
Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 197

Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke

Dokumentation 2021

von

Balthasar Novák, Franziska Stein, Abdelrahman Farouk,
Leonard Thomas

ILEK, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Universität Stuttgart

Jochen Reinhard, Tanja Zeller

Schömig-Plan Ingenieurgesellschaft mbH
Kleinstheim

Gerhard Koster

Messtechnik Beratung - Dipl.-Ing. Gerhard Koster
Darmstadt

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 197

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

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

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

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

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

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt StB 247192.7040-3418027
Erfahrungssammlung „Monitoring bei Brückenbauwerken“

Fachbetreuung:
Iris Hindersmann

Referat:
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

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

ISSN 0943-9293 | ISBN 978-3-95606-777-8 | <https://doi.org/10.60850/bericht-b197>

Bergisch Gladbach, April 2024

Kurzfassung - Abstract

Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke

Der überproportionale Anstieg des Verkehrs in den letzten Jahrzehnten (Last und Anzahl) in Verbindung mit der Altersstruktur der Brücken in Deutschland erfordert Erhaltungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit des Infrastrukturnetzes. Das steigende Schwerlastverkehrsaufkommen führt zu einer permanent hohen Brückenauslastung und einer beschleunigten Alterung. Der resultierende Bauwerkszustand kann eine Nutzungseinschränkung oder eine Verringerung der Restnutzungsdauer erforderlich machen. Umfangreiche Verstärkungsmaßnahmen oder ein Ersatz der betroffenen Bauwerke, insbesondere des älteren Brückenbestands, sind aufgrund eingeschränkter Kapazitäten und einem erhöhten Mittelbedarf kurzfristig nicht umsetzbar. Aus diesem Grund sind alternative Erhaltungsstrategien zu verfolgen, um die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit des Infrastrukturnetzes zu gewährleisten. Das Bauwerksmonitoring stellt hierbei ein Werkzeug der Erhaltungsplanung zur möglichen Verlängerung der sicheren Nutzung von Brückenbauwerken dar. Grundsätzlich ist der strategische Einsatz von Monitoring über die gesamte Lebensdauer möglich, um frühzeitig auf sich ankündigende Veränderungen des Tragwerkzustands reagieren zu können.

Beim Bauwerksmonitoring handelt es sich um eine Spezialdienstleistung. Kenntnisse zum Einsatz und Nutzen von Monitoring und der Einbindung in die Erhaltungsplanung liegen den Straßenbauverwaltungen derzeit nur eingeschränkt vor. Vor diesem Hintergrund wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen eine Länderabfrage zum Einsatz von Monitoring bei den Straßenbauverwaltungen durchgeführt. Aus den gemeldeten Maßnahmen wurden Monitoringanwendungen für die detaillierte Erfassung der gesammelten Erfahrungswerte mittels Fragebögen ausgewählt. Das Ziel der Erfahrungssammlung ist den Stand der Technik des Bauwerksmonitorings und die Anwendungsmöglichkeiten zur Förderung einer strukturierten Anwendung von Monitoring aufzuzeigen. Im Rahmen der Erfahrungssammlung werden die Erfahrungswerte zu den Anwendungsbereichen, der Leistungsfähigkeit und der Grenzen von Brückenmonitoring dargestellt und sollen eine Erfahrungsgrundlage für die zukünftige Ausschreibung, Planung und Umsetzung von Brückenmonitoring bieten.

In einem ersten Teil wird der Stand der Technik des Brückenmonitorings beschrieben und in Monitoringziele gegliedert. Die Monitoringziele richten sich überwiegend nach der Erfassung unterschiedlicher Bauwerksreaktionen, wie z. B. die Erfassung von Verformungen oder Rissentwicklungen. Den Messzielen werden die in der Praxis angewandten Messverfahren zugeordnet. Neben Angaben zur Funktionsweise und Leistungsfähigkeit der Messtechnik werden Angaben zum Informationsgewinn gemacht. Es folgen Hinweise zu den Anwendungsgrenzen des Monitorings und zur Qualitätssicherung, sofern Erfahrungswerte vorhanden sind.

In einem zweiten Teil werden in einer Beispielsammlung ausgewählte Monitoringmaßnahmen und deren Ergebnisse beschrieben. Es werden die Monitoringgründe, die für das Monitoring bedeutsamen Bauwerksmerkmale und das Ziel der Messungen aufgeführt. Neben den übergeordneten Gründen werden die verwendete Messtechnik, die Zuständigkeiten im Monitoringprozess, der Informationsgewinn und das Datenmanagement beschrieben.

Ergänzend zur Darstellung des Stands der Technik und der Beispielsammlung von Monitoringanwendungen werden zusätzliche Erfahrungswerte aus den Fragebögen insbeson-

dere zur Ausschreibung und Vergabe und den Zuständigkeiten der Akteure im Monitoringprozess in einer statistischen Auswertung analysiert und dargestellt.

Documentation of practical knowledge monitoring of bridges

The increase of traffic loading over the last decades (load and frequency) combined with the ageing infrastructure of bridges in Germany requires maintenance work to retain the functionality of the road network. The increase of heavy loading leads to a permanently high load factor and an accelerated ageing. The resulting condition of the structure may require traffic restrictions or a limitation of the remaining service life. Strengthening or replacement of all impacted structures, especially older bridges, is not feasible in the short term due to limited capacities and increased funding requirements. Therefore, alternative maintenance strategies need to be adopted to maintain the performance of the road network. Structural health monitoring can be included as a tool for maintenance strategies to extend the reliable service life of bridges. The strategic use of monitoring is possible throughout the entire service life to allow an early reaction to changes in the structural condition.

Structural health monitoring is a specialist service. At present, there is limited experience with the use and benefits of monitoring and its integration into maintenance strategies. The Federal Highway Research Institute (Bundesanstalt für Straßenwesen) conducted a national survey on the use of monitoring among the federal departments of transportation. From the reported data, monitoring projects were selected for a detailed collection of practical experience and knowledge using questionnaires. The objective of the documentation of practical knowledge is to show the state of the art of bridge monitoring and application potentials to encourage a systematic implementation of monitoring. The documentation presents practical data about the possible areas of monitoring applications, the performance and the limits of bridge monitoring and intends to provide a basis of knowledge for future tendering, planning and implementation of bridge monitoring.

In the first part, the state of the art of bridge monitoring is described and divided into monitoring objectives. The monitoring objectives are mainly based on the detection of different structural reactions, e.g. the detection of deflections or crack development. The measurement methods used in practice are assigned to the measurement objectives. In addition to information on the functionality and performance of the measurement technology, details are given regarding the information obtained from measurement data. This is followed by information on the limits of monitoring and on quality control, as far as practical knowledge is available.

In a second part, chosen monitoring projects are described in a collection of monitoring examples. The objectives of the monitoring process are described in detail, including the motivation for monitoring, the characteristics of the structure relevant for monitoring and the objective of the measurements. In addition to the general objectives, the used measurement technology, the responsibilities during the monitoring process, the gain of information and the data management are described.

In addition to the presentation of the state of the art and the collection of examples of monitoring projects, additional information from the questionnaires, in particular on tendering and contracting and the responsibilities during the monitoring process, are analysed and presented in a statistical evaluation.

Inhalt

Abkürzungen	9
Definitionen	10
1 Einleitung	14
1.1 Veranlassung	14
1.2 Zielsetzung und Vorgehen	15
2 Brückenmonitoring	17
2.1 Begriffe und Definitionen	17
2.2 Regelwerke und Merkblätter	19
2.3 Ausschreibung und Vergabe	20
2.4 Qualitätssicherung	21
2.5 Wirtschaftlichkeit	21
3 Stand der Technik Monitoring	24
3.1 Allgemeines	24
3.2 Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung	24
3.2.1 Messtechnik	25
3.2.2 Informationsgewinn und Datenmanagement	30
3.2.3 Ausführung des Messsystems	30
3.2.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	31
3.2.5 Anwendungsgrenzen	31
3.2.6 Qualitätssicherung	32
3.3 Temperaturmessung	32
3.3.1 Messtechnik	32
3.3.2 Informationsgewinn und Datenmanagement	34
3.3.3 Ausführung des Messsystems	35
3.3.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	37

3.3.5	Anwendungsgrenzen	37
3.3.6	Qualitätssicherung	37
3.4	Feuchtigkeitsmessung	37
3.4.1	Messtechnik	38
3.4.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	40
3.4.3	Ausführung des Messsystems	41
3.4.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	42
3.4.5	Anwendungsgrenzen	43
3.4.6	Qualitätssicherung	43
3.5	Korrosionsmessung	43
3.5.1	Messtechnik	45
3.5.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	49
3.5.3	Ausführung des Messsystems	49
3.5.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	50
3.5.5	Anwendungsgrenzen	51
3.5.6	Qualitätssicherung	51
3.6	Messtechnische Erfassung der Tragwerksverformungen	52
3.6.1	Messtechnik	52
3.6.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	55
3.6.3	Ausführung des Messsystems	56
3.6.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	57
3.6.5	Anwendungsgrenzen	58
3.6.6	Qualitätssicherung	59
3.7	Messungen von Verschiebungen	59
3.7.1	Messtechnik	60
3.7.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	61
3.7.3	Ausführung des Messsystems	62
3.7.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	64
3.7.5	Anwendungsgrenzen	64
3.7.6	Qualitätssicherung	64
3.8	Messungen von Neigungsänderungen	64
3.8.1	Messtechnik	65
3.8.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	65
3.8.3	Ausführung des Messsystems	66
3.8.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	67
3.8.5	Anwendungsgrenzen	69

3.8.6	Qualitätssicherung	69
3.9	Messung des Schwingungsverhalten	69
3.9.1	Messtechnik	69
3.9.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	70
3.9.3	Anregungsmöglichkeiten zur Messung der Eigenfrequenzen und Dämpfungen	71
3.9.4	Ausführung des Messsystems	72
3.9.5	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	75
3.9.6	Anwendungsgrenzen	75
3.9.7	Qualitätssicherung	76
3.10	Messung der tatsächlichen Schwingbreite	77
3.10.1	Messtechnik	77
3.10.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	78
3.10.3	Ausführung des Messsystems	80
3.10.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	81
3.10.5	Anwendungsgrenzen	82
3.10.6	Qualitätssicherung	83
3.11	Rissmonitoring	83
3.11.1	Messtechnik	84
3.11.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	88
3.11.3	Ausführung des Messsystems	88
3.11.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	88
3.11.5	Anwendungsgrenzen	89
3.11.6	Qualitätssicherung	89
3.12	Dehnungs- und Kraftmessung (Stahl)	89
3.12.1	Messtechnik	90
3.12.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	93
3.12.3	Ausführung des Messsystems	95
3.12.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	96
3.12.5	Anwendungsgrenzen	97
3.12.6	Qualitätssicherung	97
3.13	Schallemissionsanalyse	98
3.13.1	Messtechnik	99
3.13.2	Informationsgewinn und Datenmanagement	99
3.13.3	Ausführung des Messsystems	101
3.13.4	Anwendungsziele und Anwendungsbereiche	102

3.13.5	Anwendungsgrenzen	102
3.13.6	Qualitätssicherung	103
3.14	Ausblick auf weitere Messsysteme und Konzepte	103
3.14.1	Digitale Bildaufnahme mittels unbemannter Fluggeräte	104
3.14.2	Verteilte faseroptische Sensoren	108
3.14.3	Konzept der Nullmessung	113
4	Erfahrungssammlung Monitoring	116
4.1	Allgemeines	116
4.2	Länderabfrage – Bestandsaufnahme Monitoring	117
4.2.1	Bauwerksdaten	117
4.2.2	Angaben zum Monitoring	118
4.3	Beispielsammlung – Bestandsaufnahme Monitoring	120
4.3.1	Bauwerksdaten	120
4.3.2	Messtechnik und Messsysteme	121
4.4	Ausschreibung und Vergabe	126
4.4.1	Leistungsbeschreibung	126
4.5	Monitoringprozess	131
4.5.1	Lebenszyklus Bauwerksmonitoring	131
4.5.2	Notwendigkeit Monitoring	132
4.5.3	Monitoringdauer	132
4.5.4	Komplexität Bauwerksmonitoring	133
4.5.5	Zuständigkeit der Akteure im Monitoringprozess	133
4.5.6	Verfügbarkeit der Daten	139
	Literatur	141
	Übersicht der Publikationen der Bundesanstalt für Straßenwesen zum Thema Monitoring von Brücken- bauwerken	156
	Bilder	158
	Tabellen	165

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen
 BAST-Archiv ELBA unter: <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Abkürzungen

A/D	Analog-Digital
AE	Acoustic Emission
AMR	Anisotropic Magnetoresistance Sensors
BRIMOS	Bridge Monitoring System
CNN	Convolutional Neural Network
CSV	Comma Separated Values
dB	Decibel
DC	Direct Current (Gleichstromausgang)
DGzFP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
DMS	Dehnungsmessstreifen
ENB	Ersatzneubau
FBG	Faser-Bragg-Gitter
FE	Finite Elemente
FFT	Fast Fourier-Transformation
GPM	Galvanostatische Pulsmessung
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HS-WIM	High Speed Weigh-in-Motion
LDV	Laser-Doppler-Vibrometer
LiDAR	Light Detection and Ranging
LKW	Lastkraftwagen
LS-WIM	Low Speed Weigh-in-Motion
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-Systems
MRE	Multiringelektrode
ms	Millisekunde (millisecond)
NMR	Nuclear Magnetic Resonanz, Kernspinresonanz
NRR	Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)
ns	Nanosekunde (nanosecond)
PE	Polyethylen
ppm	Mikrometer pro Meter ($\mu\text{m}/\text{m}$)
PVC	Polyvinyl Chloride
RFID	Radio-Frequency-Identification
RH	Relative Humidity
RMS	Root Mean Square
RTMS	Road-Traffic-Management-System
SHM	Structural Health Monitoring
SpRK	Spannungsrissskorrosion
TEM	Two-Electrode-Method
UAS	Unmanned Aircraft Systems
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UFF	Universal File Format
WAV	Waveform Audio File Format
WIM	Weigh-in-Motion
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Definitionen

Abhebekontrolle	Ein Verfahren zur Messung der Kraft eines Spannglieds mittels einer hydraulischen Presse, wobei die Kraft mit Hilfe eines Manometers gemessen wird.
Analog-Digital-Wandler	Ein Gerät zur Umwandlung analoger Signale in ein digitales Format.
Ankündigungsverhalten	Ein Nachweis über das Vorhandensein einer Ankündigung geeigneter Warnsignale vor Erreichen eines tatsächlich kritischen Zustandes (z. B. erkennbare Rissbildungen im Beton).
Biegesteifigkeitsansatz	Eine Methode zur Bestimmung der Kraft in einem Kabel anhand der dynamischen Messungen unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Kabels.
Magnetische Hystereseschleife (B-H-Kurve)	Ein Diagramm, das die Interaktion zwischen den mechanischen und magnetischen Eigenschaften von ferromagnetischen Materialien beschreibt.
Durchgangsansatz	Eine Methode zur Bestimmung der Kraft in einem Kabel anhand der dynamischen Messungen unter Berücksichtigung des Durchhangs des Kabels.
elektrische Dehnungsmessstreifen (DMS)	Ein Sensor zur Messung der Längenänderung des Bauteils (Dehnung) auf der Grundlage der gemessenen Widerstandsänderung.
Emissionssensor	Ein Sensor, der die durch eine elastische Welle verursachte Oberflächenverschiebung in ein elektrisches Signal umwandelt, das von einem Messgerät verarbeitet werden kann. Es handelt sich meist um einen piezoelektrischen Resonanz- oder Breitbandsensor für einen Frequenzbereich von ca. 20 kHz bis 2 MHz.
Faser-Bragg-Gitter-Sensoren	Optische Frequenzfilter, die in den Kern von Lichtwellenleitern „eingeschrieben“ sind. Die äußeren Einwirkungen auf die Faser (Dehnung und Temperatur) können aus der resultierenden Änderung der Bragg-Wellenlänge umgerechnet werden.
Fast Fourier Transformation	Ein Algorithmus, der die diskrete Fourier-Transformation berechnet, welche ein Hilfsmittel zur Umwandlung bestimmter Arten von Funktionssequenzen in andere Darstellungsarten ist (z. B. Umwandlung der Zyklusform einer Wellenform in sinusförmige Elemente).
Galvanostatische Pulsmessung (GPM)	Die ist die effizienteste Methode zur Bestimmung des Polarisationswiderstands. Die Messung erfolgt durch Anlegen eines galvanostatischen Impulses zusammen mit einem weiteren Strom vom Außenring.
Gleichung der schwingenden Saite	Eine Methode zur Bestimmung der Kraft in einem Kabel anhand dynamischer Messungen, die auf der einfachen Beziehung zwischen der Zugkraft, der Grundfrequenz, der Schwingungslänge und der Masse pro Längeneinheit beruht. Bei dieser Methode wird die Biegesteifigkeit des Kabels vernachlässigt.

Grundmoment M_0	Das Biegemoment auf einen Spannbetonüberbau infolge ständiger Lasten und Temperatur.
Hsu-Nielsen-Quelle (Bleistiftminenbruch)	Ein Kalibrierungsverfahren für die Ankopplungsqualität des Schallemissionssystems an das Bauwerk unter Verwendung einer reproduzierbaren künstlichen Schallemissionsquelle, die mit realen AE-Quellen vergleichbar ist.
induktiver Wegaufnehmer	Ein Sensor zur Messung der Wegänderung auf der Grundlage der Änderung der Induktivität und Impedanz einer stromdurchflossenen Spule durch die Lageänderung eines Eisenteils darin, das mit dem Element verbunden ist, dessen Wegänderung erfasst werden soll.
Instrumentierte Bohrkern	Eingebettete Bohrkern aus Beton, die mit verschiedenen Sensorarrays zur Überwachung der Korrosion im Bauwerk instrumentiert sind.
kapazitiver Wegaufnehmer	Ein Sensor zur Messung der Wegänderung unter Verwendung der ermittelten Kapazitätsänderung auf der Grundlage entweder der gemessenen Widerstandsänderung oder der gemessenen Frequenzänderung.
Kompass-Sensor	Ein magnetoresistiver Neigungssensor, der das äußere Magnetfeld der Erde misst.
Kraftmessdose	Ein Kraftaufnehmer, der eine Kraft in ein elektrisches Signal umwandelt, das gemessen werden kann.
Magnetoresistive Neigungssensoren	Neigungssensoren, die die Neigungsänderung auf der Grundlage der resultierenden Widerstandsänderung eines ladungstragenden Materials in Bezug auf ein Magnetfeld messen.
MEMS-Sensoren	Hochempfindliche und temperaturstabile Neigungssensoren, die die Neigungsänderung mit Hilfe des kapazitiven Messprinzips ermitteln, indem sie die Kapazitätsänderung messen, die sich aus der Änderung des Abstands zwischen der inneren Masse und dem Sensorkörper ergibt.
Messung des Makroelementstromes	Ein Messverfahren zur Erfassung des Korrosionsstroms und zur Abschätzung des Massenverlustes in der Bewehrung durch den Einbau künstlicher Anoden (Makrozellen) oder durch mechanisches Schneiden der Bewehrung.
Messverstärker	Ein elektronischer Verstärker, der das Signal vom Sensor erfasst, verarbeitet und an das A/D-Subsystem übermittelt.
Neigungssensoren	Ein Sensor zur Messung der Neigungsänderungen durch Umwandlung der resultierenden Abweichung eines gravitationsabhängigen Sensors (Pendel) in eine elektrische Größe in Bezug auf das Instrumentengehäuse oder die Kontaktfläche.
Polarisationswiderstand	Sie stellt den Korrosionswiderstand (Polarisation) dar und wird über die lineare Beziehung zwischen dem Potenzial E und dem Strom I bestimmt.

Potenzialdämpfung Methode	Ein Messverfahren zur Messung des Polarisationswiderstandes, bei dem mehrere Referenzelektroden in festen Abständen zueinander angeordnet sind, ein bestimmter Potentialsprung angelegt und die daraus resultierende Potenzialdämpfung aufgezeichnet wird.
Potenzialmessung	Ein Verfahren zur Bestimmung des Ortes und des Ausmaßes des Korrosionsangriffs auf die Bewehrung durch die Messung des Potentials unter Verwendung einer Referenzelektrode mit einem bekannten und konstanten Potenzial.
Rainflow-Verfahren	Ein Zählalgorithmus, der zur Bestimmung der Anzahl von Ermüdungszyklen in einem Last-Zeit-Verlauf verwendet wird, indem eine Belastungssequenz mit veränderlicher Spannung in Bezug auf die Ermüdungssicherheit in einen äquivalenten Bereich von Spannungsumkehrungen mit konstanter Amplitude umgewandelt wird.
Rissdoppelamplitude	Die gemessene Rissbreitendifferenz zwischen einem Maximalwert und seinem benachbarten Minimum.
Schallemissionsanalyse	Eine Messtechnik, die auf der Erfassung dynamischer Verschiebungen im Nanometerbereich an der Oberfläche des Messobjekts beruht, die durch die bei plötzlichen Spannungsänderungen im Material auftretenden Schallwellen (elastische Spannungswellen) verursacht werden.
Schwellwertüberwachung	Eine direkte Überwachung eines Defizits zusammen mit einem Alarmmechanismus bei Überschreiten eines vordefinierten Schwellenwertes.
Schwingsaitenaufnehmer	Ein Sensor zur Messung der Abstandsänderung basierend auf der resultierenden Änderung der Resonanzfrequenz eines gespannten schwingenden Drahtes.
Servo-Inclinometer	Eine spezielle Form von MEMS-Neigungssensoren, die eine hohe Empfindlichkeit bietet und keinen Gleichstromausgang hat.
Spannungsrissskorrosion	Die Korrosion eines Werkstoffs, die durch die gleichzeitige Einwirkung eines Korrosionsmediums und einer statischen Zugbeanspruchung entsteht.
Transiente Signalereignisse (Hits)	Schallemissionssignale, die einen erkennbaren Anfang und ein erkennbares Ende haben.
Versuchsgrenzlast (Stop criteria)	Ein Kriterium zur Festlegung der maximalen Versuchslast, um zu gewährleisten, dass während des Versuchs keine unzulässigen strukturellen Schäden auftreten, die die Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit erheblich beeinträchtigen könnten.
Weigh-in-Motion-System (WIM)	Ein System von Sensoren im oder auf dem Belag zur Erfassung des gesamten Verkehrsaufkommens unter normalen Verkehrsbedingungen, ohne den Verkehrsfluss zu stören.
WENNER-4-Punkt-Messung	Ein Messverfahren zur Erfassung des elektrischen Widerstands von Beton zur Abschätzung der Korrosionsgefahr und zur Charakterisierung des Feuchtigkeitsgehalts.

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)	Eine Gruppe von Prüfverfahren, die es ermöglichen, ein Material, ein System oder ein Bauteil zu bewerten und Daten darüber zu erfassen, ohne eine Schädigung vorzunehmen.
Statische Messung	Messung zeitlich langsam stattfindender Veränderungen (FSV, 2022)
Dynamische Messung	Messungen mit zeitlich stark veränderlichen Messgrößen (FSV, 2022)
Globales Monitoring	Messtechnische Erfassung des Gesamtverhaltens des Bauwerks oder wesentlicher Bauteile (z. B. Hauptträger) (FSV, 2022)
Lokales Monitoring	Messtechnische Erfassung des Verhaltens einzelner Bauteile (z. B. Verbindungen, Lager) (FSV, 2022)
Vergleichsgröße	Der Parameter, der zur Bewertung der zu analysierenden Funktion herangezogen werden kann. Diese Vergleichsgröße kann jedoch nicht direkt gemessen werden, daher ist eine korrelierte Messgröße zu definieren

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Der überproportionale Anstieg des Schwerverkehrs der letzten Jahrzehnte (Fahrzeuggewicht, Achslasten, Häufigkeit etc.) in Verbindung mit der Altersstruktur der Brücken erfordert Erhaltungsmaßnahmen zur Verbesserung des Zustandes insbesondere für den älteren Brückenbestand. Das steigende Schwerlastverkehrsaufkommen führt zu einer permanent hohen Brückenauslastung mit den negativen Konsequenzen einer beschleunigten Alterung und erhöhtem Verschleiß. Hohe Achslasten, teilweise auf Überladungen oder falsche Beladungen der LKW zurückzuführen, setzen insbesondere den Autobahnbrücken zu. Bei Brücken der Brückenklasse 60 oder geringer (Bild 1) sind die einstmals vorhandenen Tragreserven inzwischen teilweise aufgebraucht. Zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes bedarf es Brückenmodernisierungen wie Verstärkungen oder Ersatzneubauten (BMDV, 2022).

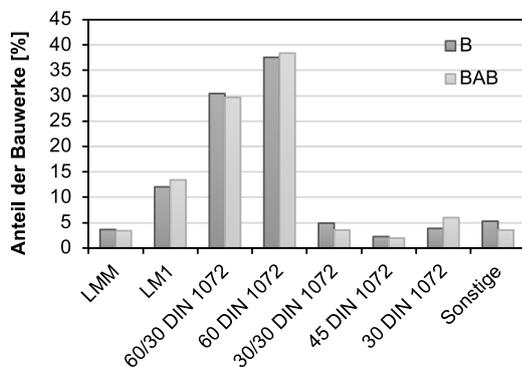


Bild 1: Tragfähigkeitsverteilung für Brücken im Zuge der Bundesfernstraßen (B) und Bundesautobahnen (BAB) anteilig nach Anzahl der Teilbauwerke (BMDV, 2022)

Die Brückenmodernisierung hat noch nicht den geplanten Zustand erreicht, weshalb weitere Anstrengungen hinsichtlich Planungs- und Baubeschleunigung notwendig werden (Bild 2). Hierfür ist in den kommenden Jahrzehnten mit einem erhöhten Mittelbedarf zu rechnen (Bild 3). Da neben fehlenden Kapazitäten für die Modernisierung des Infrastrukturnetzes, wie Verstärkungsmaßnahmen und Ersatzneubauten wirtschaftliche Methoden zur Verlängerung der Nutzungsdauer zu ergreifen sind, gewinnt der Einsatz von Brücken-

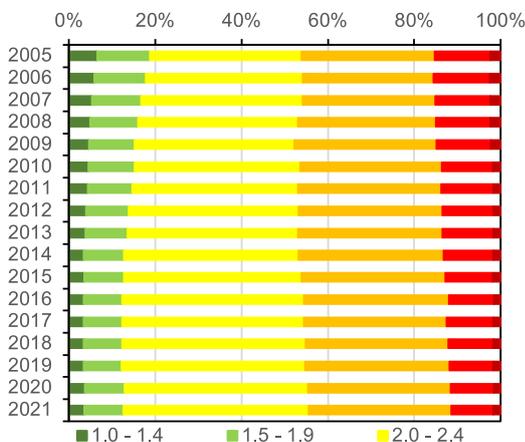


Bild 2: Zustandsnotenverteilung für Brücken an Bundesfernstraßen im Jahresvergleich anteilig nach Brückenfläche (BMDV, 2022)

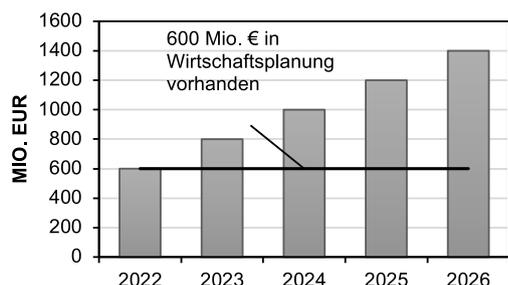


Bild 3: Erforderlicher Mittelaufwuchs für die Modernisierung von Autobahnbrücken (BMDV, 2022)

monitoring insbesondere für die Erhaltung der Leistungsfähigkeit von Bestandsbauten zunehmend an Bedeutung (BMDV, 2022).

1.2 Zielsetzung und Vorgehen

Ziel der Erfahrungssammlung ist die Sammlung und Beschreibung bereits durchgeführter Monitoringmaßnahmen an Brückenbauwerken der Bundesfernstraßen. Im Rahmen der Erfahrungssammlung sollen die Erfahrungswerte zu den Anwendungsbereichen, der Leistungsfähigkeit und Grenzen von Brückenmonitoring dargestellt und eine Grundlage für die zukünftige Ausschreibung, Planung und Umsetzung von Brückenmonitoring bieten.

In Kapitel 2 werden Grundlagen zu den Regelwerken, Ausschreibung und Vergabe und Qualitätssicherung von Monitoringanwendungen dargelegt. In Kapitel 3 werden Messverfahren nach dem derzeitigen Stand der Kenntnis vorgestellt. Die Messverfahren werden dem Messziel zugeordnet und die Messtechnik sowie Hinweise zu Informationsgewinn, Ausführung, Anwendungsbereiche, Anwendungsgrenzen und Qualitätssicherung beschrieben. In Tabelle 1 werden die in Kapitel 3 beschriebenen Messsysteme entsprechend ihres Messziels aufgeführt. Kapitel 4 gibt einen statistischen Überblick über die gesammelten Erfahrungswerte aus der Länderabfrage und den von den Straßenbauverwaltungen, Ingenieurbüros und Messdienstleistern bereitgestellten Informationen zu den erfassten Monitoringanwendungen. Die ausgewählten Monitoringanwendungen werden im Rahmen der Beispielsammlung „Monitoring von Brückenbauwerken“ vorgestellt. Neben Notwendigkeit, Beschreibung, Ziel und Nutzen der ausgeführten Messsysteme werden Informationen zum Informationsgewinn und Datenmanagement der eingesetzten Messverfahren vorgestellt.

Messziel	Messverfahren	Messgröße	Messort	Kurzzeit /Langzeit ¹	stat./dyn. ²
Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung	Streifensensor	Kraft	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Plattensensor	Kraft	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Lastzelle	Kraft	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Laser-Scanner	Bildaufnahme	verteilt	Langzeit	ereignisb.
	Instrumentierte Lager und Dehnfugen	Weg, Dehnung	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Magnetfeldsensoren	Magnetfeld	lokal	Langzeit	ereignisb.
	Bildüberwachung	Bildaufnahme	verteilt	Langzeit	ereignisb.
Temperaturmessung	Widerstandsthermometer	Widerstand	lokal	Langzeit	statisch
	Thermoelemente	Thermospannung	lokal	Langzeit	statisch
	Faseroptische Temperaturmessung	Wellenlängen	verteilt	Langzeit	statisch
Feuchtigkeitsmessung	Multiringelektrode	Widerstandsprofils	lokal	Langzeit	statisch
	RFID-Feuchtesensor	Leitfähigkeit	lokal	Langzeit	statisch
	Kernspinresonanz	Wechselspannung	lokal	Langzeit	statisch
	Holzfeuchteelektrode	Widerstand	lokal	Langzeit	statisch

Tab. 1: Übersicht der Messziele und beschriebener Messverfahren in Kapitel

Messziel	Messverfahren	Messgröße	Messort	Kurzzeit /Langzeit ¹	stat./dyn. ²
Korrosionsmessung	Polarisationswiderstand	Polarisationswiderstand	lokal	Kurzzeit	statisch
	Messung des elektrischen Betonwiderstands	Widerstand	lokal	Langzeit	statisch
	Messung des Makroelementstromes	Makroelementstrom	lokal	Langzeit	statisch
	Potenzialmessung	Potenzial	lokal	Kurzzeit	statisch
	Anodenleiter	Makrozellenstrom	lokal	Langzeit	statisch
	Drahtsensoren	Widerstand	lokal	Langzeit	statisch
Überwachung der Tragwerksverformungen	Elektronische Schlauchwaage	Weg	integral	Langzeit	statisch
	Faser-Bragg-Gitter	Wellenlängen	lokal, integral	Langzeit	statisch
	Digital-Nivelliere	Weg	lokal	Kurzzeit	statisch
	Tachymeter	Weg	lokal	Kurzzeit	statisch
	Laser-Doppler-Vibrometrie	Weg	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Induktive Wegaufnehmer	Weg	lokal, integral	Langzeit	stat./dyn.
Messung von Verschiebungen	Laseroptische Distanzsensoren	Weg	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Induktive Wegmesssysteme	Weg	lokal, integral	Langzeit	stat./dyn.
	Elektronische Seilzugsensoren	Weg	lokal, integral	Langzeit	statisch
Messung von Neigungsänderungen	Neigungssensor	Neigung	lokal	Langzeit	stat./dyn.
Messung des Schwingungsverhaltens	Beschleunigungssensoren	Beschleunigung, Geschwindigkeit	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Laser-Doppler-Vibrometrie	Weg	lokal	Langzeit	stat./dyn.
Messung der tatsächlichen Schwingbreite	Elektrische Dehnungsmessstreifen	Dehnung	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Faser-Bragg-Gitter	Dehnung	lokal, integral	Langzeit	statisch
	Wegaufnehmer	Weg	lokal, integral	Langzeit	stat./dyn.
Rissmonitoring	Induktiver Wegaufnehmer	Weg	lokal, integral	Langzeit	stat./dyn.
	Schwingsaitenaufnehmer	Weg	lokal, integral	Langzeit	statisch
	Photogrammetrie	Bilddaufnahme	flächig	Kurzzeit	stat./dyn.
Dehnungs- und Kraftmessung (Stahl)	Dehnungsmessstreifen	Dehnung	lokal	Langzeit	stat./dyn.
	Dynamische Spannkraftermittlung	Beschleunigung	lokal	Langzeit	Dyn.
	Magnetoelastische Messungen	Kraft	lokal	Kurzzeit	statisch
	Kraftmessdose	Kraft	lokal	Kurzzeit	statisch
Schallemissionsanalyse	Körperschallsensor	Schall	flächig	Langzeit	ereignisb.
Ausblick auf weitere Messsysteme und Konzepte	Digitale Bilddaufnahme	Bilddaufnahme	flächig	Langzeit	ereignisb.
	Faseroptische Sensoren	Dehnung, Temperatur	quasi-kontinuierlich	Langzeit	statisch
	Konzept der Nullmessung	-	-	Kurzzeit	-

¹ In der Tabelle werden den Messsystemen die übliche Eignung für Kurzzeit- und Langzeitmessungen zugeordnet. Messsysteme mit dem Verweis Langzeitmonitoring können ebenfalls für das Kurzzeitmonitoring eingesetzt werden. Messsysteme mit dem Verweis Kurzzeitmonitoring benötigen ggf. aufwendigere technische Anforderungen für den Langzeiteinsatz, falls möglich.

² statisch (stat.), dynamisch (dyn.), ereignisbedingt (ereignisb.)

Tab. 1: Übersicht der Messziele und beschriebener Messverfahren in Kapitel (Fortsetzung)

2 Brückenmonitoring

In diesem Kapitel werden die in dieser Erfahrungssammlung verwendeten Begriffe und Definitionen erläutert. Es wird ein Überblick über die derzeit veröffentlichten Regelwerke und Merkblätter zur Planung, Ausführung und Betrieb von Brückenmonitoring und Verwendung der Messdaten gegeben. Ergänzend zum Kapitel „Stand der Technik Monitoring“ werden allgemeine Aspekte zur Ausschreibung und Vergabe, Qualitätsmanagement und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Brückenmonitoring dargestellt.

2.1 Begriffe und Definitionen

Monitoring

Monitoring beschreibt den Gesamtprozess einer systematischen messtechnischen Bauwerksüberwachung zur Erfassung von Bauwerksreaktionen oder Einwirkungen über einen repräsentativen Zeitraum (DBV, 2018). Im Allgemeinen lässt sich Monitoring als Aufgabe des Beobachtens bedingt aus der Kontinuität und der Veränderung der Beobachtung und das Eingreifen in das System beschreiben. (ZILCH et al., 2009). Monitoring grenzt sich von der zerstörungsfreien Prüfung durch die (z. B. kontinuierliche) Überwachung bzw. Beobachtung des Systems ab.

Gemäß DBV Merkblatt Brückenmonitoring (DBV, 2018) können Monitoringaufgaben nach ihrem Überwachungszeitraum in die folgenden Begrifflichkeiten eingeordnet werden:

Kurzzeitmonitoring

Monitoring mit einem Überwachungszeitraum und Datenerfassung über mehrere Minuten bis Tage, z. B.:

- zur messtechnischen Erfassung der Bauwerksreaktion während einer Probelastung bspw. im Zuge der Nachweisführung nach Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie (NRR),
- zur messtechnischen Begleitung kritischer Bau- und Rückbauphasen (VEIT-EGERER et al., 2011).

Langzeitmonitoring

Monitoring basierend auf der Datenerfassung über mehrere Wochen, Monate oder Jahre, z. B.:

- zur Schadensüberwachung und als Frühwarnsystem,
- zur Ermittlung der Gebrauchsbeanspruchung zur Restnutzungsdaueranalyse,
- zur Ermittlung von Kriechverformungen,
- zur Ermittlung von Temperaturprofilen in einem Jahreszyklus.

Dauermonitoring

Monitoring bei einer permanenten Überwachung über die gesamte Restnutzungsdauer des Bauwerks ohne geplantes Ende, z. B.:

- Windmessung auf Großbrücken,
- Korrosionsmonitoring zur Überprüfung der Fahrbahnabdichtung,

- Überwachungsmaßnahme bei rechnerischen Defiziten,
- messtechnische Überbrücken bei erforderlichen Ertüchtigungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung der Nutzung.

Dauermonitoringsysteme werden vermehrt in Überwachungskonzepten beispielsweise zur Überprüfung der Wirksamkeit von Verstärkungsmaßnahmen oder als kompensierende Überwachungsmaßnahme für Bestandsbauten zur Sicherstellung der verkehrlichen Nutzung bei gegebener Tragfähigkeit eingesetzt. Zur Rechtfertigung eines Absenkens der Teilsicherheitsbeiwerte können kompensierende Überwachungsmaßnahmen als additive Sicherheit zur Sicherstellung eines ausreichenden Zuverlässigkeitsniveaus eingesetzt werden (BASt).

Abtastrate (Samplingrate)

Häufigkeit der Messung (Sample [S]) je Zeiteinheit. Die Einheit wird häufig in Sekunde oder in [Hz] angegeben (1 Hz = 1 S/s).

Dynamische Messung

Messung einer zeitlich veränderlichen Messgröße oder einer Messgröße deren Wert sich aus der zeitlichen Veränderung anderer Größen ergeben (DIN 1319-1, 1995).

Statische Messung

Messung einer zeitlich unveränderlichen Messgröße nach einem Messprinzip, welches nicht auf einer zeitlichen Änderung anderer Größen beruht (DIN 1319-1, 1995).

Messbereich

Physikalischer Wertebereich der Messgröße, angegeben durch Anfangswert und Endwert, in welchem das Messsystem innerhalb der festgelegten Messabweichungen arbeitet (DIN 1319-1, 1995; DGZfP, 2022).

Messunsicherheit

Quantitatives Maß des Messkennwerts zur Annäherung der Messergebnisse an den wahren Wert der Messgröße (DIN 1319-1, 1995; FSV, 2022).

Messgröße

Physikalische gemessene oder zu messende Größe im Zuge einer Messung. Der Wert der Messgröße wird über einen Zahlenwert und eine Einheit ausgedrückt (DIN 1319-1, 1995).

Messziel

Zweck zur Durchführung der Messungen.

Messsystem, Messeinrichtung

System bestehend aus unterschiedlichen Elementen zur Aufnahme, Weiterleitung und erforderlichenfalls Verarbeitung von Messwerten (DIN 1319-1, 1995; FSV, 2022).

Messobjekt

Bauwerk an dem die Messgrößen erfasst werden (FSV, 2022).

Sensor, Messwertaufnehmer

Teil einer Messeinrichtung zur unmittelbaren Erfassung der Messung (FSV, 2022).

Überwachung

Zielgerichtet durchgeführte Beobachtungen auf Basis von Messungen (DBV, 2018).

2.2 Regelwerke und Merkblätter

Derzeit stehen keine eingeführten Normen zur Planung, Ausführung oder den Betrieb von Monitoringsystemen für Brückenbauten im (deutschen) normativen Raum zur Verfügung. Eine Auflistung von Regelwerken und Merkblättern, die in Bezug auf das Brückenmonitoring relevant sein können, kann DBV (2018) entnommen werden.

Im Folgenden werden relevanten Merkblätter und Richtlinien beschrieben, die einen direkten Bezug zum Einsatz von Monitoring im Lebenszyklusmanagement von Brücken und zur Einbindung der Messergebnisse in die Bauwerksbeurteilung herstellen.

DBV Merkblatt „Brückenmonitoring – Planung, Ausschreibung und Umsetzung“

Das Merkblatt DBV (2018) beschreibt die Anwendungsmöglichkeiten von Monitoring im Lebenszyklus von Brücken von der Planung über den Betrieb bis zum Rückbau. Das Merkblatt beleuchtet die Funktion und Verantwortlichkeit verschiedener Akteure im Monitoringprozess. Die Akteure werden gemäß ihren Kompetenzen und ihrer Leistung benannt als Auftraggeber, Fachplaner Monitoring, Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen und Fachtechnischer Prüfer. Es wird darauf hingewiesen, dass eine Person je nach Erfahrung mehrere Funktionen ausüben kann.

Der Monitoringprozess wird in die folgenden Phasen aufgeteilt:

- Definition der Fragestellung, Machbarkeitsüberprüfung
- Erstellung eines qualifizierten Monitoringkonzepts
- Ausführungsplanung des Messsystems
- Installation, Betrieb, Datenerhebung
- Datenaufbereitung und Auswertung der Messergebnisse
- Bewertung der Messergebnisse

Den Monitoringphasen werden Basisleistungen und mögliche weiterführende Leistungen für komplexere Monitoringsysteme, Speziallösungen oder erschwerte Randbedingungen zugeordnet. Das Merkblatt beleuchtet außerdem die Aspekte der Qualitätssicherung, das Vorgehen bei Ausschreibung und Vergabe und das Bewertungsverfahren zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung.

DGzFP Merkblatt B 09 „Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken“

Das Merkblatt DGzFP (2022) beschreibt die praktische Planung und Realisierung von Dauermonitoringsystemen für Ingenieurbauwerke mit dem Schwerpunkt auf Brückenbauwerken in Stahl- und Spannbetonbauweise. Während in DBV (2018) der Fokus auf der Definition der Leistungen im Monitoringprozess liegt, stellt DGzFP (2022) ein Hilfsmittel zur technischen Planung, zum Aufbau und zum Betrieb von Monitoringsystemen dar.

Neben den Zielen des Dauermonitorings werden Hinweise zur Konzeption von Dauerüberwachungssystemen gegeben. Es werden praxisnahe technische Empfehlungen zur Konzeptionierung der Messanlage wie z. B. zur Auswahl der Messstellen, Sensoranbindung, Spannungsversorgung und der Datenerfassung an der Messzentrale sowie mögliche Fehlerquellen aufgezeigt. Das Merkblatt gibt einen Überblick über die Messziele, die Datenanalyse und Anwendungsgrenzen bewährter Messsysteme für die Dauerüberwachung. In Praxisbeispielen werden die Ausführung und der Nutzen unterschiedlicher Monitoringanwendungen erläutert.

Nachrechnungsrichtlinie

Die Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie) (BMVBS, 2011) gilt im Rahmen der Bauwerkserhaltung (in Deutschland) für die Bewertung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von bestehenden Straßenbrücken, die nach altem Normungsstand geplant und errichtet wurden. Durch einen erweiterten Handlungsrahmen soll Ingenieuren ermöglicht werden, die Tragreserven des Bauwerks innerhalb des zulässigen Zuverlässigkeitsniveaus gemäß DIN EN 1990 stärker auszunutzen.

Die Nachweisführung erfolgt in einem gestuften Nachweisverfahren, bei welchem ab der Stufe 3 am Bauwerk ermittelte Messergebnisse in die Nachweisführung einbezogen werden können. In der Richtlinie wird z. B. auf Messungen bei Probelastungen unter Gebrauchslast verwiesen. Ziel ist die messtechnische Erfassung des tatsächlichen Tragverhaltens und Annäherung an eine realistische Beschreibung des Bauwerkverhaltens z. B. zur Validierung des Rechenmodells. Die Nachrechnung nach Stufe 3 erfordert eine Abstimmung mit der Oberen Straßenbaubehörde der Länder (BMVBS, 2011).

DIN 1076

In der DIN 1076 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung“ (DIN 1076:1999-11, 1999) werden messtechnische Verfahren in Bezug auf vermessungstechnische Kontrollmessungen genannt. Bei der Vermutung einer geometrischen Veränderung ist eine messtechnische Überprüfung der senkrechten und waagrechten Verschiebung, Neigung und Durchbiegung im Vergleich zur Nullmessung durchzuführen.

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr verweist in BMVBS (2013) darauf, dass ein Monitoring die handnahe Bauwerksprüfung nach DIN 1076 nicht ersetzen kann. Das Bauwerksmonitoring stellt für die Bauwerksprüfung ein ergänzendes Hilfsmittel für bestimmte Fragestellungen dar, kann normativ aber nicht als Ersatz der handnahen Prüfung herangezogen werden.

2.3 Ausschreibung und Vergabe

Unter den Begrifflichkeiten „Ausschreibung und Vergabe“ werden die organisatorischen Prozesse zusammengefasst, die insbesondere im Vorfeld (aber auch während) der jeweiligen Monitoringmaßnahme stattfinden. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei Monitoringmaßnahmen in den meisten Fällen um Spezialdienstleistungen handelt, die sehr stark in ihrer Komplexität - resultierend aus der jeweils verfolgten Zielsetzung - schwanken können. Eine sehr kompakte Beschreibung dieser organisatorischen Prozesse kann DBV (2018) entnommen werden. Innerhalb dieser Beschreibung werden verschiedene Unterteilungen vorgenommen, mit dem Ziel, den ggf. komplexen Prozess in Anlehnung an die unterschiedlichen Leistungsphasen der HOAI zu gliedern (Monitoring als einen in Phasen gegliederter Prozess). In Abhängigkeit von der jeweils zu lösenden Aufgabenstellung, einfach oder

komplex, wird dann in der jeweiligen Leistungsdefinierung grundsätzlich zwischen einer detaillierten oder funktionalen Leistungsbeschreibung unterschieden (DBV, 2018).

Die funktionale Leistungsbeschreibung wird dadurch charakterisiert, dass die geplante Monitoringmaßnahme nicht im Detail z. B. bezüglich der geplanten Messtechnik beschrieben, sondern vielmehr durch die zu verfolgende Zielsetzung der Maßnahme ergebnisorientiert definiert wird.

Die detaillierte Leistungsbeschreibungen zeichnet sich dadurch aus, dass bereits zum Zeitpunkt der Ausschreibung alle für die Umsetzung erforderlichen Informationen der geplanten Monitoringmaßnahme (nahezu) vollständig bekannt sind bzw. von der ausschreibenden Stelle gefasst werden können. Innerhalb der nachfolgenden Tabelle 2 werden einige Beispiele möglicher Kriterien und Kenngrößen einer detaillierten Leistungsbeschreibung aufgeführt. Innerhalb des Abschnitts 0 dieses Berichts werden die innerhalb der Erfahrungssammlung analysierten Maßnahmen hinsichtlich der Thematik Ausschreibung und Vergabe analysiert und statistisch ausgewertet.

