens zu dokumentieren. Dies kann erfolgen, indem mit einem Zeitintervall von 3 bis 5 Jahren die Durchbiegungen des Brückenträgers durch ein Präzisionsnivellement überprüft werden, bis konstante Messwerte vorliegen. Für das Präzisionsnivellement werden Messbolzen auf der Brückenoberfläche in den Feldmitten sowie über den Pfeilern jeweils auf beiden Brückenrändern angebracht. Bei Brücken dieser Art kann davon ausgegangen werden, dass nach 15 bis 20 Jahren brauchbare Vergleichswerte vorliegen, um die späteren zusätzlichen Verformungen aufgrund eines Vorspannkraftverlustes erkennen zu können.

Aus Sicht des LZMs besteht der große Nutzen vom Monitoring darin, Vergleichswerte zu erzeugen, damit später Veränderungen des Tragverhaltens frühzeitig erkannt werden können. Mit dem vorgeschlagenen Monitoring ist das zeitliche Intervall deutlich kleiner.

### 10.2.3 Konzeption Pilotstudie „Wasserstraße“ – Beispiel Schleusenanlage

#### Bauwerk und Konstruktion

In dem Pilotstudienkonzept für den Verkehrsträger Wasserstraße wird eine Schiffsschleusenanlage an einem innerdeutschen Kanal betrachtet. Die Schleusenanlage wurde in den 1970er Jahren erbaut und als Sparschleuse mit einer Sparbeckenreihe konstruiert. Die Tragkonstruktion entspricht einem U-för-

migen Trog mit unsymmetrischer Beanspruchung, da auf der Westseite Maschinenhaus und Sparbänke anschließen.

Die Schleusenammer hat eine Nutzbreite von 12 m, eine Tiefe von rund 12,40 m und wird in Längsrichtung in 13 Blöcke mit einer jeweiligen Länge von 12,30 m unterteilt. Die Schleusungsfallhöhe beträgt rund 7,40 m. Es handelt sich um eine vergleichsweise schlanke Konstruktion. [207]

Aufgrund eines Schadensfalles an einer ähnlichen Schleusenanlage, der zu einer zeitweisen Sperrung des Kanals führte, wurden alle Schleusenanlage der gleichen Bauart einer Überprüfung und Nachrechnung unterzogen. Entsprechend der zur Bauzeit geltenden normativen Regelungen ist der Bewehrungsgrad der Schleusenwand relativ gering und eine Querkraftbewehrung nicht vorhanden. Den Duktilitäts- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen moderner Regelwerke genügen die Bewehrungsgrade bei weitem nicht. Einige Tragwerksbereiche unterliegen einer hohen rechnerischen Auslastung bezüglich Querkraft [207]. Bei einer veranlassten Untersuchung mit rückseitigem Aushub eines Teilbereiches wurde auch korrodierte Bewehrung festgestellt und saniert.

In den letzten Jahren wurden Erhaltungsmaßnahmen am Bauwerk durchgeführt. Im Jahr 2008 wurde das Untertor getauscht. Während einer Schiffsahrtssperre 2019 wurden Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt.

### Bauwerksprüfung und Schadensbild

Die Schleusenanlage wird in regelmäßigen Abständen von 6 Jahren einer Bauwerksprüfung unterzogen. Die Prüfung der trocken gelegten Schleusenammer erfolgt dabei mithilfe von Hubsteigern, Fahrgerüsten, Leitern und Seilen. Im Rahmen der Prüfung wurde die komplette Schleusenanlage geprüft. Nachfolgend wird ausschließlich die Schleusenammer betrachtet, an der folgende typische Schäden festgestellt und entsprechend dokumentiert wurden: [208]

- Schleusenammer – Sohle
  - Längsrisse, größtenteils versintert, vereinzelt Risse bis zu einer Rissbreite von 0,5 mm,
  - Abplatzungen und Hohlstellen an Blockfugen der Kammersohle,
  - mehrfache Betonausbrüche bis zu einer Tiefe von 20 cm.

- Schleusenammer – Wand
  - punktuelle, oberflächennahe Abplatzungen durch Schiffsanfahrungen, teilweise instandgesetzt,
  - Schäden an horizontalen und vertikalen Arbeitsfugen: ausgebrochene Fugen- und Rissufer, bis zu einer Rissbreite von 0,5 mm / 0,8 mm, Ausbrüche bis 1,5 cm, teilweise instandgesetzt,
  - durchgehender, vertikaler Riss bis 0,4 mm, vereinzelt 0,5 mm, vereinzelt feucht,
  - mehrere Hohlstellen, teilweise instandgesetzt,
  - kleinflächige Abplatzungen,
  - mehrfach freiliegende Bewehrung, meist kleinflächig,
  - Abwitterungen der Betonoberfläche.

Die Sohle und die Wände der Schleusenammer sind in einem zufrieden stellenden Zustand. Neben kleineren Schäden sind lediglich die Arbeitsfugen teilweise ausgebrochen oder ausgewaschen und weisen Risse auf. An den Blockfugen gibt es stellenweise Kantenabbrüche durch Schiffsanfahrungen.

### Vorhandenes Monitoring

Aufgrund der oben benannten konstruktiven Defizite wurde zur Überwachung der Schleusenanlage bereits folgendes Monitoringkonzept umgesetzt:

- Überwachung der Neigung mittels einachsiger Inklinometer am Kopf der Kammerwand an Block 5 und Block 10 der Ostwand,
- Überwachung der Schiefstellung durch die Messung der Auslenkung eines Pendellots an zwei Stellen im Maschinenhaus (Westseite),
- Überwachung des Kammerwasserstandes,
- Überwachung des Porenwasserdrucks (Erdseite Ost) und des Grundwasserstandes in der Kammerpegelschachtwand,
- Erfassung der Wassertemperatur des Luftdrucks und
- Überwachung des Drainageabflusses.

Bild 10-12 zeigt einen Querschnitt durch die Schleusenanlage sowie die Position der Sensorik und Bild 10-13 zeigt exemplarisch einen Verlauf der beiden erfassten Kammerkopf-Neigungen und der Temperatur sowie die ermittelten Differenzneigungen.

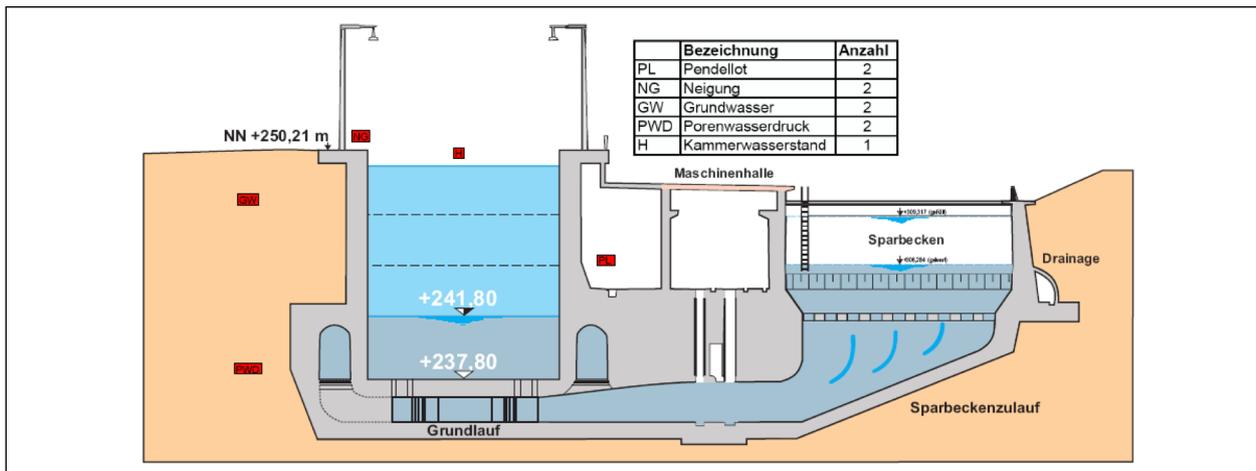


Bild 10-12: Querschnitt Schleusenanlage mit Indikation der Messsysteme (rote Boxen) [207]

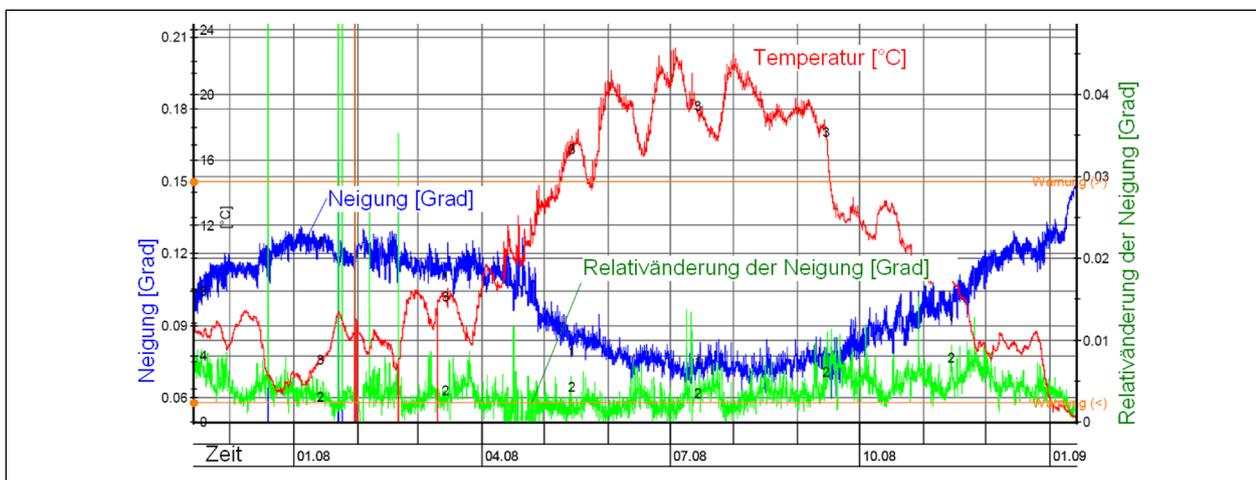


Bild 10-13: Messtechnisch ermittelte Neigung der Ostwand und Wassertemperatur [207]

### Bildbasiertes Monitoring

In der Pilotstudie soll die Schleusenammer betrachtet werden, die durch eine bildbasierte Aufnahme der Kammerwand und Kammersohle nicht-kontinuierlich überwacht werden soll. Die Aufnahme kann dabei mittels UAV (Drohne) oder mittels geeigneter Kamera-Arrays erfolgen. Die bildbasierte Aufnahme ermöglicht bei entsprechender Aufnahme:

- die Detektion von bestimmten Schadensmerkmalen, bspw.:
  - Risse, inklusive Länge, Orientierung und Rissbreite,
  - Abplatzungen,
  - freiliegende Bewehrung,
- die Lokalisierung der detektierten Schadensmerkmale.

Die Bilder müssen dabei mit entsprechender Überlappung und in ausreichend hoher Auflösung aufgenommen werden. Die genauen Aufnahmeparameter

sind in Abstimmung mit dem zuständigen Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt und dem Bauwerksprüfer festzulegen. Aus den aufgenommenen Bildern wird anschließend jeweils ein Orthofoto für die beiden Kammerwände und die Kammersohle erstellt. Gegenüber der händischen Schadensaufnahme bietet die bildbasierte Aufnahme folgende Vorteile: eine automatische Schadenserfassung und -analyse, eine exakte Dokumentation des Ist-Zustandes und eine weniger zeitaufwändige Schadensaufnahme vor Ort, sodass Nutzungseinschränkungen ggf. deutlich reduziert werden können. Weiterhin sind keine Hilfsgereäte, wie Hubsteiger, Leitern oder Fahrgerüste notwendig, die teils mit Kranhüben in die Schleusenammer befördert werden müssen. Bei Verwendung entsprechend trainierter KI-basierter Schadenserkenner werden Schadensmerkmale ab einer Mindestgröße (bspw. Risse ab 0,2 mm) und entsprechend geeigneter Aufnahmebedingungen und -parameter mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Bildern erkannt, sodass von einer nahezu vollständigen Schadenserkennerung ausgegangen werden kann.

### Betrachtung zu KPI und LZM

Ergebnis der Untersuchungen ist eine digital erstellte Schadenskartierung auf einem Orthofoto (bspw. Risskartierung) inklusive der Schadensmerkmale. Für die zu erkennenden Risse ist die jeweilige maximale Rissbreite der Einzelrisse zu bestimmen. Die identifizierte Rissbreite kann in diesem Fall als PI dienen und zusammen mit einem festzulegenden Grenzwert mit dem KPI Restnutzungsdauer verknüpft werden (siehe auch Kapitel 10.1.2). Nimmt das Ausmaß (Anzahl, Länge, Rissbreite) der Risse stark zu, dann kann aufgrund der notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen auch die Verbindung zu den KPI Lebenszykluskosten und Verfügbarkeit hergestellt werden.

Risse auf der kritischen Erdseite der Kammerwand können mit dem bildbasierten Monitoring nicht erkannt werden. Die sensorbasiert ermittelten Neigungen der Kammerwand können jedoch als Performance Indikator dienen und über entsprechende Modelle mit dem KPI Zuverlässigkeit verknüpft werden.

Sobald Maßnahmen zu erwarten sind, sinkt der KPI Verfügbarkeit markant, weil davon ausgegangen werden muss, dass für Instandsetzungen die Schleuse außer Betrieb genommen werden muss. Mögliche Verstärkungsmaßnahmen, wie beispielsweise bei Vorfinden von zu großen Rissbreiten, können das Anbringen von externen Vorspannungen oder CFK-Lamellen sein. In Abhängigkeit der Umwelt müsste im Rahmen des LZMs überprüft werden, ob der Bau einer Ersatzschleuse für das Ende der Restnutzungszeit mit geringeren Kosten und Risiken verbunden wäre.

