Geburtszertifikat für Brückenbauwerke – Die Nullmessung als Bewertungsgrundlage des Bauwerkszustands im Lebenszyklus

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 212

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Geburtszertifikat für Brückenbauwerke – Die Nullmessung als Bewertungsgrundlage des Bauwerkszustands im Lebenszyklus

von

Frederik Wedel, Yannic Stark
MKP GmbH, Weimar

Guido Morgenthal, Sebastian Rau
INFRALYTICA GmbH, Weimar

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 212

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 89.0352
Geburtszertifikat von Brückenbauwerken -
Die Nullmessung als Bewertungsgrundlage des Bauwerkszustands im Lebenszyklus - Teil 1

Fachbetreuung:
Iris Hindersmann, Lydia Puttkamer

Referat:
Stahlbau, Brückenausstattung

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293 | ISBN 978-3-95606-884-3 | https://doi.org/10.60850/bericht-b212

Bergisch Gladbach, September 2025

Kurzfassung – Abstract

Geburtszertifikat für Brückenbauwerke

Die Nullmessung als Bewertungsgrundlage des Bauwerkszustands im Lebenszyklus

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, ein umfassendes Konzept für ein „Geburtszertifikat“ von Brückenbauwerken allgemein zu entwickeln und dann an einer konkreten realen Brücke prototypisch umzusetzen. Das Geburtszertifikat soll dabei als Grundlage für die Zustandsüberwachung und Erhaltungsplanung über den gesamten Lebenszyklus der Brücke dienen. Im Mittelpunkt steht dabei die sogenannte Nullmessung, die eine detaillierte, systematische Erfassung und Dokumentation des Ausgangszustandes des Bauwerks nach der Fertigstellung und vor der Verkehrsfreigabe mit vielfältigen Prüf- und Messmethoden beinhaltet. Die Nullmessung dient somit der Charakterisierung eines Initialzustands (Referenzzustand nach der Fertigstellung). Der ermittelte Referenzzustand ist die Grundlage für Vergleichsbetrachtungen im Rahmen der Erfassung und Bewertung des Bauwerkszustandes im Zuge der Erhaltung und des Bauwerksmanagements. Er bildet erstmalig die Basis, um im Laufe des Lebenszyklus auftretende Veränderungen und Schäden frühzeitig durch den Bezug zum Referenzzustand zu detektieren und in ihrer Entwicklung zu dokumentieren und zu bewerten. Durch die Einführung dieses Konzeptes kann das Geburtszertifikat den Ausgangspunkt für die Umsetzung prädiktiver Erhaltungsmethoden darstellen.

Dabei umfasst das Geburtszertifikat eine möglichst breite und aussagekräftige Erfassung und Dokumentation physikalischer Parameter, chemischer Aspekte und geometrischer Eigenschaften des Bauwerks. Zu den physikalischen Parametern zählen beispielsweise Materialdehnungen, Verschiebungen, Eigenfrequenzen und -formen, die wichtige Hinweise auf das Tragverhalten der Brücke geben. Diese Daten werden durch sensorbasierte Systeme, wie beispielsweise Dehnungsmessstreifen, faseroptische Sensoren, und Beschleunigungsaufnehmer einmalig oder kontinuierlich über einen Zeitraum von einem Jahr vor oder kurz nach der Inbetriebnahme des Bauwerks erfasst und durch geeignete Prozessierung der Messdaten ermittelt. Chemische Aspekte, wie die Bestimmung des Chloridgehalts, der Carbonatisierungstiefe und des Feuchtigkeitsgehalts des Betons, liefern wichtige Informationen über die Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Diese chemischen Aspekte sind entscheidend, um eine mögliche Korrosion der Bewehrung frühzeitig zu erkennen, bevor gravierende strukturelle Schäden auftreten.

Das Geburtszertifikat soll nicht nur chemische Aspekte und physikalische Parameter wie die statischen oder dynamischen Parameter, sondern auch mit bildbasierten oder anderen ZfP-Verfahren erfassbare Eigenschaften beinhalten. Die geometrische Beschreibung der Brücke ist daher ein weiterer zentraler Bestandteil des Geburtszertifikats. Dabei sind die Form und die Oberflächenstruktur des Tragwerks vor Verkehrsfreigabe der Brücke aufzunehmen. Diese geometrischen Aspekte des Referenzzustands sollen durch ein georeferenziertes hochgenaues 3D-Bauwerksmodell definiert werden, das beispielsweise photogrammetrisch auf Basis systematisch generierter Bilddaten oder mithilfe von Scanningverfahren generiert wurde und anschließend in ein vorhandenes As-Built-Modell integriert wird. Die geometrische Aufnahme in Form einer „Nullmessung“ ist insbesondere für zukünftige Verformungsermittlungen sowie schadensfokussierte Zustandsbewertungen auf Basis vielfältiger sensor- und bildbasierter Monitoringverfahren ein wichtiger Ausgangspunkt. Am 3D-Bauwerksmodell können die vielfältig erfassten Eigenschaften und Zustandsparameter zusätzlich eindeutig und nachvollziehbar verortet werden.

Das Geburtszertifikat wird in einer standardisierten, leicht zugänglichen Form als kompakte und übersichtliche Zusammenfassung der wichtigsten Informationen in Form eines PDF-Dokumentes erstellt. Zur Gewährleistung einer langfristigen und flexiblen Nutzung und digitalen Verarbeitung der gewonnenen Daten enthält das PDF-Dokument Verweise auf alle Datensätze und Modelle, die zusätzlich bereitgestellt werden. Diese Verlinkungen beinhalten detaillierte Mess- und Bilddaten, abgeleitete oder aggregierte Parameter, Modelle und andere relevante Informationen, die zur Beurteilung des Zustandes notwendig sind. Diese Informationen werden in entsprechenden Datenbanken und strukturierten Dateisystemen gespeichert.

Abschließend wird das erarbeitete Konzept des Geburtszertifikates prototypisch an einem Bauwerk umgesetzt. Dabei wird auf die verschiedenen, zuvor erarbeiteten Eigenschaften und Aspekte eingegangen und dargestellt wie einzelne Parameter und das georeferenzierte 3D-Bauwerksmodell ermittelt werden können. Zudem wird auch die Ableitung von Daten für die Zustandsbewertung sowie das Datenmanagement thematisiert.

Das Geburtszertifikat unterstützt die Einbindung in moderne digitale Infrastruktursysteme, wie das Lebenszyklusmanagement von Brücken, und bildet die Grundlage für die Integration in Überwachungssysteme wie Digitale Zwillinge. Die Einführung eines solchen digitalen Zertifikates für Brücken ist ein wichtiger Schritt hin zu einer nachhaltigeren und effizienteren Nutzung von Infrastrukturressourcen.

Birth certificate for bridges

Zero measurement as a basis for assessing the condition of the building in its life cycle

The objective of this research project was to develop a comprehensive concept for a “birth certificate” for bridge structures and to implement it prototypically on a real bridge. This birth certificate is intended to serve as a basis for condition monitoring and maintenance planning throughout the entire life cycle of the bridge. Central to this is the so-called zero measurement, which involves a detailed, systematic recording and documentation of the initial condition of the structure after completion and before traffic opening, using a variety of testing and measurement methods. Thus, the “zero measurement” serves to characterize an initial condition. The determined reference condition forms the basis for comparative analyses in the context of capturing and evaluating the structure’s condition as part of maintenance and management. For the first time, it provides a basis for early detection of changes and damages that occur during the life cycle by comparing them to the initial condition, and documentation and assessment of their development. By introducing this concept, the birth certificate can constitute the starting point for the implementation of predictive maintenance methods.

The birth certificate aims to capture and document a wide range of significant physical parameters, chemical aspects, and geometric properties of the structure. Physical parameters include, for example, strains, displacements, natural frequencies and modes, which provide important insights into the load-bearing behavior of the bridge. This data is captured by sensor-based systems such as strain gauges, fiber optic sensors, and accelerometers, either once or continuously over a period of one year before or shortly after the bridge is put into operation and determined through appropriate data processing. Chemical aspects, such as chloride content, carbonation depth, and moisture content of the concrete, provide important information about the durability of the structure. These chemical aspects are crucial for detecting potential corrosion of reinforcement at an early stage before serious structural damage occurs.

The birth certificate should not only include chemical aspects and physical parameters like static or dynamic properties, but also properties that can be captured using image-based or other non-destructive testing methods. Therefore, the geometric representation of the bridge is another key component of the birth certificate. This involves recording the shape and surface of the load-bearing structure before the bridge is opened to traffic. These geometric aspects of the reference condition should be defined through a georeferenced, highly accurate 3D model of the structure, which is generated e. g. photogrammetrically based on systematically generated image data or using scanning techniques and is then integrated into an existing as-built model. The geometric recording in the form of a "zero measurement" is particularly important as a starting point for future deformation monitoring and damage-focused condition evaluations based on a wide range of sensor- and image-based monitoring methods. The various recorded properties and condition parameters can also be clearly and traceably located in the 3D model of the structure.

The birth certificate is created in a standardized, easily accessible form as a compact and clear summary of the most important information in the form of a PDF document. To ensure long-term and flexible usage and digital processing of the acquired data, the PDF document contains references to all datasets and

models that are additionally provided. These references include detailed measurement and image data, derived or aggregated parameters, models, and other relevant information necessary for condition assessment. The data is stored in appropriate databases and structured file systems.

Finally, the developed concept of the birth certificate is prototypically implemented on a bridge structure. The various properties and aspects previously developed are addressed, and it is demonstrated how individual parameters and the georeferenced 3D model of the structure can be determined. In addition, the derivation of data for condition assessment as well as data management is discussed.

The birth certificate supports integration into modern digital infrastructure systems, such as life cycle management of bridges, and forms the basis for integration into digital monitoring systems like digital twins. The introduction of such a digital certificate for bridges is an important step towards a more sustainable and efficient utilisation of infrastructure resources.

Summary

Birth certificate for bridges

Zero measurement as a basis for assessing the condition of the building in its life cycle

The goal of this research project is to develop a comprehensive concept for a birth certificate of bridge structures that documents the condition of bridges after their completion and before they are put into service, using modern technologies. This birth certificate is intended to serve as a basis for condition monitoring and maintenance planning over the entire lifecycle of the bridge. The birth certificate represents an application of the digital twin in the field of preservation planning and implementation.

The introduction of a birth certificate for bridges addresses a fundamental problem in structure monitoring and preservation: the need for a clear reference condition against which later changes in the condition of the bridge can be compared. In current practice, the determination of this reference condition, also known as the baseline measurement, is often carried out only after the first changes or damages to the structure have been detected and is usually limited to certain parts or sections of the structure. As a result, possible earlier changes in condition remain undetected, making damage assessment and the decision-making process for preservation measures more difficult. This gap can be closed by documenting the original condition after the completion of construction and before the structure is put into service, as part of the birth certificate.

At the heart of the baseline measurement is a detailed, systematic recording using a variety of testing and measurement methods with temporarily installed measuring technology and the documentation of the structure's condition after its completion. The baseline measurement thus serves to characterize a reference condition. By capturing the initial condition as broadly and meaningfully as possible, future deteriorations should be detected early by referencing the initial state and documented and assessed in their development. This allows the birth certificate to also form the basis for the implementation of predictive maintenance methods.

The birth certificate serves as a central database for the long-term documentation of the reference condition, which is represented by various appropriate parameters and aspects. It includes physical parameters, chemical aspects, and geometric properties of the bridge.

Non-destructive measurement methods for structure monitoring and diagnostics are used to capture physical parameters and chemical aspects. Physical properties include static and dynamic parameters such as prestressing forces, material strain, displacements, natural frequencies, modes, modal masses, and modal damping. These parameters are particularly relevant for assessing the structural integrity of the bridge. For example, the natural frequency provides information about the dynamic behavior of the bridge. Changes in natural frequencies or modal masses can indicate structural problems or damage. Physical parameters are derived from the measurement data of sensor-based systems, such as strain gauges, fiber optic sensors, and accelerometers, through appropriate processing. Particularly promising for the sensor-based monitoring of bridge structures is the use of fiber optic sensors, which are installed during the construction phase or after the completion of the structure. These cables act as sensors by transmitting light pulses through the fibers. When the material in which the fibers are embedded experiences loads or strains, the light's backscatter patterns change. These changes are analyzed to obtain detailed and continuous data on material stress and strain. This enables comprehensive monitoring of the entire structure, as the fiber optic cables can capture continuous measurements along their entire length. These data are recorded in real-time and read on-site with an interrogator. In the future, measurements with fiber optic sensors could become part of structure inspection, as these sensors remain installed throughout the structure's lifecycle. Chemical aspects such as carbonation depth, moisture and chloride content, as well as the material's compressive strength and modulus of elasticity, also play an important role in assessing the condition of bridges. These parameters, which are determined using diagnostic methods, provide important information about the long-term behavior and durability of the structure. The capture of chemical aspects is crucial to, for example, detect potential corrosion of reinforcement in concrete structures at an early stage before significant structural damage occurs. Early detection of this data allows for preventive measures to avoid major damage and significantly increases the availability of the bridge over its lifecycle.

The birth certificate is not only intended to include physical and chemical parameters but also properties that can be recorded using image-based or other non-destructive testing (NDT) methods. Geometric recording of the bridge is another key component of the birth certificate. The form and surface structure of the load-bearing structure must be captured before the bridge is opened to traffic. These geometric aspects of the reference condition should be defined by a georeferenced, highly accurate 3D model of the structure, generated photogrammetrically based on systematically produced image data or using scanning techniques. The geometric recording in the form of a "baseline measurement" is particularly important for future deformation assessments and damage-focused condition evaluations based on various sensor- and image-based monitoring methods. The diverse properties and condition parameters collected can also be clearly and traceably located on the 3D model of the structure.

The georeferenced 3D surface model represents the as-built geometry of the structure. By appropriately processing the data, e.g., on a cross-sectional level, a comparison with the as-planned geometry can be generated. Geometric dimensions, such as the superstructure and piers, as well as relevant geometric characteristics like misalignments or initial curvatures, can be determined. By comparing the as-built and as-planned geometry, geometric deviations from the planning model are identified and subsequently modeled. By updating the geometry in the existing BIM and calculation models, geometric uncertainties in the built form are minimized, maximizing the usefulness of the models over the lifecycle. The as-built model can serve as the basis for highly accurate deformation monitoring. By referencing the initial deformation condition, the temporal evolution of the deformation can be monitored through repeated recordings and reconstructions of the structure. For example, the onset and progression of a component's misalignment over the bridge's lifecycle can be observed.

The initial deformation figure can be derived from the as-built model and used to calibrate numerical calculation models. Structural stiffnesses, for example, can be identified, which are essential for future structural safety considerations and can be used to identify and locate damage. Especially when combined with sensor-based physical parameters such as natural frequencies, the quality of model calibration and, consequently, parameter identification can be further enhanced.

To document the initial condition of the structure's surface, initial surface damages must be identified and digitally recorded. Damage detection should be automated using machine learning methods, such as artificial neural networks. In doing so, the damages in the reference condition are precisely detected in the individual images through semantic segmentation. This creates additional image data with condition-related information alongside an image of the structure's surface. Damage information can be georeferenced on the 3D surface model or a BIM model. In repeated recordings of the bridge or individual components during its lifecycle, new damages can be identified, or the progression of existing damages observed, i.e., damage progression becomes detectable and quantifiable. Damage progression can be tracked both geometrically and temporally due to the clear location of the damage on the structure. All damages must be digitally recorded and stored in a database with their characteristics (type, location, size). For each individual damage, a rating can be carried out according to RI-EBW-PRÜF. Using additional structure-related information, a condition rating based on visually captured damages can be derived. In this way, information for condition assessment is obtained in the form of an assignment of damage classes and information on temporal development, which in turn can be incorporated into lifecycle management forecast models.

The use of modern monitoring and diagnostic methods exponentially increases the amount of data collected. This generates enormous amounts of time-series data. In parallel, chemical analyses provide information on material changes that may occur over time. High-resolution geometric data, such as those created through 3D reconstruction or scanning technologies, are added to produce highly accurate georeferenced models of the structure. This data diversity and volume pose challenges for road construction authorities in developing a powerful data management system capable of efficiently storing, managing, and analyzing the various data types. Storing and processing this data not only requires significant computing and storage capacity but also a flexible infrastructure that can keep pace with growing demands. Here, the application of the FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) in data management is fundamental. These principles ensure that the collected data can be effectively used not only in the short term but throughout the entire lifecycle of a structure. In this context, implementing federated systems offers a forward-looking solution. Federated information systems allow decentralized storage and management of monitoring and diagnostic data, while also serving as a central data source for each structure. These systems consist of several autonomous units that can be operated at different locations, creating a flexible and scalable infrastructure tailored to the specific needs of the federal structure of road construction authorities.

Furthermore, the concept of the digital twin plays a central role in the birth certificate. A digital twin is a virtual model of the bridge that can reflect all relevant condition data in real-time. The digital twin can be operated throughout the entire lifecycle of the structure. Continuous monitoring solutions can provide significant added value, as sensor-based measurement data and diagnostic results are continuously fed into the model. By combining the various data recorded in the birth certificate, a comprehensive picture of the bridge is created, serving as a basis for maintenance and preservation measures. Especially in predictive maintenance, the digital twin offers new possibilities. Deviations from the original reference condition can be detected early through comparisons, allowing proactive measures to be taken before serious damage occurs. The potential of this approach can be realized, particularly when the collected data is digitally evaluated and stored, enabling high-quality extraction of condition-related information. This primarily requires digital referencing of the data to the structure's geometry and automated analysis. Therefore, data storage should be based on the concept of a digital twin, meaning linkage to a digital structure model.

The birth certificate will be created in a standardized, easily accessible form as a compact and clear summary of the most important information in the form of a PDF document and integrated into the SIB-Bauwerke digital structure management system to ensure long-term and sustainable use of the reference condition data. To ensure long-term and flexible use and digital processing of the collected data, the PDF document contains references to all datasets and models that are also provided. These references include detailed measurement and image data, derived or aggregated parameters, models, and other relevant information needed for condition assessment. This information is stored in corresponding databases and structured file systems. Digital twin implementations can access this data and display it in its original form in the relevant structure context or perform further aggregations to represent the condition.

The introduction of a birth certificate offers numerous advantages for the long-term monitoring and preservation of bridges. The key benefits over the lifecycle of the structure include:

1. **Early damage detection**: Through comprehensive recording of the bridge's reference condition, changes in the structure's condition can be detected early through repeated measurements. Damage can be identified, its temporal progression monitored, and repairs carried out before it has serious effects on structural safety.
2. **Reliable decision-making basis**: The birth certificate provides a meaningful database on which decisions about preservation measures can be made in conjunction with evaluations and forecasts of condition development. The condition information enables targeted planning of measures to extend the bridge's service life.
3. **Optimization of maintenance costs**: The detailed information and resulting condition development allow for optimized planning of maintenance and preservation measures. Preservation demand forecasts benefit from this information. A transition from reactive to predictive maintenance approaches can thus be achieved.
4. **Increase in structural safety**: In addition to data from close-range structure inspection, additional data from discrete or continuous monitoring and resulting statically relevant variables are available for assessing structural safety and behavior.
5. **Long-term sustainability**: By providing and integrating information about the reference condition for bridge lifecycle management, sustainable use of the infrastructure is ensured. Capturing and managing condition data enables precise planning and implementation of preservation measures that can extend the structure's service life.

Inhalt

1 Einleitung 12

2 Stand der Wissenschaft und Technik 12

2.1 Das Geburtszertifikat im Kontext des Digitalen Zwillings 12

2.2 Monitoring an Ingenieurbauwerken 13

2.3 Diagnostische Verfahren 14

2.4 Bildgebende Verfahren und 3D-Erfassung von Bauwerksgeometrien 15

2.4.1 Bildgebende Verfahren 15

2.4.2 3D-Erfassung durch Photogrammetrie und Scanning-Verfahren 16

2.5 Bauwerksprüfung 17

2.6 Geburtszertifikat in der Schweiz und Deutschland 18

2.7 Model Updating, Systemidentifikation und Schadensdetektion 18

2.8 CDE und Datenmanagement 21

3 Konzept des Geburtszertifikats 23

3.1 Physikalische Parameter 24

3.1.1 Materialdehnung/-spannung 24

3.1.2 Druckfestigkeit 24

3.1.3 Elastizitätsmodul 25

3.1.4 Eigenfrequenz 26

3.1.5 Eigenschwingungsform 26

3.1.6 Modale Masse 27

3.1.7 Modale Dämpfung [Dämpfungsverhältnis] 27

3.1.8 Hängerkräfte 28

3.1.9 Externe Vorspannkraft 29

3.1.10 Verschiebung / Verformung 29

3.1.11 Wärmeausdehnungskoeffizient 30

3.1.12 Akustische Signatur 31

3.2 Chemische Aspekte 31
3.2.1 Carbonatisierung 31
3.2.2 Feuchtegehalt 32
3.2.3 Chloridgehalt 32
3.3 Erfassung / Umgang mit Metadaten 33
3.4 Geometrische Eigenschaften 34
3.4.1 Bild- und laserscanbasierte Bauwerksaufnahme 35
3.4.2 Aspekt 1 – Bauwerksgeometrie 37
3.4.3 Aspekt 2 - Bauwerksoberfläche 38
3.4.4 Aspekt 3 – Verortung beliebiger Informationen 39
3.4.5 Anwendungsszenarien für die geometrischen Aspekte im Geburtszertifikat 39
3.5 Definition des Geburtszertifikats 43
3.5.1 Namensfindung 43
3.5.2 Zeitlicher Horizont 44
3.5.3 Form und Inhalt 45
3.5.4 Integration in das Erhaltungsmanagement 46
3.6 Datenmanagement 48
3.6.1 Ausgangssituation 48
3.6.2 Zielvorstellung 49
3.6.3 Grundlagen für die Konzeption eines Datenmanagements 50

4 Prototypische Umsetzung des Konzepts 52

4.1 Bauwerksbeschreibung 52
4.2 Maßnahmen zur Ermittlung von Kenngrößen am Referenzbauwerk 52
4.2.1 Sensorbasiertes Monitoring 52
4.2.2 Diagnostik 55
4.2.3 Bildgebende Verfahren und Erfassung der 3D-Bauwerksgeometrie 56
4.3 Datenmanagement 63
4.3.1 Daten des sensorbasierten Monitorings 63
4.3.2 Daten des bildbasierten Monitorings 64
4.4 Zeitliche Zusammenhänge 65

5 Zusammenfassung und Ausblick 66

Literatur 68

Tabellen 75

Bilder 76

Anhänge 77

Anhang A: Verfahren zur Erfassung physikalischer und chemischer Parameter 77

Anhang B: Erkennbarkeit typischer Schäden an Brückenbauwerken 83

Anhang C: Abkürzungen 85

1 Einleitung

Die Möglichkeiten eines Geburtszertifikats für Brücken adressiert ein grundlegendes Problem der Bauwerksüberwachung und -erhaltung: die Notwendigkeit eines eindeutigen Referenzzustands, mit dem spätere Veränderungen im Zustand der Brücke verglichen werden können. In der heutigen Praxis wird dieser Referenzzustand, auch Nullmessung genannt, oft erst durchgeführt, nachdem erste Veränderungen oder Schäden am Bauwerk festgestellt wurden und meist nur für bestimmte Bauwerksteile oder -abschnitte. Dies hat zur Folge, dass mögliche frühere Zustandsänderungen unerkannt bleiben und somit die Schadensbeurteilung und die darauf basierende Entscheidungsfindung für Erhaltungsmaßnahmen erschwert wird. Diese Lücke kann durch die Dokumentation des ursprünglichen Zustands nach Abschluss der Baumaßname und vor Inbetriebnahme des Bauwerks im Rahmen des Geburtszertifikats geschlossen werden.

Ziel des Projektes ist es, ein umfassendes Konzept für ein solches Geburtszertifikat zu entwickeln und dieses an einer realen Brücke prototypisch zu demonstrieren. Dieses Konzept soll nicht nur physikalische Parameter wie die statischen oder dynamischen sondern auch chemische und mit bildbasierten oder anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) erfassbare Eigenschaften beinhalten. Die Erfassung dieser Daten vor der offiziellen Verkehrsfreigabe ermöglicht es, den Ausgangszustand der Brücke aussagekräftig und hochgenau festzuhalten. Jeder spätere Zustand kann dann mit diesem Referenzzustand verglichen werden, was eine deutlich verbesserte Grundlage für die Erhaltung und Überwachung des Bauwerks bietet.

Diese systematische Erfassung und Dokumentation des Ausgangszustands als Teil des Geburtszertifikats stellt eine zentrale Herausforderung dar. Sie erfordert eine zuverlässige Erfassung und Verwaltung digitaler Bestandsdaten, die über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks nutzbar und auswertbar bleiben müssen. Diese Vorgehensweise ermöglicht nicht nur eine genauere Beurteilung der Zustandsentwicklung und der Schadensentstehung, sondern erleichtert auch die vorbeugende Bauwerkserhaltung und kann somit zur Verlängerung der Lebensdauer der Brücke beitragen. Durch die frühzeitige Erfassung und kontinuierliche Überwachung wird das Geburtszertifikat zu einem wertvollen Instrument, das den Ingenieuren hilft, die strukturelle Integrität und Sicherheit von Brückenbauwerken effektiv zu gewährleisten.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Das Geburtszertifikat im Kontext des Digitalen Zwillings

Beim Zukunftsbild „Digitaler Zwilling“ fließen alle Daten über das Bauwerk über alle Lebenszyklusphasen hinweg in einem zentralen Modell zusammen, sodass sie gesamtheitlich betrachtet und ausgewertet werden können [1], [2]. Auf diese Weise können die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Zustandsbewertung eines Bauwerks gesteigert werden. Das betrifft Daten aus der Planungs- und Bauphase, der Betriebsphase (längste Phase) und schließlich auch den Rückbau. Nach der Planungs- und Bauphase kann der Referenzzustand des Bauwerks erfasst und damit ein „Geburtszertifikat“ erstellt werden. Fortan können Änderungen dieses Zustands während der Betriebsphase erfasst werden [3]. Das BMDV sieht den Digitalen Zwilling im Masterplan Bundesfernstraßen [4] als zentrales Element für eine nachhaltige und digitale Arbeitsweise im Umgang mit Ingenieurbauwerken.

Beginnend mit dem Reifegrad 1 besteht ein Digitaler Zwilling einzig aus einer virtuellen Nachbildung des realen Objekts mit der Einbindung von objektbezogenen (Zustands-)Daten. Hier sind die Daten im Kontext des Geburtszertifikats von besonderer Relevanz. Bei der Zusammenstellung dieser Daten spielt die BIM-Methode eine wichtige Rolle. Der Reifegrad 1 des Digitalen Zwillings kann daher mit einem As-Built- bzw. As-Maintained-Modell der BIM-Methode gleichgesetzt werden. In ihm liegen alle statischen (sich in der Regel nur langsam ändernden) Informationen vor. Diese stammen einerseits aus der Planungs- und Bauphase (z. B. Betoneigenschaften und -lieferanten oder Schweißverfahren/-zusatzstoffe, etc.) und werden durch Informationen aus der Betriebsphase ergänzt (bauliche Änderungen, Schäden etc.). Im Reifegrad 2 werden zusätzlich sensorbasierte Messdaten für dessen Zustandsbewertung in Echtzeit genutzt. Die oben genannten wesentlichen Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Geburtszertifikat

lassen sich in diese Reifegraddarstellung einsortieren: Während die Informationen aus der Planungs- und Bauphase über eine strukturierte Dokumentation mithilfe eines BIM-Modells den ersten Reifegrad darstellen, findet über die Erfassung physikalischer Parameter mithilfe von Monitoring der Übergang in den zweiten Reifegrad statt. Dabei wird durch das Geburtszertifikat nicht direkt ein digitaler Zwilling erzeugt, jedoch die Grundlage für den zweiten Reifegrad geschaffen. Ein Digitaler Zwilling im Reifegrad 3 nutzt diese Daten weiterführend und erstellt Zustandsprognosen, aus denen er im Reifegrad 4 mithilfe von maschinellem Lernen eigenständig Handlungsempfehlungen entwickelt. Im höchsten Reifegrad 5 ist der Digitale Zwilling autonom, lernt und handelt selbstständig. Aktuelle Entwicklungen gehen im Infrastrukturbereich allerdings noch nicht über den Reifegrad 3 hinaus [5]. Beispiele sind die Köhlbrandbrücke [6]-[9] oder die Filstalbrücken [10]-[14]. In beiden Fällen steht die Darstellung des aktuellen und objektiven Bauwerkszustands im Fokus, nicht aber die Integration eines Referenzzustands, wobei für die Filstalbrücken erste Ansätze implementiert wurden.

2.2 Monitoring an Ingenieurbauwerken

Unter Bauwerksmonitoring wird die kontinuierliche und systematische Überwachung eines Bauwerks mittels eines sensorischen Messsystems verstanden. Bauwerksmonitoring wird aktuell in der Regel problembezogen und nur in Ausnahmefällen bei Brücken eingesetzt [15]. Die Mehrwerte von Monitoring im Kontext einer kontinuierlichen Überwachung und prädiktiven Erhaltung werden aktuell noch nicht genutzt [5]. Durch das Bestreben der Bundesregierung und insbesondere des BMDV, die Digitalisierung der Infrastruktur zu beschleunigen, gerät das Monitoring bei Neubauten immer stärker in den Fokus. Projekte wie „Leitfaden - Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke“ (BASt) [16] helfen dabei, den Einsatz von Monitoring in der Praxis zu verbessern. Auch die DIN 1076 [17] wird in der Neufassung das Monitoring zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung behandeln. Da potenzielle Schadensorte bei Neubauten in der Regel nicht exakt bekannt sind, sollte die Erfassung des Referenzzustands nicht über lokale Messungen (z. B. Verschiebungen) durchgeführt werden, sondern es sollten flächendeckende Messverfahren zum Einsatz kommen, die eine Aussage über das globale Tragverhalten zulassen.

Monitoring wird unter anderem durch eine „kontinuierliche“ Datenerfassung definiert. Im Kontext des Geburtszertifikats ist es jedoch denkbar, dass bestimmte Messungen und Versuche nach Fertigstellung des Bauwerks mit temporärer Messtechnik einmalig durchgeführt werden, um einen Referenzzustand zu erfassen, und die Messtechnik anschließend zurückgebaut wird, um Kosten zu sparen. Belastungsversuche können helfen, bauwerksspezifische Parameter zu erfassen. Allerdings finden solche Versuche in Deutschland nur in Einzelfällen und in der Regel anlassbezogen statt [18]. Wenn sich im Laufe der Lebensdauer bestimmte Fragestellungen zum Zustand ergeben, können die Monitoringmaßnahmen wiederholt werden. Die Messverfahren und Auswertungen sollten demnach robust gegenüber sich ändernden Messaufbauten oder Auswerteverfahren ausgelegt sein. Wichtige Hinweise und Herangehensweisen werden in [19] beschrieben. Es muss auch geprüft werden, inwieweit die Untersuchungen in [20] für die vorliegende Aufgabenstellung relevant sind. Vielversprechende Ansätze sind daher zum Beispiel faseroptische Messungen oder Beschleunigungsmessungen:

Faseroptische Messungen

Faseroptische Sensoren eignen sich zur Erfassung von Temperaturen, Dehnungen, Feuchte und Schall. Im weiteren Verlauf des Berichts soll es in erster Linie um Dehnungsmessungen gehen: Sie haben im Vergleich zu konventionellen Dehnungsmessungen den Vorteil, dass sie die Dehnung kontinuierlich entlang einer langen Strecke erfassen und nicht nur an diskreten Stellen. Sie eignen sich daher gut für die Überwachung größerer Bauteile oder Brücken [21]-[23]. Die Faser selbst ist sehr kostengünstig (etwa 10 €/m) (Preisstand 2024)) während die Erfassungseinheit (Interrogator) derzeit noch sehr kostenintensiv ist. Faseroptische Messungen bieten sich dennoch für die Erfassung des Referenzzustands an, da Kurzzeitmessungen zu diskreten Zeitpunkten durchgeführt werden können. Entsprechend sind faseroptische Messungen für die Erstellung eines Geburtszertifikats bzw. für das gesamte Lebenszyklusmanagement sehr vielversprechend. Beispielsweise können Folgemessungen zum Referenzzustand bei Bauwerksprüfungen oder planmäßig außergewöhnlichen Belastungen (Schwertransporte, Belastungsversuche, etc.) durchgeführt werden [3]. Insbesondere die Rissentstehung oder -entwicklung in Betonbauteilen kann mithilfe von Faseroptik sehr gut erfasst werden.

Beschleunigungs-/Schwingungsmessungen

Über die Messung der Beschleunigungen an ausgewählten Stellen des Tragwerks können Eigenfrequenzen und Eigenformen bestimmt werden. Sollte es zu Zustandsänderungen oder Schäden am Tragwerk kommen, spiegelt sich dies in einer Änderung dieser Kennzahlen wider [24], sodass entsprechend reagiert werden kann. Den genauen Schadensort auf Grundlage dieser Messungen festzustellen, bleibt dabei eine Herausforderung [3]. Die Ermittlung von Eigenfrequenzen und -formen kann bei Bedarf wiederholt werden, um potenzielle Änderungen festzustellen.

Der Vorteil solcher integralen Messverfahren ist die großflächige Erfassung von Schäden oder Strukturänderungen, ohne vorab den Schadensort zu kennen. Außerdem können mit den vorgenannten Verfahren Referenzzustände erfasst werden. Anhand von Folgemessungen oder einer Dauerüberwachung können Abweichungen von diesem Zustand bestimmt werden. Schwingungsmessungen sind daher sehr gut für die Erstellung eines Geburtszertifikats bzw. ein Monitoring ab Stunde Null und damit für ein die gesamte Bestandsdauer umfassendes Lebenszyklusmanagement geeignet. Flächendeckende Messverfahren eignen sich gleichermaßen auch für Bestandsbauwerke mit spezifischen Problemstellungen.

2.3 Diagnostische Verfahren

Die Fachdisziplin der Bauwerksdiagnostik bietet vielfältige Methoden und Messverfahren für die realitätsnahe Ermittlung von Bestands- und Zustandsinformationen, auch über den visuellen Eindruck hinaus. Die Abgrenzung zu anderen Datenquellen erfolgt in der Regel anhand folgender Gesichtspunkte:

- Diagnostik meint Bauwerksuntersuchungen, die anlassbezogen durchgeführt werden und einem definierten Untersuchungsziel dienen. Diese Zielstellung kann sehr unterschiedlich sein und reicht von der Ermittlung tatsächlicher Materialeigenschaften bis hin zu komplexen Bestandsaufnahmen zur Kompensation mangelnder Bestandsunterlagen (i. A. a. [25]).
- Diagnostik meint darüber hinaus Bauwerksuntersuchungen, die in der Tiefe über eine visuelle Begutachtung und Inspektion hinausgehen, in der Breite im Gegensatz zur Bauwerksprüfung jedoch im Allgemeinen nur auf Teilbereiche eines Bauwerks ausgelegt sind (i. A. a. [26]).
- Im Gegensatz zum Bauwerksmonitoring finden diagnostische Untersuchungen in der Regel zu konkreten Untersuchungszeitpunkten statt, die Frequenz der Datenerfassung ist vergleichsweise gering (einmalig bis mehrmalig, nicht dauerhaft).

Die Diagnostik ermöglicht einen Blick in das Bauwerksinnere und bietet damit die Möglichkeit, wesentliche zustandsrelevante Tiefeninformationen zu gewinnen. Bauwerksdiagnostische Untersuchungen gehen über den Umfang einer Bauwerksprüfung hinaus. Sie tragen zu konkreten Untersuchungszeitpunkten und anlassbezogen dazu bei, wesentliche Grundlagen für beispielsweise rechnerische Bewertungen oder durchzuführende Erhaltungsmaßnahmen zu gewinnen. Materialparameter müssen dadurch nicht anhand von Bestandsunterlagen geschätzt werden, sondern werden direkt am Bauwerk gemessen. Die dafür erforderlichen Untersuchungen gelingen zunehmend durch zerstörungsfreie Messverfahren, ergänzt durch lokale minimalinvasive Eingriffe in die vorhandene Bausubstanz. Ein geregelter Anwendungsfall der Bauwerksdiagnostik ist die Objektbezogene Schadensanalyse (OSA), die schadensbezogen auf Anordnung der Bauwerksprüfung erfolgt und deren Ergebnisse unmittelbar Einfluss auf die Schadensbewertung im Rahmen der Bauwerksprüfung nehmen [5].

Diagnostikdaten werden mithilfe von unterschiedlichen zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Untersuchungen unmittelbar am Bauwerk bzw. an entnommenen Materialproben gewonnen. Der Anteil und die Akzeptanz der zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden steigen dabei stetig und invasive Eingriffe in das Bauwerk können deutlich reduziert werden [27]. Die Umsetzung und Dokumentation der Untersuchungsleistungen erfolgt durch einen Spezialdienstleister für Bauwerksdiagnostik. Die Datenerfassung vor Ort, im Labor und im Büro findet dabei idealerweise digital entsprechend eines definierten Datenmodells statt. Zu den Untersuchungsverfahren gehören beispielsweise: Bohrkernentnahmen und -beprobungen, Bohrmehlprobenentnahme und -analyse, Bestimmung der

Chloideindringtiefe oder der Carbonatisierungstiefe, Bewehrungsortung mittels zerstörender oder zerstörungsfreier Methoden, etc.

2.4 Bildgebende Verfahren und 3D-Erfassung von Bauwerksgeometrien

2.4.1 Bildgebende Verfahren

An Brückenbauwerken sind häufig oberflächliche Schäden von besonderer Bedeutung, da sie bei zu später Detektion zu größeren Folgeschäden führen können. Es handelt sich dabei z. B. um Risse und Abplatzungen an Beton- oder Fehlstellen im Korrosionsschutz von Stahlbauteilen [28]. Der Einsatz fotografischer bildgebender Aufnahmemethoden ist für die Erfassung solcher Schäden sehr gut geeignet (z. B. [29]), denn sie ermöglichen die visuelle Erfassung der Tragwerks- bzw. Bauteiloberfläche, wobei auch zustandsbezogene Informationen wie sichtbare Schäden (Risse, Abplatzungen, Rost etc.) aufgenommen werden. Durch den Einsatz moderner hochauflösender Digitalkameras entstehen so digitale Daten, die entsprechend der Sichtprüfung bei konventionellen Bauwerksprüfungen zur Detektion sowie Dokumentation von Schäden verwendet werden können. Dabei sind in den Einzelbildern erkannte Schäden zunächst nur über die Kenntnis der Aufnahmeposition am Bauwerk lokalisierbar.

Die systematische Aufnahme von Bauwerken mittels Digitalfotografie wird verstärkt eingesetzt, da sich erhebliche Effizienzpotenziale aus der Automatisierung der Aufnahme ergeben. Diese wird durch kameratragende Aufnahmeplattformen zur Bilddatenerfassung möglich und schließt neben Unmanned Aerial Systems (UAS – Drohnen) auch Befahrgeräte für z. B. Tunnel und Brückenseile ein. So können UAS z. B. die Oberfläche großer Brückenbauwerke entlang vorgeplanter Flugrouten schnell und sicher automatisiert erfassen und dabei die Aufnahmepositionen so optimieren, dass die erforderliche Bilddatenqualität und ggf. Bildüberlappung (siehe Abschnitt 2.4.2) zuverlässig erreicht wird. Der aktuelle Stand der Technik sowie anwendungsspezifische Aspekte sind in [30] ausführlich dargestellt worden. Darin wird auch explizit auf die Bedeutung der Bilddatenqualität und Maßnahmen zu deren Quantifizierung sowie Einhaltung von Kriterien eingegangen.