2.4 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung ist in allen Phasen des Monitorings von der Planung und Ausführung bis zur Bewertung der Messergebnisse sicherzustellen. In DBV (2018) wird die Qualitätssicherung in die Aufgabenbereiche Qualität des Messkonzepts, der Daten und der Bewertung eingeordnet. In Abhängigkeit von der Komplexität kann die Qualitätsprüfung von den ausführenden Akteuren oder von einem externen fachtechnischen Prüfer umgesetzt werden (DBV, 2018). Hierzu können unterschiedliche aufgabenübergreifende Personenqualifikationen notwendig werden. Bei der Erstellung des Messkonzepts sind messtechnische und bautechnische Anforderungen zu prüfen. Je nach Komplexität der Aufgabenstellung ist neben einem Monitoringsachkundigen ein Tragwerksplaner oder Prüfungingenieur hinzuzuziehen. In DGZfP (2022) wird darauf hingewiesen, dass es derzeit keinen Qualifizierungsgrad und nur ein begrenztes Angebot an Schulungsmöglichkeiten für den Bereich der Dauerüberwachung von Bauwerken gibt. Der Nachweis der Qualifizierung kann über den Nachweis der Erfahrung z. B. durch Referenzen erfolgen.

In Kapitel 3 werden Hinweise aus Erfahrungswerten zur technischen Qualitätssicherung der aufgeführten Messtechnik gegeben, sofern vorhanden.

2.5 Wirtschaftlichkeit

Im Rahmen der Bearbeitung der Erfahrungssammlung konnte die Thematik „Wirtschaftlichkeit“ auf Grund zu geringen Erfahrungswerten nicht tiefergehend datenbasiert analysiert werden. Die nachfolgenden Erläuterungen sollen daher vielmehr als Einstieg in diese Thematik verstanden werden. Für weitergehende Informationen wird auf die genannten Literaturquellen verwiesen.

Ein wirtschaftlicher Nutzen des Monitorings kann vorliegen, wenn z. B.:

- durch eine dauerhafte Überwachung des Bauwerks und messtechnische Überprüfung der rechnerischen Annahmen eine Verlängerung der rechnerischen Restnutzungsdauer ermittelt werden kann,
- die Aufrechterhaltung der verkehrlichen Nutzung durch kontinuierliche Bauwerksüberwachung während der Übergangszeit bis zur Ertüchtigung oder zum Ersatzneubau erreicht werden kann,

- durch Verzicht auf verkehrseinschränkende Maßnahmen wie z. B. Sperrung für LKW, Einschränkung für genehmigungspflichtigen Schwerverkehr (Matthias SCHUBERT et al., 2020) die Leistungsfähigkeit des Infrastrukturbauwerks erhalten bleibt,
- durch Verzicht von Verstärkungs- bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen bei rechnerischen Defiziten über die Berücksichtigung von Messergebnissen zu Erfassung des tatsächlichen Tragverhaltens z. B. gemäß Stufe 3 der NRR Ressourcen eingespart werden können, oder
- Monitoringergebnisse als Grundlage der Planung von Erhaltungsmaßnahmen zugrunde gelegt werden und dadurch z. B. eine durch „Zahlenwerte“ entsprechend abgesicherte Priorisierung ermöglicht werden kann.

Die folgenden Bewertungsmethoden können z. B. zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Monitoringmaßnahmen herangezogen werden (HINDERSMANN, 2021):

- Kostenvergleichsrechnung
- Kapitelwertmethode (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007)
- Nutzen-Kosten-Analyse (Matthias SCHUBERT et al., 2020)
- Nutzwertanalyse

Leistungskatalog			
Technische Daten:			
<input type="checkbox"/>	physikalische Größe	<input type="checkbox"/>	Temperaturkoeffizient
<input type="checkbox"/>	Messbereich	<input type="checkbox"/>	Samplefrequenz/Abtastrate
<input type="checkbox"/>	Nennmessweg	<input type="checkbox"/>	Messauflösung
<input type="checkbox"/>	Schutzart nach DIN 40050	<input type="checkbox"/>	Betriebs-/Lagerluftfeuchtigkeit
<input type="checkbox"/>	Betriebstemperaturbereich	<input type="checkbox"/>	Betriebshöhe
<input type="checkbox"/>	Anschlussspezifizierung	<input type="checkbox"/>	Redundanzmessung
<input type="checkbox"/>	Versorgungsspannung	<input type="checkbox"/>	Absolut- / Relativmessung
<input type="checkbox"/>	Linearität	<input type="checkbox"/>	Anforderungen spezieller Störeinflüsse
<input type="checkbox"/>	Messunsicherheit der gesamten Messkette	<input type="checkbox"/>	...
Ausführung:			
<input type="checkbox"/>	Elektrischer Anschluss	<input type="checkbox"/>	max. Gewicht
<input type="checkbox"/>	Anschlussspezifizierung	<input type="checkbox"/>	max. Maße
<input type="checkbox"/>	Anschlusslänge Zuleitung	<input type="checkbox"/>	Netzwerkanschluss
<input type="checkbox"/>	Anzahl Messstellen	<input type="checkbox"/>	Dauerhaftigkeit
<input type="checkbox"/>	Ort Messstellen	<input type="checkbox"/>	...
Datenmanagement			
<input type="checkbox"/>	Datenformat	<input type="checkbox"/>	Datenübertragung
<input type="checkbox"/>	Datenstruktur	<input type="checkbox"/>	Datenübertragungsrate
<input type="checkbox"/>	Datenschnittstelle	<input type="checkbox"/>	Alarmierung im Fehlerfall
<input type="checkbox"/>	Datenspeicherung	<input type="checkbox"/>	Datenarchivierung
<input type="checkbox"/>	Speicherzeitraum	<input type="checkbox"/>	Datenaufbereitung
<input type="checkbox"/>	Speicherrate	<input type="checkbox"/>	Datenauswertung
<input type="checkbox"/>	Rückführbarkeit der Daten	<input type="checkbox"/>	Alarmierungssystem inkl. Alarmwerte
<input type="checkbox"/>	Speichergröße	<input type="checkbox"/>	...
Installation			
<input type="checkbox"/>	Montagehilfen, Zugangstechnik	<input type="checkbox"/>	Störeinflüsse
<input type="checkbox"/>	Installationsstelle Sensortechnik	<input type="checkbox"/>	Vorkehrungen Vandalismus, Diebstahl
<input type="checkbox"/>	Installationsstelle Messzubehör	<input type="checkbox"/>	Austauschbarkeit
<input type="checkbox"/>	Zugänglichkeit	<input type="checkbox"/>	Witterungseinflüsse
Inbetriebnahme			
<input type="checkbox"/>	Testmessung	<input type="checkbox"/>	Einstellung und Dokumentation Nullmessung
<input type="checkbox"/>	Funktionskontrolle	<input type="checkbox"/>	
Wartung und Betrieb			
<input type="checkbox"/>	Betriebszeitraum	<input type="checkbox"/>	Langzeitstabilität
<input type="checkbox"/>	Wartungs- und Kontrollzyklus	<input type="checkbox"/>	Garantie Messtechnik
<input type="checkbox"/>	Instandsetzungsarbeiten	<input type="checkbox"/>	Mindestverfügbarkeit Messtechnik
<input type="checkbox"/>	Bereithaltung Ersatzmesstechnik	<input type="checkbox"/>	Rückbau Messtechnik
<input type="checkbox"/>	max. Unterbrechungsdauer	<input type="checkbox"/>	max. Messdatenausfallrate

Tab. 2: Mögliche Kriterien und Kenngrößen einer detaillierten Leistungsbeschreibung

3 Stand der Technik Monitoring

3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden Monitoringsysteme nach dem derzeitigen Stand der Technik beschrieben. In den Anwendungsfällen der Beispielsammlung wird eine Auswahl der in der Praxis meist angewandten Messsysteme für das Monitoring von Brückenbauwerken vorgestellt. Im folgenden Kapitel werden weitere Messsysteme auf Basis einer Literaturrecherche und Praxisberichten ergänzt. Das Kapitel gliedert sich in die Messziele der Monitoringanwendung. Innerhalb der einzelnen Kapitel werden Messverfahren und Sensoren den einzelnen Messzielen zugeordnet. Neben Angaben zur Funktionsweise und Leistungsfähigkeit der Messtechnik werden Angaben zum Informationsgewinn und Datenmanagement gemacht. Für die einzelnen Sensoren werden Erfahrungswerte zur Ausführung, den Anwendungszielen und -bereichen sowie Anwendungsgrenzen vorgestellt. Es folgen Hinweise zur Qualitätssicherung der Messung, sofern Erfahrungswerte vorhanden sind.

Es ist zu beachten, dass sich einige Messverfahren für unterschiedliche Messziele eignen können. Die Messverfahren und Sensoren werden im Kapitel der Hauptanwendung der Sensorik beschrieben und bei Anwendungsmöglichkeiten für weitere Messziele in den jeweiligen Kapiteln mit einem Verweis versehen.

3.2 Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung

Zur Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung eignen sich z. B. die folgenden Messsysteme:

- Streifensensor (Piezosensor)
- Plattensensor
- Lastzelle
- Laser-Scanner
- Instrumentierte Lager und Dehnfugen
- Magnetfeldsensoren
- Kamera/Bildüberwachung

Die Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung und deren Eintrittshäufigkeit ermöglicht zusammen mit einer statischen Auswertung eine realitätsnahe Beurteilung der Verkehrsbelastung bestehender Brücken. Die Verkehrszählungen können in die Nachweisführung nach NRR z. B. zur Anpassung der Verkehrslastmodelle oder zur Ermittlung eines modifizierten Ermüdungslastmodells herangezogen werden. Verkehrsmessungen können außerdem zur Plausibilisierung verkehrsbedingter Messereignisse im Zuge der Erfassung der Bauwerksreaktion sinnvoll sein. An dieser Stelle muss jedoch angemerkt werden, dass durch die Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung nur der im Messzeitraum vorherrschende Verkehr analysiert werden kann. Informationen bezüglich der in der Vergangenheit erfolgten Beanspruchung können im Idealfall mit den existierenden bzw. in den Regelwerken implementierten Größen verglichen werden. Bezüglich einer zukünftigen Beanspruchung können die Daten für eine Konkretisierung von beispielsweise „globalen“ Prognosen herangezogen werden.

Die tatsächlichen Verkehrslasten können direkt oder indirekt erfasst werden (LUBASCH et al., 2011). Bei der direkten Methode erfolgt die Messung direkt am Lastangriffspunkt mittels einer hierfür geeigneten integrierten Messtechnik in oder auf dem Fahrbahnbelag. Hierfür wurden sogenannte Weigh-in-Motion (WIM) Systeme entwickelt, um das gesamte Verkehrsaufkommen unter regulären Verkehrsbedingungen zu erfassen, ohne den Verkehrsfluss zu stören (JACOB, 2001).

Anhand der Geschwindigkeit der erfassten Fahrzeuge werden WIM-Systeme in Low-Speed (LS) und High-Speed (HS) Systeme unterteilt. LS-WIM-Systeme werden für geringere Fahrzeuggeschwindigkeiten (< 15 km/h) eingesetzt und kommen typischerweise bei der gewichtsabhängigen Zollerhebung und bei der Verfolgung von überladenen Fahrzeugen zum Einsatz. Dabei kann durch die Vermeidung von dynamischen Effekten eine sehr hohe Wiegegenauigkeit erreicht werden. Im Unterschied dazu können HS-WIM-Systeme bei uneingeschränkten Verkehrsgeschwindigkeiten eingesetzt werden, um alle kreuzenden Fahrzeuge zu erfassen (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009).

Die indirekte Methode basiert auf der Auswertung der Bauwerksreaktionen mit Bezug auf die einwirkenden Belastungen. Dabei können gewonnenen Messgrößen (z. B. Dehnungsmessungen an der Fahrbahn, Beschleunigungsmessung im Feld oder Kraftmessungen an den Lagern) Rückschlüsse auf die Verkehrslasten sowie ggf. deren Lokalisierung geben (KROHN, 2014). Zur indirekten Erfassung der Verkehrseinwirkung eignen sich Dehnungs- und Beschleunigungsmessungen. Zur Erläuterung der Messtechnik wird auf die Kapitel 3.8 und 3.9 verwiesen.

Die indirekte Methode erfordert die Implementierung komplexer Algorithmen und gut kalibrierter Berechnungsmodelle, um die Messdaten unter Berücksichtigung der Bauwerksreaktionen aus mehreren Fahrzeugüberfahrten zu analysieren (LUBASCH et al., 2011). Diese Systeme werden im Allgemeinen als Bridge-WIM-Systeme bezeichnet (HANSEN and MARX, 2014).

Darüber hinaus kann ein spezieller Laserscanner eingesetzt werden, um die Verkehrsdaten zu erfassen und die vorbeifahrenden Fahrzeuge mit Informationen über Fahrzeugtyp, Abmessungen, Geschwindigkeit und Fahrspur zu klassifizieren. Eine Verknüpfung der einzelnen Fahrzeugklassen hinsichtlich der dazugehörigen Lasten (z. B. Achslasten) kann nachgeschaltet durch die Überlagerung mit bereits existierenden, entsprechend detaillierten statistischen Auswertung erfolgen.

3.2.1 Messtechnik

Tabelle 3 stellt die verschiedenen WIM-Systeme und die entsprechenden Sensortypen dar (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009).

WIM-Systeme		Sensorarten
HS-WIM-Systeme (high speed)	WIM in oder auf Fahrbahnkonstruktionen	Wiegeplatten
		Streifensensoren
		Lastzelle
	Bridge-WIM	DMS
		Induktive Wegaufnehmer
LS-WIM-Systeme (low speed)	WIM in geschwindigkeitsverminderten Bereichen	Transportable Wiegematten
		Eingebaute Wiegeplatten

Tab. 3: WIM-Systeme und Sensorarten (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009)

Die wesentlichen WIM-Sensoren sind der Streifensensor und der Plattensensor. Alternativ werden Lastzellen als WIM-Sensoren eingesetzt. Weitere Messverfahren sind Laser-Scanner, instrumentierte Bauteile und Kameraüberwachung.

Streifensensor (Piezosensor)

Piezelektrische Sensoren sind in verschiedenen Formen erhältlich. Alle funktionieren nach dem Prinzip, dass ein piezelektrisches Material eine elektrische Spannung erzeugt, die proportional zu der darauf einwirkenden Last ist. Durch Quantifizierung des Verhältnisses zwischen der aufgebracht Last und der erzeugten Voltzahl kann dann das Gewicht eines Rades oder einer Achse bestimmt werden. Dieses Umwandlungsprinzip funktioniert nur bei dynamischen Lasten, d. h. es eignet sich nicht für die Messung sehr langsam wirkender Lasten und kann nicht für statische Gewichtsmessungen verwendet werden (HALLENBECK and WEINBLATT, 2004).

Die Achslast wird im Streifensensor durch Integration der Messsignale über die Zeit ermittelt, wodurch die genaue Vorbestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit für die erreichbare Genauigkeit des Sensors von Bedeutung ist. Zudem kann bei der Erfassung von Kurzzeitsignalen das Signalrauschen dadurch die Messgenauigkeit beeinträchtigen (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009).

Der derzeit am häufigsten verwendete Typ der Piezosensoren in WIM-Systemen ist der Quarz-Piezosensor. Im Gegensatz zu Lastzellen- oder Plattensensoren ist der Quarz-Piezosensor fast wartungsfrei, muss aber aufgrund von Kalibrierungsdriften alle 12 bis 18 Monate kalibriert werden. Diese Sensoren bieten in der Regel eine Messgenauigkeit für das Gesamtgewicht des Fahrzeugs von $\pm 6\%$ und sind kosteneffizient für die mittelfristige Datenerfassung (3 bis 5 Jahre), die eine hohe Messgenauigkeit erfordert (FHWA-1, 2018). Der Sensor hat eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen (HALLENBECK and WEINBLATT, 2004).

Um Informationen über die Rad- und Achsgruppenwirkung sowie die Verkehrsklassifizierung zu erhalten, werden in der Regel Induktionsschleifen parallel zum Kraftsensor eingesetzt

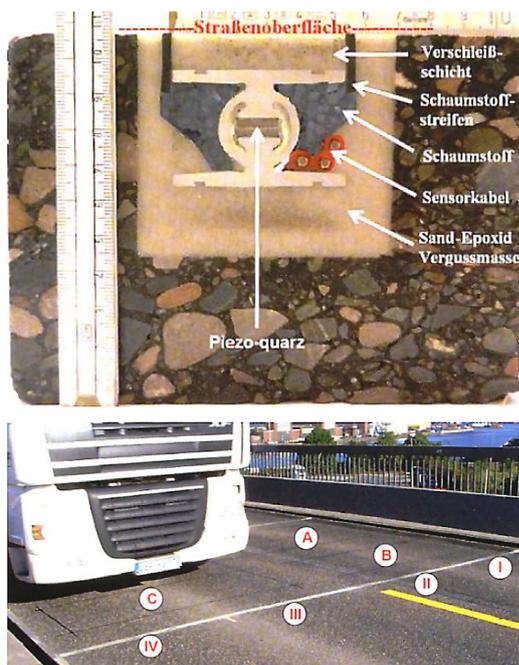


Bild 4: Angewandtes WIM-System auf der Köhlbrandbrücke in Hamburg, Sensoraufbau (oben) sowie das Sensorfeld mit Sensoren (I-IV) und Induktionsschleifen (A-C) (unten) (ULLERICH, 2012)

(WEISS and SPINDLER). Ein Beispiel für den Einsatz des Quartz-Piezosensors mit Induktionsschleifen befindet sich auf der Köhlbrandbrücke in Hamburg (Bild 4) (ULLERICH, 2012).

Plattensensor

Der Plattensensor besteht aus einer Stahlplatte, die an den Rändern auf einem Rahmen gestützt wird, und ist mit Dehnungsmessstreifen instrumentiert, die an der Unterseite der Platte montiert sind. Die gemessenen Biegedehnungen sind proportional zur vertikalen Kraft der vorbeifahrenden Fahrzeuge, wenn sie an der gleichen Stelle aufgebracht wird. Durch die Kombination von mehreren Dehnungsmessstreifen kann die Position des Rades in Querrichtung abgeschätzt und die vertikale Kraft berechnet werden (FHWA-1, 2018).

Plattensensor-WIM-Systeme werden wie piezoelektrische Sensoren mit Induktionsschleifen kombiniert. Eine Schleife vor der Position des Plattensensors dient dazu, die Anwesenheit eines Fahrzeugs zu erkennen und die Messungen des WIM-Systems einzuleiten. Eine zweite Induktionsschleife wird in der Regel hinter dem Plattensensor installiert, um zu erkennen, wenn sich ein Fahrzeug über den Sensor bewegt hat (AL-QADI et al., 2016).

Der Plattensensor weist eine sehr geringe Geschwindigkeits- und fast keine Temperaturabhängigkeit auf. Es kann eine Messgenauigkeit für das Gesamtgewicht des Fahrzeugs von $\pm 4\%$ erreicht werden. Die Sensorwartung ist jährlich durchzuführen (FHWA-1, 2018).

Lastzelle

Das Messkonzept der Lastzelle beruht auf der Umwandlung einer extern einwirkenden Kraft in ein proportionales elektrisches Signal durch die Verwendung von Paaren von Dehnungsmessstreifen, die auf beiden Seiten des Stegs eines speziell bearbeiteten Querträgers angebracht sind (AL-QADI et al., 2016). Die Lastzellen-WIM-Sensoren sind hinsichtlich der Erstinstallationskosten die teuersten Sensoren der Gewichtssensoren-Technologien, weisen sich jedoch als genaue, dauerhafte und robuste Systeme aus (AL-QADI et al., 2016). Es kann eine Messgenauigkeit für das Gesamtgewicht des Fahrzeugs von $\pm 3\%$ erreicht werden (HALLENBECK and WEINBLATT, 2004).

Laser-Scanner

Mit Hilfe eines berührungslosen Laser-Scanners kann die umgebende Fläche mit Lichtimpulsen radial in einer Ebene gescannt werden. Aus den reflektierten Laserstrahlen wird anhand der gemessenen zweidimensionalen Radialkoordinaten (Abstand und Winkel) die Position des Objekts bestimmt. Entsprechend können die Konturen der vorbeifahrenden Fahrzeuge erfasst und klassifiziert werden (SICK Sensor Intelligence, 2017). Der Einsatz von Laser-Scannern bei der Verkehrsmessung wurde an der Gänstorbrücke über die Donau in NOWAK et al. (2020) getestet (Bild 5).

Die Fahrzeuge können anhand der vom Laserscanner erfassten Fahrzeugsilhouette in bis zu 30 verschiedene Fahrzeugklassen eingestuft werden (NOWAK et al., 2020).

Es kann eine Scan-Frequenz von bis zu 100 Hz erreicht werden bei einem Arbeitsbereich von bis zu 80 m. Der mögliche systematische Fehler kann bis zu ± 50 mm betragen. Die tatsächlichen Fehlerwerte hängen von den Umfeldbedingungen ab (SICK Sensor Intelligence, 2022).

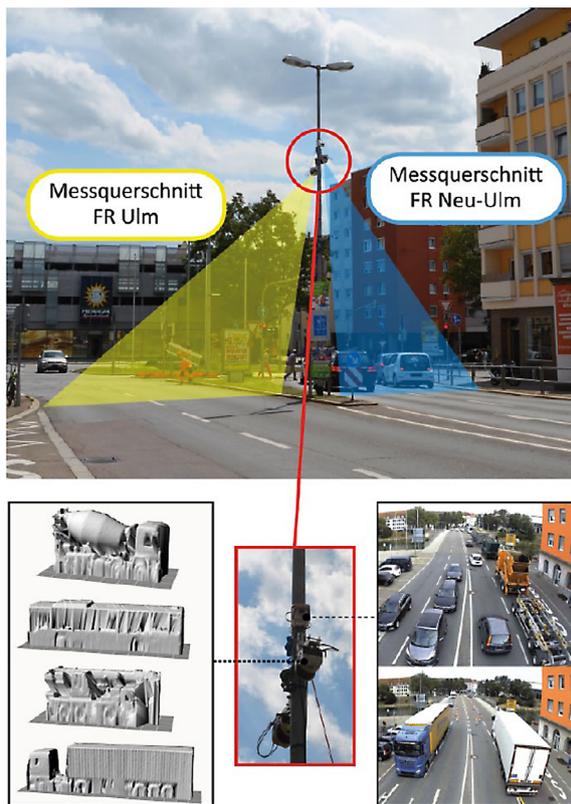


Bild 5: Laser-Scanner zur Verkehrsmessung und detektierten Fahrzeuge im Abgleich mit Bildaufnahmen der Webcam (NOWAK et al., 2020)



Bild 6: Instrumentiertes Kalottenlager (HAARDT et al., 2017)

Instrumentierte Lager und Dehnfugen

Für Verkehrsmessungen können sowohl Lager als auch Dehnfugen instrumentiert und eingesetzt werden. Kalottenlager können z. B. mit einer speziellen gekammerten Elastomerfolie zur Lasterfassung durch Messung des induzierten hydrostatischen Spannungszustandes infolge externer Last ausgestattet werden (RILL et al., 2021b).

Bild 6 zeigt ein instrumentiertes Kalottenlager zur Verkehrsmessung (HAARDT et al., 2017).

Darüber hinaus kann eine Dehnfuge mit einer Kombination verschiedener Kraftsensoren zur Erfassung der Verkehrslasten ausgestattet werden. Ein Beispiel für eine instrumentierte Dehnungsfuge wird in RILL (2021a) vorgestellt, wobei eine Kombination von piezoelektrischen Kraftmessringen, einer DMS-basierten Kraftmessdose, einem Seilzugsensor zur Spaltmessung und Beschleunigungssensoren implementiert wurde.

Magnetfeldsensoren

Die Magnetfeldsensoren (engl.: Anisotropic Magnetoresistance Sensors (AMR)) stellen eine Alternative zu den Induktionsschleifen dar, mit denen Informationen über die Verkehrsintensität und die Fahrzeuggeschwindigkeit erfasst werden können. Fahrzeugüberfahrten lassen sich über die Störung des Magnetfelds messen. Aufgrund ihrer Größe bieten diese Sensoren im Vergleich zu den Induktionsschleifen verschiedene Vorteile, wie z. B. die hohe Anwendungsflexibilität, einen geringeren Installationsaufwand sowie einen wesentlich niedrigeren Wartungsaufwand. Magnetfeldsensoren wurden als Verkehrssensoren bspw. im Rahmen des Projekts Road-Traffic-Management-System (RTMS) eingesetzt (FREUNDT et al., 2014).

Das Road-Traffic-Management-System (RTMS) wurde mit der Zielsetzung entwickelt, die Verkehrsdaten in Echtzeit zu zählen sowie die Achslasten von Fahrzeugen auf Brücken zu ermitteln. Dabei wurden zwei unabhängige Messsysteme eingesetzt (FREUNDT et al., 2014).

Zum einen wurde ein Messsystem bestehend aus Wireless-Traffic-Sensoren (Magnetfeldsensor) eingesetzt, um sowohl die charakteristischen Verkehrsdaten wie beispielsweise (Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit, Anzahl der Achsen, Abstände) in Echtzeit zu erfassen als auch die vorbeifahrenden Fahrzeuge zu klassifizieren. Die Verkehrsdaten werden im Sensor (offline) mit einer Zählgenauigkeit > 97 % und einer Fahrzeugtyp-Klassifizierungsgenauigkeit von ca. 80 % gespeichert. Die Daten können über eine Funkverbindung zeitweise gelesen werden (FREUNDT et al., 2014).

Zum anderen wurden mittels eines konventionellen Messsystems (induktive Wegaufnehmer, DMS usw.) die Brückenreaktionen und insbesondere die Verschiebungen an den Brückenlagern erfasst. Die gemessenen Verläufe der Brückenreaktionen sind die Grundlagen für die Ermittlung der Achslasten sowie für die Zustandserfassung des Bauwerks. Dabei ist eine Synchronisation und Zusammenführung der Messdaten der beiden unterschiedlichen Messsysteme für die weitere Verarbeitung von wesentlicher Bedeutung. Die zeitliche Synchronisation für die beiden Messsysteme wurde beispielsweise nach FREUNDT et al. (2014) durch den Zeitstempel nach der Funkuhr realisiert.

Kamera/Bildüberwachung

Mit dem Ziel, die gemessenen Beanspruchungen der Verkehrssituation bzw. dem Last-Bild zuzuordnen sowie die automatisierte Fahrzeugerkennung zu verifizieren, wird in der Regel eine Kamera als redundantes paralleles Erfassungsinstrument installiert (Bild 7). Die



Bild 7: Kamera an einer Stabbogenbrücke (STEFFENS, 2019)

Zuordnung des Bildmaterial zu einem bestimmten Zeitpunkt der Dehnungsmessung kann z. B. anhand des entsprechenden Zeitstempels mit einer Software automatisch durchgeführt werden (STEFFENS, 2019).

3.2.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Zur Erfassung der Verkehrsdaten des WIM-Systems sind neben den Kraftsensoren ein Induktionsschleifendetektor sowie ein Messverstärker erforderlich, um die Integrität des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Ein Beispiel für die realisierten Maßnahmen beim Datenmanagement im Zuge des Verkehrsmonitorings auf der Köhlbrandbrücke wird in ULLERICH (2012) gezeigt. Dabei wurden ein Prozessor und eine Datenspeichereinheit benötigt, um die Signale der Gewichtssensoren sowie der dazugehörigen Sensoren zur Fahrzeugtypen-Klassifizierung zu empfangen und zu analysieren sowie die Informationen über die Achslast und den Fahrzeugtyp zu generieren. Die Ausgabedaten des Systems enthalten das Datum, die Geschwindigkeit, die Fahrzeuglänge, die Anzahl der Achsen, den erkannten Fahrzeugtyp, die Achsgewichte und die Achsabstände.

Die Datenauswertung erfolgt monatlich. Die Messzentrale befindet sich im Inneren des Hohlkastens der Köhlbrandbrücke, um vor der Witterung geschützt zu sein (Bild 8).



Bild 8: Messzentrale im Inneren des Hohlkastens der Köhlbrandbrücke (ULLERICH 2012)

3.2.3 Ausführung des Messsystems

Um die Beeinträchtigung der Messgenauigkeit aufgrund der unbekannt dynamischen Effekte der vorbeifahrenden Fahrzeuge zu minimieren, müssen die Installationsorte der WIM-Systeme die folgenden Kriterien erfüllen (WOLF, 2010):

- Fahrstreifenbreite > 3 m,
- Längsneigung ≤ 2 (45 m vor und 20 m nach den Sensoren),
- Querneigung ≤ 2 (45 m vor und 20 m nach den Sensoren),
- Kurvenradius ≥ 1.700 m,
- gleichmäßiger Verkehrsfluss (wenig Brems- und Beschleunigungsvorgänge oder Fahrspurwechsel).

Bei Ausführung des WIM-Systems mit Quarz-Piezo-Sensoren erfolgt zunächst das Schlitzes des Belages mit den gewünschten Abmessungen entsprechend dem Sensor. Dann ist der Schlitz zu reinigen, um einen trockenen und von losem Material freien Schlitz zu erhalten. Anschließend wird der Sensor in die endgültige Position gebracht und das Epoxid in den

Schlitz gegossen. Nach dem vollständigen Aushärten des Epoxides wird die Oberfläche des Sensors geschliffen, damit sie bündig mit dem umgebenden Straßenbelag abschließt.

Die Messgenauigkeit des Gesamtgewichts eines Fahrzeugs hängt von der gewählten Anordnung der Quarz-Piezo-Sensoren ab (FHWA-1, 2018). Bild 9 zeigt exemplarisch die erreichbaren Richtwerte der Messgenauigkeit entsprechend unterschiedlicher Anordnungsmöglichkeiten. Für die tatsächlich erreichbare Genauigkeit sind weitere Faktoren wie z. B. die Einbauqualität und Straßeneigenschaften zu beachten.



Bild 9: Messgenauigkeit entsprechend unterschiedlicher Anordnungsmöglichkeiten der Quarz-Piezo-Sensoren nach (Kistler Group, 2020)

Bei WIM-Systemen mit Plattensensoren zur Verkehrsdatenerfassung werden in der Regel zwei einzelne Platten auf jeder Fahrspur installiert. Die beiden Platten werden entweder in einer Reihe (nebeneinander) oder versetzt installiert. Bei der Inline-Anordnung ist ein unabhängiger Sensor zur Achserkennung (normalerweise ein piezoelektrischer Streifensensor) erforderlich, um die Fahrzeuggeschwindigkeit zu berechnen (AL-QADI et al., 2016).

3.2.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele der Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung sind hauptsächlich:

- Kompensation der rechnerischen Defizite beim Nachweis der Ermüdungssicherheit sowie der Tragfähigkeit und Ermittlung möglicher Reserven
- Entwicklung bzw. Modifizierung der Lastmodelle
- Abschätzung der zukünftigen Verkehrslasten anhand der erfassten Verkehrsdaten

Die Gewinnung der charakteristischen Verkehrsdaten wie zum Beispiel Achslasten ermöglicht es, Überlastungen zu erkennen sowie Instandsetzungsmaßnahmen zielführend zu kontrollieren (HANSEN and MARX, 2014).

3.2.5 Anwendungsgrenzen

Bei der Anwendung und Realisierung der Messtechnik müssen die möglichen Nutzungseinschränkungen bzw. Nachteile beachtet werden. Im Folgenden sind beispielhaft einige dieser Nutzungseinschränkungen beschrieben:

Quarz-Piezosensoren:

Die Tatsache, dass Quarz-Piezosensoren durch die Veränderung der Eigenschaften des tragenden Belags aufgrund von Umgebungsbedingungen beeinflusst werden, obwohl das Sensormaterial selbst nicht von der Temperatur beeinflusst wird, wird als Anwendungsgrenze angesehen (FHWA-1, 2018).

Plattensensoren:

Die erforderliche jährliche Wartung der Plattensensoren wird als Nachteil genannt (FHWA-1, 2018).

Lastzellen:

Bei den Lastzellen stellen die hohen Installationskosten und der Zeitaufwand ebenfalls Nutzungseinschränkungen dar (FHWA-1, 2018).

Bridge-WIM-Systeme:

Bei den Bridge-WIM-Systemen führen die Komplexität der Rückrechnungen und die Notwendigkeit gut kalibrierter Berechnungsmodelle sowie der vergleichsweise hohe Aufwand bei der Durchführung der Messung zur indirekten Ermittlung der Lasten dazu, dass die Anwendung nicht für jedes Bauwerk geeignet ist (KROHN, 2014).

3.2.6 Qualitätssicherung

Eine Systemkalibrierung ist notwendig, um die Faktoren festzulegen, die später in den Berechnungen des WIM-Systems angewendet werden und um die beobachteten Messungen mit den entsprechenden bekannten statischen Werten zu korrelieren.

Bei der Erstinbetriebnahme ist eine Kalibrierung durchzuführen, indem jede Achse statisch gewogen und gemessen wird und jeder Achsabstand jedes der Prüfwagen zur Kalibrierung aufgezeichnet wird. Dann wird eine ausreichende Anzahl von Testfahrten durchgeführt, um Umrechnungsfaktoren zu ermitteln und die Kompensationsfaktoren für Systemfehler zu berechnen. Anschließend sind regelmäßig (z. B. jährlich) Routinekalibrierungen durchzuführen, um die Genauigkeit der WIM-Systeme während der gesamten Lebensdauer des Systems auf dem maximal möglichen Wert zu gewährleisten (FHWA-3, 2018).

Bei der Verwendung des Laser-Scanners zur Erfassung des Verkehrs wird empfohlen, eine Webcam zu installieren, die eine parallele Qualitätskontrolle der Ergebnisse ermöglicht und weitere Informationen, z. B. über die Stauhäufigkeit und die Anzahl der Achsen, liefern kann (NOWAK et al., 2020). Eine Webcam kann auch bei den anderen Systemen eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

3.3 Temperaturmessung

Zur Messung der Bauteil- und Außenlufttemperatur können für Infrastrukturbauwerke die folgenden Sensoren eingesetzt werden:

- Widerstandsthermometer
- Thermoelemente
- Faseroptische Temperaturmessung

Beim Monitoring von Brückenbauwerken wird die Temperaturmessung oftmals in Abhängigkeit von Bauteil und Messtechnik als Kompensationsmaßnahme temperaturbedingter Messfehler oder zur Untersuchung von temperaturinduziertem Zwang bzw. des tatsächlichen Temperaturgradienten im Bauwerk eingesetzt. Je nach Anwendung wird hierfür die Messung der Luft-, Bauteil- oder Oberflächentemperatur erforderlich.

3.3.1 Messtechnik

Die Temperaturmessung eines Bauteils kann mithilfe folgender Methoden erfolgen (FECKER, 2018):

- Widerstandsthermometer auf Basis der Widerstandsänderung bei unterschiedlichen Temperaturen
- Thermoelemente auf Basis der Spannungsänderung bei unterschiedlichen Temperaturen
- Faseroptische Temperaturmessung

Widerstandsthermometer

Für baupraktische Anwendungen des Monitorings werden beispielsweise in GEIER et al. (2014) und GEIER et al. (2016) Widerstandsthermometer mit einer Platinelektrode Pt100 als Kaltleiter verwendet.

Widerstandsthermometer beruhen auf der physikalischen Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand metallischer Werkstoffe und der Temperatur. Bild 10 zeigt beispielhaft ein Platin-Widerstandsthermometer. Die Messelektronik und das Thermometer wird durch ein Schutzrohr gesichert, das das Eindringen von unerwünschten Fremdstoffen verhindert. Der mögliche Messbereich üblicher Widerstandsthermometer mit Platinelektrode liegt dabei zwischen -200 °C und 850 °C .



Bild 10: Beispiel eines Platin-Widerstandsthermometers (GEIER et al., 2014)

Widerstandsthermometer eignen sich zur Ermittlung der Bauteiltemperatur. Sie erfassen die Änderung des elektrischen Widerstands einer eingebauten Platinelektrode mit unterschiedlichen Temperaturen. Durch die Messung der Spannungsveränderungen kann auf die Umgebungstemperatur geschlossen werden (Günther GmbH Temperaturmesstechnik). Bild 11 zeigt einen Pt100 Temperatursensor an der ÖBB Steyrtalbrücke (GEIER et al., 2016).



Bild 11: Pt100 Temperatursensor an der ÖBB Steyrtalbrücke (GEIER et al., 2016)

Neben der Bauteiltemperatur kann die Messung der Umgebungstemperatur bei der Ermittlung von klimatischen Einwirkungen von Bedeutung sein. Zur Messung der Außenlufttemperatur kommen dabei sogenannte Luftfühler zum Einsatz. Der mögliche Messbereich des oben gezeigten Außentemperaturfühlers liegt im Gegensatz zu den Widerstandsthermometern zwischen -50 °C und 100 °C .

Thermoelemente

Thermoelemente nutzen zur Temperaturmessung den sogenannten Thermospannungseffekt. Der Thermospannungseffekt beschreibt über das physikalische Wechselspiel zwischen Thermospannungen und Temperaturdifferenzen die Temperaturänderung eines metallischen Werkstoffs (SAB Bröckskes GmbH & Co. KG, 2022). Die Messung der Oberflächentemperatur wird beispielsweise in PENKA (2004) zur Bestimmung der tatsächlichen Temperaturbelastungen und -gradienten herangezogen. Der Temperaturbereich liegt bei statischer Messung zwischen -90 °C und 250 °C .

Die Thermoelement-Sensoren haben in der Regel einen größeren Temperaturbereich im Vergleich zum Widerstandsthermometer, was für die Anwendung im Brückenmonitoring unerheblich ist. Sie sind jedoch leicht konfektionierbar und lassen sich z. B. einbetonieren, dann abschneiden, neu verlöten und wiederverwenden. Im Vergleich zu den Widerstandsthermometern haben die Thermoelemente eine geringere Genauigkeit.

Faseroptische Temperaturmessung

Für die Temperaturmessung können zudem faseroptische Sensoren eingesetzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen temperaturabhängigen optischen Effekte der verschiedenen Fasermaterialien sind mittlerweile eine Reihe von faseroptischen Temperatursensoren in der Praxis verfügbar (BERNHARD, 2014). In diesem Bericht wird das Messkonzept des Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensors in Kapitel 3.5.1 beschrieben. Weiterhin werden die verteilten faseroptischen Sensoren in Kapitel 3.13.2 ausführlich behandelt. Dabei kann ein Messbereich von ca. -50 °C bis $+200\text{ °C}$ Temperaturen mit einer Empfindlichkeit von ca. $0,1\text{ °C}$ abgedeckt werden (GEVATTER and GRÜNHAUPT, 2006). Faseroptische Sensoren bieten die Möglichkeit Temperaturprofile über eine annähernd lückenlose Messung entlang Faser zu ermitteln.

3.3.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Der Informationsgewinn der Temperaturmessung beruht unter anderem auf der Ermittlung und Kompensation des Temperatureinflusses anderer Messgrößen mit starker Temperaturabhängigkeit (z. B. DMS) sowie der Einschätzung von Bauteilzwängungen (MÜLLER et al., 2020).

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Temperatur nur vergleichsweise langsam ändert, wird üblicherweise eine niedrige Abtastrate gewählt. Nach SANIO et al. (2017) reicht eine Rate von einer Messung pro Stunde ($1/3600\text{ Hz}$) aus, um eine vollständige, sinusförmige Schwingung des Temperatur-Tagesverlaufs darzustellen. Ein praktisches Beispiel für die Temperaturmessung an einer integralen Spannbetonbrücke wurde in GEIER et al. (2017) beschrieben, wobei mit einer Abtastrate von 1 Hz gemessen und alle 30 Minuten ein Mittelwert gebildet und gespeichert wurde. Es ist zu beachten, dass zur Echtzeit-Temperaturkompensation von Sensormessungen eine höhere Abtastrate in Betracht zu ziehen ist. In diesem Fall sollten die Abtastrate und der Zeitstempel der Temperaturmessung mit denen der zu kompensierenden Messung kompatibel sein.

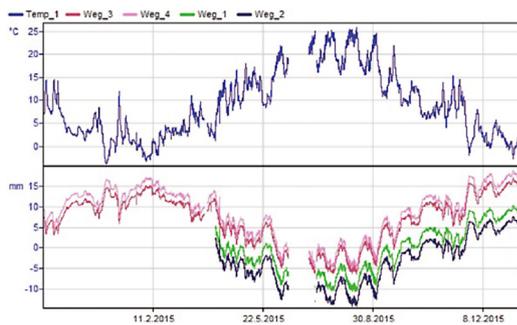


Bild 12: Jahresverlauf der Betontemperatur an einer Eisenbahnbogenbrücke in Massivbauweise im Vergleich mit den gemessenen Längenänderungen (GEIER et al., 2016)

Bild 12 zeigt beispielhaft den jahreszeitlichen Verlauf der Betontemperatur anhand einer Bogenbrücke in Massivbauweise nach GEIER et al. (2016). Im Verlauf zeigen sich Temperaturen zwischen -4 °C und 27.5 °C am maßgebenden Punkt.

3.3.3 Ausführung des Messsystems

Bild 13 stellt die Anordnung der Temperatursensoren im Vergleich mit weiteren Messkenngrößen aus der Veröffentlichung MÜLLER et al. (2020) dar. Die Temperatursensoren in Feldmitte stimmen dabei mit der Längsposition der Dehnungsmessstreifen und der integralen Wegmesser überein, um den Temperatureinfluss auf die Kenngrößen abzuschätzen.

Bild 14 und Bild 15 zeigen die Anordnung der Temperatursensoren an der Maintalbrücke in Längsrichtung sowie das zugehörige Messsystem mit Geophonen und Beschleunigungssensoren. Die Positionen der Beschleunigungssensoren und der Lufttemperatursensoren im Hohlkasten stimmen im Anwendungsbeispiel überein. Aus dem Vergleich der Bilder ist zudem ersichtlich, dass die Anordnung der Temperatursensoren in Längsrichtung des Bauteils mit der Anordnung von Beschleunigungssensoren respektive Geophonen übereinstimmt.

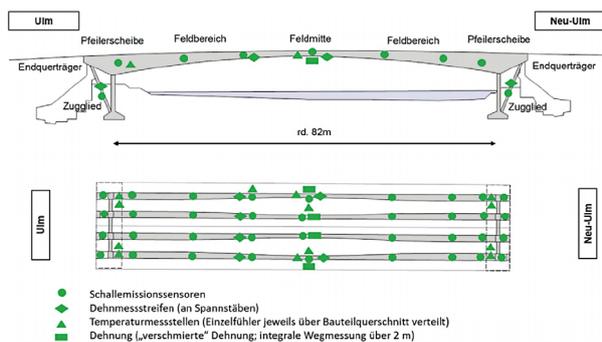


Bild 13: Temperaturmessstellen einer Beispielbrücke (MÜLLER et al., 2020)

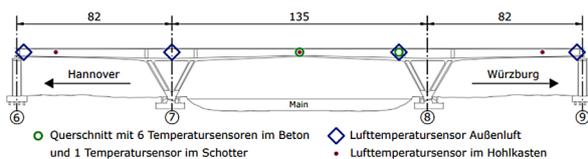


Bild 14: Temperaturmessungen an der Maintalbrücke in Längsrichtung des Brückentragwerks (HERMANN et al., 2021)

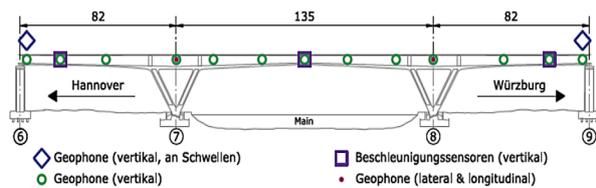


Bild 15: Vergleich der Anordnung von Geophonen und Beschleunigungssensoren für das Monitoring der Maintalbrücke (HERMANN et al., 2021)

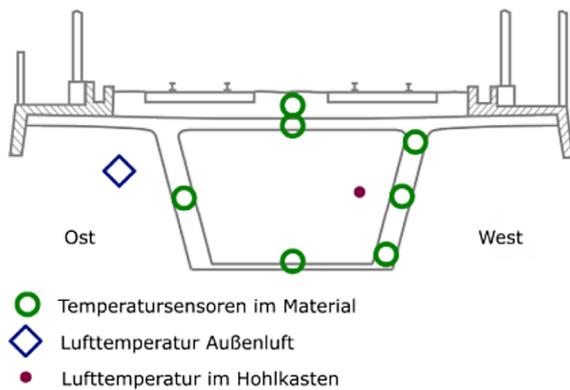


Bild 16: Temperaturmessungen an der Maintalbrücke - Anordnung der Sensoren im Querschnitt (HERMANN et al., 2021)



Bild 17: Montage eines Temperatursensors zur Erfassung der Bauteiltemperatur (WEIHER et al., 2015)

Bild 16 zeigt die Anordnung der Temperatursensoren der oben beschriebenen Maintalbrücke im Querschnitt. Im Messkonzept nach HERMANN et al. (2021) wurden dabei sowohl Temperaturmessungen an Außenluft und Innenluft im Hohlkasten sowie Messungen im Material des Hohlkastens zur Bestimmung des Temperaturgradienten durchgeführt.

Bild 17 zeigt die Montage eines Temperatursensors zur Messung der Temperaturgradienten in einer Betonbrücke (WEIHER et al., 2015). Der Temperatursensor wird dabei in ein Bohrloch eingebracht und anschließend mithilfe von Silikon gedämmt, um eine Verfälschung der Bauteiltemperatur mit der Außenlufttemperatur zu verhindern.

Die Temperaturfühler sollten in eine ausreichende Tiefe des Bauteils reichen, um die tatsächliche Bauteiltemperatur erfassen zu können. Bei zu geringer Eindringtiefe der Messelemente ist eine Messung der tatsächlichen Kerntemperatur nicht möglich, da diese durch äußere Einflüsse im Oberflächenbereich beeinflusst werden. Bei der Installation von Tauchfühlern zur Bauteiltemperaturmessung ist je nach Tiefe der Sensoreinbringung bzw. Bohrung die Schädigung der Bewehrung und Spanngliedern auszuschließen. Die Spannglieder- und Bewehrungslagen sind vorab z. B. über Radarverfahren zu orten (HERMANN et al., 2021).

3.3.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Ziele der Untersuchungen mit Widerstandsthermometer liegen zum einen in der Temperaturkompensation weiterer aufgenommener Messgrößen (z. B. DMS, Wegaufnehmer) und zum anderen in der Einschätzung des thermisch induzierten Zwangs (MÜLLER et al., 2020). Im Bereich des schwingungsbasierten Monitorings beeinflusst die Bauteiltemperatur die Eigenfrequenzen eines Brückentragwerks signifikant. Zur Erfassung des Temperatureinflusses auf die Bauteilfrequenzen und einer korrekten Bewertung einer möglichen Schädigung ist der Einsatz der Temperaturmessung unentbehrlich (WENZEL and PICHLER, 2005).