## 11 Übertragung des Konzeptes auf die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße

Das vorgeschlagene Konzept des LZMs sieht vor, Monitoringdaten zu verwenden, um die Entscheidungsfindung in der Erhaltungsplanung zu verbessern, indem in erster Linie der Zeitpunkt für eine kostengünstige Maßnahme nicht verpasst wird. In einem zweiten Schritt wird mit der Überwachung der einzelnen Bauwerke ermöglicht, den Eingriffszeitpunkt auf eine spätere kombinierte Maßnahme im Rahmen eines übergeordneten Projektes verschieben zu können und dabei die geforderte Zu-

verlässigkeit zu gewährleisten. Die daraus entstehenden Vorteile sind für alle Verkehrsträger von Bedeutung und das Konzept kann einfach übertragen werden.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde erläutert, dass sich sowohl die Erhaltungsstrategien sowie der Haupteinsatz von Monitoring auf die Besonderheiten des Bauwerksbestandes ausrichtet. Jeder Infrastrukturbetreiber steht vor leicht unterschiedlichen Herausforderungen in Abhängigkeit der Brückentypen, des Alters, der spezifischen konstruktiven Details und der Nutzlasten. Die KPIs, auf welchen die LZM-Entscheidungen beruhen, sind die gleichen, können aber durchaus eine unterschiedliche Gewichtung erhalten.

### Verkehrsträger Schiene

Für die Übertragbarkeit auf den Verkehrsträger Schiene gibt es unterschiedliche Besonderheiten von Bahnbrücken und des Schienenverkehrs, welche beim Einsatz von Monitoring für die Erhaltungsplanung relevant sind. Eine wichtige Unterscheidung gegenüber dem Straßennetz sind die fehlenden Umfahrungsmöglichkeiten und die erhöhten Anforderungen für Bauen unter Betrieb. Somit ist das Verhältnis zwischen den Installations- und Betriebskosten eines Monitoringsystems und dem Nutzen auf eine Gleissperrung verzichten zu können, im Vergleich mit dem Verkehrsträger Straße tendenziell höher. Da eine frühzeitige Anmeldung der Sperrpausen eine wichtige Rolle spielt, werden kleine präventive Erhaltungsmaßnahmen, welche in den nächtlichen Betriebspausen umgesetzt werden können, gegenüber einer Teil- oder Gesamtinstandsetzung bevorzugt. Andererseits kann für kurze Bahnbrücken aus betrieblichen Gründen oft ein Ersatzneubau mit Quereinschub interessanter sein als eine Instandsetzung unter Verkehr. Dies zeigt auf, dass Monitoringmaßnahmen, welche eine Schädigung im frühen Stadium erkennen, von großem Interesse sind, wie auch jene, welche durch deren Informationen gezeigt haben, dass die Brücke länger als erwartet genutzt werden kann, d. h. die Restnutzungsdauer größer ist und entsprechend der Ersatzneubau später unter geeigneten Randbedingungen erfolgen kann.

Wenn auf spezifischen Bahnstecken ein großer Instandsetzungsbedarf vorliegt, so kann eine Außerbetriebnahme (Totalsperrung) der Linie insgesamt vorteilhaft sein, wenn gleichzeitig auf allen Bauwerken die notwendigen Maßnahmen durchgeführt werden, um einen daran anschließenden interven-

tionsfreien Zeitraum von 20 bis 30 Jahren zu gewährleisten. Mit einer derartig konzentrierten Intervention können die KPIs Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit positiv beeinflusst werden. Als Vorbereitung für eine solche Entscheidung können diverse Monitoringsysteme eingesetzt werden, um sowohl die Tragsicherheit bis zum Zeitpunkt der Maßnahmen zu gewährleisten – wie für den Ersatzneubau – als auch um den Umfang der Instandsetzungsarbeiten bestimmen zu können.

Die Schädigungsmechanismen infolge chlorid-induzierter Korrosion sind bei den Eisenbahnbrücken weniger ausgeprägt. Vielmehr ist bei Stahlbauten die Ermüdungsproblematik zentral, bei welcher es sich lohnen kann, die effektiven Spannungen aus den Überfahrten zu überwachen, um die Tragsicherheit mittels der Schadensakkumulation nachzuweisen. Hier könnten beispielsweise sensorseitig Dehnungen an den kritischen Stellen erfasst und über die Ermittlung der Spannungsspiele und eine Zuverlässigkeitsanalyse auf den KPI Zuverlässigkeit geschlossen werden. Die Überwachung von Setzungen ist bei Eisenbahnbrücken aufgrund der zulässigen Gleisverwindung ebenfalls wichtiger als bei Strassenbrücken. Diese Aspekte sind bei der Konzeption der Monitoringsysteme und -strategie zu beachten.

### **Verkehrsträger Wasserstraße**

Auf den Verkehrsträger Wasserstraße, bei dem vorwiegend andere Ingenieurbauwerke als Brücken vorhanden sind, kann das Konzept ebenfalls übertragen werden. So sind beispielsweise, Schleusen über den ganzen Lebenszyklus zu unterhalten. Ähnlich wie bei den Eisenbahnbrücken sind die Zeitintervalle, die für die Instandstellungen der Schleusen zur Verfügung stehen, sehr kurz. Die Dokumentation der bisher durchgeführten Maßnahmen mit der genauen Lage sind aufgrund der Objektgrößen unter Umständen zu aufwendig im Vergleich zum effektiven Nutzen. Die Besonderheiten der Ingenieurbauten der Wasserstraßen sind, dass die ständigen Lasten längerfristig wirken und sich wenig verändern. Bei den Schleusen mit wiederkehrenden Änderungen des Wasserstandes sind die Einwirkungen bekannt. Veränderungen der Struktur lassen sich primär durch Verformungen feststellen. Da die hochbelasteten Querschnitte bekannt sind, kann ein zielgerichtetes Monitoring geplant werden, um die Zuverlässigkeit des Bauwerkes genauer zu ermitteln. Für das LZM sind die Maßnahmen zur Substanzerhaltung wesentlich. So

ist neben dem Verschleiß von beweglichen Bauteilen auch der Zustand des Korrosionsschutzes bei Stahlbauten oder die Integrität der Betonbauteile von Interesse.

## **12 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf**

### **12.1 Zusammenfassung**

Brücken sind als wichtiger Teil der Verkehrsinfrastruktur über die gesamte Lebensdauer kontinuierlich hohen Beanspruchungen ausgesetzt. Eine dauerhafte Sicherstellung ihrer Leistungsfähigkeit mit dem Ziel minimaler Ausfallzeiten stellt eine große Herausforderung dar. Nur durch eine effektive Bauwerkserhaltung kann die Nutzungsdauer im Sinne der Ressourcenschonung maximiert werden. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Konzeptes zur Unterstützung eines Lebenszyklusmanagements (LZM) von Brücken mit Monitoringdaten.

Einführend wurde ein umfassender Überblick zum Thema Bauwerksmonitoring erarbeitet. Dieser geht neben der Erfassung von Messdaten sowohl auf die zur Überwachung des Trag- und Verformungsverhaltens von Infrastrukturbauwerken und der Einwirkungen typischen Sensorik als auch auf die Auswertung von Monitoringdaten zur Ermittlung aussagekräftiger Kenngrößen ausführlich ein. Wesentliches Ziel des Einsatzes von Monitoringsystemen ist (I) die Erfassung von Einwirkungs-, Beanspruchungs- und Widerstandsgrößen, (II) die Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens, (III) die Detektion, Lokalisierung und quantitative Charakterisierung von Degradationsprozessen sowie (IV) die Ableitung von Instandhaltungsmaßnahmen auf Basis von Zustandsprognosen.

Bisher wird Monitoring an Brückenbauwerken fast ausschließlich anlassbezogen an alternden Brücken eingesetzt, als Folge auftretender Schädigungen, konstruktiven oder technologischen Defiziten, Unsicherheiten über das Tragverhalten oder bei angeordneten verkehrstechnischen Kompensationsmaßnahmen, falls Nachweise im Rahmen der Nachrechnung nicht zu erbringen waren und mit dem Monitoring Abhilfe geschaffen werden kann. Ein umfassender Überblick über aktuelle anlassbezogene Monitoringprojekte wurde erarbeitet und systematisch aufbereitet. Dabei wurden Anlässe,

Zielsetzungen, Messkonzepte und erreichte Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

Aus den Untersuchungen lässt sich ableiten, dass das Potenzial von Monitoringsystemen weniger in der Quantifikation des absoluten Tragwerkszustandes liegt, sondern sich vornehmlich aus der Möglichkeit ergibt, das System über lange Zeiträume kontinuierlich oder oftmals und regelmäßig zu überwachen, um Veränderungen am System zu erkennen. Folgende Potenziale wurden abgeleitet: (I) die Ermittlung des Tragwerkszustandes und Quantifizierung der Tragwerkszuverlässigkeit, (II) die Charakterisierung des Bauwerksverhaltens mit dem Ziel der Anomalie-Detektion und (III) die Absicherung der Restnutzungsdauer.

Aus Messungen extrahierte Informationen können Aufschluss über den Zustand von Bauwerken, ihren Bauteilen oder Schädigungsmechanismen geben. Diese Informationen können auch als Performance Indikatoren (PI) bezeichnet werden. Um Wissen zu generieren, müssen diese Daten mit anderen Daten verknüpft werden und Vorhersagen über Key Performance Indikatoren (KPI) ermöglichen, um schließlich im Gesamtkontext einen Wert für das Lebenszyklusmanagement (LZM) zu generieren.

Dazu wurden zuerst KPI definiert und mathematisch beschrieben damit sie später in der Nutzenfunktion einer Optimierung Anwendung finden können. Darüber hinaus wurde dargestellt, wie Informationen aus PIs durch Monitoring gewonnen werden können, um anschließend mithilfe dieser Informationen KPIs ermitteln oder aktualisieren zu können. Mit den aktualisierten KPIs und der Nutzenfunktion können im Rahmen des LZMs optimale Maßnahmen auf Bauwerksebene identifiziert werden. Dies wiederum bildet die Basis, um das LZM auf Netzebene zu optimieren.

Der Lebenszyklus einer Brücke kann als Kreislauf von der Errichtung bis zum Rückbau des Bauwerks mit den Maßnahmen Unterhaltung und Instandsetzung dargestellt werden. Zusammenhänge zwischen dem Lebenszyklus einer Einzelbrücke und dem LZM auf Netzebene wurden erläutert.

Der Zustand der Brücken ändert sich mit der Zeit und die Schädigungsmechanismen geben vor, welche Maßnahmen zu welchem Zeitpunkt durchgeführt werden sollten. Die Prognose der Zustandsentwicklung ist die Grundlage für jede Erhaltungs-

planung und damit verbunden sind die erforderlichen finanziellen Haushaltsausgaben. Es gibt unterschiedliche Erhaltungsstrategien, jedoch muss bei der Entscheidung eine Abwägung zwischen Kosten (inkl. volkswirtschaftlicher Kosten wie durch Verkehrsbeeinträchtigungen) und Risiken erfolgen.

Für jedes Bauwerk muss abgeschätzt werden, wann der richtige Zeitpunkt für eine Unterhaltung, Instandsetzung, Modernisierung oder einem Ersatzneubau wäre, und welche Variante (vorläufig) für dieses Bauwerk im Kontext des Straßennetzes am vorteilhaftesten ist. Die Entscheidungen an jedem Bauwerk hängen von den resultierenden KPI des Streckenabschnittes ab. Es ist ein iteratives Vorgehen erforderlich, das sich ständig verbessert. Dabei erfolgt die Beurteilung der Restnutzungsdauer bis zu einer bedeutenden Intervention, welche ein KPI auf Netzebene ist.

Das LZM ist ein Prozess, bei dem regelmäßig Entscheidungen getroffen werden, die darauf abzielen, die Leistungsfähigkeit eines Infrastrukturnetzes bei gegebenen (oder zu ermittelnden) Ressourcen zu maximieren. Dabei sind viele wichtige Einflussgrößen nicht bekannt bzw. unterliegen Unsicherheiten oder auch einer natürlichen Variation (z. B. Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt). Daher ist das LZM ein angewandtes Themenfeld der Entscheidungstheorie im Bauwesen.

Die theoretische Basis, auf der diese praktische Umsetzung beruht, wurde dargestellt und eine Zusammenfassung über die risikobasierte Entscheidungstheorie im Bauwesen erarbeitet. Dazu wurde zuerst die Zielkonzeption für das LZM definiert und die KPI mit den Zielen des Bundesverkehrswegeplan 2030 abgeglichen. Die Nutzenfunktion für eine risikobasierte Entscheidungsfindung im LZM wird als Funktion der KPI formuliert. Das Optimierungsproblem wird mathematisch beschrieben, jedoch wurde angemerkt, dass die Problemstellung in der Praxis iterativ mit der Erfahrung der Ingenieure gelöst werden muss. Die dargestellten Grundlagen gelten übergreifend für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße.