Während die Digitalfotografie eine bildhafte Aufnahme im Wellenbereich des sichtbaren Lichts umsetzt, sind als weitere für die digitale Aufnahme von Bauwerken relevante bildgebende Verfahren auch Sonarmethoden für Unterwasserbauteile sowie magnetinduktive Messungen für Brückenseile [31] zu nennen. Diese liefern trotz physikalisch unterschiedlicher Messmethoden ebenfalls bildhafte Darstellungen der Bauteile, die eine Aussagekraft bezüglich zustandsrelevanter Eigenschaften haben (z. B. Detektion von Drahtbrüchen durch Magnetfeldmessungen entlang des Seiles).

Darüber hinaus können verschiedenste Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) eingesetzt werden, um je nach Verfahren punktuelle, flächige oder volumenbezogene Daten zu Bauteileigenschaften zu erzeugen. Ein Überblick über gängige für die Zustandserfassung von Bauwerken relevante Verfahren kann z. B. [32] entnommen werden. Ein Großteil der Methoden liefert ebenfalls in Form von Bildern codierte Auswertungen, so dass auch hier eine geometrische Referenzierung zur Bauwerksgeometrie notwendig ist. Wichtig sind eindeutige Festpunkte, die dauerhaft zugänglich bleiben.

Die am Bauwerk generierten Bilddaten können zur Detektion von Zustandsmerkmalen wie Schäden eingesetzt werden. Unter Verwendung von automatischen Bildanalyseverfahren und Methoden des maschinellen Lernens können unter der Voraussetzung entsprechend annotierter Referenzdatensätze und bei hinreichendem Training Neuronaler Netze bestimmte Schadensarten automatisch durch semantische Segmentierung pixelgenau in den Bilddaten erkannt [30] und z. B. in Form von Falschfarbenbildern (Heatmaps) gespeichert werden. So entstehen neben einer Abbildung der Bauwerksoberfläche zusätzliche Bilddaten mit zustandsbezogenem Informationscharakter. Eine Verortung von Bildinformationen, d. h. z. B. die Lokalisierung eines im Bild erkannten Schadens, kann über den Orts- und Richtungsbezug (Kameraorientierung) sowie die Kamera- und Objektivparameter rekonstruiert werden. Für die Praxis hat es sich allerdings als sinnvoll erwiesen, mit dem Verfahren der Photogrammetrie eine Referenzierung von Bildinformationen auf die 3D-Bauwerksgeometrie durchzuführen. Eine Referenzierung auf BIM-Modelle ist ebenso möglich.

Die digitalen Bilddaten sowie daraus generierte Schadensinformationen können zur digitalen Dokumentation des Bauwerkszustands genutzt werden und haben daher auch erhebliches Potenzial für initiale Referenzmessungen im Rahmen der Erstellung eines Geburtszertifikats.

2.4.2 3D-Erfassung durch Photogrammetrie und Scanning-Verfahren

Mit digitalen Messverfahren ist die hochgenaue und hochauflösende Erfassung der dreidimensionalen Form und Oberfläche des Bauwerks möglich und für die Zustandsbewertung des Bauwerkes relevant. Damit können z. B. ein Vergleich der gebauten Geometrie mit der Planung (z. B. Bauteilkrümmungen und -schiefstellungen) oder die Erzeugung von As-Built-Modellen, insofern kein BIM-Modell vorhanden ist, durchgeführt werden. Wenn zusätzlich eine hochgenaue Georeferenzierung der Geometrieerfassung vorgenommen wird, können durch wiederholte Messungen auch Bauteil- und Bauwerksverformungen ermittelt werden, die direkt zur Detektion von Schädigungsprozessen dienen oder für die Kalibrierung von numerischen Nachrechnungs-modellen genutzt werden können [33]. Weiterhin ist die

Die 3D-Geometrie kann des Weiteren als Basis für einen Digitalen Zwilling dienen. Daher hat die 3D-Geometrie auch im Kontext eines Geburtszertifikats ein erhebliches Potenzial für das Lebenszyklus-management von Bauwerken. Neben einer BIM-Modellierung stehen für die 3D-Erfassung einerseits Scanning-Verfahren, andererseits bildbasierte Verfahren in Kombination mit Photogrammetrie zur Verfügung. Das Laserscanning (LS bzw. LiDAR) auf Basis von Laufzeitmessungen ist dabei etabliert und liefert dreidimensionale Punktwolken, deren Punkte durch eine zusätzliche Messung von Helligkeitswerten (bildgebendes LS) auch Oberflächeninformationen tragen können.

Das in Abschnitt 2.4.1 erläuterte Potenzial der Anwendung bildgebender fotografischer Verfahren kann durch den Einsatz von Methoden der Photogrammetrie und leistungsfähiger Rechentechnik noch erheblich erweitert werden. Die Photogrammetrie ist ein Messverfahren, das aus einem Verband hinreichend überlappter Bilder im Zuge der Erkennung identische Merkmalspunkte (homologer Punkte) in den Überlappungsbereichen über das Prinzip der Stereoskopie die relative Kameraorientierung (Aufnahmeposition und -richtung) ermittelt, sodass anschließend jeder Bildpunkt im relativen 3D-Raum verortet werden kann. Bei der Anwendung dieses photogrammetrischen Verfahrens kommt i. d. R. der Structure-from-Motion Ansatz zum Einsatz [29], [34]. Diese Überführung der Bildinformationen (Pixel) in 3D-Koordinaten (Punktwolke) kann durch Nutzung der RGB-Informationen der Pixel zusätzlich durch eine Einfärbung der Punktwolke ergänzt werden und vermaschte Oberflächennetze können mit den Bildinformationen als Textur belegt werden. So entstehen hochgenaue, fotorealistische 3D-Modelle des Bauwerkes, die für Zwecke der Zustandsdokumentation (Geometrie und Oberflächenmerkmale) verwendet werden können.

Die Georeferenzierung erfolgt üblicherweise durch klassische geodätische Verfahren wie Tachymetrie, bei denen Messpunkte (natürliche Punkte, oder Messmarken) eingemessen und dann für die Georeferenzierung der 3D-Modelle genutzt werden. Die georeferenzierten 3D-Modelle können direkt als hochauflösendes Bauwerksmodell verwendet, zur Erstellung von BIM-Modellen (Scan-To-BIM) oder zur Verbindung mit einem vorhandenen As-Built-Modell genutzt werden. Im Rahmen des BASt-Forschungsprojekts „BIM bei Bestandsbrücken – Modellbildung zur Umsetzung der duraBASt-Brücke“ wurden die Möglichkeiten zur Erstellung von BIM-fähigen As-Built-Modellen von Bestandsbrücken zur Nutzung in der Betriebsphase untersucht [35], [36]. Unter Anwendung des Scan-To-BIM-Ansatzes wurde ein As-Built-Modell erstellt und mit dem auf Basis der Planungsunterlagen erstellten As-Planned-Modell verglichen.

Für durch Photogrammetrie erzeugte Modelle kann der Raumbezug der ursprünglichen Bilddaten gespeichert werden, sodass stets eine Verknüpfung zwischen 2D- und 3D-Raum möglich ist. So können in Bildern erkannte Schäden geometrisch exakt auf die Oberfläche des 3D-Modelles referenziert, gespeichert und dokumentiert werden. Auch manuell annotierte Merkmale, Ergebnisse von Berechnungen (Verformungen, Spannungen etc.) oder andere Oberflächencharakteristiken wie applizierte Sensorik kann so lokalisiert werden.

Das erzeugte Bauwerksmodell stellt einen As-Built-Zustand dar. Wenn im Hinblick auf die Umsetzung der BIM-Strategie des Bundes für Neubauprojekte bereits ein BIM-Modell vorhanden ist, dann können die

durch Photogrammetrie erzeugten Informationen zur Geometrie, insbesondere aber der Oberflächentextur, auf ein vorhandenes BIM-Modell referenziert werden. Fundamentale Voraussetzung dabei ist eine entsprechende Georeferenzierung der beiden Modelle. Insofern kann das beschriebene Vorgehen zur Erstellung als auch zum Update von As-Built-Modellen dienen.

Im Zuge der, auch über den Lebenszyklus möglichen, Anreicherung mit Informationen kann das erzeugte 3D-Modell zu einem Digitalen Zwilling entwickelt werden. Die sich im Kontext der 3D-Erfassung für die Bauwerkserhaltung und ein digitales Bauwerksmanagement ergebenden Potenziale sind in [29], [30] und [37] erläutert. Das Vorhandensein eines initialen As-built-3D-Modells als Geometrie- und Zustandsreferenz ist dabei für ein Geburtszertifikat hochrelevant.

2.5 Bauwerksprüfung

Die praktische Anwendung von konventionellen Verfahren der Bauwerksprüfung zur regelmäßigen Erfassung des Bauwerkszustands ist in Deutschland in DIN 1076 geregelt. Sie definiert Prüfzyklen nach Art und Umfang der durchzuführenden Prüfungen. Begleitende Regelwerke wie die Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF [38]) stellen Detailinformationen z. B. auch in Bezug zur Dokumentation der Prüfergebnisse bereit. In Bezug auf die Inbetriebnahme wird geregelt, dass nach Fertigstellung oder größeren Instandsetzungen von Bauwerken geodätische Vermessungen nach DIN 18710-4 vorzunehmen und zu dokumentieren sind. Im Rahmen der H1-Prüfung ist dabei die sog. Nullmessung vorzunehmen.

In der aktuell in Bearbeitung befindlichen Neufassung der DIN 1076 [39] sind Regelungen für die digitalen Verfahren des Bauwerksmonitorings und der digitalen bildgebenden Verfahren enthalten. Dabei wird für das Bauwerksmonitoring als ein Anwendungsszenario das lebenszyklusbegleitende Monitoring vorgesehen, das idealerweise mit einer Referenz- (bzw. Null-) Messung vor Inbetriebnahme (H0-Prüfung) beginnen sollte.

Die bildgebenden Verfahren werden zukünftig zur Erfassung und dauerhaften digitalen Dokumentation zugelassen und in ihrer Anwendung, insbesondere in Bezug auf Anforderungen an die Aufnahmequalität sowie die zu gewährleistende 3D-Referenzierung der Bildinformationen, geregelt.

Außerdem führt die Norm das Konzept des Digitalen Zwillings ein, der es als digitale Repräsentation eines realen Bauwerks ermöglicht, die wesentlichen Eigenschaften und deren Entwicklung über den Lebenszyklus widerzuspiegeln.

Als „Referenzinformationen“ führt die Norm zukünftig detaillierte Eigenschaften des Bauwerkes zu einem bestimmten Zeitpunkt ein, die für spätere Vergleichsbetrachtungen im Rahmen der Bauwerkserhaltung genutzt werden können. Konkret wird erläutert, dass dazu unter anderem wesentliche geometrische, chemische oder physikalische Kennwerte sowie weitere Ergebnisse von zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP) und Monitoringmaßnahmen sowie bildgebende Zustandsaufnahmen gehören können.

Damit werden in der zukünftigen Fassung der Norm wesentliche Grundlagen für ein digitalisiertes lebenszyklusbegleitendes Bauwerksmanagement gelegt. Insbesondere die Referenzinformationen können als maßgeblicher Teil eines zukünftigen Geburtszertifikats verstanden und der Digitale Zwilling als Methode zur dauerhaften Fortschreibung der Zustandsdaten angewendet werden. So können zukünftige Messergebnisse automatisiert mit früheren Daten verglichen und alle Informationen dreidimensional auf die Bauwerksgeometrie referenziert werden.

Das Geburtszertifikat könnte in diesem Fall sowohl die georeferenzierte, hochgenau rekonstruierte Bauwerksgeometrie (inkl. der klassischen geodätischen (Null-)Messergebnisse), die bildhaften Oberflächeninformationen, Messwerte sowie Bauteil- und Materialparameter enthalten. Es wird damit sinngemäß zur Dokumentation der Geburt des Digitalen Zwillings.

2.6 Geburtszertifikat in der Schweiz und Deutschland

In der Schweiz sind nach der Richtline „Projektierung und Ausführung von Kunstbauten“ (ASTRA 12001) [40] vor der Abnahme des Bauwerks Kontrollmessungen durchzuführen, mit denen alle für die Dauerhaftigkeit relevanten Kennwerte und Informationen bestimmt werden. Diese Kontrollmessungen dienen als Interpretationsgrundlage für spätere Inspektionen und somit der Beurteilung des Tragwerksverhaltens. Sie werden in der Richtlinie auch als Referenzmessung bzw. Nullmessung bezeichnet. Belastungstests sind bei Neubau nicht obligatorisch, können aber von den Behörden bei entsprechender Zweckmäßigkeit angeordnet werden. Zulässige Gründe dafür sind u. a. komplexe Bauwerke, innovative Tragsysteme, setzungsempfindliche Bauwerke sowie schwerwiegende Probleme bei der Bauausführung. Der Projektant muss vor der Belastungsprobe die erwarteten Verformungen berechnen, die Versuchsdurchführung dokumentieren und im Nachgang eine Stellungnahme verfassen. Stellungnahme und Versuchsbericht werden dann in die Bauwerksakte aufgenommen. [40]

Nach Übergabe des Bauwerks ist u.a. ein Überwachungsplan zu erstellen, der notwendige Hinweise für die zukünftige Überwachung des Bauwerks enthält und regelt in welcher Art und welchem Umfang die weiteren Kontrollmessungen durchzuführen sind. Zu definieren sind darin: Art der Messung und Sensoren, die erforderliche Messgenauigkeit, die Lage der Messstellen, die Ergebnisse der Nullmessungen, Grenzwerte und Messhäufigkeiten (bzw. Datum der nächsten Messung) [40]. Mithilfe der Kontrollmessungen soll ein ungewöhnliches Verhalten, dass sich durch Abweichungen zum Referenzverhalten darstellt, oder ein Überschreiten der festgelegten Grenzwerte frühzeitig erkannt werden [41]. In jedem Fall sind bei den Kontrollmessungen im Lebenszyklus der Brücken ein Nivellement durchzuführen sowie Lagerverschiebungen und Messdaten für Anker und Zugglieder (falls vorhanden) zu bestimmen. Bei den Grenzwerten wird zwischen Melde- und Alarmwerten unterschieden. Die Informationen über die Überwachung sind weiterhin in die landeseigene Datenbank (KUBA) einzupflegen.

Neben der Schweiz sind Nullmessungen auch in Italien und Frankreich vorgeschrieben [42]. In Deutschland ist das Geburtszertifikat bisher nicht in bauaufsichtlich eingeführten Regularien implementiert. Erste konkrete Überlegungen werden z. B. in [42] präsentiert. Darin wird das Geburtszertifikat als die Nullmessung beschrieben, die den Referenzzustand und das Tragverhalten der Brücke nach deren Fertigstellung anhand geeigneter Parameter beschreibt. Das Hauptziel des Geburtszertifikats ist die Dokumentation des Referenzzustandes, um im Lebenszyklus durch Identifikation von Abweichungen desselben eine Verschlechterung des Zustandes festzustellen. Als Parameter werden physikalische, chemische und geometrische Eigenschaften als relevant dargestellt. Für die einzelnen Parametergruppen werden erste Beispiele aufzunehmender Parameter genannt, jedoch ohne konkret darauf einzugehen. Dieser Ansatz deckt sich im Wesentlichen mit dem hier verfolgten Lösungsansatz (siehe Abschnitt 3).

Die Notwendigkeit den Zustand des Tragwerks bei Fertigstellung zu kennen, um zuverlässige Aussagen und Zustandsbewertungen im Rahmen von Monitoringkampagnen im Lebenszyklus des Bauwerks treffen zu können wird vielfach in der Literatur dargestellt, beispielsweise in [15].

2.7 Model Updating, Systemidentifikation und Schadensdetektion

Messdaten, die im Rahmen eines Monitorings (sensor- oder bildbasiert) gewonnen werden, liefern in der Regel keine direkte Zustandsaussage für das untersuchte Bauwerk, sondern müssen mithilfe von geeigneten Datenverarbeitungs- und -auswerteverfahren prozessiert und aggregiert werden, um unter Verwendung von Modellbeziehungen eine Aussage zum Tragwerkszustand zu ermitteln. So lassen sich beispielsweise aus der Abnahme der Eigenfrequenzen eines Brückenüberbaus quantitative Rückschlüsse auf eine Steifigkeitsdegradation ziehen, die ihre Ursache in Schädigungsprozessen haben.

Daher können, z. B. im Rahmen der Erstellung eines Geburtszertifikats, gemessene Bauwerksparameter wie Eigenfrequenzen als Referenzwerte einen wichtigen Beitrag zur Bauwerksbewertung und -erhaltung leisten. Dazu kann die kontinuierliche Aktualisierung eines numerischen Tragwerks- und

Schädigungsmodells, z. B. als Teil eines Digitalen Zwillings, umgesetzt werden und eine kontinuierliche Identifikation der relevanten Tragwerksparameter aus Messdaten erfolgen.

Model Updating

Durch sensorbasiertes Monitoring (siehe Abschnitt. 2.2) können experimentelle Daten gewonnen werden, welche für den Abgleich eines auf Basis von Plandaten erstellten numerischen Modells herangezogen werden können. Die aussagekräftigen Zielgrößen (Strukturparameter) zur Beurteilung des Systemverhaltens und zur Zustandsidentifikation, wie Bauteilsteifigkeiten und Schädigungsgrade, sind jedoch nicht direkt messbar, sondern müssen mithilfe von inversen Ansätzen [43] ermittelt werden.

Zur Kalibrierung numerischer Modelle mithilfe von Messdaten werden Model Updating-Techniken eingesetzt. Die meisten dieser Verfahren beziehen sich dabei auf die dynamischen Eigenschaften, obwohl auch andere Messgrößen wie Verschiebungen und Neigungsänderungen einbezogen werden können. Das Model Updating passt im Rahmen eines nichtlinearen Optimierungsprozesses eine Reihe ausgewählter Modellparameter (Materialkenngrößen, Vorspanngrade etc.) so an, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen FE-Modell und den aus den Messdaten extrahierten Parametern erreicht wird. Daran anschließende statistische Untersuchungen basieren beispielsweise auf der Sensitivität der Modellparameter bezüglich der Messdaten und erlauben Rückschlüsse auf die stochastischen Eigenschaften der Parameter [44].

Alternativ zur Optimierung können sowohl stochastische Ansätze wie zum Beispiel das Bayesian Updating [45] als auch dynamische Störmethoden [46] zur Ermittlung der stochastischen Modellparameter angewandt werden. 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. Schaden an der Struktur) abzuleiten [47], [48]. Dabei kann neben der Ermittlung der Verteilung der Parameter, beschrieben durch Mittelwert und Streuung, auch Vorwissen über die zu untersuchenden Parameter (a priori Informationen) berücksichtigt werden. Während des Update-Prozesses werden die am Bauwerk gewonnenen Monitoringdaten oder daraus extrahierte, zustandsbeschreibende Größen verwendet, um eine verbesserte Schätzung der Verteilungsfunktionen der Modellparameter zu gewinnen. Auf diese Weise werden die Modelleingangsparameter entsprechend der Monitoringdaten kalibriert, woraus eine verbesserte Prognosequalität des numerischen Modells resultiert [49].

Die beschriebenen Verfahren sind im Kontext der Verwendung eines Digitalen Zwillings von besonderer Bedeutung, da hiermit eine kontinuierliche Aktualisierung eines numerischen Modells, welches jeweils das realistische Tragverhalten wiederspielgelt, umgesetzt werden kann. Dieser lebenszyklusbegleitende Prozess beginnt mit der Kalibrierung eines Referenz- bzw. Nullzustands, wie er Teil der Erstellung eines Geburtszertifikats sein kann. Im Weiteren kann dann die Identifikation von Schädigungen und Schadensfortschritten im Betrieb vollzogen und Modellunsicherheiten verringert werden.

Systemidentifikation

Das schwingungsbasierte Monitoring (siehe Abschnitt 2.2) ist eine etablierte Technik zur Ermittlung dynamischer Tragwerkseigenschaften mit dem Ziel, zustandsrelevante Eigenschaften des Tragwerks zu ermitteln. Änderungen der strukturellen Eigenschaften, wie Dämpfung oder Steifigkeit, sind typischerweise mit Änderungen der Eigenfrequenzen und Eigenformen sowie der modalen Dämpfung verbunden. Häufig resultieren diese Eigenschaftsveränderungen aus Schäden am Tragwerk, z. B. Steifigkeitsminderung eines Stahlbetonbauteils aufgrund von Rissbildung (Übergang in Zustand II) oder einer Veränderung der Seilkräfte in Schrägkabelbrücken.

Aus dynamischen Messungen können mithilfe der Spektralanalyse Eigenfrequenzen und mithilfe höherwertiger Systemidentifikationsansätzen ein vollständiger Satz Modalparameter, d. h. Eigenfrequenzen, Eigenformen und modale Dämpfung, ermittelt werden. Systemidentifikation ist der Prozess der Entwicklung oder Verbesserung der mathematischen Darstellung eines physikalischen Systems unter Verwendung experimenteller Daten, die eine Reihe von Input-Output-Signalen enthalten. Im Bauwesen wird das Bauwerk als System identifiziert, bei welchem durch Anregung (Input: ambiente oder kontrollierte Schwinganregung) eine messbare Reaktion (Output) hervorgerufen wird. Auf Basis der

Anregung wird dabei zwischen experimentellen Methoden (Experimental Modal Analysis, EMA) mit kontrollierter Anregung durch Schwingerreger oder Methoden für die Anregung unter Betriebsbedingungen (Operational Modal Analysis, OMA), d. h. mit ambienter Anregung durch Verkehr, Wind, etc., unterschieden. Für Bestandsbrücken haben sich Methoden für ambiente Anregungen (OMA) durchgesetzt, wobei die Anregung nicht messtechnisch ermittelt wird und die Methoden das System lediglich auf Basis der gemessenen Bauwerksreaktionen identifizieren. Beispiele für den erfolgreichen Einsatz der OMA-Techniken sind in [50]-[52] gegeben.

In der Literatur wird zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Systemidentifikationsmethoden unterschieden. Bei den nicht-parametrischen Methoden erfolgt eine Schätzung der Leistungsspektral-dichte, der Übertragungsfunktionen und der Impulsantworten, ohne dass eine spezifische Modellstruktur ausgewählt wird. Diese Methoden bieten nur begrenztes Wissen über die Systemantwort, zeichnen sich jedoch durch ihre einfache Implementierung und rechnerische Effizienz aus. Beispiele hierfür sind die Leistungsspektraldichte (Power Spectral Density) oder die Frequenzantwortfunktion (Frequency Response Function) [52]-[55]. Im Gegensatz dazu basieren parametrische Methoden auf einer definierten Reihe von strukturierten Parametern und ermöglichen eine genauere Schätzung, erfordern jedoch einen höheren Rechenaufwand. Diese Ansätze beschreiben ein Modell in der Regel entweder in autoregressiver Form oder durch eine Zustandsraumdarstellung und wurden umfassend in [56]-[59] behandelt. Zu den etablierten Methoden zählen die Stochastic Subspace Identification (SSI) [60]-[62] und die Frequency Domain Decomposition (FDD) [63].

Die aus den Messungen extrahierten modalen Eigenschaften können dann auch für das Model Updating verwendet werden, wie beispielhaft für Brücken in [64] und für eine Stahlkonstruktion in [65] demonstriert.

Auch aus statischen oder quasi-statischen Bauwerksreaktionen wie fortschreitenden Verformungen oder Verdrehungen unter Eigengewicht lassen sich über Modellbeziehungen relevante Strukturparameter identifizieren. Teilweise werden zu diesem Zweck auch Belastungstests durchgeführt [66], die durch Dehnungs- und Wegmessungen begleitet werden. Verformungen des Tragwerks können auch hochgenau aus bildgebenden Verfahren ermittelt werden [29], [30], so dass eine hochgenaue 3D-Aufnahme der Bauwerksgeometrie als Referenzmessung von hohem Wert sein kann.

Schadensdetektion

Eine Schadensdetektion kann bildbasiert (siehe Abschnitt 2.4.1) oder unter Verwendung der Systemidentifikationsmethoden erfolgen. Der einfachste Ansatz berücksichtigt dabei nur die Eigenfrequenzen [67], [68] und identifiziert Schädigungen durch Änderungen der Eigenfrequenzen. Der Vorteil liegt darin, dass nur eine begrenzte Anzahl an Sensoren zu deren Ermittlung notwendig ist, jedoch unterliegen die Eigenfrequenzen einer Temperaturabhängigkeit, womit dieser Ansatz beim Einsatz an Brückenbauwerken nur begrenzte Anwendung findet. Zur Verbesserung kann durch die Beobachtung der Eigenfrequenzen über einen längeren Zeitraum der Einfluss von Umgebungsbedingungen identifiziert und dann kompensiert werden. Unter alleinigem Ansatz von Eigenfrequenzen wird meist lediglich eine Identifikation von Schäden, aber keine Lokalisierung ermöglicht. [46]

Die Lokalisierung von Schäden kann mit modalform- und krümmungsbasierten Methoden erfolgen [69], [70], die eine höhere Anzahl Sensoren benötigen, um die höheren Eigenformen mit der erforderlichen räumlichen Auflösung zu ermitteln. Diese Methoden werden im Vergleich zur frequenzbasierten Methode weniger von den Umgebungsbedingungen beeinflusst. In diesem Zusammenhang sind auch Methoden, die auf der Dehnungsenergie basieren [71]-[73], oder Methoden der modalen Flexibilität [74]-[76] entstanden. Allen Ansätzen gleich ist der Vergleich zwischen ursprünglicher Eigenform im ungeschädigten Zustand und dem potenziell geschädigten Zustand. Insofern leitet sich hier direkt die Notwendigkeit der Kenntnis über den Tragwerkszustand vor Beginn der Betriebsphase ab, um im Lebenszyklus der Brücke Schäden identifizieren zu können. Dafür stehen verschiedene Methoden und damit verbundene Schadensindikatoren [77] bereit. Bei der Schadenserkennung auf der Grundlage von Modalformen bieten numerische Modelle mit Model Updating eine geringe Fehlerquote bei der Identifizierung der richtigen Eigenformen und eine hohe Genauigkeit in der Erkennung von Schäden [78].

Schadenserkennung kann ebenfalls aus einer Kombination der SSI und ARMAV (auto regressive moving average vector)-Methoden erfolgen [79]-[80]. Weiterhin werden Verfahren unter Anwendung der Wavelet-Transformation zur Schadensdetektion als auch als -lokalisierung verwendet [81], [82].

2.8 CDE und Datenmanagement

Das heutige Verständnis von Datenmanagement geht weit über das Einlesen, Speichern und Abfragen von Datensätzen mit formalen Sprachen (z. B. Datenbanksprachen) hinaus. In vielen Dimensionen erfüllen Datenmanagementsysteme eine Vielzahl von zentralen Aufgaben in der Datenorganisation, der Verwaltung und der Pflege von Daten innerhalb einer Organisation, aber auch darüber hinaus. Beim Datenmanagement werden die zentralen Prozesse und Systeme im Unternehmen oder der Verwaltung geplant, implementiert und überwacht mit dem Ziel, dass die für das Geschäftsmodell bzw. den Errichtungserlass notwendigen Daten aktuell, korrekt, sicher und zugänglich sind. In der wissenschaftlichen Praxis hat sich die Forderung nach den FAIR-Prinzipien [83] etabliert (siehe Abschnitt 3.6.3). Damit steht die Implementierung eines Datenmanagements immer in Verbindung mit der Entwicklung von Richtlinien und Verfahren im Unternehmen bzw. in der Verwaltungseinheit für die einzelnen Aufgabenbereiche der Datenerfassung, -speicherung, -analyse und -nutzung. Bei der Anwendung von Monitoring fallen beispielsweise Monitoringkonzepte, Ausschreibungsunterlagen, Beauftragungen, Fachprüfungen, Planung- und Installationsprotokolle, Wartungs- und Kalibrierinformationen, sowie die Messdaten und deren Analyseergebnisse (Zustand und Prognose) als Echtzeitvisualisierung und das Reporting, bzw. der Bewertungsbericht an. Wichtige Hinweise für die Datenaufbereitung von Messdaten liefern die Berichte der BASt [84],[85]. Die Kopplung von Datenmanagement und Datenanalyse entsteht durch die technische Abhängigkeit des schnellen und umfassenden Datenzugriffs, der für die Analyse von großen Datenbeständen notwendig ist. Systeme zum Datenmanagement und zur unmittelbaren -analyse wurden für Anwendungen der Bauwerksüberwachung und für Anwendungen des Monitoring von mehreren Anbietern umgesetzt (z. B. BRIMOS der Firma VCE GmbH, INFRA//TWIN der INFRALYTICA, DaqMon der Firma tmtron, smartBRIDGE und iris des Ingenieurbüros Marx Krontal Partner und IRIS der Firma ITC Engineering). Daneben existieren eine ganze Reihe von Datenmanagementsystemen, die in anderen Branchen (Finanzen, Produktion, Versicherung etc.) zur Verwaltung von Assets entwickelt und verwendet werden. Die Anforderungen, die an ein Datenmanagement gestellt werden, knüpfen an eine Vielzahl von Schnittstellen in der Organisationseinheit bzw. im Unternehmen an. So gibt es Interaktionen mit der Mitarbeiterverwaltung (Zugriff), dem Unternehmens-ERP (Enterprise Resource Planning), der IT, dem Workflow-Management, dem Datenzugriff, der Datenablage und der Interaktion mit anderen Systemen und Datenbanken. Aber auch viele regulatorische Aspekte adressieren das Datenmanagement, das je nach Datenumfang auch umfassende zentrale IT-Ressourcen benötigt. Hier stellen sich Fragen nach Datenschutz (in den beiden Aspekten „Security“, also Prävention von Angriffen Dritter und „Safety“, also Maßnahmen zur Betriebssicherheit und Vermeidung von Sicherheitslücken), Datenverlusten, Datenlecks etc., Datensouveränität, Kompatibilitäts- und Wartungsanforderungen, Dokumentations- und Nachweispflichten über Zugriffe bis zur IT-Sicherheit. In engem Kontakt steht das Datenmanagement zum Building Information Modelling (BIM). In BIM wird ein digitales Bauwerksmodell über den gesamten Bauwerkslebenszyklus genutzt. Die geometrische Repräsentation des Bauwerks stellt eine wichtige weitere Datenquelle dar, die eng an die Verortung, Auswertung und Visualisierung von Daten (z. B. Monitoringdaten) geknüpft ist. Im Rahmen von BIM stellt das Common Data Environment (CDE) das zentrale Datenmanagement als single source of truth (SSOT) dar, um die am Planungsprozess beteiligten Fachgewerke (BIM-Fachkoordinatoren) hinsichtlich der Zuarbeiten zum Gesamtmodell zu vernetzen [3]. Ein BIM-Modell bzw. die Abbildung eines Geburtszertifikats mithilfe einer CDE ist ein vielversprechender Ansatz, der im Rahmen des Projekts untersucht werden soll.

Wie bereits in Abschnitt 2.4 erläutert, können durch Photogrammetrie erzeugte 3D-Rekonstruktionen der Bauwerksgeometrie zur Referenzierung von Bildinformationen (Kameraorientierung) sowie zur Modellierung von bildhaften Oberflächeninformationen (Textur) genutzt werden. Aus Bilddaten erzeugte Zustandsinformationen wie Schadensmerkmale (z. B. Polylinien für Rissverläufe) können ebenso referenziert und bauwerksbezogen gespeichert werden wie Sensorpositionen oder zusätzlich manuell angelegte Informationen wie Schadensmarkierungen oder Bauteilmerkmale. Durch die 3D-Verortung der Merkmale, können bei wiederholten Aufnahmen zuverlässig Zuordnungen konstruiert werden, so dass z. B. Schadensfortschrittsentwicklungen automatisiert ermittelt werden können. Eine Georeferenzierung

ermöglicht zudem die Referenzierung auf davon abgeleitete BIM-Modelle. So können Bauteilsemantiken und Attribuierungen genutzt bzw. vererbt werden. Eine konsequente Verknüpfung ermöglicht die Anwendung von Linked-Data-Ansätzen, die (potenziell sehr umfangreiche) Zustandsinformationen von den BIM-Entitäten trennt, aber eindeutig zuordenbar hält. Die entsprechenden Ansätze wurden z. B. in [86]-[88] entwickelt, implementiert und an Datensätzen von Bauwerken validiert. Sie spielen insbesondere bei der Verknüpfung von Geometriedaten (Punktwolken oder BIM-Modelle) mit Monitoringdaten (Zeitreihen) eine wichtige Rolle. Damit bestehen die Grundlagen, um sämtliche relevante Informationen im Kontext von Bilddaten in das Konzept des Digitalen Zwillings zu transferieren.

3 Konzept des Geburtszertifikats

Das Konzept des Geburtszertifikats für Brückenbauwerke ist eine zukunftsweisende Initiative zur Sicherung einer nachhaltigen, effizienten und sicheren Infrastruktur durch die systematische Erfassung und Dokumentation von grundlegenden Daten. Diese reichen im Rahmen des Projekts vom Ende der Bauphase und vor der Verkehrsfreigabe bis ein Jahr nach der offiziellen Verkehrsübergabe. Diese umfassende Datensammlung soll eine solide Grundlage für den gesamten Lebenszyklus der Brücke, beginnend mit ihrer Fertigstellung, schaffen. Die Integration von dynamischen und statischen physikalischen Parametern, chemischen Eigenschaften sowie einer äußeren Form und Oberfläche des Bauwerks in das Geburtszertifikat ist dabei von entscheidender Bedeutung.

Betrachtet im Hinblick auf die traditionellen Herausforderungen der Brückenerhaltung, die oft durch unzureichende Grundlagendaten erschwert wird, wird die Notwendigkeit eines solchen Ansatzes deutlich. Typischerweise basieren Erhaltungsentscheidungen und Sicherheitsbewertungen auf Daten, die erst nach mehreren Jahren des Betriebs gesammelt werden, wenn möglicherweise bereits Verschleiß oder Schäden aufgetreten sind. Das Geburtszertifikat würde es ermöglichen, solche Zustandsbewertungen auf einer genauen und vollständigen Datenbasis vom ersten Betriebstag an durchzuführen.

Die praktische Umsetzung dieses Konzepts erfordert die Entwicklung spezifischer Methoden und Verfahren zur Erfassung und Auswertung der erforderlichen Daten. Dabei spielen modernste Technologien eine entscheidende Rolle: von der geodätischen Nullmessung zur exakten Bestimmung der Lage und Ausrichtung der Brücke bis hin zur hochauflösenden 3D-Dokumentation des Bauwerks. Darüber hinaus müssen chemische Analysen der Baustoffe durchgeführt werden, um zukünftige chemische Reaktionen, die die Materialintegrität beeinträchtigen könnten, vorhersagen und managen zu können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Verwendung von Messdaten zur Kalibrierung numerischer Modelle, die dann während des Betriebs kontinuierlich aktualisiert werden können, um Zustandsänderungen der Struktur genau zu simulieren und vorherzusagen. Dadurch wird es möglich, vorausschauende Erhaltungsstrategien zu entwickeln, die nicht nur kosteneffizienter sind, sondern auch die Sicherheit erhöhen, da Probleme erkannt werden können, bevor sie zu ernsthaften Sicherheitsrisiken werden. Eine Auflistung der physikalischen Parameter, chemischen Aspekte und geometrischen Eigenschaften ist in Bild 1 dargestellt.

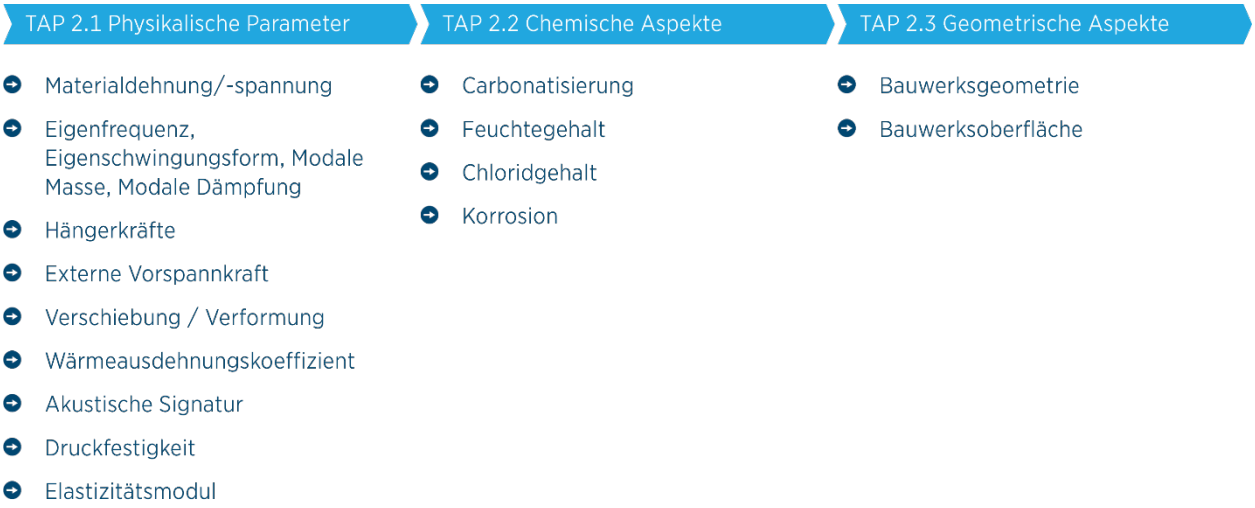

Bild 1: physikalische Parameter, chemische Aspekte und geometrische Eigenschaften des Geburtszertifikats

Die Verwaltung und Speicherung dieser Daten werden ebenfalls eine Herausforderung sein, der sich das Konzept stellen muss. Die Anwendung der FAIR-Prinzipien (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability), siehe Abschnitt 3.6.3, wird dabei eine Schlüsselrolle spielen, um sicherzustellen, dass die Daten nicht nur gesammelt, sondern auch effektiv genutzt und bei Bedarf nahtlos in andere Systeme integriert werden können.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Konzept des Geburtszertifikats für Brückenbauwerke Möglichkeiten eröffnet, die weit über die traditionellen Methoden der Bauwerksüberwachung und -erhaltung hinausgehen. Es verspricht, durch die Schaffung einer umfassenden und präzisen Datenbasis die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Effizienz im Brückenbau deutlich zu erhöhen. Darüber hinaus können diese Daten die Grundlage für die Erstellung digitaler Zwillinge bilden, die für simulationsgestützte Tests und die kontinuierliche Überwachung im Rahmen des Lebenszyklusmanagements von Brücken eingesetzt werden können.