Ein weiteres Anwendungsziel ist nach HERMANN et al. (2021) die Bestimmung von horizontalen und vertikalen Temperaturgradienten. Zudem können statische und dynamische Messgrößen direkt mit dem Temperaturverlauf gegenübergestellt werden. Aus den Temperaturdaten können Temperaturgradienten zur realistischen Einschätzung der Zwangsbeanspruchung am FE-Modell z. B. im Zuge der Nachrechnung nach Stufe 3 der NRR erfolgen (MÜLLER et al., 2020).

3.3.5 Anwendungsgrenzen

Zur Temperaturmessung werden überwiegend lokale Sensoren verwendet. In Abhängigkeit der Messaufgabe sind ausreichend viele Messstellen z. B. zur Temperaturkompensation weiterer Messgrößen über die Bauwerkslänge und den Querschnitt vorzusehen. Je nach Ausrichtung des Bauwerks ist zu beachten, dass einige Bauwerksbereiche eine höhere Sonneneinstrahlung erfahren, aus der temperaturbedingte Messsprünge resultieren können, die zu plausibilisieren sind.

3.3.6 Qualitätssicherung

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Messgenauigkeit müssen Widerstandsthermometer kalibriert werden. Vergleichsmessungen unterschiedlicher Thermometer erfolgen über die Kalibrierung an fest definierten Fixpunkten bestimmter Stoffe (Erstarrungspunkt, Schmelzpunkt) (Günther GmbH Temperaturmesstechnik). Alternativ können Kalibrierungen nach der Vergleichsmethode durchgeführt werden, bei welchen die Messwerte des Widerstandsthermometers mit Messwerten von Vergleichsthermometern gegenübergestellt werden. Da der Ausbau der Sensoren zur Überprüfung zum Teil nicht möglich ist, muss bei Langzeit-/Dauermessungen die Langzeitstabilität der Sensoren berücksichtigt werden.

3.4 Feuchtigkeitsmessung

Zur Messung der Bauteilfeuchtigkeit werden die folgenden Messsysteme vorgestellt:

- Multiringelektrode (MRE)
- RFID-Feuchtesensor
- Kernspinresonanz
- Holzfeuchteelektrode

Unter den Ursachen der dauerhaftigkeitsrelevanten Brückenschäden stellt die Durchfeuchtung die häufigste Ursache dar, die bei älteren Brücken zu korrosionsbedingten Schäden an Spannstählen führt (ZILCH and WEIHER, 2007). Daher sind sowohl die Bestimmung der Feuchtigkeitsmenge als auch des Feuchtigkeitszustands von großer Bedeutung, um einer-

seits die langfristige Funktionsfähigkeit von Bauwerken zu kontrollieren und andererseits die Richtung des Feuchtigkeitsflusses zu quantifizieren. Dadurch kann eine geeignete Entscheidung über eine erforderliche Instandhaltungsmaßnahme getroffen werden.

Die Feuchtigkeit kann direkt oder indirekt gemessen werden. Direkte Feuchtemessverfahren beruhen meist auf der Abtrennung der Wassermenge aus dem Material und deren direkter Ermittlung (MOUHASSEB, 2007). Dieses Konzept ermöglicht eine sehr genaue Bestimmung, allerdings handelt es sich dabei um zerstörende Methoden, weswegen sie bei Brücken nur begrenzt einsetzbar sind (HINDERSMANN, 2021).

Andererseits kann der Feuchtigkeitsgehalt durch Messung einiger Stoffeigenschaften des Wassers, die in einem entsprechenden funktionsbezogenen Zusammenhang stehen, indirekt ermittelt werden. Durch die Messung der Leitfähigkeit des Wassers kann beispielsweise anhand bestimmter Kalibrierkurven auf den tatsächlichen Feuchtigkeitsgehalt geschlossen werden (HINDERSMANN, 2021). Die indirekten Methoden sind für kontinuierliche Messungen geeignet, allerdings können die Messungen durch verschiedene Parameter wie z. B. Temperatur, Dichte, Zusammensetzung des Materials und Leitfähigkeit beeinflusst werden (MOUHASSEB, 2007).

3.4.1 Messtechnik

Multiringelektrode (MRE)

Die Multiringelektrode wird zur Bestimmung der Feuchteverteilung im Oberflächenbeton von Bau-teilen eingesetzt. Die Elektrode besteht aus mehreren Edelstahlringen, die mit einem PE-Isolierring getrennt sind und einem Temperatursensor. Das Messprinzip beruht auf der Bestimmung des Wechselstromwiderstandes zwischen zwei benachbarten Ringen und der Festlegung des Widerstandsprofils entlang der Einbautiefe des Sensors (Bild 18). Mit Hilfe von betonspezifischen Kalibrierkurven kann das Feuchteprofil bestimmt werden. Anschließend kann eine Temperaturkompensation des gemessenen Widerstandes mit der Betontemperatur über eine vordefinierte Zellkonstante durchgeführt werden. Multiringelektroden können sowohl in neuen als auch in bestehenden Bauwerken eingebaut werden (MAYER, 2013). Bild 19 zeigt ein Installationsbeispiel für die Multiringelektrode.

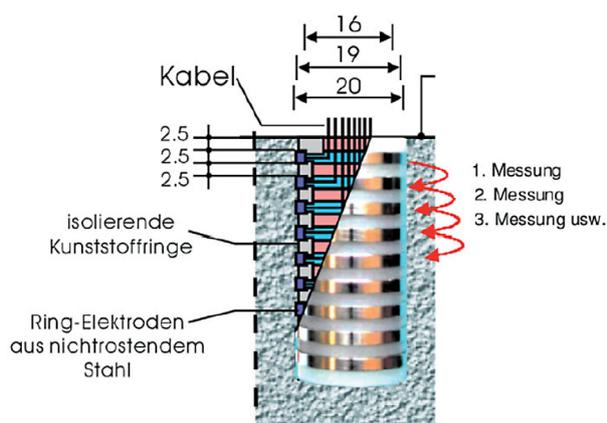


Bild 18: Multiringelektrode zur Bestimmung der Feuchteverteilung (SODEIKAT, 2010)

Bei der nachträglichen Installation des Sensors an einem bestehenden Bauwerk werden Bohrlöcher und Füllmörtel verwendet. Dabei wird die Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes im Altbeton anhand der detektierten Ausgleichsfeuchte zwischen dem Ankopplungsmörtel und dem Altbeton, die nach Abschluss der Hydratation auftritt, erfasst (BRAMESHUBER et al., 2016).

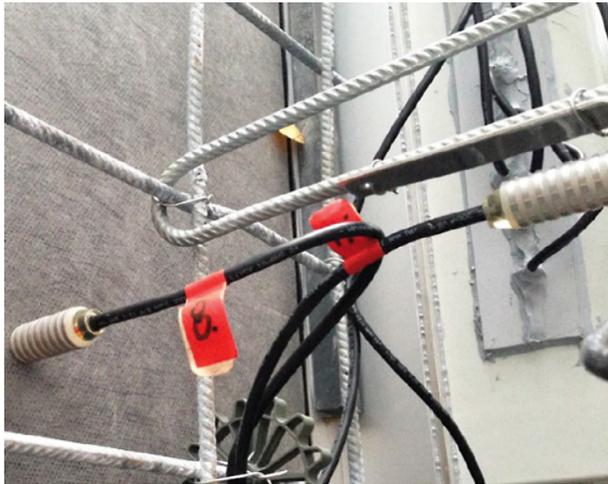


Bild 19: Installationsbeispiel einer Multiringelektrode (SCHULZE and BREIT, 2016)

RFID-Feuchtesensor

Der Feuchtesensor besteht aus zwei an einem Betonkern befestigten Edelstahlringen mit einem integrierten Transponder. Mit dem Sensor können die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit innerhalb des Betons gemessen werden. Hierfür wird der Sensor oberhalb der Bewehrung vor dem Betonieren oder nachträglich über Kernbohrungen eingebracht. Die an den Edelstahlringen gemessene elektrische Leitfähigkeit kann mit Kalibrierkurven in eine Feuchtigkeit in Masseprozent umgerechnet werden. Die Kalibrierkurven sind für jeden Beton neu zu ermitteln (BS2 Sicherheitssysteme GmbH; HINDERSMANN, 2021).

Der Feuchtesensor ist passiv und energielos und benötigt keine Kabelverbindung zu einem Messsystem. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgt über das Messprinzip der Radio-Frequency-Identification (RFID). Hierbei wird mit einem Lesegerät ein elektromagnetisches Feld erzeugt über das der im Sensor integrierter Transponder Energie zur sofortigen Übertragung der Messdaten per Funkt an das Lesegerät erhält. Als Lesegerät kommen Handlesegeräte zur manuellen Messung oder Systemerweiterungen zur Fernabfrage zum Einsatz. (Fraunhofer IMS Duisburg, 2016) Die Sensoren eignen sich zur dauerhaften Einbettung über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks (BARTHOLMAI, 2017).

Kernspinresonanz

Die Kernspinresonanz (Nuclear Magnetic Resonanz, NMR) steht für ein Phänomen, das die Resonanz beschreibt, die an den Wasserstoffkernen im Baustoff auftritt, wenn ein Magnetfeld und zusätzliche Bestrahlung bei bestimmten Frequenzen angelegt werden. Mit Hilfe dieses Effekts kann der Wassergehalt indirekt quantifiziert werden, indem die in einem mineralischen Baustoff enthaltenen Wasserstoffkerne bestimmt werden, für den Fall, dass die Wasserstoffkerne ausschließlich in Wassermolekülen gebunden sind. Mit Hilfe einer Hochfrequenzspule wird die resonante elektromagnetische Energie in Form von Impulsen eingestrahlt. Die Wasserstoffkerne erfahren dann durch die Bestrahlung phasenkohärente Schwingungen, die mit Hilfe einer Antenne als induzierte Wechselspannung erfasst werden. Das Signal wird dann mit empirischen Anpassungsfunktionen analysiert.

Holzfeuchteelektrode

Das Messprinzip der Holzfeuchteelektrode basiert auf der Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand des Holzes und seinem Feuchtigkeitsgehalt. Da Wasser eine höhere

elektrische Leitfähigkeit als Holz besitzt, sinkt der gemessene elektrische Widerstand mit zunehmendem Holzfeuchtegehalt (GAMPER et al., 2013). Der Sensor besteht in der Regel aus Elektroden aus Edelstahlschrauben, die teilweise isoliert sind, um die Feuchtigkeit in definierten Tiefen des Querschnitts zu messen. Über verschiedene Messpunkte entlang der Tiefe kann das Feuchteprofil bestimmt werden (SIMON, 2017). Bild 20 zeigt ein Installationsbeispiel für die Holzfeuchteelektroden. Hierbei ist eine Temperaturkompensation der Holzfeuchtemesswerte zu berücksichtigen, um deren Einfluss auf die elektrischen Widerstandsmessungen herauszufiltern. Zu diesem Zweck ist eine begleitende Temperaturmessung an der Messstelle vorzunehmen (SIMON, 2017). Der Elektrodenkopf und die Holzoberfläche sollten voneinander getrennt und abgedichtet sein, um mögliche Messfehler durch Oberflächenkriechströme zu vermeiden (SIMON, 2017).

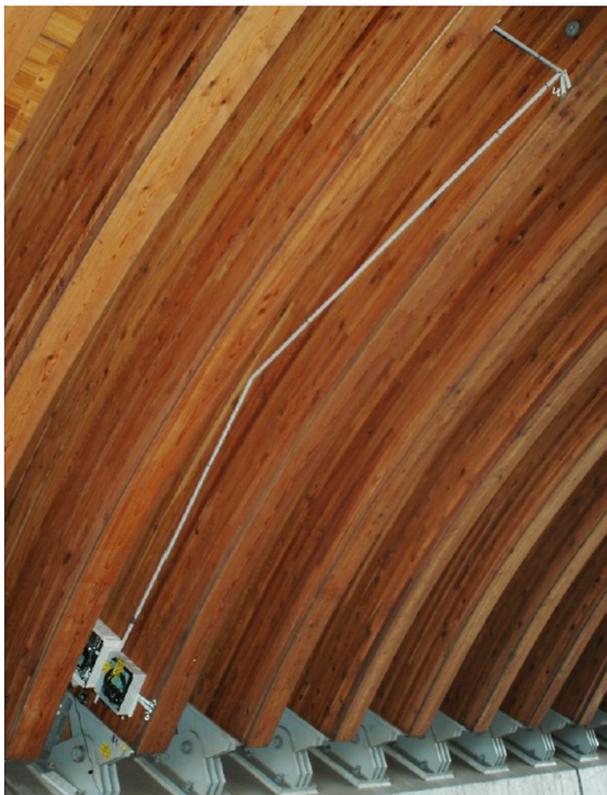


Bild 20: Anordnung von Holzfeuchteelektroden (Beispielsammlung Monitoring 3.1; Quelle: KBauMV FH Wismar)

3.4.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Die Messfrequenz der Multiringelektrode kann zwischen 100 Hz und 1.000 Hz für die Zweielektroden-Wechselstromwiderstandsmessung zwischen zwei benachbarten Edelstahlringen liegen (MAYER, 2013). Die Messung der Betontemperatur erfolgt auf der Höhe des innersten Ringes. Dabei wird die Wechselstrommessung nach BRAMESHUBER et al. (2016) bei einer Frequenz von 108 Hz und einer maximalen Messspannung von 2 Volt durchgeführt.

Um zuverlässige Aussagen über die Messdaten treffen zu können, wird in SCHNELLENBACH-HELD et al. (2015b) eine geforderte Messgenauigkeit von 1 % bis 5 % und ein vorgeschlagenes Messintervall von Tagen bis Monaten für die Materialfeuchte vorgestellt.

Bei der Verwendung der Multiringelektrode ist zu beachten, dass die gemessenen Absolutwerte des elektrischen Widerstandes mit einer experimentell vorherbestimmten Zellkonstante in den spezifischen elektrischen Widerstand umgerechnet werden müssen. Diese Konstante beträgt beispielsweise für Multiringelektroden in HINDERSMANN (2021) sowie

in RAUPACH et al. (2003) den Wert 0,1. Der spezifische elektrische Widerstand ist dann anhand einer so genannten Arrhenius-Gleichung auf eine Referenztemperatur von 25 °C umzurechnen.

Zur Kompensation des Temperatureinflusses auf den Widerstand sowie zur Ermittlung der absoluten Temperatur kann ein zusätzlicher Temperatursensor mit der Multiringelektrode integriert werden.

Über ein Prinzip zur Datenerfassung mit Datenfernübertragung wird in BRAMESHUBER et al. (2016) berichtet. Dabei erfolgt die Erfassung von Daten über eine Sensorsteuerung an einem Multiplexer und einen Datenlogger, der die Daten speichert. Die Daten können dann z. B. über ein Funkmodem ausgelesen werden. Zusätzlich können Alarmwerte eingestellt werden (Bild 21) (FRIESE et al., 2018).

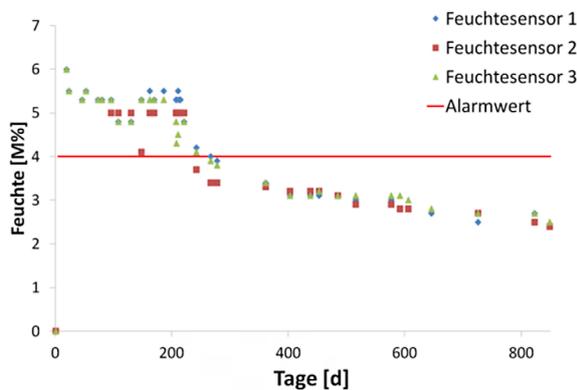


Bild 21: Auswertung der Feuchtedaten mit dem Alarmwert (FRIESE et al., 2018)

3.4.3 Ausführung des Messsystems

Ein Beispiel für die Anordnung von Feuchtigkeitssensoren ist in HINDERSMANN (2021) dargestellt. Dabei erfolgten der Einbau einer Multi-Ring-Elektrode und RFID-Sensoren in der Fahrbahn mittels Kernbohrungen in den erforderlichen Höhen. Anschließend wurden die Sensoren mit einem geeigneten Kopplungsmörtel fixiert und die Löcher verschlossen. Bild 23 zeigt die Einbaustellen der Feuchtesensoren an der duraBAST-Brücke sowie die Kernbohrungen.

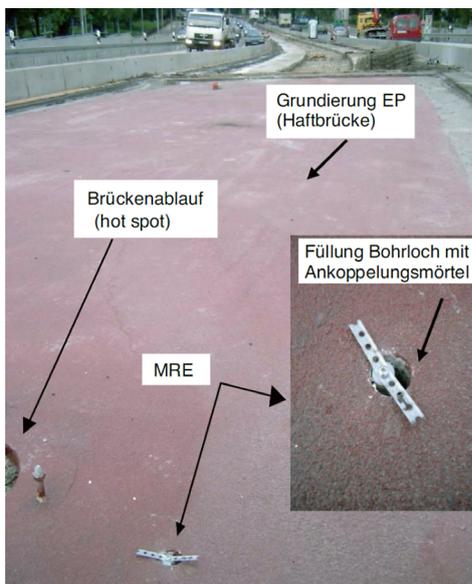


Bild 22: Beispiel der Installationsvorbereitung von Multiringelektroden (SODEIKAT, 2010)

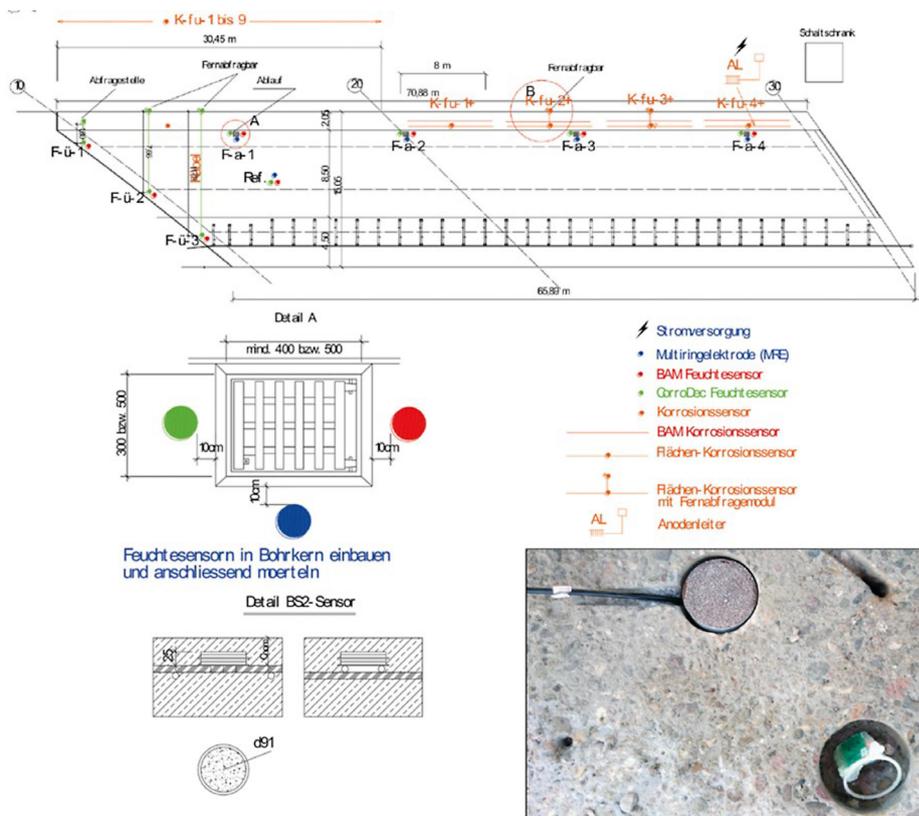


Bild 23: Einbaustellen der Feuchtesensoren an der duraBASt-Brücke und Kernbohrungen (HINDERSMANN, 2021)

Darüber hinaus können die Feuchtesensoren während der Instandsetzung an der freigelegten Bewehrung nachgerüstet werden. Bild 22 zeigt die vorbereiteten Bohrlöcher für das Anbringen von Mehrfachringelektroden. Bei der Ausführung des NMR-Messsystems ist es erforderlich, die Messpunkte mit dem größtmöglichen Abstand zur Bewehrung anzubringen. Daher ist eine Vorortung der vorhandenen Bewehrung eine wichtige Maßnahme.

Ein weiteres Beispiel für die Installation des NMR-Messsystems an einer Schleusenwand wird in BRAMESHUBER et al. (2016) vorgestellt. Dabei wird der genaue Standort der Messungen so festgelegt, dass die magnetische Anziehung infolge der hohen Bewehrung möglichst gering ist. Die Befestigung des Messsystems erfolgt über Konsolen, die an der Wand angebracht werden.

3.4.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele der Feuchtigkeitsmessung sind hauptsächlich folgende:

- Kontrolle der langfristigen Funktionsfähigkeit von Bauwerken im Hinblick auf dauerhaftigkeitsrelevante Brückenschäden,
- Quantifizierung der Richtung des Feuchtigkeitsflusses, um mögliche Instandsetzungsmaßnahmen zu bestimmen,
- Monitoring der Funktionsfähigkeit von Abdichtungen unter Brückenkappen oder in Fugenbereichen (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015b),
- Beurteilung von Instandsetzungsmaßnahmen durch die Nachrüstung von Feuchtesensoren,
- Qualitätssicherung bei Neubauten.

3.4.5 Anwendungsgrenzen

Multiringelektrode:

Als Nachteil der Multiringelektrode als Feuchtesensor zeigen sich die hohen Anforderungen bei der Ausführung. Darüber hinaus stellt der Einfluss von Temperatur, Salzgehalt und Karbonatisierung auf die Messungen von Sensoren, die mit der Leitfähigkeitsmethode arbeiten (z. B. BS2 Sensor), eine Anwendungsgrenze dar (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015b). Der gleiche Nachteil gilt auch für die RFID-Sensoren.

NMR-Methode:

Die Anwendung der NMR-Methode ist durch die begrenzte Messtiefe und die Verzerrung des Magnetfeldes aufgrund ferromagnetischer Materialien (z. B. Bewehrung) eingeschränkt. Diese Effekte beeinträchtigen die Messgenauigkeit. (BRAMESHUBER et al., 2016).

3.4.6 Qualitätssicherung

Zur Überwachung und Bewertung des Feuchtegehalts wird die Erfassung der vorhandenen Bauteilfeuchte bei Sensorinstallation empfohlen. Um den funktionalen Zusammenhang zwischen Elektrolytwiderstand und Wassergehalt im Beton zu bestimmen, ist die Zwei-Elektroden-Methode (TEM) ein geeigneter Ansatz. Dabei kann der funktionelle Zusammenhang durch Einstellen verschiedener Wassergehalte zwischen vollständiger Wassersättigung und trockenem Zustand bei paralleler Widerstandsmessung ermittelt werden.

Dabei ist zu beachten, dass die gemessenen Widerstände von der Messfrequenz und der Probengeometrie abhängig sind. Nach BRAMESHUBER et al. (2009) können mit einer geeigneten Messfrequenz von 10,8 Hz einige störende Einflüsse wie z. B. Polarisation vermieden werden.

Zur Sicherstellung der Messqualität ist zudem eine Kombination verschiedener Messverfahren (z. B. NMR mit MRE (BRAMESHUBER et al., 2016)) bzw. Sensoren verschiedener Hersteller zu verwenden, um ein redundantes Messsystem zu erhalten (HINDERSMANN, 2021).

3.5 Korrosionsmessung

Zur Messung des Korrosionsfortschritts und der Korrosioninitiiierung werden die folgenden Messsysteme vorgestellt:

- Polarisationswiderstand
- Messung des elektrischen Betonwiderstands
- Messung des Makroelementstromes
- Potenzialmessung
- Anodenleiter
- Drahtsensoren

Das Hauptziel des Korrosionsmonitorings ist die Erfassung der Initiierung bzw. des Fortschritts der Stahl- und Spannstahlkorrosion und die Bewertung der daraus resultierenden Schadensgrade. Es wird angestrebt Korrosionsvorgänge rechtzeitig zu erkennen und dadurch einen optimalen Zeitpunkt zur Einleitung von Instandsetzungsmaßnahmen feststellen zu können. Aufgrund der Multiparameterabhängigkeit und der Interaktion der Schadensgröße mit Umwelteinflüssen gilt die Korrosionsmessung als komplizierte Messaufgabe, bei der die Messgröße meist nur indirekt erfasst werden kann (HOLST, 2007a).

Dabei muss bei der Instrumentierung ein Kompromiss zwischen der Anzahl der einzusetzenden Sensoren, des Informationsgewinns und der Empfindlichkeit der Sensoren gegenüber Korrosionsschäden gefunden werden (HOSSER et al., 2003).

Um eine geeignete Monitoringstrategie festzulegen, ist es zunächst von Bedeutung, die tatsächliche Korrosionsphase in Bezug auf den Schädigungsgrad einzuschätzen. Entsprechend kann eine geeignete Messtechnik anhand der folgend erläuternden Monitoringstufen identifiziert werden.

Die Monitoringphasen lassen sich anhand des Stahlkorrosionsverlaufs gemäß Bild 24 in drei Stufen unterteilen (HOLST et al., 2007b):

1. Einleitungsphase bis zur Depassivierung, bei der die elektrochemischen Sensoren zur Messung der korrosionsbeeinflussenden Parameter eingesetzt werden können. Die Interaktion der verschiedenen Parameter ermöglicht Rückschlüsse auf den Korrosionsfortschritt.
2. Zerstörungsphase (Korrosionsschädigung, Induktionsphase) und
3. Bruchzustand des betrachteten Stahlelements

Die Korrosionsmessungen erfolgen mittels zerstörungsfreier bzw. semi-zerstörungsfreier Prüf- und Messverfahren (ZfP) der 2. und 3. Monitoringstufe entweder unmittelbar am Stahl oder an der Bauteiloberfläche. Für das Monitoring der Korrosion in der Stufe 1 lassen sich verschiedene Messtechniken einsetzen.

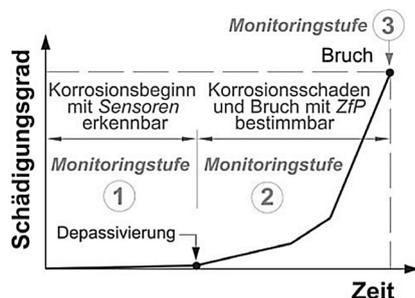


Bild 24: Korrosionsphasen, Monitoringstufen sowie Grenzzustände der Stahlkorrosion (HOLST et al., 2007b)

Die übernommene Monitoringstrategie kann entweder prognostisch (z. B. basierend auf adaptiven Modellen wie bspw. FE-Dauerhaftigkeitssimulationen) oder als Schwellenwertüberwachung (Festlegung eines Warn- und Alarmwerts) erfolgen. Als geeigneter Ansatz für Korrosionsmessungen gilt das „Ampel“-Prinzip, das den Zustand des Spannglieds oder Bauteils mit den Farben Grün, Gelb und Rot mit jeweiliger Korrosionsrisikogruppierung beschreibt (Bild 25) (HOLST et al., 2007b).

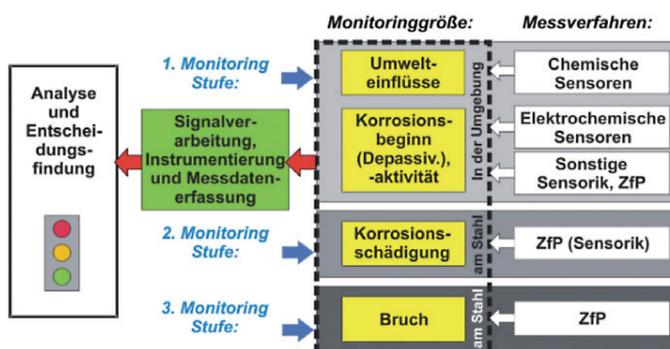


Bild 25: Konzept einer möglichen Korrosionsmonitoringstrategie (HOLST et al., 2007b)

Als Hilfestellung für die Planung und Ausführung von Korrosionsmonitoring wurde von der DGzFP das Merkblatt B12 „Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken“ (DGzFP, 2018) erstellt. Das Merkblatt beschreibt die Planung und Anwendung ortsfest eingebauter Sensoren zur kontinuierlichen Erfassung korrosionsrelevanter Messgrößen.

3.5.1 Messtechnik

In der Phase 1 der Korrosionsschädigung werden zur Informationsgewinnung hauptsächlich elektrochemische Methoden eingesetzt. Die wesentlichen elektrochemischen Verfahren zur Korrosionsmessung werden im Folgenden kurz beschrieben.

Polarisationswiderstand

Die Messung des Polarisationswiderstands durch elektrochemische Methoden erlaubt die Quantifizierung der Korrosionsgeschwindigkeit. Sie stellt den Korrosionswiderstand (Polarisation) dar und wird über die lineare Beziehung zwischen dem Potenzial E und dem Strom I bestimmt. Dabei wird eine Systemkonstante B eingeführt, die die Kinetik der anodischen und kathodischen Teilreaktion enthält. Diese Konstante beträgt 26 mV für korrodierenden Stahl und 52 mV für passiven Stahl in Beton (SCHIEGG, 2002).

Hierbei wird ein konstantes Potenzial an den Stahl im Beton über eine inerte (d. h. sich nicht auflösende) Gegenelektrode (z. B. Platin- oder Titannetz) auf der Betonoberfläche angebracht, und der resultierende Strom nach einigen Minuten (üblicherweise zwischen 30 und 100 Sekunden) gemessen (ANDRADE, 2020). Der wirksam gemessene Polarisationswiderstand ist entsprechend dem ohmschen Widerstand des Betons zu korrigieren, der z. B. mit einer Wechsellspannungswiderstandsmessung ermittelt werden kann (SCHIEGG, 2002). Der Polarisationswiderstand kann mit den folgenden Methoden gemessen werden (ELSENER, 1996; ANDRADE and ALONSO, 2004):

Galvanostatische Pulsmessung GPM

Die GPM (auch Guard-Ring-Methode genannt) ist die effizienteste Methode zur Bestimmung des Polarisationswiderstands (SCHIEGG, 2002). Die Messung erfolgt durch Anlegen eines galvanostatischen Impulses mit einer Dauer von 30 Sekunden (korrosiv) bis 100 Sekunden (passiv). Dann wird ein weiterer Strom vom äußeren Ring angelegt, der durch zwei Referenzelektroden moduliert wird, um den Strom effizient auf den vorbestimmten Bereich zu begrenzen und somit den Polarisationswiderstand zu ermitteln (ANDRADE, 2020).

Potenzialdämpfungsmethode

Eine andere Möglichkeit besteht in der Messung der kritischen Dämpfungslänge mit Hilfe der Mehrfachelektroden- oder Potenzialdämpfungsmethode. Der Sensor besteht in diesem Fall aus einer kleinen Scheibe, die als einzige Gegenelektrode wirkt und in deren Mitte sich die Referenzelektrode für die Aufzeichnung des korrigierten Potenzials befindet. Drei weitere Referenzelektroden sind in festen Abständen zueinander angeordnet. Für die Messung wird ein Potenzialsprung von etwa 100 mV, der zwischen 15 und 60 s dauert, an den Stab angelegt. Dieser angelegte Potenzialsprung dämpft sich mit zunehmendem Abstand ab. Aus dem Abstand (L_{crit}), den das Signal erreicht, und bestimmten geometrischen Angaben zum Stabdurchmesser lässt sich der tatsächliche Potenzialwiderstand (bezogen auf eine bestimmte Stahlfläche) berechnen (ANDRADE, 2020).

Messung des elektrischen Betonwiderstands

Die Messung des elektrischen Widerstands im Beton wird angewandt, um das Korrosionsrisiko abzuschätzen und den Feuchtigkeitsgehalt des Betons zu bestimmen. Zementgebun-

dene Stoffe weisen je nach Zusammensetzung und Umgebungsverhältnissen elektrische Widerstände in einem Bereich von wenigen hundert Ohm bis Megaohm auf. Das Austrocknen des Baustoffs kann über den Anstieg des elektrischen Widerstands erfasst werden. Der elektrische Widerstand wird in der Regel über die Messung des niederfrequenten Wechselstromwiderstands zwischen mehreren Elektroden, üblicherweise Zwei- oder Vierelektrodenanordnungen, ermittelt. Die Elektroden werden hierzu nachträglich in fester Anordnung in das Bauteil integriert (DGZfP, 2018). Zur tiefengestaffelten Messung des elektrischen Betonwiderstands können Multiring-Elektroden verwendet werden. Das Messprinzip und die Anwendung der Multiring-Elektrode ist in Kapitel 3.4 beschrieben.

Messung des Makroelementstromes

Beim Kontakt zwischen zwei verschiedenen Metallen, wie bei lokaler Korrosion oder bei stark variierendem Sauerstoffgehalt, kommt es zur Bildung von Makroelementen. Durch die Messung des Makroelementstroms kann der Korrosionsstrom direkt ermittelt werden und der Massenverlust am Bewehrungsstahl abgeschätzt werden. Im Prinzip können Makroelementströme durch den Einbau künstlicher Anoden (Makrozellen) oder durch mechanisches Auftrennen der Bewehrung gemessen werden.

In beiden Fällen wird angestrebt, diese Elemente mit einer möglichst geringen Störung des Altbetons einzubauen, um keine ungewollten Effekte zu erzeugen, die nicht repräsentativ für das untersuchte Bauteil sind. Dies erfordert die Verwendung von kleinen Probekörpern und kleinflächigen, spitzen Öffnungen. Die elektrische Verbindung von Anode und Kathode durch abgeschirmte Kabel wird z. B. durch eine Gewindebohrung und Verschraubung hergestellt. Beim elektrischen Trennen (Isolieren) von korrodierenden Bewehrungsstäben muss zunächst die Bewehrung lokalisiert werden, dann wird sorgfältig ein Kreuzungspunkt festgelegt und die Bewehrungsstäbe werden mit einem Trennschleifgerät durchtrennt (Bild 26) (SCHIEGG, 2002).

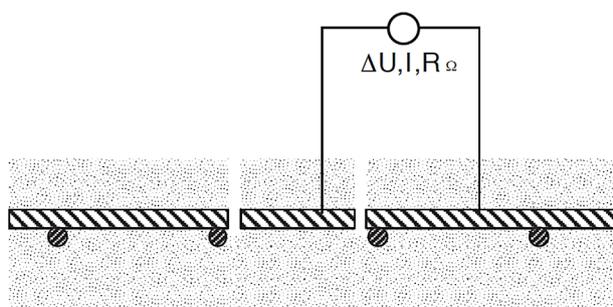


Bild 26: Makroelement auf Bauwerken durch Trennen der Bewehrung (schematisch) (ELSENER, 1996)

Die künstlichen Anoden (Makrozellen) sind Bewehrungsstäbe, die in einem chloridbelasteten oder chloridfreien Beton/Mörtel eingebettet und mit einem Messkabel kontaktiert werden. Das Gewicht des Bewehrungsstabes ist vor dem Einbau zu messen, um den Masseverlust und die korrodierende Fläche bei einem späteren Ausbau beurteilen zu können (SCHIEGG, 2002).

Potenzialmessung

Die Potenzialmessung ist eine Methode zur Beurteilung von Korrosionsprozessen an der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen. Das Messprinzip der Potenzialmessung beruht auf der Messung des Potentials als Spannungsmessung zwischen der Bewehrung und einer Bezugs-elektrode. Die Messung negativer Potentiale kann als Beginn der Korrosion oder als eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Korrosion gedeutet werden (DGZfP, 2018). Das

Messsystem besteht aus einer Bezugselektrode mit bekanntem und konstantem Potenzial, einem Bewehrungsanschluss und einem hochohmigen Spannungsmessgerät (SCHIEGG, 2002). Bild 27 zeigt das Messprinzip mit einer portablen Elektrode. Für eine dauerhafte Messung des Bewehrungspotenzials an kritischen Bauwerksbereichen können die Elektroden beim Neubau direkt eingebaut werden und ermöglichen eine frühzeitige Erkennung von Korrosionsvorgängen. Für einen permanenten Einbau eignen sich Silberchlorid-Elektroden oder Mangandioxid-Elektroden (Bild 28). Die Potentiale der Bezugselektrode sind temperaturabhängig und erfordern eine Temperaturkompensation über die Erfassung der Temperatur bei bekanntem Temperaturkoeffizienten (DGZfP, 2018).

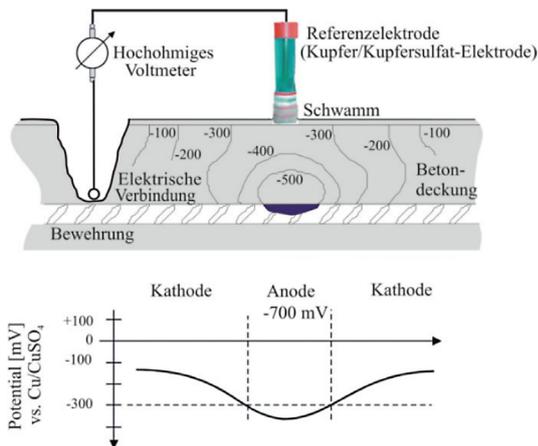


Bild 27: Prinzip der Potenzialmessung auf der Betonoberfläche (KEßLER et al., 2011)

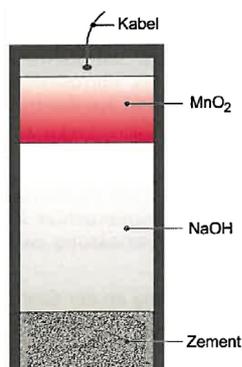


Bild 28: Aufbau und Beispiel einer Mangandioxid-Elektrode (DGZfP, 2018)

Anodenleiter

Das Anodenleitersystem ist ein Makrozellensensorsystem zur Verfolgung des Eindringens der Depassivierungsfront (Chloride oder Karbonatisierungsfront) als Funktion der Tiefe durch Messung des galvanischen Stroms gegen eine im Beton montierte Kathode. Das Messprinzip beruht auf dem deutlichen Anstieg des Makrozellenstroms als Folge der Depassivierung durch das Eindringen von Chloriden oder Karbonatisierung. Durch die zyklischen Messungen kann die Eindringtiefe des Schadens verfolgt und die zu erwartende Schadensentwicklung extrapoliert werden (MAYER, 2010a).

Nach MAYER, 2010b besteht das Messsystem aus einer tiefengestaffelten Anodenleiter mit 6 Einzelanoden einschließlich eines Temperatursensors als Hauptmesssensor, einem Kathodenstab als Gegenelektrode für die elektrischen Messungen, einem Kabelanschluss, einem Anschlusskasten und einem Anschluss an die Bewehrung (Bild 29).

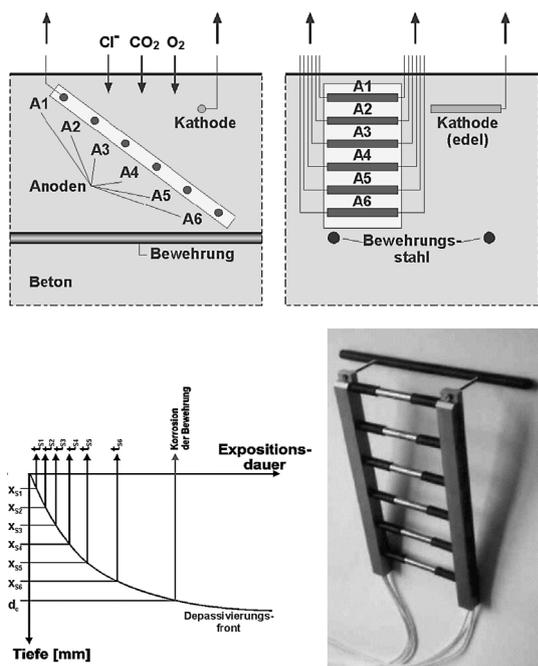


Bild 29: Aufbau einer Anodenleiter (SODEIKAT et al., 2006)

Die Messintervalle sind in Abhängigkeit der Messaufgabe zu wählen. In den meisten Anwendungsfällen sind Messperioden von einem Jahr ausreichend (MAYER, 2010a). In einigen Anwendungsfällen wie z. B. der Überprüfung neuer Bauarten oder der Ermittlung des Zeitpunkts der Korrosionsinitiation können kürzere Messperioden notwendig sein.

Obwohl die mit dem Anodenleitersystem gemessenen Makrozellenströme die Zeit bis zur Depassivierung ermitteln können, lassen sich aufgrund des geringen Kathoden-Anoden-Verhältnisses keine Informationen über die Korrosionsgeschwindigkeit des Stahls gewinnen (BERTOLINI et al., 2013).

Die Anodenleiter ist aufgrund der Sensorgröße hauptsächlich für Neubauten zur Anordnung vor der Betonage geeignet. Für den nachträglichen Einsatz bei umfangreichen Instandsetzungsmaßnahmen oder Verstärkungsmaßnahmen können diese Sensoren ebenfalls zum Einsatz kommen (SCHIEGG, 2002).

Drahtsensoren

Drahtsensoren bestehen aus mehreren parallelen Eisen- oder Stahldrähten. Bei korrosiven Einflüssen kommt es zum korrosionsinduzierten Drahtbruch der Sensordrähte. Über die Erfassung der Anzahl der korrodierten Drähte (Stellvertreterkorrosion) lässt sich die Eindringtiefe der Schädigungsfront (Chlorid- oder Karbonatisierungsfrente) feststellen. Das Durchrosten der Drähte kann über die Messung des elektrischen Widerstands überwacht werden. Bei Bruch eines Sensordrahts steigt der Sensorgesamt-widerstand sprunghaft an (HOLST et al., 2010). Die Einzeldrähte selbst sind parallelgeschaltet. Bei Drahtbruch scheidet der spezifische Ohm'sche Widerstand des Einzeldrahts aus der Parallelschaltung aus, wodurch der Fortschritt der Schädigungsfront festgestellt werden kann (DGZfP, 2018).

Drahtsensoren sind als kabelgebundene oder kontaktlose Sensoren erhältlich. Zum kontaktlosen Auslesen können Drahtkorrosionssensoren auch als passive, energielose RFID-Sensoren ausgeführt werden (Fraunhofer IMS Duisburg, 2016). Das Auslesen und die Installation der RFID-Drahtkorrosionssensoren entspricht dem Prinzip der RFID-Feuchtigkeitssensoren in Kapitel 3.4.1 und 3.4.3.

3.5.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Zur Datenerfassung der Messgrößen bei Korrosionsmonitoring müssen sowohl die Anforderungen der Messtechnik als auch die Funktionsfähigkeit in den vorhandenen Temperaturbereichen gleichermaßen berücksichtigt werden. Die Korrosionsüberwachungsmaßnahme kann verschiedene Messgrößen zugleich beinhalten, daher ist das realisierte Datenerfassungssystem entsprechend der Messgrößen mit unterschiedlichen Messmodulen auszustatten. Ein Beispiel für den parallelen Einsatz verschiedener Messinstrumente mittels eingebetteter Kerne (Bild 30) mit Sensorarrays wird in (SCHIEGG and BÖHNI, 2000; SCHIEGG, 2002) vorgestellt.

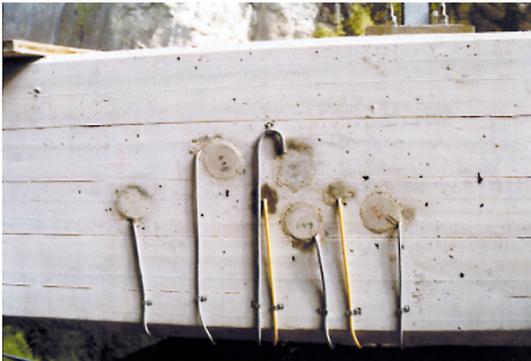


Bild 30: Instrumentierte Bohrkern im Konsolkopf einer Brücke (SCHIEGG and BÖHNI, 2000)

Die Messgrößen (Potenzial, Strom, Widerstand, Hilfsgrößen etc.) wurden über ein implementiertes Datenerfassungssystem gemessen, das vier verschiedene Messmodule enthält und an der Konsolenunterseite des Brückendecks befestigt ist (Bild 31).



Bild 31: Aufbau und Befestigung des Datenerfassungssystems (ohne Abdeckung) (SCHIEGG and BÖHNI, 2000; SCHIEGG, 2002)

Die zu messenden Signale werden in eine proportionale Ausgangsspannung umgewandelt, die von einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert und dem Mikrocomputer des Systems zugeleitet wird. Der gesamte Messprozess wird von dem Mikrocomputer des Systems gesteuert. Gleichzeitig werden die Daten in einem Flash-Speicher (nicht überschreibbar) gespeichert, um Datenverluste bei einem Stromausfall zu vermeiden.

3.5.3 Ausführung des Messsystems

Polarisationswiderstand

Bei der Potenzialdämpfungsmethode wird empfohlen, einen Mörtel mit niedrigem spezifischem Widerstand (mit hohem Wasser/Zement-Verhältnis) zu verwenden, um die Sensoren an der Oberfläche zu befestigen (ANDRADE, 2020).

Messung des Makroelementstromes

Ein Ausführungsbeispiel für ein Korrosionsmonitoring mit einer Makroelementstrom-Messzelle ist in ANGST and BÜCHLER (2019) veröffentlicht. Das Monitoringsystem besteht aus einer Makro-Element-Strommesszelle, die auf der Oberseite des Querträgers einer Brücke in Hergiswil in den Beton eingebaut wurde.

Der Aufbau der verwendeten Sensoren besteht aus gebogenen Edelstahlelementen, die zwei Korrosionsstellen aus Betonstahl. Die Messgröße ist dann der Makroelementstrom zwischen den eingebetteten Korrosionsstellen des Bewehrungsstahls und der vorhandenen Bewehrung. Das Messkabel wurde mit einem Kunststoffrohr geschützt. Ein Monitoringsystem, das die Makroelementströme kontinuierlich aufzeichnet und lokal speichert, wurde an die Sensoren angeschlossen.

Anodenleiter

Der Einbau des Anodenleiters erfolgt in der Regel zwischen der Betonoberfläche und der Bewehrung (in der Betondeckung). Die Zwischenabstände der Anodenleiterstufen betragen üblicherweise 5 oder 10 mm. Die Kabelanschlüsse für das Messinstrument sind dabei vor Wasser zu schützen. Ein Anschlusskasten kann hierfür eine Ausführungsmöglichkeit darstellen (SODEIKAT et al., 2006). Bild 32 zeigt ein Ausführungsbeispiel des Anodenleiters auf der Bewehrung vor dem Betonieren.