Das LZM basiert auf informierter Entscheidungsfindung. Die Logik der Zusammenhänge zwischen Maßnahmen und Entscheidungen des LZMs, Monitoring und KPI wurden erläutert. Dabei wurde auf folgende Punkte genauer eingegangen: Clusterbildung, relevante Bauteile, Schädigungsmechanismus, Maßnahme bis Grenzzustand, Monitoring und

abgeleitete KPI. Die Clusterbildung von Bauwerken mit ähnlichen Fragestellungen, Ausgangslage und relevanten Bauteilen ist ein Hauptwerkzeug für das LZM, um das Gesamtbild auf Netzseite zu gewinnen. Pro Cluster ist der maßgebende Schädigungsmechanismus zu definieren. Für die Maßnahmen zur Behebung der Schäden müssen Grenzzustände definiert werden, ab wann eine bestimmte Maßnahme nicht mehr angebracht ist. Die Definition des Grenzzustandes schließt die Auswahl der Monitoringmethode ein. Anhand von neun Beispielen wurde abschließend aufgezeigt, wie Monitoringdaten in Verbindung mit PIs und KPIs gebracht werden und die Entscheidungsfindung im LZM beeinflussen.

Auf Basis der dargestellten Grundlagen zu Monitoring, KPI und LZM wurde ein Konzept eines Monitoring-basierten LZM erarbeitet.

Die Optimierung des LZMs erfolgt insbesondere durch die gemeinsame Ausführung von Maßnahmen an mehreren Brücken innerhalb eines Streckenabschnittes. Die Homogenisierung des Zustands aller Brücken in einem Abschnitt führt zu einer wesentlichen Reduktion der Verkehrsbehinderungen und zu einer großen Effizienzsteigerung für die Erhaltung.

Im LZM, können Monitoringdaten bei unterschiedlichen Fragestellungen wesentlich bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Die Optimierungen auf Netzebene können Fragestellungen zur Quantifizierung der Risiken bei einzelnen Bauwerken aufwerfen. Bei der Kombination der gewonnenen Monitoringdaten von ähnlichen Bauwerken unterschiedlichen Alters oder Schädigungsstadien lassen sich Prognoseunsicherheiten reduzieren und die Mehrjahresplanung mit Vorhersage des Investitionsbedarfes wird zuverlässiger.

Mit Monitoring kann das Risiko eines Tragwerksversagens oder eines weiteren Schädigungsverlaufes besser quantifiziert werden. Dazu wurden drei Ansatzpunkte für den Einsatz von Monitoring erläutert. Es sind jeweils die gleichen Monitoringmethoden, welche mit unterschiedlichen Zielen ausgelöst werden. Die Restnutzungsdauer von Brücken kann unter Einhaltung des KPIs Zuverlässigkeit verlängert werden, wenn die relevanten Messgrößen erfasst werden und diese die definierten Grenzwerte nicht überschreiten.

Eine Hilfestellung zur Umsetzung eines Monitoring-basierten LZMs wurde erarbeitet und die Anforderungen

an die Betreiber wurden erläutert, indem zunehmend auf die Prozesse innerhalb der Bauherrnschaft erforderliche personelle Ressourcen, fachliche Kompetenzen und technische Hilfsmittel analysiert wurden. Im Speziellen wurde dabei auf die Datengrundlagen, die Zustandsbeurteilungen, die Zustandsprognosen, die Streckenabschnitte und die Erhaltungsplanung für die Implementierung eines Monitoring-basierten LZMs eingegangen.

Auf Basis der erarbeiteten Grundlagen zum Monitoring und zu den Indikatoren sowie dem Konzept für ein Monitoring-basiertes LZM wurde eine Anwendungsstudie für ein bildbasiertes Monitoring und drei Pilotstudien konzipiert. Die Anwendungsstudie beinhaltet dabei das Monitoring von durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) geschädigten Betonoberflächen mit dem Ziel der Erkennung von Schäden und von deren Fortschrittsentwicklung durch visuelle (bildbasierte) Überwachung. Dabei wird auch genauer auf die Ermittlung des KPIs Restnutzungsdauer aus dem PI Rissbreite sowie auf Fragestellungen aus Sicht des LZMs eingegangen. Die drei Pilotstudienkonzepte greifen typische Fragestellungen (Bauwerksart, Schadensmechanismus, etc.) der Brückenerhaltung auf, die in konkrete Untersuchungskonzepte überführt werden. Dies umfasst die Auswahl von geeigneten Referenzobjekten mit entsprechenden Schadensbildern, konkrete Monitoring-Instrumentierungen sowie die Benennung der zu extrahierenden Informationen als KPI für das LZM.

Das vorgeschlagene LZM-Konzept sieht vor, Monitoringdaten zu verwenden, um die Entscheidungsfindung in der Erhaltungsplanung zu verbessern, indem in erster Linie der Zeitpunkt für eine kostengünstige Maßnahme nicht verpasst wird. In einem zweiten Schritt wird mit der Überwachung der einzelnen Bauwerke ermöglicht, den Eingriffszeitpunkt auf eine spätere kombinierte Maßnahme im Rahmen eines übergeordneten Projektes zu verschieben und dabei die geforderte Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Die daraus entstehenden Vorteile sind für alle Verkehrsträger von Bedeutung und das Konzept kann direkt übertragen werden. Die Übertragbarkeit des Konzeptes auf die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße wurde betrachtet und diskutiert.

Mit der Implementierung der hier vorgestellten Strategien in praktischen Erhaltungsprozessen kann der Übergang von einer reaktiven Maßnahmenplanung hin zu einem prädiktiven Bauwerksmanage-

ment erfolgen, das den gesamten Lebenszyklus jedes Einzelbauwerkes abdeckt und eine Optimierung der Erhaltungsaufwendungen und der Verfügbarkeit im Netz ermöglicht.

## 12.2 Weiterer Forschungsbedarf

Im Folgenden werden aus den Ergebnissen des Projektes Vorschläge für weiterführende Forschungsarbeiten abgeleitet:

- Wesentliches Ziel zukünftiger Forschung sollte die sukzessive Umsetzung des vorgestellten Konzeptes sein. Ein systematisches und mit Aussagen moderner Methoden der Zustandserfassung verknüpftes Konzept für ein Lebenszyklusmanagement für Brücken und Ingenieurbauwerke sollte entwickelt werden. Diese Entwicklung muss die Definition von Kenngrößen, mathematischen Modellen, Einsatzrandbedingungen, Stakeholdern sowie von Prozessen der Datenauswertung, Entscheidungsfindung und Maßnahmenumsetzung enthalten. Die Komponenten sind generalisiert zu verknüpfen und unter Nutzung digitaler Methoden der Datengenerierung, -verarbeitung, -speicherung und -visualisierung zu implementieren und praxisgerecht in angepasste Abläufe der Bauwerkserhaltung einzubetten.
- Weiterer Forschungsbedarf besteht in Bezug auf die Generierung belastbarer, d. h. zuverlässigkeitsbezogener, quantifizierbarer Aussagen von Monitoringverfahren und die systematische Überführung in Zustandsindikatoren, die in einem LZM Anwendung finden und dort zur Verbesserung der Bauwerkserhaltung beitragen können.
- Die Entwicklung moderner LZM-Systeme unter Anwendung von Methoden der modellbasierten Zustandsverwaltung (BIM, Digitaler Zwilling) und unter Verknüpfung mit Methoden der prädiktiven Instandhaltung im LZM stellt eine weiterhin große Herausforderung an der Schnittstelle zwischen wissenschaftlicher Methodenentwicklung und praktischer, insbesondere softwarebasierter, Umsetzung dar. Hierfür erscheinen Pilotstudien wie die hier vorgeschlagenen, begleitet von einem regelmäßigen Austausch aller an Erhaltungsprozessen Beteiligten sowie Tests prototypischer Softwareimplementierungen, besonders zielführend.
- Bezüglich des erheblichen Potenzials der Schadenserfassung mit bildbasierten Verfahren und den daraus ermittelten Zustandsaussagen ist zu untersuchen, wie Schädigungsmodelle, z. B. für AKR, mit Ist-Zustandsdaten und Zustandsentwicklungen verknüpft und diesbezüglich Modellparameter identifiziert werden können. Die Zuverlässigkeit von mit bildgebenden Verfahren generierten Zustandsaussagen ist zu quantifizieren. Die Regeln für visuelle Bauwerksprüfungen sind entsprechend fortzuschreiben, um optimierte Zustandserfassungen zu ermöglichen.
- Die datenbasierte Optimierung von Instandsetzungsarbeiten stellt eine komplexe Herausforderung dar, bei der vielfältige Kriterien zu berücksichtigen sind und gewichtet bzw. gegeneinander abgewogen werden müssen. Insbesondere für die Berücksichtigung der einzusetzenden Ressourcen und des akkumulierten CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes des Bauwerkes sind noch bessere Modell- und Datengrundlagen, z. B. in Form von anfallenden sowie zulässigen CO<sub>2</sub>-Emissionen, Steuern oder Kosten pro CO<sub>2</sub>-Emission, erforderlich.
- Für Schädigungsmechanismen müssen die Einsatzgrenzen verfügbarer Prognosemodelle noch detaillierter beschrieben werden. Für Interventionsmaßnahmen ist aus Erfahrung und Daten abzuleiten, wie der Aufwand von Maßnahmen mit dem Schadensgrad steigt und wann diese ggf. nicht mehr einsetzbar sind und welche Alternativmaßnahmen dann noch zur Verfügung stehen.
- Die Potenziale von Monitoringdaten bei der Prognose von Zustandsverläufen sind noch weiter herauszuarbeiten. Insbesondere datengetriebene Ansätze sind u. U. in der Lage, die Entwicklung bestimmter Schädigungen zukünftig robust vorherzusagen. Die Modellqualität solcher Ansätze ist zu quantifizieren, die erforderlichen Trainingsdaten zu beschreiben und Anwendungen im LZM zu pilotieren. Darüber hinaus sind Verknüpfungen mit konventionellen Verfahren der Nachrechnung dahingehend zu stärken, dass modellbasierte Ansätze durch Daten- und Formatspezifikationen unterstützt werden. Durch die Fusion der Aussagen aus vielfältigen Monitoringdaten sowie der Ergebnisse von parametrisierten Simulationsmodellen wird sich die Identifizierung des aktuellen Bauwerkszustandes deutlich verbessern und die Prognose von Zustandsentwicklungen ermöglichen lassen.

## Literatur

- [1] BMVBS, Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ). BMVBS, 2004.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1076 - Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Beuth Verlag, 2013.
- [3] R. HAJDIN, M. KUŠAR, S. MAŠOVIĆ, P. LINNEBERG, J. AMADO und N. TANASIĆ, Establishment of a Quality Control Plan - WG3. 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.tu1406.eu/wp-content/uploads/2018/09/tu1406\\_wg3\\_digital\\_vf.pdf](https://www.tu1406.eu/wp-content/uploads/2018/09/tu1406_wg3_digital_vf.pdf)
- [4] A. STRAUSS, A. M. IVANKOVIĆ, 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, Bd. 95, Nr. 2, S. 123–138, 2018, doi: 10.1002/bate.201700104.
- [5] M. SCHUBERT u. a., Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten von Monitoringmaßnahmen, Bd. B 156. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/2446>
- [6] A. LEBHARDT, D. SEILER, A. GERDES, A. BOMBECK und K. LENNERTS, Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur: Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems. Bremen: Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG, 2020.
- [7] G. MORGENTHAL, V. RODEHORST, N. HALLERMANN, P. DEBUS und C. BENZ, Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte). 2021.
- [8] „nVisDa - Strukturen für eine konsistente Bauwerksprüfung mit digitalen Bildern und Data Analytics“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.uni-weimar.de/de/medien/professuren/medieninformatik/computer-vision/forschung/nvisda/>
- [9] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), „Stand der Modernisierung von Straßenbrücken der Bundesfernstraßen - Stand 2020“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bericht-stand-modernisierung-von-strassenbruecken-2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bericht-stand-modernisierung-von-strassenbruecken-2020.pdf?__blob=publicationFile)
- [10] DBV, Merkblatt: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. 2014.
- [11] „AISTEC“. 2020. [Online]. Verfügbar unter: [www.uni-weimar.de/aistec](http://www.uni-weimar.de/aistec)
- [12] D. M. FRANGOPOL, A. STRAUSS und S. KIM, „Bridge Reliability Assessment Based on Monitoring“, J. Bridge Eng., Bd. 13, Nr. 3, S. 258–270, Mai 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:3(258).
- [13] A. KAMARIOTIS, D. STRAUB und E. CHATZI, „Optimal maintenance decisions supported by SHM: A benchmark study“, gehalten auf der Seventh International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Shanghai, China., 2020.
- [14] WPM - Ingenieurgesellschaft für Bauwesen und Datenverarbeitung mbH, „SIB Bauwerke“. 2016.
- [15] BMVI, „RI-EBW-PRÜF - Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076“. 2017.
- [16] BMVBS, Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING - Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA). 2007. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Erhaltung/RI-ERH-ING-OSA-Leitfaden-Erhaltung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Erhaltung/RI-ERH-ING-OSA-Leitfaden-Erhaltung.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [17] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), „Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisa-