3.1 Physikalische Parameter

3.1.1 Materialdehnung/-spannung

Der Parameter der Materialdehnung gibt entscheidende Einblicke in das Verhalten eines Materials unter Beanspruchung. Er ist definiert als das Verhältnis der relativen Längenänderung eines Materials zur Ausgangslänge. Diese Dehnung misst nicht nur die Fähigkeit des Materials, sich unter Last zu strecken/stauchen, sondern ist auch ein wichtiger Indikator für dessen Duktilität und Zähigkeit. Wenn ein Material eine hohe Dehnbarkeit aufweist, bedeutet dies, dass es in der Lage ist, Belastungen durch Verformung eher standzuhalten, ohne zu versagen. Verändern sich jedoch die Indikatoren für Duktilität und Zähigkeit, könnte dies darauf hindeuten, dass das Material unter ansonsten gleichen Belastungsbedingungen früher versagen könnte. Die Änderung der Materialdehnung kann durch verschiedene äußere und innere Faktoren beeinflusst werden. Zu den äußeren Faktoren zählen Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit, die das Materialverhalten deutlich verändern können.
Angesichts seiner Bedeutung für die strukturelle Integrität eignet sich die Materialdehnung/-spannung hervorragend für die Aufnahme im Geburtszertifikat eines Bauwerks. Dieses Zertifikat würde nicht nur die ursprünglichen Materialwerte dokumentieren, sondern auch wichtige Informationen über die erwartete Dauerhaftigkeit und die Widerstandsfähigkeit des Materials unter verschiedenen Bedingungen liefern.
Die Erfassung dieser wichtigen Parameter kann durch verschiedene Verfahren erfolgen. Eine der häufigsten Methoden ist der Druckversuch, der in Laboren durchgeführt wird. Dabei wird eine Materialprobe einer kontinuierlichen Druckbelastung unterzogen, bis sie bricht. Die dabei ermittelten Daten geben Aufschluss über die maximale Druckfestigkeit des Materials.
Eine andere Methode ist die DFOS-Messung (Distributed Fiber Optic Sensing) [89], die auf der verteilten faseroptischen Sensorik basiert. Hierbei werden Lichtimpulse durch Faseroptikkabel gesendet, die entlang oder in der Struktur verlegt sind. Veränderungen in den Rückstreuungsmustern des Lichts, verursacht durch Dehnungen im Material, werden dann analysiert, um detaillierte und kontinuierliche Daten über die Materialspannung und -dehnung zu gewinnen.
Zusätzlich gibt es die Messung, bei der Dehnungsmessstreifen (DMS) verwendet werden. Diese Streifen werden direkt auf das Material aufgebracht und messen die Änderung des elektrischen Widerstands, die durch Materialdehnung entsteht. Diese Methode eignet sich besonders für punktuelle Messungen an kritischen Stellen der Struktur.
Eine flächige Messung von Dehnungen an der Oberfläche von Bauteilen kann durch optische Verfahren, z. B. mittels Optical Flow aus Bilddaten, umgesetzt werden [90]. Jedes dieser Verfahren hat seine spezifischen Stärken und Anwendungsbereiche, die eine genaue Überwachung und Dokumentation des Materialverhaltens unter verschiedenen Belastungen und Bedingungen ermöglichen. Sie tragen wesentlich zur Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauwerken bei und sollten fester Bestandteil der Qualitätssicherung im Brückenbau sein.

3.1.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit eines Materials ist ein grundlegender Parameter, der seine Fähigkeit beschreibt, unter Druckbelastungen standzuhalten, ohne zu versagen. Sie ist definiert als die maximale Druckspannung, die ein Material aushalten kann, bevor es bricht. Im Bauwesen, insbesondere im Brückenbau, ist die Druckfestigkeit von entscheidender Bedeutung, da Brückentragwerke kontinuierlich hohen Drucklasten

ausgesetzt sind, sei es durch Verkehr, Eigengewicht oder Umwelteinflüsse. Wenn sich die Druckfestigkeit eines Materials ändert, deutet dies auf eine Veränderung seiner inneren Struktur oder Zusammensetzung hin. Beispielsweise könnte eine Abnahme der Druckfestigkeit auf Materialermüdung, Schäden durch Umwelteinflüsse oder eine unzureichende Materialqualität hinweisen. Umgekehrt könnte eine Zunahme der Druckfestigkeit durch Verbesserungen in der Materialzusammensetzung oder durch Optimierungen im Herstellungsprozess erreicht werden. Verschiedene Rand- und Umgebungsbedingungen haben ebenfalls einen Einfluss auf die Druckfestigkeit. Temperaturänderungen können beispielsweise das Materialverhalten beeinflussen, da einige Materialien bei extremen Temperaturen spröder oder duktiler werden können. Feuchtigkeit und chemische Einflüsse, wie Salz oder saurer Regen, können ebenfalls die Materialintegrität und somit die Druckfestigkeit beeinträchtigen. Mechanische Belastungen und wiederholte Lastwechsel können zu einer schrittweisen Verschlechterung der Druckfestigkeit führen.

Aufgrund seiner Bedeutung und Aussagekraft eignet sich die Druckfestigkeit gut für die Aufnahme in das Geburtszertifikat. Sie bietet einen klaren und quantifizierbaren Wert, der als Benchmark für die Qualität und Langlebigkeit des Materials dient. Diese Werte sind essenziell für die Bauplanung, die Qualitätssicherung und die langfristige Erhaltung von Bauwerken. Die Erfassung der Druckfestigkeit erfolgt durch standardisierte Verfahren, meist durch Druckversuche. Eine Materialprobe wird dabei in eine Prüfmaschine eingespannt und einer zunehmenden Druckbelastung ausgesetzt, bis sie bricht. Die bei diesem Test ermittelte maximale Spannung wird als Druckfestigkeit bezeichnet.

Insgesamt ist die Druckfestigkeit ein kritischer Parameter für die Bewertung und Sicherstellung der Materialqualität im Bauwesen. Durch regelmäßige Tests und die Aufnahme der Ergebnisse in dem Geburtszertifikat kann die langfristige Leistungsfähigkeit und Sicherheit von Bauwerken gewährleistet werden. Es ist zu beachten, dass die Druckfestigkeit in der Regel bereits in der Bauphase ermittelt und dokumentiert werden sollte, es gibt aber auch zerstörende Prüfungen, die dies nachträglich ermöglichen.

3.1.3 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul, ist ein wesentlicher Parameter in der Materialwissenschaft und im Bauingenieurwesen. Er beschreibt das Verhältnis von Spannung zu Dehnung in einem Material, solange dieses im elastischen Bereich seiner Belastung bleibt. Der Elastizitätsmodul gibt somit Auskunft über die Steifigkeit eines Materials und dessen Fähigkeit, sich unter Belastung zu verformen und wieder in die ursprüngliche Form zurückzukehren. Wenn sich der Elastizitätsmodul eines Materials ändert, deutet dies auf eine Veränderung seiner mechanischen Eigenschaften hin. Ein höherer Elastizitätsmodul bedeutet, dass das Material steifer ist und sich unter Belastung weniger verformt. Eine Verringerung des Elastizitätsmoduls kann auf Materialermüdung, mikroskopische Risse oder Veränderungen in der Materialzusammensetzung hindeuten. Solche Veränderungen können die Belastbarkeit und die Verformungseigenschaften des Materials beeinträchtigen. Verschiedene Rand- und Umgebungsbedingungen beeinflussen den Elastizitätsmodul. Temperaturänderungen sind ein bedeutender Faktor, da die Steifigkeit von Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen variieren kann. Feuchtigkeit und chemische Einflüsse, wie Korrosion durch Salze oder Säuren, können ebenfalls die mechanischen Eigenschaften verändern und somit den Elastizitätsmodul beeinflussen. Zudem können mechanische Belastungen über längere Zeiträume oder zyklische Belastungen zu einer Änderung des Elastizitätsmoduls führen.

Der Elastizitätsmodul eignet sich gut für die Aufnahme in das Geburtszertifikat, da er eine grundlegende Information über die mechanischen Eigenschaften und die Steifigkeit eines Materials liefert. Diese Werte sind entscheidend für die Planung, Konstruktion und langfristige Überwachung von Bauwerken. Der Elastizitätsmodul bietet eine verlässliche Grundlage zur Beurteilung der Materialleistung unter verschiedenen Belastungsbedingungen. Die Messung des Elastizitätsmoduls erfolgt durch Zug- oder Druckversuche. Dabei wird eine Materialprobe einer bekannten Kraft ausgesetzt und die resultierende Dehnung gemessen. Der Elastizitätsmodul wird aus dem Verhältnis von Spannung und Dehnung berechnet.

Insgesamt ist der Elastizitätsmodul ein entscheidender Parameter für die Bewertung und Sicherstellung der Materialqualität im Bauwesen. Durch die regelmäßige Erfassung und Dokumentation dieser Werte im

Geburtszertifikat kann die langfristige Leistungsfähigkeit und Sicherheit von Bauwerken, insbesondere von Brücken, gewährleistet werden.

3.1.4 Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz eines Bauwerks ist ein grundlegender Parameter, der viel über die strukturelle Integrität und Stabilität aussagt. Sie bezeichnet die Frequenz, mit der das Bauwerk bei Anregung natürlich zu schwingen beginnt. Insbesondere im Brückenbau ist die Eigenfrequenz von großer Bedeutung, da sie wesentlich für die Bewertung der strukturellen Sicherheit und Stabilität der Brücke unter verschiedenen Belastungen wie Verkehr, Wind oder Erdbeben ist.

Eine der Hauptgefahren für Brücken ist die Resonanzkatastrophe, die auftritt, wenn die Anregungsfrequenz, beispielsweise durch Windböen oder vorbeifahrende Fahrzeuge, nahe an oder gleich der Eigenfrequenz der Brücke liegt. Dies kann zu großen Amplituden der Schwingungen führen, die die strukturelle Integrität der Brücke gefährden können.

Änderungen der identifizierten Eigenfrequenzen einer Brücke im Laufe der Zeit können auf Probleme wie Materialermüdung, Schäden oder Verschlechterung hinweisen, wobei äußere Einflüsse wie temperaturbedingte Änderungen/Schwankungen zu berücksichtigen sind. Diese Änderungen können durch dynamische Tests in Verbindung mit Sensorik und ggf. Aktorik wie Vibrationsgeneratoren erfasst werden. Neben der dynamischen Analyse dienen ermittelte Eigenfrequenzen z. B. der Kalibrierung oder dem Update numerischer Modelle (siehe Abschnitt 2.7).

Jedes Bauwerk hat mehrere natürliche Schwingfrequenzen, die als Eigenfrequenzen bezeichnet werden. Diese Frequenzen hängen von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Masse, Steifigkeit, der Bauart, sowie der Art der Lagerung und Verankerung der Brücke.

Die Aufnahme der Eigenfrequenz im Geburtszertifikat eines Bauwerks eignet sich grundsätzlich gut, da sie reproduzierbar ist und eine große Aussagekraft hat. Allerdings ist die Reproduzierbarkeit der Prüfung davon abhängig, ob sich die äußeren Gegebenheiten wie die Masse der Brücke nicht durch bauliche Maßnahmen verändert haben. Weiterhin ist der Einfluss der Temperatur auf die Eigenfrequenzen beispielsweise durch geeignete Kompensationsmaßnahmen zu berücksichtigen.

3.1.5 Eigenschwingungsform

Die Eigenschwingungsform, auch Modeform oder einfach Mode genannt, ist ein entscheidender Parameter in der strukturellen Dynamik, insbesondere im Brückenbau. Diese Schwingungsform beschreibt das Muster der Verschiebungen oder Verformungen, die eine Brücke aufweist, wenn sie bei einer ihrer Eigenfrequenzen schwingt. Jede Eigenfrequenz einer Struktur ist mit einer spezifischen Eigenschwingungsform verbunden, die verdeutlicht, wie sich verschiedene Teile der Brücke relativ zueinander bewegen. Dies gibt wichtige Einblicke, wie die Brücke auf natürliche oder künstliche Anregungen reagiert.

Änderungen der Eigenschwingungsformen können ein Hinweis auf Schwachstellen sein, die unter dynamischer Beanspruchung überbeansprucht wurden und die Ursache für Ermüdung oder andere Schäden sind. Solche Erkenntnisse sind entscheidend für die Verbesserung des Entwurfs und die Vermeidung von strukturellen Problemen. Zudem ermöglicht die Analyse der Eigenschwingungsformen Ingenieuren, potenziell gefährliche Resonanzen zu erkennen und durch Designanpassungen zu vermeiden, um die Sicherheit der Brücke zu gewährleisten.

Die dynamische Reaktion einer Brücke bei bestimmten Frequenzen, die durch ihre Eigenschwingungsformen dargestellt wird, ist von wesentlicher Bedeutung. Sie zeigt die kritischen Bereiche, die bei bestimmten Frequenzen am stärksten schwingen oder sich am stärksten verformen.

Die Eigenfrequenzen und die damit verbundenen Eigenschwingungsformen eines Bauwerks hängen von mehreren Faktoren ab, unter anderem von der Masse der Brücke, ihrer Steifigkeit, der geometrischen Form und Konstruktionsweise sowie der Art der Lagerung und Verankerung.

Die Dokumentation dieser Eigenschwingungsformen im Geburtszertifikat eines Bauwerks kann sehr nützlich sein, da sie reproduzierbare und aussagekräftige Daten liefert, die die Langzeitüberwachung und -wartung der Brücke unterstützen können. Allerdings hängt die Genauigkeit dieser Daten davon ab, ob sich die äußeren Bedingungen wie die Masse der Brücke durch bauliche Maßnahmen nicht verändert haben.

Die Erfassung dieser Parameter kann durch experimentelle Methoden erfolgen, indem Sensoren und Erreger an der Brücke angebracht werden, um die tatsächlichen Schwingungsantworten aufzuzeichnen. Die Daten werden dann analysiert, um die dominierenden Schwingungsmoden zu identifizieren. Alternativ bieten numerische Simulationen, wie die Finite-Elemente-Methode (FEM), eine Möglichkeit, die Schwingungseigenschaften einer Brücke zu simulieren und zu analysieren, ohne die Struktur physisch zu testen. Diese computergestützten Methoden ermöglichen die Visualisierung und detaillierte Untersuchung der Eigenschwingungsformen, was für die Entwurfs- und Sicherheitsbewertung von großem Wert ist. Zur Validierung der numerischen Ergebnisse ist eine Ermittlung der Eigenschwingungsformen am realen Bauwerk mit den oben genannten Verfahren erforderlich.

3.1.6 Modale Masse

Die modale Masse ist ein Schlüsselbegriff in der strukturdynamischen Analyse, insbesondere relevant für die Untersuchung von Schwingungsverhalten in Brückenkonstruktionen. Dieser Parameter beschreibt die effektive Masse, die an einer spezifischen Schwingungsform beteiligt ist oder auf eine bestimmte Eigenfrequenz reagiert. Das Verständnis der modalen Masse ist essenziell, um zu erkennen, wie die Gesamtmasse einer Brücke dynamischen Belastungen gegenübersteht, die unterschiedliche Schwingungsmuster hervorrufen.

Die modale Masse ist besonders aussagekräftig, wenn es darum geht, die Reaktion einer Brücke auf externe Belastungen wie Erdbeben, Wind oder Verkehrslasten zu analysieren. Sie liefert entscheidende Informationen darüber, wie stark jede Schwingungsform zur Gesamtantwort der Brücke beiträgt. Schwingungsmoden mit einer höheren modalen Masse sind oft kritischer für die strukturelle Integrität, da sie eine größere Menge an Energie absorbieren und weiterleiten. Darüber hinaus zeigt die modale Masse, wie viel der gesamten kinetischen Energie der Struktur in einer bestimmten Eigenschwingungsform gespeichert ist; eine größere modale Masse in einem bestimmten Modus bedeutet, dass dieser Modus einen signifikanten Anteil der Gesamtenergie der Struktur trägt, wenn er angeregt wird.

Verschiedene Rand- und Umgebungsbedingungen beeinflussen die modale Masse und damit die dynamischen Eigenschaften einer Brücke. Zu diesen Bedingungen gehören solche wie, die Masse der Brücke, die Steifigkeit der Brücke, die geometrische Form und die Konstruktionsweise der Brücke und die Art der Auflagerung und Verankerung der Brücke.

Die Erfassung der modalen Masse ist ein technischer Prozess, der in der Regel durch die Berechnung der Massenverteilung der Struktur erfolgt, kombiniert mit den Verschiebungen der jeweiligen Eigenformen. Mathematisch wird die modale Masse m_i für den i-ten Modus durch die Gleichung $m_i = \Phi_i^T M \Phi_i$ ausgedrückt, wobei Φi der Vektor der Eigenform für den i-ten Modus ist und M die Massenmatrix der Struktur darstellt. Der transponierte Eigenform-Vektor Φ_i^T ist in der Mathematik für die Umwandlung eines Vektors von Spaltenvektor zu Zeilenvektor, was notwendig ist für die Matrixmultiplikation. Diese Berechnungen werden häufig in Finite-Elemente-Software durchgeführt, die zur Modellierung und Analyse von Brückenstrukturen eingesetzt wird.

Aufgrund ihrer Bedeutung für die strukturelle Analyse und die Bewertung von Brücken unter dynamischen Belastungen ist die modale Masse ein geeigneter Kandidat für die Aufnahme in das Geburtszertifikat eines Bauwerks. Die Dokumentation dieses Parameters ermöglicht eine präzise Überwachung und Bewertung der dynamischen Eigenschaften und trägt zur langfristigen Sicherheits- und Erhaltungsplanung bei.

3.1.7 Modale Dämpfung [Dämpfungsverhältnis]

Das modale Dämpfungsverhältnis, auch bekannt als modale Dämpfung, ist ein entscheidender Parameter in der dynamischen Analyse von Brückenbauwerken. Dieser Parameter gibt an, wie effektiv ein Bauwerk in der Lage ist, die Energie aus seinen eigenen Schwingungsbewegungen zu dissipieren. Genauer gesagt

misst es, wie schnell die Schwingungen eines Systems nach einer Störung, wie zum Beispiel einem Windstoß oder einem Erdbeben, abnehmen. Dieses Maß für die Energieabsorption ist entscheidend für das Verständnis und die Bewertung der strukturellen Integrität und Sicherheit von Brücken.

Das modale Dämpfungsverhältnis ändert sich unter verschiedenen externen und internen Einflüssen. Zum Beispiel kann eine Zunahme der Rissbildung oder Korrosion innerhalb der Struktur die Dämpfungseigenschaften beeinflussen, indem sie die Energieabsorption verringert und so die Amplituden der Schwingungen erhöht. Auch externe Faktoren wie Temperaturschwankungen und Umwelteinflüsse wie Wind und Verkehr haben direkte Auswirkungen auf die modale Dämpfung. Eine verstärkte dynamische Belastung durch erhöhten Verkehr oder starke Winde kann das Dämpfungsverhalten einer Brücke ebenfalls verändern, indem die Materialermüdung beschleunigt wird und die Effektivität der Dämpfung abnimmt.

Die Lebensdauer einer Brücke kann durch eine effektive modale Dämpfung verlängert werden, da durch die Reduzierung der Schwingungsamplituden die Ermüdung der Materialien verringert wird. Dies trägt zur Sicherheit und Langlebigkeit der Struktur bei.

Die Bestimmung des modalen Dämpfungsverhältnisses erfolgt typischerweise durch die Modalanalyse, die mit experimentellen Methoden und Identifikationsansätzen (z. B. SSI, siehe Abschnitt 2.7) durchgeführt werden kann.

Aufgrund seiner Bedeutung für die Bewertung der strukturellen Gesundheit und Leistung ist das modale Dämpfungsverhältnis ein wesentlicher Bestandteil im Geburtszertifikat für Brücken. Die Aufnahme dieses Parameters ermöglicht eine umfassende Bewertung der dynamischen Eigenschaften einer Brücke und unterstützt Entscheidungen zur Wartung und zum Management der Struktur.

3.1.8 Hängerkräfte

Hänger in Brückenkonstruktionen von Schrägkabel-, Stabbogen-, Netzwerkbogen- oder Hängebrücken sind in der Regel aus Stahlkabeln, -seilen oder -blechen gefertigt und spielen eine zentrale Rolle bei der Lastübertragung. Sie sind entscheidend für die Übernahme der vertikalen Lasten und Gewichtskräfte der Brückendecke und leiten diese an die tragenden Strukturen wie Pylone oder Verankerungen weiter. Diese kritische Funktion macht die Hänger zu einem Schlüsselelement für die Stabilität und Langlebigkeit der gesamten Brückenstruktur.

Die Hängerkräfte können sich unter bestimmten Umständen ändern, was zu einer Einschränkung des Tragverhaltens der Brücke führen kann. Wesentliche Änderungen in den Hängerkräften können durch Materialermüdung oder durch externe Ereignisse wie Erdbeben oder starke Windlasten hervorgerufen werden. Solche Ereignisse können die Spannungszustände in den Hängern verändern und zu einem potenziellen Versagen führen. Daher ist die genaue Analyse und Bewertung der Hängerkräfte entscheidend für die Sicherheit und strukturelle Integrität der Brücke.

Verschiedene Rand- und Umgebungsbedingungen beeinflussen die Kräfte, die auf die Hänger wirken. Die Geometrie der Brücke spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Faktoren wie die Spannweite der Brücke, die Höhe der Pylone, die Anordnung und der Winkel der Hänger sowie die Steifigkeit der Fahrbahn bestimmen, wie Lasten übertragen und verteilt werden.

Die Erfassung der Hängerkräfte ist sowohl zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme als auch zu späteren Zeitpunkten wichtig und eignet sich daher für die Aufnahme in das Geburtszertifikat der Brücke. Da diese Kräfte durch grundlegende physische Eigenschaften wie Geometrie und Last bestimmt sind, die sich im Laufe der Zeit nicht wesentlich verändern, bietet ihre Dokumentation einen wertvollen Einblick in den Zustand und die Leistungsfähigkeit der Brücke über ihre gesamte Lebensdauer.

Die Erfassung dieser Parameter erfolgt durch verschiedene technische Methoden, einschließlich Lastannahmen, Einflusslinienanalyse sowie statische und dynamische Berechnungen. Insbesondere numerische Methoden wie die Finite-Elemente-Modellierung (FEM) sind unerlässlich, um präzise und umfassende Analysen der Hängerkräfte und deren Auswirkungen auf die Gesamtstruktur der Brücke zu

ermöglichen. Diese Techniken ermöglichen es Ingenieuren, präzise Einschätzungen der strukturellen Integrität und Sicherheit moderner Brückenbauwerke vorzunehmen.

Die korrekte Erfassung und Analyse der Hängerkräfte ist somit essenziell, um die strukturelle Sicherheit und Funktionalität von Brücken zu gewährleisten und um frühzeitig potenzielle Schwachstellen oder Schäden zu identifizieren.

3.1.9 Externe Vorspannkraft

Die externe Vorspannung in Bauwerken, insbesondere bei Brücken, ist eine Schlüsseltechnik zur Verbesserung der strukturellen Integrität und Langlebigkeit. Der Parameter, um den es hier geht, betrifft die Größe der Vorspannkraft, die durch Spannkabel außerhalb des Betonquerschnitts erzeugt wird. Diese Vorspannkraft komprimiert den Beton, erhöht dessen Zugfestigkeit und minimiert die Durchbiegung unter Last. Ziel ist es, die Tragfähigkeit des Bauwerks zu verbessern, Rissbildung zu verhindern und Langzeitschäden zu minimieren.

Der Parameter selbst gibt Auskunft über die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Brücke. Bei einer Änderung des Parameters, die bedeutet, dass die erforderliche Größe der Vorspannkraft nicht mehr erreicht wird, könnte dies zu einem strukturellen Versagen führen. Es ist daher entscheidend, dass dieser Parameter während des gesamten Lebenszyklus des Bauwerks kontinuierlich überwacht wird.

Verschiedene Faktoren können den Parameter der Vorspannung in Betonkonstruktionen beeinflussen. Ein wesentlicher Faktor ist die Anordnung der Spannkabel, die entscheidend für die Verteilung der Kräfte auf den Betonquerschnitt ist. Darüber hinaus spielt der Spannprozess eine kritische Rolle. Dieser Prozess umfasst, wie die Spannkabel gespannt und verankert werden, was wiederum die Gesamtstabilität und Effektivität der Vorspannung beeinflusst. Das Material der Spannkabel ist ebenfalls von Bedeutung, da es deren Dauerhaftigkeit und Reaktion auf Umwelteinflüsse bestimmt. Korrosionsschutzmaßnahmen sind ebenfalls wichtig, da sie die Haltbarkeit der Spannkabel beeinflussen und somit die Sicherheit und Lebensdauer der gesamten Struktur verlängern können.

Umweltbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit spielen ebenfalls eine Rolle, da sie sowohl die Materialien als auch die Messergebnisse beeinflussen können. Diese externen Bedingungen können die physikalischen Eigenschaften der Spannkabel verändern und dadurch die Vorspannkraft beeinträchtigen.

Um den Parameter der Vorspannung effektiv zu erfassen und zu überwachen, können verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Lastübertragungstests werden oft vor der Inbetriebnahme durchgeführt, um die tatsächliche Übertragung der Vorspannkraft zu überprüfen. Dehnungsmessstreifen (DMS) werden verwendet, um Veränderungen in der Dehnung des Materials zu detektieren, was Hinweise auf die Integrität der Struktur geben kann. Die akustische Emissionsanalyse ist eine weitere Technik, die akustische Wellen misst, die von Rissen oder anderen Defekten im Material ausgehen. Diese Methode kann frühzeitig Warnsignale liefern, die auf potenzielle Probleme in der Struktur hinweisen. Magnetische Methoden, wie der Einsatz von magnetostriktiven Sensoren, überwachen strukturelle Veränderungen durch die Messung magnetischer Eigenschaften. Diese Techniken ermöglichen es, tiefergehende Einblicke in den Zustand der Vorspannung und der Gesamtstruktur zu erhalten.

In Bezug auf die Aufnahme dieses Parameters in ein Geburtszertifikat ist dies sinnvoll. Die ständige Kontrolle und Dokumentation der Vorspannkraft ist für die Überwachung und Erhaltung der strukturellen Integrität des Bauwerks von wesentlicher Bedeutung. Referenzwerte sind hilfreich, um Veränderungen im Laufe der Zeit zu erkennen und geeignete Erhaltungsmaßnahmen einzuleiten.

3.1.10 Verschiebung / Verformung

Die Verschiebung und Verformung eines Bauwerks, wie einer Brücke, ist ein entscheidender Parameter, der Einblicke in die Fähigkeit der Brücke bietet, Lasten zu widerstehen und gleichzeitig potenzielle strukturelle Probleme oder Überlastungen frühzeitig zu erkennen. Große und anhaltende Verformungen sind oft Indikatoren für Materialermüdung und andere Schäden, die letztendlich die Lebensdauer der Brücke verkürzen können. Diese Art der Deformation zeigt, wie gut die Brücke in der Lage ist, unter

verschiedenen Lastbedingungen zu funktionieren, und hilft Ingenieuren, notwendige Wartungsarbeiten oder Verstärkungen vorzunehmen, bevor schwerwiegende Schäden auftreten.

Die Veränderung dieses Parameters ist besonders kritisch, wenn große Verschiebungen in der Geometrie des Bauwerks auftreten. Solche Verschiebungen können eine Verminderung der Tragfähigkeit signalisieren und, wenn sie über längere Zeit bestehen, zu einer verkürzten Lebensdauer der Brücke führen. Umgebungsbedingungen wie Temperaturschwankungen, Wind, sowie Vibrationen und Erschütterungen durch Verkehr oder seismische Aktivitäten können ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Verschiebung haben.

Eine Aufnahme der Verschiebung und Verformung in das Geburtszertifikat einer Brücke wird als sinnvoll erachtet, da sie grundlegende Informationen über die Geometrie und die strukturelle Integrität des Bauwerks bei Inbetriebnahme liefert. Eine Verschiebung wirkt sich auf die Geometrie des Bauwerks aus, indem sie dessen Lage, Form oder Orientierung verändert. Während sich gleichmäßige Verschiebungen auf die Lage auswirken, können ungleichmäßige Verschiebungen zu Verformungen führen, die die Integrität der Brücke beeinträchtigen. Die Überwachung der beiden Parameter über die Zeit hinweg ermöglicht es, Veränderungen in der Struktur zu erkennen und entsprechend zu handeln.

Zur Erfassung der Parameter werden verschiedene Technologien eingesetzt. Dehnungsmessstreifen messen die Dehnung, die indirekt Aufschluss über die Verformung gibt. Beschleunigungsmesser erfassen die Beschleunigung der Brückenstruktur, aus der sich Verschiebungen ableiten lassen. GPS-Sensoren bieten präzise geografische Positionsdaten, die zur Messung größerer Verschiebungen nützlich sind. Laserscanner wiederum können die Oberfläche der Brücke sehr genau erfassen und werden verwendet, um die Form der Brücke zu analysieren und Veränderungen im Laufe der Zeit zu überwachen. Diese Instrumente spielen eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung der Langzeitstabilität und Sicherheit von Brückenbauwerken.

3.1.11 Wärmeausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient, der die thermische Ausdehnung von Brückenkonstruktionen beschreibt, gibt entscheidende Informationen über das Verhalten von Brückenkonstruktionen unter Temperatureinflüssen. In der Praxis bedeutet dies, dass sich Brücken bei Temperaturerhöhungen ausdehnen und bei Abkühlungen zusammenziehen. Diese Größe der Ausdehnung bzw. Kontraktion hat erhebliche Auswirkungen auf die Sicherheit und Funktionalität der Brücke. Wird die thermische Ausdehnung nicht adäquat in der Konstruktionsplanung berücksichtigt, kann es zu Materialspannungen kommen, die Risse und andere strukturelle Schäden verursachen.

Brücken sind daher typischerweise mit Bewegungsfugen ausgestattet, die es der Struktur ermöglichen, sich entsprechend der Temperaturänderungen frei zu dehnen und zu kontrahieren. Dies hilft, potenzielle Schäden zu vermeiden, die sonst durch starre Bauweisen entstehen könnten.

Bei konstanten oder ähnlichen äußeren Bedingungen verändert sich die relative Längenänderung des Materials proportional zur Temperaturänderung. Es können Verschiebungen auftreten, und bei sprödem Material kann es zu Rissen oder strukturellen Schäden kommen. Die maßgeblichen Randbedingungen, die den Wärmeausdehnungskoeffizienten beeinflussen, umfassen die ursprüngliche Länge der Brückenelemente und die Temperaturänderung. Diese sind in der Formel für die thermische Ausdehnung enthalten und machen deutlich, wie eng Geometrie und Temperatur miteinander verknüpft sind.

Die Eignung des Wärmeausdehnungskoeffizienten für das Geburtszertifikat einer Brücke ergibt sich aus der guten Reproduzierbarkeit der Geometrie und Temperatur, welche grundlegende Parameter zur Bestimmung dieses Koeffizienten darstellen. Dieser Koeffizient ist essenziell für die Bewertung der Langzeitstabilität und Sicherheit der Brücke unter variablen Umweltbedingungen.

Die Erfassung dieses Parameters erfolgt in der Regel über langfristige Methoden, da kurzfristige Temperaturschwankungen keine ausreichend präzisen Daten liefern. Hierfür kommen Temperatursensoren zum Einsatz, die über längere Zeiträume hinweg Daten sammeln. Zusätzlich bietet die optische Auswertung, bei der mindestens zwei Vergleichsmessungen durchgeführt werden, eine Möglichkeit, die thermische Ausdehnung visuell zu dokumentieren und zu analysieren. Diese Methoden

sichern eine präzise Erfassung und ermöglichen es, die Auswirkungen der thermischen Ausdehnung auf die Strukturintegrität der Brücke genau zu verstehen und zu überwachen.

3.1.12 Akustische Signatur

Die akustische Signatur von einzelnen Bauteilen an Übergangskonstruktionen (ÜKOs) einer Brücke ist ein weiterer Parameter in der Strukturüberwachung und ingenieurtechnischen Diagnostik. Diese Signatur, ein spezifisches Profil aus Schallwellen und Schwingungen, wird durch die Interaktion der Brückenstruktur mit ihrer Umgebung sowie der auf sie wirkenden Belastung erzeugt. Durch die Analyse dieser akustischen Signatur lassen sich wertvolle Informationen über den Zustand der Brücke gewinnen. Insbesondere ist es möglich, Anomalien, Verschleißerscheinungen und potenzielle strukturelle Probleme frühzeitig zu erkennen. Veränderungen in der akustischen Signatur treten typischerweise auf, wenn Schäden wie Risse, Korrosion oder lose Verbindungselemente insbesondere bei Übergangskonstruktionen vorhanden sind. Diese Schäden erzeugen spezifische akustische Muster, die mittels spezialisierter Diagnosewerkzeuge identifiziert werden können. Darüber hinaus beeinflussen auch Wetterbedingungen und andere Umgebungsfaktoren die akustischen Messungen, was bei der Analyse und Bewertung dieser Daten berücksichtigt werden muss.

Mikrofone nehmen die von der Brücke erzeugten Schallwellen direkt auf. Die Frequenzanalyse, insbesondere die schnelle Fourier-Transformation (FFT), wird verwendet, um das Frequenzspektrum der akustischen Signatur zu analysieren und bestimmte Muster zu erkennen. Die Modalanalyse hilft, die Schwingungsmuster der ÜKOs zu verstehen, die in direktem Zusammenhang mit der strukturellen Integrität stehen. Kontinuierliches Monitoring mit akustischen Emissionssensoren ermöglicht die kontinuierliche Überwachung der Struktur, um akustische Anomalien, die auf Schäden hindeuten könnten, frühzeitig zu erkennen. Zusammen bilden diese Methoden ein robustes System zur Überwachung und Gewährleistung der langfristigen Stabilität und Sicherheit von Brücken durch die Analyse ihrer akustischen Signatur.

3.2 Chemische Aspekte

3.2.1 Carbonatisierung

Carbonatisierung ist ein zentraler Prozess im Lebenszyklus von Betonbauwerken, der maßgeblich die Dauerhaftigkeit und Sicherheit beeinflusst. Es handelt sich dabei um einen natürlichen chemischen Prozess, bei dem Kohlendioxid (CO_2) aus der Atmosphäre in den Beton eindringt und mit den Basen im Zement zu Carbonaten reagiert. Normalerweise weist frischer Beton einen hohen pH-Wert zwischen 12 und 13 auf, der für den Korrosionsschutz der Bewehrungsstähle unerlässlich ist. Durch die Carbonatisierung wird der pH-Wert des Betons jedoch auf etwa 8 bis 9 gesenkt, wodurch der Korrosionsschutz abnimmt und die Bewehrung zunehmend korrosionsanfällig wird. Änderungen in der Carbonatisierungstiefe können eine fortschreitende Korrosionsgefahr für den Stahl in Beton bedeuten. Eine Schwächung des Stahls durch Korrosion führt unweigerlich auch zu einer Schwächung der Tragfähigkeit des gesamten Betonelements. Die Rate und das Ausmaß der Carbonatisierung werden durch verschiedene Rand- und Umgebungsbedingungen beeinflusst. Dazu zählen die Porosität des Betons, die ein schnelleres Eindringen von CO_2 ermöglicht, und der Feuchtigkeitsgehalt, der notwendig für die Carbonatisierung ist, jedoch bei Überschuss den Prozess verlangsamen kann, indem er die Poren des Betons füllt. Ebenso spielen die Betonqualität und -zusammensetzung eine wichtige Rolle; ein hoher Zementgehalt und ein niedriges Wasser/Zement-Verhältnis können die Carbonatisierungstiefe verringern. Zudem beschleunigen Umweltbedingungen wie hohe CO_2-Konzentrationen und wechselnde Feuchtigkeitsbedingungen den Carbonatisierungsprozess.

Aufgrund seiner Bedeutung für die strukturelle Integrität und Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken ist das sensorbasierte Erfassen der Carbonatisierungstiefe besonders geeignet für die Aufnahme in das Geburtszertifikat einer Struktur. Dabei werden spezielle Sensoren zur kontinuierlichen Überwachung des pH-Wertes im Beton eingesetzt, um fortlaufende Daten über den Fortschritt der Carbonatisierung zu liefern. Diese Methoden ermöglichen eine präzise Überwachung und Bewertung der Carbonatisierung, was entscheidend ist für die Wartung und Erhaltung von Betonstrukturen. Ein weiteres Verfahren ist das

Aufsprühen einer Phenolphthaleinlösung auf die Bruchfläche des Betons. Phenolphthalein ist ein pH-Indikator, der bei einem pH-Wert über 9,4 farblos ist und bei niedrigeren pH-Werten rosa wird, was eine visuelle Indikation der Carbonatisierungstiefe ermöglicht.

3.2.2 Feuchtegehalt

Der Feuchtigkeitsgehalt in Baumaterialien wie Beton und Mauerwerk ist ein entscheidender Parameter, der erheblichen Einfluss auf die Haltbarkeit und Strukturstabilität der Bauwerke hat. Feuchtigkeit kann eine Reihe von Problemen verursachen, darunter die Korrosion der Bewehrung, Frostschäden und eine beschleunigte Alterung des Betons. Steigt der Feuchtigkeitsgehalt an, etwa durch Wasseraufnahme nach starkem Regenfall oder durch aufsteigende Feuchtigkeit aus dem Boden, können die Gewichtsprozent (Massenprozent) des Feuchtegehalts zunehmen. Dies lässt sich nicht nur durch Messungen feststellen, sondern oft auch visuell beobachten, wenn Feuchtigkeit durch Fugen, Risse oder das Material selbst austritt.

Die Änderung des Feuchtigkeitsgehalts wird von mehreren Rand- und Umgebungsbedingungen beeinflusst. Dazu gehören die Umgebungstemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Luftzirkulation, die Sonneneinstrahlung, sowie Niederschläge und allgemeine Wetterbedingungen. Auch die Kondensation spielt eine Rolle, ebenso wie die spezifischen Eigenschaften der Baustoffe und die Betonzusammensetzung, die bestimmen, wie anfällig ein Material für Feuchtigkeitsaufnahme und -speicherung ist.

Zur Erfassung des Feuchtigkeitsgehalts in Baumaterialien werden verschiedene sensorbasierte Technologien eingesetzt. Ein verbreitetes Verfahren ist die Messung des elektrischen Widerstands, bei der Sensoren die Veränderung des Widerstands durch Feuchtigkeit im Material detektieren. Eine weitere Methode ist die kapazitive Messung, die Veränderungen in der elektrischen Kapazität des Materials aufgrund von Feuchtigkeit erfasst. Beide Techniken ermöglichen eine präzise und zuverlässige Überwachung des Feuchtigkeitsgehalts.

Angesichts der Bedeutung des Feuchtigkeitsgehalts für die strukturelle Integrität und Langlebigkeit von Bauwerken eignet sich die Aufnahme dieses Parameters in ein Geburtszertifikat. Ein solches Zertifikat kann dazu beitragen, die Qualität und Sicherheit des Bauwerks über dessen gesamte Lebensdauer zu überwachen und zu dokumentieren, indem es wichtige Daten über den Feuchtigkeitsgehalt und dessen potenzielle Auswirkungen auf die Struktur enthält.

3.2.3 Chloridgehalt

Der Chloridgehalt ist ein entscheidender Parameter bei der Bewertung der strukturellen Integrität und Langlebigkeit von Betonbrücken. Chloride sind bekannt dafür, eine der Hauptursachen für die Korrosion von Bewehrungsstahl in Beton zu sein. Sie durchdringen die schützende Passivschicht des Stahls, wodurch dieser anfällig für Korrosion wird. Ein hoher Chloridgehalt ist somit ein klares Indiz für ein erhöhtes Risiko der Stahlkorrosion, die die Stabilität der gesamten Brückenstruktur gefährden kann.