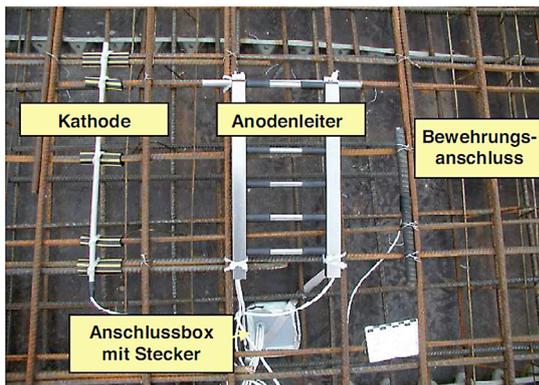


Bild 32: Ausführungsbeispiel der Anodenleiter auf der Bewehrung vor dem Betonieren (SODEIKAT, 2010)

Drahtsensoren

Drahtkorrosionssensoren eignen sich für den direkten und nachträglichen Einbau. Beim direkten Einbau bei Neubauten sind die Sensoren in ihrer Lage zu fixieren, sodass sie nach dem Betonieren die vorgesehene Lage im Betonbauteil aufweisen. Für den nachträglichen Einbau können Sie in Bohrlöcher mit Ankopplungsmörtel eingelassen werden. Die Ausführung von kontaktlosen Drahtkorrosionssensoren ist in Kapitel 3.4.3 beschrieben.

3.5.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele der Korrosionsmessung lassen sich wie folgt zusammenfassen (HUNKELER, 1999; SCHIEGG, 2002):

- Die Zustandsentwicklung beschädigter Bauwerke verfolgen, um die Zuverlässigkeit einer Zustandsbewertung zu erhöhen und den optimalen Interventionszeitpunkt zu bestimmen,
- Informationen über die Notwendigkeit von Instandsetzungsmaßnahmen darzustellen,

- Evaluierung und Verfolgen der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen,
- Abschätzung der Restnutzungsdauer, und
- die rechtzeitige Erkennung des Zeitpunkts des Beginns der Korrosionsprozesse.

3.5.5 Anwendungsgrenzen

Grundsätzlich liefert das Korrosionsmonitoring mit lokalen ortsfesten Sensoren nur eine punktuelle Aussage über den lokalen Bauwerkszustand. Zur Ableitung einer Aussage über den Bauwerkszustand ist eine ausreichende Anzahl an Sensoren an repräsentativen Stellen notwendig. Die Messverfahren liefern eine relative Aussage über den Korrosionszustand. Die Quantifizierung der tatsächlichen Korrosionsrate und die absolute Bestimmung von Querschnittsverlusten ist nicht möglich (DGZfP, 2018). Im Folgenden werden die Anwendungsgrenzen der einzelnen Messprinzipien zusammengefasst.

Polarisationswiderstand:

Die Anwendungsgrenze des kritischen Längenkonzepts bei der Messung des Polarisationswiderstandes liegt darin, dass der Zustand der Bewehrung im Voraus bekannt sein muss. Unkenntnis kann zu einer Unterschätzung des Betonwiderstandes und einer Überschätzung des spezifischen Polarisationswiderstandes führen, so dass die Korrosionsraten zu niedrig eingestuft werden (SCHIEGG, 2002).

Messung des Betonwiderstands:

Zu den Schwierigkeiten bei der Messung des Betonwiderstands gehören die Befeuchtung der Betonoberfläche mit nassen Schwämmen, hochwiderstandsfähige Oberflächenschichten und eine inhomogene Feuchtigkeitsverteilung im Beton (SCHIEGG, 2002).

Potenzialmessung:

Als nachteilig werden die Schwierigkeiten bei der Interpretation der gemessenen Potenzialwerte aufgrund des multifaktoriellen Einflusses (z. B. Betonfeuchte, Chloridgehalt, pH-Wert des Porenwassers, Streuströme) angesehen. Darüber hinaus kann die Korrosion der Spannstahlbewehrung nicht festgestellt werden, wenn sie sich in einem Schutzrohr befindet (Proceq SA, 2009).

Drahtsensoren:

Das Durchrosten des Sensordrahts ist abhängig von der Lage und dem Durchmesser des Drahts. Verlässliche Aussagen zum Korrosionszustand können nur getroffen werden, wenn eine bekannte Korrelation von der Durchrostung des Drahts zum Korrosionszustand der Bewehrung vorliegt. Aufgrund ihres irreversiblen Messprinzips können keine Aussagen zur zeitabhängigen Veränderung von Korrosionsaktivitäten getroffen werden. Für die Prüfung der Wirksamkeit von Instandsetzungsmaßnahmen sind sie somit bedingt geeignet (DGZfP, 2018).

3.5.6 Qualitätssicherung

Beim Korrosionsmonitoring handelt es sich um eine vergleichsweise komplexe Aufgabenstellung. Für die Auswahl der Sensoren und Messstellen sowie Bewertung der Messergebnisse ist ein Sachkundiger Planer mit Kenntnis im konstruktiven Ingenieurbau und im Gebiet der Korrosion und des Korrosionsschutzes hinzuzuziehen. Fachkenntnisse können über das Vorweisen von Ausbildungen oder Fortbildungen (z. B. über Fachausschuss „ZfP im Bauwesen“, Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz) nachgewiesen werden. (DGZfP, 2018).

Zur Interpretation und Auswertung der Ergebnisse von Korrosionsmessungen werden in ANDRADE (2020) typische Werte sowohl für den spezifischen Widerstand als auch für die

Spezifischer Widerstand	Wahrscheinlichkeit der Korrosion
> 1000 – 2000 $\Omega \cdot m$	Niedrige Korrosionsrate. Trockener Beton.
> 500 – 1000 $\Omega \cdot m$	Niedrige Korrosionsrate. Mittelmäßig trockener Beton.
> 100 – 500 $\Omega \cdot m$	Mittelmäßige Korrosionsrate. Nasser Beton.
> 100 $\Omega \cdot m$	Hohe Korrosionsrate. Nasser Beton mit hoher Porosität.

Tab. 4: Typische Messwerte für Korrosion und die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten - Bereiche des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der erwarteten Korrosionsrate (ANDRADE, 2020)

Korrosionsgrad	$\mu A/cm^2$	$\mu m/Jahr$	Zustand
Vernachlässigbar	< 0,1	< 1	Passiver Zustand
Niedrig	0,1 – 0,5	1 – 5	Depassiviert in Beton mit niedriger Luftfeuchtigkeit
Mittelmäßig	0,5 – 1	5 – 10	Aktive Korrosion bei mittlerer Luftfeuchtigkeit
Hoch	> 1	> 10	Großflächige Korrosion in nassem Beton

Tab. 5: Bereiche der Korrosionsrate in Bauwerken - Typische Messwerte (ANDRADE, 2020)

lineare Polarisation mit den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten der Korrosion angegeben (Tabelle 4 und Tabelle 5).

3.6 Messtechnische Erfassung der Tragwerksverformungen

Zur Erfassung der Tragwerksverformungen eignen sich weitere Messsysteme, die im Kapitel der Verschiebungen näher beschrieben werden:

- Elektronische Schlauchwaage
- Digital-Nivelliere
- Tachymeter
- Laser-Doppler-Vibrometrie
- Induktive Wegaufnehmer

Zur Vermeidung einer übermäßigen Rissbildung und zur Einhaltung von Komfortkriterien bei der Überfahrt sollten vertikale Verformungen bei Brückentragwerken begrenzt werden. Da in numerischen Berechnungen wesentliche Effekte (Rissbildung, Kriechen, Schwinden) auf Grund des Charakters dieser Art von Analysen nicht exakt bzw. mit der jeweiligen Realität in Übereinstimmung berücksichtigt werden können, liefern Verformungsmessungen an den maßgebenden Stellen realitätsgetreue Messwerte zur Beurteilung der o. g. Kenngrößen.

3.6.1 Messtechnik

Die Messtechnik zur Verschiebungs- und Verformungsmessung ist grundsätzlich ähnlich und in Teilen für beide Aufgabenbereiche anwendbar. Aus diesem Grund sind laseroptische Distanzsensoren und elektrische Seilzugsensoren in Kapitel 3.7 aufgeführt. Im Rahmen dieses Kapitels werden Verfahren zur vertikalen und generellen Verformungsmessung vorgestellt.

Elektronische Schlauchwaage

Bild 33 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer elektronischen Schlauchwaage nach GEIER et al. (2014). Die elektronische Schlauchwaage besteht aus einem Referenzbehälter mit Füll-

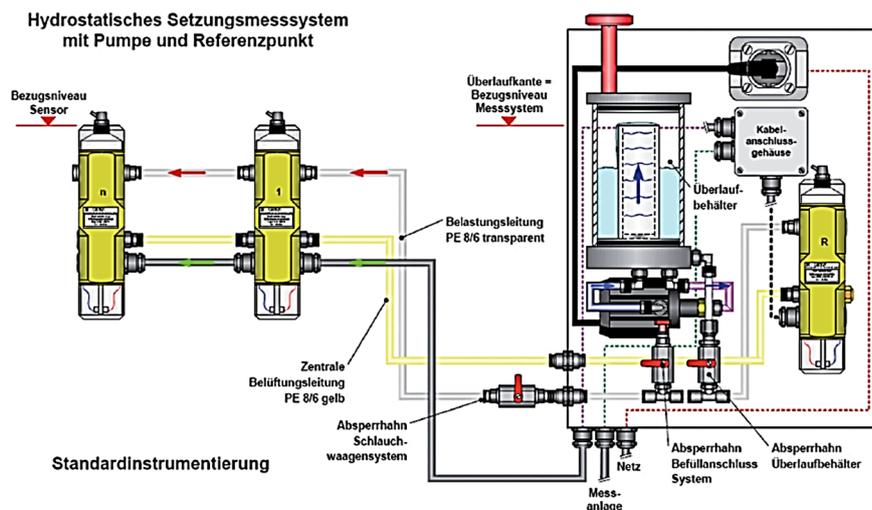


Bild 33: Schematische Darstellung einer elektrischen Schlauchwaage (GEIER et al., 2014)

flüssigkeit, welcher über einen Schlauch mit einzelnen Drucksensoren verbunden ist. Die Drucksensoren werden dabei auf die zu untersuchenden Stellen im Bauwerk verteilt.

Eine Schlauchwaage dient der Kontrolle vertikaler Verformungen. Das Messsystem beruht auf einer hydrostatischen Setzungsmessung. Der Druck der Füllflüssigkeit aus dem Referenzbehälter belastet dabei die einzelnen Drucksensoren in Abhängigkeit der Höhenlage im Bauteil. Durch das Auftreten einer Höhenänderung folgt eine unmittelbare Druckänderung. Diese Druckänderung kann über die Wichte der Flüssigkeit in eine äquivalente Höhenänderung bzw. Verschiebung umgerechnet werden.

Elektronische Schlauchwaagen sind ausschließlich für statische Messungen geeignet (MEHLHORN and CURBACH, 2014). Der Messbereich liegt dabei zwischen 100 mm und 1000 mm. Dabei liegt die Genauigkeit zwischen 0,1 mm und 2,0 mm (MEHLHORN and CURBACH, 2014). Die elektronische Schlauchwaage ist für die folgenden Einsatzgebiete geeignet (MEHLHORN and CURBACH, 2014):

- Lang- und Kurzeitdurchbiegungen
- Aufnahme der Setzungen bzw. Hebungen von Widerlagern oder Pfeilern
- Bestimmung vertikaler Verformungen eines Bauwerks
- Verformungen in unterschiedlichen Bauzuständen

Faser-Bragg-Gitter

Faser-Bragg-Gitter sind faseroptische Sensoren. In die optische Faser werden mithilfe von UV-Lasern kleinere Rillen auf einem begrenzten Bereich angebracht. Diese Rillen werden als Bragg-Gitter bezeichnet. Die Bragg-Gitter liegen dabei senkrecht zur Faserachse. Der Abstand zwischen den einzelnen Kerben des Bragg-Gitters ist dabei für jeden einzelnen Abschnitt konstant und wird mit der Konstante Λ bezeichnet. Bei Lichteinstrahlung in das faseroptische System wird ein Teil des eingestrahlichten Lichts an den Gittern reflektiert.

Eine Veränderung des Gitterabstandes durch mechanische oder thermische Verformungen verursacht nach der obigen Formel eine Änderung der Bragg-Wellenlänge. Über die veränderten Wellenlängen sind dann Verformungen detektierbar und dem tatsächlichen Ort an der Faser zuordenbar.

Bei der Einprägung mehrerer Bragg-Gitter über eine größere Faser-Distanz können unterschiedliche Gitterabstände für die einzelnen Bragg-Gitter verwendet werden. In diesem Fall werden an jedem Bragg-Gitter Lichtwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen reflektiert. Hierüber sind dann Rückschlüsse auf den Ort der auftretenden Dehnung möglich. Die FBG-Sensoren sind üblicherweise für die Langzeitmessung geeignet.

Digital-Nivelliere

Eine weitere Möglichkeit zur Höhen- und Distanzmessung (Kurzzeitmessung) stellen Digital-Nivelliere dar. Bild 34 zeigt das Grundprinzip eines Digitalnivelliers. Dieser besteht grundsätzlich aus einem drehbaren Nivellierfernrohr, mit welchem eine horizontale Ziellinie zur Nivellierlatte erzeugt werden kann. Hierüber sind dann Aussagen über Höhenunterschiede zwischen Messpunkt und Nivelliergerät möglich.

Für Höhenmessungen sind dabei Genauigkeiten von 0,3 mm bis 1,0 mm erzielbar (Leica Geosystems AG, 2021). Für Distanzmessungen sind nach Herstellerangaben Genauigkeiten von 15 mm bei einer Distanz von 30 m erzielbar. Der Messbereich des genannten Digitalnivelliers liegt dabei zwischen einer minimalen Reichweite von 1,8 m und einer maximalen Reichweite von 110 m (Leica Geosystems AG, 2021).

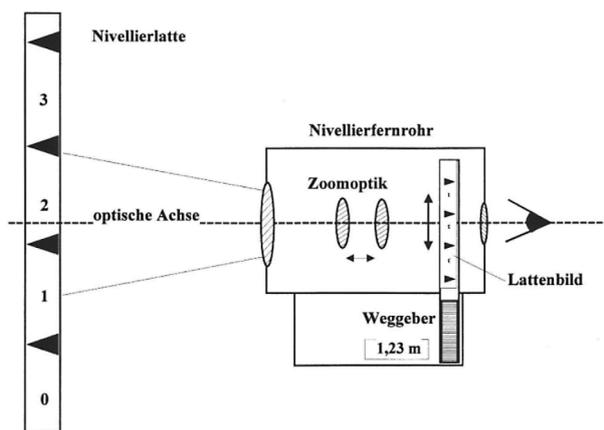


Bild 34: Grundprinzip einer Digital-Nivelliere (INGENSAND, 1995)

Tachymeter

Bild 35 zeigt das Messschema eines Tachymeters. Elektronische Tachymeter werden zur Messung von Richtungen, Vertikalwinkeln und Schrägdistanzen verwendet. Sie sind normalerweise für die Kurzzeitmessung geeignet.

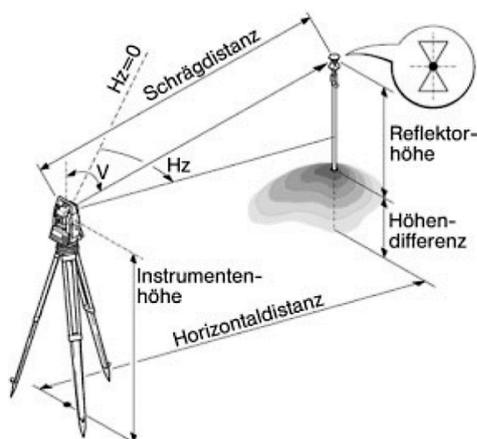


Bild 35: Messschema eines Tachymeters (BERGMEISTER et al., 2010)

Ein Tachymeter besteht aus einem elektronischen Theodolit zur Winkelmessung sowie einem elektronischen Distanzmesser. Mit elektronischen Tachymetern können dabei Reichweiten von 1,5 m bis mehrere tausend Meter gemessen werden (Leica Geosystems AG, 2020). Dabei werden Genauigkeiten zwischen 1 und 2 mm (bei einfacher Messung) erreicht.

Laser-Doppler-Vibrometrie

Der Laser-Doppler-Vibrometer ermöglicht eine berührungsfreie Messung von Geschwindigkeiten und Verformungen bis in hohe Frequenzbereiche (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Das Messprinzip ist in Bild 36 dargestellt. Der einfallende Laserstrahl wird über Strahlenteiler in einen Referenzstrahl und einen Messstrahl aufgeteilt. Der Messstrahl trifft auf das Messobjekt und wird an dessen Oberfläche reflektiert. In Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit der Oberfläche in Richtung des Laserstrahl erfolgt eine Frequenzmodulation des reflektierten Strahls, über welche auf die Geschwindigkeit bzw. die Verschiebung des Messobjektes relativ zu einem ortsfesten Bezugspunkt rückgeschlossen werden kann. Sie sind normalerweise für die Kurzzeitmessung geeignet.

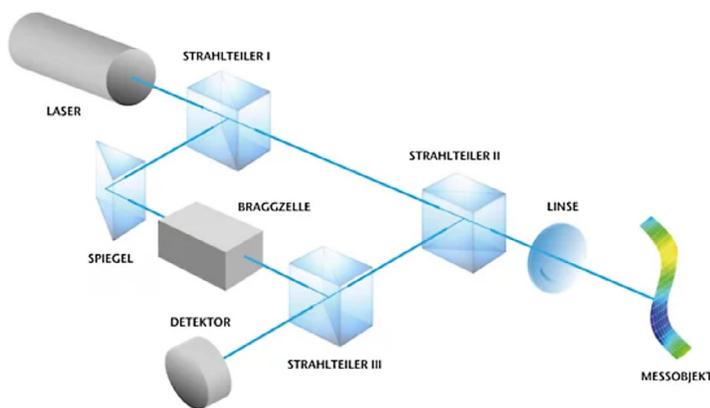


Bild 36: Prinzip der Laser-Doppler-Vibrometrie (Polytec GmbH, 2021b)

Der Messbereich der Geschwindigkeit von Laser-Doppler-Vibrometern liegt zwischen $0,5 \mu\text{m/s}$ und 10 m/s (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Der Frequenzbereich ist dabei zwischen 0 Hz und mehreren GHz angeordnet. Technisch sind neben der Geschwindigkeitsmessung auch Verschiebungsmessungen möglich (Polytec GmbH, 2021b).

Die Messung von Verschiebungen sind dabei im Größenbereich von $\pm 200 \text{ mm}$. Die kleinstmöglichen Wegmessbereiche liegen dabei im Bereich zwischen $\pm 1 \mu\text{m}$ und $\pm 10 \text{ nm}$ bei Auflösungen von 31 pm bis $0,3 \text{ pm}$ (Polytec GmbH, 2021a).

Über ein Beispiel für die Anwendung des Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) auf Brücken zur Messung von Brückenverformungen und -schwingungen in New York wird in NASSIF et al. (2005) berichtet. Die Messungen des Laser-Doppler-Vibrometers wurden mit den parallelen Messdaten von Wegaufnehmern verglichen und verifiziert, wobei vergleichsweise detaillierte Ergebnisse gegenüber den Wegaufnehmern erzielt wurden.

Induktive Wegaufnehmer

Das Messprinzip induktiver Wegaufnehmer ist in Kapitel 3.11 beschrieben.

3.6.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Für die Dehnungsmessungen mit Faser-Bragg-Gittern gibt SAKIYAMA et al. (2022) eine Messrate von 200 Hz an.

Verformungsmessungen mit elektronischen Schlauchwaagen werden nach REITERER et al. (2008) mit einer Messrate von 1 Hz durchgeführt.

3.6.3 Ausführung des Messsystems

Der Einsatz elektronischer Schlauchwaagen zur vertikalen Verformungsmessung ist in Bild 37 dargestellt. Im Messkonzept wurden zwei Setzungsmessungen an den Auslegerenden sowie in Brückenmitte angeordnet. Die angebrachten Sensoren messen dabei Verformungsunterschiede zu einem Referenzsensor mit einer Genauigkeit von 0,01 mm.

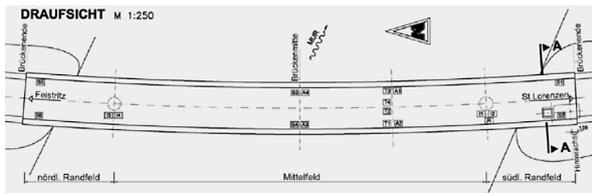


Bild 37: Monitoring-System mit Schlauchwaagen (Si) an einer Straßenbrücke (REITERER et al., 2008)

Bild 38 zeigt die Montage der beschriebenen Schlauchwaagen. Wesentlich dabei ist, dass der Referenzsensor (Referenzbehälter) an einem setzungsunempfindlichen Ort angebracht wird.



Bild 38: Montage einer elektronischen Schlauchwaage (REITERER et al., 2008)

Das installierte System dient der Erfassung der Dehnungen (SAKIYAMA et al., 2022). Durch den differenzialen Zusammenhang zwischen Dehnung und Verformung kann von gemessenen Dehnungen auf die Verformung rückgeschlossen werden. Die Dehnung wird dabei integral über die gesamte Länge des Sensors gemessen.

Bild 39 zeigt ein Beispiel für die Applikation eines Faser-Bragg-Gitters (TUE and DIETZ, 2005).

Tachymeter werden oftmals für den geplanten Messeinsatz zum Bauwerks mitgebracht, während die Referenzpunkte permanent am Bauwerk befestigt werden. Für eine perma-



Bild 39: Faser-Bragg-Gitter-Sensor an einer Brücke (TUE and DIETZ, 2005)

nente Deformationsüberwachung können motorisierte Tachymeter in Schutzkästen am Bauwerk montiert werden. Diese Art von Vervormungsmessung findet sich beispielsweise auch häufig im Bereich des Gleis- bzw. Tunnelbaus.

Bild 40 zeigt ein Anwendungsbeispiel des Wegaufnehmers für die Messung von Verformungen am Pfeilerkopf der Scherkondetalbrücke (MARX and WENNER, 2015).

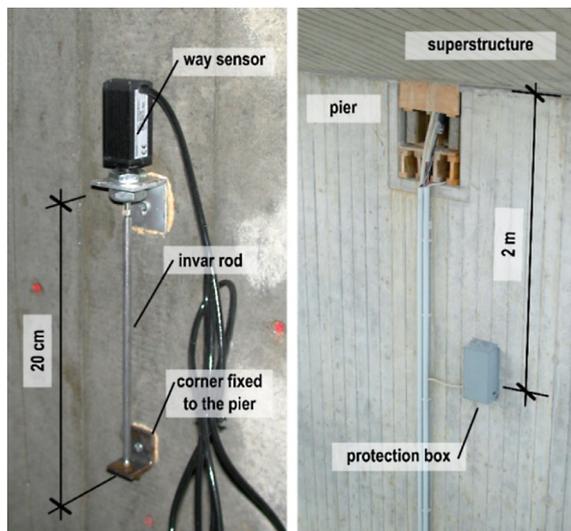


Bild 40: Anwendungsbeispiel eines Wegaufnehmers für die Messung von Verformungen am Pfeilerkopf der Scherkondetalbrücke (MARX and WENNER, 2015)

3.6.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele liegen in der Erfassung von Durchbiegungen und Verformungen eines Bauwerks. Daraus folgen die aufgeführten Anwendungsbereiche:

- Überprüfung des Tragwerkverhaltens unter Verkehrseinwirkung, insbesondere Schwerlastverkehr
- Überprüfung der tatsächlichen Bauwerkssteifigkeiten zur Verifizierung der rechnerischen Annahmen und Unterstützung der Nachrechnung
- Überprüfung der Verformungen als Indikator einer eintretenden Schädigung bzw. Änderung im Tragverhalten
- Messung von vertikalen Verformungen in Feldmitte und an den Auslegerenden bzw. an verschiedenen Stellen im Tragwerk (REITERER et al., 2008; GEIER et al., 2014)
- Ein weiteres Anwendungsziel wird beispielsweise in (GEIER et al., 2008) beschrieben:

Hierbei werden die Einsenkungen eines Brückentragwerks infolge der Überfahrt eines Zuges untersucht.

Die zugehörigen Ergebnisse sind in Bild 41 dargestellt. Die gemessenen Einsenkungen liegen dabei im Größenbereich von 4 mm bis vereinzelt 8 mm. Besonders interessant ist die Gegenüberstellung mit dem zugehörigen Temperaturverlauf. Hieraus ist ersichtlich, dass die Minima der Durchbiegung auftreten, wenn die Temperatur der Tragwerksoberfläche unter dem Gefrierpunkt liegt. Diese Erkenntnis bezüglich der Tragwerksversteifung steht im Einklang mit Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der maßgebenden Eigenfrequenzen eines Brückentragwerks (PEETERS, 2000). Demnach führen niedrige Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes zu einem signifikanten Zuwachs der Eigenfrequenzen und somit zu einer Versteifung des globalen Tragsystems. Ähnliche Erkenntnisse resultieren auch aus der Darstellung der Verformungsmesswerte nach BOROS et al. (2016) in Abhängigkeit der Bauteiltemperatur. Demnach stimmen die Verformungsmaxima bzw. -minima mit den maximalen bzw. minimalen Temperaturen überein (Bild 42).

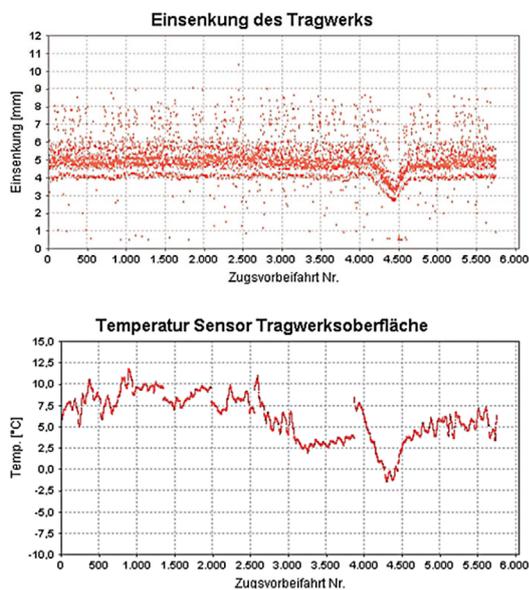


Bild 41: Einsenkung eines Brückentragwerks in Feldmitte (oben) und zugehörige Temperatur an der Tragwerksoberfläche (unten) (GEIER et al., 2008)

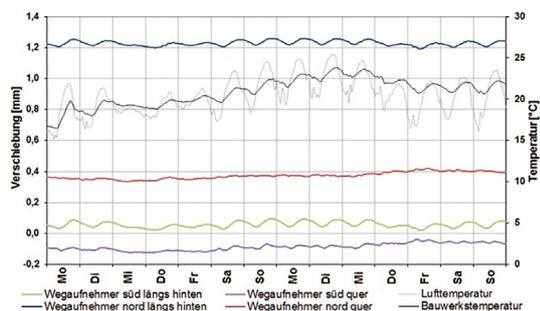


Bild 42: Messwerte der Wegaufnehmer im Vergleich zur Temperaturmessung (BOROS et al., 2016)

3.6.5 Anwendungsgrenzen

Die Anwendungsgrenzen sind vom jeweiligen Verfahren abhängig:

- Elektronische Schlauchwaage:
Messung vertikaler Verformungen durch Änderung der Höhenlage des Bauteils. Der Referenzpunkt zum Vergleich von Druckunterschieden sollte dabei an einem verschiebungsunempfindlichen Ort angebracht werden.

- **LDV-Systems:**
Eine Anwendungsgrenze des LDV-Systems ist die Ungeeignetheit für die Langzeitüberwachung von Brücken, da es oft auf dem Boden unter der Brücke platziert wird und nicht unbeaufsichtigt stehen gelassen werden kann (NASSIF et al., 2005). Heute werden die Systeme allerdings zur Langzeitüberwachung mit den entsprechend geeigneten Anwendungsmaßnahmen eingesetzt.

3.6.6 Qualitätssicherung

Digital-Nivelliere:

Für die Qualitätssicherung von Messungen mit digitalen Nivelliergeräten sind Kalibrierungen von Nivelliergerät und Nivellierlatten zur korrekten Erfassung des Maßstabes notwendig (SCHWARZ and HENNES, 2017). Das hat den Hintergrund, dass der Maßstab eine zeitabhängige Änderung aufweist. Nach SCHWARZ and HENNES (2017) sollte somit einmal im Jahr eine Kalibrierung von Nivelliergerät und Nivellierlatten erfolgen. Digitalnivelliere sind mit einer sogenannten Systemkalibrierung auf den richtigen Maßstab anzupassen. Hintergründe hierzu können (SCHWARZ and HENNES, 2017) entnommen werden.

Faser-Bragg-Gitter:

Bei der Messung mit FBG-Sensoren ist der Anteil der Wellenlängenänderung zu eliminieren, der durch die Veränderung der optischen Eigenschaften der Faser aufgrund der Temperaturschwankungen verursacht wird. Diese Eliminierung kann über zwei Vorgehensweisen erfolgen. Einerseits kann die Kompensation mittels eines Referenzsensors erfolgen, der in thermischem Kontakt mit dem Bauteil steht, aber nicht der mechanischen Dehnungsänderung ausgesetzt wird. Die temperaturabhängigen Abweichungen im Fasermaterial können dann abgezogen werden. Andererseits kann die Kompensation über Korrekturkurven für Materialtemperaturen gegenüber Abweichungen erfolgen (CASAS and CRUZ, 2003).

Tachymeter:

Bei den Messungen spielt die Positionierung der Tachymeter eine wesentliche Rolle. Einerseits kann durch eine geeignete Positionierung höhere Genauigkeit bzw. eine hohe Ortsauflösung mit der ausreichenden Anzahl von Messpunkten erreicht werden (RETZE, 2007). Andererseits ist die Positionierung so zu planen, dass mögliche Witterungseinflüsse während der Messung vermieden werden. Ein Beispiel für die Installation von Tachymetern zur Bestimmung von Verformungen an einem Brückenpfeiler ist in (Bild 43) dargestellt, wobei ein Gehäuse für das Instrument veranschaulicht wird.



Bild 43: Installationsbeispiel eines Tachymeters für Verformungsmessungen (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015a) (Beispielsammlung Monitoring 5.2)

3.7 Messungen von Verschiebungen

Für die Verschiebungsmessung an Ingenieurbauwerken stehen nach SKI Ingenieurgesellschaft mbH u.A. die folgenden Methoden zur Verfügung:

- Laseroptische Distanzsensoren

- Induktive Wegmesssysteme/ Wegaufnehmer
- Elektronische Seilzugsensoren

Die Erfassung außerplanmäßiger Bauwerksverschiebungen stellt einen wesentlichen Bestandteil des Brücken-Monitoring dar. Ungewollte Bauwerksverformungen verursachen bei Behinderung der freien Verformungen (z. B. durch eine statisch unbestimmte Lagerung) Zwangsspannungen, welche das Bauwerk zusätzlich beanspruchen. Im Falle von Brückenbauwerken in Betonbauweise werden diese Zwangsspannungen bei Überschreiten der Betonzugfestigkeit durch Rissbildung abgebaut, welche das Bauwerk in der Regel ungünstig hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und u. U. der Tragfähigkeit beeinflussen. Neben der Abschätzung der Zwangsspannungen aus der Behinderung freier Verformungen ist auch die Messung freier horizontaler Verschiebungen eines Brückentragwerks von Interesse. Ein Beispiel hierfür sind Fahrbahnübergangskonstruktionen, welche die Bewegungen der Bücke aus Temperatur und Verkehr ausgleichen sollen.

3.7.1 Messtechnik

In den folgenden Ausführungen werden die Begriffe Wegmesssystem und Wegaufnehmer entsprechend ihrer Definition synonym verwendet.

Laseroptische Distanzsensoren

Laseroptische Wegmesssysteme werden beispielsweise in GEIER and BINDER (2009) zur Erfassung auftretender Horizontalverschiebungen an den Kämpfern einer Kanalbrücke verwendet. Nach dem heutigen Stand der Technik werden bei der laseroptischen Wegmessung Wegaufnehmer bei hohen Genauigkeitsanforderungen nach dem Triangulationsprinzip verwendet.

Das Messprinzip laseroptischer Wegmesssysteme beruht auf der Reflexion emittierter Laserstrahlen auf dem untersuchten Material und der anschließenden Auswertung der reflektierten Strahlung am Empfangselement. Bei der Auswahl eines Messsystems muss eine Abstimmung der Laserart (und somit des Sensors) auf das Bauteilmaterial erfolgen (WINKLER, 2021). Laseroptische Systeme sind nicht für sämtliche Oberflächen und deren Reflexionseigenschaften geeignet. Der nutzbare Frequenzbereich liegt für laseroptische Wegaufnehmer nach der Triangulationsmethode zwischen 0 Hz (Statische Verschiebungen) und zu mehreren hundert Hz (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Der wesentliche Vorteil der Methodik ist dabei eine berührungsfreie Messmethodik. Dem gegenüber stehen die Nachteile der Schmutz- und Feuchteempfindlichkeit (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Die Auflösung der Laser-Wegsensoren nach (Micro-Epsilon, 2022a) liegen dabei im Bereich von 0.03 μm bis 20 μm . Die Messbereiche (Abstand vom Messobjekt) liegen zwischen 2 mm und 1000 mm.

Für die laseroptische Erfassung von Verschiebungen über größere Distanzen können Laser-Distanz-Sensoren nach Micro-Epsilon, 2022b verwendet werden. Hiermit sind Distanzmessungen statisch und dynamisch bewegter Messobjekte über Distanzen bis zu 300 m auf natürlichen Oberflächen und 3000 m bei Verwendung spezieller Reflektoren möglich.

Der oben genannte Sensor beruht auf dem Messprinzip der Licht-Laufzeitmessung. Über eine Laserdiode im Sensor werden Lichtimpulse in Richtung des Messobjektes abgestrahlt. Die Lichtwellen treffen auf das Messobjekt und werden teilweise wieder zurück zum Sensor reflektiert. Über die Laufzeit bis zum Auftreffen der reflektierten Lichtimpulse sind Rückschlüsse auf die Distanz des Messobjektes möglich. Die Auflösung der Laser-Distanz-Sensoren liegt dabei im Größenbereich von 0,1 mm bis 1 mm.

Die Einsatzgebiete von laseroptischen Sensoren sind vielfältig (MEHLHORN and CURBACH, 2014): Zum einen können auch geringfügige Verschiebungen (Lagerverschiebungen, Rissentwicklung, Relativverschiebungen) ermittelt werden. Zum anderen sind Verformungsmessungen über größere Distanzen und Durchbiegungsmessungen an hohen Brücken durchführbar. Bild 44 zeigt ein Beispiel für die Lasersensoren an der ÖBB Steyrtalbrücke mit den dazugehörigen Reflektoren (GEIER et al., 2016).



Bild 44: Laserdistanzmessung an der ÖBB Steyrtalbrücke (links) und Reflektoren (rechts) (GEIER et al., 2016)

Induktive Wegmesssysteme/ Wegaufnehmer

Eine Beschreibung der Messtechnik kann dem Kapitel 3.11 Rissmonitoring entnommen werden.

Elektronische Seilzugsensoren

Elektronische Seilzugsensoren sind Aufnehmer, welche die Position und die Geschwindigkeit eines beweglichen Bauteils in Bezug zu einer festen Oberfläche messen können. Dazu wird der Aufnehmer an einer festen Oberfläche und das bewegliche Messseil am beweglichen Gegenstand befestigt. Bei Bewegung entsteht ein weg- bzw. geschwindigkeitsproportionales Signal, welches die Rückrechnung auf relative Verformungen und Geschwindigkeiten ermöglicht.

Aufgrund der oben beschriebenen Messform sind sowohl statische als auch dynamische Messgrößen mit Seilzugsensoren bestimmbar (MEHLHORN and CURBACH, 2014). Dabei ist eine Ankopplung an das Messobjekt notwendig. Die Messbereiche liegen zwischen 0,01 m und 50 m. Die Genauigkeit ist dabei im Bereich von 0,1 mm bis 1,00 mm angeordnet (MEHLHORN and CURBACH, 2014). Elektronische Seilzugsensoren sind für die folgenden Anwendungsfelder geeignet (MEHLHORN and CURBACH, 2014):

- Messung von Durchbiegungen
- Messung vertikaler Lagerverschiebungen
- Messung von Relativverformungen zwischen zwei Bauteilen (Widerlagerwände, Fahrbahnübergangskonstruktionen)

3.7.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Die Wahl eines laserbasierten Messsystems erfolgte nach MACK et al. (2016) aufgrund der Erfordernis eines berührungslosen Messsystems.

Die Wahl der Abtastrate für Verschiebungsmessungen ist stark von der Untersuchung abhängig. Zur Messung rein statischer Verschiebungen an den Kämpfern einer Bogenbrücke verwenden GEIER and BINDER (2009) Abtastraten von $f_s = 1 / 120 \text{ s} = 0.0083 \text{ Hz}$. (Eine Messung in zwei Minuten). Nach der Veröffentlichung ergeben sich aus dieser Messwert-erfassung ausreichende Datengrundlagen und eine lange Lebensdauer des verwendeten laseroptischen Wegmesssystems. GEIER et al. (2014) geben für die Messung statischer Kenngrößen eine Abtastrate von 1 Hz an, welche halbstündlich gemittelt werden. Dabei werden die Verschiebungen zwischen den Widerlagern einer integralen Rahmenbrücke erfasst.

3.7.3 Ausführung des Messsystems

Die Anordnung des Messsystems ist von der gesuchten Verschiebungsgröße abhängig (Verformungen in Feldmitte, Verschiebungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion, etc.).

Bild 48 zeigt ein beispielhaftes Messsystem mit Laser-Distanz-Sensoren. Das eingezeichnete Messsystem misst die Längenänderungen, welche zwischen den Widerlagern der Rahmenbrücke auftreten (Bild 46). Prinzipiell sind Messungen mit Laser-Distanzsensoren mit und ohne spezielle Reflektoren möglich. Somit können Distanzmessungen auch auf sämtlichen lichtundurchlässigen Flächen und Materialien durchgeführt werden. Falls keine eindeutigen Messpunkte bestimmt werden können oder über große Distanzen gemessen werden soll, sind spezielle Reflektorplatten, wie in Bild 45 dargestellt, anzuordnen. Bild 47 zeigt einen laseroptischen Sensor, welcher an den Kämpfern einer Bogenbrücke angeordnet wurden.



Bild 45: Reflektorplatte (GEIER et al., 2014)



Bild 46: Laser-Distanzsensoren an der Kammerwand einer semi-integralen Rahmenbrücke (GEIER et al., 2014)

Der dargestellte Sensor weist dabei eine Messgenauigkeit von 1.5 mm bei einem Messbereich von bis zu 500 m mit entsprechender Reflektortafel auf (GEIER and BINDER, 2009).

Bild 49 zeigt die Montage eines elektronischen Seilzugsensors am Fahrbahnübergang einer Brücke. Die Verwendung des Sensors ermöglicht dabei eine unkomplizierte Messung über größere Distanzen und verhindert eine Beschädigung der Messtechnik bei eventuellen Bewegungen des Tragwerks (MACK et al., 2016).



Bild 47: Installation eines laseroptischen Sensors an den Kämpfern einer Bogenbrücke in Massivbauweise (GEIER and BINDER, 2009)

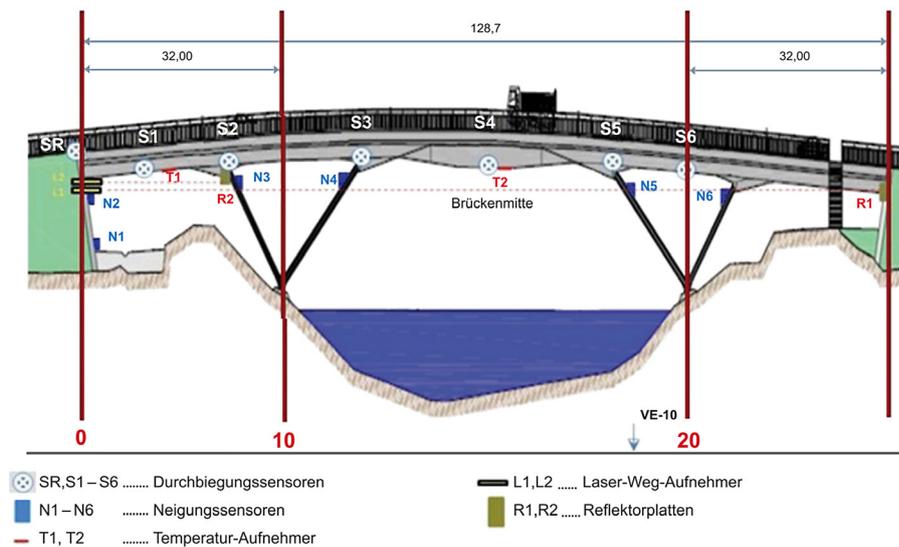


Bild 48: Sensoranordnung an einer semi-integralen Rahmenbrücke (GEIER et al., 2014)



Bild 49: Montage eines elektrischen Seilzugsensors an der Fahrbahnübergangskonstruktion (MACK et al., 2016)

Bild 50 zeigt die Montage von Wegaufnehmern zur Messung lateraler und longitudinaler Verschiebungen des Verankerungsblockes einer nachträglich extern vorgespannten Brücke. Die Messung der Verschiebungen in Querrichtung dient dabei der Erfassung initiiert Risse, welche unter Umständen in der Fuge zwischen dem nachträglich betonierten Verankerungsblock und dem Bestandsbeton des Brückentragwerks entstehen (BOROS et al., 2016). Die Wegaufnehmer ermöglichen die Erfassung von Verschiebungen entlang der Brückenlängsachse.



Bild 50: Montage von Wegaufnehmern hinter dem Endverankerungsblock (BOROS et al., 2016)

3.7.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die möglichen Anwendungsbereiche für die Verschiebungsmessung sind folgende:

- Erfassung kritischer Längenänderung des Bauwerks (GEIER and BINDER, 2009)
- Überwachen der Funktionstüchtigkeit von Lagerkonstruktionen (GEIER and BINDER, 2009)
- Erfassung der Einflüsse aus Verkehrs- und Temperaturbelastung (MACK et al., 2016)

3.7.5 Anwendungsgrenzen

Die Anwendungsgrenzen sind vom jeweiligen Messverfahren abhängig:

- Seilzugsensor:
Die Verschiebungsmessung ist nur in Richtung der Seilspannrichtung möglich.
- Laser-Distanzsensoren:
Eine Anwendungsgrenze der Laser-Distanzsensoren liegt darin, dass sie gegenüber den induktiven Wegaufnehmern ein etwas höheres Signalrauschen haben (HANSEN and MARX, 2014). Bei der Verwendung von Distanzlasern sind Messungen ohne Reflektortafeln auf allen lichtundurchlässigen Materialien möglich, solange diese keine spiegelnde Oberfläche aufweisen (GEIER et al., 2014).

3.7.6 Qualitätssicherung

Zum Plausibilisieren und Unterscheiden schädigungs- oder temperaturbedingter Verformungen bzw. Verschiebungen sollte ergänzend zur Erfassung der Verschiebung die Bauteil- und Außenlufttemperatur in Abhängigkeit des Messziels gemessen werden.

3.8 Messungen von Neigungsänderungen

Zur Erfassung von Neigungsänderungen wird das folgende Messsystem vorgestellt:

- Neigungssensor (Inklinometer)

3.8.1 Messtechnik

Neigungssensor (Inklinometer)

Das Messprinzip der Neigungssensoren beruht auf der Umwandlung der resultierenden Abweichung eines gravitationsabhängigen Sensors (Pendel) in eine elektrische Größe in Bezug auf das Instrumentengehäuse oder die Kontaktfläche. Diese Abweichung kann entweder die Wegdifferenz oder die Kraftdifferenz sein (MÖSER, 2004).

Zusätzlich kann die Neigungsmessung in Bezug auf ein Magnetfeld vorgenommen werden (HERING and SCHÖNFELDER, 2012). Magneto-resistive Neigungssensoren messen die Neigungsänderung anhand der daraus resultierenden Widerstandsänderung eines ladungstragenden Materials in Bezug auf ein Magnetfeld. Die Auflösung der magneto-resistiven Neigungssensoren liegt bei $0,005^\circ$, die Nichtlinearität bei $< 0,05^\circ$ und die Wiederholbarkeit bei $< 0,01^\circ$ (HERING and SCHÖNFELDER, 2012).

Eine besondere Variante der magneto-resistiven Sensoren sind die Kompass-Sensoren, die das äußere Magnetfeld der Erde messen. Aufgrund der relativen Schwäche des Erdmagnetfeldes und der naturbedingten Neigung des magnetischen Flusses erfordert dieses Messprinzip eine genaue Kalibrierung. Die Auflösung der Kompass-Sensoren liegt bei $0,1^\circ$, die Nichtlinearität bei $< 0,05^\circ$ und die Wiederholbarkeit bei $< 0,01^\circ$ (HERING and SCHÖNFELDER, 2012).

Basierend auf dem kapazitiven Messprinzip (Kapitel 3.9) werden MEMS-Sensoren (Micro-electromechanical systems) als hochempfindliche und temperaturstabile Neigungssensoren entwickelt. MEMS-Technologie steht hier für den Prozess zur Herstellung von Geräten oder Systemen, die mechanische und elektrische Komponenten kombinieren. Durch die Messung der Kapazitätsänderung, die sich aus der Abstandsänderung zwischen der inneren Masse und dem Sensorkörper ergibt, kann die Neigungsänderung ermittelt werden. Die Auflösung der MEMS Neigungs-Sensoren liegt bei $0,005^\circ$, die Nichtlinearität bei $< 0,03^\circ$ und die Wiederholbarkeit bei $< 0,06^\circ$ (HERING and SCHÖNFELDER, 2012).

Eine Sonderform der MEMS-Neigungssensoren sind die Servo-Inclinometer. Sie bieten eine hohe Empfindlichkeit und haben keinen Gleichstromausgang (DC). Durch ein zusätzliches internes Rückkopplungssystem wird die Genauigkeit der Messung erhöht, und es können Messungen oberhalb der Eigenfrequenz des Systems erzielt werden. Die Auflösung der MEMS Neigungs-Sensoren liegt bei $0,00005^\circ$, die Nichtlinearität bei $< 0,05^\circ$ und die Wiederholbarkeit bei $< 0,001^\circ$ (HERING and SCHÖNFELDER, 2012). Im Allgemeinen können die Neigungssensoren entweder einachsiger oder zweiachsiger hergestellt werden (BERGMEISTER and SANTA, 2004).

3.8.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Da die Messung der Neigungsänderung in der Regel von weiteren Messaufgaben begleitet wird, muss das eingesetzte Monitoringsystem in der Lage sein, verschiedene Parameter gleichzeitig zu erfassen. Dies erfordert die Möglichkeit, je nach Art der Messung unterschiedliche Abstraten aufzuzeichnen, wie z. B. bei der parallelen Anwendung von Beschleunigungs- und Neigungssensoren (GEIER et al., 2014).