- on, Kosten“, Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung, 2013.
- [18] Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (Film), (2002).
- [19] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Merkblatt Brückenmonitoring: Planung, Ausschreibung und Umsetzung. Berlin, 2018.
- [20] S. WINDMANN, Intelligente Brücke - Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn, Bd. Heft B 178. Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2022. Zugegriffen: 1. August 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:opus-bast-26516>
- [21] J. TARABEN, P. BRUST, P. DEBUS, G. MORGENTHAL und E. TAUSCHER, „Approach for the IFC based integration of Life Cycle Data and Processes in Building Information Models“, 2018, S. 944–950.
- [22] J. TARABEN, N. HALLERMANN, J. KERSTEN, G. MORGENTHAL und V. RODEHORST, „Case study for the integration of geometrical analyses for structural condition assessment in building information models“, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., Bd. 365, S. 022054, Juni 2018, doi: 10.1088/1757-899X/365/2/022054.
- [23] N. HALLERMANN, M. HELMRICH, G. MORGENTHAL, E. SCHNITZLER, V. RODEHORST und P. DEBUS, „UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken: Teil einer digitalen Instandhaltungsstrategie“, Bautechnik, Bd. 95, Nr. 10, S. 720–726, Okt. 2018, doi: 10.1002/bate.201800066.
- [24] J. TARABEN und M. HELMRICH, „Methode zur automatisierten Verortung von Inspektionsdaten aus bildbasierten Bauwerksprüfungen“, in 30. Forum Bauinformatik von jungen Forschenden für junge Forschende, Weimar, 2018.
- [25] G. MORGENTHAL, J. F. EICK, S. RAU und J. TARABEN, „Wireless Sensor Networks Composed of Standard Microcomputers and Smartphones for Applications in Structural Health Monitoring“, Sensors, Bd. 19, Nr. 9, S. 2070, Mai 2019, doi: 10.3390/s19092070.
- [26] N. HALLERMANN, J. TARABEN und G. MORGENTHAL, „BIM related workflow for an image-based deformation monitoring of bridges“, Melbourne, 2018.
- [27] C. MATTHES, A. KRESKOWSKI und B. FROEHLICH, „A Geometry-Based Method for the Spatio-Temporal Detection of Cracks in 4D-Reconstructions“, in Advances in Visual Computing, Bd. 11844, G. BEBIS, R. BOYLE, B. PARVIN, D. KORACIN, D. USHIZIMA, S. CHAI, S. SUEDA, X. LIN, A. LU, D. THALMANN, C. WANG und P. XU, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 605–618. doi: 10.1007/978-3-030-33720-9\_47.
- [28] T. WEISSKER, A. KULIK und B. FROEHLICH, „Multi-Ray Jumping: Comprehensible Group Navigation for Collocated Users in Immersive Virtual Reality“, in 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Osaka, Japan, März 2019, S. 136–144. doi: 10.1109/VR.2019.8797807.
- [29] A. KUNERT, T. WEISSKER, B. FROEHLICH und A. KULIK, „Multi-Window 3D Interaction for Collaborative Virtual Reality“, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., Bd. 26, Nr. 11, S. 3271–3284, Nov. 2020, doi: 10.1109/TVCG.2019.2914677.
- [30] N. Rail, Code of Practice for Terms and Definitions for Use in Civil Engineering Standards (NR/GN/CIV/045). UK, 2004.
- [31] K. WORDEN, C. R. FARRAR, G. MANSON und G. PARK, „The fundamental axioms of structural health monitoring“, Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci., Bd. 463, Nr. 2082, S. 1639–1664, Juni 2007, doi: 10.1098/rspa.2007.1834.
- [32] P. HAARDT, Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken: Schlussbericht zu AP 97244. 1998.
- [33] P. HAARDT, „Vom schadensbasierten zum zuverlässigkeitsorientierten Erhaltungsmanagement für Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen“, gehalten auf der 2. Kollo-

- quium Erhalten von Bauwerken, Esslingen, 2011.
- [34] P. HAARDT und R. HOLST, „Monitoring during life cycle of bridges to establish performance indicators“, in Proceedings of the Joint COST TU1402 - COST TU1406 - IABSE WC1 Workshop, 2017.
- [35] G. FELTRIN, G. SEDLACEK, R. SOORENSEN, T. FROOLUND und B. LUCZYNSKI, Sustainable Bridges: Monitoring Guidelines for Railway Bridges. 2007. Zugegriffen: 1. September 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1330452/FULLTEXT01.pdf>
- [36] „MAINLINE - MAINTenance, renewal and Improvement of rail transport infrastructure to reduce Economic and environmental impacts, WP4 - Monitoring and examination techniques, Deliverable 4.1: Report on assessment of current monitoring and examination practices in relation to degradation models“, 2013. [Online]. Verfügbar unter: [http://mainline-project.eu/IMG/pdf/ml-d4\\_1-current\\_monitoring\\_and\\_examination\\_practices.pdf](http://mainline-project.eu/IMG/pdf/ml-d4_1-current_monitoring_and_examination_practices.pdf)
- [37] The SMARTRAIL Consortium, „SMARTRAIL - Smart Maintenance, Analysis and Remediation of Transport Infrastructure - Final Report“. [Online]. Verfügbar unter: <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/9760/final1-smartrail-final-report-final311014.pdf>
- [38] „Intelligente Brücke“. 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.intelligentebruecke.de/ibruecke/DE/Home/home\\_node.html;jsessionid=6A5364E6DC57893151BF10BB6438C564.live11313](https://www.intelligentebruecke.de/ibruecke/DE/Home/home_node.html;jsessionid=6A5364E6DC57893151BF10BB6438C564.live11313)
- [39] M. SCHNELLENBACH-HELD, B. KARZEWSKI und O. KÜHN, Intelligente Brücke - Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke, Bd. B 105. Bremen and Bremen: Fachverlag NW, 2014.
- [40] P. HAARDT, „Intelligente Brücken - Adaptive Systeme zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit“, gehalten auf der 3. Kolloquium Erhalten von Bauwerken, Esslingen, 2013.
- [41] V. J. HODGE, S. O'KEEFE, M. WEEKS und A. MOULDS, „Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey“, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., Bd. 16, Nr. 3, S. 1088–1106, Juni 2015, doi: 10.1109/TITS.2014.2366512.
- [42] S.-S. JIN, S. CHO, H.-J. JUNG, J.-J. LEE und C.-B. YUN, „A new multi-objective approach to finite element model updating“, J. Sound Vib., Bd. 333, Nr. 11, S. 2323–2338, Mai 2014, doi: 10.1016/j.jsv.2014.01.015.
- [43] B. SUTTER u. a., „A semi-autonomous mobile robot for bridge inspection“, Autom. Constr., Bd. 91, S. 111–119, Juli 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.02.013.
- [44] G. MORGENTHAL und N. HALLERMANN, „Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures“, Adv. Struct. Eng., Bd. 17, Nr. 3, S. 289–302, März 2014, doi: 10.1260/1369-4332.17.3.289.
- [45] M. ARTUS und C. KOCH, „State of the Art in Damage Information Modeling for Bridges“, gehalten auf der 26TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTELLIGENT COMPUTING IN ENGINEERING, Leuven, 2019.
- [46] P. DEBUS, C. BENZ und V. RODEHORST, „Multiple view anomaly detection in images from UAS structure inspection using CNNs“, gehalten auf der 2019 IABSE Congress - The Evolving Metropolis, New York City, 2019.
- [47] S. STENT, R. GHERARDI, B. STENGER und R. CIPOLLA, „Detecting Change for Multi-View, Long-Term Surface Inspection“, in Proceedings of the British Machine Vision Conference 2015, Swansea, 2015, S. 127.1-127.12. doi: 10.5244/C.29.127.
- [48] R. S. ADHIKARI, O. MOSELHI und A. BAGCHI, „Image-Based Retrieval of Concrete Crack Properties“, gehalten auf der 29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction; Held jointly with the 8th World Conference of the International Society for Gerontechnology, Eindhoven,

- The Netherlands, Juni 2012. doi: 10.22260/ISARC2012/0054.
- [49] G. MORGENTHAL u. a., „Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges“, *Autom. Constr.*, Bd. 97, S. 77–95, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.aut-con.2018.10.006.
- [50] J. KERSTEN, V. RODEHORST, N. HALLERMANN, P. DEBUS und G. MORGENTHAL, „Potenzials of Autonomous UAS and Automated Image Analysis for Structural Health Monitoring“, in *IABSE Symposium, Nantes 2018: Tomorrow's Megastructures*, Nantes, France, 2018, S. S24-119. doi: 10.2749/nantes.2018.s24-119.
- [51] I. HINDERSMANN, J. BEDNORZ, S. NIEBOROWSKI und S. WINDMANN, „BIM - auf dem Weg zum Digitalen Zwilling“, *Strasse Autob.* 112021, S. 917–924, 2021.
- [52] L. FORKERT, *Verfahren zur Prognose von Schadensentwicklungen bei einer kostenoptimierten Brückeninstandhaltung*, Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 1990.
- [53] I. LOTSBERG, G. SIGURDSSON, A. FJELDSTAD und T. MOAN, „Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures“, *Mar. Struct.*, Bd. 46, S. 167–192, März 2016, doi: 10.1016/j.marstruc.2016.02.002.
- [54] M. SCHUBERT, M. T. LIND, B. NIELSEN, K. LYNGBERG und J. PLAGBORG-MØLLER, „Practical Application Of A Probabilistic Fracture Mechanics Approach In An Offshore Structure“, gehalten auf der *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Juni 2015. Zugegriffen: 3. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings/ISOPE15/All-ISOPE15/ISOPE-I-15-237/14666>
- [55] M. SCHUBERT, M. T. LIND, M. ERIKSSON und F. JACOBSEN, „Reliability Assessment of an Existing Offshore Steel Structure with Hot Spots“, *Int. J. Offshore Polar Eng.*, Bd. 27, Nr. 04, S. 433–441, Dez. 2017, doi: 10.17736/ijope.2017.et02.
- [56] B. NOVAK, S. BROSGE und F. REICHERT, „Weiterentwicklung von Verhaltensmodellen im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems, Schlussbericht FE 15.370/2002/HRB“, Universität Stuttgart, Stuttgart, Schlussbericht FE 15.370/2002/HRB, 2003. Zugegriffen: 3. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/953650>
- [57] P. SCHIEßL, *Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons*. Berlin: Ernst, 1976. [Online]. Verfügbar unter: <https://opacplus.bsb-muenchen.de/search?isbn>
- [58] J. ZWERGER u. a., „EPING - Erhaltungsbedarfsprognose für Ingenieurbauwerke“, *Strasse Autob.*, Bd. 70, Nr. 11, S. 1011–1015, 2019.
- [59] „Messsystem und Messprozess sind zweierlei“, *QZ*, Bd. 56, Nr. 4, S. 16–20.
- [60] JCGM, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, Bd. 100:2008. S. 1–134. Zugegriffen: 25. August 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6)
- [61] JCGM 104:2009, „Auswertung von Messdaten – Eine Einführung zum ‚Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen‘ und zu den dazugehörigen Dokumenten“.
- [62] K. Y. WONG und Y. Q. NI, „12 - Structural health monitoring of cable-supported bridges in Hong Kong“, in *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, V. M. KARBHARI und F. ANSARI, Hrsg. Woodhead Publishing, 2009, S. 371–411. doi: 10.1533/9781845696825.2.371.
- [63] X. HU, B. WANG und H. Ji, „A Wireless Sensor Network-Based Structural Health Monitoring System for Highway Bridges“, *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, Bd. 28, Nr. 3, S. 193–209, 2013, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2012.00781.x>.

- [64] D. A. HOWELL und H. W. SHENTON, „System for In-Service Strain Monitoring of Ordinary Bridges“, *J. Bridge Eng.*, Bd. 11, Nr. 6, S. 673–680, Nov. 2006, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:6(673).
- [65] J. M. W. BROWNJOHN, P. MOYO, P. OMENZETTER und S. CHAKRABORTY, „Lessons from monitoring the performance of highway bridges“, *Struct. Control Health Monit.*, Bd. 12, Nr. 3–4, S. 227–244, 2005, doi: <https://doi.org/10.1002/stc.67>.
- [66] H. S. PARK, H. Y. LEE, S. W. CHOI und Y. KIM, „A Practical Monitoring System for the Structural Safety of Mega-Trusses Using Wireless Vibrating Wire Strain Gauges“, *Sensors*, Bd. 13, Nr. 12, Art. Nr. 12, Dez. 2013, doi: 10.3390/s131217346.
- [67] J. M. BROWNJOHN und P. MOYO, „Monitoring of Singapore-Malaysia second link during construction“, in *Second international conference on experimental mechanics*, 2001, Bd. 4317, S. 528–533.
- [68] S. SUMITRO und M. L. WANG, „Sustainable structural health monitoring system“, *Struct. Control Health Monit.*, Bd. 12, Nr. 3–4, S. 445–467, 2005, doi: 10.1002/stc.79.
- [69] M. S. CHEUNG, G. S. TADROS, T. BROWN und W. H. DILGER, „Field monitoring and research on performance of the Confederation Bridge“, *Can. J. Civ. Eng.*, Bd. 24, Nr. 6, S. 951, 1997.
- [70] S. W. DOEBLING, C. R. FARRAR, M. B. PRIME und D. W. SHEVITZ, „Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review“, 1996.
- [71] J. MARIGHETTI, A. WITTEWER, M. DE BORTOLI, B. NATALINI, M. PALUCH und M. NATALINI, „Fluctuating and mean pressure measurements on a stadium covering in wind tunnel“, *J. WIND Eng. Ind. Aerodyn.*, Bd. 84, Nr. 3, S. 321–328, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0167-6105(99)00111-7.
- [72] J. B. FRANDBSEN, „Simultaneous pressures and accelerations measured full-scale on the Great Belt East suspension bridge“, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Bd. 89, Nr. 1, S. 95–129, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0167-6105(00)00059-3.
- [73] W. E. DANIELL und C. A. TAYLOR, „Full-scale dynamic testing and analysis of a reservoir intake tower“, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Bd. 23, Nr. 11, S. 1219–1237, 1994, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290231105>.
- [74] F. N. CATBAS, T. L. KIJEWSKI-CORREA, A. E. AKTAN und *Structural Engineering Institute*, Hrsg., *Structural identification of constructed systems: approaches, methods, and technologies for effective practice of St-Id*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2013.
- [75] „Experimental study of laser Doppler vibrometer and ambient vibration for vibration-based damage detection - ScienceDirect“. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029606001180> (zugegriffen 14. April 2021).
- [76] N. HALLERMANN und G. MORGENTHAL, *Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*. 2014. doi: 10.1201/b17063-96.
- [77] E. CAETANO, S. SILVA und J. BATEIRA, *Application of a vision system to the monitoring of cable structures*. .
- [78] C. NIEZRECKI, J. BAQERSAD und A. SABATO, „Digital Image Correlation Techniques for NDE and SHM“, in *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation*, N. IDA und N. MEYENDORF, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 1–46. doi: 10.1007/978-3-319-30050-4\_47-1.
- [79] Y. Q. NI, „Sensing solutions for assessing and monitoring super-tall towers“, in *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, Elsevier, 2014, S. 246–274.
- [80] T.-H. YI, H.-N. LI und M. GU, „Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge“, *Measurement*, Bd. 46, Nr. 1, S. 420–432, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2012.07.018.
- [81] M. J. USHER, R. F. BURCH und C. GURRALP, „Wide-band feedback seismometers“,