Die Veränderungen des Chloridgehalts sind häufig auf spezifische Umwelt- und Betriebsbedingungen zurückzuführen. Zum Beispiel kann eine erhöhte Anwendung von Streusalz im Winter oder eine unzureichende Drainage auf der Brückenoberfläche zu einem Anstieg des Chloridgehalts führen. Wasseransammlungen auf oder im Beton fördern den Transport von Chloriden in das Innere des Materials, besonders in Bereichen mit schlechter Drainage oder Rissen im Beton. Strukturelle Schäden wie Risse und Abplatzungen können ebenfalls zu einer beschleunigten Aufnahme von Feuchtigkeit und Chloriden führen, was den Chloridgehalt lokal erhöht und die Korrosion beschleunigt.

Die Erfassung des Chloridgehalts ist für die Aufnahme im Referenzzertifikat einer Brücke von großer Bedeutung, da sie eine Grundlage für die Bewertung des Zustands und der erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen bietet. Verschiedene Methoden können zur Bestimmung des Chloridgehalts herangezogen werden. Dazu zählen die potentiometrische Titration nach der Volhard-Methode, die Ionenchromatographie, sowie die Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF). Diese Techniken ermöglichen eine

präzise Messung des Chloridgehalts, die sowohl für die initiale Bewertung als auch für die laufende Überwachung der Brückenstruktur unerlässlich ist.

Insgesamt ist der Chloridgehalt ein kritischer Indikator, der nicht nur das aktuelle Korrosionsrisiko aufzeigt, sondern auch hilft, die erforderlichen Schutz- und Wartungsstrategien für Brücken festzulegen, um ihre Sicherheit und Funktionalität langfristig zu gewährleisten.

3.3 Erfassung / Umgang mit Metadaten

Metadaten sind ergänzende Informationen, die zusammen mit den Hauptmessdaten aufgezeichnet werden, um deren Kontext und Bedeutung besser zu verstehen. Sie liefern den notwendigen Rahmen, um die erfassten Daten präzise zu interpretieren und anzuwenden. Bei der Erfassung physikalischer Parameter, chemischer Aspekte und geometrischer Aspekte an Brücken umfassen Metadaten verschiedene entscheidende Komponenten.

Standortinformationen

Eine der wichtigsten Metadatenkategorien sind Standortinformationen. Diese geben den genauen Ort der Messung auf der Brücke an und sind entscheidend, um die räumliche Verteilung der Parameter zu analysieren und spezifische Problemzonen zu identifizieren. Es können durch präzise Standortangaben kritische Bereiche einer Brücke, die besonders anfällig für Schäden sind, gezielt überwacht und instandgehalten werden.

Zeitstempel

Zeitstempel dokumentieren das Datum und die Uhrzeit der Messung. Diese Informationen sind notwendig, um zeitliche Veränderungen und Trends zu verfolgen. Beispielsweise kann eine kontinuierliche Überwachung der Temperatur- und Feuchtigkeitswerte über einen längeren Zeitraum Hinweise auf saisonale Schwankungen oder langfristige Veränderungen im Materialzustand der Brücke geben. Für Probennamen und die bildbasierte Aufnahme eines Bauwerks sind Einzeldaten relevant.

Messbedingungen

Messbedingungen beinhalten Informationen über die Umweltbedingungen zum Zeitpunkt der Messung, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wetterbedingungen. Diese Daten sind essenziell, da sie die Messergebnisse stark beeinflussen können. Es können Veränderungen in den Umgebungsbedingungen zu signifikanten Abweichungen in den Messergebnissen führen, die ohne entsprechende Metadaten schwer zu interpretieren wären.

Belastungszustand

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Metadaten bei der Erfassung von Brückenparametern ist der Belastungszustand der Struktur zum Zeitpunkt der Messung. Der Belastungszustand umfasst Informationen darüber, welche Art und welche Intensität von Lasten auf die Brücke wirken, wie Verkehrslast, Windlast oder andere dynamische Einflüsse. Diese Informationen sind entscheidend, um die Auswirkungen der verschiedenen Belastungen auf die strukturelle Integrität der Brücke zu verstehen und zu analysieren. Der Belastungszustand kann erheblich variieren und hat direkten Einfluss auf die Messergebnisse der strukturellen Parameter. Beispielsweise können starke Verkehrslasten zu erhöhten Verformungen und Spannungen im Brückenmaterial führen, die ohne Berücksichtigung dieser Belastungen schwer zu interpretieren wären. Die genaue Dokumentation des Belastungszustands hilft Ingenieuren, die Messergebnisse in einen sinnvollen Kontext zu setzen und die strukturelle Belastbarkeit der Brücke zu bewerten.

Sensorinformationen

Sensorinformationen liefern Details zu den verwendeten Sensoren, einschließlich ihrer Typen, Kalibrierdaten und Seriennummern. Diese Metadaten sind wichtig, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messungen sicherzustellen. Genaue Sensorinformationen ermöglichen eine Nachverfolgung und Validierung der Datenqualität sowie die Identifizierung potenzieller Fehlerquellen. Darüber hinaus sind für eine eindeutige Auswertung der Messdaten die Positionen der eingebauten Sensoren am Bauwerk als Metadaten zu dokumentieren.

Messmethoden

Angaben zur eingesetzten Messtechnik und -methode sind ebenfalls wichtige Metadaten, die die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleisten. Unterschiedliche Messmethoden können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, daher ist es wichtig, die verwendete Technik genau zu dokumentieren. Die Dokumentation der Messmethoden ist entscheidend für die wissenschaftliche Reproduzierbarkeit und die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Studien.

Nutzen von Metadaten

Diese Metadaten ermöglichen es Ingenieuren, die Hauptmessdaten im richtigen Kontext zu interpretieren, Korrelationen zu erkennen und fundierte Entscheidungen bezüglich der Erhaltung und Sicherheit der Brücke zu treffen. Beispielsweise können durch die Analyse von Temperatur- und Feuchtigkeitsdaten in Verbindung mit den entsprechenden Metadaten Schwachstellen in der Brückenstruktur identifiziert werden, die durch thermische Ausdehnung oder Feuchtigkeitsaufnahme beeinträchtigt sind. Ohne diese ergänzenden Informationen wären die Hauptmessdaten oft unvollständig und schwer verständlich, was die Effektivität der Überwachung und Wartung der Brückenstruktur beeinträchtigen könnte. Metadaten sind somit ein unverzichtbarer Bestandteil eines umfassenden Überwachungssystems für Brücken, das die langfristige Sicherheit und Stabilität dieser kritischen Infrastruktur gewährleistet.

3.4 Geometrische Eigenschaften

Der im Geburtszertifikat zu dokumentierende Referenzzustand des Brückenbauwerks soll neben den physikalischen und chemischen Parametern auch geometrische Eigenschaften, wie die Form und die Oberflächenstruktur des Tragwerks, enthalten. Geometrische Aspekte des Referenzzustands sollen durch ein georeferenziertes 3D-Bauwerksmodell definiert werden, das beispielsweise photogrammetrisch auf Basis systematisch generierter Bilddaten oder mithilfe von Scanningverfahren generiert wurde.

Im Hinblick auf die BIM-Strategie des Bundes sollen für Brückenneubauten BIM-Modelle erstellt und über den gesamten Lebenszyklus durchgängig gepflegt werden. Für das entwickelte Konzept ist eine exakte Georeferenzierung dieses Modells, dass die Planungs- und Bauphase abbildet, notwendig, um das so entstandene As-Built-Modell mit anderen 3D-Bauwerksmodellen, z. B. durch Photogrammetrie erzeugte Modelle, und darin verortete Informationen verknüpfen zu können. Insofern kein BIM-Modell vorhanden ist, kann das durch bildbasierte Aufnahme und 3D-Rekonstruktion erstellte Modell den As-Built-Zustand liefern. Der Mehrwert der Modellrekonstruktion auf Basis der Bilddaten liegt in der ermittelten Oberflächentextur, die unter Berücksichtigung von Anforderungen an die Genauigkeit (Bildaufnahme etc.) eine Erkennung von Schäden ermöglicht, weshalb nachfolgend diese Methode berücksichtigt wird. Dabei ist es unerheblich, ob die durch die beschriebene Methodik erzeugten Informationen in ein vorhandenes As-Built-Modell (BIM-Modell) integriert werden oder erst ein As-Built-Modell erstellt wird.

Die georeferenzierte dreidimensionale digitale Bauwerksaufnahme nach Fertigstellung und vor Verkehrsfreigabe des Brückenbauwerks ermöglicht die Erfassung des Ausgangszustands bezüglich Geometrie und Oberfläche des erstellten Brückenneubaus. Dieser Referenzzustand bildet die Basis für Zustandsbewertungen im Lebenszyklus des Brückentragwerks. Die geometrische Aufnahme in Form einer „Nullmessung“ ist insbesondere für zukünftige Verformungsermittlungen sowie schadensfokussierte Zustandsbewertungen auf Basis vielfältiger sensor- und bildbasierter Monitoringverfahren ein wichtiger Ausgangspunkt.

Durch bildgebende Verfahren kann die sichtbare Oberfläche des Bauwerks aufgenommen werden, d. h. dass mithilfe dieser Methodik nur Schäden ermittelt werden können, die auch visuell erfassbar sind. Hinzu kommen Positionen am Bauwerk, die entweder durch technologische Einschränkungen nicht bildbasiert erfasst werden können, beispielsweise nicht direkt erfassbare Bereiche der Struktur infolge einzuhaltender Mindestabstände zum Bauwerk bei Befliegungen oder limitierter Standorte für Laserscanner. Darüber hinaus können schlecht ausgeleuchtete Positionen am Bauwerk ggf. Einschränkungen für die erfassbare Bauwerksoberfläche bedeuten.

Die systematische bildbasierte Aufnahme von Brückenbauwerken kann mithilfe von kameratragenden Aufnahmeplattformen zur Bilddatenerfassung erfolgen. Neben der Verwendung von Unmanned Aerial Systems (UAS, Drohnen), die das Bauwerk auf vorgeplanten Flugrouten automatisiert befliegen, können auch Befahrgeräte beispielweise für Tunnel und Brückenseile sowie Kamera-Arrays beispielsweise für die Innenseiten von Brückenpfeilern Anwendung finden.

Voraussetzung für die Ermittlung eines hochgenauen dreidimensionalen Bauwerksabbildes sind eine hohe Qualität der Bauwerksaufnahme und die präzise Georeferenzierung. Die Bauwerksaufnahme muss dabei vollständig sein, d. h. die komplette Oberfläche einschließen, und relevante Qualitätsanforderungen an die Bilddaten erfüllen.

Die Georeferenzierung der Aufnahme erfolgt durch klassische geodätische Vermessungsverfahren, wie Tachymetrie, mit denen Messpunkte (natürliche Punkte oder Messmarken) auf der Bauwerkshülle eingemessen und dann für die Georeferenzierung der 3D-Modelle genutzt werden. Dabei sind immer mindestens drei Messpunkte erforderlich, die über das Bauwerk verteilt sind. In Abhängigkeit der Größe des Bauwerks und den vorhandenen Randbedingungen können auch mehr Messpunkte erforderlich werden. Messmarken müssen vorab ab Bauwerk angebracht werden und verbleiben anschließend ortsfest an der Konstruktion.

Auf Basis der in einer vollständigen bildbasierten Aufnahme der sichtbaren Bauwerksoberfläche ermittelten Bilddaten kann mithilfe der photogrammetrischen Rekonstruktion eine dichte Punktwolke und ein vermaschtes Oberflächenmodell ermittelt werden. Durch die geodätische Aufnahme zur Georeferenzierung entsteht ein hochgenaues, fotorealistisches, georeferenziertes 3D-Bauwerksmodell. Alle Bilddaten können durch die Kenntnis der Aufnahmeposition am Bauwerk verortet werden.

3.4.1 Bild- und laserscanbasierte Bauwerksaufnahme

Aufnahmetechnik

Für die bildbasierte Bauwerksaufnahme kann eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme zum Einsatz kommen. Für die luftgestützte bildbasierte Aufnahme mittels Drohne (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) stehen Modelle zur Verfügung, die sich hauptsächlich in Größe und Form, Gewicht und Traglast sowie Akkulaufzeit und Sensorik unterscheiden. Die Drohnen sind mit unterschiedlichen Funktionalitäten zur Kollisionsvermeidung und zur automatisierten Befliegung auf vorgeplanten Flugrouten ausgestattet. Neben kameratragenden Drohnen können auch verfahrbare Tragsysteme sowie konventionelle Stative etc. für die Positionierung der Digitalkameras am Bauwerk genutzt werden. Die Rekonstruktion der 3D-Geometrie des Bauwerkes kann aus einem vollständigen Bilddatensatz der Oberfläche, der die Anforderungen an die Überlappung der Bilder erfüllt, mit dem Structure-From-Motion-Verfahren der Photogrammetrie erfolgen (siehe auch Abschnitt 2.4.2) [30], [34].

Zusätzlich zu bildbasierten Aufnahmen können Laserscanner zur präzisen Erfassung von Bauwerksstrukturen eingesetzt werden. Diese Geräte ermöglichen eine hochgenaue dreidimensionale Vermessung von Bauwerken und liefern teilweise auch Farbinformationen zur Bauwerksoberfläche. Sie unterscheiden sich in Reichweite, Genauigkeit und Scangeschwindigkeit. Laserscanner liefern Punktwolken, die als Grundlage für weitere Planungen und Analysen dienen können.

Datenaufnahme mit Kameratechnik

Die Aufnahme von Bauwerken und deren Schäden mittels Kameratechnik stellt grundsätzliche Anforderungen an die Aufnahme der Bilder. Diese lassen sich einteilen in

- prozedurale Anforderungen, d. h. Anforderungen an die Aufnahme der Bilder (Abstand der Kamera vom Objekt sowie Ausrichtung, Helligkeit, Kameraeinstellungen) und
- technologische Anforderungen, d. h. Anforderungen an Kamerahardware und -software

Die beiden Bereiche lassen sich nicht unabhängig voneinander betrachten und sind aufeinander abzustimmen, damit die Bilddaten die erforderliche Qualität erreichen. Unabhängig von den spezifischen

Anforderungen ist bei der Aufnahme sicherzustellen, dass der nötige Zugang zum Bauteil gewährleistet ist und die wesentlichen Merkmale auf der Bauteiloberfläche gut sichtbar bzw. erfassbar, sind.

Die maßgeblichen technologischen und prozeduralen Anforderungen einer bildbasierten Schadensaufnahme ergeben sich aus der Zielstellung, Bilddaten zu erzeugen, die eine ausreichende Qualität und Zuverlässigkeit der Zustandsbewertung gewährleistet (Aussagekraft). Die in diesem Zusammenhang relevanten physikalischen (Optik), elektronischen (Bildsensor und Datenvorverarbeitung wie Filtern) sowie die algorithmischen (Datenprozessierung) Effekte sind vielfältig und sollen hier nicht im Detail erläutert werden. Es wird auf entsprechende Fachliteratur, wie beispielsweise [30], verwiesen. Vielmehr werden hier die wesentlichen praktischen Parameter benannt, aus denen sich die Umsetzung und die Anforderungen an Hard- und Software direkt ableiten lassen.

Für eine hohe Qualität der erfassten Bilddaten sind vor allem folgende Eigenschaften zu erfüllen:

- hohe Objektauflösung (Resultat aus Auflösung der Kamera, Optik und Abstand zum Objekt)
- sehr geringes Farbrauschen,
- große Schärfentiefe in Bezug auf die geometrischen Eigenschaften des Bauteils bzw. die Verteilung der Schäden,
- ausgewogene und ausreichend hohe Ausleuchtung (natürliche oder künstliche Belichtung),
- möglichst geringe Bewegungsunschärfe (Motion Blur),
- möglichst geringe optische Verzeichnung der Bilder (problematisch sind v.a. kleine Optiken und Ultraweitwinkelobjektive).

Die Auflösung ist dabei eine feststehende Eigenschaft eines Kamerasensors, die zusammen mit der Brennweite des verwendeten Objektivs und dem Objektabstand zur Objektauflösung (mm/Pixel) führt und maßgeblich für die Erkennbarkeit von Merkmalen im digitalen Bild verantwortlich ist. Die übrigen Eigenschaften der digitalen Bilddaten sind im Weiteren von den Sensor- und Objektiveigenschaften sowie den gewählten Kameraeinstellungen abhängig und werden in der Literatur [30] ausführlich beschrieben.

Die konkreten Aufnahmeparameter, insbesondere die Fokussierung, Tiefenschärfe, Belichtungszeit und Empfindlichkeit (ISO) sowie Kamera-, Objektiv- und Drohnenparameter, müssen so gewählt werden, dass eine ausreichende Schärfe und Helligkeit der relevanten Bildbereiche gewährleistet wird.

Sollen Schäden der Bauwerksoberfläche auf Basis der generierten Bilddaten ermittelt werden, so sind Qualitätsanforderungen in Form einer Bildauflösung zu berücksichtigen. Diese Anforderungen sind entsprechend der weiteren Verwendung festzulegen. Dabei ist der kritischste Schaden, d. h. der Schaden mit geringsten Abmessungen zu berücksichtigen. Bei der Erkennung von Schäden auf Betonoberflächen ist der kritische Schaden ein Riss, da hier i. d. R. die Rissweite von Interesse ist, welche sich in einem Größenbereich von unter 0,5 mm bewegt. Für die sichere Detektion von Rissweite bestehen aufgrund der geringen Rissweite die höchsten Anforderungen.

Datenaufnahme mit Laserscanner

Die Datenaufnahme mit Laserscannern ist ein präziser und effizienter Prozess, der es ermöglicht, detaillierte dreidimensionale Modelle von Objekten und Umgebungen zu erstellen. Laserscanner arbeiten durch die Emission von Laserstrahlen und das Messen der Zeit, die diese Strahlen benötigen, um von einer Oberfläche reflektiert zu werden und zum Scanner zurückzukehren, sie tasten die Oberflächengeometrie eines Bauwerks berührungslos ab. Diese Technologie erlaubt es, Millionen von Datenpunkten in kurzer Zeit zu erfassen, wodurch ein genaues digitales Abbild des Bauwerks entsteht.

Ein wichtiger Aspekt bei der Datenaufnahme ist die Wahl geeigneter Aufnahmepositionen. Um eine vollständige und lückenlose Erfassung des Zielbereiches zu gewährleisten, müssen häufig mehrere Scans aus unterschiedlichen Perspektiven durchgeführt werden. Dies erfordert eine präzise Planung der Scanpositionen sowie die Berücksichtigung der Reichweite und des Sichtfelds des Laserscanners. Hindernisse wie Schotte, Aussteifungen oder externe Spannkabel in einem Überbauhohlkasten, die den Scanner und die Sicht blockieren, müssen ebenfalls in die Planung einbezogen werden. Dabei ist es erforderlich, die notwendige Auflösung der Scans festzulegen und Überlappungen zwischen den einzelnen

Scans zu gewährleisten, um eine nahtlose Zusammenführung der ermittelten Punktwolken zu ermöglichen. Eine sorgfältige Positionierung minimiert die Notwendigkeit nachträglicher Korrekturen und Datenlücken, was die Qualität der erfassten Daten erheblich steigert.

Neben der technischen Ausführung spielen auch externe Bedingungen eine wesentliche Rolle bei der Datenaufnahme. Faktoren wie Beleuchtung, Wetterbedingungen und die Beschaffenheit der Oberflächen des Zielobjekts können die Scanqualität beeinflussen. Beispielsweise können starke Sonnenstrahlung oder reflektierende Oberflächen zu Messfehlern führen. Daher ist es wichtig, die Datenaufnahme möglichst unter kontrollierten Bedingungen durchzuführen oder entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um solche Einflüsse zu minimieren. Zusätzlich sollte das Personal, das die Laserscanner bedient, umfassend geschult sein, um potenzielle Fehler zu erkennen und zu beheben, was die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Datenerhebung weiter erhöht.

Detektierbarkeit der Schäden

Eine erste Einschätzung zur Prüfbarkeit verschiedener Schadenstypen mit den Möglichkeiten der innovativen Bildauswertung ist im Bericht „Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie“ [91] gegeben. Diese Einordnung der jeweiligen Schäden entsprechend der Erkennbarkeit bei handnaher Bauwerksprüfung (BWP) und mittels innovativer Bildauswertung wird in Tabelle 2 in Anhang B dargestellt. Darin wird ersichtlich, dass bestimmte Schäden, wie Oberflächenschäden, prinzipiell erkennbar sind, andere nur teilweise, d. h. unter bestimmten Bedingungen, und wiederum andere Schäden nicht mit visuellen Methoden detektierbar sind.

Hinsichtlich einer automatisierten Erkennung von Schäden durch eine semantische Segmentierung der Bilddaten mit Verfahren des maschinellen Lernens (Neuronale Netze) wird auf [92] und [29] verwiesen.

3.4.2 Aspekt 1 – Bauwerksgeometrie

Ein durch photogrammetrische Rekonstruktion oder 3D-Laserscanning generiertes 3D-Oberflächenmodell stellt die tatsächlich gebaute (As-Built-) Geometrie des Bauwerkes und damit eine wesentliche Referenzeigenschaft dar. Zu beachten ist, dass diese die statische Wirkung der korrespondierenden ständigen, sowie gegebenenfalls weiterer zum Aufnahmezeitpunkt relevanter Einwirkungen darstellt und sich insofern von der sogenannten spannungslosen Form (z. B. der Schal- oder Werkstattform) unterscheidet.

Diese hochauflösende As-Built-Geometrie kann durch geeignete Prozessierung der Daten weiter abstrahiert werden, indem z. B. bauteilbezogene geometrische Parameter für einen Abgleich mit der As-Planned-Geometrie erzeugt werden. So können z. B. Querschnittsgeometrien in bestimmten Schnitten sowie die Geometrien von Bauteilachsen approximiert werden. Hierfür können auch Scan-To-BIM-Ansätze verwendet werden. Entsprechende Prozesse sind jedoch als Dimensionsreduzierung zu verstehen und entsprechend mit einem Verlust an geometrischen (Roh-)Informationen verbunden. Durch den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Geometrie können geometrische Abweichungen zum Planungsmodell identifiziert und nachfolgend modelliert werden. Diese Informationen können für eine Anpassung bestehender BIM- und Berechnungsmodelle genutzt werden. Durch ein Geometrie-Update der Modelle können geometrische Unsicherheiten zur gebauten Form minimiert und somit der Nutzen der Modelle im Lebenszyklus maximiert werden.

Durch Abgleich mit den Ergebnissen der Tragwerksplanung und dem dazu genutzten Simulationsmodell kann das hochgenaue 3D-Bauwerksmodell auch zur Bestimmung der initialen Verformung des Tragwerks genutzt werden. Auf Basis dieser Verformungsfigur können z. B. initiale Schiefstellungen und Vorkrümmungen von Bauteilen ermittelt und in Bezug auf den spannungslosen Zustand oder den Zustand unter ständigen Lasten angegeben werden.

Für die Betrachtungen des Lebenszyklus bildet die ermittelte Bauwerksgeometrie die Grundlage für ein hochgenaues Verformungsmonitoring. Hiermit wird im Geburtszertifikat erstmals eine belastbare Referenz als Ausgangszustand der Verformung bereitgestellt. Das Verformungsmonitoring kann sich damit auf den Nullzustand beziehen, nicht wie bisher auf einen geschädigten Zustand mit unbekannter Belastungshistorie mit Bezug zum Zeitpunkt, an welchem das Monitoring begann. Durch diese Referenz kann die zeitliche

Entwicklung der Verformung mit Bezug zum gebauten Zustand betrachtet werden. So kann beispielsweise. die Schiefstellung eines Pfeilers über den Lebenszyklus der Brücke betrachtet werden.

Die initiale Verformungsfigur kann für zukünftige Betrachtungen zur Kalibrierung numerischer Berechnungsmodelle herangezogen werden. Insbesondere bei der Kombination mit sensorbasiert ermittelten physikalischen Parametern wie Eigenfrequenzen, kann die Qualität der Kalibrierung weiter gesteigert werden. Dabei ist insbesondere die Belastungshistorie, d. h. der Bauablauf zu berücksichtigen. Typischerweise können so Bauteilsteifigkeiten (ggf. Verläufe) identifiziert werden, welche wiederum die wesentliche Größe für zukünftige Standsicherheitsbetrachtungen sind und zur Identifikation und Lokalisierung von Schädigungen genutzt werden können.

Für die Dokumentation der IST-Bauwerksgeometrie zum Referenzzeitpunkt sind im Geburtszertifikat folgende Informationen zu verankern.

- vollständige geometrische Abbildung des Bauwerks:
  - 3D-Oberflächenmodell im OBJ-Format mit Texturfiles oder 3D-Punktwolke im PLY oder e57-Format
  - erzeugte Bilddaten bei einer bildbasierten Aufnahme
  - erzeugte Punktwolken bei einer Laserscan-Aufnahme
- ableitbare Größen:
  - Querschnittsparameter für definierte Positionen
  - Verformungsfigur (beinhaltet Schiefstellungen und Vorkrümmungen)
  - Bauteilsteifigkeiten
- notwendige weitere Parameter/Informationen:
  - Aufnahmeparameter und Umgebungsbedingung der Nullmessung
  - Informationen zur Datenprozessierung (wichtig für Nachvollziehbarkeit)
- Informationen zur Georeferenzierung:
  - Definition der eingemessenen Messpunkte am Bauwerk (Koordinaten)

Aufnahme der Innenseiten

Die Geometrie im Innern der Tragkonstruktion, beispielsweise Innenräume von Hohlkästen oder Hohlpfeilern, kann ebenfalls bild- oder laserscanbasiert erfasst werden. Dabei werden für die Aufnahme des Überbau-Hohlkastens i. d. R. Laserscanner eingesetzt, da diese leicht handhabbar sind. Insbesondere in Bereichen, die nur schwer zugänglich sind, wie beispielsweise das Innere von Hohlpfeilern (ohne Treppenhaus), können verfahrbare Kameraarrays zum Einsatz kommen (siehe auch [30]).

Beim Einsatz im Innenraum ist bei der Anwendung bildbasierter Aufnahmetechniken die Ausleuchtung eine Herausforderung. Die Erfassung dieser Innengeometrie ist erst bei entsprechenden Querschnittshöhen sinnvoll. Es ist unbedingt notwendig, dass die erfasste innere und äußere Bauwerksoberfläche gegenseitig in der richtigen Position und Ausrichtung zueinanderstehen. Dazu sind die beiden erfassten Modelle durch korrekte Georeferenzierung in Beziehung zu setzen.

3.4.3 Aspekt 2 - Bauwerksoberfläche

Ein bildbasiert erzeugtes 3D-Modell liefert darüber hinaus die bildhafte Abbildung der Bauwerksoberfläche. Durch die Referenzierung der Oberfläche auf die 3D-Geometrie ist die eindeutige Zuordnung von Bildmerkmalen wie Schäden zur Position am Tragwerk möglich. Die Oberfläche zum Zeitpunkt der Fertigstellung stellt damit eine weitere wichtige Referenz für die Zustandsbewertung dar. In den aufgenommenen Bilddaten können Schäden mithilfe geeigneter Verfahren erkannt und eindeutig am Tragwerk verortet werden. Diese Abbildung der Oberflächenschäden kann in 2D in Orthoansichten (Messbildern) oder an einem georeferenzierten 3D-Modell erfolgen. Dieses mit detektierten Schadensinformationen augmentierte (semantische Informationen) 3D-Modell kann wesentlicher Teil eines Digitalen Zwillings sein.

Die Erkennung von Anomalien bzw. Schäden der Oberfläche kann durch manuelle Annotation oder auf Basis der Bilddaten unter Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz erfolgen. Schäden, die

z. B. im Rahmen einer Bauwerksprüfung festgestellt werden, können manuell auf der Oberfläche des 3D-Modells eingetragen und verortet werden. Mit der initialen Abbildung der Oberfläche und darauf manuell oder automatisch erkannten und verorteten Schäden wird der Ausgangspunkt für die Beobachtung des Schadensfortschritts geschaffen. Mit dieser Referenz wird der Schadensfortschritt detektier- und quantifizierbar. Das Fortschreiten einer Schädigung, beispielsweise eines Risses auf einer Betonoberfläche, kann geometrisch, wie auch zeitlich verfolgt werden. Auf diese Weise werden Informationen zur Zustandsbewertung in Form einer Zuordnung von Schadensklassen und Informationen der zeitlichen Entwicklung, welche wiederum Eingang in Prognosemodelle im Lebenszyklusmanagement finden können, erschlossen. Eine Aggregierung mit den Ergebnissen von Montoringverfahren kann die Detektions- und Modellierungsqualität weiter erhöhen und zukünftige Nachrechnungen und Prognosen der Tragwerkszuverlässigkeit verbessern.

Es ist noch zu prüfen, inwieweit auch das Innere von Bauteilen an maßgebenden Stellen für das Geburtszertifikat relevant sein kann und wie solche Informationen im Geburtszertifikat untergebracht werden können. Dabei handelt es sich z. B. um vorhandene Bewehrungs- und Spanngliedlagen oder Betondeckungen. Diese könnten vor Betonage aufgemessen werden oder im Anschluss über zerstörungsfreie Prüfverfahren (Ultraschall oder Radar) erfasst werden. Diese Informationen spielen bei späteren Untersuchungen wie Nachrechnungen oder geplanten baulichen Veränderungen eine wichtige Rolle.

Das As-Built-3D-Modell kann manuell oder mittels Scan-To-BIM-Verfahren in ein BIM-Modell überführt oder mit existierenden BIM-Modellierungen unter der Voraussetzung einer entsprechenden Georeferenzierung beider Modelle verknüpft werden. So können identifizierte geometrische Abweichungen von der Soll-Geometrie auf das Planungsmodell augmentiert werden. Die Semantik des BIM-Modells muss ggf. entsprechend angepasst werden. Informationen können im BIM-Modell abgelegt oder mittels Linked-Data-Ansätzen mit diesem verknüpft und geometrisch referenziert werden. Aus dem As-Built-Modell, das Grundlage des Geburtszertifikats ist, wird im Laufe des Lebenszyklus durch Anreicherung mit zusätzlichen Informationen aus der Bauwerksprüfung und -erhaltung das As-Maintained-Modell.

3.4.4 Aspekt 3 – Verortung beliebiger Informationen

Im georeferenzierten 3D-Bauwerksmodell können beliebige relevante Informationen verknüpft und verortet werden. Prinzipiell ist die Form der Daten dabei beliebig, d. h. es können Bilder, Text und/oder Dateien (u. A. Bauwerksplan, Untersuchungsprotokoll) verknüpft werden. Dabei ergeben sich die anzuhängenden Informationen aus der Notwendigkeit bzw. aus dem Ziel der Untersuchung.

Beispiele für zu verknüpfende Daten sind:

- Verortung von Sensorpositionen und Verlinkung zu Messdaten oder daraus aggregierten Informationen:
  - ermittelte Spannkraft von Vorspannkabel
  - ermittelte Windlasten
  - vorhandene Bodendrücke
  - überwachte Korrosion von Bewehrungsstahl
  - Messung der Bauteilfeuchtigkeit und Carbonatisierung
  - etc.
- Verortung zu Probennahmen/Materialprüfungen und Verlinkung zu den Ergebnissen (bspw. Bild eines Bohrkerns, Prüfbericht),
- Anmerkungen für Bauwerkserhaltung; Auffälligkeiten bei Abnahmen (Nachbesserungen).

3.4.5 Anwendungsszenarien für die geometrischen Aspekte im Geburtszertifikat

Nachfolgend werden drei Szenarien beschrieben, die infolge der Dokumentation der initialen Form und Oberfläche eines Bauwerks im Geburtszertifikat ermöglicht werden:

- die Beobachtung von Bauwerksverformungen über den Lebenszyklus im Sinne eines hochgenauen Verformungsmonitorings,
- die Beobachtung von vorhandenen oder während des Lebenszyklus auftretenden Schädigungen der Bauwerksoberfläche im Sinne eines Schadensfortschrittsmonitoring sowie einer fortlaufenden Zustandsbewertung und -prognose,
- die Betrachtung spezieller Fragestellungen und Mängel.

Anwendungsszenario 1: Hochgenaues Verformungsmonitoring

In Anwendungsszenario 1 sollen die Verformungen des Tragwerks über den Lebenszyklus betrachtet werden. Grundlage dafür ist das georeferenzierte 3D-Bauwerksmodell im Nullzustand als Referenz für ein Verformungsmonitoring. Das Bauwerk zum Zeitpunkt der Fertigstellung vor Verkehrsfreigabe ist nur durch die ständigen (i. W. Eigengewichts-) Lasten beansprucht. Die frühe Belastungshistorie ist im Sinne des Bauablaufs bekannt oder vernachlässigbar.

Das Verformungsmonitoring im Lebenszyklus basiert auf wiederholten 3D-Erfassungen, die durch eine ebenfalls durchgeführte hochgenaue Georeferenzierung die Extraktion der Veränderung der Bauwerksgeometrie ermöglichen. Der Vergleich kann zwischen beliebigen „Epochen“ stattfinden, wobei der Referenzzustand des Geburtszertifikates eine besondere Bedeutung hat. Die Verformung ergibt sich aus der 3D-Differenz zwischen den beiden Zuständen in Form eines Verschiebungsfeldes. Dies kann z. B. ein 3D-Vektorfeld sein oder eine Punktwolke, bei der den Punkten die Verschiebungskomponenten zugewiesen sind (und z. B. als Farbinformationen codiert auch bildhaft darstellbar). Die Ermittlung der Verschiebungen erfolgt beispielsweise über die euklidische Distanz (global) oder die M3C2-Distanz, die punktweise Verformungen in der Bauteilebene ermittelt [93], [94].

Die Extraktion statisch-konstruktiv relevanter Verformungsinformationen aus den Verschiebungsfeldern einzelner Bauteile (Überbau-Träger, Pfeiler, Pylone, Seile etc.) kann über eine Modellierung erfolgen, die sich z. B. an der Diskretisierung eines numerischen Simulationsmodells orientiert oder Scan-To-BIM-Methoden nutzt. So können durch die Erkennung von Querschnittskanten mittels Regression die Dehnungs-, Krümmung-, Scherungs- und Torsionsanteile der Verformung stabförmiger Bauteile approximiert werden.

Das Potenzial wiederholter Verformungsmessungen ergibt sich insbesondere durch die Information der Bauwerksform im Referenzzustand. Ein Verformungsmonitoring im Lebenszyklus lässt sich grundsätzlich auch auf Grundlage einer ersten Aufnahme an einem beliebigen Zeitpunkt während der Betriebsphase des Bauwerks durchführen. Nur wenn für die Erstaufnahme sichergestellt ist, dass sie im ungeschädigten Zustand erfolgt ist, lassen sich jedoch durch ein Verformungsmonitoring zuverlässige Rückschlüsse auf die absoluten Schädigungen des Tragwerks ziehen. Diese können dann mit weiteren schadensrelevanten Beobachtungen und Messdaten sowie zusätzlichen Annahmen sowie Berechnungsmodellen interpretiert werden.

Ein spezielles Beispiel für ein hochgenaues Verformungsmonitoring bildet die Beobachtung der Tragwerksverformungen, um mögliche Pfeilersetzungen zu identifizieren. Setzungen bedeuten dabei eine Verschiebung im Bereich der Gründung, die eine Verformung des Tragwerks zu Folge haben. In Abhängigkeit des Tragwerkstyp nehmen Verformungen an bestimmten Stellen der Tragkonstruktion zu. Bei durchlaufenden Überbaukonstruktionen erzeugt eine Lagersetzung eine größere Durchbiegung des Überbaus; bei integralen Bauwerken werden Zwangsbeanspruchungen erzeugt, die zu einer weiteren Verformung des Tragwerks führen. Die im Rahmen eines hochgenauen Verformungsmonitorings ermittelten Änderungen der Verformungsfigur können u. U. Hinweis auf eine Pfeilersetzung geben. Die genaue Ursache ist damit jedoch nicht direkt ermittelbar, z. B. Änderung des Grundwasserstandes.

Voraussetzungen:

- georeferenziertes 3D-Bauwerksmodell (im Nullzustand),
- georeferenzierte 3D-Bauwerksmodelle zu verschiedenen anderen Zeitpunkten im Lebenszyklus des Bauwerks,
- Passpunkte bzw. Messmarken am Bauwerk,

ermittelte Größen:

- diskretisierte Verformungsfigur (beschrieben durch den Flächenschwerpunkt oder mit Hilfe von zwei Querschnittspunkten entlang der Mittelachse des Bauteils),

weitere Größen:

- Setzungen und Hebungen des Baugrundes.

Anwendungsszenario 2: Schadensfortschrittsmonitoring und Zustandsbewertung

Im zweiten Anwendungsszenario soll der visuell erkennbare Schadensfortschritt über den Lebenszyklus beobachtet werden. Grundlegende Voraussetzung dafür ist die Erfassung des initialen Bauwerkszustandes. Mithilfe der bildbasierten Bauwerksaufnahme lassen sich die sichtbaren Oberflächenschäden wie Risse, Abplatzungen und freiliegende Bewehrung an Beton- oder Korrosionsstellen an Stahlbauteilen identifizieren.

Die am Bauwerk generierten Bilddaten können zur Detektion von Zustandsmerkmalen wie Schäden eingesetzt werden. Die Auswertung der aufgenommenen Bilddaten kann entweder manuell oder automatisiert unter Einsatz künstlicher neuronaler Netzwerke (KNNs) erfolgen. Als Grundlage für die Auswertung werden i. d. R. die 2D-Bilddaten herangezogen. Dabei können auch Orthobildansichten, die auf Basis des 3D-Modells generiert werden, zur Anwendung kommen.

Bei der automatischen Bildanalyse werden Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt. Verwendung finden speziell für diesen Zweck trainierte KNNs, die auf Basis von Trainingsdaten Muster und Zusammenhänge erlernen, die für relevante Schadensklassen charakteristisch sind. Unter der Voraussetzung entsprechend annotierter Referenzdatensätze und bei hinreichendem Training des neuronalen Netzes können bestimmte Schadensarten automatisch durch semantische Segmentierung pixelgenau in den Bilddaten erkannt [30] und z. B. in Form von Falschfarbenbildern (Heatmaps) gespeichert werden.

Die vollständig dokumentierte Bauwerksoberfläche im Nullzustand lässt die Identifikation der initialen Schäden zu. Die Schäden werden durch die Art des Schadens und auf Basis quantitativer Größen, wie Flächeninhalt (flächige Schäden) oder Breite und Länge (linienartige Schäden), charakterisiert und durch die Lage am Bauwerk verortet.

Die in jeder nachfolgenden Aufnahme erfasste Bauwerksoberfläche lässt sich gegen die initiale Oberfläche prüfen. Dabei werden die „neu“ identifizierten Schäden bezüglich Größe auf Basis ihrer Lage am Bauwerk mit der ursprünglichen Oberfläche verglichen. Dabei sind folgende Szenarien möglich:

- der Schaden ist in der zweiten Aufnahme vorhanden, aber noch nicht in der Erstaufnahme: ein neuer Schaden aufgetreten, z. B. neue Korrosionsstelle;
- der Schaden ist in beiden Zuständen vorhanden und vom selben Typ: eine Veränderung der Schadensgröße ist beobachtbar, z. B. die Vergrößerung einer Rissbreite;
- ein Schaden ist in beiden Aufnahmen vorhanden, aber unterschiedlichen Typs: eine zweite Schädigung tritt auf, z. B. eine nun freiliegende Bewehrung innerhalb einer bereits vorhandenen Abplatzung;
- der Schaden ist in der ersten, aber nicht in der zweiten Aufnahme sichtbar: der Schaden wurde möglicherweise behoben oder verdeckt, z. B. Ausbesserung einer Abplatzung oder Auftrag von Korrosionsschutz auf eine korrodierte Stelle;
- zusätzliche Schäden bei wiederholter Aufnahme in unmittelbarer Nähe eines bereits vorhandenen Schadens: eine Schadensausbreitung oder zusätzliche Schädigung, die auf eine Verschlechterung des Zustands hinweist, z. B. weitere Risse in der Nähe eines bestehenden Risses.