Die übernommene Abstrategie bei der Neigungsmessung unterscheidet sich nach der verwendeten Art der Messung. Ein Beispiel für die unterschiedlichen Abstraten wird in MACK et al. (2016) vorgestellt, wobei für die Neigungsmessungen Abstraten von $0,5\text{ Hz}$ und für die Beschleunigungssensoren 50 Hz verwendet wurden. Dabei beträgt der Messbereich der verwendeten Neigungsmesser bis zu ± 10 Milligrad bei entsprechend hoher Messauflösung.

Für die Neigungsmessung einer flexiblen Stahlstützen wurde in (GEIER et al., 2014) eine Abtastrate von 1 Hz berücksichtigt und durchschnittlich alle 30 Minuten gespeichert. Zusätzlich wurde sowohl in (WENNER et al., 2019) als auch in (SUNG et al., 2016) eine Abtastrate von 10 Hz verwendet.

3.8.3 Ausführung des Messsystems

Beim Einsatz der Neigungssensoren sind Libellen einzubauen, um die Horizontalität zu gewährleisten. Für jeden Sensor ist zusätzlich eine Unterkonstruktion vorzusehen, um die Sensorbefestigung zu gewährleisten. Es ist auch zu beachten, dass das resultierende Neigungszeichen (positiv bzw. negativ) durch die Sensoranordnung sorgfältig identifiziert werden kann. Ein Beispiel für die Ausführung eines Neigungsmesssystems wird in GEIER et al. (2016) berichtet (Bild 51).



Bild 51: Applikation eines Neigungssensors (GEIER et al., 2016)

Ein Beispiel für die Installation von Neigungssensoren auf einer Stahl- bzw. Verbundbrücke wird in RETZE (2007) beschrieben. Dabei wurden die Neigungssensoren an den Untergruppen der Brückenlängsträger im Bereich der mittleren Stützen angebracht. Die Positionierung der Sensoren wurde so gewählt, dass aus den Neigungstangenten das Durchbiegungsprofil der angrenzenden Brückenfelder unter der Annahme einer konstanten Biegesteifigkeit in Brückenlängsrichtung bestimmt werden kann (Bild 52).

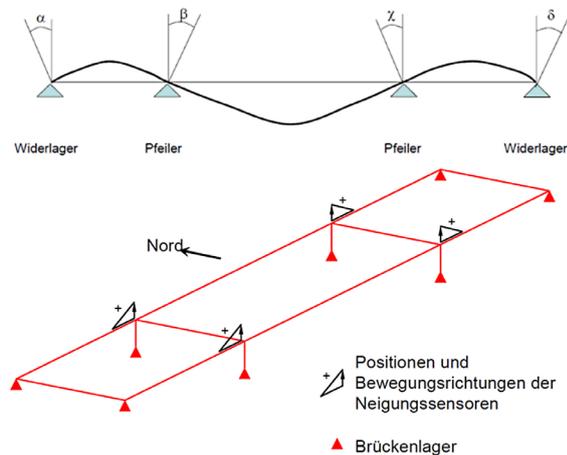


Bild 52: Konzept zur Ermittlung der Durchbiegung (oben) und die Positionierung der Sensoren (unten) (RETZE, 2007)

Bild 53 zeigt ein Beispiel für die Installation des Neigungssensors an der Seitenhafenbrücke (GEIER et al., 2014).

Bei einem Monitoring zur Überwachung von Brückenkolken in Texas wurde die Neigung der Brückenpfeiler gemessen (BRIAUD et al., 2011). Dazu wurden zwei einachsige Neigungssensoren entlang der vertikalen Achse zu einem zweiachsigen Neigungssensor montiert. Der Messbereich der verwendeten Sensoren beträgt $\pm 60^\circ$, die Auflösung $0,001^\circ$ und die Linearität $\pm 0,1^\circ$ im Bereich von $0 - 10^\circ$ von 0 bis 10° , bei $10 - 45^\circ$ eine Linearität



Bild 53: Installation eines Neigungssensors an der Seitenhafenbrücke (GEIER et al., 2014)

von $\pm 1\%$ und monoton bei $45\text{--}60^\circ$. Der Sensor wurde zum Schutz vor Umwelteinflüssen in einem Gehäuse montiert.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz von Servo-Neigungssensoren mit einem Messbereich von $\pm 1^\circ$ in Längsrichtung und $\pm 3^\circ$ in Querrichtung sowie einer Grenzfrequenz von 3 Hz wird in HERMANN et al. (2021) beschrieben. Die Sensoren wurden mit Hilfe einer verstellbaren Halterung installiert und in den Brückenkasten eingeklebt.

3.8.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die möglichen Anwendungsbereiche für die Messung von Neigungsänderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erkenntnisse über das globale Verformungsverhalten des Bauwerks gewinnen, ohne dass eine Messbasis benötigt wird.
- Erkennung und Lokalisierung von möglichen lokalen Schäden.
- Ermittlung und Beurteilung der Einspannwirkung der Widerlager.
- Bestimmung der effektiven horizontalen Steifigkeit der Unterbauten in Längsrichtung.
- Bereitstellung einer redundanten Messtechnik mit den Verformungsmessungen bei Belastungsversuchen

Im allgemeinen bietet sich die Messung von Neigungsänderungen bzw. Verdrehungen als ein wichtiges Messprinzip an, um Rückschlüsse auf das globale Verformungsverhalten des Bauwerks zu ziehen (Bild 54). Im Unterschied zu den Durchbiegungsmessungen (Kapitel 3.7) ist für die Messung der Neigungsänderungen keine Messbasis bzw. Referenzkonstruktion mehr nötig, was in den Fällen, in denen die Zugänglichkeit unter der zu messenden Konstruktionen eingeschränkt ist, eine realisierbare und sinnvolle Alternative darstellt. Dabei können die Verformungen anhand der Anordnung der Sensoren erfasst und den entsprechenden Teilbereichen zugeordnet werden. Die Durchbiegungswerte können unter Berücksichtigung der vorhandenen Randbedingungen an Auflagern aber auch durch Integration gewonnen werden (BOLLE et al., 2017).

Neben der globalen Erfassung des Verformungsverhaltens dient die Messung der Neigungsänderung auch dazu, einen eventuellen Schaden zu erkennen und lokalisieren zu können. Eine lokale Schädigung wird in der Regel von einer strukturellen Diskontinuität an ihrer Stelle begleitet, was beispielsweise eine Steifigkeitsänderung aufgrund einer Rissbildung sein kann. Die daraus resultierende strukturelle Diskontinuität beeinflusst den Verlauf des Neigungswinkels über die Bauteillänge signifikant (Bild 55). Das Schadensausmaß kann dann anhand der sich ergebenden verminderten Biegesteifigkeit in Korrelation mit der lokalen Krümmungszunahme abgeschätzt werden (RETZE, 2007).

Darüber hinaus kann die Messung der Neigungsänderung eine geeignete Methode zur Ermittlung und Beurteilung der Einspannwirkung der Widerlager darstellen, was insbesondere bei Integral- bzw. Rahmenbrücken von Bedeutung ist, bei denen die Boden-Bauwerk-

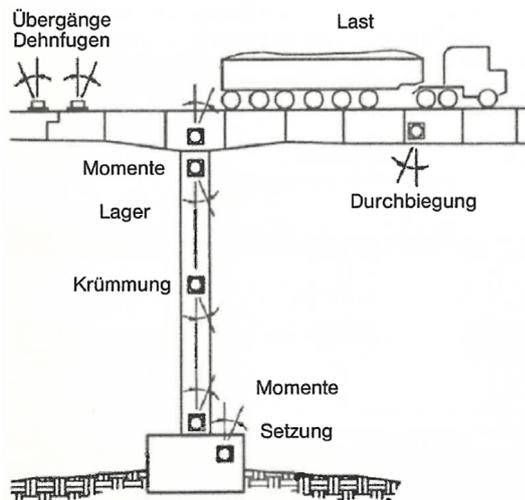


Bild 54: Neigungsmessungen an Brücken (BERGMEISTER and SANTA, 2004)

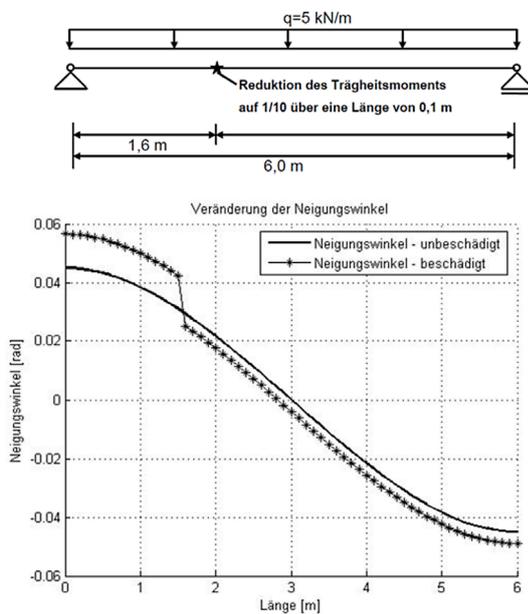


Bild 55: Veränderung des Neigungswinkels aufgrund einer lokalen Schädigung (RETZE, 2007)

Interaktion des Tragwerksverhalten erheblich beeinflusst. Dies kann mittels der Differenzialmessung erfolgen, indem Neigungssensoren sowohl am Widerlager als auch am Überbau an der gleichen Stelle angeordnet werden (GUTERMANN, 2003).

In diesem Zusammenhang lässt sich ebenfalls die wirksame horizontale Steifigkeit der Unterbauten in Längsrichtung durch Neigungssensoren effizient bestimmen. Dadurch kann eine realistischere Verteilung der Längskräfte einschließlich der thermischen Lasten und Bremslasten erzielt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass verschiedene Verformungskomponenten an der gesamten horizontalen Verformung des Unterbaus beteiligt sind (Bild 56) und folglich jeweils durch Erfassung der Unterbausteifigkeit erfasst werden sollen (WENNER et al., 2019).

Ferner kann der Einsatz von Neigungssensoren zusammen mit Beschleunigungssensoren (Kapitel 3.9) effektiv für die indirekte Messung von Verformungen mit hoher Genauigkeit unter dynamischer Belastung eingesetzt werden. Ein Beispiel für die Ermittlung von Daten für die indirekte Messung der Verformung unter dynamischer Belastung an einer Eisenbahnbrücke (bis zu 200 km/h) wird in OLASZEK et al. (2020) vorgestellt.

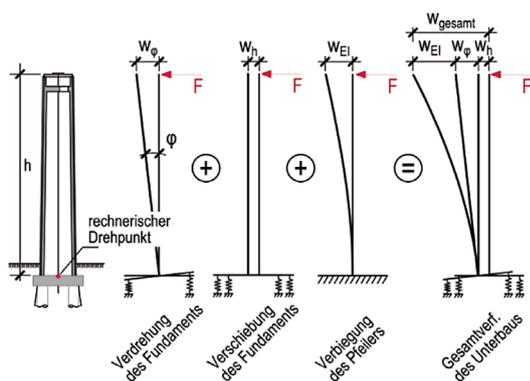


Bild 56: Beteiligte Verformungskomponenten bei der Bestimmung der Unterbausteifigkeit (WENNER et al., 2019)

3.8.5 Anwendungsgrenzen

Kompass-Sensoren:

Eine Anwendungsgrenze der Kompass-Sensoren ist die Notwendigkeit einer genauen Kalibrierung bei der Anwendung auf Stahl, daher werden sie in der Regel mit MEMS-Neigungsmessern begleitet (HERING and SCHÖNFELDER, 2012).

MEMS-Sensoren:

Als Nachteil wird die Empfindlichkeit der MEMS-Sensoren gegenüber unkontrollierter elektrischer Ströme angesehen (HERING and SCHÖNFELDER, 2012).

3.8.6 Qualitätssicherung

Um die mögliche Abweichung des Instruments im Laufe der Zeit zu quantifizieren und zu kontrollieren, kann eine mechanische Vorrichtung verwendet werden, mit der die Neigungssensoren präzise um 180° in einer horizontalen Ebene verdreht werden können. Anschließend kann die Abweichung durch den Vergleich der in der Ausgangsposition und der gedrehten Position gemessenen Werte ermittelt werden (BURDET, 1998).

3.9 Messung des Schwingungsverhalten

Zur Messung des Schwingungsverhaltens werden die folgenden Messsysteme vorgestellt:

- Beschleunigungssensoren
- Laser-Doppler-Vibrometrie

Der zentrale Bestandteil dieser Messmethodik ist die experimentelle Ermittlung modaler Parameter (Eigenformen, zugehörige Eigenfrequenzen und Dämpfungen) eines Brückentragwerks. Über den Vergleich von Eigenformen sowie den zugehörigen Eigenfrequenzen und Dämpfungen sind grundlegende Aussagen über den globalen Schädigungszustand des Bauwerks möglich (NEITZEL and SCHWARZ, 2017).

3.9.1 Messtechnik

Beschleunigungssensoren

Grundlage der experimentellen Ermittlung modaler Parameter stellen im Brückenmonitoring häufig Beschleunigungssensoren dar (MARX et al., 2015; NEITZEL and SCHWARZ,

2017; KEMKES et al., 2019). Die Erfassung der Beschleunigungsänderungen erfolgt durch die Kapazitätsänderung infolge der Bewegung der seismischen Masse (KUTTNER and ROHNEN, 2019b, 2019a). Die kapazitiven Aufnehmer sind Absolutaufnehmer und erfassen die Beschleunigung somit in Bezug zu einem Inerzialsystem (KUTTNER and ROHNEN, 2019a).

Kapazitive Aufnehmer finden heutzutage in der MEMS-Technologie (micro-electro-mechanical-systems) ihre Anwendung. Beispiele zum Einsatz in Forschung und Praxis des Bauingenieurwesens sind in den Referenzen (NEITZEL and SCHWARZ, 2017; SCHWARZ, 2017; KOHM and STEMPNIEWSKI, 2021) zu finden.

Das aufgezeichnete Signal liegt häufig in analoger, zeitkontinuierlicher Form vor, weshalb für eine automatisierte Signalverarbeitung eine Umwandlung des analogen Signals in eine digitale Form erfolgt (KUTTNER and ROHNEN, 2019b, 2019a). Diese Überführung findet im Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) statt. Die fehlerfreie Transformation in ein digitales, zeitdiskretes Signal erfordert die Vorschaltung eines Messverstärkers sowie eines Tiefpassfilters und einer Sample&Hold-Schaltung. Der Messverstärker passt dabei die aufgezeichneten analogen Signale an die abweichende Eingangsspannung des A/D-Wandlers an.

Der nachgeschaltete Tiefpassfilter sorgt für die Filterung unerwünschter, höherfrequenter Signalanteile aus dem analogen Zeitschrieb. Ohne Filterung verursachen diese höherfrequenten Anteile unter Umständen eine Verfälschung der Frequenzanteile bei Transformation in den Frequenzbereich. Nach der Tiefpassfilterung liegt ein zeit- und wertkontinuierliches Signal mit unterdrückten Störanteilen vor (Rauschen, Aliasing, Eigenfrequenzen des Aufnehmers). Durch die anschließenden Schritte der Sample&Hold-Schaltung sowie der A/D-Wandlung wird das zunächst analoge, zeitkontinuierliche Signal zeitdiskret abgetastet und anschließend in ein digital verarbeitbares zeit- und wertdiskretes Signal überführt (KUTTNER and ROHNEN, 2019b, 2019a). Im Anschluss sind dann übliche computergestützte Algorithmen wie die Transformation in den Frequenzbereich mit der Fast-Fourier-Transformation anwendbar.

Für eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Komponenten und Funktionen des Messaufbaus wird an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen (KUTTNER and ROHNEN, 2019a, 2019b).

Laser-Doppler-Vibrometrie

Das Messprinzip von Laser-Doppler-Vibrometern wird in Kapitel 3.5 beschrieben.

3.9.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Der Informationsgewinn bei der Analyse des Schwingungsverhaltens beruht im Wesentlichen auf den dynamischen Bauteilparametern (Eigenformen und zugehörige Frequenzen sowie Dämpfungen). Infolge von Bauteilschädigungen verändern sich bereichsweise die Bauteilsteifigkeiten sowie die Formen der Dissipation der Schwingungsenergie (RETZE, 2007; NEITZEL and SCHWARZ, 2017). Durch den Vergleich des Ist-Zustandes mit einem definierten, bekannten Ausgangszustand sind Aussagen über lokale Schädigungen durch die Messung modaler Kenngrößen möglich (RETZE, 2007; NEITZEL and SCHWARZ, 2017). Die Identifikation der maßgebenden Eigenformen und Messung der zugehörigen Eigenfrequenzen erfolgt über die Transformation der Beschleunigungs-Zeitverläufe in den Frequenzbereich. Die computergestützte Überführung in die Spektraldarstellung erfolgt üblicherweise mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) (NEITZEL and SCHWARZ, 2017; KUTTNER and ROHNEN, 2019a, 2019b).

Die Messung der Dämpfungskennwerte ist durch verschiedene Methoden im Zeit- und Frequenzbereich möglich. Der folgende Abschnitt gibt eine kurze Übersicht über die gängigen Anregungs- und Messmethoden.

Das Datenmanagement und die zugehörigen Auswertungsmöglichkeiten sind von der verwendeten Monitoring Software abhängig. Kommerzielle Programmlösungen wie BRIMOS (FURTNER et al., 2013) ermöglichen auf Grundlage webbasierter Programmlösungen die Ausgabe von Rohdaten und Analysen in üblichen Dateiformaten (Comma separated values (CSV)). Neben den kommerziellen Programmlösungen ist eine Messwerterfassung prinzipiell auch mit der Software Matlab möglich (KUTTNER and ROHNEN, 2019b, 2019a). In Matlab stehen für die Datenverarbeitung die Formate CSV, Audiodatenformat (WAV) und das Universal Daten Format UFF zur Verfügung.

Nach Angaben der Veröffentlichung (FURTNER et al., 2013) übersteigt das Datenvolumen bei schwingungsbasiertem Monitoring 2 GB im Monat nicht.

Neben den Beschleunigungssensoren können bei der Erfassung der Bauwerksschwingungen auch alternative Methoden eingesetzt werden. Die Bewegungsgleichungen eines schwingungsfähigen Systems sind neben der Beschleunigung auch über die Schwingungsgeschwindigkeit (Schnelle) sowie die zeitlichen Verschiebungen definiert. Die Erfassung modaler Bauwerkparameter ist in der Schwingungsmesstechnik somit grundsätzlich über Schnelle- Weg- und Deformationsaufnehmer möglich (KUTTNER and ROHNEN, 2019b, 2019a). Als Messverfahren stehen für die Schnelle beispielsweise elektrodynamische Messverfahren zur Verfügung (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Die Messung kann durch den physikalischen Zusammenhang zwischen Spannung in einem Leiter sowie dessen Schwinggeschwindigkeit erfolgen (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Weitere mögliche Messverfahren für die Schnelle stellen beispielweise die elektromagnetischen Schnelleaufnehmer sowie die Laser-Doppler-Vibrometrie dar (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Im Bereich der Wegaufnehmer werden unter anderem kapazitive Wegaufnehmer und faseroptische Wegaufnehmer verwendet.

Prinzipiell erfasst ein faseroptischer Wegaufnehmer Schwingungen über den Vergleich des an einer Oberfläche reflektierten Lichts mit dem gemessenen Abstand zur Oberfläche (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Hierdurch sind Aussagen über Bauteilschwingungen senkrecht zur Richtung des einfallenden Lichts möglich.

3.9.3 Anregungsmöglichkeiten zur Messung der Eigenfrequenzen und Dämpfungen

Zur Bestimmung modaler Parameter existieren zwei Belastungskonzepte, um das Tragwerk zum Schwingen anzuregen (NEITZEL and SCHWARZ, 2017; SCHWARZ, 2017):

- Erzwungene Anregung mit Methoden der experimentellen Modalanalyse
- Ambivalente Anregung

Bei der klassischen Vorgehensweise mit erzwungener Anregung wird das Brückentragwerk im Fall der Ermittlung der Eigenfrequenzen durch einen Impuls (Impulshammer o.Ä.) zu Antwortschwingung angeregt. Die Sensoren erfassen die Beschleunigung des Sensors an der jeweiligen Position. Durch Transformation des Beschleunigungs-Zeitverlaufs in den Frequenzbereich sind dann die Eigenfrequenzen am Ort des Sensors messbar. Für die Dämpfungsermittlung empfehlen MISTLER and HEILAND (2015) eine monofrequente Anregung des Bauwerks zur gezielten Anregung einzelner Eigenformen. Im Gegensatz zur ambivalenten Anregung ist bei der monofrequenten Anregung mit anschließendem

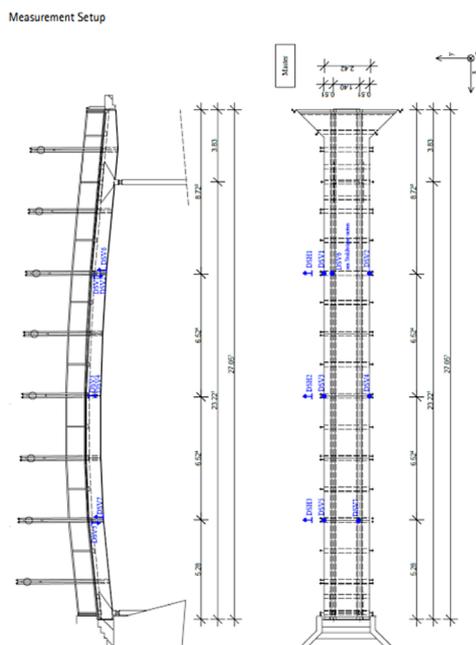
Ausschwingvorgang im Zeitbereich eine amplitudenabhängige und eigenformspezifische Dämpfungsermittlung möglich (auch für Eigenformen höherer Ordnung).

In der praktischen Ausführung des Brückenmonitoring besitzt die ambivalente Anregung eine breite Anwendung (WENZEL and PICHLER, 2005; NEITZEL and SCHWARZ, 2017; SCHWARZ, 2017). Die ambivalente Anregung besitzt gegenüber der erzwungenen Anregung mit den Methoden der experimenteller Modalanalyse den Vorteil, dass die Brücke bei der Durchführung von Messungen nicht für den Verkehr gesperrt werden muss (RETZE, 2007). Bei der ambivalenten Anregung wird das Tragwerk durch die realen äußeren Einwirkungen (Verkehr, Wind) zum Schwingen angeregt.

Für die Bestimmung der modalen Kenngrößen sind ausschließlich Bereiche von Interesse, in welchen das Tragwerk ohne äußere Einwirkung frei ausschwingt. Diese Bereiche werden als Ambient Window bezeichnet. Die Bestimmung der Eigenfrequenzen erfolgt über die Transformation des Ambient-Window in den Frequenzbereich (NEITZEL and SCHWARZ, 2017; SCHWARZ, 2017). Die Messung der Dämpfung (der dominierenden Eigenform) wird mithilfe von Curve-Fitting über die gedämpfte harmonische Schwingung realisiert.

3.9.4 Ausführung des Messsystems

Bei der Ausführung des Messsystems ist auf die Anordnung der Sensorik zu achten. Die Auswahl der Messpunkte sollte insbesondere für komplexe Brückentragwerke auf Grundlage einer Eigenfrequenzanalyse am Finite-Elemente-Modell erfolgen (NEITZEL and SCHWARZ, 2017). Dies hat den Hintergrund, dass bestimmte Biegeeigenformen an charakteristischen Punkten des Tragwerks (Knoten) keinen vertikalen Einflusswert der Amplitude aufweisen. Somit sind die zugehörigen Eigenfrequenzen im Amplitudenspektrum der Beschleunigungsantwort nicht messbar (PUENTE LEÓN, 2017). Die Mess- und Anregungspunkte der zu detektierenden Eigenformen müssen somit mit den maximalen Amplitudenverhältnissen der Eigenformen übereinstimmen. Bild 57 zeigt eine prinzipielle Sensoranordnung anhand eines Einfeldträgers in Stahlbauweise nach (HERRMANN, 2018; KEMKES et al., 2019). Durch das gewählte Messlayout ist die eindeutige Identifikation der ersten drei Biegeeigenformen sowie zweier Torsionsmodi möglich.



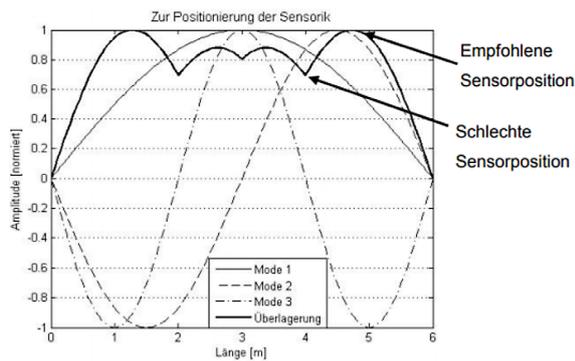


Bild 58: Anordnung der Sensorpositionen aus geometrischer Überlagerung der Amplitudenverhältnisse der maßgebenden Eigenformen (RETZE, 2007)

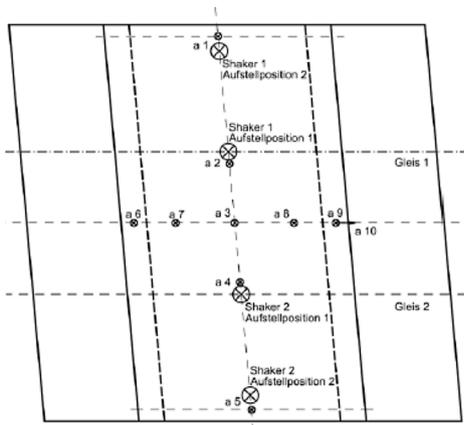


Bild 59: Aufstellpositionen zweier Schwingerreger (Long-Stroke-Shaker) sowie der Beschleunigungssensoren zur Detektion verschiedener maßgebender Eigenformen (REITERER and LACHINGER, 2020)

Nach RETZE (2007) kann eine systematische Anordnung der Messsensoren aus einer Überlagerung der normierten Amplitudenverhältnisse der maßgebenden Eigenformen erfolgen. Bild 58 zeigt dieses Vorgehen beispielhaft anhand der ersten drei Biegeeigenformen eines ebenen Einfeldträgers.

Die lokalen Minima der überlagerten Kurve entsprechen den Knoten der zweiten und dritten Biegeeigenform. Bei Anordnung der Sensoren in diesen Punkten sind nach den vorherigen Erläuterungen keine Verschiebungen messbar und die zweite und dritte Biegeeigenform ist somit nicht im Frequenzspektrum messbar. Die lokalen Maxima der überlagerten Eigenformen stellen nach RETZE (2007) analog zu den vorherigen Erläuterungen die optimalen Sensorpositionen dar.

Ein weiteres Beispiel der Sensoranordnung geben REITERER und LACHINGER in der Veröffentlichung (REITERER and LACHINGER, 2020) für eine schiefwinklige Eisenbahnrahmenbrücke. Bild 59 zeigt die entsprechende Skizze. Die Sensoren a2, a3, a4 sowie a6-a9 dienen der eindeutigen Detektion der ersten Biegelängseigenform der Brücke. Der Beschleunigungssensor 9 dient der Erfassung von Starrkörperverschiebungen und Sensor 10 erfasst die horizontalen Brückenschwingungen.

Für die Montage von Beschleunigungssensoren ist eine Vielzahl an Möglichkeiten vorhanden. Tabelle 6 gibt eine Übersicht über mögliche Montageverfahren sowie deren Vor- und Nachteile.



Bild 60: Installation eines Beschleunigungssensor mit Klebemittel (PIRSKAWETZ et al., 2022)

Montageverfahren	Vorteile	Nachteile	Anmerkungen
Tastspitze	Schnelle Messung	Geringere Genauigkeit	
Magnetischer Montageadapter	Schnelle und einfache Montage	Deutliche Gewichtserhöhung, verringert Resonanzfrequenz	Beschränkt auf ferromagnetische Materialien
Klebeadapter	Erlaubt Montage mit Stützen und isolierte Montage	Verringert Resonanzfrequenz	Pads werden in der Regel dem Prüfkörper ausgesetzt
Klebewachs	Ideal für leichte Sensoren	Begrenzte Temperaturbereiche und Beschleunigungsamplituden	Schnell und sauber
Klebmontage	Gute, steife Montage des Sensors am Prüfling, höhere Temperaturbeständigkeit als Wachs	Sensor lässt sich nur schwer entfernen, erfordert Lösungsmittel, Ausbauwerkzeug und/oder Wärme	Geeignet für länger dauernde Anwendungen und Messungen bei hohen Frequenzen
Isolierter Montagebolzen	Ermöglicht sowohl eine starke Kopplung als auch eine Messisolation	Erfordert Gewindebohrung im Prüfling, leicht geringere Resonanzfrequenz	Montagedrehmoment kontrollieren, Silikonfett verwenden
Montagebolzen	Beste und steifste Verbindung des Sensors am Prüfling für das beste Frequenzverhalten	Erfordert Gewindebohrung im Prüfling	Montagedrehmoment kontrollieren, Silikonfett verwenden

Tab. 6: Montagemöglichkeiten von Beschleunigungssensoren (Kistler Instrumente GmbH)

Demnach stellen insbesondere Verfahren mit Montagebolzen die optimale Verbindung zwischen Beschleunigungssensor und Bauteil dar. Bild 60 zeigt eine praktische Befestigung eines Schwingungssensor mit Klebstoff nach PIRSKAWETZ et al. (2022). Klebstoffe basieren meist auf Methacrylat- oder Epoxidzusammensetzungen (KUTTNER and ROHNEN, 2019a). Diese Form der Befestigung ist insbesondere von Vorteil, wenn keine Gewinde schneidbar sind.

Bild 61 zeigt ein Beispiel für die Befestigung des Aufnehmers mittels einer Stahlplatte und Schrauben (GEIER et al., 2006).

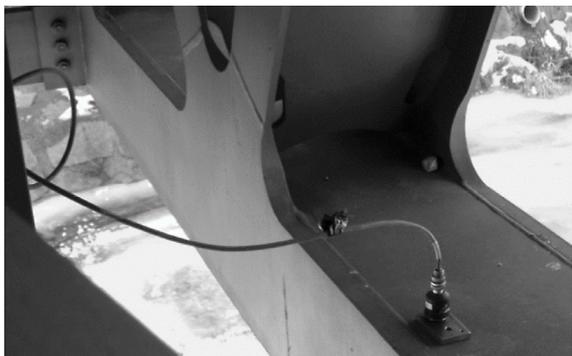


Bild 61: Befestigung eines Beschleunigungssensors mittels einer Stahlplatte und Schrauben (GEIER et al., 2006)

3.9.5 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Das Ziel der Anwendung des Monitoringkonzeptes ist die Lokalisierung von Schädigungen auf Basis der modalen Kenngrößen. Hierfür stehen im Wesentlichen die folgenden Konzepte zur Verfügung (JAUREGUI and FARRAR, 1996; RETZE, 2007):

- Schadensindex-Methode
- Eigenform-Krümmungsmethode
- Änderung der Nachgiebigkeit
- Änderung der Einheitsnachgiebigkeit
- Methode der Steifigkeitsveränderung
- Direkte Steifigkeitsberechnung
- Änderung der Eigenformen

Für die Beschreibung und vergleichende Analyse der einzelnen Verfahren wird an dieser Stelle auf JAUREGUI and FARRAR (1996) verwiesen. In der Veröffentlichung zeigt die Schadensindex-Methode die zuverlässigste Einschätzung für die Erkennung und die Lokalisierung von Schäden gegenüber den fünf Messmethoden auf. Nach RETZE (2007) sind die Methode der Änderung der Nachgiebigkeit sowie die Methode auf Basis der Änderung der Eigenformen ebenfalls für die Erkennung und Lokalisierung bestimmter Schädigungsszenarien einer Stahlverbundbrücke geeignet.

In der praktischen Anwendung kann im Wesentlichen zwischen drei Messszenarien für das schwingungsbasierte Monitoring unterschieden werden (WENZEL, 2009):

1. Detaillierte Referenzmessung
2. Periodische Messkampagnen
3. Durchgängige Messkampagne

Die detaillierte Referenzmessung dient dem Informationsgewinn aussagekräftiger Messdaten. Der Vergleich dieser Referenzmessung mit einer anschließenden periodischen Messkampagne kann mögliche Schädigungen im Lebenszyklus des Bauwerks durch Änderungen der modalen Parameter detektieren. Die durchgängige Messkampagne ist im Sonderfall für besonders gefährdete Bauwerke geeignet.

Die Erkenntnisse aus der Schadensidentifizierung können in weiteren Schritten zur Anpassung von numerischen FEM-Modellen der Brückenbauwerke verwendet werden. Hierbei erfolgt eine Modellanpassung der numerischen Ergebnisse an die Messungen mithilfe lokaler Steifigkeitskorrekturen (WENZEL and PICHLER, 2005). Außerdem soll das Brückenmonitoring modale Einflussfaktoren identifizieren, welche in einer normativen Berechnung im Regelfall nicht berücksichtigt werden. Als wesentliche Einflussfaktoren sind hierbei die „Boden-Bauwerk-Wechselwirkung“ sowie der Steifigkeitsbeitrag sekundärer Elemente der Brückenausstattung (Geländer, Belag, Kappe) zu nennen (REITERER et al., 2008; BIGELOW et al., 2017).

3.9.6 Anwendungsgrenzen

Die Anwendung des Monitoringkonzeptes mit Schwingungsmessung ist nach den vorherigen Erläuterungen auf Schädigungen begrenzt, welche die modalen Eigenschaften des Brückentragwerks signifikant beeinflussen. Folgende Beispiele können folglich nicht durch ein Schwingungsmonitoring detektiert werden (WENZEL and PICHLER, 2005):

- Beschädigte Handläufe
- Fortschreitende Karbonatisierung
- Bewehrungskorrosion im Anfangsstadium

Eine weitere Einschränkung folgt nach NEITZEL and SCHWARZ (2017) durch Auswahl der zu untersuchenden Eigenformen und Frequenzen. Demnach reagieren Eigenformen mit tiefer Eigenfrequenz (Grundschiwingung) gegenüber örtlichen Fehlstellen unempfindlich. Zur Beurteilung sind deshalb höhere Oberschwingungen heranzuziehen.

Die Messung der Bauteilfrequenzen steht in deutlicher Abhängigkeit von der Temperatur, welche die Schädigungseinflüsse in bestimmten Fällen übertrifft (RETZE, 2007; GEIER et al., 2008).

Bild 62 zeigt beispielhaft den Einfluss der Bauteiltemperatur auf die gemessene erste Biegeeigenfrequenz einer Brücke in Massivbauweise. Die Temperatur TP1 kennzeichnet dabei die gemessene Temperatur der Asphalttschicht.

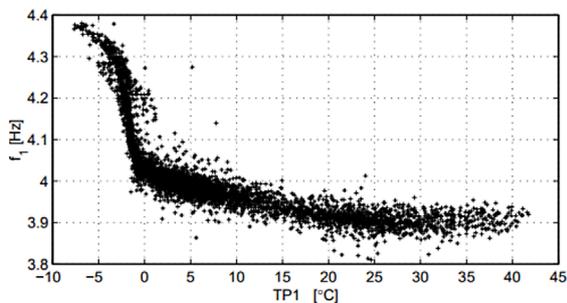


Bild 62: Temperaturabhängigkeit der ersten Biegeeigenfrequenzen einer Brücke in Massivbauweise nach (PEETERS, 2000)

Die Auswertung zeigt ein näherungsweise bilineares Verhalten der ersten Biegeeigenfrequenz. Dabei verursacht eine Temperaturzunahme eine Abnahme der ersten Biegeeigenfrequenz (PEETERS, 2000). Für Interpretationen des schwingungsbasierten Monitorings ist der Temperaturverlauf an aussagekräftigen Punkten im Bauwerk zu erfassen. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist nach GEIER et al. (2008) der modale Parameter der Eigenfrequenz zur alleinigen Beurteilung der Schädigungseinflüsse ungeeignet. Nach GEIER et al. (2008) ermöglicht auch die Hinzunahme der globalen Eigenschwingungsformen mit Berücksichtigung der Bauwerkstemperatur keine sensitive Früherkennung von Schäden.

Bestimmte Messgrößen sind zudem durch verformungsbasierte Messmethoden zuverlässiger detektierbar. Nach RETZE (2007) trifft dies insbesondere für Setzungsunterschiede und Veränderungen an den Lagerungsbedingungen zu.

3.9.7 Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung müssen die Beschleunigungssensoren vor jeder Messung kalibriert werden. Hierzu werden die Messsignale der Sensoren am gleichen Ort unter identischer Anregung verglichen. Bei Abweichungen können Korrekturfunktionen zur Kalibrierung der Sensoren erstellt werden (NEITZEL and SCHWARZ, 2017).

Bei Zugrundelegung der Eigenfrequenzen zum Bauwerksmonitoring ist die Messung der Temperaturabhängigkeit der modalen Kenngrößen elementar (GEIER et al., 2008). Um den tatsächlichen Schädigungseinfluss zu detektieren, muss die Temperatur an aussagekräftigen Punkten im Bauwerk gemessen werden.

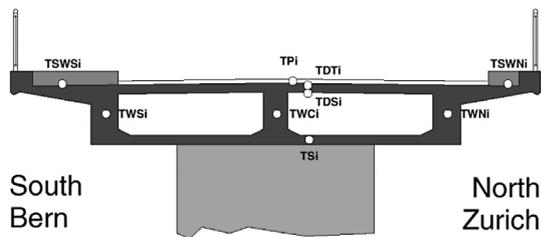


Bild 63: Temperaturmessungen an einer Hohlkastenbrücke (PEETERS, 2000)

Als aussagekräftigen Messpunkt gibt (PEETERS, 2000) den in Bild 63 gekennzeichneten Punkt TPI auf der Asphaltdecke an, welcher in allen Feldern des Bauwerks positioniert wurde.

3.10 Messung der tatsächlichen Schwingbreite

Zur Erfassung der tatsächlichen Schwingbreite werden die folgenden Messsysteme vorgestellt:

- Elektrische Dehnungsmessstreifen (DMS).
- Faser-Bragg-Gitter.
- Wegaufnehmer (Erfassung der Rissdoppelamplitude).

Ziel der Messung der tatsächlichen Schwingbreite der Spannungen ist es, eine realistische Bewertung der Ermüdungsgefahr bestehender Brücken zu erhalten und ggf. konservative Annahmen bei den Berechnungen kompensieren zu können. Dies kann zu einer erheblichen Verbesserung der Lebensdauerprognose von Brücken mit rechnerischen Defiziten hinsichtlich der Ermüdungssicherheit führen.

3.10.1 Messtechnik

Die Messtechnik der tatsächlichen Schwingbreite liegt hauptsächlich in der Messung der Dehnungsänderungen des Spannstahls bzw. des Baustahls. Die gemessenen Dehnungen entsprechen den Dehnungsänderungen im Vergleich zum „Nullzustand“ beim Einbau der Sensoren. Folglich wird die absolute Dehnung nicht erfasst.

Eine Auswahl der üblichen Sensoren zur Messung der Dehnungen bzw. Dehnungsänderungen sind folgende:

Elektrische Dehnungsmessstreifen (DMS)

Sie bestehen aus einem Widerstandsmaterial, das auf einem Träger aufgebracht ist, und müssen mit einem Kleber (üblicherweise Epoxidharz) innig mit dem belasteten Bauteil verbunden werden, um die Längenänderung des Bauteils zu erfassen. Die Dehnungsänderungen können durch die gemessene Widerstandsänderung umgerechnet werden (PARTHIER, 2016). Die DMS werden üblicherweise für die Messung der tatsächlichen Schwingungsamplitude in Stahlbrücken ohne Einschränkungen eingesetzt (MEYER et al., 2012; PELKE et al., 2020).

Der Messbereich beträgt 0,01 % bis 0,5 %, die Genauigkeit liegt bei 1/100 des Messwerts. Sie sind sowohl für statische als auch für dynamische Messungen geeignet (MEHLHORN and CURBACH, 2014).

Faser-Bragg-Gitter (FBG)

FBG-Sensoren eignen sich auf Grund der Messkette an Dehnungsmesspunkten zur Erfassung der tatsächlichen Schwingbreite über einen längeren Messabschnitt. Das Messprinzip der FBG-Sensoren wird in Kapitel 3.6 vorgestellt.

Wegaufnehmer (Erfassung der Rissdoppelamplitude)

Durch die Erfassung der Rissdoppelamplitude kann die Dehnungsänderung ermittelt werden. Zur Überwachung der Rissbewegungen kommen die induktiven Wegaufnehmer zum Einsatz (Bild 64). Eine detaillierte Erläuterung der Messtechnik induktiver Wegaufnehmer kann Kapitel 3.11 Rissmonitoring entnommen werden.

Für die diskrete Messung der Dehnungsschwingbreite ist es Voraussetzung, die Lage des maßgebenden Querschnitts präzise zu identifizieren. Für die Fälle, in denen das Bauwerk keine sichtbaren Risse oder Defekte aufweist, kann die Identifizierung des maßgebenden Querschnitts nur über die Nachrechnung von untergeordneter Zuverlässigkeit sein. Eine Lösung hinsichtlich dieses Anliegens ist die Anwendung der dynamischen Untersuchung zur Unterstützung der Feststellung und Lokalisierung. potenzieller Problemzonen basierend auf dem gemessenen Schwingungsverhalten des Bauwerks. Ein Beispiel dafür ist die Europabrücke, bei der die Schwachstellen innerhalb des gesamten Bauwerks lokalisiert wurden, indem die analytisch berechneten Steifigkeiten des Stahlbauteils mit den gemessenen Werten verglichen wurden (MORDINI et al., 2008).

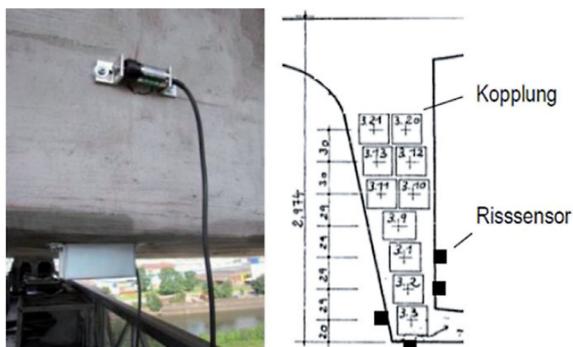


Bild 64: Wegaufnehmer am Riss zur Erfassung der Rissdoppelamplitude (WEIHER et al., 2015)

3.10.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Bei der Messung der Dehnungsschwingbreite zur Ermüdungsuntersuchung ist der Informationsgewinn hauptsächlich die Dehnungsänderung über der Zeit, die entsprechende Verkehrslast und deren Auftretenshäufigkeit sowie die Temperatur.

Messzeitraum

Um die Ermüdungseffekte zu erfassen und eventuell auch die Ergebnisse des entsprechenden Brückenbauwerks für die weitere Nutzungsdauer des Bauwerks extrapolieren, ist die Messdauer ausreichend groß zu gestalten.

Die begleitende Temperaturmessung, die üblicherweise bei Ermüdungsuntersuchungen erforderlich ist, ist ein entscheidender Faktor bei der Planung der Messdauer um die saisonalen Veränderungen zu erfassen.

Die Temperaturbeanspruchungen von gängigen Brückenquerschnitten wurden anhand von Messungen über einen Zeitraum von 8 Jahren ermittelt (ZILCH et al., 2001). Die Auswertung zeigt, dass eine sehr ähnliche Verteilung des vertikalen Temperaturunterschieds

in den einzelnen Messjahren vorkommt, somit wäre ein Messzeitraum von einem ganzen Jahr ausreichend.

Für die klimatischen Zustände in Deutschland kann der Messzeitraum auf einen Zeitraum von 3 bis 6 Monaten in den Sommermonaten verkürzt werden. Damit können sowohl die sehr hohen als auch die niedrigen Temperaturbelastungen abgedeckt werden (PENKA, 2004).

Abtastrate

Bei der digitalen Abtastung eines analogen Signals ist die Bestimmung der optimalen Abtastrate von großer Bedeutung, um die Rekonstruktion des zeitkontinuierlichen Signals aus dem digitalisierten Signal, d. h. der eigentlichen Messgröße, zu ermöglichen (BERGMEISTER et al., 2015).

Die erforderlichen Abtastraten sind abhängig zum einen vom Schwingungsverhalten des Bauwerks und zum anderen vom Schwingungsverhalten der überfahrenden Fahrzeuge. Dabei sind die ersten Eigenformen und Frequenzen zu bestimmen und die maßgebenden Schwingungsformen für die zu untersuchende Messgröße zu identifizieren. Die Abtastrate kann näherungsweise mit dem Zehnfachen der maßgebenden Eigenfrequenz angesetzt werden, um eine sinnvolle Abtastung des Messsignals zu erhalten (SANIO et al., 2017).

Für die überfahrenden Fahrzeuge liegen die hohen Frequenzen, die durch den Achssprung verursacht werden, etwa zwischen 10 und 15 Hz (LUDESCHER and BRÜHWILER, 2009).

Laut dem Abtasttheorem von Shannon muss die Abtastrate mindestens doppelt so groß sein wie die größte im Signal vorkommende Frequenz als untere physikalische Grenze, um das sogenannte Aliasing-Rauschen zu vermeiden (Bild 65) (BERGMEISTER et al., 2015).

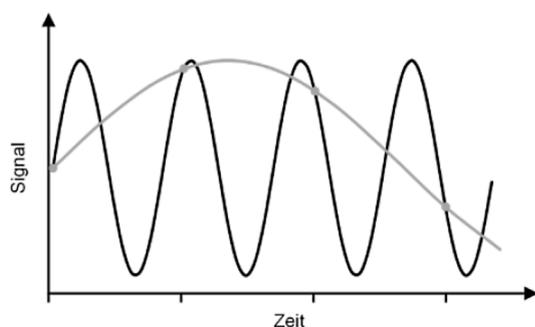


Bild 65: Aliasing-Effekt (BERGMEISTER et al., 2015)

Die bei den vorherigen Monitoring-Maßnahmen angewandten üblichen Abtastraten liegen zwischen 50 und 200 Hz (PENKA, 2004; ZILCH et al., 2009; BERGMEISTER et al., 2015).

Beim Monitoring der Rissamplitude müssen sowohl die Abtastrate als auch die Messdauer die maximalen und minimalen Amplituden sowie die Differenz dazwischen (Doppelamplitude) während der Überfahrt der Fahrzeuge unter Berücksichtigung der möglichen Verkehrsflüsse erfassen (ZILCH et al., 2009).

Datenmanagement

Um mögliche falsche Ergebnisse zu vermeiden, die sich bei den Zählmethoden (z. B. Rainflow-Verfahren) aus der separaten oder intervallweisen Betrachtung der Messdaten ergeben können, müssen die Auswertung und Verarbeitung der Messdaten nach Abschluss der Messungen erfolgen (BERGMEISTER et al., 2015).