- Phys. Earth Planet. Inter., Bd. 18, Nr. 2, S. 38–50, 1979.
- [82] H. LI u. a., „Structural Health Monitoring System for the Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge“, *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, Bd. 21, Nr. 4, S. 306–317, 2006, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2006.00437.x>.
- [83] J. P. LYNCH, Y. WANG, K. J. LOH, J.-H. YI und C.-B. YUN, „Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors“, *Smart Mater. Struct.*, Bd. 15, Nr. 6, S. 1561, Okt. 2006, doi: 10.1088/0964-1726/15/6/008.
- [84] R.-J. SUN, Z. SUN, D.-H. DAN und L.-M. SUN, „An integrated FBG sensing system for bridge health monitoring“, in *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, Apr. 2006, Bd. 6174, S. 61742Q. doi: 10.1117/12.658926.
- [85] H. H. NASSIF, M. GINDY und J. DAVIS, „Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration“, *NDT E Int.*, Bd. 38, Nr. 3, S. 213–218, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.ndteint.2004.06.012.
- [86] G. CHEN, Q. LIANG, W. ZHONG, X. GAO und F. CUI, „Homography-based measurement of bridge vibration using UAV and DIC method“, *Measurement*, Bd. 170, S. 108683, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108683.
- [87] H. MARTÍN-SANZ, K. TATSIS, V. K. DERTIMANIS, L. D. AVENDAÑO-VALENCIA, E. BRÜHWILER und E. CHATZI, „Monitoring of the UHPFRC strengthened Chillon viaduct under environmental and operational variability“, *Struct. Infrastruct. Eng.*, S. 1–31, 2019.
- [88] „Sensors and Sensing Technology for Structural Monitoring“, in *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*, John Wiley & Sons, Ltd, 2018, S. 15–49. doi: 10.1002/9781119166641.ch2.
- [89] S. FRICKER und T. VOGEL, „Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring“, *Constr. Build. Mater.*, Bd. 21, Nr. 3, S. 501–510, März 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.04.008.
- [90] C.-Y. LEE und G.-B. LEE, „Humidity Sensors: A Review“, *Sens. Lett.*, Bd. 3, Nr. 1–2, S. 1–15, Jan. 2005, doi: 10.1166/sl.2005.001.
- [91] S. AKHTAR, „Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review“, *J. Build. Pathol. Rehabil.*, S. 20, 2020.
- [92] C. ANDRADE und C. ALONSO, „Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method“, *Mater. Struct.*, Bd. 37, Nr. 9, S. 623–643, Nov. 2004, doi: 10.1007/BF02483292.
- [93] J. GAO, J. WU, J. LI und X. ZHAO, „Monitoring of corrosion in reinforced concrete structure using Bragg grating sensing“, *NDT E Int.*, Bd. 44, Nr. 2, S. 202–205, März 2011, doi: 10.1016/j.ndteint.2010.11.011.
- [94] I. HINDERSMANN, *Dauerüberwachung von Bestandsbrücken Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen*. Carl Ed. Schünemann KG.
- [95] I. DREßLER, H.-J. WICHMANN und H. BUDELMANN, „Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken mit einem funkbasierten Drahtsensor“, *Bautechnik*, Bd. 92, Nr. 10, S. 683–687, 2015, doi: 10.1002/bate.201500051.
- [96] Y. IZUMI und M. L. BARAD, „Wind Speeds as Measured by Cup and Sonic Anemometers and Influenced by Tower Structure“, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Bd. 9, Nr. 6, S. 851–856, Dez. 1970, doi: 10.1175/1520-0450(1970)009<0851:WSAMBC>2.0.CO;2.
- [97] K. ZHOU, Q.-S. LI und X. LI, „Eliminating Beating Effects in Damping Estimation of High-Rise Buildings“, *J. Eng. Mech.*, Bd. 145, Nr. 12, S. 04019102, Dez. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001681.
- [98] G. Yannis und C. Antoniou, „INTEGRATION OF WEIGH-IN-MOTION TECHNOLOGIES

- IN ROAD INFRASTRUCTURE MANAGEMENT“, S. 10.
- [99] ASTM, Standard specification for highway weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test methods. ASTM International West Conshohocken, PA, 2009.
- [100] A. BATENKO, A. GRAKOVSKI, I. KABASHKIN, E. PETERSONS und Y. SIKERZHICKI, „Weight-in-motion (WIM) measurements by fiber optic sensor: problems and solutions“, *Transp. Telecommun.*, Bd. 12, Nr. 4, S. 27–33, 2011.
- [101] J. M. LOPEZ-HIGUERA, L. RODRIGUEZ COBO, A. QUINTELA INCERA und A. COBO, „Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring“, *J. Light. Technol.*, Bd. 29, Nr. 4, S. 587–608, Feb. 2011, doi: 10.1109/JLT.2011.2106479.
- [102] B. GLISIC und D. INAUDI, *Fibre optic methods for structural health monitoring*. John Wiley & Sons, 2008.
- [103] B. GLISIC, M. BADOUX, J. JACCOUD und D. INAUDI, „Monitoring A Subterranean Structure with the SOFO System“, *Tunn. Manag. Int. Mag.*, Bd. 2, Jan. 2000.
- [104] B. GLISIC, D. INAUDI und C. NAN, „Pile Monitoring with Fiber Optic Sensors During Axial Compression, Pullout, and Flexure Tests“, *Transp. Res. Rec.*, Bd. 1808, Nr. 1, S. 11–20, Jan. 2002, doi: 10.3141/1808-02.
- [105] D. INAUDI, A. RUEFENACHT, B. VON ARX, H. P. NOHER, S. VURPILLOT und B. GLISIC, „Monitoring of a concrete arch bridge during construction“, in *Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Juni 2002, Bd. 4696, S. 146–153. doi: 10.1117/12.472550.
- [106] J. LENG und A. ASUNDI, „Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors“, *Sens. Actuators Phys.*, Bd. 103, Nr. 3, S. 330–340, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0924-4247(02)00429-6.
- [107] A. KERROUCHE, W. J. O. BOYLE, T. SUN und K. T. V. GRATTAN, „Design and in-the-field performance evaluation of compact FBG sensor system for structural health monitoring applications“, *Sens. Actuators Phys.*, Bd. 151, Nr. 2, S. 107–112, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.sna.2009.01.021.
- [108] C.-Y. HONG, Y.-F. ZHANG, M.-X. ZHANG, L. M. G. LEUNG und L.-Q. LIU, „Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques“, *Sens. Actuators Phys.*, Bd. 244, S. 184–197, Juni 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.04.033.
- [109] „Early Monitoring of Rebar Corrosion Evolution Based on FBG Sensor“. <https://www.worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/S0219455418400011> (zugegriffen 30. Juni 2021).
- [110] J. R. CASAS und P. J. S. CRUZ, „Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring“, *J. Bridge Eng.*, Bd. 8, Nr. 6, S. 362–373, Nov. 2003, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(362).
- [111] M. M. ETTOUNEY und S. ALAMPALLI, *Infrastructure Health in Civil Engineering: Theory and Components*. CRC Press, 2016.
- [112] „Sensor Placement Optimization - Barthorpe - 2009 - Major Reference Works - Wiley Online Library“. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470061626.shm086> (zugegriffen 13. April 2021).
- [113] H.-P. CHEN, K. F. TEE und Y.Q.NI, „Mode Shape Expansion with Consideration of Analytical Modelling Errors and Modal Measurement Uncertainty“, *SMART Struct. Syst.*, Bd. 10, S. 485–499, Okt. 2012, doi: 10.12989/sss.2012.10.4\_5.485.
- [114] M. MEO und G. ZUMPANO, „On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure“, *Eng. Struct.*, Bd. 27, Nr. 10, S. 1488–1497, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.03.015.
- [115] „Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures | Wiley“, *Wiley.com*. <https://www.wiley.com/en-us/Structural+Health+Monitoring+of+Large+Civil+Engineering+Structures-p-9781119166436> (zugegriffen 16. April 2021).

- [116] H. SOHN u. a., „A review of structural health monitoring literature: 1996–2001“, Los Alamos Natl. Lab. USA, 2003.
- [117] R. BISCHOFF, J. MEYER und G. FELTRIN, „Wireless sensor network platforms“, *Encycl. Struct. Health Monit.*, 2009.
- [118] C. R. FARRAR und K. WORDEN, „An introduction to structural health monitoring“, *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, Bd. 365, Nr. 1851, S. 303–315, 2006.
- [119] C. FARRAR und K. WORDEN, *Data normalization: a key to structural health monitoring*. 2001.
- [120] W. FAN und P. QIAO, „Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study“, *Struct. Health Monit.*, Bd. 10, Nr. 1, S. 83–111, 2011.
- [121] P. CAWLEY und R. D. ADAMS, „The location of defects in structures from measurements of natural frequencies“, *J. Strain Anal. Eng. Des.*, Bd. 14, Nr. 2, S. 49–57, 1979.
- [122] M. M. SAMMAN und M. BISWAS, „Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. I: Theory“, *J. Struct. Eng.*, Bd. 120, Nr. 1, S. 269–289, 1994.
- [123] E. P. CARDEN und P. FANNING, „Vibration based condition monitoring: a review“, *Struct. Health Monit.*, Bd. 3, Nr. 4, S. 355–377, 2004.
- [124] Y. SHOKRANI, V. K. DERTIMANIS, E. CHATZI und M. SAVOIA, „On the use of mode shape curvatures for damage localization under varying environmental conditions“, *Struct. Control Health Monit.*, Bd. 25, Nr. 4, S. e2132, 2018.
- [125] A. PANDEY, M. BISWAS und M. SAMMAN, „Damage detection from changes in curvature mode shapes“, *J. Sound Vib.*, Bd. 145, Nr. 2, S. 321–332, 1991.
- [126] P. CORNWELL, S. W. DOEBLING und C. R. FARRAR, „Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures“, *J. Sound Vib.*, Bd. 224, Nr. 2, S. 359–374, 1999.
- [127] K. LIU, „A method based on virtual strain-energy parameters for multiaxial fatigue life prediction“, in *Advances in multiaxial fatigue*, ASTM International, 1993.
- [128] S. SEYEDPOOR, „A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization“, *Int. J. Non-Linear Mech.*, Bd. 47, Nr. 1, S. 1–8, 2012.
- [129] A. Z. HOSSEINZADEH, G. G. AMIRI, S. S. RAZZAGHI, K. KOO und S.-H. SUNG, „Structural damage detection using sparse sensors installation by optimization procedure based on the modal flexibility matrix“, *J. Sound Vib.*, Bd. 381, S. 65–82, 2016.
- [130] B. JAISHI und W.-X. REN, „Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual“, *J. Sound Vib.*, Bd. 290, Nr. 1–2, S. 369–387, 2006.
- [131] T. TOKSOY und A. AKTAN, „Bridge-condition assessment by modal flexibility“, *Exp. Mech.*, Bd. 34, Nr. 3, S. 271–278, 1994.
- [132] R. P. BANDARA, T. H. CHAN und D. P. THAMBIRATNAM, „Structural damage detection method using frequency response functions“, *Struct. Health Monit.*, Bd. 13, Nr. 4, S. 418–429, 2014.
- [133] F. N. CATBAS, H. B. GOKCE und M. GUL, „Nonparametric analysis of structural health monitoring data for identification and localization of changes: Concept, lab, and real-life studies“, *Struct. Health Monit.*, Bd. 11, Nr. 5, S. 613–626, 2012.
- [134] A. ESFANDIARI, F. BAKHTIARI-NEJAD, A. RAHAI und M. SANAYEI, „Structural model updating using frequency response function and quasi-linear sensitivity equation“, *J. Sound Vib.*, Bd. 326, Nr. 3–5, S. 557–573, 2009.
- [135] P. E. WELLSTEAD, „Non-parametric methods of system identification“, *Automatica*, Bd. 17, Nr. 1, S. 55–69, 1981.
- [136] Y. GAO und B. SPENCER JR, „Online damage diagnosis for civil infrastructure employing a flexibility-based approach“, *Smart Mater. Struct.*, Bd. 15, Nr. 1, S. 9, 2005.