Im Schadensfortschrittmonitoring soll die Veränderung der Schäden über die Zeit beobachtet werden. Durch wiederholte Aufnahmen der Bauwerksoberfläche und entsprechende Schadensannotation bzw. -erkennung kann der zeitliche Verlauf der Schädigung beobachtet werden. Dabei ist insbesondere von Interesse, ob und mit welcher Geschwindigkeit ein Schaden wächst. Diese Informationen können

Berücksichtigung in einer Erhaltungsplanung finden, da der zeitliche Verlauf eine gute Indikation für die Dringlichkeit einer Instandsetzungs- oder Sofortmaßnahme (auch Verkehrseinschränkungen) sein kann.

Die Beobachtung einer fortschreitenden Schädigung infolge Alkali-Kieselsäurereaktion (AKR) ist ein gutes Beispiel einer Anwendung des Schadensfortschrittsmonitoring. Der materialbedingte Schädigungsmechanismus ist durch ein fortschreitendes Risswachstum und die Ausprägung der Risse in einer netzartigen Form bekannt. Insbesondere das Risswachstum in Länge und Breite kann bei Einhaltung entsprechender Anforderungen an die Objektauflösung sehr gut verfolgt werden.

Die in Einzelbildern identifizierten Schäden können am 3D-Bauwerksmodell verortet werden. Alle Schäden sind dabei digital erfasst und werden in einer Datenbank mit deren Eigenschaften (Typ, Position, Größe) gespeichert. Für jeden Einzelschaden kann entsprechend RI-EBW-PRÜF [38] eine Bewertung vorgenommen werden. Unter Berücksichtigung der Komponenten und der jeweiligen Anzahl der Schäden lässt sich ggf. unter Einbeziehung weiterer Informationen eine Zustandsbewertung durchführen und eine Zustandsnote (auf Basis der visuell erfassten und erkannten Schäden) ermitteln.

Voraussetzungen:

- vollständiger Bilddatensatz der Bauwerksoberfläche in geforderter Objektauflösung,
- in Bilder erkannte und quantifizierte Schäden,
- georeferenziertes 3D-Bauwerksmodell zur Verortung der Bilddaten und der erkannten Schäden,
- Algorithmus zur Zuordnung der Schäden aus unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten
- Bewertungsalgorithmus zur Ermittlung einer Zustandsnote,

ermittelte Größen:

- Schäden der Bauwerksoberfläche: Schadenskategorie, Position, quantitative Beschreibung (Größe),
- Schadensänderung (i. d. R. Zunahme) und bei wiederholter Aufnahme Geschwindigkeit der Schadenszunahme,
- Zustandsnote der Einzelschäden, Einzelkomponenten und des Bauwerks auf Basis der visuell erkannten Schäden (unter Einbeziehung weiterer Informationen),

weitere Größen:

- Schadenszunahmen / Schadensrate.

Anwendungsszenario 3: Beobachtung spezieller Mängel und Schäden

In das dritte Anwendungsszenario werden alle speziellen Fragestellungen, die ggf. erst zu einem späteren Zeitpunkt am Bauwerk auftreten, eingeordnet. Dieser Anwendungsfall geht dabei auf die Dokumentation der Ausgangszustandes ein und betrifft weniger ein Monitoring wie in den ersten beiden Szenarien, sondern die Fragestellung „Ist dieser Mangel bzw. Schaden neu, oder lag dieser bereits bei Fertigstellung des Bauwerks vor?“.

Bei Vorhandensein einer vollständigen Aufnahme des Bauwerks lassen sich diese Fragen i. d. R. ohne großen Aufwand beantworten. Insbesondere das 3D-Bauwerksmodell kann Zeit gegenüber einer aufwändigen Bildrecherche sparen.

Beispiel für dieses Anwendungsszenario:

- fehlende Verbindungsmittel, z. B. an Lager oder Knotenverbindungen,
- Lagerverschiebungen,
- Schiefstellung eines Elastomerlagers,
- Mangel an der Fahrbahnübergangskonstruktion,
- Monitoring von Einzelschäden,

Voraussetzung:

- vollständiger Bilddatensatz,
- georeferenziertes 3D-Bauwerksmodell mit vollständiger Abbildung der Bauwerksoberfläche.

3.5 Definition des Geburtszertifikats

3.5.1 Namensfindung

Um einen geeigneten Begriff für die geplante Dokumentation eines Referenzzustandes des ungeschädigten Zustand eines Bauwerks zu finden, ist es wichtig, die damit verbundenen Grundbegriffe zu beleuchten.

Zertifikat

Ein Zertifikat ist ein formelles Dokument, das in der Regel von einer öffentlichen Behörde oder zumindest von einer autoritativen oder akkreditierten Stelle ausgestellt wird. Es dient als Nachweis oder Bestätigung dafür, dass eine bestimmte Sache, in diesem Fall das Brückenbauwerk, bestimmte festgelegte Standards oder Anforderungen erfüllt.

Dokumentation

Die Dokumentation ist das Sammeln, Aufbereiten und Strukturieren von Informationen oder Daten zur unterstützenden Beschreibung des Brückenbauwerks. Dies kann in Form von Handbüchern, Anleitungen, Berichten und Online-Hilfen vorliegen.

Protokoll

Ein Protokoll ist eine formale Aufzeichnung oder dokumentierte Zusammenfassung von Ereignissen, Diskussionen und/oder Beschlüssen, die während eines Meetings oder einer anderen Art von formeller Zusammenkunft stattgefunden haben. Es dient dazu, Transparenz zu schaffen und sicherzustellen, dass alle Teilnehmer und andere interessierte Parteien eine verlässliche Aufzeichnung über den Verlauf und die Ergebnisse der Besprechung haben.

Bericht

Ein Bericht ist ein strukturiertes Dokument, das Informationen zu einem bestimmten Thema, Ereignis oder Problem analysiert und präsentiert. Berichte werden in einer Vielzahl von Kontexten verwendet, um Fortschritte, Ergebnisse oder Erkenntnisse zu kommunizieren. Berichte sind oft detaillierter als andere Kommunikationsformen und enthalten Daten, Analysen, Schlussfolgerungen und oft auch Empfehlungen.

Referenz

Der Begriff „Referenz“ wird in verschiedenen Kontexten und auch im Gelbdruck der DIN 1076 verwendet und hat dementsprechend unterschiedliche Bedeutungen. Wobei die allgemeine Bedeutung ein Verweis auf etwas ist, um Informationen oder Sachverhalte zu untermauern oder zu belegen.

Erfassung

Erfassung bezeichnet den Prozess des Sammelns und Aufzeichnens von Daten oder Informationen. Dies kann manuell oder automatisch erfolgen und umfasst die Eingabe von Daten in Systeme, Formulare oder Datenbanken.

Beschreibung

Eine Beschreibung ist eine detaillierte Darstellung oder Erklärung der Eigenschaften, Merkmale und Funktionen eines Objekts, Prozesses oder Konzepts. Sie soll dem Lesenden ein klares Verständnis des beschriebenen Gegenstands vermitteln.

Modellierung

Modellierung ist der Prozess der Erstellung einer vereinfachten Darstellung oder eines Modells eines realen Systems oder Prozesses. Modelle werden verwendet, um komplexe Systeme zu analysieren, zu verstehen und vorherzusagen.

Simulation

Eine Simulation ist die Nachbildung eines realen Prozesses oder Systems über die Zeit mittels eines Modells. Sie wird verwendet, um das Verhalten eines Systems unter verschiedenen Bedingungen zu untersuchen und Vorhersagen zu treffen.

Archiv

Ein Archiv ist eine organisierte Sammlung von Dokumenten, Aufzeichnungen und anderen Materialien, die aufgrund ihres langfristigen Werts aufbewahrt werden. Archive dienen der Bewahrung von Informationen für zukünftige Referenz- und Forschungszwecke.

Initial

Initial bezieht sich auf den Anfang oder die erste Phase eines Prozesses, Projekts oder Systems. Es bezeichnet den Ausgangspunkt oder die Ausgangsbedingungen, von denen aus weitergearbeitet wird.

Null

Null ist ein mathematischer Wert, der die Abwesenheit von Menge oder eine Position am Anfang einer Zählung oder Skala darstellt. In verschiedenen Kontexten kann Null auch einen Ausgangspunkt oder Referenzwert ohne Einfluss oder Wirkung bedeuten.

Messung

Messung ist der Prozess der quantitativen Bestimmung oder Bewertung einer Eigenschaft oder eines Zustands eines Objekts oder Phänomens mittels geeigneter Instrumente und Einheiten. Sie liefert präzise und objektive Daten zur Analyse und Interpretation.

Zustand

Ein Zustand bezeichnet eine spezifische Konfiguration oder eine bestimmte Phase, in der sich ein Objekt, System oder Prozess zu einem gegebenen Zeitpunkt befindet. Zustände können durch unterschiedliche Eigenschaften oder Merkmale beschrieben werden und ändern sich in Abhängigkeit von internen oder externen Einflüssen.

Erhaltung

Erhaltung bezeichnet den Prozess und die Maßnahme, die darauf abzielen, den aktuellen Zustand eines Objektes langfristig zu bewahren.

Instandhaltung

Die Instandhaltung umfasst alle Aktivitäten, die darauf abzielen, die Funktionsfähigkeit eines Objekts wiederherzustellen oder aufrechtzuerhalten. Dazu zählen Wartung, Inspektion, Reparatur und Verbesserung.

Begriffsbestimmung bezogen auf das Geburtszertifikat

Eine endgültige Festlegung auf eine Begriffskombination ist aufgrund der vielfältigen Bedeutungen und Interpretationen der einzelnen Begriffe nicht einfach. Daher werden in diesem Abschnitt verschiedene Definitionen von Begriffen vorgestellt, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes behandelt wurden. Welche Begriffskombination zu verwenden ist, soll in diesem Abschnitt nicht vorgegeben werden.

3.5.2 Zeitlicher Horizont

Der Zeitraum, der im Geburtszertifikat einer Brücke betrachtet wird, ist grundlegend für die Definition der Parameter und Aspekte, die in dem Geburtszertifikat berücksichtigt werden müssen. Dieser Zeitraum erstreckt sich im Rahmen des vorliegenden Projekts vom Ende der Bauphase und vor der Verkehrsfreigabe bis zu einem Jahr nach der offiziellen Verkehrsübergabe. Die in dieser Phase gesammelten Informationen bilden die Grundlage für das Geburtszertifikat, das den Referenzzustand der Brücke im Ausgangszustand vor Verkehrsfreigabe festhält.

Es ist zu beachten, dass das Geburtszertifikat einer Brücke für das vorliegende Projekt weder die Planungs- und Bauphase noch die späteren Betriebsphasen nach dem ersten Jahr der Verkehrsübergabe abdeckt. Die Planungs- und Bauphasen werden, obwohl sie für das Verständnis der strukturellen Grundlagen und der Entstehung der Brücke unerlässlich sind, als vorbereitende Schritte betrachtet, die vor dem Zeitraum des Geburtszertifikats liegen. Gleiches gilt für die langfristige Betriebsphase, die wichtige Aspekte wie die kontinuierliche Überwachung umfassen kann.

Die Planungs- und Bauphasen beinhalten wichtige Details zur strukturellen Integrität und den technischen Spezifikationen der Brücke. Diese Phasen umfassen Entwurfspläne, Materialauswahl, Bauverfahren und Qualitätskontrollen, die alle wesentlich für die Gesamtstruktur der Brücke sind. Während diese Phasen vor dem Zeitraum des Geburtszertifikats liegen, stellen sie dennoch eine essentielle Wissensbasis dar, die für zukünftige Wartungs- und Überwachungsaktivitäten von Bedeutung ist.

Über das Projekt hinaus sollte es dabei jedoch auch möglich sein, ein Geburtszertifikat für Bestandsbauwerke auszustellen. In diesem Fall bezieht sich der Referenzzustand auf den dann vorliegenden Zustand, gegen den in Folgeuntersuchungen verglichen werden kann. Außerdem liefern die Planungs- und Bauphase wichtige Informationen, die im Rahmen eines Geburtszertifikats gespeichert werden sollten. Sie werden zwar für das Projekt vernachlässigt, sollten aber darüber hinaus berücksichtigt werden. Dies ermöglicht eine umfassende Dokumentation, die nicht nur den aktuellen Zustand, sondern auch die gesamte Historie und Entwicklung der Brücke nachvollziehbar macht.

In Bild 2 findet eine zeitliche Einordnung des Projekts in die Lebenszyklusphasen eines Bauwerks statt. Diese Einordnung hilft dabei, die Bedeutung jeder Phase im Lebenszyklus der Brücke zu verstehen und hervorzuheben, wie das Geburtszertifikat die Brücke von ihrem Referenzzustand im Ausgangszustand bis zu einem Jahr nach der Verkehrsfreigabe abbildet. Es unterstreicht die Wichtigkeit, jeden Abschnitt im Lebenszyklus detailliert zu dokumentieren, um eine fundierte Basis für zukünftige Bewertungen und Erhaltungsstrategien zu haben.

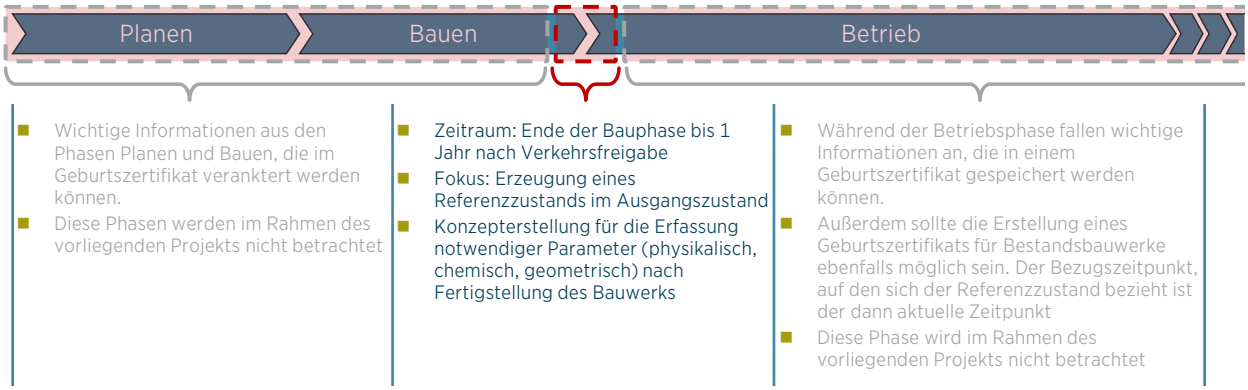

Bild 2: Einordnung des Geburtszertifikats im Rahmen des Projekts in die Lebenszyklusphasen eines Bauwerks

Insgesamt trägt das Geburtszertifikat dazu bei, eine solide Grundlage für die langfristige Überwachung und Erhaltung der Brücke zu schaffen. Es bietet eine detaillierte Momentaufnahme des Zustands der Brücke zu einem kritischen Zeitpunkt in ihrem Lebenszyklus und ermöglicht so eine fundierte und präzise Bewertung ihrer strukturellen Gesundheit im Laufe der Zeit.

3.5.3 Form und Inhalt

Das Geburtszertifikat wird als PDF-Dokument erstellt, das eine kompakte und übersichtliche Zusammenfassung der wichtigsten Informationen zu den durchgeführten und geplanten Messungen an der Brücke enthält. Diese PDF dient als offizielles und leicht zugängliches Dokument, das die wesentlichen Daten des Bauwerks in einer standardisierten Form präsentiert. Da das PDF-Format weit verbreitet und anerkannt ist, bietet es eine geeignete Basis für die formale Darstellung. Allerdings ist es wichtig zu beachten, dass die Maschinenlesbarkeit einer reinen PDF eingeschränkt ist.

Um dieser Einschränkung zu begegnen und eine langfristige und flexible Nutzung der Daten zu gewährleisten, enthält das Geburtszertifikat Verweise auf maschinenverarbeitbare Datensätze, die im Rahmen des Datenmanagements organisiert sind. Diese Datensätze sind nach den FAIR-Prinzipien (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) strukturiert und ermöglichen eine effiziente Integration in digitale Systeme, einschließlich in die Bauwerksinformationsdatenbank SIB-Bauwerke. Die Verweise in der PDF führen zu detaillierten Messdaten, Modellen und anderen relevanten Informationen, die in entsprechenden Datenbanken gespeichert sind.

Der Inhalt des Geburtszertifikats ist modular aufgebaut und umfasst alle wesentlichen Informationen, die zur vollständigen Beschreibung des Bauwerks und seines Zustands bei Inbetriebnahme erforderlich sind. Dabei wird das Zertifikat in verschiedene Abschnitte unterteilt, die jeweils spezifische Fragen beantworten:

- Was wurde bestimmt? Das Zertifikat dokumentiert die physikalischen und chemischen Eigenschaften der verwendeten Materialien sowie die strukturellen Merkmale des Bauwerks. Dazu gehören Daten zur Tragfähigkeit, Spannweite, Belastungsgrenzen und dem Schwingungsverhalten. Diese Parameter werden durch spezialisierte Messverfahren ermittelt und dienen als Referenzwerte für zukünftige Zustandsbewertungen.
- Wo wurde es bestimmt? Die Messungen und Prüfungen finden an verschiedenen Stellen des Bauwerks und in unterschiedlichen Phasen vor und nach der Inbetriebnahme statt. Dazu gehören sowohl Labortests der Baumaterialien als auch Messungen am fertiggestellten Bauwerk.
- Wie wurde es bestimmt? Das Geburtszertifikat enthält detaillierte Angaben zu den verwendeten Untersuchungsmethoden und -geräten. Diese Methoden sind in der Regel standardisiert und werden in einer zugehörigen Anlage des Dokuments (Anlage A) aufgelistet, die die spezifischen Parameter mit den entsprechenden Untersuchungsverfahren verknüpft.
- Wann wurde es bestimmt? Die im Zertifikat erfassten Daten beziehen sich auf Messungen, die vor der offiziellen Freigabe der Brücke für den Verkehr durchgeführt wurden. Diese Prüfungen sind sorgfältig zeitlich geplant, um sicherzustellen, dass alle relevanten Parameter zum richtigen Zeitpunkt erfasst werden, sodass die Brücke den technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen entspricht.

Einbindung in SIB-Bauwerke

Die Integration des Geburtszertifikats in das "SIB-Bauwerke"-System ist von entscheidender Bedeutung für die nachhaltige Verwaltung und Nutzung der erfassten Daten. SIB-Bauwerke ist das zentrale Informationssystem für Sonderbauwerke, das eine umfassende Dokumentation und Verwaltung aller relevanten Daten über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks hinweg ermöglicht.

Durch die Einbindung des Geburtszertifikats in SIB-Bauwerke wird sichergestellt, dass die gesammelten Daten nicht isoliert bleiben, sondern in einem größeren Kontext verwendet und analysiert werden können. Die im Geburtszertifikat enthaltenen Verweise auf weiterführende Datensätze und Modelle erleichtern die nahtlose Integration dieser Informationen in das SIB-Bauwerke-System. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung und Bewertung des Bauwerkszustands sowie eine fundierte Entscheidungsfindung bei Erhaltungsmaßnahmen.

Zusammenfassend gewährleisten die durchdachte Form und Struktur des Geburtszertifikats, dass alle relevanten Informationen übersichtlich und zugänglich bleiben, während die Einbindung in SIB-Bauwerke eine effiziente Nutzung und langfristige Verwaltung der Daten sicherstellt.

3.5.4 Integration in das Erhaltungsmanagement

Die Einführung eines Geburtszertifikats für Brückenbauwerke stellt eine bedeutende Neuerung im Bereich der Bauwerksüberwachung und -erhaltung dar. Die Hauptzielsetzung des Geburtszertifikats ist die Schaffung eines detaillierten und genauen Referenzzustands einer Brücke, der als Ausgangspunkt für alle zukünftigen Beurteilungen für Erhaltungsmaßnahmen dient. Um den größtmöglichen Nutzen aus diesem Konzept zu ziehen, muss das Geburtszertifikat nahtlos in das bestehende Erhaltungsmanagement

integriert werden. Dies erfordert die Etablierung spezifischer Prozesse und Strukturen innerhalb des Infrastrukturbetreibers, um die neuen Anforderungen effektiv zu erfüllen.

Damit ein Geburtszertifikat im Rahmen des Erhaltungsmanagements effektiv genutzt werden kann, sind bestimmte Voraussetzungen erforderlich. Zunächst muss ein umfassendes und genaues Datenmanagementsystem etabliert werden, das alle relevanten Daten, die im Rahmen des Geburtszertifikats erfasst werden, langfristig und maschinenlesbar speichert. Dieses System muss die Fähigkeit haben, sowohl die physikalischen und chemischen Eigenschaften als auch die geometrischen Daten der Brücke zuverlässig zu verwalten. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Gewährleistung der Datenqualität und -konsistenz über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks dar.

Darüber hinaus müssen klare Prozesse definiert werden, wie die im Geburtszertifikat enthaltenen Daten in die regelmäßigen Inspektionen und Zustandsbewertungen einfließen. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen den für die Bauwerksüberwachung verantwortlichen Ingenieuren und denjenigen, die für die Datenanalyse und -interpretation zuständig sind. Ein zentrales Element ist dabei die Kalibrierung und kontinuierliche Aktualisierung numerischer Modelle auf Basis der im Geburtszertifikat enthaltenen Daten, um eine präzise Vorhersage und Überwachung des Bauwerkszustands zu ermöglichen.

Ein wesentlicher Aspekt der Integration des Geburtszertifikats in das Erhaltungsmanagement ist die Möglichkeit, proaktive, nicht anlassbezogene Erhaltungsmaßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Im Gegensatz zu traditionellen Ansätzen, die oft reaktiv auf sichtbare Schäden oder Probleme reagieren, ermöglicht das Geburtszertifikat eine vorausschauende Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen. Durch die regelmäßige Überprüfung des aktuellen Bauwerkszustands im Vergleich zum im Geburtszertifikat dokumentierten Referenzzustand können potenzielle Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden, bevor sie zu ernsthaften Schäden führen.

Diese präventiven Maßnahmen sind besonders wichtig, um die Lebensdauer der Brücke zu verlängern und die Gesamtkosten für Erhaltung und Reparaturen zu reduzieren. Die kontinuierliche Überwachung und der Vergleich mit dem Geburtszertifikat können dabei helfen, Abweichungen vom Referenzzustand frühzeitig zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen einzuleiten, bevor sich die Struktur des Bauwerks verschlechtert.

Für eine erfolgreiche Umsetzung muss das Konzept des Geburtszertifikats in die bestehenden Geschäftsprozesse der Straßenbauverwaltung integriert werden. Dies umfasst die Anpassung der aktuellen Erhaltungsstrategien, um die im Geburtszertifikat enthaltenen Daten und Analysen zu berücksichtigen. Ein wichtiger Schritt in diesem Prozess ist die Entwicklung eines standardisierten Prozesses zur Datenübergabe und -integration zwischen den verschiedenen Akteuren, einschließlich der Straßenbauverwaltung, den Ingenieurbüros und den Spezialdienstleistern für Bauwerksmessungen.

Das Datenmanagementsystem muss so gestaltet sein, dass es die FAIR-Prinzipien (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability) erfüllt, um eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Daten zu gewährleisten. Dies bedeutet, dass die gesammelten Daten nicht nur archiviert, sondern auch aktiv genutzt und bei Bedarf in andere Systeme integriert werden können. Ein zentraler Aspekt dabei ist die Sicherstellung der langfristigen Lesbarkeit und Zugänglichkeit der Daten, um eine kontinuierliche Überwachung und Erhaltung über die gesamte Lebensdauer der Brücke zu ermöglichen.

Die Integration des Geburtszertifikats in das Erhaltungsmanagement bringt einige Herausforderungen mit sich, die es zu bewältigen gilt. Die größten Herausforderungen sind die Heterogenität der gesammelten Daten und die Notwendigkeit, diese Daten in einer Weise zu korrelieren, dass sie für verschiedene Anwendungen und Analysen genutzt werden können. Dies erfordert ein hohes Maß an Abstimmung und Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren, um sicherzustellen, dass die Daten konsistent und nutzbar bleiben.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Schulung und Sensibilisierung der Mitarbeitenden innerhalb der Straßenbauverwaltung für den Umgang mit den neuen Technologien und Prozessen, die im Zusammenhang mit dem Geburtszertifikat eingeführt werden. Dies schließt die Notwendigkeit ein, bestehende IT-Systeme anzupassen oder neue Systeme zu implementieren, um den Anforderungen gerecht zu werden.

3.6 Datenmanagement

3.6.1 Ausgangssituation

In der aktuellen Praxis der Bauwerksüberwachung und -erhaltung stehen Infrastrukturbetreiber vor einer Vielzahl von Herausforderungen, die sich insbesondere aus der zunehmenden Menge und Heterogenität der erhobenen Daten ergeben. Diese Daten stammen aus verschiedenen Quellen und umfassen ein breites Spektrum an Informationen, die für eine umfassende Bewertung des Bauwerkszustands unerlässlich sind. Dazu gehören physikalische Parameter, chemische Aspekte sowie geometrische Aspekte, die im Rahmen von Monitoring- und Diagnostikuntersuchungen erfasst werden.

Mit dem Einsatz moderner Monitoring- und Diagnostikverfahren steigt die Menge der erhobenen Daten exponentiell an. Sensoren, die kontinuierlich physikalische Größen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Verformungen oder Vibrationen messen, generieren große Mengen an Zeitreihendaten. Parallel dazu liefern chemische Analysen Informationen über Materialveränderungen, die im Laufe der Zeit auftreten können. Hinzu kommen hochauflösende geometrische Daten, die beispielsweise durch 3D-Scanning-Technologien erfasst werden, um exakte Modelle des Bauwerks zu erstellen.

Diese Datenvielfalt und -menge stellt die Straßenbauverwaltung vor die Herausforderung, ein leistungsfähiges Datenmanagementsystem zu entwickeln, das in der Lage ist, die verschiedenen Datentypen effizient zu speichern, zu verwalten und auszuwerten. Die Speicherung und Verarbeitung dieser Daten erfordern nicht nur eine erhebliche Rechen- und Speicherkapazität, sondern auch eine flexible Infrastruktur, die mit den steigenden Anforderungen Schritt halten kann.

Ein weiteres zentrales Problem ist die Heterogenität der erfassten Daten. Die unterschiedlichen Datentypen, wie Zeitreihen, chemische Analysen und geometrische Modelle, weisen jeweils spezifische Anforderungen an die Speicherung und Verarbeitung auf. Zeitreihendaten erfordern beispielsweise eine kontinuierliche und zeitlich strukturierte Speicherung, während chemische Daten häufig in Form von diskreten Messwerten oder Laborberichten vorliegen. Geometrische Daten wiederum benötigen spezialisierte Speicherformate, die eine exakte Repräsentation der Bauwerksstruktur ermöglichen.

Diese Heterogenität macht es schwierig, eine einheitliche Datenhaltung zu gewährleisten und erfordert den Einsatz verschiedener Speicher- und Datenbanktechnologien. Zudem müssen die Daten so strukturiert werden, dass sie für unterschiedliche Anwendungen und Analysen leicht zugänglich und nutzbar sind. Die Herausforderung besteht darin, ein System zu entwickeln, das in der Lage ist, diese vielfältigen Datenquellen zu integrieren und eine konsistente und kohärente Sicht auf die Informationen zu bieten.

Ein weiterer Aspekt der Ausgangssituation ist die Notwendigkeit, die gesammelten Daten über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks hinweg sicher zu archivieren und zugänglich zu machen. Dies erfordert nicht nur eine langfristige Speicherstrategie, sondern auch Mechanismen, die gewährleisten, dass die Daten jederzeit nachvollziehbar und in einem nutzbaren Format vorliegen. Die Sicherstellung der Datenintegrität über lange Zeiträume hinweg ist entscheidend, um spätere Analysen und Vergleichsmessungen auf einer soliden Datenbasis durchführen zu können.

Ein zentrales Ziel ist dabei, die Daten so zu strukturieren und zu speichern, dass sie den FAIR-Prinzipien (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) entsprechen. Dies bedeutet, dass die Daten nicht nur leicht auffindbar und zugänglich sein müssen, sondern auch in einer Form vorliegen sollten, die ihre Interoperabilität mit anderen Systemen ermöglicht und ihre Wiederverwendbarkeit sicherstellt.

Die Integration der verschiedenen Datenquellen und die Sicherstellung ihrer Nutzbarkeit über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks hinweg stellen erhebliche technische und organisatorische Herausforderungen dar. Die föderale Struktur der Straßenbauverwaltungen und die damit verbundene dezentrale Datenhaltung erfordern ein flexibles und skalierbares Datenmanagementsystem, das in der Lage ist, Daten aus unterschiedlichen Quellen und Systemen effizient zu integrieren und bereitzustellen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ausgangssituation durch eine wachsende Datenmenge, eine hohe Heterogenität der Daten und die Notwendigkeit einer nachhaltigen Datenarchivierung geprägt ist. Diese Herausforderungen erfordern innovative Lösungen im Bereich des Datenmanagements, um die

gesammelten Informationen effizient zu speichern, zu verwalten und in den Erhaltungsprozessen nutzbar zu machen.

3.6.2 Zielvorstellung

Für die Straßenbauverwaltung ergibt sich die zentrale Aufgabe, neben den dokumentierten und visuell dargestellten Ergebnissen auch die aufbereiteten Messdaten in maschinell verarbeitbarer Form zu speichern. Diese Daten sollen nicht nur als Grundlage für zukünftige Auswertungen dienen, sondern auch für Vergleichsmessungen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks hinweg nutzbar sein. Dabei muss die Datenhaltung höchsten Anforderungen an Nachvollziehbarkeit, langfristige Archivierbarkeit und Lesbarkeit genügen.

In diesem Kontext bietet die Implementierung föderierter Systeme eine zukunftsweisende Lösung. Föderierte Informationssysteme ermöglichen eine dezentrale Speicherung und Verwaltung von Monitoring- und Diagnostikdaten, die dennoch als zentrale Datenquelle für jedes Bauwerk fungieren. Diese Systeme bestehen aus mehreren autonomen Einheiten, die an unterschiedlichen Standorten betrieben werden können. Dadurch wird eine flexible und skalierbare Infrastruktur geschaffen, die den spezifischen Anforderungen der föderalen Struktur der Straßenbauverwaltungen gerecht wird.

Das Datenmanagementsystem muss in der Lage sein, eine eindeutige Zuordnung zwischen laufenden und historischen Messdaten sowie den zugehörigen Metadaten herzustellen. Gleichzeitig muss es ermöglichen, Verknüpfungen zu externen Ressourcen wie Bauwerksplänen, BIM-Modellen und Messstellenplänen jederzeit aufzulösen und aktuell zu halten. In einem föderierten System bedeutet dies, dass die Daten physisch an verschiedenen Orten gespeichert sein können, jedoch durch geeignete Schnittstellen und Metadatenverknüpfungen eine konsistente und kohärente Sicht auf alle relevanten Informationen gewährleistet ist.

Die effektive Nutzung dieses föderierten Datenmanagementsystems, siehe Bild 3, validiert dessen Mehrwert und verhindert die Entstehung isolierter Datensilos. Eine reine Datenarchivierung ohne Rückkopplung zur Nutzung ist ineffizient und führt dazu, dass das Potenzial der gesammelten Informationen nicht ausgeschöpft wird. Föderierte Systeme bieten hier einen entscheidenden Vorteil: Sie

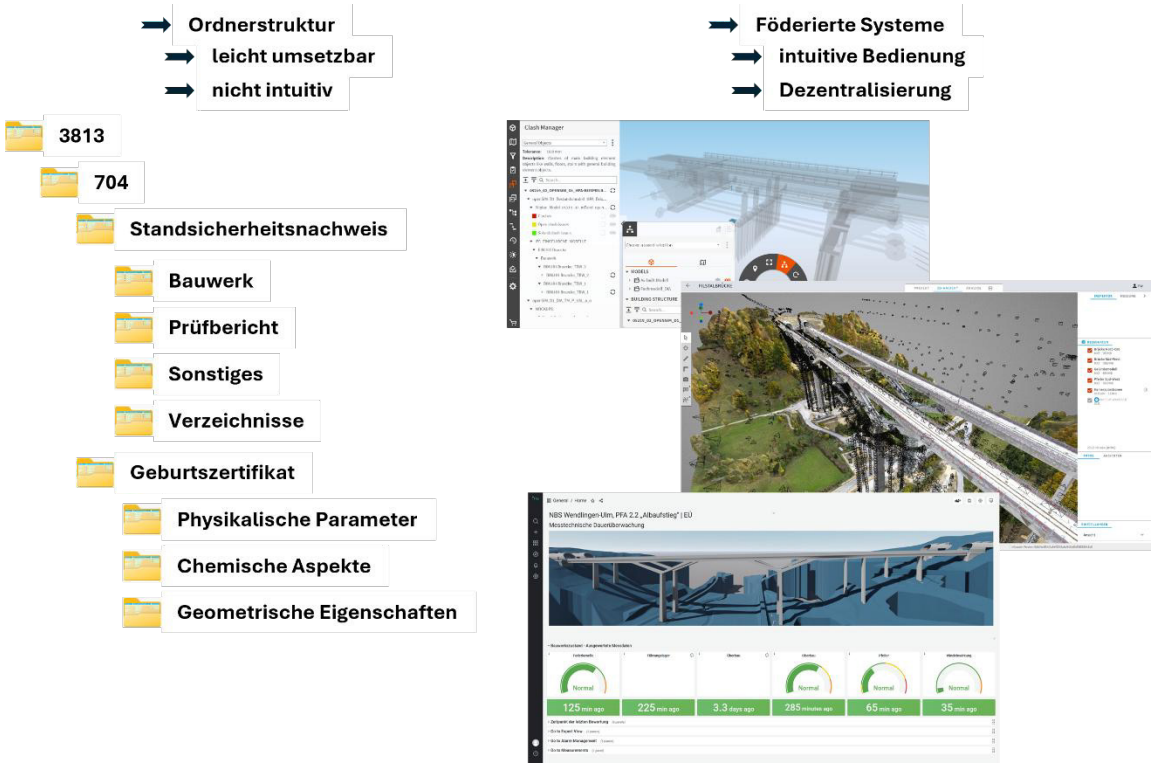

Bild 3: Gegenüberstellung: Ordnerstruktur (links) und föderierte Systeme (rechts)

ermöglichen es, Daten dezentral zu verwalten und gleichzeitig zentralisiert auf diese zuzugreifen und sie auszuwerten.

Die Herausforderungen bei der Datenhaltung in einem föderierten System ergeben sich insbesondere aus der Heterogenität der Monitoringdaten und der Notwendigkeit, diese Daten mit den zugehörigen Metainformationen zu korrelieren. Die kontinuierlich anwachsenden Datenbestände, die sowohl als Zeitreihen als auch in anderen Formaten vorliegen, erfordern daher flexible und leistungsfähige IT-Systeme, die eine nahtlose Integration und Verwaltung der Daten gewährleisten.

Die Abstimmung zwischen den Spezialdienstleistern für Bauwerksmessungen und der Straßenbauverwaltung spielt in diesem Kontext eine entscheidende Rolle. Je nach Anwendungsfall kann die Intensität dieser Abstimmung variieren. Praxiserfahrungen zeigen, dass insbesondere bei Monitoringdaten auf niedrigen Aggregationsstufen Detailwissen und Rücksprache mit den Dienstleistern notwendig sind. In einem föderierten System ist es entscheidend, dass das Datenmanagement zentral im Gesamtprozess der Bauwerksprüfung verankert ist. Dies gewährleistet, dass alle notwendigen Informationen vollständig erfasst, korrekt zugeordnet und optimal genutzt werden können, unabhängig davon, wo die Daten physisch gespeichert sind.

3.6.3 Grundlagen für die Konzeption eines Datenmanagements

FAIR-Prinzipien

Die Anwendung der FAIR-Prinzipien (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) ist im Kontext des Datenmanagements für Monitoring-, Diagnostikdaten und geometrische Aspekte von grundlegender Bedeutung. Diese Prinzipien stellen sicher, dass die gesammelten Daten nicht nur kurzfristig, sondern über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks hinweg effektiv genutzt werden können.

Findable (Auffindbar): Die Daten müssen leicht auffindbar sein, sowohl für Menschen als auch für automatisierte Systeme. Dies erfordert eine klare und standardisierte Kennzeichnung sowie eine strukturierte Indizierung der Daten. Metadaten spielen hierbei eine zentrale Rolle, indem sie die Grundlage für die Auffindbarkeit der Informationen bieten.

Accessible (Zugänglich): Die Daten sollten nach ihrer Auffindung einfach zugänglich sein, unter Berücksichtigung von Zugriffsrechten, Datenschutz und Sicherheitsanforderungen. Es muss klar definierte Mechanismen geben, um sicherzustellen, dass autorisierte Nutzer problemlos auf die Daten zugreifen können.

Interoperable (Interoperabel): Die Daten müssen so strukturiert sein, dass sie mit anderen Datenquellen und Systemen nahtlos kombiniert und weiterverarbeitet werden können. Dies erfordert die Verwendung standardisierter Formate und Protokolle, die eine reibungslose Integration in bestehende und zukünftige Systeme ermöglichen.

Reusable (Wiederverwendbar): Die Daten sollten für zukünftige Anwendungen wiederverwendbar sein. Dies setzt voraus, dass sie gut dokumentiert, qualitativ hochwertig und in einem Format vorliegen, das auch langfristig nutzbar ist. Die Wiederverwendbarkeit ist entscheidend, um eine nachhaltige und effiziente Nutzung der gesammelten Informationen sicherzustellen.

Die Implementierung der FAIR-Prinzipien trägt nicht nur zur Verbesserung der Datenqualität bei, sondern stellt auch sicher, dass die gesammelten Informationen langfristig nutzbar bleiben. Dies ist besonders wichtig im Kontext von Monitoring- und Diagnostikdaten, die über Jahre hinweg gesammelt und ausgewertet werden, um den Zustand und die Sicherheit von Bauwerken zu überwachen.

Föderierte Informationssysteme

Ein föderiertes Informationssystem, bestehend aus mehreren autonomen IT-Systemen, bietet hier eine ideale Lösung. Solche Systeme ermöglichen es, Monitoring-, Diagnostikdaten und geometrische Aspekte dezentral zu speichern und zu verwalten, während gleichzeitig ein übergreifender Zugriff auf die verteilten Datenbestände gewährleistet wird.

Flexibilität und Skalierbarkeit

Föderierte Informationssysteme erlauben es, die Datenmanagement-Infrastruktur flexibel an die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Verwaltungsebenen und Standorte anzupassen. Durch den Einsatz von Virtualisierungstechnologien und Containern kann die Leistung der Systeme dynamisch skaliert werden, um den wechselnden Anforderungen gerecht zu werden.

Dezentrale Datenhaltung

Die Architektur eines föderierten Systems unterstützt die dezentrale Speicherung von Daten, was insbesondere in einer föderal organisierten Verwaltung von Vorteil ist. Trotz der physischen Verteilung der Daten wird eine einheitliche Sicht auf alle relevanten Informationen ermöglicht, ohne dass die Daten zentralisiert werden müssen.