Die aus den Messungen resultierende Datenmenge kann auf einem Speicher am Bauwerk abgelegt und erst nach Abschluss der Messung übertragen werden. Die Funktionalität und Qualität der Messdaten während der Messung müssen mit einem Remote-System über das Internet kontrolliert werden (ZILCH et al., 2009).

Die gespeicherten Daten auf der vor Ort stationierten Datenerfassungseinheit können automatisch ausgewertet und die statistischen Parameter (Standardabweichung, Minimal- und Maximalwerte, RMS, Mittelwert) und die Rainflow-Analyse können vor Ort bearbeitet werden. Die ausgewerteten Messdatensätze werden dann zur Absicherung und Weiterverarbeitung auf einen Projektserver übertragen (MEYER et al., 2012).

3.10.3 Ausführung des Messsystems

Bei der Ausführung des Messsystems muss das System während der gesamten Messdauer mechanisch sowie gegen Umwelteinflüsse (z. B. Feuchtigkeit) geschützt werden. Die Dehnungsmessstreifen können zum Beispiel mit einem Abdeckmittel versiegelt werden, um sie mechanisch zu schützen. Zur Leitung des Messsignals zum Messverstärker können zum Schutz vor chemischen, mechanischen oder elektrischen Störquellen geschirmte Kabel mit PVC- oder Silikonummantelung verwendet werden (SANIO et al., 2017).

Die temperaturbedingten Dehnungen in den Dehnungsmessstreifen selbst müssen während der Langzeitmessung kompensiert werden. Die Temperaturkompensation kann durch einen weiteren Dehnungsmessstreifen gewährleistet werden, der auf eine Stahlplatte geklebt ist. Diese Platte wird in unmittelbarer Nähe der Messstelle unbelastet und zwanglos aufgehängt, damit sie sich nur durch Temperaturänderungen frei verformen kann (BERGMEISTER et al., 2015). Bild 66 zeigt Installationsbeispiele für DMS nach KROHN (2014).

Die Analog-Digital-Wandlung der Messsignale soll möglichst nahe am Sensor erfolgen, um störungsanfällige analoge Datenleitungen so kurz wie möglich und den fehleranfälligen Verkabelungsaufwand so gering wie möglich zu halten (MEYER et al., 2012). Ein Messverstärker ist üblicherweise mit einem vor Ort installierten PC verbunden, der der Datenerfassung und Speicherung der Daten dient (KROHN, 2014).



Bild 66: Installation eines Dehnungsmessstreifens auf Baustahl (links) und auf Bewehrungsstahl (rechts) (KROHN, 2014)

Aufgrund der Problematik der Koppelfugen in den bestehenden Spannbetonbrücken werden die Messungen der tatsächlichen Schwingbreiten üblicherweise an den Koppelfugen durchgeführt. Die Festlegung des Messpunktes bei Direktmessungen mit DMS hängt von der Geometrie der Kopplung oder von potenziell rissauslösenden Kerben ab. Ein Beispiel für die Messung an einem Spanndraht in der Nähe der Verankerung ist in Bild 67 dargestellt (KROHN, 2014).

Für den Fall, dass das Freilegen der Spanndrähte direkt hinter der Ankerplatte des Spannankers z. B. aufgrund einer sehr dichten Wendelbewehrung nicht möglich ist, kann der Dehnungsmessstreifen an dem Gewindebolzen angebracht werden, der den Spannanker (S) und den Koppelanker (K) miteinander in Verbindung bringt (Bild 68).

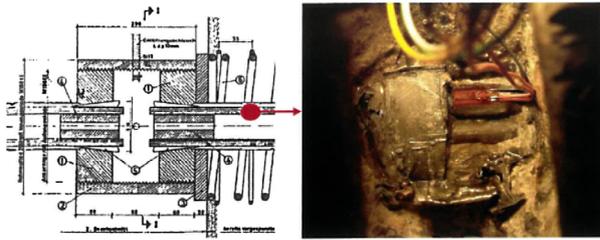


Bild 67: DMS auf Spanndraht nahe der Kopplung nach (KROHN, 2014)

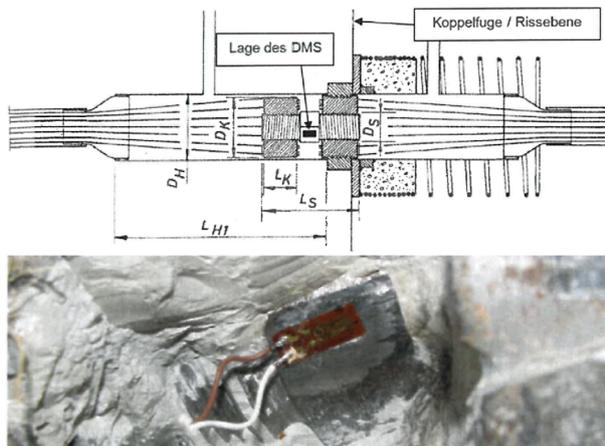


Bild 68: Lagekizze des DMS (oben), und DMS am Spannstahl (unten) (KROHN, 2014)



Bild 69: Induktiver Wegaufnehmer zur integralen Messung mit 50 cm Messabstand (KROHN, 2014)

Ein Beispiel für die Installation von induktiven Wegaufnehmern zur Dehnungsmessung an Betonoberflächen wird in (KROHN, 2014) vorgestellt. Es wird ein Messabstand von 50 cm zwischen den auf der Betonoberfläche befestigten Winkeln angesetzt (Bild 69). Dadurch können aufgrund der relativ großen Messbasis auch sehr kleine Betondehnungen gemessen werden. Zudem ist die Vorrichtung flexibel in Bezug auf Unebenheiten des Untergrundes.

3.10.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele der Messung der tatsächlichen Schwingbreite sind hauptsächlich folgende:

- Frühzeitige Erkennung eines kritischen Spannstahlversagens (bzw. Baustahl) aufgrund der Ermüdung um rechtzeitig entsprechende Maßnahmen am Bauwerk vornehmen zu können (HEINRICH, 2019).
- Unterstützung und Ergänzung der Nachrechnung durch Kompensation von Ungenauigkeiten sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite und damit Aktivierung der bisher nicht erkennbaren Lastreserven von gealterten Brücken (SANIO et al., 2017).

- Auswertung der ermüdungsrelevanten Lastmodelle und Extrapolation zukünftiger Verkehrslasten zur Verbesserung der Genauigkeit der Lebensdauerprognosen.

3.10.5 Anwendungsgrenzen

Für die Planung des Monitoringsystems müssen zunächst die Messgrößen anhand der folgenden Punkte festgelegt werden (ZILCH et al., 2009):

- Die Messgröße und die Vergleichsgröße müssen innerhalb der Randbedingungen direkt korreliert werden. Dabei ist die Vergleichsgröße der Parameter, der zur Bewertung der zu analysierenden Funktion herangezogen werden kann. Ein Beispiel dafür ist die resultierende Spannungsschwingbreite im Spannstahl aus häufig auftretenden Temperaturbelastungen und Verkehrslasten als Vergleichsgröße für die Ermüdungsgefahr. Diese Vergleichsgröße kann jedoch nicht direkt gemessen werden, daher ist eine korrelierte Messgröße zu definieren (z. B. Dehnungsänderung).
- Die Tragfähigkeit ist während der Vorbereitung und Durchführung der Messaufgabe durch lokale oder globale Beschädigungen nicht zu beeinflussen (z. B. durch installationsbedingte Störung des Verbunds).

Die Messgröße kann entweder als direkte Messung erfolgen z. B. am Betonstahl durch Freilegen der Bewehrung oder indirekt über die Messung der Dehnung an der Bauteiloberfläche oder die Erfassung von Rissbewegungen. Ein Beispiel hierfür ist die direkte Messung der Dehnungsänderung von Spannstahl durch Freilegen der Spannglieder und Öffnen des Hüllrohrs (SANIO et al., 2014). Dabei ist zu beachten, dass die gemessene Ermüdungssicherheit des untersuchten Querschnitts in diesem Fall aufgrund der möglichen Spannungsumlagerung von dem verbundgestörten Spannglied zu den ungestörten Bewehrungslagen zu einer Überschätzung der Ermüdungssicherheit kommen kann (PENKA, 2004).

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz einer indirekten Messgröße wie z. B. der Rissdoppelamplitude als korreliertes Maß zur Bewertung der Ermüdungsbruchgefahr des Spannstahls an Koppelstellen (WEIHER et al., 2015). Bei Stahlbrücken kann die tatsächliche Schwingbreite direkt ohne Einschränkungen durch Dehnungsmessungen erfasst werden (MEYER et al., 2012; PELKE et al., 2020).

Bei der Ermüdungsuntersuchung von Spannbetonbrücken ist es besonders wichtig, zum einen die Spannungsschwingbreiten im Spannstahl aus der Verkehrslast und deren Auftretenshäufigkeit zu erfassen und zum anderen die Größe des Grundmoments M_0 infolge ständiger Lasten und Temperatur zu bestimmen. Grund dafür ist der überproportionale Anstieg der Schwingbreite im ausgeprägten Zustand II.

Das Monitoring der tatsächlichen Schwingbreite wird somit üblicherweise mit Temperaturmessung begleitet (PENKA, 2004; ZILCH et al., 2009; SANIO et al., 2014; WEIHER et al., 2015).

Sensorspezifisch sind die folgenden messtechnischen Herausforderungen zu beachten:

- Wegaufnehmer (Erfassung der Rissdoppelamplitude): Eine der Anwendungsbeschränkungen für die diskrete Messung der Dehnungsamplitude ist die Voraussetzung, die Lage des maßgebenden Querschnitts genau zu identifizieren was insbesondere in den Fällen schwierig ist, in denen keine sichtbaren Risse oder Defekte vorhanden sind. Das Signalrauschen ist auch dabei zu beachten.
- Elektrische Dehnungsmessstreifen (DMS): Die direkte Messung der Dehnungsänderung des Spannstahls bei Spannbetonbrücken kann durch die partielle lokale Schädigung, die

zur Aufbringung des DMS erforderlich ist, eingeschränkt sein. Die daraus resultierenden Ungenauigkeiten in den Messungen aufgrund von Verbundstörungen sind ebenfalls zu beachten.

3.10.6 Qualitätssicherung

Um die Funktionstüchtigkeit und Qualitätssicherung der Messtechnik zu überprüfen, können vor der Durchführung der Langzeitmessung Belastungsversuche durchgeführt werden (MEYER et al., 2012). Weiterhin können auch die Perioden ohne LKW-Fahrt für die Auswertung vernachlässigt werden (ZILCH et al., 2009). Die Synchronisierung der Videoaufzeichnung des Verkehrs auf der Brücke mit dem Messsignal (Videoabgleich, siehe Kapitel 3.2) gehört zu den möglichen Hilfsmitteln für die Interpretation der Dehnungsmessdaten (Bild 70) (SANIO et al., 2014). Bei der Messung der Rissamplitude kann die ermittelte Rissdoppelamplitude durch Subtraktion von Messwerten, die von der Anfahrt desselben Fahrzeugs stammen, überprüft werden (Bild 71).

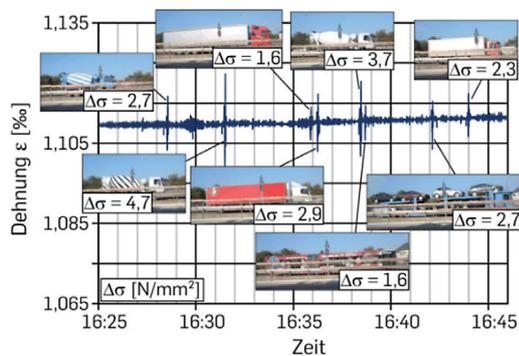


Bild 70: Videoabgleich zur Interpretation gemessener Dehnungsschwingbreiten (SANIO et al., 2014)

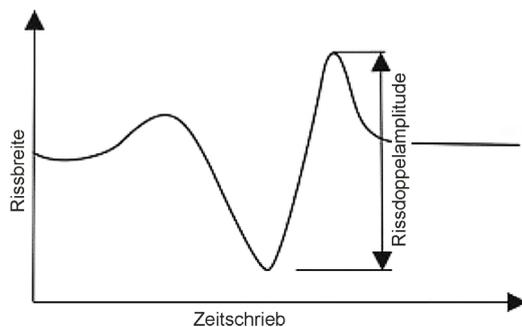


Bild 71: Beispiel für Rissbreitenmessung während einer Lkw-Überfahrt (ZILCH et al., 2009)

3.11 Rissmonitoring

Zur Messung von Rissentwicklungen werden die folgenden Messsysteme vorgestellt:

- Induktive Wegaufnehmer.
- Schwingsaitenaufnehmer.
- Photogrammetrie.

Das Monitoring bereits bestehender Risse bzw. Rissbreitenänderungen kann eine leistungsfähige kompensierende Überwachungsmaßnahme für die Bauwerksbewertung im Sinne eines Ausgleichs vorhandener Defizite darstellen. Bei einer Schwellwertüberwachung wird bei Überschreitung eines vorher definierten Grenzwertes ein Alarm ausgelöst. Darüber hinaus können die Wirksamkeit und Funktionalität von Verstärkungsmaßnahmen

dadurch effektiv beurteilt werden. Die Zunahme der Rissbreitenänderung unter konstanter Belastung deutet zum Beispiel auf eine abnehmende Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme hin (PEETERS, 2017).

Ferner werden die lastabhängigen Rissbreiten bzw. Rissbreitenänderungen zu den wesentlichen Messgrößen der Tragwerksreaktionen gezählt, die die Grenzkriterien bzw. Versuchsgrenzlasten (Stop criteria) bei Belastungsversuchen von Brücken festlegen. Dadurch wird sichergestellt, dass während des Belastungsversuchs keine unzulässigen Bauwerksschädigungen auftreten, die die Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit wesentlich beeinflussen (DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken, 2020).

Die Erfassung von Rissen im Bereich von Koppelfugen vorgespannter Brücken ist eine typische Anwendung des Rissmonitorings mit dem Ziel der Quantifizierung der tatsächlichen ermüdungsrelevanten Spannungsschwingbreiten, vgl. Kapitel 3.10. Zudem kann die Rissbreitenänderung nicht nur zur frühzeitigen Erkennung eines möglichen kritischen Spannstahlversagens infolge von Ermüdung genutzt werden, sondern auch zur Klassifizierung des Schadens in verschiedene Versagensphasen (HEINRICH, 2019; HEINRICH et al., 2021).

3.11.1 Messtechnik

Die üblichen verfügbaren Sensortechniken zur Überwachung bestehender Risse und zur Erfassung der Rissbreiten(-änderungen) werden kurz vorgestellt:

Induktive Wegaufnehmer

Induktive Wegaufnehmer sind die meist verwendeten Sensoren zur Messung der Rissbreitenänderungen bei bestehenden Rissen. Neben ihrer Dauerhaftigkeit und Robustheit, sind die hohe Messauflösung und die Möglichkeit zur Verwendung bei dynamischen Messungen die Hauptvorteile dieser Sensoren (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015b).

Bei den induktiven Wegaufnehmern beruht das Prinzip auf der Änderung von Induktivität und Impedanz einer stromdurchflossenen Spule durch die Lageänderung eines Eisenteils, das mit dem Element verbunden ist, dessen Wegänderung erfasst werden soll (Bild 72).

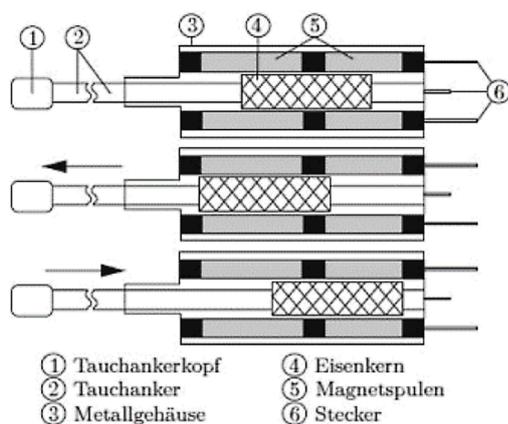


Bild 72: Funktionsprinzip eines Wegaufnehmers (BERGMEISTER et al., 2015)

Der Messbereich reicht von 1 mm bis 500 mm und die Genauigkeit von 0,001 mm bis 1 mm. Die Wegaufnehmer sind sowohl für statische als auch für dynamische Messungen geeignet (MEHLHORN and CURBACH, 2014).

Ein Beispiel für die Rissüberwachung an Koppelfugen mittels Wegaufnehmern wird in SPULER and BERGER (2010) sowie in TREACY and BRÜHWILER (2015) für die Weyermanns-

hausbrücke vorgestellt, wobei die verwendeten Sensoren einen Messbereich von nur +/-1 mm mit einer Linearität von besser als 0,3 % und einer Wiederholbarkeit von 0,15 µm hatten.

Aufgrund des Prinzips des Wegaufnehmers ist die Auflösung praktisch unendlich (abhängig vom gewählten Messbereich und der Amplifikation). Daher ist in der Vorbereitungsphase des Projekts eine zuverlässige Auflösung festzulegen. In dem genannten Beispiel wurde eine Auflösung von 0,5 µm verwendet.

Die üblichen Messbereiche induktiver Wegaufnehmer zum Rissmonitoring liegen zwischen 1 und 10 mm bei einem Linearitätsfehler von ca. 0,1 Prozent. Beim Rissmonitoring auf der Wittener Straßenbrücke in Bochum wurden bspw. Wegaufnehmer mit einem Messbereich von ± 5 mm, einer Auflösung von 0,001 mm und einer Genauigkeit von 0,1mm eingesetzt (THUNICH, 2017).

Zudem wurden die Risse an der Brücke Alveo Vecchio mittels Wegaufnehmer mit einem Messbereich von 10 mm und einer Genauigkeit von 0,1 % überwacht (TONELLI et al., 2020). Ferner wurden 5 Sensoren mit einem Messbereich von 5 mm und einer Genauigkeit von 0,15 % verwendet (WANG and YIM, 2010). Dabei sind begleitende Erfassungen der Bauteiltemperatur und ergänzend der Lufttemperatur wichtig, um den Temperatureinfluss auf die Sensorik zu kompensieren und die temperaturbedingten Einflüsse auf das Bauwerk gegenüber den geplanten Messgrößen zu eliminieren.

Ein weiteres Beispiel ist die Hochstraße Göttinger Straße in Hannover, wo Wegaufnehmer zur Koppelfugenüberwachung eingesetzt wurden (DIRK and HAUKE, 2017). Zudem werden die Messungen der Rissbewegungen an den Koppelfugen in PENKA (2004) beschrieben. Bild 73 zeigt ein Beispiel für die Anwendung eines Wegaufnehmers an Koppelfuge.

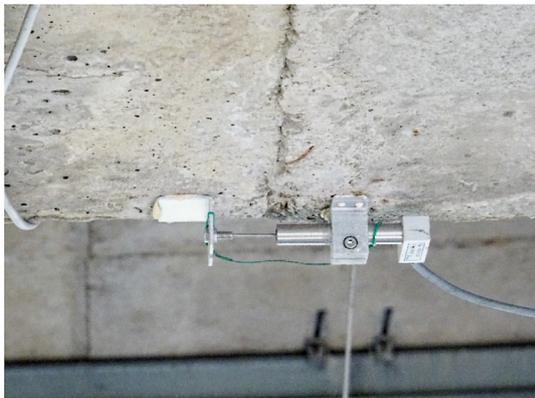


Bild 73: Installation eines Wegaufnehmers an einer Koppelfuge (Quelle: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart)

Schwingsaitenaufnehmer

Die Sensorfunktion beruht auf dem Prinzip, dass ein gespannter Draht beim Anziehen in seiner Resonanzfrequenz schwingt. Das Quadrat dieser Frequenz ist proportional zur Dehnung des Drahtes. Um den Draht herum befindet sich eine Magnetspule, die, wenn sie von einer schwingenden Ausleseschnittstelle angeregt wird, den Draht magnetisch anzieht und die resultierende Resonanzfrequenz der Schwingung erfasst. Eine Änderung des Abstands zwischen den Ankern, die durch das Öffnen oder Schließen des Risses verursacht wird, führt dazu, dass sich der innere, frei gleitende Stab innerhalb des äußeren Körpers bewegt, wodurch sich die Spannung auf die Feder und den schwingenden Draht ändert, und sich die Resonanzfrequenz des Drahtes verändert (Papworths Construction Testing Equipment

& Tools). Der Schwingsaitenaufnehmer kann einen eigenen Temperatursensor (Thermistor) zur Kompensation der Sensortemperatur enthalten.

In einer Überwachungsmaßnahme an der Hochstraße Gifhorn wurden Schwingsaitenaufnehmer eingesetzt, um die Rissbreite an den Koppelfugen zu erfassen. Der Messbereich betrug hierbei ± 2 mm, die Auflösung ca. $1 \mu\text{m}$ und die Messbasis (ohne Verlängerung) 27 cm (SIEGERT et al., 2015).

Der Schwingsaitenaufnehmer kann ebenfalls zur Überwachung von Rissen an Stahlbrücken eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist das Monitoring der Brücke der I-275 über den Ohio River in den USA (PEIRIS et al., 2018).

Hierbei ist zu beachten, dass der Schwingsaitenaufnehmer zwar einige Vorteile gegenüber dem Wegaufnehmer im Rahmen der Langzeitstabilität, der integrierten Temperaturkompensation sowie der relativ geringen Kosten aufweist, jedoch die Beschränkung des Einsatzes auf die statische Messung als Hauptnachteil angesehen wird (SIEGERT et al., 2015).

Photogrammetrie

Die relativen Bewegungen eines Punktes auf dem Brückenbauwerk und damit eine Beschreibung des Rissfortschritts können mit Hilfe der photogrammetrischen Methode ohne Einsatz von Sensoren erfasst werden. Dabei kann die Bildsequenzanalyse anhand von hochauflösenden Hochgeschwindigkeitskameras in Verbindung mit einer permanenten schnellen Verbindung zu einem Rechner eine langfristig stabile Überwachungslösung bieten (MAAS, 2012).

Für die Texturierung der Betonoberfläche gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: erstens die Anwendung von codierten bzw. uncodierten Messmarken in einem vorgegebenen Messraster und zweitens markierungslose Techniken, die auf der Verwendung von künstlichen oder natürlichen Mustern beruhen. Die Verwendung von Messmarken ermöglicht eine genaue Messung der Rissbreite in Abhängigkeit von der Rastergröße, allerdings kann die Position nur ungenau bestimmt werden (MARX et al., 2011).

Ein Beispiel für die Anwendung des photogrammetrischen Verfahrens zur Rissüberwachung an der Alvik-Brücke in Stockholm wird in BERNSTONE and HEYDEN (2009) vorgestellt, wobei ein System bestehend aus einer Netzwerkkamera, einem Modem, Kabeln und einer Kamera-Gehäuse-Einheit eingesetzt wurde (Bild 74).

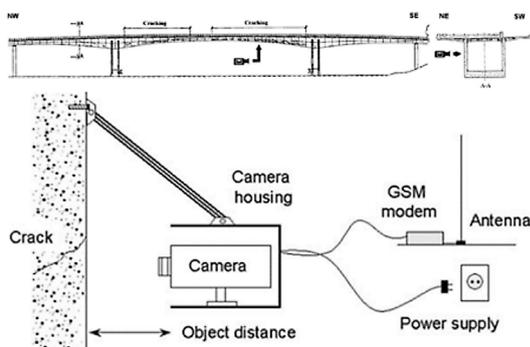


Bild 74: Systembeschreibung des photogrammetrischen Rissmonitorings an der Alvik-Brücke in Stockholm (BERNSTONE and HEYDEN, 2009)

Der Objektabstand war 37 cm, was eine Pixel-Dichte von 4,42 Pixel/mm entspricht. Die Markierungen auf der Betonoberfläche wurden mit Hilfe eines Stahlrahmens mit 4-mm-Bohrungen im Abstand von 30 mm angebracht. Um den Kontrast zwischen den Markern und der Betonoberfläche zu maximieren, wurde die Oberfläche zunächst mit weißer,

schnell trocknender Markerfarbe besprüht. Während des Überwachungszeitraums wurden stündlich Bilder aufgenommen, um den klimatischen Wechsel von Winter- zu Sommerbedingungen zu erfassen. Die Beleuchtung des Risses erfolgte durch eine Halogenlampe.

Schwingungen von durchfahrenden Zügen wurden auf das Kameragehäuse übertragen, d. h. alle Pixel im Bild waren in gleicher Weise betroffen. Es konnte eine Rissamplitude in der Größenordnung von 0,03 mm gemessen werden, was mit den Ergebnissen des permanenten Überwachungsprogramms in übereinstimmend war.

Nach SCHACHT et al. werden die Vorteile der photogrammetrischen Messtechnik gegenüber der konventionellen Messtechnik wie folgt zusammengefasst:

- berührungslose Messtechnik,
- geringer Anwendungsaufwand,
- mehrdimensionale Datenerfassung,
- Unabhängigkeit von der Messlänge,
- wiederholbare Auswertung,
- Lokalisierung von Verformungsprozessen.

Ein Beispiel, bei dem photogrammetrische Bildanalysemethoden eingesetzt wurden, um die Rissentwicklung über einen großen Bereich zu erfassen, befindet sich an der Eisenbahnbogenbrücke über die Aller (Mauerwerksbrücke).

Elektrische Dehnungsmessstreifen (DMS)

Die DMS (Kapitel 3.10.1) können auf Beton aufgebracht werden, um die auftretende Dehnung bzw. die Rissbildung zu überwachen. Wichtige Aspekte, die dabei zu beachten sind, sind die passende Messlänge, die geeignete Verklebung sowie die Anforderungen an die Langzeitstabilität.

Zusätzlich zur maximalen Rissamplitude spielt die Größe der Betonzuschlagstoffe eine wichtige Rolle bei der Auswahl der Messlänge. Beim Einsatz in Beton sind größere Messlängen als beim Baustahl erforderlich, um anomale lokale Dehnungsmesswerte aufgrund der Einflüsse der Aggregatgröße zu vermeiden. Nach ROOKE (2015) kann die dreifache Größe der Zuschlagstoffe als Referenzwert herangezogen werden, um eine gemittelte Auswertung der Betondehnungen zu erhalten. Das Spektrum der angewandten Messlängen in Beton liegt zwischen 30 mm und 120 mm.

Der verwendete Klebstoff soll dabei stabile Kriecheigenschaften aufweisen, d. h. einen großen Elastizitätsmodul und eine minimale Veränderung bei Temperatur bzw. Feuchtigkeit, eine ausreichende Verbundfestigkeit und eine gute elektrische Isolierung. Epoxid und Polyester werden häufig als Klebstoffe für Beton verwendet. Bild 75 zeigt ein Beispiel für die Anwendung von DMS auf Beton.

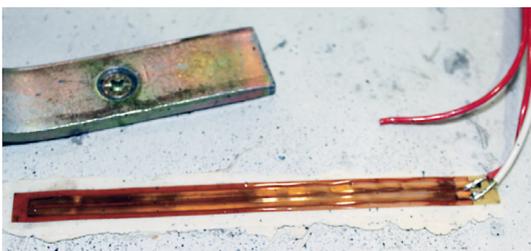


Bild 75: Installation von DMS auf Beton (SCHACHT et al., 2013)

3.11.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Induktive Wegaufnehmer

Hinsichtlich der Abtastrate beim Monitoring von Rissen an Kopplungsstellen beträgt die empfohlene Mindestfrequenz nach WEIHER and RUNTEMUND (2015) 50 Hz, der verwendete Wert war dabei 100 Hz.

An der Talbrücke Weyermannshaus wurde eine Messfrequenz von 500 Hz für die Kurzzeitanalyse für nur eine Woche gewählt (SPULER and BERGER, 2010). Für die Langzeitanalyse über drei Jahre wurde dann eine Frequenz von 50 Hz berücksichtigt, wobei jedoch nur die Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte für jeden Sensor über eine fünfminütige Sequenz gespeichert wurden, um eine kontrollierbare Datenmenge für die Speicherung und Verarbeitung zu erreichen. Ein fünfminütiger Maximal- oder Minimalwert erfasst somit die ungünstigsten Ereignisse und gibt einen guten Hinweis auf das Verkehrsverhalten während des Tages (TREACY and BRÜHWILER, 2015). Das verwendete remote zugreifbare Datenerfassungssystem wurde zum Schutz vor äußeren Einflüssen im Inneren der Brücke installiert (SPULER and BERGER, 2010; TREACY and BRÜHWILER, 2015).

Beim Monitoring der Koppelfugen und im Falle eines nicht vorhandenen sichtbaren Risses sollte festgestellt werden, ob die Fuge tatsächlich offen ist. Dazu kann eine Doppelmessung vorgenommen werden, bei der Wegaufnehmer direkt an der Koppelfuge aufgesetzt und mit Wegaufnehmern aus einem unmittelbar benachbarten ungerissenen Bereich verglichen werden. Die Messwerte sind im Falle einer offenen Koppelfuge um ein Vielfaches höher als in den ungerissenen Bereichen (BUSCHMEYER et al., 2009).

Schwingsaitenaufnehmer

Zur Datenerfassung der Schwingsaitenaufnehmer wurde beispielsweise die Messzentrale an der Hochstraße in Gifhorn in zwei abschließbaren Messschranken und zum Schutz vor Vandalismus in 2 m Höhe auf einer Stütze montiert. Abhängig von der eingestellten Sensormessrate wurden die Messdaten entweder zweimal täglich (Messintervall 90 Sekunden) oder einmal wöchentlich (Messintervall 5 min) automatisch per GSM-Modem versendet. Eine Statusmeldung des Messsystems wurde täglich per SMS verschickt (SIEGERT et al., 2015).

Photogrammetrie

Nach JESSE and KUTZNER (2013) können Messgenauigkeiten von weniger als 1/100 Pixel beim Einsatz der Photogrammetrie sicher erreicht werden. Bei Erhöhung der Facettenzahl und der Bilderzahl kann die Genauigkeit für relative Messungen auf 1/1000 Pixel erhöht werden.

3.11.3 Ausführung des Messsystems

Im Allgemeinen sind die Sensoren zu schützen, solange sie für die Langzeitüberwachung verwendet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung eines Abdeckrelais wie bei der Abiskojäkkabrücke (FURENSTAM, 2020). Bei der Kurzzeitüberwachung können die Sensoren direkt ungeschützt verlegt werden. Um Messfehlern auch für kurzfristige Anwendungen zu vermeiden, wird die Verwendung von Klebern empfohlen.

3.11.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele des Rissmonitorings sind hauptsächlich folgende:

- Vorlegen einer kompensierenden Monitoringmaßnahme für die Bauwerksbewertung im Sinne eines Ausgleichs der bestehenden Defizite.
- Schwellwertüberwachung bei vorhandenen Defiziten
- Beurteilung der Wirksamkeit und Funktionalität von Verstärkungsmaßnahmen (PEETERS, 2017).
- Festlegung der Grenzkriterien bzw. Versuchsgrenzlasten (Stop criteria) bei Belastungsversuchen von Brücken (DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken, 2020).
- Quantifizierung der tatsächlichen ermüdungsrelevanten Spannungsschwingbreiten
- Frühzeitige Erkennung eines möglichen kritischen Spannstahlversagens infolge von Ermüdung sowie Klassifizierung des Schadens in verschiedene Versagensphasen (HEINRICH, 2019; HEINRICH et al., 2021).

3.11.5 Anwendungsgrenzen

Wegaufnehmer:

Der notwendige Kontakt zwischen dem Wegaufnehmer und der Konstruktion wird als Anwendungsgrenze angesehen. Die Notwendigkeit, eine Unterkonstruktion zu installieren, ist vor allem bei weitgespannten Brückenbauwerken meist sehr aufwendig zu implementieren (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015a).

Photogrammetrie:

Im Vergleich zu induktiven Wegaufnehmern weisen photogrammetrische Methoden insbesondere im Einsatz an größeren Bauwerken eine geringere Genauigkeit auf. Für den Bauwerkseinsatz fallen zudem vergleichsweise hohe Installationskosten an. (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015b).

3.11.6 Qualitätssicherung

Zum Plausibilisieren und Unterscheiden schädigungs- oder temperaturbedingter Rissentwicklungen sollte ergänzend zur Rissüberwachung die Bauteil- und Außenlufttemperatur in Abhängigkeit des Messziels erfasst werden.

3.12 Dehnungs- und Kraftmessung (Stahl)

Zur Erfassung der Stahldehnung und Spannkraftmessung werden die folgenden Messsysteme und Methoden vorgestellt:

- Anwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS)
- Ansetzen der Spannpressen (Abhebekontrolle)
- Dynamische Messungen mit Spannkraftermittlung
- Magnetoelastische Messungen
- Vormontieren von Kraftmessdosen

Da die zusätzliche externe Vorspannung häufig als umfassendes Verfahren zur Brückenverstärkung eingesetzt wird, mit dem mehrere gleichzeitig bestehende Defizite ausgeglichen werden können, ist die Kraftmessung externer Spannglieder erforderlich, um die kurzfristige Wirksamkeit der Verstärkung zu beurteilen und die langfristige Effektivität der Verstär-

kung zu überwachen. Darüber hinaus eignet sie sich für die globale Zustandsprüfung von Bauwerken, bei denen die externen Spannglieder bzw. Schrägseile tragende Elemente sind.

Bei der Brückenverstärkung mit externer Vorspannung werden in der Regel neben den Spanngliedern auch die entsprechenden Bauteile zur Einleitung der Vorspannkraft in den Bestandsüberbau überwacht (PEETERS, 2017). Bei nachträglich betonierten Verankerungsblöcken kann die relative Verformung zwischen dem Ankerblock und dem vorhandenen Überbau einen Hinweis auf die Bewegung der Fuge geben und somit die Übertragung der Kräfte und die Sicherheit der Fuge beurteilen (Bild 76). Ein Beispiel dafür ist in BOROS et al. (2016) beschrieben.

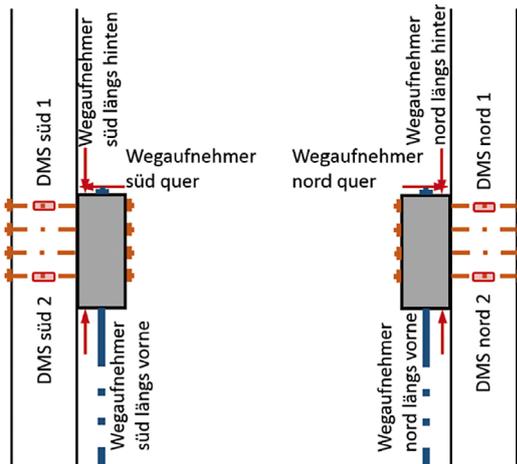


Bild 76: Sensoranordnung an den Verankerungsblöcken (BOROS et al., 2016)

3.12.1 Messtechnik

Zur Ermittlung der Spannkraft von externen Spanngliedern wurden zahlreiche Messtechniken entwickelt. Die in diesem Zusammenhang an den häufigsten verwendeten Methoden werden kurz vorgestellt:

Anwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS)

Die Dehnungsmessung von externen Spanngliedern mittels DMS kann zur Ermittlung der Vorspannkraft durchgeführt werden. Das Messprinzip der DMS wird in Kapitel 3.10 vorgestellt.

Die Dehnungsmessung eignet sich vor allem für Spannglieder zur Quervorspannung von nachträglich betonierten Ankerkörpern, die in der Regel aus Querspannstäben bestehen und ohne Schutzmantelung durch Bohrlöcher direkt in den vorhandenen Brückenquerschnitt eingebaut werden. Die DMS-Sensoren können direkt auf die Stahloberfläche der Querstäbe unmittelbar vor dem Vorspannen angebracht werden (Bild 77).

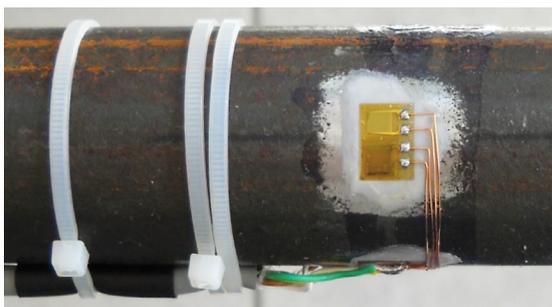


Bild 77: Dehnungsmessstreifen montiert auf Spannstab (BOROS et al., 2016)

Die Auswahl der Stellen bzw. Spannstäbe, an denen DMS zur Kontrolle der Spannstahtspannungen installiert werden sollen, ist so zu treffen, dass eine mögliche Verdrehung des Ankerblocks detektiert werden kann (BOROS et al., 2016).

Für externe Längsspannglieder ist die Dehnungsmessung nicht geeignet, da sie mit einer Beschädigung der PE-Ummantelung der externen Spannglieder einhergeht, um an den Spannstaht zu gelangen (PEETERS, 2017).

Ansetzen der Spannresse (Abhebekontrolle)

Das Ansetzen einer Spannresse, auch Abhebekontrolle oder Lift-Off-Test genannt, ist eine mögliche Methode zur Messung der Spannkraft. Die freie Zugänglichkeit des Spannankers und das Vorhandensein eines dauerplastischen Korrosionsschutzes in Form von Fett oder Wachs sind die Voraussetzungen zur Anwendung dieser Methode. Das Ansetzen der Spannresse an einem Drahtspannsystem (z. B. SUSPA-Draht EX) ist ohne Einschränkungen möglich und führt zu keiner Beschädigung des Spanngliedsystems (STEMPNIEWSKI).

Die Abhebekontrolle erfolgt mittels hydraulischer Pressen und die Kraft wird mittels Manometer gemessen. Die Spannresse greift in die Spannhülse der in den Spannanker eingeschraubten Stützmutter ein und hebt diese im Drahtspannsystem um 1 bis 2 mm ab.

Bei Litzenspannsystemen ist eine ausreichende Litzenlänge hinter der Keilverankerung erforderlich, um den Einsatz der Spannresse zu ermöglichen. Alternativ kann die Abhebekontrolle an einzelnen Litzen durchgeführt werden, wobei die Monolitzenpresse auf die einzelne Litze geschoben wird und der erforderliche Druck mit einer Handpumpe aufgebracht wird, um die Litze ein kleines Stück herauszuziehen. Dafür ist auch ein ausreichend großer Litzenüberstand nötig (STEMPNIEWSKI).

Dieses Verfahren ermöglicht die Messung der vorhandenen Kraft nur unmittelbar am Spannanker. Dabei ist die Beachtung der Abnahme der Vorspannkraft infolge Reibung und Querpressung an den Umlenkstellen bei einem über mehrere Umlenkstellen geführten Spannglied wichtig (SIEGEL, 2018).

Die Abhebekontrolle an einer einzelnen Litze kann auch auf die Schrägseile übertragen werden, um die vorhandene Kraftmessung durchzuführen (WEIHER and GLÄSER, 2008).

Dynamische Messungen mit Spannkraftermittlung

Die Bestimmung der Vorspannkraft kann durch dynamische Messungen z. B. mit Beschleunigungssensoren erfolgen. Das Messprinzip von Beschleunigungssensoren wird in Kapitel 3.9 beschrieben. Die Eigenfrequenzen eines Spannglieds werden durch Schwingungen festgestellt. Mit Kenntnis der Eigenschaften des Spannglieds (Durchmesser, Dichte und Elastizitätsmodul des Spannstahts) kann die Spannung im Spannglied ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Lagerbedingungen und des Durchhangs des Spannglieds ergibt sich eine Abweichung von weniger als 3 % im Vergleich zu der mit der Abhebekontrolle gemessenen Spannkraft (RIAD, 2006a).

In der Regel wird das untersuchte Spannglied mit einem Impaktor – z. B. einem Hammer – zu Schwingungen angeregt. Die Signale werden aufgezeichnet und mit Hilfe eines Beschleunigungssensors und einer Auswerteeinheit in ein Frequenzspektrum überführt. Dies kann im einfachsten Fall über eine Fast Fourier Transformation durchgeführt werden (STEMPNIEWSKI).

Um die Kräfte von Spanngliedern zu ermitteln, wird der Schwingungsaufnehmer meist in der Nähe des Verankerungspunktes und damit in der Nähe des Schwingungsknotens.

Durch den Einsatz von hochsensiblen Sensoren kann trotz der dort auftretenden geringen Schwingungsamplituden eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden. Die Eigenmoden des Spannglieds können durch die Befestigung weiterer Schwingungsaufnehmer entlang des Seils erfasst und damit die Schwingungslänge bestimmt werden. (STEMPNIEWSKI).

Die Spannraft kann im Allgemeinen über die Gleichung einer schwingenden Saite (linearen Ansatz), den Biegesteifigkeitsansatz und den Durchhangansatz näherungsweise ermittelt werden. Die sich daraus ergebenden Ergebnisse können je nach verwendetem Ansatz deutlich voneinander abweichen. Für Seillängen bis zu 50 m ist der Einfluss der Änderung des Durchhangs vernachlässigbar gering (SIEGEL, 2018). Wobei bei externen Spanngliedern beeinflussen die Bestimmung der effektiven freien Länge und die Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Spannglieds die dynamischen Eigenschaften prinzipiell wesentlich deutlicher als bei Schrägseilbrücken. Dies liegt an den kürzeren Seillängen, die hier meist vorhanden sind (RIAD, 2006a).

In diesem Zusammenhang ist bei der Ermittlung der effektiven Schwingungslänge von externen Spanngliedern wegen der oft aus Ausführungsungenauigkeiten resultierenden Abweichungen besonderes Augenmerk zu legen (RIAD et al., 2006b). In STADLER et al. (2007) wurde eine Methode zur Bestimmung der freien Schwingungslänge anhand der Daten aus den dynamischen Messungen vorgestellt.

Die theoretischen Grundlagen dieser Methoden sind in (RIAD, 2006a; ZILCH et al., 2009; NASER and WANG, 2012; SIEGEL, 2018) ausführlich dargestellt. Ein Anwendungsbeispiel bei den Schrägseilen wird in GEIER and PETZ (2004) vorgestellt.

Magnetoelastische Messungen

Eine weitere Möglichkeit, die Spannraft zu bestimmen, ist die Anwendung von magnetoelastischen Messungen. Der magnetoelastische Effekt beschreibt die Interaktion zwischen den mechanischen und magnetischen Eigenschaften von ferromagnetischen Materialien. Die magnetischen Eigenschaften eines ferromagnetischen Materials ändern sich, wenn sie einer mechanischen Belastung, d. h. einer erzwungenen geometrischen Veränderung, ausgesetzt werden. Die magnetische Hystereseschleife (B-H-Kurve) von Spannstahl kann diesen Effekt deutlich beschreiben (Bild 78). Die Hystereseschleife wird bei einer Belastung flacher, folglich werden Steigung und Fläche der Kurve betragsmäßig kleiner. Die in Bild 78 angegebenen magnetischen Parameter können zur Feststellung des Spannungszustands verwendet werden (BUDELMANN et al., 2009).

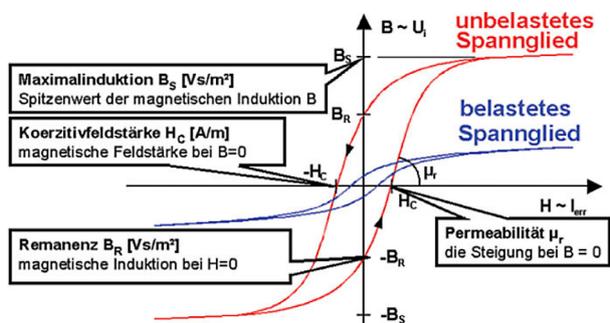


Bild 78: Veränderung der magnetischen Hystereseschleife eines Spannstahls unter Zugbeanspruchung (BUDELMANN et al., 2009)

Dieser Effekt wird bei einem magnetoelastischen Sensor ausgenutzt. Der eingesetzte Sensor besteht aus zwei Spulen. Eine Spule dient zur Erregung des Magnetfeldes und eine weitere Spule zur Erzeugung der induzierten Spannung. Das Spannelement übernimmt die

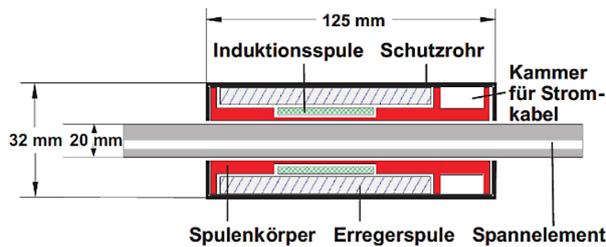


Bild 79: Schnitt durch einen magnetoelastischen Sensor (BUDELMANN et al., 2009)

Funktion des Kerns der Spule (HOLST et al., 2006). Bild 79 zeigt einen Schnitt durch einen magnetoelastischen Sensor.

Die Kraftwerte können mit dieser Methode direkt auf Messgeräten abgelesen werden. Die Messunsicherheit beträgt etwa 2,0 bis 2,5 %. Die Sensoren werden beim Einbau der Spannglieder/Seile installiert, z. B. zwischen Ankerkopf und Ankerplatte für Langzeitmessungen (Bild 80). Für den späteren Einbau der Sensoren sind die Spulen aufwendig um das Hüllrohr zu wickeln (STEMPNIEWSKI).



Bild 80: Magnetoelastischer Sensor am Spannanker (BUDELMANN et al., 2009)

Vormontieren von Kraftmessdosen

Kraftmessdosen können während des Einbaus der Spannglieder am Festanker bei der Verstärkung mit nachträglichen externen Spanngliedern angebracht werden. Die Vorspannkraft kann damit kontinuierlich ermittelt werden (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015a).

3.12.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Dynamische Messungen mit Spannkraftermittlung

Für die dynamischen Messungen zur Spannkraftbestimmung besteht die Messdatenerfassung in der Regel aus einem Signalaufbereiter, einem Entkopplungsverstärker, einem Analog-Digital-Wandler und einem Laptop zur digitalen Filterung sowie zum Speichern und der Erstauswertung des Signals (SCHÖNEKER, 2009).

Bei Eigenfrequenzen von Spanngliedern von über 5 Hz ist die Abtastrate hoch anzusetzen, z. B. 1000 Hz mit einer messbaren Maximalfrequenz von 500 Hz. Die Messdauer kann sehr kurz sein, um die benötigten Messdaten zu erhalten. Zur Schwingungsmessung können zwei bis vier einachsige Beschleunigungsaufnehmer (Messbereich: 5 g, untere Grenzfrequenz 0,5 Hz, Genauigkeit 5 %), verwendet werden (SCHÖNEKER, 2009). Die Eigenfrequenzen können durch Fourier-Transformation der Messdaten ermittelt werden (z. B. Bild 81). Dann kann die Umsetzung der Messgröße auf die Vergleichsgröße mit den gegebenen Beziehungen (z. B. die Gleichung einer schwingenden Saite) durchgeführt werden.