- [137] E. P. CARDEN und J. M. BROWNJOHN, „ARMA modelled time-series classification for structural health monitoring of civil infrastructure“, *Mech. Syst. Signal Process.*, Bd. 22, Nr. 2, S. 295–314, 2008.
- [138] E. REYNDERS, R. PINTELON und G. DE ROECK, „Uncertainty bounds on modal parameters obtained from stochastic subspace identification“, *Mech. Syst. Signal Process.*, Bd. 22, Nr. 4, S. 948–969, 2008.
- [139] M. VIBERG, B. WAHLBERG und B. OTTERSTEN, „Analysis of state space system identification methods based on instrumental variables and subspace fitting“, *Automatica*, Bd. 33, Nr. 9, S. 1603–1616, 1997.
- [140] O. ABDELJABER, O. AVCI, S. KIRANYAZ, M. GABBOUJ und D. J. INMAN, „Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks“, *J. Sound Vib.*, Bd. 388, S. 154–170, 2017.
- [141] N. DERVILIS, K. WORDEN und E. CROSS, „On robust regression analysis as a means of exploring environmental and operational conditions for SHM data“, *J. Sound Vib.*, Bd. 347, S. 279–296, 2015.
- [142] X. ZHANG, D. LIANG, J. ZENG und A. ASUNDI, „Genetic algorithm-support vector regression for high reliability SHM system based on FBG sensor network“, *Opt. Lasers Eng.*, Bd. 50, Nr. 2, S. 148–153, 2012.
- [143] M. FALLAHIAN, F. KHOSHNOUDIAN und V. MERUANE, „Ensemble classification method for structural damage assessment under varying temperature“, *Struct. Health Monit.*, Bd. 17, Nr. 4, S. 747–762, 2018.
- [144] Y. W. OU, V. K. DERTIMANIS und E. CHATZI, „Operational Damage Localization of Wind Turbine Blades“, in *International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 2017, S. 261–272.
- [145] M. H. RAFIEI und H. ADELI, „A novel unsupervised deep learning model for global and local health condition assessment of structures“, *Eng. Struct.*, Bd. 156, S. 598–607, 2018.
- [146] M. TODD, G. JOHNSON und S. VOHRA, „Deployment of a fiber Bragg grating-based measurement system in a structural health monitoring application“, *Smart Mater. Struct.*, Bd. 10, Nr. 3, S. 534, 2001.
- [147] S. CHEN, F. CERDA, P. RIZZO, J. BIELAK, J. H. GARRETT und J. KOVAČEVIĆ, „Semi-supervised multiresolution classification using adaptive graph filtering with application to indirect bridge structural health monitoring“, *IEEE Trans. Signal Process.*, Bd. 62, Nr. 11, S. 2879–2893, 2014.
- [148] L. BULL, K. WORDEN, G. MANSON und N. DERVILIS, „Active learning for semi-supervised structural health monitoring“, *J. Sound Vib.*, Bd. 437, S. 373–388, 2018.
- [149] J. E. MOTTERSHEAD und M. I. FRISWELL, „Model Updating In Structural Dynamics: A Survey“, *J. Sound Vib.*, Bd. 167, Nr. 2, S. 347–375, Okt. 1993, doi: 10.1006/jsvi.1993.1340.
- [150] S. H. CHEUNG und J. L. BECK, „Bayesian Model Updating Using Hybrid Monte Carlo Simulation with Application to Structural Dynamic Models with Many Uncertain Parameters“, *J. Eng. Mech.*, Bd. 135, Nr. 4, S. 243–255, Apr. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:4(243).
- [151] X. G. HUA, Y. Q. NI, Z. Q. CHEN und J. M. KO, „An improved perturbation method for stochastic finite element model updating“, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Bd. 73, Nr. 13, S. 1845–1864, 2008, doi: 10.1002/nme.2151.
- [152] L. ZHANG, Y. XIA, J. A. LOZANO-GALANT und L. SUN, „Mass-Stiffness Combined Perturbation Method for Mode Shape Monitoring of Bridge Structures“, *Shock Vib.*, Bd. 2019, S. e7320196, Nov. 2019, doi: 10.1155/2019/7320196.
- [153] M. FENG, Y. FUKUDA, M. MIZUTA und E. OZER, „Citizen Sensors for SHM: Use of Accelerometer Data from Smartphones“, *Sensors*, Bd. 15, Nr. 2, Art. Nr. 2, Feb. 2015, doi: 10.3390/s150202980.
- [154] G. MORGENTHAL, S. RAU, J. TARABEN und T. ABBAS, „Determination of Stay-Cable

- Forces Using Highly Mobile Vibration Measurement Devices“, *J. Bridge Eng.*, Bd. 23, Nr. 2, S. 04017136, Feb. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001166.
- [155] X. ZHAO, K. RI und N. WANG, „Experimental Verification for Cable Force Estimation Using Handheld Shooting of Smartphones“, *J. Sens.*, Bd. 2017, S. 1–13, 2017, doi: 10.1155/2017/5625396.
- [156] H. SHOKRAVI, H. SHOKRAVI, N. BAKHARY, M. HEIDARREZAEI, S. S. RAHIMIAN KOLOOR und M. PETRŮ, „Vehicle-assisted techniques for health monitoring of bridges“, *Sensors*, Bd. 20, Nr. 12, S. 3460, 2020.
- [157] M. VALINEJADSHOUBI, A. BAGCHI und O. MOSELHI, „Development of a BIM-Based Data Management System for Structural Health Monitoring with Application to Modular Buildings: Case Study“, *J. Comput. Civ. Eng.*, Bd. 33, Nr. 3, S. 05019003, Mai 2019, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000826.
- [158] P. HAARDT, S. DABRINGHAUS, W. D. FRIEBEL, R. BAYERSTORFER, T. BÄUMLER und U. FREUNDT, „Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn“, *Bautechnik*, Bd. 94, Nr. 7, S. 438–444, 2017, doi: 10.1002/bate.201700035.
- [159] G. BOLLE, O. MERTZSCH und S. MARX, „Messtechnische Dauerüberwachung zur Absicherung der Restnutzungsdauer eines spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brückenbauwerks“, *Beton- Stahlbetonbau*, Bd. 112, Nr. 2, S. 75–84, 2017, doi: 10.1002/best.201600067.
- [160] M. HERBRAND, M. WENNER, C. ULLERICH, T. RAUERT, G. ZEHETMAIER und S. MARX, „Beurteilung der Bauwerkszuverlässigkeit durch Bauwerksmonitoring: Probabilistischer Beulnachweis der Hamburger Köhlbrandbrücke“, *Bautechnik*, S. bate.202000094, Jan. 2021, doi: 10.1002/bate.202000094.
- [161] H. WEIHER, C. ULLERICH und K. RUNTEMUND, „Monitoring an den Koppelfugen der Köhlbrandbrücke (Rampe Ost) in Hamburg“, gehalten auf der 1. Kolloquium Brückenkolloquium - Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken, Esslingen, 2014.
- [162] G. T. WEBB, P. J. VARDANEGA und C. R. MIDDLETON, „Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities“, *J. Bridge Eng.*, Bd. 20, Nr. 11, S. 04014118, Nov. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000735.
- [163] I. HINDERSMANN, „Anwendung von Monitoring bei Brücken der Bundesfernstraßen und zukünftige Monitoringstrategien“, Tübingen.
- [164] E. PENKA, „Beurteilung der Ermüdungssicherheit von koppelfugenquerschnitten bestehender Spannbetonbrücken durch Langzeitmessungen“, Dissertation, Technische Universität München, München, 2004.
- [165] G. SCHACHT, M. KÄDING, G. BOLLE und S. MARX, „Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrissskorrosionsgefahr“, *Beton- Stahlbetonbau*, Bd. 114, Nr. 2, S. 85–94, Feb. 2019, doi: 10.1002/best.201800087.
- [166] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und BMVI, „Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion)“. 2011.
- [167] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1072: 1985-12 Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen. Beuth, 1985.
- [168] DIN Fachbericht 101:2009, DIN Fachbericht 101: Einwirkung auf Brücken.
- [169] „DIN EN 1991-2:2010-12, Eurocode\_1: Einwirkungen auf Tragwerke\_ Teil\_2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN\_1991-2:2003\_+ AC:2010“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1723953.
- [170] A. JACKMUTH, W. KÖNIG, G. MARZAHN, O. MERTZSCH und R. PINNEL, „Die neue Erhaltungsstrategie für Brücken der Bundesfernstraßen“, in *BetonKalender 2022*, 1. Aufl., K. BERGMEISTER, F. FINGERLOOS

- und J. WÖRNER, Hrsg. Wiley, 2022, S. 347–373. doi: 10.1002/9783433610879.ch5.
- [171] M. SCHNELLENBACH-HELD, M. PEETERS und G. MIEDZINSKI, *Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton*, Bd. B 110. Bremen and Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2015.
- [172] F. FÜCSÖK, C. MÜLLER und M. SCHARMACH, „Measuring of the reliability of NDE“, Portorož, Slovenia, 2005, S. 173–180.
- [173] J. FISCHER, D. STRAUB, R. SCHNEIDER, S. THÖNS und W. RÜCKER, *Intelligente Brücke - zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen*. Bremen: Fachverlag NW, 2014. Zugegriffen: 31. August 2021. [Online]. Verfügbar unter: [http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2014/768/pdf/BAST\\_B\\_99\\_ELBA\\_PDF.pdf](http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2014/768/pdf/BAST_B_99_ELBA_PDF.pdf)
- [174] M. SCHNELLENBACH-HELD, M. PEETERS und G. MIEDZINSKI, *Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton*. BAST, Bergisch Gladbach, *Intelligente Brücke*, 2015.
- [175] BMVI, *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen - RI-EWB-PRÜF*. 2017. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.hochstrasse-halle.de/fileadmin/download/pdf/RI-EBW-PRUEF\\_\\_2007\\_1\\_.pdf](http://www.hochstrasse-halle.de/fileadmin/download/pdf/RI-EBW-PRUEF__2007_1_.pdf)
- [176] M. SCHUBERT u. a., *Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten von Monitoringmaßnahmen: Unveröffentlichter Schlussbericht zu FE 89.0331/2017*. 2019.
- [177] SN EN 50126-1:2017: SN EN, „Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) - Teil 1: Generischer RAMS Prozess“. SNV. Zugegriffen: 31. August 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/snen-50126-1-2017>
- [178] EN 1990:2010-12, „Eurocode - Basis of Structural Design“. 2010.
- [179] J. FISCHER, R. SCHNEIDER, S. THÖNS, W. RÜCKER und D. STRAUB, „Intelligente Brücke - Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen, Heft B“, Heft B 99, Bundesanstalt für Straßenwesen BAST, Bergisch Gladbach., 2014.
- [180] T. MIELECKE, C.-A. GRAUBNER und C. ROTH, „Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur“, Bundesanstalt für Straßenwesen, B 126. Zugegriffen: 3. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-b/2016-2015/b-126.html](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-b/2016-2015/b-126.html)
- [181] E. P. SMALL, T. PHILBIN, M. FRAHER und G. P. ROMACK, „Current status of bridge management system implementation in the Unites States“, in *Transportation Research Circular*, Washington, 2000, Nr. 498. Zugegriffen: 3. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/684606>
- [182] D. M. FRANGOPOL, J. S. KONG und E. S. GHARAIBEH, „Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges“, *J. Comput. Civ. Eng.*, Bd. 15, Nr. 1, S. 27–34, Jan. 2001, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:1(27).
- [183] E. P. SMALL und J. COOPER, „Bridge management software programs“, *TR News*, Bd. 194, S. 10–11, 1998.
- [184] P. D. THOMPSON, E. P. SMALL, M. JOHNSON und A. R. MARSHALL, „The Pontis Bridge Management System“, *Struct. Eng. Int.*, Bd. 8, Nr. 4, S. 303–308, Nov. 1998, doi: 10.2749/101686698780488758.
- [185] K. GOLABI und P. THOMPSON, *Pontis Executive Summary: A Network Optimization System for Bridge Improvements and Maintenance*. Optima, Incorporated, 1991.

- [186] R. B. COROTIS, „The Political Realities of Life Cycle Costing“, International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, 2002.
- [187] D. M. FRANGOPOLO und M. SOLIMAN, „Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions“, Struct. Infrastruct. Eng., Bd. 12, Nr. 1, S. 1–20, Jan. 2016, doi: 10.1080/15732479.2014.999794.
- [188] S. KERWIN und B. T. ADEY, „Optimal Intervention Planning: A Bottom-Up Approach to Renewing Aging Water Infrastructure“, J. Water Resour. Plan. Manag., Bd. 146, Nr. 7, S. 04020044, Juli 2020, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001217.
- [189] K. SCHELLENBERG, R. HESS, R. MÜLLER und H. HUBER, „Defining a Bridge Maintenance Strategy – Some Practical Constraints“, in Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment, 2016, S. 1477–1484. doi: 10.2749/stockholm.2016.1472.
- [190] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesanstalt für Straßenwesen, „Bauwerkserhaltung - Bauwerksprüfung, Erhaltungsplanung, Ausführung“. 2015. Zugegriffen: 1. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bast.de/DE/Publikationen/Medien/Dokumente/B-Flyer-bauwerkserhaltung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bast.de/DE/Publikationen/Medien/Dokumente/B-Flyer-bauwerkserhaltung.pdf?__blob=publicationFile)
- [191] A. BOMBECK, A. LEBHARDT, D. SEILER, A. GERDES und K. LENNERTS, Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur - Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems, Projektbericht zu FE 69.0002/2017. Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2021.
- [192] Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre von Schierenbeck. Henner (2002) Gebundene Ausgabe.
- [193] O. KUEBLER, „Applied decision-making in civil engineering“, Diss. ETH Zür. Nr, Bd. 16394, 2007.
- [194] L. D. ORDÓÑEZ, M. E. SCHWEITZER, A. A. GALINSKY und M. H. BZERMAN, „Goals Gone Wild: The Systematic Side Effects of Over-Prescribing Goal Setting“, Harvard Business School, 09–083, 2009.
- [195] JCSS, Probabilistic model code. Joint Committee on Structural Safety, RILEM, 2001. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>
- [196] R. D. LUCE und H. RAIFFA, Games and decisions: Introduction and critical survey. John & Sons: Wiley, 1957.
- [197] D. BERNOULLI, „Exposition of a new theory on the measurement of risk“, Econometrica, Bd. 22, S. 23–36, 1954.
- [198] H. RAIFFA und R. SCHLAIFER, Applied statistical decision theory. Boston: Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University, USA, 1961.
- [199] J. BENJAMIN und C. A. CORNELL, Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [200] M. H. FABER, Risk and Safety in Civil. ETH Zürich, Lecture Notes: Surveying and Environmental Engineering, 2006.
- [201] H. R. VARIAN, Mikroökonomie, 3. Oldenbourg, 1994.
- [202] J. S. NATHWANI, N. C. LIND und M. D. PANDEY, Affordable safety by choice: The life quality method. Waterloo: Institute for Risk Research, University of Waterloo, 1997.
- [203] AS/NZS 4360:1999, „Risk management“. Australian Standards, 1999.
- [204] G. KLEIN, „Performing a Project Premortem“. Harvard Business Review, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://hbr.org/2007/09/performing-a-project-premortem>
- [205] „Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) - Grundlagen und Massnahmen bei neuen und bestehenden Kunstbauten“, Bundesamt für Strassen ASTRA, ASTRA 8213, 2007.
- [206] C. BUTZ, Maurer Engineering GmbH und Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft, Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalotten-

gleitlager = Digital testbed motorway - Smart bridge: data collection strategies and data analysis for smart spherical bearings. Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2021. Zugegriffen: 18. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://edocs.tib.eu/files/e01fn21/175473331X.pdf>

[207] Bundesanstalt für Wasserbau, „Schleuse - Gutachten zur Untersuchung der Tragfähigkeit mit nichtlinearen Berechnungsmethoden A 395.101.10147-1“, Karlsruhe, Dez. 2009. (nicht veröffentlicht)

[208] M. ESPERT und WSA Nürnberg, „Prüfbericht: Schiffsschleusenanlage Strullendorf - Massivbau“, Nürnberg, Feb. 2020.