Interoperabilität und Integration

Föderierte Systeme bieten die Möglichkeit, verschiedene Datenquellen und Systeme miteinander zu verknüpfen, ohne die Autonomie der einzelnen Systeme zu beeinträchtigen. Dies gewährleistet, dass die Daten aus unterschiedlichen Standorten und Systemen nahtlos integriert und genutzt werden können.

Unabhängigkeit von zentralen Lösungen

Die Unabhängigkeit von einer zentralen Datenmanagementlösung ist entscheidend, um eine bedarfsgerechte und flexible Nutzung der gesammelten Daten zu ermöglichen. Föderierte Informationssysteme bieten die notwendige Autonomie, um auf spezifische Anforderungen und Veränderungen schnell und effektiv reagieren zu können.

Zusammenfassend bieten föderierte Informationssysteme eine robuste und anpassungsfähige Infrastruktur für das Datenmanagement in der Straßenbauverwaltung. Sie ermöglichen es, die vielfältigen und heterogenen Datenbestände effizient zu verwalten und dabei die spezifischen Anforderungen einer föderal organisierten Verwaltung optimal zu berücksichtigen.

4 Prototypische Umsetzung des Konzepts

4.1 Bauwerksbeschreibung

Als Referenzbauwerk wird die Brücke über die Welse an der B198, die die Orte Greiffenberg und Angermünde (Brandenburg) verbindet, zur Verfügung gestellt. Die Brücke besitzt eine freie Spannweite von 11,50 m und eine Breite von 20,50 m. Die Brücke wird in Betonbauweise mit schlaffer Bewehrung als Rahmenbrücke hergestellt. Der Brückenüberbau besteht aus einer 80 cm starken Stahlbetonplatte und die Trassenführung ist geradlinig. Gegründet ist die Brücke auf Bohrpfählen, die in den tragfähigen Baugrund einbinden.

Die Brücke überspannt einen kleinen Fluss, die Welse, die eine Breite von bis zu 6 m erreicht. Beidseitig des Flusses sind ca. 2 m breite Bankette angeordnet, die jeweils eine lichte Höhe bis zur Brückenunterseite von 1,80 m bzw. 2,40 m haben. In Bild 4 ist die Ansicht der Brücke und der Querschnitt der Fahrbahnplatte dargestellt.

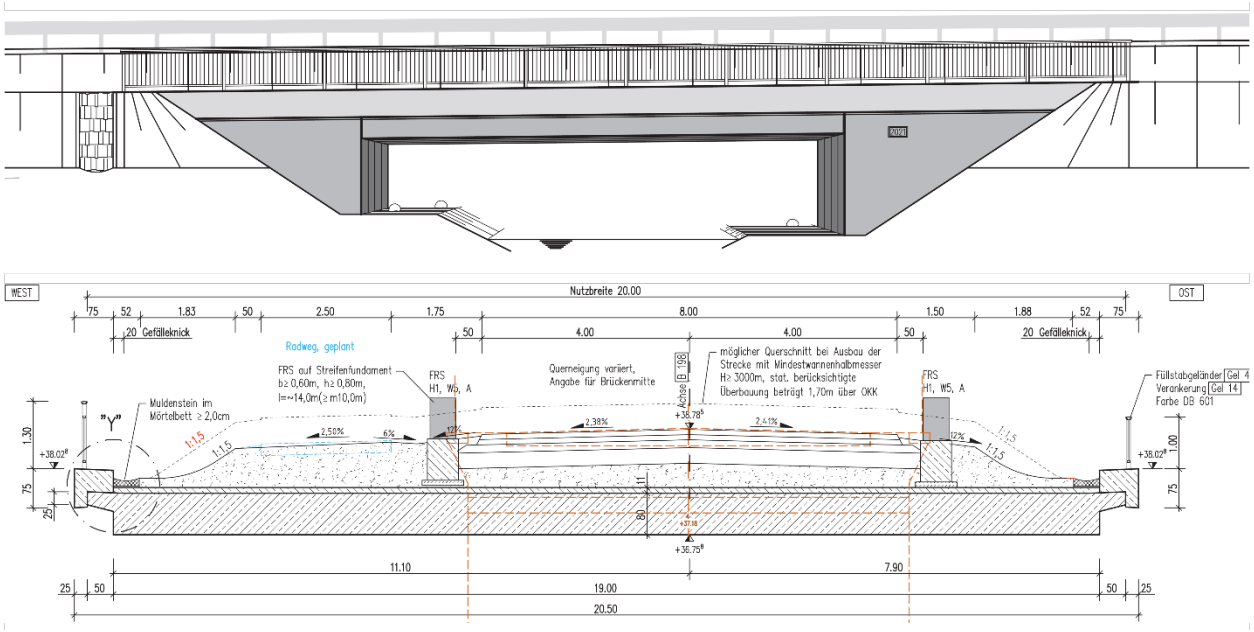

Bild 4: Ansicht (oben) und Regelquerschnitt (unten) des Referenzbauwerks [95]

4.2 Maßnahmen zur Ermittlung von Kenngrößen am Referenzbauwerk

4.2.1 Sensorbasiertes Monitoring

Materialdehnung/-spannung

Die DFOS-Messung basiert auf der verteilten faseroptischen Sensorik. Hierbei werden Lichtleiterkabel entlang oder innerhalb der Brückenstruktur verlegt. Diese Kabel fungieren als Sensoren, indem sie Lichtimpulse durch die Fasern senden. Wenn das Material, in dem die Fasern eingebettet sind, Belastungen bzw. Dehnungen erfährt, verändern sich die Rückstreuungsmuster des Lichts. Diese Veränderungen werden analysiert, um detaillierte und kontinuierliche Daten über die Materialspannung und -dehnung zu gewinnen. Dies ermöglicht eine umfassende Überwachung der gesamten Struktur, da die Faseroptikkabel kontinuierliche Messungen entlang ihrer gesamten Länge erfassen können.

Die Installation der DFOS-Sensoren erfolgt idealerweise während der Bauphase des Brückenbauwerks. Die faseroptischen Sensoren werden vor der Betonage des Bauwerks an der Bewehrung angebracht, um

eine optimale Erfassung der Materialspannungen und -dehnungen sicherzustellen. Auf diese Weise sind die Sensoren tief in der Struktur verankert und können präzise Daten liefern. Es ist erwähnenswert, dass die Faser, die für die Messungen verwendet wird, dauerhaft in die Struktur eingebracht wird und vergleichsweise günstig ist. Die Messtechnik, insbesondere der Interrogator, der zur Auswertung der Messdaten benötigt wird, ist jedoch nur temporär für Messungen am Bauwerk notwendig und daher im Vergleich teurer.

Die Verwendung von DFOS hat den großen Vorteil, dass räumlich kontinuierlich, aber zeitlich diskret aufgenommen werden kann. Die Messung erfolgt manuell vor Ort am Bauwerk und kann perspektivisch in den Regelprozess bei Bauwerksprüfungen aufgenommen werden.

Die durch die DFOS-Messungen gewonnenen Daten umfassen präzise Informationen über die Materialspannungen und -dehnungen an verschiedenen Punkten der Brücke. Diese Daten werden in einem modularen Datensystem gespeichert, das die gemessenen Werte zusammen mit einem Zeitstempel in einem zeitlichen Kanal abspeichert. Durch diese Struktur wird sichergestellt, dass die Daten jederzeit abrufbar und analysierbar sind, was für die laufende Überwachung und Wartung des Bauwerks von entscheidender Bedeutung ist.

Eine sorgfältige Installation und regelmäßige Funktionsprüfung der Messstellen sind unerlässlich, um eine lange Lebensdauer der Sensoren zu gewährleisten. Fehler bei der Installation oder Vernachlässigung der Messstellenabdeckung können zu verkürzter Lebenszeit oder sogar zum Totalausfall der Messsysteme führen. Besonders während der Bauphase ist es wichtig, die Funktionsfähigkeit der installierten Sensoren zu dokumentieren, um spätere Ausfälle durch externe Einflüsse, wie die Betonage, nachweisen zu können.

Verschiebung / Verformung

Zur Ermittlung der Verformungen können u.a. DFOS-Messungen wie bei den Materialdehnungen/-spannungen durchgeführt werden. Zusätzlich können während der Bauphase Dehnungsmessstreifen an einem oder mehreren Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von mindestens 20 mm angebracht werden, die mit einer DMS-Vollbrücke in Zugstabkonfiguration ausgestattet sind. Diese Konfiguration ermöglicht die Kompensation von Temperatureffekten und Biegeverformungen. Nachdem die Messstelle eingerichtet ist, wird sie durch eine definierte Kraft beaufschlagt, um die Funktionsfähigkeit der Messanordnung zu überprüfen. Die erfassten Messdaten werden durch Umrechnungsvorschriften und Materialkennwerte validiert, um die Plausibilität sicherzustellen.

Zusätzlich können Wegsensoren die lineare Verschiebung eines bestimmten Punktes der Struktur messen. Diese Sensoren werden an kritischen Stellen der Brücke installiert, um kleinste Verformungen oder Bewegungen zu erfassen. Dies kann durch Verschrauben, Kleben oder Einbetten in das Bauwerk erfolgen, dabei ist eine feste Messbasis nötig. Damit ist eine dauerhafte Kennzeichnung zur Gewährleistung der Rückverfolgbarkeit gewährleistet. Sie bieten eine hohe Präzision und eignen sich besonders für die Überwachung von Bewegungen, die durch Lastwechsel oder thermische Einflüsse verursacht werden.

Beschleunigungssensoren erfassen die dynamischen Bewegungen der Brücke, wie Schwingungen und Erschütterungen, die durch Verkehr oder Umwelteinflüsse verursacht werden. Diese Sensoren werden an verschiedenen Stellen der Brücke installiert und liefern Daten über die Amplitude und Frequenz der Schwingungen.

Laserscanner werden eingesetzt, um die gesamte Struktur der Brücke dreidimensional zu erfassen und Veränderungen in der Form oder Ausrichtung punktuell über die Zeit zu überwachen. Diese Scanner senden Laserstrahlen aus und messen die zurückreflektierten Signale, um präzise Punktwolken der Brücke zu erstellen. Diese Modelle können dann bei entsprechender Registrierung mit früheren Scans verglichen werden, um Verformungen zu identifizieren.

Die manuelle Neigungsmessung erfolgt durch den Einsatz von Neigungsmessgeräten, die an spezifischen Punkten der Brücke angebracht werden. Diese Geräte messen den Winkel einer Oberfläche relativ zur Horizontalen und ermöglichen die Erkennung von Verschiebungen oder Verformungen, die auf strukturelle oder geodätische Probleme hindeuten könnten.

Die verschiedenen Messverfahren erfassen eine Vielzahl von Daten, darunter lineare Verschiebungen (Wegsensoren), lokale Dehnungen (DMS), dynamische Bewegungen (Beschleunigungssensoren), und Neigungswinkel (sensorbasierte Neigungsmessung). Laserscanner liefern detaillierte Punktwolken im 3D-

Raum, die Veränderungen in der Form und Ausrichtung aufzeigen, während DFOS kontinuierliche Daten über die Materialspannung und -dehnung bereitstellt.

Die erfassten Daten werden in einem modularen Datensystem gespeichert, das die Messwerte mit Zeitstempeln versieht und in zeitlichen Kanälen organisiert. Dies ermöglicht eine fortlaufende Überwachung und Analyse der Struktur. Die Daten können nach Bedarf abgerufen, verglichen und ausgewertet werden, um potenzielle strukturelle Probleme frühzeitig zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Die kontinuierliche Speicherung und Analyse dieser Daten sind entscheidend für die langfristige Überwachung und Wartung des Bauwerks.

Wärmeausdehnungskoeffizient

Temperatursensoren werden eingesetzt, um die Temperatur an verschiedenen Stellen der Brücke kontinuierlich zu überwachen. Diese Sensoren erfassen Temperaturänderungen, die direkten Einfluss auf die Materialausdehnung haben. Durch das präzise Messen der Temperaturverläufe können Temperaturgradienten in den entsprechenden Bauteilen ermittelt werden.

Wegsensoren messen die lineare Verschiebung oder Ausdehnung der Struktur infolge von Temperaturänderungen. Diese Sensoren erfassen kleinste Verschiebungen, die durch die thermische Ausdehnung oder Kontraktion des Materials verursacht werden. Die gemessenen Verschiebungen werden dann in Beziehung zu den erfassten Temperaturdaten gesetzt, um den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Materials zu bestimmen.

Die Installation der Temperatursensoren erfolgt an mehreren strategischen Punkten der Brücke, sowohl an der Oberfläche als auch in der Tiefe, um ein umfassendes Temperaturprofil der Struktur zu erhalten. Diese Sensoren werden entweder in das Material eingebettet oder an der Oberfläche befestigt, je nach den Anforderungen der Messung.

Die Wegsensoren werden an Stellen installiert, an denen thermische Ausdehnungen besonders relevant sind, beispielsweise an Übergangskonstruktionen oder an den Enden von Brückenelementen. Die Sensoren werden fest montiert, sodass sie präzise lineare Verschiebungen am Bauteilerfassen können, die durch Temperaturveränderungen verursacht werden.

Die Temperatursensoren erfassen kontinuierlich Daten über die Temperaturverläufe an verschiedenen Punkten der Brücke. Diese Daten sind entscheidend für das Verständnis, wie sich thermische Beanspruchungen in Längsrichtung der Brücke und im Bauteilquerschnitt verteilen. Gleichzeitig erfassen die Wegsensoren die durch Temperaturänderungen verursachten linearen Verschiebungen. Durch die Kombination dieser Daten kann der Wärmeausdehnungskoeffizient des Materials berechnet und überwacht werden.

Die gesammelten Daten werden in einem modularen Datensystem gespeichert, das sowohl Temperatur- als auch Verschiebungsdaten in Echtzeit erfasst und speichert. Jede Messung wird mit einem Zeitstempel versehen, sodass die Daten über die Zeit hinweg analysiert werden können. Diese strukturierte Speicherung ermöglicht es, langfristige Trends in den Temperaturverläufen und den damit verbundenen Längsverschiebungen zu erkennen und gegebenenfalls frühzeitig Maßnahmen zur Wartung oder Anpassung der Struktur zu ergreifen.

Eigenfrequenz, Eigenschwingform, Modale Masse, Modale Dämpfung

Mit einem Schwingungserreger wird die Brücke gezielt in Schwingung versetzt. Diese künstlich induzierten Schwingungen ermöglichen es, die Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen der Brücke zu erfassen. Durch die Analyse der Strukturreaktionen (Schwingungen) können Rückschlüsse auf die dynamischen Eigenschaften der Brücke gezogen werden.

Um die tatsächlichen Schwingungen des Bauwerks zu messen, werden Beschleunigungssensoren an geeigneten Stellen der Brücke angebracht. Sie erfassen punktuell die dynamische Bewegung der Brücke als Reaktion auf äußere Einflüsse wie Verkehr oder Umwelteinflüsse oder die Anregung durch den Schwingungserreger. Auf der Grundlage dieser Daten können mit Hilfe der Modalanalyse die modalen Parameter der Brücke bestimmt werden.

Die Modalanalyse ist ein Verfahren zur Bestimmung der Eigenfrequenzen, der Schwingungsformen und der modalen Dämpfung der untersuchten Struktur. Diese Analyse basiert auf Daten, die von Beschleunigungssensoren und gegebenenfalls von Schwingungserregern erfasst werden, und bestimmt die oben genannten Modalparameter. Die Kenntnis der Modalparameter ermöglicht ein umfassendes Verständnis des dynamischen Verhaltens der Brücke.

Die Ergebnisse der Untersuchungen können dann bei späteren Referenzmessungen Aufschluss über Veränderungen der Brückenstruktur geben. Diese Veränderungen können auf strukturelle Probleme der Brücke hinweisen. Darüber hinaus können die Ergebnisse der Referenzmessung zur Anreicherung eines FEM-Modells verwendet werden.

Akustische Signatur

Bei der Bestimmung der akustischen Signatur von ÜKOs eines Brückenbauwerks werden Mikrofone eingesetzt, um das spezifische Profil aus Schallwellen und Schwingungen zu ermitteln, indem die Brückenstruktur mit ihrer Umgebung sowie der auf sie wirkenden Belastung in Schwingungen versetzt wird. Dadurch können akustische Signatur an ÜKOs ermittelt werden. In diesem Fall, einer Einfeldbrücke, sind die ÜKOs die Lager, an denen mit Mikrofonen die akustische Signatur erfasst werden kann. Durch die Analyse der akustischen Signatur können Veränderungen im Schwingungsverhalten der Bauteile festgestellt werden, die auf strukturelle Veränderungen hindeuten können. Kontinuierliches Monitoring mit akustischen Emissionssensoren ermöglicht die kontinuierliche Überwachung des Bauwerks, um frühzeitig akustische Anomalien zu erkennen, die auf Schäden hindeuten könnten.

4.2.2 Diagnostik

Druckfestigkeit

Beim Druckversuch wird eine Materialprobe, meist aus Beton, in eine spezielle Prüfvorrichtung eingespannt und gleichmäßig unter Druck gesetzt, bis diese versagt. Dabei wird die maximale Druckfestigkeit des Materials ermittelt. Diese ist ein entscheidender Wert für die Beurteilung der strukturellen Integrität der Brücke. Die ermittelten Daten werden digital erfasst und in einem strukturierten Datensystem gespeichert. Dies ermöglicht eine langfristige Überwachung und den Vergleich mit zukünftigen Messungen, um Veränderungen in der Druckfestigkeit des Materials zu erkennen.

Der Druckversuch sollte in regelmäßigen Abständen während der Lebensdauer der Brücke durchgeführt werden, besonders nach größeren Belastungen oder baulichen Veränderungen. Zu Beginn wird die Druckfestigkeit an einem Probekörper in der Bauphase erfasst. Zunächst könnte eine jährliche Prüfung sinnvoll sein, später eventuell in mehrjährigen Intervallen, je nach den Ergebnissen und dem Zustand der Brücke.

Elastizitätsmodul

Das Verfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls (E-Modul) ist das Gleiche wie bei der Bestimmung der Druckfestigkeit, wobei ein Druckversuch durchgeführt wird. Der Elastizitätsmodul wird nach mehreren Belastungszyklen bestimmt, bei denen Spannung und Dehnung gemessen werden. Er gibt an, wie stark sich das Material unter Belastung verformt. Dies ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Steifigkeit und des Verformungsverhaltens der Brücke. Die Spannungs- und Dehnungsdaten werden digital erfasst und zusammen mit den berechneten E-Modulwerten in einem Datensystem gespeichert. Diese Daten sind für die Beurteilung der Tragfähigkeit im Laufe der Zeit von entscheidender Bedeutung.

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls sollte wie bei der Druckfestigkeit während der Bauphase erfolgen. Dazu sind Probekörper herzustellen und im Druckversuch zu untersuchen. Nach dem Bau der Brücke und während der Lebensdauer des Bauwerks können Kernbohrungen durchgeführt werden, um Referenzwerte zu erhalten. Weitere Messungen können nach signifikanten Belastungsereignissen oder im Rahmen von regelmäßigen Inspektionen, z. B. alle fünf bis zehn Jahre, sinnvoll sein, um mögliche Änderungen der Materialsteifigkeit zu erfassen.

Carbonatisierung

Beim Indikatortest wird eine Probe der Betonoberfläche mit einem pH-Indikator behandelt, der auf die Änderung des pH-Werts aufgrund der Carbonatisierung reagiert. pH-Sensoren können ebenfalls in den Beton eingebracht werden, um kontinuierlich den pH-Wert zu überwachen und so die Carbonatisierungstiefe zu messen. Erfasst wird die Tiefe der Carbonatisierung im Beton, die anzeigt, wie weit CO_2 in das Material eingedrungen ist und den pH-Wert gesenkt hat. Dies ist wichtig, da ein niedriger pH-Wert die Passivierungsschicht des Bewehrungsstahls zerstören kann, was wiederum zu Korrosion führt. Die Ergebnisse des Indikatortests werden dokumentiert, und die Daten der pH-Sensoren werden digital erfasst und gespeichert. Diese Daten ermöglichen eine langfristige Überwachung des Fortschritts der Carbonatisierung.

Die Überprüfung auf Carbonatisierung sollte nach etwa zehn Jahren erstmals erfolgen und danach alle fünf bis zehn Jahre, abhängig von den Umgebungsbedingungen und den bisherigen Ergebnissen. Frühzeitige Erkennung ist wichtig, um Korrosionsrisiken für den Bewehrungsstahl zu minimieren.

Chloridgehalt

Sensoren, die in den Beton eingebracht werden, können den Chloridgehalt kontinuierlich überwachen. Alternativ können Proben aus dem Beton entnommen und im Labor auf ihren Chloridgehalt analysiert werden. Beide Methoden bestimmen die Menge an Chloridionen, die in den Beton eingedrungen sind. Erfasst wird die Konzentration von Chloridionen im Beton. Hohe Chloridwerte können die Korrosion des Bewehrungsstahls beschleunigen, was die strukturelle Integrität der Brücke gefährdet. Die Sensordaten werden kontinuierlich erfasst und digital gespeichert, während die Ergebnisse von Labortests ebenfalls in einer Datenbank dokumentiert werden. Diese Daten helfen, die Fortschritte der Chloridpenetration und deren Auswirkungen zu verfolgen.

Die Überwachung des Chloridgehalts sollte in Küstennähe oder in Regionen mit hohem Einsatz von Streusalz in regelmäßigen Abständen (z. B. alle drei bis fünf Jahre) durchgeführt werden, um frühzeitig Maßnahmen gegen Korrosion einleiten zu können.

Feuchte

Der Feuchtegehalt von Baustoffen kann für erste Anhaltswerte durch die Messung des elektrischen Widerstandes im Beton bestimmt werden. Die elektrische Widerstandsmessung ist eine schnelle und nicht-invasive Methode zur Bestimmung des Feuchtegehalts. Für eine kontinuierliche Feuchteüberwachung werden Feuchtesensoren in das Bauwerk eingebaut, um bei Feuchteänderungen proaktive Maßnahmen zu ergreifen. Dies gilt beispielsweise für den Feuchtegehalt des Betons, der ein wichtiger Indikator für die Gefahr von Frostschäden und die Wahrscheinlichkeit von Bewehrungskorrosion ist. Die Messergebnisse werden digital erfasst und in einer Datenbank gespeichert, die es ermöglicht, den Feuchtigkeitsgehalt über die Zeit in einem föderierten System zu verfolgen und mögliche Trends zu erkennen.

Die Überwachung der Feuchtigkeit sollte nach dem Bau der Brücke kontinuierlich durch Sensoren erfolgen. Bei Anzeichen erhöhter Feuchtigkeit oder in Regionen mit starkem Frost sind frühzeitig Maßnahmen zu ergreifen, um Schäden rechtzeitig zu verhindern.

4.2.3 Bildgebende Verfahren und Erfassung der 3D-Bauwerksgeometrie

Mithilfe der bildgebenden Verfahren soll die Geometrie und die Bauwerksoberfläche im Referenzzustand aufgenommen werden. Die Ziele der bildbasierten Aufnahme leiten sich direkt daraus ab:

- die photogrammetrische Rekonstruktion der Geometrie des Referenzbauwerks auf Basis aufgenommener Bilddaten und
- die Aufnahme der Bauwerksoberfläche zur Dokumentation und Schadenserkennung.

Grundlage dieser Methodik sind die aufgenommenen Bilddaten des zu dokumentierenden Bauwerks. Diese sind unter Beachtung einer zu definierenden Zielstellung aufzunehmen. Prämisse dabei ist die Gewährleistung einer ausreichenden Qualität und Zuverlässigkeit der Zustandsbewertung (Aussagekraft).

Die erforderliche Objektauflösung ist maßgeblich für die Erkennbarkeit von Merkmalen im digitalen Bild verantwortlich und entsprechend der aufzulösenden Details der Bauwerksoberfläche (d. h. entsprechend der Zielstellung) zu definieren. In Abhängigkeit dieser Objektauflösung ergibt sich unter Berücksichtigung der verwendeten Aufnahmetechnik (Kamera, Objektiv) der erforderliche Aufnahmeabstand. Da nachfolgend die Aufnahmetechnik nicht festgelegt werden soll, können insofern keine Aufnahmedetails wie Abstände etc. festgelegt werden. Um Kompressionsverluste zu vermeiden und den größtmöglichen Grad der Bearbeitbarkeit zu erhalten sollen die Bilder im Rohdatenformat der Kamera aufgenommen werden.

Bildbasierte Aufnahme des Referenzbauwerks

Eine bildbasierte Aufnahme des Bauwerks durch eine Drohnenbefliegung kann nur teilweise erfolgen. Die Befliegung zur Aufnahme der Unterseite der Fahrbahnplatte sowie der Widerlagerwände ist voraussichtlich aufgrund der geringen lichten Höhe unter dem Bauwerk (< 2,5 m) nicht möglich. Dies ist durch erforderliche Mindestabstände der Drohne zum Bauwerk und zur Umgebung (Vegetation, Boden etc.) begründet, die am Bauwerk nicht eingehalten werden können. Erforderlich sind i. d. R. mindestens 2,5 m um die Drohne, d. h. mindestens 5 m lichter Abstand zwischen Bauwerk und Umgebung.

Der Lösungsansatz für das Referenzbauwerk ist daher mehrteilig. Mittels Drohnenbefliegung soll ein Globalmodell erstellt werden, das die Ansichtsflächen des Bauwerks enthält. Die Unterseite der Brücke sowie die Widerlagerwände sind darin nicht enthalten. Die Aufnahme derselben muss daher anschließend mithilfe eines Kameraarrays erfolgen.

1. Drohnenbefliegung zur Erstellung eines globalen 3D-Modells

Die Befliegung des Bauwerks zur Erstellung eines globalen 3D-Modells erfolgt unter Einsatz einer Drohne, die mit einer hochauflösenden Kamera ausgestattet ist. Die Aufnahme umfasst sowohl das Bauwerk selbst als auch einen zu definierenden Bereich um das Bauwerk. Dabei werden die Flügelwände des Widerlagers und die Brückenkappen erfasst, um eine vollständige Abbildung der Ansichtsflächen des Bauwerks zu gewährleisten.

Da die Drohne voraussichtlich nicht in der Lage ist, das gesamte Bauwerk aufgrund begrenzter Kapazität der Akkumulatoren in einem einzigen Flug zu erfassen, ist die Befliegung abschnittsweise durchzuführen, um die gesamte Fläche zu dokumentieren. Die Aufnahmen erfolgen dabei in definierten Bahnen, wobei zwischen den Flügen die Position der Drohne angepasst wird, um eine vollständige Abdeckung sicherzustellen. Die Überlappung der Bilder (siehe Abschnitt 3.4.1) zwischen den Flugabschnitten ist zu beachten, um sicherzustellen, dass nachfolgend ein hochgenaues 3D-Modell photogrammetrisch rekonstruiert werden kann.

Die Drohne sollte zudem mit einem Echtzeit-Kinematik-Modul (RTK) ausgestattet sein, um eine präzise Positionierung während der Aufnahmen zu gewährleisten. Dies ist insbesondere in Bereichen mit schwierigen Umgebungsbedingungen von Bedeutung, um eine konsistente Bildqualität zu gewährleisten und Abweichungen in der Georeferenzierung zu minimieren.

- Ziel: globales Modell des Bauwerks mit Umgebung,
- Aufnahme der Flügelwände des Widerlagers und der Brückenkappen (Ansichtsflächen des Bauwerks),
- geeignete Drohne und Aufnahmetechnik mit an die Umgebungsbedingungen angepassten Kameraeinstellungen,
- Aufnahmeabstand der Drohne ist entsprechend der verwendeten Kamerahardware und einer festzulegenden Objektauflösung (entsprechend der Zielstellung) zu bestimmen,
- Aufnahme im Rohdatenformat der verwendeten Kamera,
- Protokollierung der verwendeten Hardware und der Aufnahme (inklusive Parameter) und Umgebungsbedingungen (Datum/Uhrzeit, Temperatur etc.).

2. Aufnahme der Bauwerksunterseite zur Vervollständigung des 3D-Modells

Die Aufnahme kann beispielsweise mithilfe eines Kameraarrays mit einer zu bestimmenden Anzahl in Reihe positionierter Kameras, die auf einer Traverse installiert sind, erfolgen. In Bild 5 ist beispielhaft ein Kameraarray mit sieben Kameras dargestellt. Zusätzlich ist zu prüfen, ob für die Aufnahme der

verschatteten Unterseite eine zusätzliche Beleuchtung notwendig ist. Die Anordnung der Kameras erfolgt unter Berücksichtigung des Aufnahmeabstandes, der sich wiederum in Abhängigkeit der erforderlichen Objektauflösung und der notwendigen Bildüberlappung (siehe Abschnitt 3.4.1) ergibt.

Bild 5: Beispielhaftes Kameraarray: Sieben Kameras mit Ringlichtern an einer Traverse mit Abstandhaltern

In Abhängigkeit der Ausstattung der Traverse mit Kameras und damit der Breite der erfassbaren Unterseite ist diese ggf. „streifenweise“ aufzunehmen. Die notwendige Anzahl der Streifenaufnahmen ist von der Anzahl der in Reihe befindlichen Kameras abhängig. Dabei ist vor allem auch die erforderliche Bildüberlappung im Randbereich zum zuvor aufgenommenen Streifen zu beachten.

- Ziel: vollständige Aufnahme der Bauwerksunterseite zur Dokumentation des Referenzzustandes,
- geeignete Aufnahmetechnik mit an die Umgebungsbedingungen angepassten Kameraeinstellungen,
- Kameraabstand ist entsprechend der verwendeten Kamerahardware und einer festzulegenden Objektauflösung zu bestimmen,
- Aufnahme im Rohdatenformat der verwendeten Kamera,
- Protokollierung der verwendeten Hardware und der Aufnahme (inklusive Parameter) und Umgebungsbedingungen (Datum/Uhrzeit, Temperatur etc.) sowie Dokumentation der Aufnahme mit Kameraarray.

3. Aufnahme der Widerlagerwände zur Vervollständigung des 3D-Modells

Die Aufnahme der Widerlagerwände kann manuell erfolgen. Dabei ist die Ansichtsfläche mit einer handgetragenen Kamera unter Berücksichtigung der erforderlichen Bildüberlappung in Reihen und Spalten aufzunehmen. Dieses Vorgehen ist im Sinne der Vollständigkeit fehleranfällig. Insofern ist die Aufnahme mit einem vertikalen Kameraarray zu bevorzugen.

Die Aufnahme mittels Kameraarray kann analog zu 2. mit in Reihe positionierter Kameras, die an einem vertikal ausgerichteten Profil installiert sind, erfolgen. In Bild 6 ist beispielhaft ein Kameraarray mit sechs Kameras in zwei Reihen dargestellt. Es ist ebenfalls zu prüfen, ob für die Aufnahme, der ggf. verschatteten Wiederlagerwände eine Beleuchtung notwendig ist. Die Anordnung der Kameras erfolgt unter Berücksichtigung des Aufnahmeabstandes und der notwendigen Bildüberlappung (siehe Abschnitt 3.4.1).

- Ziel: vollständige Aufnahme der Wiederlagerwände zur Dokumentation der Referenzoberfläche,
- geeignete Aufnahmetechnik mit an die Umgebungsbedingungen angepassten Kameraeinstellungen,
- Kameraabstand ist entsprechend eingesetzten Kamerahardware und einer festzulegenden Objektauflösung zu bestimmen,
- Aufnahme im Rohdatenformat der verwendeten Kamera,

- Protokollierung der verwendeten Hardware und der Aufnahme (inklusive Parameter) und Umgebungsbedingungen (Datum/Uhrzeit, Temperatur etc.) sowie Dokumentation der Aufnahme mit Kameraarray.

Bild 6: Beispielhaftes Kameraarray in vertikaler Ausrichtung zur Aufnahme von Pfeileransichtsflächen

Georeferenzierung

Zur exakten Verortung des zu ermittelnden 3D-Modells und zur entsprechenden Skalierung des Modells ist eine Georeferenzierung durchzuführen. Das Einmessen des Bauwerks kann mit klassischen geodätischen Verfahren erfolgen. Die Verortung erfolgt dabei in einem globalen Koordinatensystem (KOS) bezüglich mindestens einem Festpunkt, bevorzugt vier Festpunkte (Bezug zu Landeskoordinaten). Dabei sind folgende Schritte notwendig:

- Anbringen von Passmarken am Bauwerk (feste Verbindung mit Bolzen oder Klebung, mind. 5 Passmarken),
- Einmessen der Passmarken mithilfe eines Tachymeters,
- Protokollierung der Passpunkte und Aufnahmerandbedingungen (Datum, Temperatur, Standpunkt Tachymeter etc.) und Anfertigung eines Aufnahmeprotokolls, idealerweise mit einer Skizze mit Aufnahmestandpunkt und Orientierung zum Bauwerk sowie Position der Passmarken,
- Angabe der Koordinaten der Passmarken im Koordinatensystem (Transformation ins globale KOS).

Wenn einzelne Bauteile referenziert werden sollen, müssen fünf Passmarken je Bauteil angebracht werden. In diesem Fall lassen sich Schäden am Einzelbauteil, die in einem neuen Teilbilddatensatz vorhanden sind, auf das vorhandene Bauteil projizieren, ohne die Brücke komplett neu aufnehmen zu müssen.

Aufbereitung der Bilddaten

Die erfassten Bilddaten sind in einer klaren Ordnerstruktur/-hierarchie digital zu speichern und für die weitere Prozessierungsschritte aufzubereiten. Die aufgenommenen Bilder im Rohdatenformat müssen entsprechend aufbereitet werden. Die Bearbeitung der Bilddaten ist entscheidend, um Belichtung und Detailgenauigkeit nachträglich zu optimieren, was insbesondere bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen bei der Aufnahme und komplexen Bauwerksstrukturen notwendig wird. So wird sichergestellt, dass alle relevanten Informationen für die präzise Modellierung zur Verfügung stehen.

Des Weiteren ist es zwingend notwendig radiale Verzeichnungen, die durch das Linsensystem des Objektivs verursacht werden, zu korrigieren. Eine sorgfältige Vorverarbeitung ermöglicht die Identifikation einer erhöhten Anzahl korrespondierender Punkte und damit eine bessere Schätzung der relativen

Orientierung (in 3D-Rekonstruktion). Die geometrische Korrektur erfolgt vollautomatisch und für die Wahl der Parameter der radiometrischen Korrektur sollte ein für den Datensatz repräsentatives Bild herangezogen werden. Alle weiteren Bilder können nach diesem Vorgang mit den festgelegten Parametern vollautomatisch verarbeitet werden. Ergebnis des Prozesses ist ein radiometrisch und geometrisch korrigiertes Bild.

Folgende Korrekturen sind nach Erforderlichkeit der enthaltenen Bildmängel durchzuführen, um die höchste Genauigkeit in der nachfolgenden 3D-Rekonstruktion abzusichern:

- Linsenkorrektur (radiometrische Korrektur),
- Weißabgleich,
- Kontrastverbesserung,
- ggf. Reduktion von Farbsäumen,
- ggf. Aufhellen dunkler Bereiche (z. B. Schatten) und Reduktion überstrahlten Bereichen (z. B. Spitzenlichter),
- ggf. Vignettierung,
- ggf. kantenerhaltende Rauschminderung.

Die individuelle Vorverarbeitung der Bilder erfolgt softwarebasiert. Verschiedene Anwendungen stehen am Markt zur Verfügung und sind basierend auf dem Rohformat der Bilddaten auszuwählen.

Unter Umständen kann es erforderlich sein, Bilder aus dem erzeugten Bilddatensatzes aufgrund von ungeeigneten Bildinhalten oder unzureichender Qualität vor der weiteren Prozessierung auszuschließen.

Zu dokumentieren sind:

- durchgeführte Bildkorrekturen,
- ggf. Ausschluss von Einzelbildern.

Erzeugung des 3D-Modells

Die Ermittlung des georeferenzierten 3D-Modells erfolgt unter Anwendung der photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion. Grundlage dafür ist der zuvor erzeugte Bilddatensatz, der durch Aufnahmen mit ausreichender Überlappung (benachbarter Bilder) erstellt wurde (siehe Abschnitt 3.4.1).

Auf Basis dieses Bilddatensatzes kommt der Structure-From-Motion-Ansatz [34] zum Einsatz. Ziel dabei ist es, die Struktur durch die exakte 3D-Verortung der Bildpunkte zu rekonstruieren. Die Geometrie kann unter Verwendung entsprechender Softwareimplementierungen und leistungsfähiger Rechner rekonstruiert werden. Folgende Schritte werden dabei durchlaufen:

- Erkennung von Bildmerkmalen (Feature- / homologe Punkte, wie Ecken und Kanten) im Datensatz überlappender Bilder,
- Bestimmung der Aufnahmeposition und -richtung (d. h. der Kameraorientierung) anhand der Merkmalspunkte über das Prinzip der Stereoskopie sowie Ermittlung einer dünnen Punktwolke und
- Verdichtung der dünnen Punktwolke anhand der Bildinhalte.

Das Ergebnis der photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion ist ein georeferenziertes, vermaschtes und texturiertes 3D-Oberflächenmodell, das auch Informationen zu den Kamerapositionen und -orientierungen enthält. Bei der Rekonstruktion sind entsprechende Vorgaben für die Texturermittlung zu treffen. Die Anzahl der Texturen hängt von der Größe und Komplexität des Bauwerks ab. Ein beispielhaftes 3D-Modell ist in Bild 7 dargestellt.

Im Vergleich dazu wird bei einer Aufnahme des Bauwerks mittels Laserscanner lediglich eine Punktwolke ermittelt. Deren Punktdichte ist dann von den Aufnahmeparametern abhängig. Ein texturiertes Oberflächenmodell wird unter Anwendung der scannenden Verfahren nicht erzeugt. Beim Laserscanning werden die Oberflächenpunkte (3D-Positionen) direkt gemessen. Farbinformationen können jedoch nur unter Verwendung zusätzlicher Hardware (Frontkamera) ermittelt werden.

Zu dokumentieren sind folgende Metadaten / Ergebnisse der Rekonstruktion:

- Ausgangsdatensatz (vorverarbeitete Bilder),
- Parameter der 3D-Rekonstruktion: Mindestanzahl der Featurepunkte je Bild,

- rekonstruiertes 3D-Modell inklusive Texturdateien,
- erreichte Genauigkeit bezüglich der eingemessenen Punkte (aus Software),
- erreichte Auflösung des Modells (Objektauflösung mm/px; aus Software),
- Bericht der 3D-Modellerstellung (Softwarereport).

Bild 7: Beispielhaftes 3D-Modell einer Brücke mit vergleichbaren Dimensionen im Vergleich zum Referenzbauwerk

Das 3D-Modell ist als Punktwolke oder texturiertes Oberflächenmodell vorzugsweise in einem Viewer bereitzustellen. Als Standardformat der Punktwolken dient das obj-Format. Alternativ kann das e57-Format verwendet werden.