Bei der Anwendung an Schrägseilen in GEIER and PETZ (2004) wurde ein 1-dimensionale Beschleunigungsaufnehmer, mit einem Frequenzbereich von 0,05 Hz bis 450 Hz, zur Erfassung des dynamischen Verhaltens verwendet. Die Messdatenerfassung wurde mit der Software DASyLab Version V 7.0 durchgeführt. Die verwendete Abtastrate lag bei 1024 Hz und die Messzeit wurde mit 130 Sekunden angesetzt ($2^{17} = 131.072$ Datenpunkte).

Falls es erforderlich ist, aus den Messdaten die Dämpfungskoeffizienten unter ambientser Anregung zu extrahieren, empfiehlt es sich, deutlich längere Messzeiten zu verwenden oder den Ausschwingvorgang bei transienter Anregung zu berücksichtigen (GEIER and PETZ, 2004).

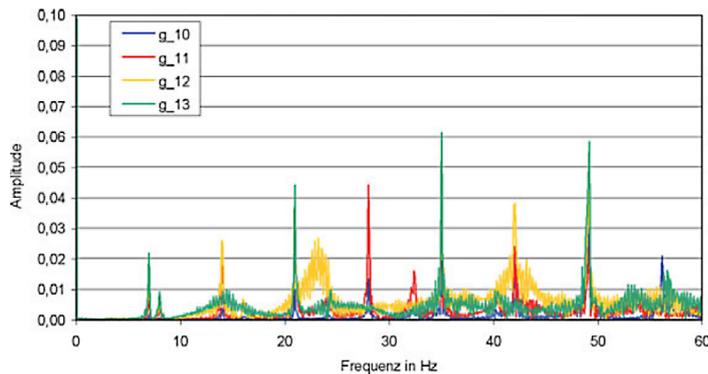


Bild 81: Amplituden der Spanngliedschwingung im Frequenzsrieb (ZILCH et al., 2009)

Magnetoelastische Messungen

Bild 82 zeigt das Blockschaltbild eines Beispiels für ein elektronisches Messsystem für magnetoelastische Messungen (BUDELMANN et al., 2009). Die magnetischen Parameter werden mit Hilfe des Steuer-PCs aus den Messsignalen ermittelt, daraus wird die Vorspannkraft entsprechend der Kalibrierkurve umgerechnet. Es besteht die Möglichkeit der „teildynamischen“ Erfassung von 24 Sensoren über einen Multiplexer. Das Messsystem kann entweder bis zu vier Kanäle dynamisch mit einer Messrate von 10 Hz oder 24 Kanäle statisch erfassen (BUDELMANN et al., 2009). Bild 83 zeigt die Anwendung magnetoelastischer Sensoren (GLÄSER et al., 2014).

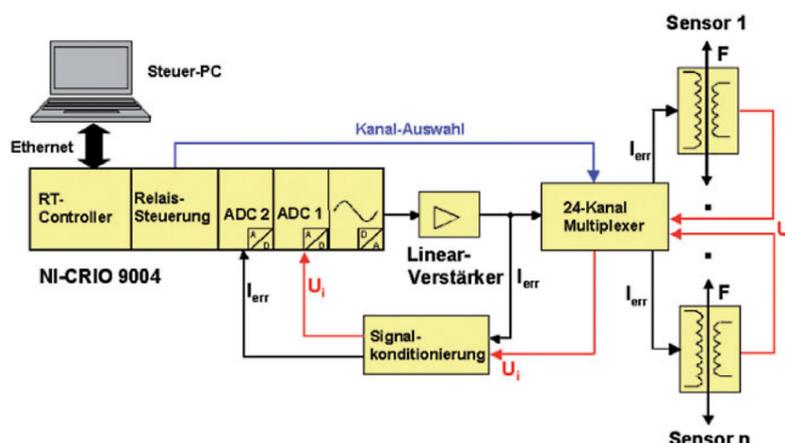


Bild 82: Blockschaltbild der iBMB/MPA-Messanlage zur Auslesung von bis zu 24 magnetoelastischen Sensoren (BUDELMANN et al., 2009)



Bild 83: Montage magnetoelastischer Sensoren zur Kraftmessung (GLÄSER et al., 2014)

3.12.3 Ausführung des Messsystems

Anwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS)

Dehnungsmessstreifen werden in der Regel auf der vorbereiteten Oberfläche mit Heiß- oder Kaltklebverfahren appliziert. Dabei sind die DMS vor Umwelt- und elektromagnetischen Einflüssen zu schützen. Zum Schutz vor Korrosion kann eine Epoxidschicht als Abdeckung verwendet werden (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015a).

Weiterhin sind die Bauwerks- und Oberflächentemperatur kontinuierlich zu erfassen, um Temperatureinflüsse bei der Auswertung der Messergebnisse herauszufiltern. (BOROS et al., 2016).

Ansetzen der Spannpresse (Abhebekontrolle)

Ein Beispiel für die Durchführung der Abhebekontrolle an Litzen von Schrägseilen ist in WEIHER and GLÄSER (2008) vorgestellt. Um den Anker zu erreichen, wurde ein Inspektionsgerät für die Brückenunterseite verwendet. Nach dem Ausbau der Ankerkappe wurde das zum Korrosionsschutz verwendete Wachs entfernt.

Ein Stahlring wurde über ein Ende einer Litze geschoben, so dass der Keil umschlossen wurde. Auf diesen Stahlring wurde eine Monolitzenpresse aufgesetzt.

Die Last der Presse wurde erhöht, bis eine Bewegung des Keils beobachtet wurde. Dieser Vorgang wurde für alle Litzen des Seils wiederholt. Dann wurde die Ankerkappe wieder aufgesetzt und mit Wachs gefüllt.

Dynamische Messungen mit Spannkraftermittlung

Für die Bestimmung der Schwingungseigenfrequenzen müssen die Positionen der Beschleunigungssensoren so gewählt werden, dass zumindest die ersten Eigenformen ermittelt und isoliert werden können (z. B. Mitte des Spannglieds für die erste Form, Viertelpunkt für die zweite Form usw.). Der Sensor und das Spannglied müssen direkt miteinander gekoppelt werden. Um das Spannglied nicht zu beschädigen, können die Sensoren am Hüllrohr befestigt werden. (ZILCH et al., 2009)

Für die Befestigung der Messwertnehmer können bei runden Hüllrohren geeignete Rohrschellen verwendet werden. Bei rechteckigen Hüllrohren können Metallblättchen

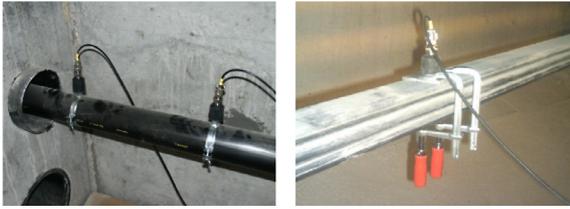


Bild 84: Befestigung der Beschleunigungssensoren auf runden Hüllrohren (links) und rechteckigen Hüllrohren (rechts) (RIAD, 2006a)



Bild 85: Befestigung des Beschleunigungssensors auf einem Schrägseil (GEIER and PETZ, 2004)

mittels Schraubzwingen verwendet werden (Bild 84), um den Sensor an der Oberfläche des Spannglieds zu befestigen (SCHÖNEKEß, 2009).

Bei Schrägseilen kann der Sensor an ein Aluminium-U-Profil geschraubt werden, das mit einem Spannrriemen am Schrägkabel befestigt wird um den Einsatz an unterschiedlichen Kabeltypen und Durchmessern zu gewährleisten. (Bild 85) (GEIER and PETZ, 2004).

Magnetoelastische Messungen

Die Montage des Sensors erfolgt in der Regel durch einfaches Aufschieben auf das Spannelement. Besteht keine Möglichkeit, den Sensor vor Ort auf das Spanngliedende zu schieben, kann eine spezielle Vorrichtung verwendet werden, um den Sensor direkt auf das Spannglied zu wickeln. Dies kann in der Regel bei frei zugänglichen Spanngliedern (externe Spannglieder und Kabel) erfolgen. Zunächst müssen die Spulenkörperhälften auf das Spannglied aufgesetzt werden. Dann werden die Induktionsspule und anschließend die Erregerspule durch Drehen des Spulenkörpers auf diesen gewickelt. Die nachträgliche Wicklung vor Ort entspricht in ihrer Qualität nahezu der Herstellung der Sensoren im Labor gemäß (BUDELMANN et al., 2009).

3.12.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele der Kraftmessung von (externen) Spanngliedern sind hauptsächlich folgende (BUDELMANN et al., 2009; PEETERS, 2017):

- Beurteilung der langfristigen Funktionsfähigkeit sowie der Belastbarkeit von Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen.
- Indikation für die unmittelbare Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme.
- Verifikation der rechnerischen Annahmen (Model-Updating).

- Überprüfung des Zuwachses oder Verlustes der Vorspannkraft aufgrund von Bodenverformungen oder Temperaturschwankungen.
- Ermittlung der Spannkraftverluste durch Reibung, Keilschlupf, Spannstahlrelaxation bzw. Umlenkung sowie infolge von Kriechen und Schwinden des Betons.
- Qualitätssicherung durch Überwachung der Bauzustände, z. B. bei Abspannungen und temporären Ankern oder Krafteinleitung beim Einschub von Taktschiebebrücken.
- Ein Frühwarnsystem gegen kritische Zustände und Schäden.
- Regelmäßige Prüfung von Spanngliedern und Schrägseilen.

3.12.5 Anwendungsgrenzen

Die Anwendungsgrenzen für jede Messtechnik zur Ermittlung der Spannkraft werden wie folgt beschrieben:

- **DMS:**
Die Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen, die zu einer unzureichenden Langzeitstabilität der Messergebnisse führen kann. Dazu schränken die besonderen bzw. komplexen Klebeanforderungen die Anwendung dieser Methode ein (RIAD, 2006a). Dabei stellt die Verhinderung einer zuverlässigen kraftschlüssigen Messaufnahmeapplikation infolge von Drahtverdrillungen bei Spannstahlilitzen und Seilen eine Anwendungsgrenze dar (BUDELMANN et al., 2009). Darüber hinaus wird die Applikation bei den Längsspanngliedern dadurch eingeschränkt, dass die PE-Ummantelung der externen Spannglieder beschädigt werden muss, um an den Spannstahl zu gelangen (PEETERS, 2017).
- **Abhebekontrolle:**
Der Zeit- und Kostenaufwand begrenzen die Anwendung dieser Methode. Weiterhin kommt die Gefahr einer unbeabsichtigten Beschädigung der Verankerung oder des Seils infolge mehrfachen Keilbisses hinzu. Darüber hinaus eignet sich die Spannpresse für Litzenspannsysteme nur, wenn die Spanngliedlänge hinter der Keilverankerung ausreichend ist (STEMPNIEWSKI).
- **Dynamische Messungen mit Spannkraftermittlung:**
Der mit diesem Verfahren verbundene hohe Berechnungsaufwand ist ein Nachteil. Die Möglichkeit des Auftretens von signifikanten Messfehlern aufgrund der erforderlichen Systemparameter ist eine Anwendungsgrenze (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015a).
- **Magnetoelastische Messungen:**
Die Notwendigkeit, ein Stück des Kabelmaterials für die Kalibrierung vorzuhalten, wird hier als Nachteil angesehen (RIAD, 2006a).
- **Vormontieren von Kraftmessdosen:**
Die hohen Anschaffungskosten und die schwankenden Ergebnisse sind die Nachteile dieses Verfahrens (RIAD, 2006a).

3.12.6 Qualitätssicherung

Bei dynamischen Messungen zur Bestimmung der Spannkraft sind die ersten 5 bis 15 Eigenfrequenzen zu berücksichtigen, um die Spannkraft mit ausreichender Genauigkeit und möglichst geringem Aufwand zu ermitteln. Zudem muss bei der Montage der Sensoren für aussagekräftige Ergebnisse eine kraftschlüssige Verbindung der Sensoren mit dem Spannglied hergestellt werden, um Eigenschwingungen der Verbindung und zusätzliche Dämpfung zu vermeiden (STEMPNIEWSKI).

Bei magnetoelastischen Messungen sind für jeden Sensor spezifische Amplituden-/Kalibrierungsfaktoren im Voraus zu ermitteln (SCHÖNEKER, 2009).

3.13 Schallemissionsanalyse

Zur Erfassung von Schallereignissen von z. B. Spanndrahtbrüchen wird das folgenden Messsysteme vorgestellt:

- Körperschallsensoren

Die Schallemissionsanalyse stellt einen Monitoringansatz zur Erfassung visuell nicht erkennbarer Schäden dar (SODEIKAT et al., 2019). Eine ideale Anwendung ist die Detektion sowie Lokalisierung (bei geeigneter Anordnung der Sensoren) von Spanndrahtbrüchen, was beim Monitoring von Brückenbauwerken mit Spannungsrissskorrosionsgefahr notwendig werden kann (SCHACHT et al., 2019).

Die Drahtbrüche von Schrägseilen bzw. Hängeseilen können mit minimalem Messaufwand mittels Schallemissionsanalyse erfasst und lokalisiert werden. Drahtbrüche von Schrägseilen sind durch hohe Energiefreisetzung bei Brüchen und Rissen gekennzeichnet, diese sind für die Genauigkeit der Überwachungsmaßnahme von großer Bedeutung. Ein Anwendungsbeispiel ist die Schallemissionsanalyse an der M48 Severn River-Brücke in Großbritannien mit dem Ziel, Drahtbrüche aufgrund von Korrosion und Vandalismus in den Schrägseilen zu erfassen und lokalisieren (LÖHR, 2015).

Die Schallemissionsanalyse kann zur Überwachung bereits bestehender Risse eingesetzt werden. Dies kann dazu dienen, einen umfassenden Einblick in den Rissfortschritt zu erhalten und das lastabhängige Risswachstum zu bewerten. Über ein Anwendungsbeispiel dafür in den USA wird in ANAY RAFAL et al. (2020) berichtet.

Eine weitere Anwendung liegt im Bereich der Lastversuche, wobei anhand der Überwachung der Makrorissbildung durch Schallemissionsanalyse ein Grenzkriterium festgelegt werden kann (SIEGERT et al., 2015). Daher empfiehlt die DAfStb-Richtlinie (DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken, 2000) die Schallemissionsmessung als begleitende Messmethode zur Zustandsüberwachung bei Belastungsversuchen. Ein Belastungsversuch mit begleitender Schallemissionsanalyse an einer Stampfbetonbrücke (Baujahr 1900) wird in GROBE and SCHUMACHER (2013) vorgestellt.

Bei Stahlbrücken wird die Schallemissionsanalyse in großem Umfang zur Überwachung von Brückenbauteilen eingesetzt, die für die Entstehung von Ermüdungsrissen und ein mögliches Versagen aufgrund von Brüchen anfällig sind. Die Einsatzorte solcher kritischen Schwachstellen, an denen Schallemissionsanalysen durchgeführt wurden, sind in HAY et al. (2009) wie folgt zusammengefasst:

- Hängerverbindungen.
- Gelenkbolzenverbindung.
- Querträger bzw. Cope-Löcher.
- Steifen-Schweißverbindungen.

3.13.1 Messtechnik

Körperschallsensoren

Das Messprinzip der Schallemission beruht auf der Erfassung dynamischer Verschiebungen im Nanometerbereich an der Oberfläche des Messobjekts, die bei plötzlichen Spannungsänderungen im Material auftretenden Schallwellen (elastische Spannungswellen) verursacht werden. Infolgedessen wird durch diese Wellen eine Wechseldruckanregung hervorgerufen, die einen elektrischen Spannungsausgang im piezoelektrischen Element des Schallemissionssensors erzeugt. Die entsprechende Amplitude hängt von der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Sensors gegenüber der Anregung ab (DGzFP-Fachausschuss, 2018).

Die Messtechnik der Schallemission besteht hauptsächlich aus akustischen Emissionssensoren (AE-Sensoren), die meist piezoelektrische Resonanz- bzw. Breitbandsensoren für einen Frequenzbereich von ca. 20 kHz bis 2 MHz sind.

Für eine effektive akustische Kopplung mit dem Messobjekt werden Kopplungsmittel verwendet, die in der Regel aus Silikonfett, Öl, Klebstoff, Wachs, wasserlöslicher Paste oder Paste auf Lösungsmittelbasis bestehen (FRIESE and REINHARDT, 2021). Dabei ist es wichtig, dass die Kopplung den Verlust von Signalenergie verringert und im Vergleich zum Messobjekt eine niedrige akustische Impedanz aufweist (GROSS et al., 2022). Für die Befestigung der Sensoren sind außerdem Befestigungsmittel wie Magnethalter oder Klebebänder, Klemmen, Klebstoff usw. erforderlich.

Zur Aufzeichnung und Analyse der AE-Daten ist eine Steuereinheit (PC-Software) einschließlich einer Erfassungs- und Auswerteeinheit mit Analog-Digital-Wandlern sowie Analogkanälen zur synchronen Aufzeichnung weiterer externer Prüfparameter nötig. Zudem sind ein Signalverstärker und ein Frequenzfilter wesentliche Bestandteile des Messsystems.

3.13.2 Informationsgewinn und Datenmanagement

Die grundsätzliche Festlegung der geeigneten Sensoren mit dem entsprechenden Frequenzbereich sowie der Verstärkung zur Erfassung von Schallereignissen aus bestimmten Schallquellen ist von großer Bedeutung. Nach SODEIKAT et al. (2019) liegen AE-Sensoren für Betonbauwerke üblicherweise in einem Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 100 kHz mit einer Verstärkung von etwa 46 dB. An der Ponte Moesa wurde die Schallemissionsüberwachung bspw. mit AE-Sensoren mit einem Frequenzbereich von 1-20 kHz durchgeführt, um Drahtbrüche zu erkennen und lokalisieren (FRICKER and VOGEL, 2010).

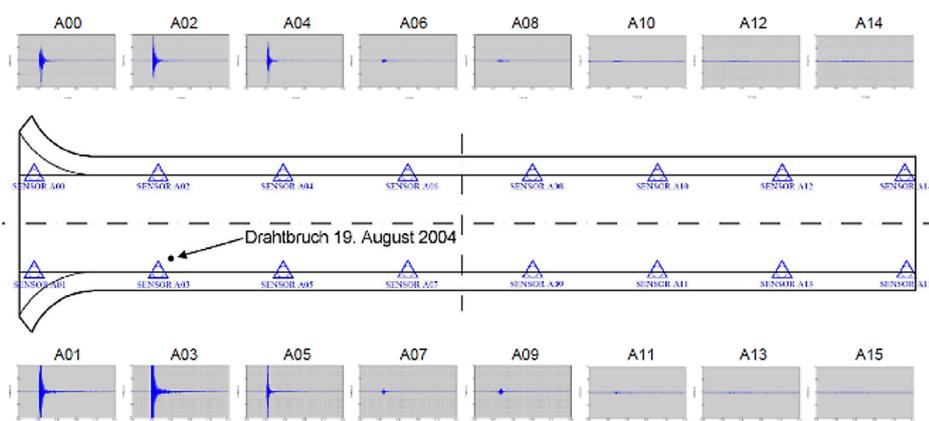


Bild 86: Anordnung der Sensoren im Grundriss und die aufgezeichneten Signale bei Drahtbruch (Nr. 3) (FRICKER and VOGEL, 2010)

Bild 86 zeigt die Anordnung der Sensoren im Grundriss und die aufgezeichneten Signale im Falle eines Drahtbruchs an der Ponte Moesa (FRICKER and VOGEL, 2010).

Um eine ausreichende Genauigkeit der Umwandlungsaufzeichnung der mechanischen Wellen in elektrische Signale zu gewährleisten, werden die elektrischen Signale mit einer hohen Abtastrate von in der Regel zwischen 25 ns und 100 ns am A/D-Wandler aufgezeichnet (SODEIKAT et al., 2019). Dabei werden nur die transienten Signalereignisse (Hits) gespeichert, die einen erkennbaren Anfang und ein erkennbares Ende haben. Dies wird eingesetzt, um das permanente akustische Rauschen auszuschließen (Bild 87).

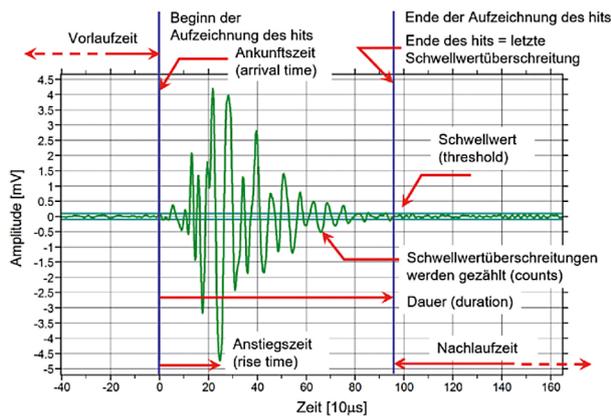


Bild 87: Schallsignal (Amplituden-/Zeitverlauf) (SODEIKAT et al., 2019)

Am Beispiel der Stennert-Brücke wurden insgesamt 66 Sensoren im Abstand von 10 m mit einem Frequenzbereich von 25 bis 80 kHz an Brückenstegen installiert. Das Drahtbruchsignal (beim Referenzsignal) ist hierbei stark saturiert und hat eine besonders lange Signallaufzeit von ca. 270 ms. Zudem ist eine zuverlässige Detektion auch bei einem Laufweg von 20 m möglich (Bild 88) (KÄDING et al., 2019b). Die Lokalisierungsgenauigkeit beträgt nach KÄDING et al. (2019a) ± 30 cm.

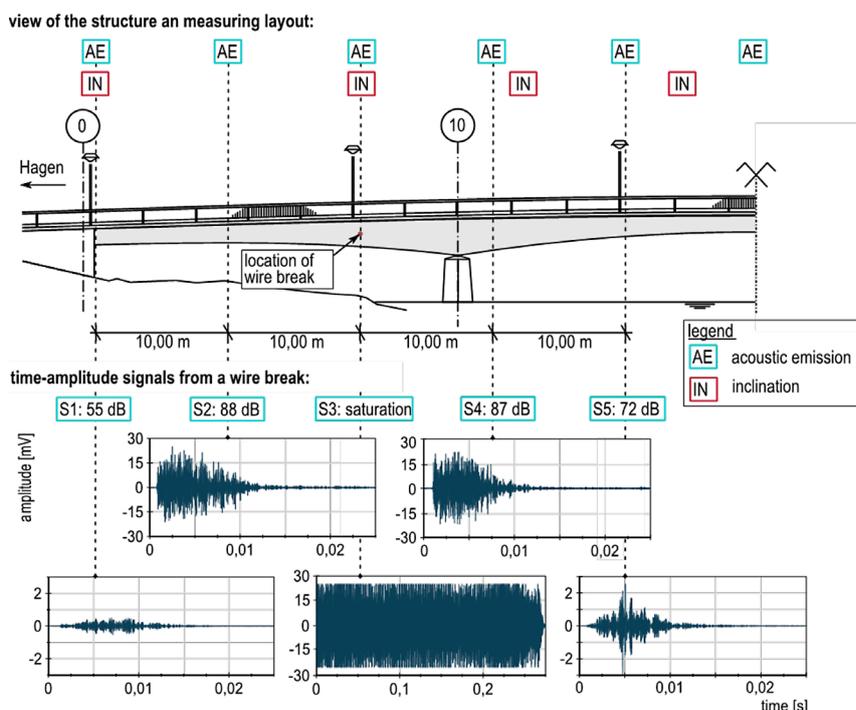


Bild 88: Anordnung der Sensoren sowie Zeit-Amplituden-Kurven des an der Stennertbrücke erzeugten Drahtbruchsignals (Referenzsignal) (KÄDING et al., 2019b)

Ein weiteres Anwendungsbeispiel an Stahlbrücken wurde in HAY et al. (2009) beschrieben, wo eine Gesamtrisslänge von 380 mm lokalisiert und durch AE-Monitoring gemessen wurde, obwohl nur eine Risslänge von 100 mm sichtbar war.

3.13.3 Ausführung des Messsystems

Eine wesentliche Voraussetzung für die Installation eines Sensors ist eine ausreichende akustische Kopplung zwischen der Oberfläche des Sensors und dem Bauteil, um eine glatte und saubere Kontaktfläche zu gewährleisten, die eine gute Ankopplung ermöglicht. Luftblasen sowie zu dicke Klebstoff-/Kupplungsschichten sind zu vermeiden, um die Dämpfung der Wellen zu verringern. Die Kopplungsschicht ist möglichst dünn, aber dennoch ausreichend dick auszuführen, um durch Oberflächenrauigkeit verursachte Lücken zu füllen und Luftlücken zu vermeiden. Die am häufigsten verwendeten Kopplungsmittel sind dabei Vakuumpfette, wasserlösliche Glykole, lösungsmittellösliche Harze und proprietäre Ultraschallkopplungsmittel (GROSSE et al., 2022).

Mit dem Ziel, die Langzeitstabilität verschiedener Kopplungsmittel zu untersuchen, wurden drei Kopplungsmittel (Dentalwachs, Therapieknete, Silikonfett) auf einem Probekörper installiert und im Winter für ca. 3 Monate der freien Witterung ausgesetzt. Anschließend wurde eine Warmzeit durch Lagerung in der Prüfhalle simuliert und die Prüfsignale mit Bleistiftminenbrüchen erzeugt. Nach der Installation wurde bei allen Kopplungsmitteln ein Abfall der Signalintensität festgestellt. Dieser Abfall setzte sich bei Silikonfett und Therapieknete fort. Relativ stabile Transmissionseigenschaften wurden für Wachs festgestellt (Bild 89) (KÄDING et al., 2019b).

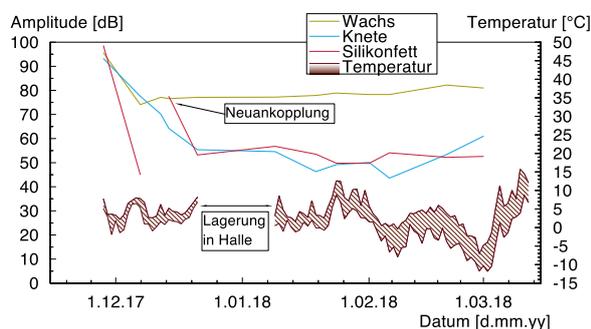


Bild 89: Untersuchung der Transmissionseigenschaften verschiedener Kopplungsmittel (KÄDING et al., 2019a)

Neben der Ankopplung muss der Sensor immer befestigt sein. Zu diesem Zweck kann ein Kleber verwendet werden, der auch als Kupplung dienen kann. Vor dem Einsatz eines Klebers sollte die leichte Entfernbarkeit beachtet werden, da nicht alle Sensoren einer großen Abziehkraft zwischen dem Körper und der Befestigungsfläche (wear plate) standhalten können. Zusätzlich können Befestigungsmittel wie Bänder, Gummibänder, Federn, magnetische Halterungen und andere Spezialbefestigungen verwendet werden. Es ist wichtig, dass eine mechanische Befestigung keinen elektrischen Kontakt zwischen dem Sensorkörper und dem Bauteil herstellt. Daher ist eine Erdung des Körpers oft notwendig.

Bei der Ausführung des Messsystems an der Gänsetorbrücke wurden die Sensoren über eine Sensorplatte mit Sensorhaltern auf einer vorbereiteten Betonfläche mit dem Bauwerk verschraubt. Zusätzlich wurde ein Injektionsmörtel verwendet, um eine dauerhafte Kopplung zu gewährleisten. Die Sensoren wurden außerdem zum Schutz vor äußeren Witterungseinflüssen und anderen mechanischen Einwirkungen abgedeckt (SODEIKAT et al., 2019).

Zur Vermeidung langer, störungsanfälliger Instrumentenkabel kann ein speziell angefertigtes wetterfestes Gehäuse in der Nähe des zu untersuchenden Bereichs an die Brücke montiert werden. Dieses Vorgehen wurde an der John-Kennedy-Stahlbrücke verwendet (KOSNIK, 2009). Dabei wurde das Gehäuse auf Gummifüßen montiert und weit außerhalb der AE-Anordnung positioniert, um elektrisches Rauschen und unerwünschte AE-Hits aus dem Gehäuse selbst zu reduzieren, so dass alle Ereignisse von den AE-Verarbeitungsfiltern zurückgewiesen würden.

Bei der Positionierung der Sensoren ist es wichtig, dass eine optimale Erfassung der Signale aus dem observierten/maßgebenden Bereich gewährleistet ist. Zum Beispiel können lange Schweißnähte mit linearer Anordnung erfasst werden (HAY et al., 2009). Bild 90 zeigt ein Beispiel für die Anordnung der AE-Sensoren, die mit Magnethaltern befestigt sind, sowie einen externen Vorverstärker an der Brücke am Altstädter Bahnhof in der Stadt Brandenburg (PIRSKAWETZ et al., 2022).



Bild 90: Anordnung der AE-Sensoren an Magnethaltern (links) und eines externen Vorverstärkers (rechts) (PIRSKAWETZ et al., 2022)

3.13.4 Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele der Schallemissionsanalyse sind hauptsächlich folgende:

- Direkte Detektion sowie Lokalisierung (bei geeigneter Anordnung der Sensoren) von Spanndrahtbrüchen an Spannbetonbrücken (SCHACHT et al., 2019) bzw. Seilbrücken (LÖHR, 2015).
- Monitoring von Bauteilen von Stahlbrücken, die anfällig für Ermüdungsrisse und ein mögliches Versagen aufgrund von Brüchen sind (HAY et al., 2009).

3.13.5 Anwendungsgrenzen

Nach FRIESE and REINHARDT (2021) sind die Anwendungsgrenzen der Schallemissionsanalyse wie folgt:

- Die bereits vorhandenen Spanndrahtbrüche vor dem Monitoring können nicht erfasst werden.
- Die starken Auswirkungen von Hintergrund- und Betriebsgeräuschen bzw. anderen, externen Störgeräuschen wird als Nachteil angesehen. Dies setzt eine Vorlokalisierung der Schallemissionsquellen voraus, um zwischen Schallemissionen aufgrund von inter-

nen Schäden und aufgrund von Störquellen zu unterscheiden.

- Schwierige Lokalisierung der Schadensposition, wenn die AE-Sensoren nicht an ausreichenden Stellen angebracht sind.
- Die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Qualität der akustischen Ankopplung, der mechanischen Befestigung, der Frequenzwahl und der angepassten Verkabelung ist eine Anwendungsgrenze.
- Das Messsystem wird durch die Ebenheit der Oberfläche für die Befestigung der Sensoren und eine angemessene und wiederholbare Übertragung der Wellen beeinflusst.

3.13.6 Qualitätssicherung

Als Kalibrierungsmethode für die Ankopplungsqualität der AE-Sensoren ans Bauwerk für das Schallemissionssystem gilt der Bleistiftminenbruch (auch Hsu-Nielsen-Quelle genannt) (DIN EN 1330-9, 2017) als reproduzierbare künstliche Schallemissionsquelle, die mit realen AE-Quellen vergleichbar ist.

Bei der Anwendung von Schallemissionen zur Detektion von Spannstahlbrüchen ist es von entscheidender Bedeutung, eine geeignete Verstärkung der Sensoren sowie eine geeignete Sensoranordnung zu wählen, um eine zuverlässige Detektion und Lokalisierung der Spannstahlbrüche zu gewährleisten. Dabei ist die Signaldetektion sowohl von den Dämpfungseigenschaften des Bauwerks als auch von den Hintergrundgeräuschen (Noise-level), z. B. Verkehr, abhängig. Es wird daher empfohlen, die Dämpfungseigenschaften des Bauwerks entweder durch Vorversuche (SODEIKAT et al., 2019) oder durch Simulation von Spanndrahtbrüchen durch Rückprallhammerschläge (KAPLAN et al., 2022) zu ermitteln bzw. abzuschätzen. Weiterhin sind die Amplituden der Signale gegenüber den Störgeräuschen größer zu wählen, um eine zuverlässige Identifizierung der Signale zu ermöglichen (KAPLAN et al., 2022). Darüber hinaus kann ein Referenzsignal aus Spannstahlproben und künstlich erzeugten Spanngliedbrüchen zur Verifizierung des Schallsignals herangezogen werden (KAPLAN et al., 2022).

Nach KÄDING et al. (2019b) werden die Signalparameter bzw. Wellenformen in einem mehrstufigen Verfahren ausgewertet. Dieses Verfahren besteht aus:

- Schwellenwerten für verschiedene Signalparameter,
- Mustererkennung basierte Signalklassifizierung,
- Berücksichtigung des Sensornetzes und der Materialeigenschaften durch Lokalisierung
- und einer individuellen visuellen und akustischen Bewertung

Es ist auch zu beachten, dass die täglichen sowie die saisonalen zyklischen Schwankungen der Bauwerkstemperatur die AE-Signale signifikant beeinflussen können, wodurch der Einsatz des Temperatursensors für die Validierung der Schallereignisse von besonderer Bedeutung ist. (BAYANE and BRÜHWILER, 2020)

3.14 Ausblick auf weitere Messsysteme und Konzepte

Der folgende Abschnitt gibt einen Ausblick auf weitere Messsysteme und Konzepte, welche zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Anwendung nach dem Stand der Technik sind oder sich in der Entwicklungsphase für einen standardisierten Einsatz im Bereich des Brückenmonitoring befinden. Nachfolgend wird ein Ausblick auf die folgenden Systeme gegeben:

- Digitale Bildaufnahme mittels unbemannter Fluggeräte.
- Verteilte faseroptische Sensoren.
- Konzept der Nullmessung.

3.14.1 Digitale Bildaufnahme mittels unbemannter Fluggeräte

Unbemannte Fluggeräte, so genannte UAS (Unmanned Aircraft Systems) oder Drohnen mit hochauflösender Kameraausstattung werden in den letzten Jahren vermehrt für die wiederkehrende visuelle Prüfung von Windenergieanlagen eingesetzt und zeigen unter geringer technologischer Anpassung ebenfalls das Potenzial zur Unterstützung der visuellen Bauwerksprüfung von Infrastrukturbauwerken. Insbesondere bei erschwerten Zugänglichkeiten der Bauwerke kann ein erhöhter Personal- und Arbeitsmitteleinsatz für die visuelle Prüfung erforderlich werden und Verkehrsbehinderung oder Gefahrensituationen auftreten. (KÜHNE et al., 2021) Der Einsatz von Drohnenbefliegungen mit bildgebenden Verfahren und fortschreitender automatisierter Auswertung bietet der Brückeninspektion ein Hilfsmittel, mit dem sich Zeit und Kosten sparen und die Sicherheitsaspekte verbessern lassen.

Das unbemannte Fluggerät wird in der Regel von einem Drohnenpiloten gesteuert, mit der Aufgabe, die Flugrouten zu planen und die Befehle an das Fluggerät zu geben. Es können ein oder mehrere visuelle Beobachter zur Teilnahme benötigt werden. Drohnen können zum Teil automatisch geflogen werden, indem Flugrouten auf der Basis von 3D-Geometrien berechnet werden. Geräte mit autonomen Flugfähigkeiten werden auch als Unmanned Aerial Vehicle (UAV) bezeichnet. Durch eine begleitende automatische Bildanalyse mit Hilfe moderner Methoden und Algorithmen können verschiedene Schäden und bauliche Mängel wie bspw. Risse an der Betonoberfläche von Brücken sowohl quantitative als auch räumlich identifiziert werden (MORGENTHAL et al.). Aufgrund der Tatsache, dass die manuelle Analyse der Bilddaten kosten- und zeitaufwändig ist, werden vorprogrammierte künstliche neuronale Netzwerke mit dem Ziel entwickelt, die möglichen Anomalien im Bild zu erkennen und klassifizieren (SIMON et al., 2022). Dabei werden maschinelle Lernverfahren wie z. B. (Convolutional Neural Network (CNN)) für die Risserkennung auf der Grundlage einer repräsentativen Menge gekennzeichneten Daten unter Berücksichtigung möglicher unerwünschter Merkmale in den erfassten Daten (z. B. fehlender Kontrast oder Intensität) entwickelt (BENZ et al., 2019).

Zusätzlich können die photogrammetrischen Daten für die geometrische Rekonstruktion eines 3D-Modells verwendet werden. Die aktualisierte verformte Geometrie kann mit einem zuvor aufgenommenen Referenzzustand verglichen werden. Im Fall einer Strukturschädigung können hierdurch mögliche Steifigkeitsänderungen anhand einer bekannten Laständerung (z. B. Temperaturänderung) ermittelt werden (SIMON et al., 2022).

Für die Zustandserfassung von Infrastrukturbauten werden unbemannte Fluggeräte derzeit für folgende Messziele eingesetzt:

- Risserkennung an Betonoberfläche durch hochauflösende digitale Bildaufnahme
- Georeferenzierung/ 3D-Modell zur Erfassung des Ausgangszustands (z. B. Nullmessung, Bestandsaufnahme)
- Erkennung von feuchten Stellen und Delaminationen auf Betonoberflächen mittels Infrarotkameras bzw. thermografischen Sensoren (BERGMEISTER, 2022a)

Messtechnik

Als unbemannte Fluggeräte (UAS) werden im Allgemeinen alle Flugzeuge oder Luftfahrzeuge bezeichnet, die ferngesteuert werden können und ohne einen menschlichen Piloten an Bord fliegen (DORAFSHAN et al., 2017). Anhand der aerodynamischen Flugprinzipien lassen sich die UAS (Drohnen) in Dreh- und Starrflügeldrohnen einteilen. Dabei sind Drehflügeldrohnen häufiger im Einsatz, da sie eine hohe Zugänglichkeit, eine einfache Bedienung, eine gute Kamerakontrolle sowie die Unterstützung von vertikaler Start- und Landung bieten (AB RAHMAN et al., 2019).

Für den Einsatz als Unterstützung der visuellen Bauwerksprüfung können die UAS mit verschiedenen Arten von berührungslosen Sensoren ausgestattet werden. Es werden überwiegend visuelle Sensoren (z. B. Kamera) zur Aufnahme hochauflösender Bilddaten (z. B. Video- und Standbilder) eingesetzt. Visuelle Sensoren können zur Beobachtung, Datenerfassung und Navigation eingesetzt werden.

Die folgenden gängigen Sensoren werden derzeit an UAS für den Einsatz an Infrastrukturbauwerken montiert (BERGMEISTER, 2022a):

- Digitale Foto-, Videokamera
- LiDAR/ Laserscanner
- Wärmebild-/Nachtsicht-/Infrarotkamera
- Multispektralkamera

LiDAR (Light detection and ranging systems) sind eine Form des Laserscannings, die den Abstand zwischen dem Sensor und einem Zielobjekt mittels ausgesendeter Lichtimpulse hochauflösend messen. Die Methode kann für das dreidimensionale Laserscanning verwendet werden z. B. für die Rekonstruktion von Geometrien auf Basis von Messpunkten. In Kombination mit fotogrammetrischen Aufnahmen können räumlich präzise visuelle Nachbildungen des Objekts erzielt werden (BERGMEISTER, 2022a). LiDAR werden bei Drohnenflügen außerdem als Kollisionsvermeidungs-Sensoren verwendet (AZARI et al., 2021).

Servomotoren können zur von UAS unabhängigen Steuerung der Kamera eingesetzt werden. Der vertikale Abstand von UAS zur Unterseite der Brücke wird mit Lasermessgeräten gemessen. Zusätzlich kann die Relativbewegung von UAS zur Brücke durch Anbringen eines optischen Strömungssensors an den UAS ermittelt werden. (TOMICZEK Andrew P. et al., 2019). Zur Positionierung und Navigation der UAS wird in der Regel ein Global Positioning System (GPS) eingesetzt (DORAFSHAN et al., 2017). Bild 91 zeigt ein Beispiel UAS-Einsatz für Brückeninspektionen.

Bei der Ausstattung von UAS ist zu beachten, dass ein Kompromiss zwischen bewährter Nutzlast und Flugfähigkeit des Fahrzeugs gefunden wird. Zusätzliche Sensoren verbessern zwar die Datenerfassung, aber durch das zusätzliche Gewicht verkürzt sich die Flugzeit und die Flugkontrolle wird erschwert (TOMICZEK et al., 2019).

Zusätzlich zum ausgestatteten UAS ist eine Messstation für den Betrieb und die Planung vor Ort vorzusehen (GILLINS et al., 2018). Die Messstation kann fest oder beweglich aufgestellt werden, was einen einfachen Transport des Inspektionssystems zwischen den Flügen ermöglicht (TOMICZEK Andrew P. et al., 2019).

Zusätzlich ist eine Datenverbindung oder ein Übertragungssystem erforderlich, das die Verbindung zwischen der Messstation und den UAS ermöglicht (GILLINS et al., 2018).

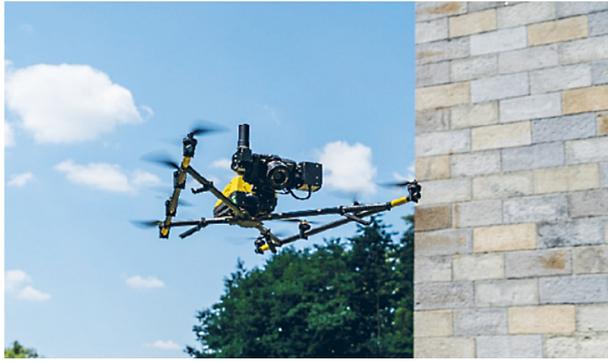


Bild 91: Beispiel für den UAS-Einsatz bei Brückeninspektionen (MORGENTHAL et al.)

Für den Einsatz von UAS sind die Regelungen der europäischen Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge zu beachten (Die europäische Kommission, 2019; BERGMEISTER et al., 2022b).

Informationsgewinn und Datenmanagement

Derzeit werden von den UAS hauptsächlich Live-Videos, Fotos und Videos gewonnen. Die gewonnenen visuellen Informationen können dann zur Erstellung eines 3D-Modells der Brücke verwendet werden, das die Messung und Quantifizierung von Mängeln nach der Inspektion ermöglicht (AZARI et al., 2021). Darüber hinaus kann auf der Grundlage dreidimensionaler Geometriemodelle ein Algorithmus erstellt werden, der die Navigationsroute des Fluggeräts optimiert und eine vollständige Abdeckung der Struktur gewährleistet (HALLERMANN et al., 2018). zeigt ein Beispiel für eine Flugroutenplanung (MORGENTHAL et al.).



Bild 92: Beispiel für eine Flugroutenplanung (MORGENTHAL et al.)

Die aufgezeichneten Bilddaten können automatisch durch maschinelle Lernverfahren analysiert werden und die potenziell beschädigten Bereiche werden erfasst. Für die automatische Bildanalyse zur Risserkennung wurden beispielsweise eine Reihe von Ansätzen mit unterschiedlichen Algorithmen entwickelt. Grundsätzlich extrahieren und lernen die verwendeten maschinellen Lernverfahren schadensrelevante Merkmale aus den eingegebenen Bilddatensätzen. Darauf aufbauend erfolgt eine Klassifizierung des Bildes entweder auf Bild- oder Bildausschnittsebene (Bildklassifizierung) oder auf Pixelebene (pixelbasierte Klassifizierung). Bei einer Bildklassifizierung wird zunächst eine Zuordnung jedes Vollbildes eines Trainingsdatensatzes zu einer Kategorie (z. B. Riss oder Nicht-Riss) vorgenommen. Anschließend wird nach dem maschinellen Lernprozess eine automatische Vorhersage getroffen, zu welcher Kategorie das Bild gehört. Dabei sind die möglichen Ursachen von

Beeinträchtigungen wie Blickwinkel, Maßstabsunterschiede, Bildverzerrungen und Hintergrundrauschen zu beachten (MORGENTHAL et al.).

Bei der pixelbasierten Klassifizierung werden die Farbinformationen auf Pixelebene unter Berücksichtigung der lokalen Nachbarschaften als Grundlage für die Risserkennung analysiert. Alternativ kann auch ein Schiebefenster mit fester Breite und Höhe über das gesamte Bild geschoben werden, um das Rissbild zu identifizieren (MORGENTHAL et al.). Die durchschnittliche Erfolgsrate bei der Risserkennung mit einem CNN-Klassifizierungssystem liegt bei 92,35 %, laut KIM and CHO (2018).

Nach MORGENTHAL et al. (2019) sind die Qualitätskriterien für die aufgenommenen Bilder so zu definieren, dass die Genauigkeit des rekonstruierten Modells gewährleistet ist:

- Vollständige Abdeckung: jeder Punkt auf der Oberfläche des Bauwerks muss in mindestens zwei Bildern sichtbar sein, um seine Position im 3D-Raum aus den Bildern ableiten zu können.
- Bildüberlappung: Für einen zuverlässigen Bildabgleich muss eine ausreichende Überlappung von benachbarten Bildern gewährleistet sein.
- Bildqualität und räumliche Auflösung: Die Beleuchtung und Schärfe der Bilder sowie die räumliche Geometrie der Schnittpunkte sollten eine Rekonstruktion für die Oberflächeninspektion ermöglichen.

Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsziele von UAS sind hauptsächlich folgende:

- Brückeninspektionen insbesondere in Bereichen mit eingeschränkter Zugänglichkeit (MORGENTHAL et al.).
- Verformungsermittlung (HALLERMANN et al., 2018).
- Erfassung von Oberflächenschäden (AZARI et al., 2021).
- Verfolgung der zeitlichen Schädigung (AZARI et al., 2021).

In einigen Fällen wurden UAS-Bilder des gesamten Bauwerks bei der Erstellung von Brücken-Plänen für ältere Brücken verwendet, für die die ursprünglichen Zeichnungen nicht mehr existieren (AZARI et al., 2021).

Derzeitige Anwendungsgrenzen und technische Herausforderungen

- Hoher Zeitaufwand für die Nachbearbeitung aufgrund großer Datenmengen (AZARI et al., 2021).
- Große digitale Speicher- und Archivierungsanforderungen je nach Anzahl der Bilder und Videos (AZARI et al., 2021).
- Schwierigkeiten bei der Anwendung an einigen Standorten, an denen die GPS-Signale verloren gehen (z. B. unter der Brücke) (AZARI et al., 2021).
- Ungünstige Witterungs- und Umgebungsverhältnisse wie bspw. Temperaturen, Wind, Niederschläge oder Staubaufwirbelungen beeinträchtigen die Leistungsfähigkeit von UAS und die Präzision der Bildaufnahme (HOLST, 2018; AZARI et al., 2021).
- Für eine zuverlässige Datenaufzeichnung bestehen hohe Anforderungen an die präzise Bewegung in der Luft, stabile Haltung von UAS im Schwebeflug und eine zuverlässige Gerätekommunikation. (BERGMEISTER, 2022a).