## Bilder

Bild 1-1: Altersstruktur der Bestandsbrücken der Bundesfernstraßen nach dem Anteil an der Gesamtbrückenfläche in % mit Stand 01.09.2020 [9]

Bild 1-2: Verteilung der Zustandsnoten für Bestandsbrücken der Bundesfernstraßen nach dem Anteil an der Gesamtbrückenfläche in % mit Stand 01.09.2020 [9]

Bild 2-1: Ishikawa-Diagramm: Einflüsse auf die Unsicherheit von Messungen (oben: Einflüsse des Messprozesses, unten: Einflüsse des Messsystems [59])

Bild 2-2: Schematische Darstellung von Präzision und Genauigkeit (eigene Darstellung)

Bild 2-3: Schematische Darstellung der Messkette (eigene Darstellung)

Bild 2-4: Schema Bauwerksmonitoring (eigene Darstellung)

Bild 3-1: Verteilung der Baujahre der untersuchten Brückenbauwerke mit anlassbezogenem Monitoring (eigene Darstellung)

Bild 3-2: Zeitliche Einordnung des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahls nach Handelsnamen (eigene Darstellung)

Bild 3-3: Zuordnung von Normengenerationen zu

Spannungsrissskorrosion- und Koppelfugenproblematik (eigene Darstellung)

Bild 3-4: Schematische Darstellung der Informationsgewinnung aus Monitoringdaten für Sensorsysteme und bildbasierte Verfahren (z. B. mit Drohnen) (eigene Darstellung)

Bild 3-5: Schematische Darstellung der Integration von Monitoringdaten in ein KPI-basiertes LZM (eigene Darstellung)

Bild 4-1: Beispielhafte Darstellung der Definition der KPI (eigene Darstellung)

Bild 4-2: Schematische Darstellung der Bedeutung des KPI Restnutzungsdauer (eigene Darstellung)

Bild 4-3: Aktueller und langfristiger Finanzierungsbedarf als Funktion der Lebenszykluskosten (eigene Darstellung)

Bild 4-4: Einfluss der KPI und der Präferenzen/Randbedingungen auf die Entscheidungsfindung (eigene Darstellung)

Bild 4-5: Darstellung der Wahrscheinlichkeit einer korrodierten Bewehrung bei einer Potenzialfeldmessung (eigene Darstellung)

Bild 4-6: Darstellung der Detektionswahrscheinlichkeit eines Ermüdungsrissses als Funktion der Risslänge (eigene Darstellung)

Bild 4-7: Schematische Darstellung zum Einfluss neuer Information auf den Zeitpunkt des Ermüdungsversagens ohne (links) und mit Monitoring (rechts) (eigene Darstellung)

Bild 4-8: Unterschiedliche Situationen beim Einsatz von Monitoring [5]

Bild 4-9: Beispielhafte Darstellung des Einflusses von Messunsicherheiten auf die a-posteriori Verteilung. (eigene Darstellung)

Bild 4-10: Schematische Darstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten, wenn kein Monitoringsystem installiert wird [5]

Bild 4-11: Schematische Darstellung zur Bestimmung der erwarteten Kosten, wenn ein Monitoringsystem installiert wird [5]

- Bild 5-1: Schematische Darstellung des LZM Brückenbau im Zusammenhang mit Stecken-Performance und zu treffenden Entscheidungen [9] (eigene Darstellung)
- Bild 5-2: Verteilung der Bauweisen der Bestandsbrücken nach Fläche in 2015 gemäß Broschüre Erhaltungsplanung BAST [190] (eigene Darstellung)
- Bild 5-3: Beispiel für eine Erhaltungsstrategie, wenn eine Straßenverbreiterung zu einem bestimmten Zeitpunkt erforderlich ist
- Bild 6-1: Nutzen und Eintretenswahrscheinlichkeit für 3 mögliche Entscheidungs-Alternativen und vier möglichen Zuständen [193]
- Bild 6-2: Darstellung von Entscheidungsproblemen. Links: der Entscheidungsbaum. Rechts: Bayes'sches Netz [193]
- Bild 6-3: Hierarchische Optimierung (eigene Darstellung)
- Bild 6-4: Risikomanagement-Prozess gemäß AS/NZS 4360:1999 [203]
- Bild 6-5: Graphische Darstellung der SWOT Analyse. (eigene Darstellung)
- Bild 6-6: Eisenhower-Matrix. (eigene Darstellung)
- Bild 7-1: Zusammenhänge zwischen LZM, Monitoring und KPIs (eigene Darstellung)
- Bild 7-2: Clusterbildung (eigene Darstellung)
- Bild 7-3: Typische Schädigungen an Stahl- und Spannbetonbrücken (Fotos: Kristian Schellenberg)
- Bild 8-1: Ansatzpunkte für Monitoring: a) Überblick, b) Erweiterung der schematischen Darstellung des LZM auf Objektebene aus Kap. 5.1 sowie c) LZM auf Netzebene (eigene Darstellungen)
- Bild 8-2: Einsatz von Monitoring zur Verlängerung der Restnutzungsdauer oder zur Senkung der Lebenszykluskosten
- Bild 8-3: Schematischer Ablauf der Entscheidungsfindung bei Brücken im Zusammenhang mit Maßnahmen am Straßenabschnitt (eigene Darstellung)
- Bild 10-1: Kategorisierung von Performance-Indikatoren und Bewertungsprozessen von Schäden an Brückentragwerken [4]
- Bild 10-2: Talbrücke Brünn der BAB 73 (Foto: Norman Hallermann)
- Bild 10-3: Pfeileroberfläche an der Talbrücke Brünn: Originalaufnahme mit Rissen (links) und beispielhafte Schadensskizze mit der Lage der Risse auf dem Pfeiler (rechts) (Foto: Norman Hallermann)
- Bild 10-4: Rissmarken zur Überwachung der Rissbreiten am Pfeiler der Talbrücke Brünn (Fotos: Norman Hallermann)
- Bild 10-5: Drohnenbasierte Aufnahme eines Pfeilers der Talbrücke Brünn, durchschnittliche Aufnahmeentfernung ca. 2 m (Foto: Norman Hallermann)
- Bild 10-6: Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion eines Pfeilers der Talbrücke Brünn, Ausschnitt des farbcodierten 3D-Oberflächenmodells mit den Bildaufnahme-positionen (links), untexturiertes (Mitte) und texturiertes (rechts) 3D-Bauwerksmodell (eigene Darstellung)
- Bild 10-7: Beispielhafte Projektion / Verortung detektierter Risse im 2D-Bild (links) und auf der 3D-Bauwerks Oberfläche (rechts)
- Bild 10-8: Lebenszyklus einer Brücke, die durch einen Neubau ersetzt wird (eigene Darstellung)
- Bild 10-9: Illustration des Wertes von Monitoring bei einer AKR-Schädigung (eigene Darstellung)
- Bild 10-10: Intelligente Brücke (Ersatzneubau) am Autobahnkreuz Nürnberg (Foto: Marko Friedel)
- Bild 10-11: Scherkondetalbrücke VDE 8.2 (Foto: Norman Hallermann)
- Bild 10-12: Querschnitt Schleusenanlage mit Indikation der Messsysteme (rote Boxen) [207]
- Bild 10-13: Messtechnisch ermittelte Neigung der Ostwand und Wassertemperatur [207]

## Tabellen

- Tab. 2-1: Vergleich faseroptischer Sensortypen [102]
- Tab. 2-2: Zuordnung von Sensorik, Messgrößen und Beispielanwendungen zu verschiedenen Untersuchungsparametern
- Tab. 3-1: Typische Messgrößen für statische und dynamische Bauwerksreaktionen, einwirkende Lasten und Umgebungsbedingungen (siehe auch Kapitel 2.4)
- Tab. 4-1: KPI gemäß COST TU1406 Projekt [4], die Begriffe werden in Kapitel 4.4 erläutert
- Tab. 4-2: Vorgeschlagene Key Performance Indikatoren
- Tab. 6-1: Schnittstelle Ziele des Bundesverkehrswegeplans 2030 und der KPIs
- Tab. 7-1: Beispiel 1 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-2: Beispiel 2 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-3: Beispiel 3 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-4: Beispiel 4 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-5: Beispiel 5 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-6: Beispiel 6 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-7: Beispiel 7 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-8: Beispiel 8 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI
- Tab. 7-9: Beispiel 9 für Beziehung zwischen Monitoring und KPI