Für Brückenneubauten wird angenommen, dass bereits in der Planung ein BIM-Modell erstellt wird. Das durch photogrammetrische Rekonstruktion erzeugte dreidimensionale Oberflächen-Modell wird mit dem vorhandenen BIM-Modell der Brücke aus der Planungs- und Bauphase verknüpft. Fundamentale Voraussetzung für die Integration des 3D-Modells und der darin enthaltenen Informationen im Referenzzustand in das BIM-Modell ist eine Georeferenzierung beider Modelle. Durch die Integration entsteht das As-Built-Modell des Brückenbauwerks, dass den Referenzzustand vor Verkehrsfreigabe definiert. Wenn kein BIM-Modell der Brücke vorhanden ist, wie beispielsweise bei Bestandsbrücken, dann liefert das unter Anwendung der Photogrammetrie ermittelte georeferenzierte 3D-Modell das As-Built-Modell.

Bildanalyse zur Schadensdetektion

Zur Dokumentation des Ausgangszustandes der Bauwerksoberfläche des Referenzbauwerks sollen initiale Schäden der Betonoberfläche identifiziert und digital dokumentiert werden. Die Identifikation kann manuell in den Bilddaten oder in einem geeigneten 3D-Viewer mit entsprechendem Funktionsumfang zur Schadensannotation auf dem 3D-Bauwerksmodell erfolgen. Da dieser Prozess sehr zeitaufwändig und fehleranfällig ist, ist eine automatische Schadenserkennung zu bevorzugen. Diese kann unter Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens beispielsweise mit künstlichen neuronalen Netzen erfolgen.

Für das Neuronale Netz sind geeignete Netzwerkarchitekturen zu wählen. Bei der Auswahl der Architektur ist zu berücksichtigen, dass Schäden nicht allein klassifiziert, sondern in den Bildern segmentiert werden sollen. Die Segmentierung von Schadensmerkmalen soll pixelgenau erfolgen, um quantitative Größen der Schäden ableiten zu können. Kritischster Schaden bei Betonoberflächen ist dabei der Schaden Riss, der u. a. durch eine Rissbreite charakterisiert wird. Weitere relevante Schäden für Betonoberflächen sind: Abplatzungen, Aussinterungen und Verfärbungen, korrodierte Stellen (von freiliegender Bewehrung) und Bewuchs / Vegetation (siehe Bild 8). Diese in Summe fünf Schadenskategorien sind von einem Schadenserkenner mindestens zu erkennen. Die Relevanz derselben für die Bauwerksprüfung ist in [92] dargestellt.

Das Neuronale Netz ist vorab mit einem umfangreichen Datensatz an repräsentativen Bildern manuell annotierter Schadensbilder zu trainieren und validieren. Die Qualität der Schadenserkennung ist anzugeben. Eine Evaluierung der Erkennungsqualität kann beispielsweise auf Basis des Datensatzes und der implementierten Software aus dem DACH-Projekt ev.AI.luate [92] erfolgen. Die erforderlichen Erkennungsraten sind vom AG festzulegen.

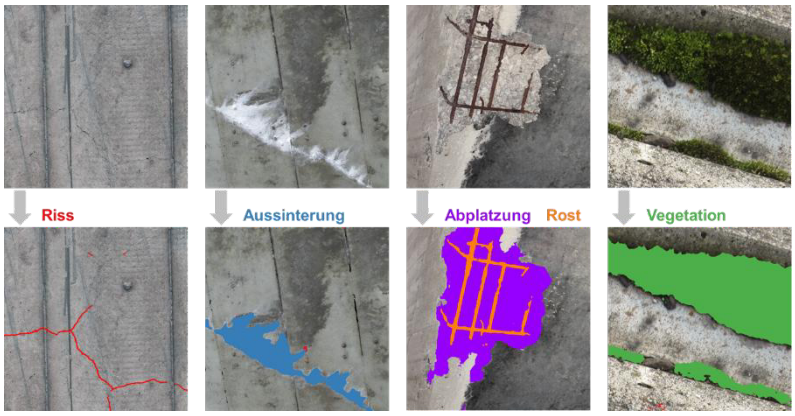

Bild 8: Beispielhafte Darstellung von Betonschäden: Rohdatenbild (oben) und Bild mit Überlagerung erkannter Schäden (unten) für die Schäden Riss, Aussinterungen, Abplatzungen und Rost, Vegetation (Bewuchs) (v.l.n.r.) [92]

Die ermittelten Schäden der Bauwerksoberfläche können optional auch in Orthobildansichten der Einzelkomponenten verortet werden. Diese Orthobilder bieten einen sehr guten Überblick über die Verteilung der Schäden am Bauwerk. Beispielsweise können Ansichtsflächen von Pfeiler oder des Überbaus dargestellt werden. Im Fall von nichtplanaren Oberflächen, z. B. der Bogenunterseite, lassen sich diese Orthobildansichten durch Abwicklung erzeugen.

Zu dokumentieren sind folgende Metadaten und Ergebnisse:

- Bilddatensatz,
- verwendeter Algorithmus zur Schadensdetektion (Name, Version, Netzarchitektur etc.) mit Details zum Trainings- / Referenzdatensatz (Ground Truth) sowie die berücksichtigten Schadenskategorien,
- erreichte Erkennungsqualität je Schadenskategorie in Validierung,
- erkannte Schäden mit Zuordnung eine Schadenskategorie und zu Einzelbildern sowie Informationen bezüglich Lage und Größe des Schadens bspw. in einer Schadensdatei (.sdiff),
- Orthoschadensbilder (falls erzeugt).

Ableitung von Daten für die Zustandsbewertung im Lebenszyklus

Das georeferenzierte 3D-Oberflächenmodell stellt die ermittelte As-Built-Geometrie des Bauwerkes dar. Durch geeignete Prozessierung der Daten, beispielsweise auf Querschnittsebene, kann ein Abgleich mit der As-Planned-Geometrie erzeugt werden. Dabei können geometrische Abmessungen, z. B. des Überbaus und der Pfeiler (falls vorhanden), sowie relevante geometrische Kenngrößen wie Schiefstellungen oder Vorkrümmungen ermittelt werden. Durch den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Geometrie werden geometrische Abweichungen zum Planungsmodell identifiziert und nachfolgend modelliert. Durch ein Geometrie-Update der bestehenden BIM- und Berechnungsmodelle werden geometrische Unsicherheiten zur gebauten Form minimiert und somit der Nutzen der Modelle im Lebenszyklus maximiert.

Das As-Built-Modell kann als Grundlage für ein hochgenaues Verformungsmonitoring (siehe Anwendungsszenario 1) verwendet werden. Durch diese Referenz auf den Ausgangszustand der Verformung kann bei wiederholter Aufnahme und Rekonstruktion des Bauwerks die zeitliche Entwicklung der Verformung überwacht werden. So kann beispielsweise das Eintreten und das Fortschreiten einer Bauteilschiefstellung über den Lebenszyklus der Brücke beobachtet werden.

Da die Bauwerksaufnahme vor Verkehrsfreigabe der Brücke erfolgt, sind die vorhandenen Belastungen der Brücke sehr gut abschätzbar. Die initiale Verformungsfigur wird bei der Nullmessung i. d. R. für einen Beanspruchungszustand aus Eigengewicht der Tragkonstruktion und den Ausbaulasten ermittelt. Insofern ist die initiale Verformungsfigur zur Kalibrierung numerischer Berechnungsmodelle heranzuziehen. Der Bauablauf und die Belastungshistorie sind dabei insbesondere zu berücksichtigen. Durch die Kalibrierung werden Bauteilsteifigkeiten (ggf. Verläufe) identifiziert, welche wiederum die wesentliche Größe für

zukünftige Standsicherheitsbetrachtungen sind und zur Identifikation und Lokalisierung von Schädigungen genutzt werden können. Durch wiederholte Anpassungen des Modells im Sinne eines Model Updatings im Lebenszyklus der Brücke können punktuell Steifigkeitsdegradationen ermittelt werden, die ggf. auf eine Schädigung der Tragkomponenten (z. B. Überbau) zurückgeführt werden können. Vor allem bei der Kombination mit sensorbasiert ermittelten physikalischen Parametern wie Eigenfrequenzen, kann die Qualität der Modellkalibrierung und damit der Parameteridentifikation weiter gesteigert werden.

Das bildbasiert erzeugte 3D-Modell liefert darüber hinaus die bildhafte Abbildung der Bauwerksoberfläche einschließlich der erkannten Schäden zum Zeitpunkt der Nullaufnahme. Bei wiederholten Aufnahmen der Brücke oder von Einzelkomponenten im Lebenszyklus kann das Auftreten neuer Schäden identifiziert bzw. das Fortschreiten vorhandener Schäden beobachtet werden (Anwendungsszenario 2), d. h. der Schadensfortschritt ist detektierbar und quantifizierbar. Der Schadensfortschritt ist durch die eindeutige Verortbarkeit am Bauwerk geometrisch wie auch zeitlich verfolgbar. Alle Schäden sind digital zu erfassen und werden in einer Datenbank mit deren Eigenschaften (Typ, Position, Größe) gespeichert. Für jeden Einzelschaden kann entsprechend RI-EBW-PRÜF eine Bewertung vorgenommen werden. Unter Berücksichtigung der Komponenten und der jeweiligen Anzahl der Schäden lässt sich ggf. unter Einbeziehung weiterer Informationen eine Zustandsbewertung durchführen und eine Zustandsnote (auf Basis der visuell erfassten und erkannten Schäden) ermitteln. Auf diese Weise werden Informationen zur Zustandsbewertung in Form einer Zuordnung von Schadensklassen und Informationen der zeitlichen Entwicklung, welche wiederum Eingang in Prognosemodelle im Lebenszyklusmanagement finden können, erschlossen.

Der überwiegende Anteil der Informationen kann in einem BIM-Modell abgelegt oder mittels Linked-Data-Ansätzen mit diesem verknüpft und geometrisch referenziert werden. Aus dem As-Built-Modell, das Teil des Geburtszertifikats ist, wird im Laufe des Lebenszyklus durch Anreicherung mit zusätzlichen Informationen aus der Bauwerksprüfung und -erhaltung das As-Maintained-Modell. Der Digitale Zwilling verortet die gesammelten Informationen im 3D-Modell und macht diese dauerhaft für eine Vielzahl von Anwendern verfügbar. Dies umfasst u. a. die Sensorpositionen und verknüpften Messdaten, die detektierten Schäden je Aufnahmekampagne inklusive deren zeitlicher Entwicklung sowie die Bewertung des Zustandes.

4.3 Datenmanagement

Das Datenmanagement ist ein zentraler Bestandteil der Überwachung und Analyse der Brückenstruktur. Für das Referenzbauwerk – die Brücke über die Welse – wird ein umfassendes, modular aufgebautes Datensystem eingesetzt, das eine langfristige Speicherung, Verwaltung und Analyse der gesammelten Messdaten ermöglicht.

4.3.1 Daten des sensorbasierten Monitorings

Die Daten werden kontinuierlich im Zeitraum von maximal einem Jahr erfasst und mit Zeitstempeln versehen, sodass sie sowohl in Echtzeit überwacht als auch für historische Analysen herangezogen werden können.

Ein modular aufgebautes Datensystem ist eine flexible und strukturierte Art der Datenverwaltung, bei der die Gesamtfunktionalität in kleinere, unabhängige oder halb-unabhängige Module unterteilt wird. Jedes dieser Module ist auf eine spezifische Aufgabe oder Funktion spezialisiert und kann sowohl eigenständig arbeiten als auch mit anderen Modulen interagieren. Diese Architektur bietet entscheidende Vorteile, insbesondere in Bezug auf Flexibilität und Anpassbarkeit. Da jedes Modul eigenständig ist, können neue Module problemlos hinzugefügt oder bestehende Module angepasst werden, ohne das gesamte System verändern zu müssen. Dies ermöglicht eine einfache Erweiterung des Systems, wenn neue Anforderungen oder Technologien hinzukommen.

Jedes Modul kann eigene Daten speichern und verwalten. In einem Brückenüberwachungssystem könnten beispielsweise separate Module für die Erfassung von Temperaturdaten, Materialdehnungen oder strukturellen Verformungen zuständig sein, die jeweils ihre spezifischen Daten sammeln und speichern.

Dies ermöglicht auch eine spezialisierte und fokussierte Analyse innerhalb der jeweiligen Module. Die Ergebnisse dieser Analysen können anschließend zusammengeführt werden, um ein umfassendes und detailliertes Bild des gesamten Systems zu erhalten.

Die Brücke wird durch eine Vielzahl von Sensoren und Messverfahren überwacht, die unter anderem Materialdehnung und -spannung, Verformungen, Temperaturänderungen sowie Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul erfassen. Die verteilte faseroptische Sensorik (DFOS) bietet eine kontinuierliche Überwachung entlang der gesamten Brückenstruktur, während Dehnungsmessstreifen (DMS) gezielte Messungen an kritischen Punkten ermöglichen. Wegsensoren und Laserscanner überwachen die Verformungen, während Beschleunigungsaufnehmer die Schwingungen und Vibrationen registrieren. Temperatursensoren und Wegsensoren erfassen die thermische Ausdehnung des Materials, und der Wärmeausdehnungskoeffizient wird durch die Kombination der Temperatur- und Verschiebungsdaten bestimmt. Die strukturelle Integrität des Betons wird durch Druckversuche und die Ermittlung des Elastizitätsmoduls überwacht. Zusätzlich werden die Carbonatisierung, der Chloridgehalt und die Feuchtigkeit im Beton überprüft, um Korrosionsrisiken und Frostschäden frühzeitig zu erkennen.

Alle erfassten Daten werden in einem modularen Datensystem gespeichert, das eine klare zeitliche Zuordnung der Messungen ermöglicht. Jede Messung wird mit einem präzisen Zeitstempel versehen, sodass eine langfristige Speicherung und die Analyse über den gesamten Lebenszyklus der Brücke hinweg möglich sind. Die Daten werden in spezifische Kanäle unterteilt, um eine übersichtliche und gezielte Analyse zu ermöglichen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Langzeitspeicherung, um historische Daten für zukünftige Vergleichsmessungen verfügbar zu halten. Regelmäßige Backups und Redundanzmaßnahmen sorgen dafür, dass die Daten sicher gespeichert und jederzeit zugänglich sind.

Die Verarbeitung und Analyse der Daten erfolgen teils automatisiert. Abweichungen von Normwerten werden durch automatisierte Prozesse identifiziert, sodass potenzielle Probleme frühzeitig erkannt werden können. Langfristige Trendanalysen helfen, Veränderungen in der Materialbeschaffenheit und der Lastverteilung der Brücke zu identifizieren. Bei Überschreitung bestimmter Schwellenwerte werden Alarme ausgelöst, um das Wartungspersonal zu benachrichtigen. Kalibrierungen der Messstellen und Sensoren werden regelmäßig durchgeführt, um die Genauigkeit der Daten zu gewährleisten, und die erfassten Daten werden durch Vergleich mit Materialkennwerten validiert.

Ingenieure und zuständige Behörden haben über Webinterfaces oder spezialisierte Softwarelösungen Zugriff auf die Daten. Die gemessenen Werte werden in übersichtlichen Graphen und Tabellen dargestellt, die eine schnelle und intuitive Interpretation ermöglichen. Kritische Parameter werden hervorgehoben, und historische Verläufe lassen sich miteinander vergleichen, um langfristige Trends zu erkennen. Regelmäßige Berichte fassen die Ergebnisse zusammen und bewerten die strukturelle Integrität der Brücke, wobei diese Berichte als Grundlage für Entscheidungen über notwendige Wartungsmaßnahmen dienen. Die erfassten Daten fließen direkt in die Erstellung eines Wartungsplans ein, der die Inspektionsintervalle und erforderliche Maßnahmen zur Erhaltung der Brücke definiert.

4.3.2 Daten des bildbasierten Monitorings

Bildbasierte Bauwerksaufnahmen finden an diskreten Zeitpunkten statt. Dabei generierte Bilddaten werden in einem strukturierten Dateisystem mit Verknüpfung zum entsprechenden Aufnahmedatum abgelegt. Neben den Rohdaten werden auch die aufbereiteten Fotos gespeichert, die Grundlage der photogrammetrischen Rekonstruktion sind. Das ermittelte texturierte Oberflächenmodell wird ebenfalls mit Referenz zur Aufnahme des Bauwerks und Metadaten der Rekonstruktion gespeichert. Die aufgenommenen Bilddaten sind mit Bezug zum 3D-Modell des Bauwerkes geometrisch zu referenzieren. Nur so ist ein genauer Bezug von in Bildern erkennbaren Merkmalen zur Bauwerksgeometrie herstellbar. Konkret wird im Rahmen der photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion die Kameraorientierung für jedes Bild hochgenau ermittelt, so dass jeder Punkt jedes Bildes einem 3D-Punkt auf der Oberfläche des 3D-Modells zugeordnet werden kann. Diese Verknüpfungsinformation ist zu speichern, damit Bildinformationen, wie beispielsweise erkannte Schäden, mit dem als digitaler Zwilling fungierenden Bauwerksmodell verknüpft sind. Neben den Verknüpfungen werden alle Dateien in einer Ordnerstruktur abgelegt.

Auf Basis der einzelnen Bilddaten können Schäden der aufgenommenen Bauwerksoberfläche ermittelt werden. Resultat einer automatischen Schadenserkennung sind Schadensinformationen der Einzelbilder, die in einer separaten Datei zur weiteren Verwendung abgespeichert werden. Diese Informationen lassen sich dann am Einzelbild oder am 3D-Modell visualisieren. Für das Einzelbild können entsprechende Schadens-Overlays ermittelt werden, die mit dem Ausgangsbild überlagert werden und Schäden direkt auf dem Bild verorten. Aufgrund des Bezugs der Schäden zu einem Einzelbild und der bekannten Verortung des Bildes am 3D-Modell können die auf Basis der Einzelbilder ermittelten Schäden exakt am Bauwerk verortet und im dreidimensionalen Bauwerksmodell visualisiert werden. Die verschiedenen Schadenskategorien sind neben der Lage am Bauwerk durch unterschiedliche Parameter charakterisiert, beispielsweise eine Betonabplatzung durch eine Fläche oder ein Riss durch eine Rissbreite, eine Länge und ggf. Orientierung. Diese Metadaten werden ggf. gemeinsam mit aggregierten Zustandsinformationen in Form einer Datenbank abgespeichert. Gleiches gilt optional für Kommentare, Markierungen und händische Annotationen (Schäden), die ein Bauwerksprüfer am digitalen Modell erstellt hat.

Die Verknüpfung und der digitale Zugriff auf die vielfältigen Daten wird durch Datenbankmodelle ermöglicht, die entweder lokal oder auf Serverinfrastrukturen vorgehalten werden. Für Cloud-Infrastrukturen entwickelte Systeme wie INFRA//TWIN [96] eignen sich besonders für die skalierbare und sichere Speicherung der Daten in einem Backend und die hochwertige Bereitstellung mittels Visualisierungen und Interaktionswerkzeugen in einem Web-Frontend.

4.4 Zeitliche Zusammenhänge

Der zeitliche Ablauf der in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen Messungen zur Bestimmung der physikalischen, chemischen und geometrischen Eigenschaften vor und nach der Inbetriebnahme ist in Bild 9 dargestellt. Diese Übersicht ordnet die beschriebenen Maßnahmen in ihren zeitlichen Kontext ein. Der Zeitstrahl gibt nicht die Dauer der Messungen an, sondern den Zeitpunkt, zu dem bestimmte Sensoren installiert oder Messungen durchgeführt werden. Es können sich im Zuge der Umsetzung Abweichungen ergeben, die individuell betrachtet werden müssen.

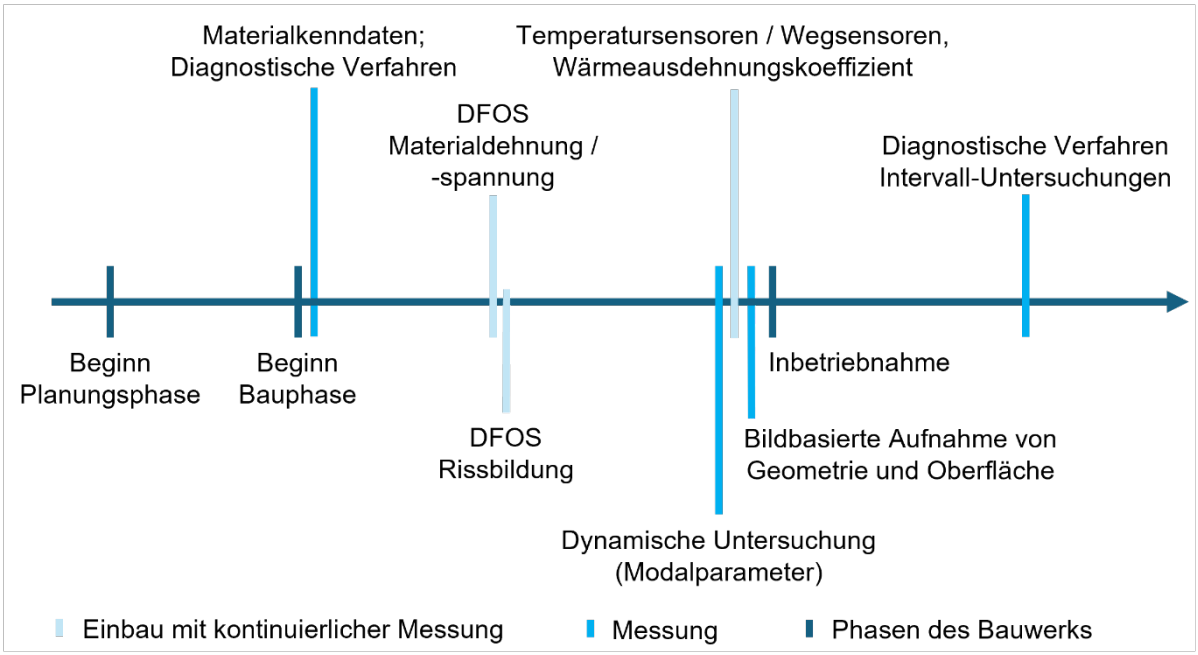

Bild 9: Zeitpunkte der zu installierenden Sensoren und durchzuführenden Messungen (Zeitachse nicht maßstäblich)

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt wurde ein Konzept für das „Geburtszertifikat“ von Brückenbauwerken entwickelt, das Referenzinformationen zu einem bestimmten Zeitpunkt, günstigstenfalls direkt nach dem Neubau, dokumentiert. Dieses soll der Bedeutung der Charakterisierung eines Referenzzustandes vor Inbetriebnahme des Bauwerkes Rechnung tragen und als Grundlage für Vergleichsbetrachtungen im Rahmen der Erfassung und Bewertung des Bauwerkszustandes im Zuge der Erhaltung und des Bauwerksmanagements dienen. Durch eine möglichst breite und aussagekräftige Erfassung des initialen Zustandes nach Herstellung des Bauwerkes sollen zukünftige Veränderungen mit vielfältigen Prüf- und Messmethoden frühzeitig durch Bezug zum Initialzustand detektiert und in ihrer Entwicklung dokumentiert und bewertet werden. Damit kann das Geburtszertifikat auch den Ausgangspunkt für die Umsetzung prädiktiver Erhaltungsmethoden darstellen.

Die Potenziale dieser Herangehensweise lassen sich vor allem dann realisieren, wenn die erhobenen Daten digital ausgewertet und gespeichert werden und damit eine möglichst hochwertige Extraktion zustandsbezogener Informationen ermöglicht wird. Dies bedingt vor allem eine digitale Referenzierung der Daten zur Bauwerksgeometrie und eine automatisierbare Auswertung. Daher sollte die Datenspeicherung auf Basis des Konzeptes eines Digitalen Zwillings erfolgen, also die Verknüpfung mit einem digitalen Bauwerksmodell.

Das Geburtszertifikat wird in einer standardisierten, leicht zugänglichen Form als kompakte und übersichtliche Zusammenfassung der wichtigsten Informationen in Form eines PDF-Dokumentes erstellt. Zur Gewährleistung einer langfristigen und flexiblen Nutzung und digitalen Verarbeitung der gewonnenen Daten enthält das PDF-Dokument Verweise auf alle Datensätze und Modelle, die zusätzlich bereitgestellt werden. Diese Verlinkungen beinhalten detaillierte Mess- und Bilddaten, abgeleitete oder aggregierte Parameter, Modelle und andere relevante Informationen, die zur Beurteilung des Zustandes notwendig sind. Diese Informationen werden in entsprechenden Datenbanken und strukturierten Dateisystemen gespeichert. BIM-Modelle und Implementierungen Digitaler Zwillinge können auf diese Daten zugreifen und in ihrer Ausgangsform im entsprechenden Bauwerkskontext anzeigen oder weitere Aggregierungen zur Darstellung des Zustandes durchführen.

In die Konzeptentwicklung ist der aktuelle Stand der Technik sowie Erfahrungen aus der Anwendung von Bauwerksmonitoring, zerstörungsfreier Prüfung, bildbasierter Bauwerkserfassung und Vermessung sowie der digitalen Bauwerksmodellierung eingeflossen. Die wesentlichen Bauwerkseigenschaften und -parameter wurden beschrieben und die zur Verfügung stehenden Erfassungsmethoden dargestellt. Dies betrifft neben mechanisch-konstruktiven Eigenschaften wie auch materialbezogene chemische Parameter sowie geometrische Eigenschaften wie die hochauflösende „As-Built“ 3D-Geometrie. Das Konzept ist offen gestaltet und kann auch auf neue zukünftig erfassbare oder für bestimmte Bauwerke als relevant angesehene Parameter angewendet werden. Der Speicherung der Daten im Bezug zu einem Bauwerksmodell und der Verfügbarkeit nach FAIR-Kriterien sollte besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die Umsetzung der Methodik an einem Referenzbauwerk wurde ebenfalls konzipiert und beschrieben.

Wenn das Konzept, z. B. im Zuge der Überarbeitung der DIN 1076, zukünftig durch Regelwerke in die Praxis eingeführt werden soll, könnte die Bezeichnung nochmals überdacht werden. Aus Sicht der Autoren ist wesentlich, dass an der Bauwerkserhaltung Beteiligte das Geburtszertifikat als „digital“ und „daten“-basiert angelegte „Dokumentation“ des „Referenz“- bzw. „Initial“-Zustandes des Bauwerkes ansehen, das zum Zeitpunkt „Null“ angelegt wird und den „Ursprung“ für einen „lebenszyklus“-begleitenden Ansatz in der Bauwerkserhaltung bildet. Insofern könnten auch diese herausgestellten Begriffe in die Bezeichnung einfließen.

Für eine weitere Konkretisierung und Detaillierung des hier beschriebenen Konzeptes sowie die Planungen einer konkreten Einführung in die Prozesse der Bauwerksprüfung können im Weiteren die nachfolgenden Arbeiten angestrebt werden.

Eine generalisierende Systematisierung der Struktur eines Geburtszertifikates kann erfolgen, indem Bauwerke hinsichtlich ihrer Eigenschaften wie z. B. Tragsystem, Bauweise, Dimension,

Standortbedingungen und Erhaltungsstrategien kategorisiert werden, und auf dieser Basis die in Frage kommenden bzw. empfohlenen Komponenten und spezifisch zu erfassenden Parameter zusammengestellt werden. Auch eine Priorisierung, die eine kostenbezogene Optimierung ermöglicht, kann Teil dieser Systematik zur Festlegung der Inhalte des jeweiligen bauwerksspezifischen Geburtszertifikates sein.

Des Weiteren könnte eine genauere Untersuchung von Aufwand und Nutzen der Erfassung einzelner Parameter umgesetzt werden, um Entscheidungsprozesse bezüglich des Inhalts und Umfangs des Geburtszertifikates zu unterstützen. Hierbei kann z. B. auch eine Verknüpfung mit Konzepten der aus bestimmten Daten bzw. Informationen ableitbaren KPIs sinnvoll sein.

Hinsichtlich der Speicherung und Referenzierung der anfallenden Daten ist die sinnvolle Verknüpfung im Digitalen Zwilling zu konzipieren und zu spezifizieren sowie prototypisch umzusetzen. Aktuelle Methoden wie „Linked Data“ im Kontext von BIM können hier aufgegriffen werden. Auch die Visualisierung und einfache Bereitstellung der Daten z. B. in digitalen Plattformen sollte näher untersucht und z. B. in Form von Mindestanforderungen festgelegt werden.

Hinsichtlich der Praxiseinführung sollten die aktuellen Entwicklungen der DIN 1076 und begleitender Regelwerke wie RI-EBW-PRÜF, OSA-Leitfaden und Prüfhandbücher berücksichtigt werden. Insbesondere auf die Regelungen zum Referenzzustand sowie die Anforderungen an den Inhalt von Bauwerksbuch und Bauwerksakte ist Bezug zu nehmen. Darauf basierend kann die Ausgestaltung des Geburtszertifikates hinsichtlich seiner Inhalte, seiner Form, seiner Speicherung und seiner Nutzung und Fortschreibung weiter detailliert werden.

Literatur

[1] Hindersmann, I.; Bednorz, J.; Nieborowski, S.; Windmann, S. (2021) BIM - auf dem Weg zum Digitalen Zwilling. In: Straße + Autobahn (11), S. 917–924.

[2] Nieborowski, S.; Windmann, S.; Bednorz, J.; Hindersmann, I.; Zinke, T. (2023) Digitaler Zwilling Brücke im Betrieb. Bautechnik 100, H. 2, S. 86–93. https://doi.org/10.1002/bate.202200089

[3] Anlage A zum Angebot zu FE 15.0707/2022/LRB; Ersteller: MKP GmbH & BAM, 15.03.2023

[4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2021) Masterplan BIM Bundesfernstraßen, Stand: September 2021 https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bim-rd-masterplan-bundesfernstrassen.pdf?__blob=publicationFile [25.11.2024]

[5] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hrsg.) (2023) Digitaler Zwilling von Brücken - Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen (kurz vor Veröffentlichung), Berlin: Eigenverlag, 2023.

[6] Grabe, M.; Wenner, M.; Herbrand, M. (2020) smartBridge Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings. Bautechnik 97, H. 2, S. 118–125. https://doi.org/10.1002/bate.201900108

[7] Herbrand, M.; Lazoglu, A.; Marx, S.; Ullerich, C. (2021) smartBRIDGE Hamburg – Aggregation von Zustandsindikatoren aus Inspektions- und Monitoringdaten. In: Krieger, J. (Hrsg.): Tagungsband des 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Technische Akademie Esslingen, Juni 2021, Ostfildern, S. 247–255.

[8] Wedel, F.; Opitz, D.; Tiedemann, C.; Meyer-Westphal, M. (2021) smartBRIDGE Hamburg – Die Rolle von BIM im Konzept des digitalen Zwillings. In: Krieger, J. (Hrsg.): Tagungsband des 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Technische Akademie Esslingen, Juni 2021, Ostfildern S. 257– 268.

[9] Wedel, F.; Opitz, D.; Tiedemann, C.; Meyer-Westphal, M. (2022) Das 3-D-Modell als Grundlage des digitalen Zwillings. Bautechnik 99, H. 2, S. 104–113. https://doi.org/10.1002/bate.202100092

[10] Lazoglu, A.; Naraniecki H.; Zaidman, I.; Marx, S. (2023) A monitoring based digital twin for the Filstal bridges, IALCCE - 8th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, July 2023, S. 205-212. https://doi.org/10.1201/9781003323020

[11] Naraniecki, H.; Lazoglu, A. (2023) Concept for a digital twin of railway bridges on the example of the new Filstal bridges, 2nd Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures - EUROSTRUCT, September 2023.

[12] Lazoglu, A.; Bartsch, A.; Naraniecki, H.; Marx, S. (2023) Ein Digitaler Zwilling für die Filstalbrücken entsteht - Erweiterung der Konzepte aus smartBRIDGE Hamburg, Tagungsband des 2. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Technische Akademie Esslingen, Juni 2023, S. 225–235.

[13] Lazoglu, A. (2023) Deformationsmonitoring im Digitalen Zwilling der Filstalbrücken, VDEI Symposium Geodätisches und Geotechnisches Monitoring, September 2023, ITZ Fulda

[14] Wedel, F. (2023) Der Digitale Zwilling für den Betrieb von Eisenbahnbrücken - Ein Pilotprojekt an den Filstalbrücken. VDEI 19. Fachtagung Konstruktiver Ingenieurbau, 28.09.2023, Berlin.

[15] Morgenthal, G.; Hallermann, N.; Rau, S.; Schellenberg, K.; Martín-Sanz, H.; Schubert, M.; Kübler, O. (2023) Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken. Schlussbericht zu FE 69.0006, BASt-Bericht B 190, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlags GmbH, Bergisch Gladbach. https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2780/file/B190+Gesamtversion+BF.pdf [15.11.2024]

[16] Wedel, F.; Pitters, S.; Hille, F.; Herrmann, R.; Schneider, R. (2024) Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 15.0707/2022/LRB. BASt-Bericht B 210, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlags GmbH, Bergisch Gladbach. https://doi.org/10.60850/bericht-b210

[17] Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg): DIN 1076:1999-11; Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung. https://dx.doi.org/10.31030/8499929

[18] Schacht, G.; Wedel, F.; Marx, S. (2017) Bridge Load Testing in Germany. Conference Paper in ACI Fall Convention. American Concrete Institute, October 2017; Anaheim, CA., USA.

[19] Schnellenbach-Held, M.; Karczewski, B.; Kühn, O. (2014) Intelligente Brücke - Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke. Schlussbericht zum Forschungsprojekt 15.0509/2011/GRB, BASt-Bericht B 105, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach. https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/736 [26.11.2024]

[20] Schnellenbach-Held, M.; Peeters, M.; Miedzinski, G. (2015) Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton, Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 15.0510/2011/DRB, BASt-Bericht B 110, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlags GmbH, Bergisch Gladbach. https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/1131 [25.11.2024]

[21] Novák, B.; Stein, F.; Reinhard, J.; Dudonu, A. (2021) Einsatz kontinuierlicher faseroptischer Sensoren zum Monitoring von Bestandsbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 10, S. 718–726. https://doi.org/10.1002/best.202100070

[22] Wosniok, A.; Jansen, R.; Chen L.; Chruscicki, S. (2021) Ortsaufgelöste Zustandsüberwachung von Brückenbauwerken mittels faseroptischer Sensoren. In: Tagungsbroschüre der DGZfP-Jahrestagung 2021, S. 112. https://jahrestagung.dgzfp.de/portals/jt2021/bb176/inhalt/p73.pdf [26.11.2024]

[23] Zdanowicz, K.; Bednarski, Ł.; Howiacki, T.; Sieńko, R. (2022) Verteilte Dehnungsmessungen von Spannbetonbauteilen mit faseroptischen Sensoren. Beton- und Stahlbetonbau 117, H. 7, S. 539–547. https://doi.org/10.1002/best.202200035

[24] Das, S.; Saha, P.; Patro, S.K. (2016) Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: A review. J Civil Struct Health Monit 6, S. 477–507. https://doi.org/10.1007/s13349-016-0168-5

[25] Assing, M.; Burkhardt, R.; Hahn, O.; Hoffmann-Berling, F.; Kappes, K.; Karrasch, A.; Krontal, L.; Marx, S.; Müller, C.; Strube, K.; Weitendorf, N. (2020) Arbeitshilfe zum Umgang mit historischen Eisenbahnbrücken, Herausgebende: DB Netz AG, Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, MKP GmbH, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Januar 2020. https://marxkrontal.com/files/redaktion/leistung/Veroeffentlichungen/20200131_Arbeitshilfe_zum_Umgang_mit_Eisenbahnbr%C3%BCcken.pdf [26.11.2024]

[26] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hrsg.) (2020) Leitfaden zur Prüfung von Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken (Abgrenzung Ersatzneubau), LPI-ING, Stand 2020/10. https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Sonstiges/LPI-ING.pdf;jsessionid=C9DA93505DEBD9A1EF460F9EAC1D8A00.live11313?__blob=publicationFile&v=2 [26.11.2024]

[27] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (2014) DBV-Merkblatt - Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. Berlin, Fassung Januar 2014.

[28] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.) (2022) DGZfP-Merkblatt B 09 Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken, Stand: September 2022.

[29] Morgenthal, G.; Hallermann, N.; Kersten, J.; Taraben, J.; Debus, P.; Helmrich, M.; Rodehorst, V. (2019) Framework for Automated UAS-based Structural Condition Assessment of Bridges. Automation in Construction 97, S. 77–95. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.006

[30] Morgenthal, G. (2023) Bildbasierte Bauwerksprüfung und digitale Zustandsdokumentation. In: Mertens, M. (Hrsg.): Handbuch Bauwerksprüfung – Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit. Rudolf Müller Verlag, 2. akt. und erw. Auflage. S. 316 – 340.

[31] Friedrich, H. (2014) Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen. Bericht zum Forschungsprojekt F1100.221200. BASt-Bericht B 98. Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach. https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/734/file/B98b.pdf [20.11.2024]

[32] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2013) Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten. Dokumentation 2013. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/dokumentation-bauwerkspruefung-nach-din-1076.pdf?__blob=publicationFile [20.11.2024]

[33] Hallermann, N.; Helmrich, M.; Morgenthal, G.; Schnitzler, E. (2018) UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken – Teil einer digitalen Instandhaltungsstrategie. Bautechnik 95, Heft 2, S. 720 – 726. https://doi.org/10.1002/bate.201800066

[34] Schönberger, J. L.; Frahm, J. M. (2016) Structure-from-motion revisited. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 4104–4113. https://doi.org/10.1109/CVPR.2000.854715

[35] Bednorz, J.; Hindersmann, I.; Duschl, M. (2018) BIM bei Bestandsbrücken – Modellbildung zur Umsetzung der duraBASt-Brücke. BASt-Projekt. https://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/BIM/Daten/abgeschlossen/BASt-2317004.html [21.11.2024]

[36] Bednorz, J.; Hindersmann, I.; Jäger, K.; Marszalik, M. (2020) Methoden zur Generierung von As-Built-Modellen für Bestandsbrücken. Bautechnik (97), Heft 4, S. 286–294. https://doi.org/10.1002/bate.202000011

[37] Morgenthal, G.; Helmrich, M. (2023) Bildbasierte Erfassung und digitale Dokumentation von Geometrie und Zustand an Eisenbahnbrücken. Bautechnik (100), Heft 6, S. 310–317. https://doi.org/10.1002/bate.202300049

[38] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hrsg.) (2017) Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF). Stand: 22.02.2017. https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Erhaltung/RI-EBW-PRUEF-Erhaltung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [22.11.2024]

[39] Deutsches Institut für Normung e.V. (2024) E DIN 1076:2024-02 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung (Entwurf).

[40] Bundesamt für Strassen ASTRA (2005) Richtlinie Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen (ASTRA 12001). https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/standards_fuer_nationalstrassen/astra_12001_projektierungundausfuehrungvonkunstbautendernational.pdf.download.pdf/astra_12001_projektierungundausfuehrungvonkunstbautendernational.pdf [26.11.2024]

[41] Bundesamt für Strassen ASTRA (2005) Richtlinie Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen (ASTRA 12002). https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/standards_fuer_nationalstrassen/astra_12002_ueberwachungundunterhaltderkunstbautendernationalstr.pdf.download.pdf/astra_12002_ueberwachungundunterhaltderkunstbautendernationalstr.pdf [26.11.2024]

[42] Hindersmann, I.; Puttkamer, L.; Müller, M. (2024) Birth certificates of bridges – reference condition of new bridges. Proceedings of the 11th European Workshop on Structural Health Monitoring

(EWSHM 2024), June 10-13, 2024 in Potsdam, Germany. e-Journal of Nondestructive Testing. https://doi.org/10.58286/29564

[43] Tarantola, A. (2005) Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Society for Industrial and Applied Mathematics, SIAM.