## **Anhang**

### **Anhang A: Anlassbezogenes Monitoring von Bestandsstraßenbrücken**

Beispiele eines anlassbezogenen Monitorings für Straßenbrücken

Nr.	Name	Bundesland	Ort	Brückentyp	Baujahr	Anlass / Problem	Ziel	Konzept / Vorgehen	Messgrößen	Messtechnik / Setup	Ergebnisse	Potential
1	Stemmerbrücke B7	NW	Hagen Hohenburg	SPB-Hohlkasten	1959	Spannungskorrosion	Dektion und Lokalisierung von Spanndrähbrüchen Erfassung der Belastungsspannungszustände (Stiefteiländerungen)	- direkte Erfassung von Spanndrähbrüchen mittels Schallemissionsmessung - Erfassung von Belastungsspannungszuständen mittels Messung der Dehnung - abschrittweise Ermittlung der mittleren Krümmungen	- Schall - Neigungen - Temperaturen - Dehnungen - Niederschlag (Stürgelb)	- Mikrofone - Temperatursensoren - Dehnungssensoren - Dehnungssensoren (Folien) - Niederschlagsensor	- Spanndrähbrücke detektierbar und lokalisierbar, jedoch zusätzliche Informationen über den Belastungszustand und den Schädigungsprozess zu erhalten - Stand- und Verkehrsverhalten für den Zeitraum bis zum geplanten Ersatzneubau abgeklärt oder spezifiziert werden.	
2	Talbrücke Sachsendorfen BAB 45	NW	südlich vom Dortmund	SPB-Hohlkasten	1971	Demobauwerk OSMA-B Projekt	- Umsetzung Pilotstudie - Entwicklung eines ganzheitlichen Konzeptes für die Dauerhaftigkeitsbewertung - Aufschluss über den Bestand	- Smart Data Analyse - den Bauzustand erfassen und kontinuierlich überwachen - Zuverlässigkeitsanalyse	- Beschleunigungen - Dehnungen - Temperaturen - Neigungen - Temperatur, Schall - Achslasten (WIM)	- Beschleunigungssensoren - Dehnungssensoren - Temperatursensoren - Neigungssensoren - Niederschlagsensor	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
3	Kahnbrücke B3 (Anschluss BAB 7)	HH	Hamburg	Schleppbrücke mit Stahlhohlkasten-Überbau	1974	Nachweis: Bauprobem	- Ermittlung, ob Bauprobem tatsächlich besteht und ob Abspannkräfte ggf. aufgehoben werden können - Nachweise der Stabilität durch probabilistische Analyse	- Ermittlung der Spannungen in den Blechen - Ermittlung der Längsdruckkraft im Überbau - Erfassung meteorologischer Daten - Belastungsversuche zur Modellüberprüfung	- Dehnungen - Beschleunigungen - Temperaturen - Weiteinstellen	- Dehnungssensoren am Überbau - Beschleunigungssensoren - Temperatursensoren - Sensoren Wetterstation	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
4	Hochstraßenrampe K30, Hamburg (BAB 7 (südlich Ebnendorfer))	HH	Hamburg	Stahlbetonplattenbrücken	1974	Schadensnahme trotz Sanierungsmaßnahme	- Gewährleistung benötigter RND bis Neubau	- Ermittlung der Durchbiegung mithilfe DNS - Relativbewegung "oberer" und "unterer" OT - Alarmplan bei Überschreitungen	- Verformungen (Weg) - Temperatur	- Stromversorgung über Blei-Akkus - Messdaten online auf Website	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
5	Nordseeblick K6, Hamburg (BAB 1 (2019))	HH	Hamburg	Schleppbrücke mit orthotroper Platte	1983	Rissbildung in Stahlplatte	- Ermittlung der Verkehrslasten / Überschreitung - Aufschluss über Ermüdung	- Monitoring der Verkehrslasten - dynam. Lastensammung bei Schwerlastverfahren zur Verformungsermittlung und Schwingungsuntersuchung	- Achslasten - Verformungen (dynamisch)	- Kernschichttechnik - Achslastwaage - versch. Lastenscanner	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
6	Leinwerfeler Brücke, Hamburg (BAB 7 (2013))	HH	Hamburg	SPB-Hohlkasten	1972	Gefahr rüttelischer Versagen der Hammerköpfe an Stützgeräten	- Gewährleistung sicheren Tragwerk	- Überwachung der Verformungen - Alarmplan, bei Grenzwertüberschreitung weitere Maßnahmen (Begutachtung, ggf. Sperrung)	- Dehnungen - Temperaturen	- DNS - Temperatursensoren	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
7	Südseeblick K6, Hamburg (BAB 1 (2019))	HH	Hamburg	Stahl-Balkenbrücke	1938	Notwendige Erweiterung trotz Schäden (bei fließendem Verkehr)	- Ermittlung Verkehrslasten	- Monitoring der Verkehrslasten - dynam. Lastensammung bei Schwerlastverfahren zur Verformungsermittlung und Schwingungsuntersuchung	- Achslasten - Verformungen (dynamisch)	- Kernschichttechnik - Achslastwaage - versch. Lastenscanner	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
8	Hochstraße Ebnendorfer K20, Hamburg	HH	Hamburg	SPB-Plattenbalkenbrücke	1974	Notwendige Erweiterung trotz Schäden (bei fließendem Verkehr)	- Verifizierung des Ausbaukonzeptes - Sichernstellung der RND	- Monitoring im Normalzustand - Ermittlung von Verformungen und Risikowerten - Erfassung der Bewehrung - Verformungsbeobachtung	- Verformungen - Dehnungen - Temperatur - Überfahreignisse	- IWT - DNS - Temperatursensoren - Kernschichttechnik	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
9a	Talbrücke Sachsendorfen BAB 45	HE	nahe Herborn, südlich vom Siegen	SPB-Plattenbalkenbrücke	1968	Schadensneignis §2011 bei Einbau externer Vorspannung; Entwerferunterbrechung (Verzögerungsverträge)	- Überwachung Entwerferunterbrechung	- Monitoring der Dehnungen in Querschnittsgliedern - Relativverschiebung zw. Bestand und Entwerferunterbrechung	- Verformungen - Dehnungen - Temperatur	- IWT - DNS	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
9b	Talbrücke Sachsendorfen BAB 45	HE	nahe Herborn, südlich vom Siegen	SPB-Plattenbalkenbrücke	1968	Restnutzungsdauer bis Ersatzneubau?	- Bestätigung der benötigten RND	- Koppelflaggenüberwachung - Verkehrsbeobachtung	- Verformungen - Dehnungen - Temperatur - Überfahreignisse	- IWT an UK Steg - Temperatur - Kameras	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
9c	Thalbachbrücke BAB 7	HE	nahe Fulda	Stahl-Balkenbrücke	1968	Risse an Schweißnähten der Stützgeräten -> aufwändige 1/4 jährliche Schweißprüfung	- Vermeidung des Aufwands für Schweißprüfung - Ergründung der geschädigten Bereiche	- Schallemissionsprüfung	- Schall	- Mikrofone	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
9d	Schleppbrücke BAB 66	HE	Wiesbaden	SPB-Plattenbalkenbrücke	1963	Spannschlechte an interner Vorspannung	- Detektion von Schadenserscheinungen	- Schallemissionsprüfung	- Schall	- 32 Mikrofone	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
9e	UF-Nidda BAB 648	HE	nahe Frankfurt	SPB-Plattenbalkenbrücke	1971	Spannungskorrosionsgefährdeter Spannstahl, geringes Versagen ohne Ankleidung	- Überwachung Tragverhalten	- Überwachung der Neigungen zur Überwachung der Überbauauflage - Dehnungsmessung um Verkehrslast zu ermitteln	- Neigungen - Dehnungen - Temperaturen	- DNS - Neigungssensoren - Dehnungssensoren - Kamera	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
9f	UF-Nidda (Kreuz Frankfurt)	HE	nahe Frankfurt	SPB-Plattenbalkenbrücke	1971	Spannungskorrosionsgefährdeter Spannstahl, geringes Versagen ohne Ankleidung	- Überwachung Tragverhalten - Prüfung mit Ikon Laserscanner -> Versagen mit Ankleidung	- Überwachung der Durchbiegung mit dynamischer -> Verformungen, Eigenfrequenzen, Trendanalysen	- Durchbiegungen (dyn.)	- Messstation mit Ikon Laserscanner - Dauermessung an 4 Zielmarken an den Ht. in 2 Feldern	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
10	Hochstraße Hochheim B 327	RP	nahe Koblenz	Plattenbalkenbrücke	1972 - 1975	Koppelflaggen an 100% Koppelflaggenstab	- Frage klären: Ist Flagge dauerhaft geöffnet?	- Überwachung verschalteter Koppelflaggen - Überwachung Verkehr	- Verformungen - Temperatur - Überfahreignisse	- Liniensollnennmeter und Risikofotografie - Kameras - Temperatur	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin
11	Brücken Petersdorfer See BAB 19	WV	nahe Melchow	Verbundbrücke	1979	Nachrechnung Tragfähigkeit nur für begrenzte RND - Einschränkungen des Verkehrs und der Fahrgeschwindigkeit - Abbruch weißer TBW / Monitoring des statischen TBW	- Verifizierung des IST-Zustandes (Tragverhalten) - Abschätzung Brückenlast (Beanspr. im Normalzustand) - Überwachung der Änderung im Tragzustand - Identifikation von Überbelastungen	- Belastungsversuche vor Abriss des westlichen TBW - Überwachung lokaler Größen (Dehnungen) und globaler Größen (QS-Verbreitung, Krümmung) - Neigungen - Temperatur - Durchbiegung - Kontrollmessung - Belastungsversuche: Dehnungen + Neigungen + verstreutes Lastensammung (jährlich)	- Dehnungen - Temperaturen - Durchbiegung	- DNS - Temperatursensoren - Neigungssensoren	- Bemesslungswert der Einwirkung (Spannungen) auf Basis von Messdaten ermittelbar - Beinahezeitnahe durch probabilistischen Nachweis erbracht werden → Zuverlässigkeitsindex - Anbindung zum Achslastprotokoll	- Hilfe bei Erbringung von Nachweisen, die ohne Ermittlung der Einwirkungen, nicht zu erbringen bin

Nr.	Name	Bundesland	Ort	Brückentyp	Baujahr	Anlass / Problem	Ziel	Konzept / Vorgehen	Messgrößen	Messtechnik / Setup	Ergebnisse	Potential
12a	UF DB B 192	MV	Wären	SPB-Plattenbrücke	1973	- Spannungsrisskorrosion - bei Nachrechnung ausreichendes Ankerungsverhalten nachgewiesen	- Ermittlung ggf. auftretender irreversibler Verformungsanteile und Zuordnung der Verformungen zu konkreten Bauteilbereichen - Messung der Spannungsänderungen unter Kurzzeitverformungen durch LAUV-Überfahren; Lastermittlung	- Monitoring von Verschiebungen entlang der Struktur zur Überwachung der abschätzweisen Änderung der Krümmung - Messung der Spannungsänderungen unter Kurzzeitverformungen durch LAUV-Überfahren; Lastermittlung	- Neigungen - Temperatur - DMS in Feldmitte - Dehnungen - Schwingungen	- irreversible Krümmungsänderungen detektiert - Bereich der Schädigung konnte ermittelt werden - in Sonderprüfung wurde Bleigenau aufgefunden - Messung als Alternative zu diskontinuierlicher Sonderprüfung (Aufwand, Gleisspannung)	- Dauermessung eine Alternative zu Sonderprüfung - Risikofeld ein visuell kaum erfassbar, der Steifigkeitsverlust messtechnisch identifizierbar - durch messtechnische Überwachung Risikofeldern zeitnah detektiert werden	
12b	UF DB B 192	MV	Wären	SPB-Plattenbrücke	1973	Spannungsrisskorrosionsgefährdeter Baugliederausfall	- Identifikation von Spanndrahtbrüchen - spannungsoptische Auswertung	- Schallemissionsprüfung - spannungsoptische Auswertung	- Schall	- Mikrofone	- Zuordnung von Spanndrahtbrüchen nach aufwendiger Signalanalyse	
13	Schleierbrücke BAB 71	TH	Ruhr (bei Meiningen)	SPB-Hohlkastenbrücke	2002	Gründung in aktiven Kalksteinbruch	- Sicherstellung der Integrität des Tragwerks	- Messung der Schwingungen an Fuß und Kopf des ärgsten Pfeilers	- Beschleunigungen	- Beschleunigungssensoren	- höchstes Schwingeniveau bei deren Sperrung der Autobahn notwendig ist - messdatenbasierte Zustandsbewertung	
15	Saalebrücke (Brücke der Deutschen Einheit)	BY	Rudolphstein	Gewölbebrücke	1936 / 1989	Schäden an Fahrbahnübergängen nach "Übermischung"		- Monitoring der Verschiebung und Temperatur	- Verschiebungen - Temperaturen	- Wegaufnehmer - Temperatursensoren		
19	Rheinbrücke Schleesien BAB 843	HE / RP	Mainz/Wiesbaden	SPB-Brücke	1962	Torsionsbruch Hauptträger		- Rissanbahnung - Korrosionsanbahnung	- Verformungen			
20	Hochbrücke R2, Hannover	NI	Hannover	SPB-Hohlkastenbrücke	1975	Erhebung Basine-gestütztes Messsystem	- Ermittlung / Test der Tragfähigkeit mit alternativem Messkonzept	- gesammelte Sei durch Brücke - Messung der Verschiebung zwischen Überbau und Seil bei Schweißtafelbrücke	- Verschiebungen (optisch, dynam.)		- sehr preisgünstige und langzeitstabile Messung - Durchbiegungen infolge LKW werden erfolgreich und zuverlässig erfasst	
21	Hochbrücke R2, Hannover	NI	Hannover	SPB-Hohlkastenbrücke	1975	Ermittlung Schwereverformungen - Forschungsprojekt, Entwicklung Weight in Motion-System (WIM-System)	- Ermittlung Verkehrslasten	- Nachmontierung der Lamelle oder Traverse - Erfassung der Durchbiegungen und Beschleunigungen - Kalibrierung bei Probelastrungen	- Verformungen (optisch) - Beschleunigungen		- Achslastverteilungen	
22	Außerbahnbrücke BAB 9	BY	Stuttgart	SPB-Hohlkastenbrücke	1982	Risse in Bodenplatte mit unbekannter Ursache		- Beschleunigungsmessung an unterschiedlichen Positionen	- Beschleunigungen	- Beschleunigungssensoren	- Ermittlung Eigenfrequenzen - Verkehaufkommen über Beschleunigungsauslenkungen	
23	Talbrücke Trochau BAB 9	BY	Trochau / Pegnitz	SPB-Hohlkastenbrücke	2001			- bildbasierte Bauwerksaufnahme		- UAS mit hochauflösender Kamera	- digitales 3D-Modell mit hoher Rekonstruktionsgenauigkeit	
24	Arns-Ebert-Brücke Magdeburg	ST	Magdeburg	Naturstein-Bogenbrücke	1882	Sanierung der Brücke und begleitendes Pilotprojekt UAS-basierte						
25	Ella-Brücke Schönbeck B 246a	ST	Schönbeck	Schleierbrücke mit Stahlplattens	2013	Teilweise verschobene Pfeilerköpfe zur Bestimmung von Stützparametern	- Bestimmung der Eigenfrequenzen, Kalkül-Überprüfung	- Schwingungsmessung an Stützgeräten unter ansonsten manueller Anbringung	- Beschleunigungen - Stützgeräten	- Beschleunigungssensoren - Dyna Ford Sensor	- Kalküleffekte, Eigenfrequenzen, Dämpfung ermittelt	
26	Fuldaerbrücke BAB 66	HE	Eichenzell	SPB-Hohlkastenbrücke	1966	Studie: Anwendung verschiedener scan-	- Ermittlung von Einsatzszenarien und -bedingte Anwendung von drei zerstörungsfreien Prüfverfahren (großflächige Anwendung):		- Schall	- Radar - Impact-Echo - Ultraschall-Echo	- Bewehrungslagen u.a., Betondecken, Lage der Hohlrohre, Spanngliederung, Lokalisierung von Drahtbrüchen, Verpressfehler	

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2021

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

Butz

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

**B 161: Lagerwege von Brücken**

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

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

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

Müller

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

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

Hindersmann

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

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

Kleinert, Sawo

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

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

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

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

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

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

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

**B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan**

Staeck, Eilers

€ 15,50

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

Rill

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

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

Neumann, Brauer

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

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

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

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

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

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

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

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

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

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

**B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelnenschalen aus Stahlbeton**

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

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

#### 2022

**B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen**

Dudenhöfer, Rückert

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

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

Purtak, Möbius

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

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

Staeck

€ 15,00

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

Freundt, Böning, Fischer, Lau

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

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

Windmann

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

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

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

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

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

Schreck, Decker, Wawrzyniak

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

**B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten**

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

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

**B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau**

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

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

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

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennberger, Zulauf, Locher

€ 18,00

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

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

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

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

## 2023

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

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

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

Friedrich € 18,00

**B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm**

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

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

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

**B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken**

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

---

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

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

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

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