[44] Donaldson, J.R.; Schnabel, R.B. (1985) Computational Experience with Confidence Regions and Confidence Intervals for Nonlinear Least Squares. Forschungsbericht, University of Colorado at Boulder.

[45] Box, G.E.P.; Tiao, G.C. (1992) Bayesian Inference in Statistical Analysis. John Wiley and Sons. ISBN:9780471574286

[46] Morgenthal, G.; Hallermann, N.; Rau, S.; Schellenberg, K.; Martín-Sanz, H.; Schubert, M.; Kübler, O. (2023) Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken. Schlussbericht zu FE 69.0006, BASt-Bericht B 190, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlags GmbH, Bergisch Gladbach.

[47] Mottershead, J. E.; Friswell, M.I. (1993) Model Updating in Structural Dynamics: A Survey, J. Sound Vib., Bd. 167, Nr. 2, S. 347–375. https://doi.org/10.1006/jsvi.1993.1340

[48] Cheung, S. H.; Beck, J. L. (2009) 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. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:4(243)

[49] Keitel, H. (2011) Bewertungsmethoden für die Prognosequalität von Kriechmodellen des Betons, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar. https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00025529/KEITEL_DissertationDeutschEnglisch_2011_2-1.pdf [26.11.2024]

[50] Jaishi, B.; Ren, W.-X. (2006) Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual, J. Sound Vib., Bd. 290, Nr. 1–2, S. 369–387.

[51] Toksoy, T.; Aktan, A. (1994) Bridge-condition assessment by modal flexibility, Exp. Mech., Bd. 34, Nr. 3, S. 271–278.

[52] Bandara, R. P.; Chan, T. H.; Thambiratnam, D. P. (2014) Structural damage detection method using frequency response functions, Struct. Health Monit., Bd. 13, Nr. 4, S. 418–429.

[53] Catbas, F. N.; Gokce, H. B.; Gul, M. (2012) 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.

[54] Esfandiari, A.; Bakhtiari-Nejad, F.; Rahai, A.; Sanayei, M. (2009) Structural model updating using frequency response function and quasi-linear sensitivity equation, J. Sound Vib., Bd. 326, Nr. 3–5, S. 557–573.

[55] Wellstead, P.E. (1981) Non-parametric methods of system identification, Automatica, Bd. 17, Nr. 1, S. 55–69.

[56] Gao, Y.; Spencer, B. Jr. (2005) Online damage diagnosis for civil infrastructure employing a flexibility-based approach, Smart Mater. Struct., Bd. 15, Nr. 1, S. 9.

[57] Carden, E. P.; Brownjohn, J. M. (2008) ARMA modelled time-series classification for structural health monitoring of civil infrastructure, Mech. Syst. Signal Process., Bd. 22, Nr. 2, S. 295–314.

[58] Reynders, E.; Pintelon, R.; De Roeck, G. (2008) Uncertainty bounds on modal parameters obtained from stochastic subspace identification, Mech. Syst. Signal Process., Bd. 22, Nr. 4, S. 948–969.

[59] Viberg, M.; Wahlberg, B.; Ottersten, B. (1997) Analysis of state space system identification meth-ods based on instrumental variables and subspace fitting, Automatica, Bd. 33, Nr. 9, S. 1603–1616.

[60] Van Overschee, P.; De Moor, B. (1996) Subspace Identification for Linear Systems: Theory Implementation – Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4613-0465-4 [20.11.2024]

[61] Ljung, L. (1987) System Identification - Theory for the User, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. ISBN: 978-0-13-656695-3

[62] Peeters, P.; De Roeck, G. (1999) Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, 13, S. 855–878.

[63] Brinker, R.; Zhang, L.; Andersen, P. (2001) Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. Smart Mater. Struct. 10, S. 441– 445.

[64] Zhang, Q. W.; Chang, C.C.; Chang, T. Y. P. (2000) Finite Element model updating for structures with parametric constraints. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, S. 927–944.

[65] Wu, J. R.; Li, Q. S. (2006) Structural parameter identification and damage detection for a steel structure using a two-stage finite element model updating method. Journal of Constructional Steel Research 62 (3), S. 231–239.

[66] Simon, P.; Helmrich, M.; Herrmann, R.; Schneider R.; Baeßler, M.; Lorelli, S.; Morgenthal, G. (2022) Maintalbrücke Gemünden: Bauwerksmonitoring und -identifikation aus einem Guss, Bautechnik (99), Heft 3, S. 163–172. https://doi.org/10.1002/bate.202100102

[67] Cawley, P.; Adams, R. D. (1979) The location of defects in structures from measurements of natural frequencies, J. Strain Anal. Eng. Des., Bd. 14, Nr. 2, S. 49–57.

[68] Samman, M. M.; Biswas, M. (1994) Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. I: Theory, J. Struct. Eng., Bd. 120, Nr. 1, S. 269–289.

[69] Shokrani, Y.; Dertimanis, V. K.; Chatzi, E.; Savoia, M. (2018) On the use of mode shape curvatures for damage localization under varying environmental conditions, Struct. Control Health Monit., Bd. 25, Nr. 4, S. e2132.

[70] Pandey, A.; Biswas, M.; Samman, M. (1991) Damage detection from changes in curvature mode shapes, J. Sound Vib., Bd. 145, Nr. 2, S. 321–332.

[71] Cornwell, P.; Doebling, S. W.; Farrar, C. R. (1999) Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures, J. Sound Vib., Bd. 224, Nr. 2, S. 359–374.

[72] Liu, K. (1993) A method based on virtual strain-energy parameters for multiaxial fatigue life prediction, in Advances in multiaxial fatigue, ASTM International.

[73] Seyedpoor, S. (2012) 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.

[74] Hosseinzadeh, A. Z.; Amiri, G. G.; Razzaghi, S. S.; Koo, K.; Sung, S.-H. (2016) Structural damage detection using sparse sensors installation by optimization procedure based on the modal flexibility matrix, J. Sound Vib., Bd. 381, S. 65–82.

[75] Jaishi, B.; Ren, W.-X. (2006) Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual, J. Sound Vib., Bd. 290, Nr. 1–2, S. 369–387.

[76] Toksoy, T.; Aktan, A. (1994) Bridge-condition assessment by modal flexibility, Exp. Mech., Bd. 34, Nr. 3, S. 271–278.

[77] Fan, W.; Qiao, P. (2010) Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. Structural Health Monitoring 10 (1), S. 83–111.

[78] Zhang, L.; Xia, Y.; Lozano-Galant, J. A.; Sun, L. (2019) Mass-Stiffness Combined Perturbation Method for Mode Shape Monitoring of Bridge Structures, Shock Vib., Bd. 2019, S. e7320196, https://doi.org/10.1155/2019/7320196

[79] Bordeux, J. B.; Golinval, J. C. (2203) Modal identification and damage detection using the data-driven stochastic subspace and ARMAV Methods. Mechanical Systems and Signal Processing, 17 (1), S. 83–89.

[80] Andersen, P.; Kirkegaard, P. H. (1998) Statistical damage detection of civil engineering structures using ARMAV models. Proceedings of the 16th IMAC, Santa Barbara, CA, USA.

[81] Taha, M. M. R. (2006) Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features. Structural Health Monitoring, 5(3): S. 267–295.

[82] Sun, Z.; Chang, C. C. (2002) Structural Damage Assessment Based on Wavelet Packet Transform. Journal of Structural Engineering, 128(10): S. 1354-1361.

[83] GO FAIR (2024) FAIR Principles. https://www.go-fair.org/fair-principles/ [19.11.2024]

[84] Sawo, F.; Klumpp, V.; Beutler, F. (2015) Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform. Schlussbericht zu FE 15.0548/2011/GRB, BASt-Bericht B 114, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlags GmbH, Bergisch Gladbach. https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1358/file/B114b.pdf [26.11.2024]

[85] Windmann, S. (2022) Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. Schlussbericht zu Forschungsprojekt 2116009, BASt-Bericht B 178, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlags GmbH, Bergisch Gladbach. https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2651/file/B178+BA+Gesamtversion.pdf [21.11.2024]

[86] Taraben, J.; Helmrich, M.; Morgenthal, G. (2022) Datenmodelle für digitale Zwillinge von Brücken und bildbasierte Zustandsaufnahmen. Bautechnik (99), Heft 2, S. 134–142. https://doi.org/10.1002/bate.202100091

[87] Hamdan, A.; Taraben, J.; Helmrich, M.; Mansperger, T.; Morgenthal, G.; Scherer, R. (2021) A semantic modeling approach for the automated detection and interpretation of structural damage, Automation in Construction 128, S. 103739.

[88] Taraben, J.; Helmrich, M.; Morgenthal, G. (2022) Bridge Condition Assessment Based on Image Data and Digital Twins. Proceedings of the IABSE Symposium Prague 2022: Challenges for Existing and Oncoming Structures, May 25-May 27, 2022, Pague, Czech Republic. IABSE, ISBN: 978-3-85748-181-9. https://doi.org/10.2749/prague.2022.0735

[89] Richter, B.; Messerer, D.; Herbers, M.; Speck, K.; Laukner, J.; Gläser, C.; Jesse, F.; Marx, S. (2024) Monitoring of a prestressed bridge girder with integrated distributed fiber optic sensors. Procedia Structural Integrity 64, S. 1208–1215. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.168

[90] Taube, C.; Morgenthal, G. (2024) Experimental investigation of the biaxial load-bearing and deformation behaviour of wheat straw big bales for construction. Construction and Building Materials (433), S. 136630. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136630

[91] Sperber, M.; Gößmann, R.; Reget, C.; Müller, J.; Nolden, J.; Köhler, R. Kremkau, L. (2017) Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie. BASt-Bericht B 139, Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach. https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1840/file/B139_barrierfreies_Internet_PDF.pdf [26.11.2024]

[92] Rodehorst, V.; Debus, P.; Morgenthal, G.; Rau, S.; Schallauer, P. (2023) Evaluierung von KI-Methoden zur Schadensdetektion an Ingenieurbauwerken im Kontext von Bildqualität. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt ev.AI.luate, D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastruktur-forschung 2022. https://projekte.ffg.at/projekt/4413336 [27.11.2024]

[93] Hallermann, N.; Taraben, J.; Morgenthal, G. (2018) BIM related workflow for an image-based deformation monitoring of bridges, 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS), Melbourne.

[94] Taraben, J. (2024) Methoden zur Charakterisierung, Modellierung und automatisierten Auswertung von Zustandsdaten im Kontext der digitalen Bauwerkserhaltung. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar. https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00061958 [20.11.2024]

[95] Planungsbüro Haak & Schulze (2021) Planungsunterlagen: Brücke im Zuge der B 198 über die Welse bei Greiffenberg, Stand: 08/2021, Bauherr: Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg.

[96] INFRALYTICA GmbH: INFRA//TWIN-Plattform: https://infralytica.com/infratwin/ [21.11.2024]

Tabellen

Tabelle 1: Verfahren zur Erfassung physikalischer und chemischer Parameter
Tabelle 2: Kurzübersicht der Prüfbarkeit typischer Schäden nach [91]

Bilder

Bild 1: physikalische Parameter, chemische Aspekte und geometrische Eigenschaften des Geburtszertifikats
Bild 2: Einordnung des Geburtszertifikats im Rahmen des Projekts in die Lebenszyklusphasen eines Bauwerks
Bild 3: Gegenüberstellung: Ordnerstruktur (links) und föderierte Systeme (rechts)
Bild 4: Ansicht (oben) und Regelquerschnitt (unten) des Referenzbauwerks [95]
Bild 5: Beispielhaftes Kameraarray: Sieben Kameras mit Ringlichtern an einer Traverse mit Abstandhaltern
Bild 6: Beispielhaftes Kameraarray in vertikaler Ausrichtung zur Aufnahme von Pfeileransichtsflächen
Bild 7: Beispielhaftes 3D-Modell einer Brücke mit vergleichbaren Dimensionen im Vergleich zum Referenzbauwerk
Bild 8: Beispielhafte Darstellung von Betonschäden: Rohdatenbild (oben) und Bild mit Überlagerung erkannter Schäden (unten) für die Schäden Riss, Aussinterungen, Abplatzungen und Rost, Vegetation (Bewuchs) (v.l.n.r.) [92]
Bild 9: Zeitpunkte der zu installierenden Sensoren und durchzuführenden Messungen (Zeitachse nicht maßstäblich)

Anhänge

Anhang A: Verfahren zur Erfassung physikalischer und chemischer Parameter

Kap.	Parameter	Ermittlung des Parameters	Anforderungen an die Messstelle	Datenausgabe	Metadaten	Wie funktioniert das Verfahren?	Vorteile	Nachteile
3.1.1	Materialdehnung/-spannung	DFOS (Distributed Fiber Optic Sensing)	Saubere, trockene Oberflächen für die Befestigung der Faseroptikkabel: Oder gute Möglichkeit zum Einbau der Kabel in das Bauwerk; minimaler mechanischer Stress und Interferenzen während der Installation	Grafische Darstellung der Dehnung und Spannung entlang der Faser; numerische Werte der maximalen und minimalen Spannungen	Position und Länge der Faser; Datum und Uhrzeit der Messung; spezifische Einstellungen des DFOS-Geräts	Faseroptikkabel werden entlang oder in der zu überwachenden Struktur verlegt. Lichtimpulse werden durch das Kabel gesendet und die Veränderungen in den Rückstreuungsmustern, verursacht durch Dehnung im Material, gemessen.	Bietet kontinuierliche Überwachung über lange Distanzen; hohe räumliche Auflösung; robust gegenüber Umwelteinflüssen; geringe Wartung erforderlich	Anfängliche Installationskosten können hoch sein; Hohe Kosten beim Auslesen der Daten; Interpretation der Daten erfordert Fachkenntnisse
		DMS (Dehnungsmessstreifen)	Saubere, trockene und ebene Oberflächen für die Befestigung; korrekte Oberflächenvorbereitung zur Vermeidung von Adhäsionsproblemen; frei von Vibrationen und elektromagnetischen Störungen während der Messung	Grafische Darstellung der Dehnung; numerische Werte der Spannungen	Position der Messstreifen; Datum und Uhrzeit der Messung; Kalibrierdaten	Dehnungsmessstreifen werden direkt auf das zu messende Material geklebt. Änderungen der elektrischen Widerstände im Streifen infolge von Materialdehnungen werden gemessen, um Spannungen zu ermitteln.	Genauigkeit bei der Messung lokal begrenzter Dehnungen; relativ kostengünstig; einfache Anwendung und Auswertung	Anfällig für Umwelteinflüsse wie Temperaturschwankungen; nur punktuelle Messung, keine flächendeckende Überwachung
3.1.2	Druckfestigkeit	Druckversuch	Probenentnahme von der Brücke; Schutz der Proben vor Feuchtigkeit und Verschmutzung	Maximaler Druck, den die Probe aushält	Standort der Probenentnahme; Datum und Zeit des Tests; Testbedingungen	Beim Druckversuch wird eine Materialprobe einer kontinuierlich steigenden Druckbelastung ausgesetzt, bis sie versagt. Die maximale Spannung wird als Druckfestigkeit bezeichnet.	Standardisierte Methode; gibt Aufschluss über die strukturelle Integrität	Invasive Methode; Probenentnahme kann zu Schäden an der Struktur führen
3.1.3	Elastizitätsmodul	Druckversuch mit Belastungszyklen	Probenentnahme von der Brücke; Schutz der Proben vor Feuchtigkeit und Verschmutzung	Elastizitätsmodul in GPa	Standort der Probenentnahme; Datum und Zeit des Tests; Testbedingungen	Der Elastizitätsmodul wird durch Zug- oder Druckversuche ermittelt.	Liefert genaue Daten über die Steifigkeit des Materials	Invasive Methode; Ergebnisse können durch unsachgemäße Probenvorbereitung beeinflusst werden
3.1.4	Eigenfrequenz	Vibrationsgeneratoren (Modalanalyse)	Zugang zu tragenden Elementen der Brücke; stabile Plattform für den Vibrationsgenerator	Frequenzspektrum; Amplituden der Schwingungen	Standort der Messgeräte; Datum und Uhrzeit der Messung; Umgebungsbedingungen; Art der Sensoren (z. B. Beschleunigungsmesser)	Vibrationsgeneratoren erzeugen kontrollierte Anregungen auf der Brücke. Beschleunigungsmesser messen die Antwort des Bauwerks auf diese Anregungen. Durch Analyse der Resonanzfrequenzen können die	Direkte und kontrollierte Methode zur Bestimmung dynamischer Eigenschaften; hohe Präzision in den Ergebnissen	Erfordert spezielle Ausrüstung und kann bei größeren Brücken logistisch anspruchsvoll sein; mögliche Störung durch Verkehr und Umgebung

						Eigenfrequenzen der Brücke ermittelt werden.		
3.1.5	Eigenschwingungsform	Beschleunigungssensor	Zugänglichkeit für Sensorinstallation; minimale Störungen	Zeitverlauf der Verschiebungen; Frequenzanalyse	Sensor-ID; Zeitstempel; Standortdaten; Umgebungsbedingungen	Sensoren (wie Beschleunigungssensor, Dehnungsmessstreifen) messen die Antwort der Brücke auf natürliche oder induzierte Schwingungen. Daten werden in Frequenz und Amplitude analysiert, um Schwingungsmodi zu identifizieren. Beanspruchungen zu identifizieren.	Direkte Erfassung struktureller Reaktionen; ermöglicht präzise Modellierung und Analyse	Kann teuer in der Einrichtung und Wartung sein; erfordert spezialisierte Kenntnisse für die Datenanalyse
3.1.6	Modale Masse	Modalanalyse	Minimalinvasive Messung; Sensorverteilung muss Gesamtstruktur erfassen	Modale Massen, die verschiedenen Eigenmoden zugeordnet sind	Detaillierte Sensorplatzierungspläne	Die modale Masse wird aus den Schwingungsantworten berechnet, indem die Massenverteilung analysiert wird, die notwendig ist, um die beobachteten dynamischen Eigenschaften zu erzeugen.	Wichtige Daten für strukturelle Bewertungen und zur Validierung von Simulationsmodellen	Aufwändige Datenerhebung und -analyse; erfordert korrekte Modellannahmen für präzise Ergebnisse
3.1.7	Modale Dämpfung	Modalanalyse	Stabile Montagepunkte für Sensoren; adäquate Sensorverteilung über die Struktur	Dämpfungsraten der Brückenstrukturen	Umgebungsbedingungen während der Messung	Die Dämpfungsraten werden aus den gemessenen Schwingungsdaten abgeleitet, indem die Abklingrate der Schwingung nach einer Anregung analysiert wird.	Bietet Einblicke in das Energieverlustverhalten der Brücke; wichtig für Sicherheitsanalysen	Kann durch Umwelteinflüsse beeinflusst werden; Messgenauigkeit hängt von der Qualität der Anregung ab
3.1.8	Hängerkräfte	Einflusslinienanalyse	Präzise Vermessung der Brückenstruktur; gute Sensorik	Kraftverteilung in Hängern; maximale und minimale Last	Standort der Sensoren; Messzeitpunkt; Fahrzeugtypen	Einflusslinien werden durch Überfahren der Brücke mit bekannter Belastung ermittelt, um die Lastverteilung und Reaktionen auf die Hänger zu messen.	Direkte Messung realer Lasten; präzise Daten	Zeitaufwendig; Verkehrsbeeinträchtigung möglich
3.1.9	Externe Vorspannkraft	DMS (Dehnungsmessstefen)	Saubere, trockene und ebene Oberfläche an den Spanngliedern; geringe elektromagnetische Störungen;	Numerische Werte der Spannkräfte; Vorspannkraft in kN oder Tonnen; grafische Darstellung der Dehnungswerte	Position der DMS auf den Spanngliedern; Datum und Uhrzeit der Installation und Messung; Kalibrierdaten	Dehnungsmessstreifen werden auf den Spanngliedern angebracht. Die Dehnung, die durch die Vorspannung verursacht wird, ändert den elektrischen Widerstand der DMS, was zur Berechnung der	Ermöglicht die direkte Messung der Kräfte in den Spanngliedern; präzise Ergebnisse; einfache Installation	Empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen wie Temperatur und Feuchtigkeit; punktuelle Messung; Erfordert sorgfältige Kalibrierung

			Zugänglichkeit für die Installation der DMS	entlang des Spanngliedes		Vorspannkraft genutzt wird.		
		Magnetische Methode (Magnetostrictive Sensoren)	Zugang zu Spanngliedern; minimaler elektromagnetischer Hintergrund	Numerische Werte der Spannkräfte; Vorspannkraft in kN oder Tonnen	Sensorposition; Kalibrierdaten	Magnetostrictive Sensoren werden entlang der Spannkabel angebracht. Sie nutzen die Eigenschaft von magnetostriktiven Materialien, unter Einfluss eines magnetischen Feldes ihre Länge zu ändern, was die Kraftmessung ermöglicht.	Direkte Messung der Vorspannkraft; hohe Genauigkeit und Empfindlichkeit	Empfindlich gegenüber äußeren magnetischen Störungen; hohe Kosten
		Akustische Emissionsanalyse	Zugänglichkeit zu Spanngliedern; ruhige akustische Umgebung	AE Ereignisrate und Intensität	Sensorposition; Kalibrierdaten; Zeitstempel	AE-Sensoren werden an den Spannkabeln befestigt. Wenn die Vorspannkabel unter Last stehen, emittieren sie akustische Signale, deren Eigenschaften zur Schätzung der Spannkraft analysiert werden.	Nicht-invasive Technik, ermöglicht Echtzeitüberwachung	Begrenzt auf qualitative Analyse, kann durch Umgebungsgeräusche gestört werden
3.1.10	Verschiebung / Verformung	DMS (Dehnungsmessstreifen)	Saubere, ebene Oberfläche; Zugänglichkeit für die Anbringung der DMS; Minimierung von mechanischen Störungen während der Installation	Grafische Darstellung der Verschiebung; numerische Werte der Verformung	Position der DMS; Datum und Uhrzeit der Messung; Kalibrierdaten	DMS werden an kritischen Punkten der Brückenstruktur angebracht. Sie messen die Dehnung, die durch Verformungen entsteht, und geben Auskunft über die Verschiebungen / Verformungen der Brückenkomponenten.	Ermöglicht die präzise Messung lokaler Verformungen; kann in Echtzeit überwacht werden; relativ kostengünstige Lösung	Anfällig für Umwelteinflüsse wie Temperaturänderungen; nur punktuelle Informationen, keine flächendeckende Messung
		Beschleunigungsmesser	Feste Montagepunkte; geringe Vibrationseinflüsse aus der Umgebung	Beschleunigungsdaten in m/s²	Sensorposition; Kalibrierdaten; Zeitstempel	Beschleunigungsmesser werden an strategischen Punkten der Brücke montiert, um die Beschleunigung zu messen. Die zweifache Integration der Beschleunigungsdaten liefert die Verformung.	Direkte Messung der dynamischen Reaktion; hohe Datengenauigkeit	Erfordert genaue Kalibrierung und Integration; anfällig für Rauschen in den Daten
		GPS-Sensoren	Klare Sicht zum Himmel für ununterbrochenen Satellitenkontakt, stabile Montageflächen	Positionskoordinaten (X, Y, Z)	Sensor-ID; Positionskoordinaten; Zeitstempel; Signalstärke	GPS-Sensoren messen die exakte Position der Brücke in Echtzeit durch Satellitensignale. Durch Vergleich der Positionsdaten über die Zeit können Verformungen genau erfasst werden.	Hohe Präzision bei der Positionsbestimmung; einfache Installation	Beeinträchtigung durch atmosphärische Störungen; begrenzte Auflösung bei kleineren Bewegungen

		Laserscanner	Sichtlinie zum Ziel muss frei sein; stabile Aufstellungsfläche	3D-Punktwolke; relative Bewegungen	Sensor-ID; Positionsdaten; Zeitstempel	Ein Laserscanner erfasst mittels Lichtimpulsen die Distanz und die relative Position von Objekten. Diese Daten werden zu einer 3D-Punktwolke verarbeitet, um Verformungen zu erkennen.	Hochpräzise; detaillierte räumliche Auflösung; schnelle Datenerfassung	Empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen wie Nebel oder starkem Regen; hohe Anschaffungs- und Wartungskosten
3.1.11	Wärmeausdehnungs-koeffizient	Temperatursensor	Zugänglichkeit für Sensoren; stabile Befestigungspunkte	Temperatur und Längenänderungen der Brücke	Sensorpositionen; Messzeiten; Umweltbedingungen	Temperatursensoren messen die Temperaturänderungen und entsprechende Längenänderungen der Brücke. Aus diesen Daten wird der Koeffizient berechnet.	Genaue Messung der Materialreaktion auf Temperatur	Abhängig von präziser Sensorplatzierung und Kalibrierung
		Optische Auswertung	Klare Sichtlinie für optische Sensoren; Schutz vor Umwelteinflüssen	Dehnungsdaten; Temperaturdaten	Standort der optischen Sensoren; Messzeiten; Umweltbedingungen	Optische Sensoren (wie Laserscanner oder Drohnen) erfassen Veränderungen in der geometrischen Form der Brücke bei Temperaturschwankungen und berechnen den Koeffizienten.	Nicht-invasive Messung; hohe Genauigkeit bei Dehnungserfassung	Anfällig für optische Störungen; hohe Anforderungen an Umweltbedingungen
3.1.12	Akustische Signatur	DMS (Dehnungsmesssteifen)	Störungsarme Umgebung, um akustische Interferenzen zu minimieren; feste und stabile Anbringung der DMS; korrekte Ausrichtung der Sensoren	Frequenzspektren; Amplituden; Phaseninformationen	Position der DMS; Datum und Uhrzeit der Messung; Kalibrierdaten; Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Wind	DMS erfassen durch Materialverformung induzierte Dehnungen, die mit Schwingungen und Vibrationen der Brücke in Beziehung stehen. Diese Daten werden analysiert, um das Schwingungsverhalten und damit die akustische Signatur zu bestimmen.	Erlaubt die direkte Messung der durch Verkehr oder Wind verursachten Schwingungen; nützlich für strukturelle Gesundheitsüberwachung	Begrenzte Analysemöglichkeiten für komplexe akustische Signaturen; kann durch Umweltfaktoren beeinflusst werden
		Modalanalyse	Geringe Hintergrundgeräusche; Zugang für akustische Sensoren erforderlich	Frequenzspektrum und Intensität der Schallwellen	Akustische Eigenschaften der Umgebung	Durch Analyse der von der Brückenstruktur emittierten akustischen Wellen während der Anregung kann die akustische Signatur identifiziert werden. Diese Signatur reflektiert strukturelle Eigenschaften und Zustände.	Nicht-invasive Technik; kann Hinweise auf verborgene Schäden geben	Empfindlich gegenüber Umgebungslärm; erfordert spezialisierte akustische Messgeräte

		Akustische Emissionsanalyse	Zugang zu relevanten Brückenbereichen; geringe Umgebungsgeräusche	Schallwellenfrequenzen und -amplituden	Sensor-ID; Zeitstempel; Standortdaten	Sensoren erfassen von der Brückenstruktur emittierte Schallwellen, die durch Materialermüdung oder Risse verursacht werden. Die Analyse ermöglicht die Identifikation und Lokalisation von Schadstellen.	Früherkennung von Schäden; nicht-invasiv; Echtzeitüberwachung	Empfindlich gegenüber Hintergrundgeräuschen; hoher Analyseaufwand
		Frequenzanalyse mit Mikrofonen	Zugang zu relevanten Brückenbereichen; geringe Umgebungsgeräusche	Schallwellenfrequenzen und -amplituden; Frequenzspektrum; Schallintensität	Sensor-ID; Zeitstempel; Standortdaten	Akustische Sensoren erfassen von der Brückenstruktur emittierte Schallwellen. Diese werden mittels Frequenzanalyse ausgewertet, um Muster zu erkennen, die auf strukturelle Unregelmäßigkeiten hinweisen. Solche wie die durch Materialermüdung oder Risse verursacht werden. Die Analyse ermöglicht die Identifikation und Lokalisation von Schadstellen.	Identifizierung spezifischer Frequenzmuster, die auf Schäden hindeuten können; Ermöglicht kontinuierliche Überwachung	Anfälligkeit für Störgeräusche; Interpretation der Daten kann komplex sein
3.2.1	Carbonatisierung	pH-Sensoren	Zugang zum Beton für direkte Sensorinstallation	pH-Wert	Standort; Datum und Zeit der Messung	pH-Sensoren werden direkt im Beton installiert oder in Kontakt mit der Betonoberfläche gebracht, um den aktuellen pH-Wert zu messen.	Direkte und spezifische Messung der Carbonatisierung; kann für Langzeitüberwachung genutzt werden	Installation kann invasiv sein; Sensoren können durch Umwelteinflüsse beeinträchtigt werden
		Indikatortest	Zugängliche und freigelegte Betonoberfläche	Carbonatisierungstiefe in Millimetern	Standort; Datum und Zeit der Messung; Messbedingungen	Eine Indikatorlösung (meist Phenolphthalein) wird auf die frisch geschnittene Betonoberfläche aufgetragen. Stellen, an denen der pH-Wert durch Carbonatisierung abgesunken ist, färben sich nicht.	Minimal-invasiv und einfach durchzuführen; bietet visuelle Sofortergebnisse	Qualitative und nicht quantitativ genaue Messung; Oberflächenvorbereitung nötig
3.2.2	Feuchte	Sensorik (elektrischer Widerstand)	Zugang zu kritischen oder repräsentativen Betonbereichen	Feuchtigkeitsgehalt in Prozent	Standort; Datum und Zeit der Messung; Messbedingungen	Feuchtigkeitssensoren messen den elektrischen Widerstand des Betons, der mit zunehmender Feuchtigkeit typischerweise abnimmt.	Relativ einfache und schnelle Methode zur Datenerhebung	Kann durch Salze und andere im Beton enthaltene Stoffe beeinflusst werden; beschränkt auf Messstellen
		Sensorik (kapazitive Messung)	Zugang zu repräsentativen Stellen innerhalb der Struktur	Feuchtigkeitsgehalt in Prozent	Standort; Datum und Zeit der Messung;	Kapazitive Sensoren messen die Änderung der dielektrischen Konstante des Materials, die durch	Nicht-invasive Messung; schnelle Ergebnisse	Beeinflussung durch Materialzusammensetzung möglich; weniger genau bei

					Messbedingungen	Feuchtigkeit beeinflusst wird.		hohen Feuchtigkeitsgehalten
3.2.3	Chloridgehalt	potentiometrische Titration	Probeentnahme von Beton, Schutz der Proben vor Kontamination	Chloridkonzentration in % oder ppm	Standort; Datum und Zeit der Messung; Laborbedingungen	Eine Probe wird gelöst und mit einer Silbernitratlösung titriert, während ein Potentiometer zur Messung des elektrischen Potentials verwendet wird, um den Endpunkt der Titration zu bestimmen.	Hohe Genauigkeit; quantitative Ergebnisse	Laborbasiert; zeitaufwendig; erfordert qualifiziertes Personal
		Ionenchromatographie	Probeentnahme von Beton, Schutz der Proben vor Kontamination	Chloridkonzentration in % oder ppm	Standort; Datum und Zeit der Messung; Laborbedingungen	Die Probe wird in einer Lösung gelöst, die dann durch eine Säule gepumpt wird, die speziell beschichtete Harze enthält. Diese Harze trennen die Ionen nach ihrer Ladung und Größe. Ein Detektor identifiziert und quantifiziert die Chloridionen basierend auf ihrer Retentionszeit und dem Ladungsaustausch.	Präzise und empfindliche Messmethode, kann mehrere Ionen gleichzeitig messen	Erfordert spezielle Ausrüstung und Fachkenntnisse; kostspielig
		Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)	Zugänglichkeit der Brückenelemente, geringe Oberflächenkontamination	Chloridkonzentration in ppm oder %	Standort; Datum und Zeit der Analyse; spezifische Geräteeinstellungen	Das zu untersuchende Material wird mit Röntgenstrahlen bestrahlt. Die Atomkerne absorbieren diese Energie, was zu einer Emission von Sekundärstrahlen führt. Diese werden gemessen und geben Auskunft über die Elementzusammensetzung der Probe.	Nicht-invasiv; schnelle Durchführung der Messungen	Kann durch Oberflächenverschmutzung oder Beschichtungen beeinträchtigt werden
		Ionenselektive Feldeffekttransistoren (ISFET)	Zugängliche Oberflächenbereiche, Feuchtigkeitskontrolle	Chloridkonzentration in ppm	Standort; Datum und Uhrzeit der Messung; Sensor-ID	ISFET messen die Aktivität von Chloridionen in einer Lösung, indem sie die Veränderung des elektrischen Feldes erkennen.	Direkte und spezifische Messung, schnelle Reaktionszeit, hohe Empfindlichkeit	Empfindlich gegenüber Umgebungsbedingungen; regelmäßige Kalibrierung notwendig

Tabelle 1: Verfahren zur Erfassung physikalischer und chemischer Parameter

Anhang B: Erkennbarkeit typischer Schäden an Brückenbauwerken

Zusammenstellung zur Prüfbarkeit typischer Schäden entsprechend RI-EBW-PRÜF [38] nach [91]: (siehe auch Abschnitt 3.4.1; BWP = Bauwerksprüfung)

	BWP handnah	**BWP innovativ mittels Bildauswertung möglich**		
Befund/ Schaden		**Ja**	**Nein**	**ein-geschränkt**
Verschmutzungen / Staub	x	x		
Fremdstoffe / Rückstände	x	x		
Verwitterung	x	x		
Zerstörung	x	x		
Abplatzungen	x	x		
Kiesnester	x	x		
Durchfeuchtung	x	x		
Wasseraustritt	x	x		
Ausblühungen / Aussinterungen	x	x		
Rostflecken / Rostfahnen	x	x		
Freiliegende Bewehrung	x	x		
Korrodierende Bewehrung (sofern freiliegend)	x	x		
Korrosion Art (Narben, Blattrost, …)	x			x
Korrosion	x			x
Erkennbarkeit Risse, Breite b ≤ 0,2 mm[1]	x		x	
Erkennbarkeit Risse, Breite b > 0,2 mm[1]	x	x		
Mechanische Beschädigung / Anprall	x	x		
Brandschäden	x	x		
Betondeckung	x		x	
Hohlstellen	x		x	
Dichtheit	x		x	x
Carbonatisierung	x		x	
Chloridgehalt	x		x	
Betonfestigkeit	x		x	
Bewehrung: Lage und Durchmesser	x		x	
Freiliegende Hüllrohre	x	x		
Hüllrohre / Spannstahlverpressung	x		x	
Schalungsreste	x	x		
Versprödungen (z. B. Leitungen, Manschetten usw. (kein Stahl))	x	x		

Blasenbildung	x	x		
Funktion / Beweglichkeit	x		x	x
Setzung	x			x
Schiefstellung	x			x
Ausbauchung / Ausbeulung	x			x
Durchbiegung / Verformung	x			x
Anlandung	x			x
Rutschung	x			x
Auskolkung	x		x	
Stellungsanzeiger (Lager, …)	x	x		x
Vollständigkeit Verbindungsmittel	x	x		

[1] Erkennbarkeit unter günstigen Randbedingungen, wie z. B. Licht, Feuchtigkeit usw. Rissbreitenmessung derzeit noch nicht möglich

Tabelle 2: Kurzübersicht der Prüfbarkeit typischer Schäden nach [91]

Anhang C: Abkürzungen

Abkürzungen

AG	Auftraggeber
AKR	Alkali-Kieselsäurereaktion
ARMAV	Auto Regressive Moving Average Vector
BIM	Building Information Modeling
BWD	Bauwerksprüfung
CDE	Common Data Environment
DFOS	Distributed Fiber Optical Sensing
DMS	Dehnungsmessstreifen
E-Modul	Elastizitätsmodul
EMA	Experimental Modal Analysis
ERP	Enterprise Resource Planning
FAIR	Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability
FDD	Frequency Domain Decomposition
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier-Transformation
GPa	Gigapascal
ISFET	Ionenselektive Feldeffekttransistoren
KNN	künstlicher neuronaler Netzwerke
KOS	Koordinatensystem
LiDAR	Light Detection and Ranging
LS	Laserscanning
OMA	Operational Modal Analysis
OSA	Objektbezogene Schadensanalyse
RTK	Echtzeit-Kinematik-Modul
SSI	Stochastic Subspace Identification
SSOT	Single Source Of Truth
UAS	Unmanned Aerial Systems
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
ÜKO	Übergangskonstruktion
XRF	Röntgenfluoreszenzanalyse
ZaP	Zerstörungsarme Prüfverfahren
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2023

B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken
Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken
Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schubert, Kübler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau
Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe, Weißbrod
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur
Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 193: Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke
Empelmann, Javidmehr, Rathgen, Hellenbrand, Ulbricht, Wagner, Kessel, Sietas
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 194: Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken
Taffe, Vonk
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 195: Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2
Geißler, Kraus, Freundt, Böning
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2024

B 196: Zukünftige Einwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken
Hajdin, Schiffmann, Blumenfeld, Tanasić
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 197: Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke – Dokumentation 2021
Novák, Stein, Farouk, Thomas, Reinhard, Zeller, Koster
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 198: Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen
Moormann, Kugler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 199: Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Feinkonzept
Hajdin, Fastrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 200: Konzeption zur Bestimmung von Lage und Anzahl asbesthaltiger Abstandhalter in Betonbrücken – Handlungsanweisung für den Umgang mit asbesthaltigen Hilfsbauteilen in Brückenbauwerken aus Stahlbeton
Hönig, Bossemeyer, Sanio, Thome € 16,00

B 201: Blockhinterlegung und Verpressverfahren zur Abdichtung von Tunnelinnenschalen
Thienert, Kessler, Brummermann, Tintelnot, Matsini, Handke, Lis, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 202: 10. BASt-Tunnelsymposium

€ 19,00

2025

B 203: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Betonbrücken im Bestand
Hegger, Dommes, Adam, Fischer, Lamatsch, Thoma, Maurer, Lavrentyev, Stakalies, Kerkeni, Teworte, Sharei, Stettner, Zilch(†), Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 204: Erarbeitung eines Prüfverfahrens zur Feststellung der inneren Standsicherheit von Gabionen aus punktgeschweißten Drahtgittern
Heimbecher, Lengers, Thünemann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 205: Einfluss des Pannenbuchtenabstands auf die Tunnelsicherheit
Mayer, Brennberger, Haack, Zimmermann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 206: Erfahrungsbericht zur Innenbeschichtung nach TL-Blatt 50 an der Brücke über den Petersdorfer See
Rüters, Schröder, Windmann, Lebelt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 207: Entwicklung eines leistungsorientierten Prüfregimes für Brückenseilverfüllmittel
Hübscher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 208: Korrosionsschutz von Brückenseilen
Friedrich, Windmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 209: Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens in Straßentunneln unter Berücksichtigung von Gruppeneffekten
Thienert, Leismann, Kaufmann, Jenki, Stuehler, Hahn-Klimroth, Oetinger, Czudnochowski, Galler, Wenighofer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 210: Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke
Wedel, Pitters, Hille, Herrmann, Schneider
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 211: Konzeptionelle Untersuchung zur Zusammenführung von Komponenten des Digital Twins Brücke
Zinke, Reymer, Schumann, Kosse, König, Wedel, Schneider, Marx
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 212: Geburtszertifikat für Brückenbauwerke – Die Nullmessung als Bewertungsgrundlage des Bauwerkszustands im Lebenszyklus
Wedel, Stark, Morgenthal, Rau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de
Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-884-3
https://doi.org/10.60850/bericht-b212

www.bast.de