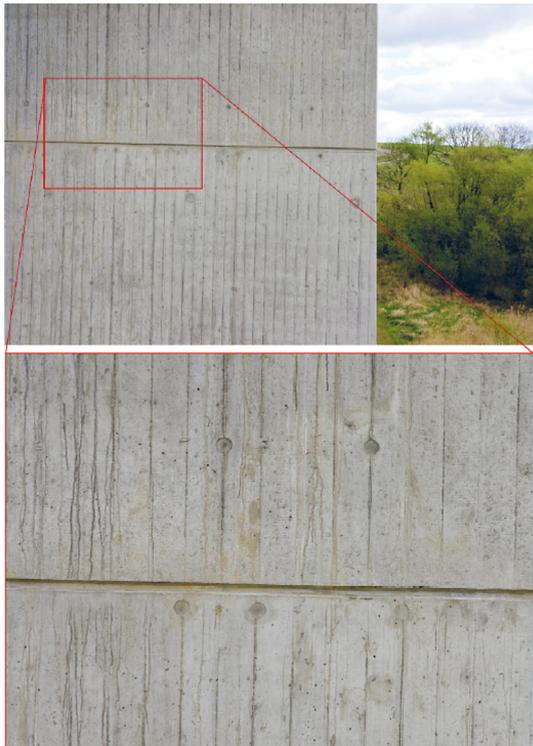


Bild 93: Beispiel typischer Störquellen (MORGENTHAL et al.)

Es ist bei der automatischen Bildanalyse mit Fokus auf die Rissidentifikation zu beachten, dass Störungen auf der Oberfläche zu Verwechslungen oder Fehlern bei der Identifikation führen können. Verfärbungen, Verschmutzungen und Schalkanten können Beispiele für diese Störquellen darstellen (Bild 93) (MORGENTHAL et al.).

3.14.2 Verteilte faseroptische Sensoren

Verteilte Faseroptische Sensoren (engl. Distributed Fibre Optic Sensing, DFOS) bieten die Möglichkeit Dehnungsänderungen an gesamten Bauwerkbereichen großflächig über verlegte Glasfasersensoren zu überwachen. Im Vergleich zu Sensoren mit lokalem Messprinzip bietet dies die Möglichkeit einer flächigen Strukturüberwachung ohne detaillierte Kenntnis des maßgebenden Strukturpunktes. Sie zeigen das Potenzial als Überwachungssystem zur frühzeitigen Detektion von Zustandsveränderungen z. B. durch Änderungen der Bauteilverformungen oder Rissentwicklung eingesetzt zu werden. Faseroptische Sensoren sind im Vergleich zu elektrischen Sensoren unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Einwirkungen und elektrische Bedrohungsszenarien (UDD, 1996).

Messtechnik

Faseroptische Sensoren setzen sich aus einem Lichtwellenleiter und einer Auswerteeinheit (Interrogator) zusammen. Als Lichtwellenleiter werden Singlemode Glasfasern mit einem Wellenlängenbereich von 1550 nm genutzt.

Im Brückenmonitoring kann für örtlich hochauflösende Messungen Sensorik auf Basis der Frequenzbereichsreflektometrie (Optical Frequency-Domain Reflectometry, kurz: OFDR) genutzt werden. Das Messprinzip beruht auf der Messung der Rayleigh-Streuung. Diese entsteht durch elastische Streuprozesse an Brechzahlvariationen oder lokalen Störungen der Wellenleitergeometrie bzw. der Glasfaser. Bei Abtasten der Glasfaser wird ein fluktuierender Intensitätsverlauf der Rayleigh-Streuung entlang der abgetasteten Segmente der

Glasfaser erfasst. Der Intensitätsverlauf ist bei wiederholter Messung unter gleichbleibenden äußeren Bedingungen stabil, sodass für jedes Glasfasersegment ein charakteristischer „Fingerabdruck“ erstellt werden kann. Bei Dehnungsänderungen in der Faser, mechanisch und thermisch bedingt, kommt es zu einer Streckung oder Stauchung des Fingerabdrucks (Bild 94). Die Änderung des Rayleigh-Musters kann dann in eine Dehnungsänderung umgerechnet werden (SAMIEC, 2011).

Neben Messsystemen auf Basis der OFDR Technologie werden für das Bauwerksmonitoring Messungen der Brillouin-Streuung auf Basis der Optischen Zeitbereichsreflektometrie (engl. Optical Time Domain Reflectometry, OTDR) oder Frequenzbereichsanalyse (engl.: Optical Frequency-Domain Analysis, OFDA) verwendet. Die Messlängen können sich auf mehrere Kilometer erstrecken bei einer örtlichen Messauflösung zwischen 20 cm und 1 m. Die Messdauer für eine Messung liegt in Abhängigkeit der Messlänge im Bereich von 3 bis 60 Minuten (MONSBERGER and LIENHART, 2021b). Aufgrund der langen Messlängen werden BODFA-Sensoren in der Geodäsie und im Tunnelbau z. B. zur statischen Überwachung von Hangrutschen und Deformationsüberwachung von Tunnelschalen im Bau- und Endzustand eingesetzt (MONSBERGER and LIENHART, 2021a). Die folgenden Abschnitte beziehen sich auf die OFDR Technologie.

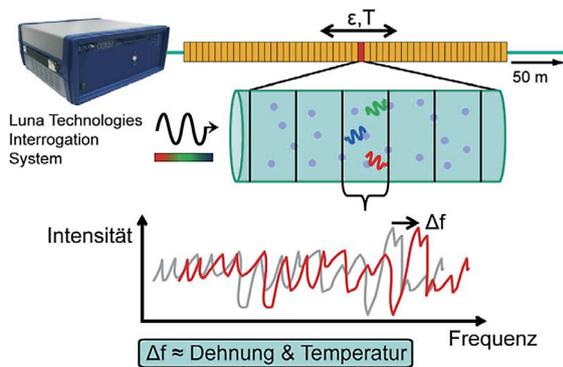


Bild 94: OFDR Messprinzip verteilter faseroptischer Sensoren (nach LUNA Innovations Inc.) (SAMIEC, 2011)

Informationsgewinn und Datenmanagement

Die OFDR Technologie ermöglicht zum derzeitigen Stand der Technik Messlängen von bis zu 100 m bei einer örtlichen Messauflösung zwischen 1 mm bis 5 mm. Die erwartete Messgenauigkeit der Dehnungsmessung liegt bei ca. $30\mu\text{m}/\text{m}$. In Abhängigkeit von der Gesamtlänge sind Abtastraten von 0,625 Hz bis 250 Hz möglich (Luna Innovations, 2022). Bei Brückenbauwerken ist wegen des Einsatzes längerer Messlängen und mehreren Sensoren von Abtastraten < 5 Hz auszugehen. Die Datenübertragung vom Laser zur Auswerteeinheit erfolgt kabelgebunden. Durch die hohe örtliche Messauflösung fallen bei einer kontinuierlichen Messung große Datenvolumen an.

Für Beton- und Spannbetonbauwerke eignen sich faseroptische Sensoren zur Detektion und Lokalisierung von Rissen am Bauwerk. In Abhängigkeit der Ummantelung der Messfaser und der Installationsqualität lassen sich qualitative Aussagen über die Rissentwicklungen durch die Rückrechnung der Dehnung treffen. In Abhängigkeit der Ummantelungsart und des verwendeten Klebmittels stellen sich charakteristische Dehnungskurven für Rissentwicklungen ein (NOVÁK et al., 2021).

Bild 95 zeigt die Installation von Messfasern in einer Nut entlang eines Spannbetonquerträgers für die wiederkehrende Prüfung zur Untersuchung bestehender Risse. Am Träger konnten die unter Verkehr arbeitenden Risse über die Auswertung lokaler Dehnungsspitzen lokalisiert werden (Bild 96) (ZDANOWICZ et al., 2022).

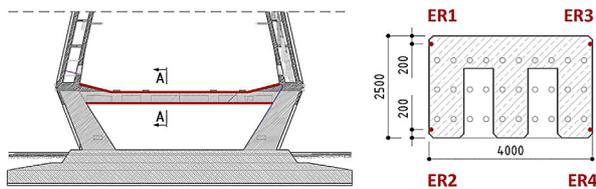


Bild 95: Anordnung der faseroptischen Sensoren am Träger (ZDANOWICZ et al., 2022)

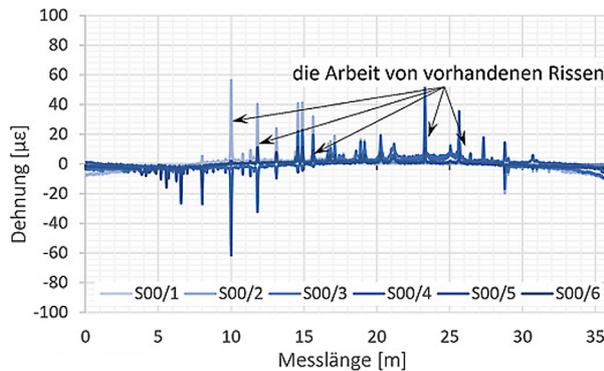


Bild 96: Dehnungsmessung der faseroptischen Sensoren über einen Zeitraum weniger Minuten (ZDANOWICZ et al., 2022)

Neben der Detektion lokaler Dehnungsereignisse bieten optische Messfasern die Möglichkeit Dehnungsprofile über gesamte Bauwerksbereiche zu erfassen. Die Messergebnisse der verteilten Dehnungsmessung können zur Validierung des Rechenmodells herangezogen werden. Bild 97 zeigt eine exemplarische Gegenüberstellung der optische Dehnungsmessung eines Kurzzeitmonitorings mit den Berechnungsergebnissen des FE-Modells. Die Sensoren wurden in der Fahrbahnplatte in der Bewehrungsebene installiert. (SIEŃKO et al., 2021)

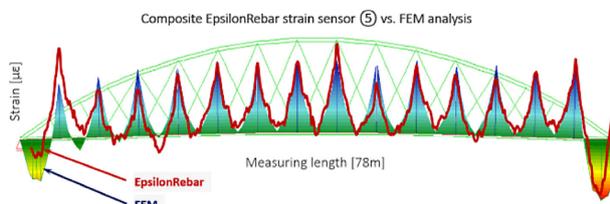
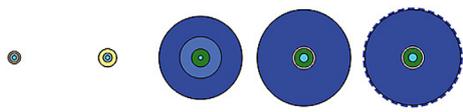


Bild 97: Exemplarischer Vergleich der Dehnungsmessergebnisse der verteilten faseroptischen Sensoren mit den Rechenergebnissen aus dem FE-Modell für die Lastfälle Eigengewicht und Schwinden (SIEŃKO et al., 2021)

Verteilte faseroptische Sensoren eignen sich außerdem als Sicherheitssystem zur flächigen Überwachung der Tragwerksreaktion kritischer Bauwerksbereiche während Belastungstests. Über die Echtzeit-Messung der Dehnungen aus Verformungen infolge Achslasten können maßgebende Laststellungen überprüft und angepasst werden. Über die Auswertung lokaler Messpunkte können neben der globalen Dehnungsüberwachung lokale Rissentwicklungen dokumentiert und qualitativ bewertet werden (NOVÁK et al., 2022).

An der Brücke Altstädter Bahnhof wurden als Kurzzeitmonitoring zur Erfassung der Auswirkungen künstlich herbeigeführter Spanndrahtbrücke faseroptische Sensoren unterhalb der Längsträger auf der Betonoberfläche appliziert. Für die Messung wurden Sensorlängen von 70 m mit einer örtlichen Messauflösung von 5 mm mit einer Signalaufösung von 2 $\mu\text{m}/\text{m}$ verwendet (PIRSKAWETZ et al., 2022).



Durchmesser:	Ø 0.25 mm	Ø 0.9 mm	Ø 2.8 mm	Ø 3.2 mm	Ø 3.2 mm
Mantel:	Polymide	Acrylate	EPR Non-metallic	Polyamid Metal tube	Polyamid Metal tube

Bild 98: Auswahl handelsüblicher Messfasern (NOVÁK et al., 2021)

Ausführung

Glasfasern sind mit unterschiedlichen Ummantelungen als mechanischem Schutz erhältlich (Bild 98). Die Ummantelung dient zum Faserschutz, besserer Handhabung und zur Abminderung der Dehnung in der Faser um Faserbruch bei lokal hohen Dehnungen z. B. aus Rissentwicklungen zu vermeiden. Die Stärke und Elastizität der Ummantelung ist in Abhängigkeit des Anwendungsziels zu wählen. Für globale Dehnungsmessungen in rauen Umgebungen z. B. zum Einbetonieren in Bauteile, bei schwierige Installationsbedingungen oder geotechnischer Anwendung bieten sich robuste Ummantelungen an. Zur Rissdetektion und qualitativen Bewertung von lokalen Dehnungsereignissen im Mikrometerbereich eignen sich elastische Ummantelungen mit guten Verbundeigenschaften. Einige marktüblichen Messkabel sind nicht primär zur Dehnungsmessung entwickelt worden und enthalten keine Herstellerangaben zum Dehnungsübertragungskoeffizienten der Ummantelung. In Abhängigkeit des Messziels sind gesonderte Laborkalibrierungen zur qualitativen Bewertung von (lokalen) Dehnungsentwicklungen erforderlich. Bei Oberflächenapplikationen mit elastischen Klebmitteln ist zusätzlich eine Kalibrierung der Dehnungsübertragung des Klebmittels bzw. der gesamten Dehnungsübertragung von Klebmittel und Ummantelungsschichten notwendig (NOVÁK et al., 2021).

Bei Neubauten in Massivbauweise können die Sensoren direkt im Querschnitt verlegt werden z. B. durch Befestigung an der Bewehrung. Hierfür sind Messfasern mit ausreichend robuster Ummantelung zum Schutz der Faser während den Installations- und Betonierarbeiten zu wählen (SIENKO et al., 2022).

Bei Bestandsbauten werden verteilte faseroptische Sensoren üblicherweise an der Oberfläche appliziert. Die Messfaser kann in Abhängigkeit des Messziels und der Oberflächenbeschaffenheiten direkt auf der vorbehandelten Oberfläche (Bild 99) (geeignet für Kurzzeitmessungen) oder bei Massivbauten in einer eingefrästen Nut (Bild 100) (geeignet für Langzeitmessungen) installiert werden.



Bild 99: Einsatzbeispiel der faseroptischen Sensoren zur Messung in zwei orthogonalen Richtungen (SCHRAMM and FISCHER, 2019)



Bild 100: Installationsmöglichkeit in einer Nut nahe der Stegunterkante (NOVÁK et al., 2021)

Anwendungsziele und Anwendungsbereiche

Die Anwendungsgebiete von verteilten faseroptischen Sensoren sind nach aktuellem Stand der Technik:

- Überwachungssystem zur annähernd flächigen Überwachung kritischer Bauwerksbereiche bei entsprechender Sensorverlegung
- Rissdetektion und Lokalisierung
- Qualitative Bewertung von Rissentwicklungen
- Überwachung von Verformungen
- Messung globaler Dehnungsprofile
- Temperaturmessung

Verteilte faseroptische Sensoren werden derzeit vereinzelt für das Kurzzeitmonitoring wie z. B. für Belastungstests oder wiederkehrende messtechnische Prüfungen eingesetzt. Für das Dauermonitoring werden erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Messtechnik und an das Datenmanagement gestellt.

Derzeitige Anwendungsgrenzen und technische Herausforderungen

Verteilte faseroptische Sensoren auf Basis der Rayleigh-Streuung erfassen mechanisch und thermisch induzierte Dehnung. Für den Einsatz in Umgebungen mit veränderlichen Bauteil- und Außenlufttemperaturen sind zusätzlich Messsysteme zur Temperaturerfassung zu installieren. Die Temperaturkompensation kann über eine parallel verlegte dehnungsentkoppelte Messfaser erfolgen (MONSBERGER et al., 2018). Bei dieser Lösung belegt die Messfaser zur Temperaturmessung einen separaten Messkanal. Da verteilte faseroptische Messsysteme zum aktuellen Stand der Technik kostenintensiv sind, kann dies im Einzelfall eine unwirtschaftliche Lösung darstellen. Alternativ kann die Bauteiltemperatur z. B. mit Temperatursensoren nahe der Messfaser erfasst und der thermische Anteil der Dehnung über den Temperaturdehnungskoeffizient der Messfaser rückgerechnet werden (ZDANOWICZ et al., 2022).

Aufgrund der hohen Anzahl der Messpunkte, bei einigen Systemen sind bis zu annähernd 38.400 Messpunkte je Sensorfaser möglich, sind mit verteilten faseroptischen Sensoren nur vergleichsweise langsame Abtastraten möglich. Für die praktische Anwendung an Brückenbauwerken eignen sich faseroptische Sensoren zur flächigen Überwachung von Tragwerksveränderungen, Detektion und Lokalisierung von Rissentwicklungen, insbesondere für visuell nicht erkennbare Risse. Aufgrund der geringen Abtastrate entsprechend der Sensorlänge sind die Messsysteme zum Erfassen von verkehrsbedingten Bauwerks-

reaktionen nur bedingt geeignet und sollten für dieses Messziel durch lokale Sensoren mit entsprechend höherer Abtastrate komplementiert werden.

Bei der Planung der Sensorverlegung sind die vom Hersteller angegebenen Biegegraden der Messfaser zu beachten und sollten zur Erhaltung der Messqualität über die gesamte Sensorlänge nicht unterschritten werden. Äußere Einflüsse wie hochfrequente Vibrationen können Störungen in der Messung durch eine Änderung der Intensität des Lichts an der gestörte Messstelle hervorrufen (BARRIAS et al., 2016).

Durch die hohe Anzahl der Messpunkte fallen bei kontinuierlichen Messungen große Datenmengen an. Für den Einsatz als Dauermonitoring ist in der Planung ein erhöhter Aufwand für die Aufstellung des Datenmanagements einzuplanen.

3.14.3 Konzept der Nullmessung

Neben dem Einsatz von Monitoringmaßnahmen bei Bestandsbrücken können Monitoringssysteme bei Neubauten z. B. zur Inbetriebnahme zur Anwendung kommen. Nullmessungen am Bauwerk werden überwiegend für die folgenden Messziele angewandt:

- Überprüfung des tatsächlichen Tragverhaltens im Vergleich zu den rechnerischen Annahmen bei neuartigen Bauarten oder Bauwerke mit Zustimmung im Einzelfall z. B. in (MANSPERGER and JUNG, 2015),
- Verifizierung und Kalibrierung des Rechenmodells (z. B. hinsichtlich der Steifigkeitsannahmen und Anforderungen),
- Messtechnische Überprüfung des erwarteten Schwingverhaltens und numerischer Eigenformen.

Mit dem Ziel, den Ist-Zustand des Bauwerks und die möglichen zukünftigen Abweichungen vom Normalzustand (Soll-Zustand) des Bauwerks zu erfassen, wird die kontinuierliche Zustandsbewertung herangezogen. Hierzu ist es notwendig, den ungestörten Initialzustand (Nullzustand) des Bauwerks als Grundlage für die anschließenden Messungen der Bauwerksreaktionen zu erfassen. Die Soll-Messwerte, die den Normalzustand des Bauwerks beschreiben, können unter Berücksichtigung der erforderlichen Anpassungen infolge der Umwelteinflüsse (z. B. Temperatur) statistisch extrapoliert werden. Dadurch können Abweichungen des Tragwerksverhaltens festgestellt und eine frühzeitige Untersuchung und Behandlung der Abweichungsursache eingeleitet werden (HEGGER and MARK, 2021).

Ein Beispiel dafür ist in LINK et al. (2016) für die Gärtnerplatzbrücke in Kassel beschrieben. Bei der Gärtnerplatzbrücke dienen die Eigenfrequenzen und Eigenformen, die aus der dynamischen Antwort infolge einer Erregung extrahiert werden, als Hinweise auf Veränderungen des Tragwerksverhaltens. Vor der Installation des Monitorings wurden Vorversuche durchgeführt, die es ermöglichten, ein kalibriertes Finite-Elemente-Modell als Referenz zu erstellen. Die Daten des Initialzustandes wurden dann als Nullmessung für die nachfolgenden Messdaten verwendet. Bild 101 zeigt die 96 aufgebrauchten Stoßimpulse und die 5 Referenzmesspunkte R1-R5 auf der Brücke bei den Vorversuchen.

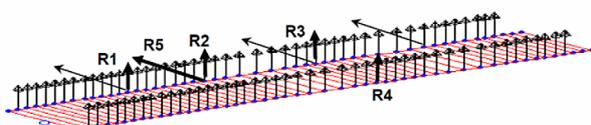


Bild 101: Die 96 aufgebrauchten Stoßimpulse und die 5 Referenzmesspunkte R1-R5 auf der Gärtnerplatzbrücke in Kassel bei den Vorversuchen (LINK et al., 2008)

Ein weiteres Ziel der Monitoringmaßnahmen in Bezug auf die Inbetriebnahme von Bauwerken besteht darin, die Berechnungsannahmen zu bestätigen, insbesondere bei komplizierten Tragsystemen, die eine Reihe von Annahmen erfordern (LINDORF, 2018). Dies ist der Fall bei großen (semi-)integralen Bauwerken, wobei die Messdaten als Vergleichswerte zum tatsächlichen Verhalten des Bauwerks für weitere Analysen von großer Bedeutung sein können. Darüber hinaus kann der Bauprozess komplexer Bauwerke messtechnisch dokumentiert werden, was eine zuverlässigere Zukunftsplanung für ähnliche Bauwerke ermöglicht und die Qualität der Standardisierung verbessert (GEIER et al., 2017). In der RE-ING 01/2021 wird für große (semi-)integrale Bauwerke ein Monitoring explizit empfohlen.

Ein Beispiel für den Einsatz eines Monitoringsystems bei integralen Bauwerken an wird in GEIER et al. (2014) beschrieben. Dabei wurden Temperaturen, Bauwerksbewegungen und der Erddruck am Widerlager gemessen, um das tatsächliche Verhalten des flexiblen Widerlagers zu überprüfen. Da bei integralen Brücken der die Boden-Bauwerk-Interaktion ein entscheidender Parameter ist, der über die Abhängigkeit der Lagerungssteifigkeit des Tragsystems sowie dem resultierenden Zwang einen direkten Einfluss auf die Bemessung des Bauwerks hat, werden Messungen üblicherweise mit Hilfe von Erddruckaufnehmern durchgeführt (Bild 102).



Bild 102: Erddruckaufnehmer (GEIER et al., 2014)

Bild 103 zeigt ein Beispiel für die Installation eines Erddruckaufnehmers an der Rückseite des Widerlagers an einer vorgespannten integralen Rahmenbrücke (VILL et al., 2022).



Bild 103: Beispiel für die Installation eines Erddruckaufnehmers (VILL et al., 2022)

Bei der Objektplanung sind Standorte für Monitoringzentralen zu definieren und bei der Ausführung zu berücksichtigen. So wurde bspw. am Widerlager der Seitenhafenbrücke eine Nische mit einer Vandalismusschutztür erstellt, um darin das Monitoring-System zu installieren (Bild 104).



Bild 104: Vorgesehene Nische für die Monitoringzentrale am Widerlager an der Seitenhafenbrücke in Wien (GEIER et al., 2014)

Ein weiteres Beispiel ist in MISCHO et al. (2022) beschrieben. Dabei erfolgt die Planung der Messsysteme parallel zur Objektplanung unter Berücksichtigung der erforderlichen Kabelwege, Durchbrüche, Leerrohre und Anschlussmöglichkeiten. Die Nullmessung des Monitorings wurde in der ersten Betriebsphase durchgeführt, wobei die Initialwerte für Verformungen, Dehnungen und Temperatur als Referenzwerte aufgezeichnet wurden.

Die Grubentalbrücke ist ein weiteres Beispiel für die Überwachung von semi-integralen Brücken. Mit dem Ziel, die Berechnungen der Kriech- und Schwindverformungen zu überprüfen, wurde ein Monitoringsystem eingesetzt (KEIL and WENGER, 2015). Dabei wurden die DMS genau an den vorgegebenen Stellen auf den Bewehrungsstäben und auf der Betonoberfläche unter Berücksichtigung der Schutzmaßnahmen bei Betonierarbeiten und Rütteln angebracht und anschließend eine Nullmessung zur Erfassung der Toleranzen durchgeführt.

Mit dem Ziel, die mögliche Rissbildung an den Verbundfahrbahnplatten zu überwachen, wurden DMS an der Anschlussbewehrung und Rissbreitenaufnehmer in den Zwischenfugen angebracht. Dabei erfolgt die Zugänglichkeit der Kabelanschlüsse für die Messtechnik über ein in der Kappe einbetoniertes Rohr (GEIßLER et al., 2009).

4 Erfahrungssammlung Monitoring

4.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die von der Straßenbauverwaltung und den Ingenieurbüros zu Verfügung gestellten Erfahrungswerte ausgewertet. Die Erfahrungswerte wurden in einer Länderabfrage und in Fragebögen zu ausgewählten Anwendungsfällen zusammengetragen. Die Auswertung der Erfahrungswerte basiert auf einer stichprobenartigen Sammlung an Erfahrungswerten ohne allgemeingültige Aussage. Aus einigen Erfahrungswerten lassen sich jedoch Trends ableiten, die als Anhaltspunkt für die Planung, Ausschreibung und Umsetzung von Monitoringsystemen für Brücken herangezogen werden können.

Im Jahr 2020 wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen eine Länderabfrage zu durchgeführten Monitoringmaßnahmen an Brücken der Bundesfernstraßen erstellt. In der Länderabfrage wurden von der Straßenbauverwaltung 102 laufende und abgeschlossene Monitoringmaßnahmen an 97 (Teil-)Bauwerken gemeldet. An einigen Bauwerken wurden in der Betriebsphase zeitlich versetzt mehrere (unabhängige) Monitoringsysteme angebracht, die in der statistischen Auswertung als eigenständiges System an getrennten Bauwerken erfasst werden.

Aus den gemeldeten Monitoringanwendungen wurden 52 Maßnahmen für eine detaillierte Befragung ausgewählt. Die Vorauswahl repräsentativer Maßnahmen erfolgte unter anderem nach dem Vorliegen eines erkennbaren Monitoringsziels, einer ausreichenden Datenlage und einem nachvollziehbaren Einsatz der Messtechnik für das angegebene Messziel. In der Vorauswahl wurden reine Planungsstände von Monitoringmaßnahmen, von Brückenbauwerken abweichende Bauwerksarten und Monitoring im Zuge reiner Forschungs- und Entwicklungsprojekte nicht berücksichtigt. Periodische Handmessungen im Zuge der Bauwerksprüfung wurden ebenfalls nicht mit aufgenommen. Die Sammlung der Erfahrungswerte erfolgte in einem ersten Schritt anhand von an die Straßenbauverwaltung versendeten Fragebögen. Aus dem Rücklauf der Fragebögen konnten 33 Maßnahmen in die statistische Auswertung aufgenommen werden. Nicht alle Fragebögen sind vollständig ausgefüllt, da es im Zeitraum der Erstellung der Erfahrungssammlung zu einem Wechsel des Baulastträgers bei einer Großzahl der Bauwerke kam. Dadurch konnten in einigen Fällen Informationen für abgeschlossenen Monitoringmaßnahmen nicht vollständig bereitgestellt werden. Von den Monitoringanwendungen aus den vorliegenden Fragebögen wurden 31 in die Beispielsammlung aufgenommen. Zusätzlich werden drei repräsentative Monitoringmaßnahmen in der Beispielsammlung (siehe Beispielsammlung Monitoring 4.2, Monitoring 6.1, Monitoring 12.4) beschrieben, zu denen keine Fragebögen vorliegen und die in der statistischen Auswertung zur Ausschreibung und Vergabe und dem Monitoringprozess nicht berücksichtigt wurden.

Bei 4 Monitoringmaßnahmen wurden zusammenhängende Messsysteme mit mehreren Messzielen und unterschiedlicher Sensorik installiert. In der Statistik werden diese Maßnahmen als eine Gesamtmaßnahme betrachtet. In der Beispielsammlung wurde bei diesen Maßnahmen die Gesamtmaßnahme in einzelne Messziele mit entsprechender Sensorik aufgeteilt, um den Nutzen und Informationsgewinn der Einzelmesssysteme detailliert in Einzelkapiteln aufzuzeigen. In den Einzelkapiteln wird auf die Einbindung in der Gesamtmaßnahme verwiesen.

Dieses Kapitel dient als Ergänzung der Beispielsammlung mit zusätzlichen Erfahrungswerten zu Ausschreibung und Vergabe sowie der Zuständigkeit der Akteure in den einzelnen Monitoringphasen nach DBV (2018). In Kapitel 4.2 werden die Ergebnisse der Länderab-

frage als Bestandsaufnahme der gemeldeten Monitoringanwendungen bis zum Jahr 2020 aufgeführt. Die darauffolgenden Abschnitte beziehen sich auf ergänzende Erfahrungswerte aus den Fragebögen der ausgewählten Monitoringanwendungen.

4.2 Länderabfrage – Bestandsaufnahme Monitoring

4.2.1 Bauwerksdaten

Die Verteilung der Baujahre (Bild 105) zeigt, dass ein großer Anteil der überwachten Bauwerke im Zeitraum der 1960er und 1970er Jahre gebaut wurde. Die Bauwerke befinden sich somit überwiegend in der zweiten Hälfte der planmäßigen Nutzungsphase. Auffallend ist der große Anteil an Spannbetonbrücken von 65 %. Dies kann beispielsweise auf die SpRK-Problematik des in den 1960er bis 1990er Jahren verbauten Spannstahls zurückgeführt werden, aber auch auf den erhöhten Einsatz von Spannbeton im Großbrückenbau mit höheren erwarteten Defiziten. In der Länderabfrage wurde zwischen Hohlkasten, Plattenbalken, Platten und Sonstiges als Überbautyp unterschieden (Bild 107). Der größte Anteil der Brücken wurde als Hohlkastenbrücke (43 %) und Plattenbalkenbrücke (38 %) ausgeführt. Das theoretische Traglastniveau (Bild 108) kann bei ungefähr der Hälfte (48 %) der Bauwerke mit der Brückenklasse BK 60 angenommen werden. 24 % der überwachten Brücken weisen eine höhere Traglast auf.

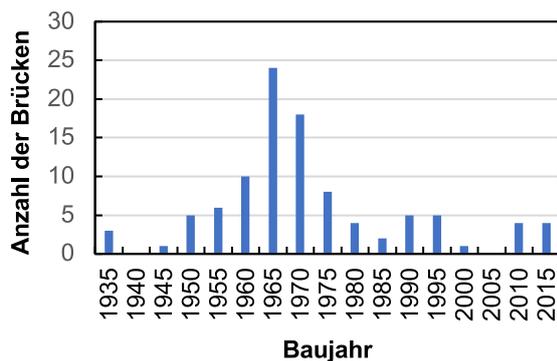


Bild 105: Übersicht über den theoretischen Widerstand anhand der Brückenklasse (Länderabfrage)

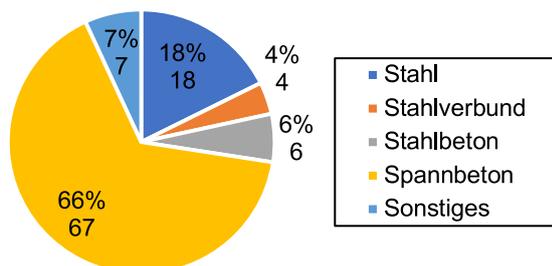


Bild 106: Übersicht über die Baustoffe der überwachten Brücken (Länderabfrage)

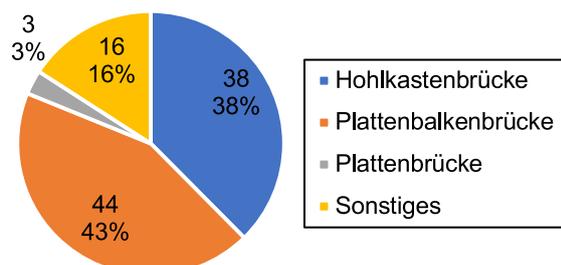


Bild 107: Übersicht über die Bauart der überwachten Brücken (Länderabfrage)

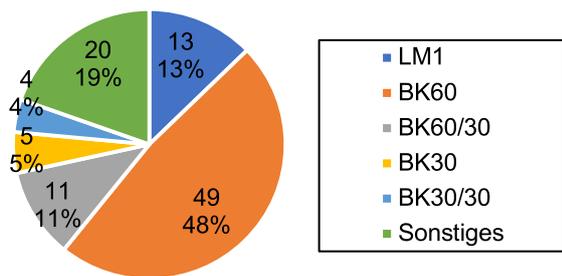


Bild 108: Übersicht über den theoretischen Widerstand anhand der Brückenklasse (Länderabfrage)

4.2.2 Angaben zum Monitoring

Anlass des Monitorings

Es können mehrere Anlässe zur Notwendigkeit eines Bauwerksmonitorings führen. In der Länderabfrage wurden für einige Monitoringanwendungen mehrere Anlässe genannt. Die Anlässe sind in der Statistik in Bild 109 einzeln aufgeführt.

So können beispielsweise Messungen als messtechnische Ergänzung der Nachrechnung z. B. nach Stufe 3 der NRR zur Abschätzung des tatsächlichen Tragverhaltens herangezogen werden. Hierbei werden in der Regel Kurzzeitmessungen am Bauwerk im Zuge einer Probelastung gemacht und die Messdaten der Bauwerksreaktion beispielsweise zur Kalibrierung des FE-Modells und Anpassung der rechnerischen Annahmen verwendet. In der Länderabfrage wurde für 17 % der Monitoringanwendungen der Anlass als Unterstützung der Nachrechnung angegeben. Bestehen in der Nachweisführung nach NRR weiterhin rechnerische Defizite kann es notwendig werden, dass das Monitoringsystem zur Überwachung von Zustandsveränderungen und Überprüfung der Gültigkeit der rechnerischen Annahmen bestehen bleibt.

In 20 % der gemeldeten Monitoringanwendungen wurde die Überwachung bekannter rechnerischer und baulicher Defizite als Monitoringanlass genannt. Es wird (objektspezifisch) davon ausgegangen, dass sich Zustandsveränderungen z. B. über die Erfassung der Reaktionen des Bauwerks (26 %) überwachen lassen. Veränderungen der Bauwerksreaktion (z. B. Verformungszunahme, Änderung der modalen Parameter) können auf einen möglichen Schädigungsprozess hindeuten.

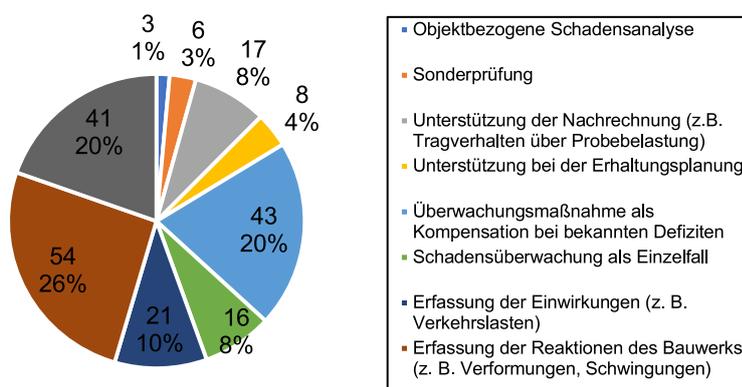


Bild 109: Übersicht über den Anlass des Monitorings (Länderabfrage)

Die Erfassung der Bauwerksreaktion kann außerdem Ausschluss über die tatsächliche Bauteilsteifigkeit geben und für den Vergleich der rechnerischen Annahmen herangezogen werden.

In 8 % der Monitoringanwendungen wurde eine Schadensüberwachung als Einzelfall notwendig, z. B. zur Überwachung einzelner Risse ohne erkennbare Rissursache oder als mögliche Ankündigung einer Zustandsverschlechterung.

Monitoring kann zur Aufrechterhaltung der verkehrlichen Nutzung in der reaktiven und präventiven Erhaltungsplanung (4 %) nach dem BMVI (2020) als unterstützendes Mittel eingesetzt werden, z. B. in Form eines Frühwarnsystems für die Einleitung von Ertüchtigungsmaßnahmen.

Unter bestimmten Voraussetzungen können mit Unterstützung eines Monitorings die Abstände der Sonderprüfung (3 %) verlängert werden. Insbesondere für schwer zugängliche Bauwerksbereichen kann die messtechnische Unterstützung der Sonderprüfung sinnvoll sein. Das Bauwerksmonitoring kann jedoch nicht die Sonderprüfung ersetzen.

Monitoring kann außerdem als objektbezogene Schadensanalyse (1 %) z. B. in Form von Feuchtigkeits- oder Korrosionsmessungen herangezogen werden. Eine regelmäßige Messung oder kontinuierliche Überwachung hat den Vorteil, dass der Schädigungsbeginn (z. B. bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte) bestenfalls messtechnisch erfasst werden kann.

Unter die Angabe Sonstiges (23 %) fallen Anlässe wie z. B. die Prüfung der Bauart im Zuge von Pilotprojekten.

Dauer des Monitorings

Bild 110 stellt die Monitoringart (siehe Kapitel 2.1) nach ihrer Dauer dar. In 8 % der Anwendungen wurde ein Kurzzeit- und 48 % ein Langzeitmonitoring durchgeführt. In 44 % der Anwendungen ist das Monitoringsystem bis zum Ersatzneubau als Dauermonitoring unter Betrieb.

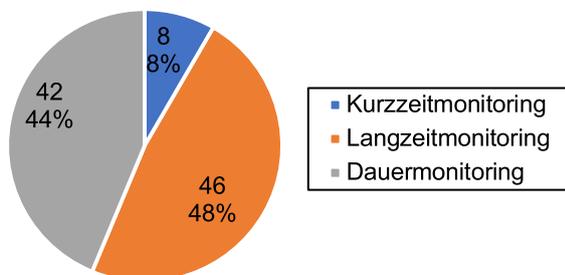


Bild 110: Dauer des Monitorings (Länderabfrage)

Messtechnik

In der Länderabfrage wird ein erster Überblick über die verwendete Messtechnik gegeben (Bild 111). Die Messtechnik wird in Verformungssensoren (z. B. DMS, induktive Wegaufnehmer, Lichtwellenleiter), Neigungssensoren, Beschleunigungssensoren, Temperatursensoren und sonstige Messtechnik unterteilt. Temperatursensoren werden häufig als ergänzende Messung des primären Messziels eingesetzt, um thermische Messeffekte zu bereinigen (Temperaturkompensation) oder den thermischen Zwang eines Bauteils abzuschätzen. Entsprechend hoch ist der Anteil der Temperatursensoren in den ausgewerteten Monitoringanwendungen mit 31 % der Gesamtsensorik. In dem Anteil der Verformungssensoren von 28 % wurden unter anderem Rissensoren (z. B. Wegaufnehmer), Dehnungsmessstreifen, integrale Dehnungsmessungen und Laser angegeben. Zu 30 % wurden sonstige Sensoren genutzt wie z. B. Schallemissionsanalyse, Korrosionsmonitoring und Tachymeter. Zum Teil überschneiden sich die Angaben zwischen Verformungssensoren

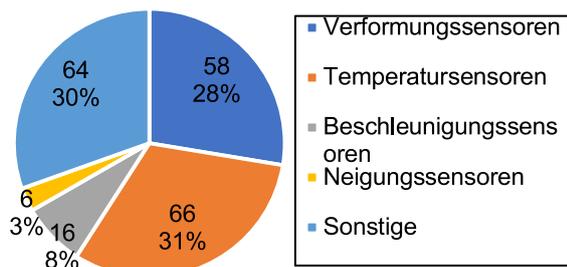


Bild 111: Übersicht der verwendeten Messtechnik (Länderabfrage)

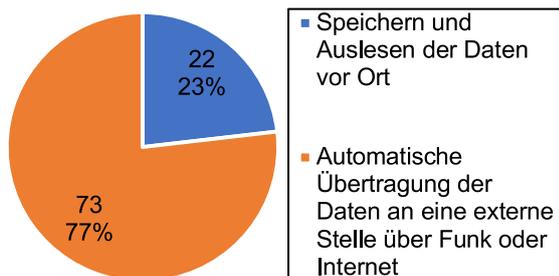


Bild 112: Übersicht über Datenerfassung und Datenübertragung (Länderabfrage)

und sonstigen Sensoren. Die Messdaten werden in 77 % der Anwendungen automatisch über Funk oder Internet an eine externe Stelle übertragen (Bild 112). Lediglich in 23 % der Monitoringanwendungen wurden die Daten vor Ort gespeichert und ausgelesen.

4.3 Beispielsammlung – Bestandsaufnahme Monitoring

4.3.1 Bauwerksdaten

Im Rücklauf der Fragebögen (Auswahl der Monitoringanwendungen aus der Länderabfrage) zeigt sich eine ähnliche statistische Verteilung wie in den Ergebnissen der Länderumfrage. Aus der Analyse der Baujahre und der Baustoffe lässt sich ein Trend ableiten, dass derzeit überwiegend Brücken aus den 1960er und 1970er Jahren messtechnisch überwacht werden. Bei 69 % der Bauwerke handelt es sich um Spannbetonbrücken, rückzuführen auf die SpRK-Problematik des in diesen Jahrzehnten verbauten Spannstahls. 49 % der Bauwerke weisen die normative Tragfähigkeitsklasse BK60 auf. In 36 % der Anwendungsfälle liegt eine geringe normative Tragfähigkeit vor.

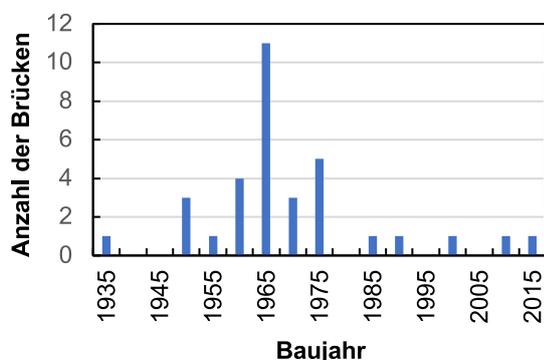


Bild 113: Baujahr der Bauwerke (Fragebögen)

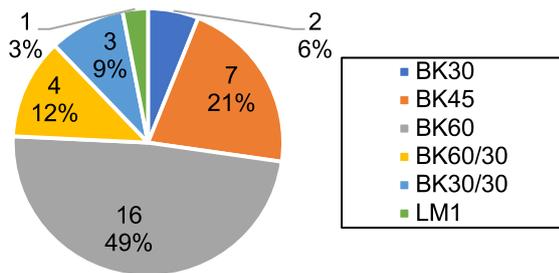


Bild 114: Brückenklassen (Fragebögen)

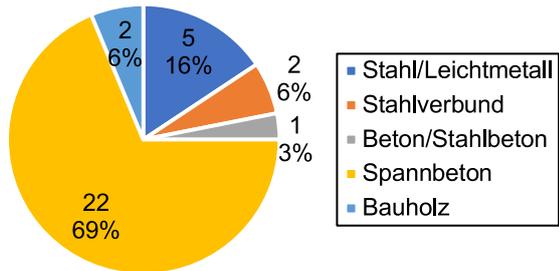


Bild 115: Hauptbaustoff (Fragebögen)

4.3.2 Messtechnik und Messsysteme

Im Folgenden wird ein Überblick über die verwendete Messtechnik der in der Beispielsammlung vorgestellten Monitoringanwendungen gegeben. Die Beispielsammlung gliedert sich in 12 Messziele. Den Messzielen wurden 38 Monitoringanwendungen zugeordnet.

Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung

Die Erfassung der Verkehrsbeanspruchung kann direkt z. B. über Verkehrszählung mittels Bildüberwachung oder indirekt über die Erfassung der Bauwerksreaktion infolge Verkehrseinwirkungen erfolgen. In der Beispielsammlung werden ein Anwendungsfall zur direkten und 2 Anwendungsfälle zur indirekten Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung vorgestellt. In einem Monitoring wurde die Verkehrsüberfahrt direkt mittels Magnetfeldsensoren im Zuge der Nachrechnung erfasst. Die Daten zur Überfahrt und den Dimensionen der Fahrzeuge wurde zur Plausibilisierung weiterer Dehnungs- und Beschleunigungsmessungen genutzt und mit Bildaufnahmen mit automatisierter Objekterkennung ergänzt. In zwei Monitoringanwendungen wurde die Bauwerksreaktion infolge der Verkehrseinwirkung mittels Dehnungs- und Beschleunigungsmessungen indirekt erfasst. Unter Berücksichtigung der Messdaten konnten für die Nachrechnung nach NRR modifizierte Lastmodelle aufgestellt werden. Bild 116 zeigt den Anteil der verwendeten Messtechnik. Zur Abschätzung des Temperatureinflusses wurden in zwei Anwendungen Temperatur- bzw. Klimasensoren verwendet.

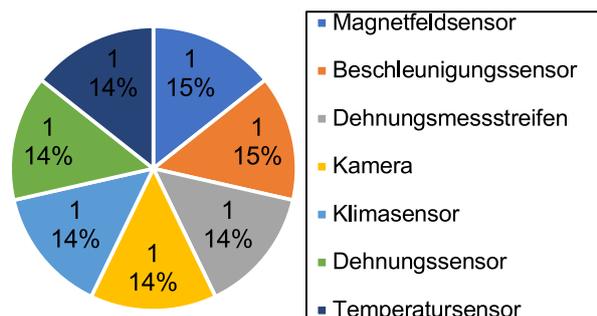


Bild 116: Verwendete Messtechnik (Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung)

Temperaturmessung

Es liegen keine Erfahrungswerte zur Temperaturmessung als direktes Messziel z. B. zu Überprüfung des tatsächlichen Temperaturprofils zur Abschätzung des thermischen Zwangs vor. In der Beispielsammlung wird eine exemplarische Anwendung zur Abschätzung der Temperature Auswirkungen bzw. Temperaturkompensation im Zuge eines weiteren primären Messziels vorgestellt. Die statistische Auswertung entfällt aufgrund der fehlenden Datenlage.

Feuchtigkeitsmessung

In zwei Monitoringanwendung wurde die Bauteilfeuchtigkeit in Abhängigkeit des Umgebungsklimas an zwei Wildbrücken in Holzbauweise überwacht. Die Holzfeuchte wurde mittels Holzfeuchteelektroden kontrolliert und mit Klima- bzw. Temperaturmessungen abgeglichen (Bild 117). Die Messungen wurden als Bauartprüfung einer neuen Konstruktionsweise, Dauerhaftigkeitsüberwachung und Kontrolle des Abdichtungssystems durchgeführt.

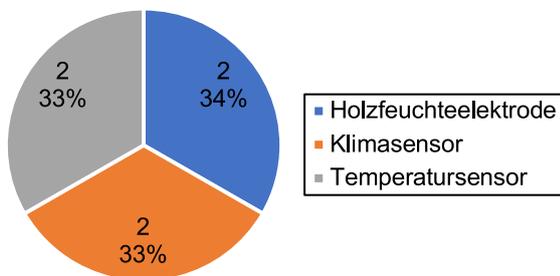


Bild 117: Verwendete Messtechnik (Feuchtigkeitsmessung)

Korrosionsmessung

In zwei Monitoringbeispielen wurde ein Korrosionsmonitoring zur Erfassung des Zeitpunkts einer möglichen Korrosionsinitiierung installiert. Als Messsystem wurden Anodenleitern mit integrierten Temperatursensoren im Bauzustand an der Bewehrung angebracht (Bild 118). In einem Anwendungsfall wurde das Monitoring zur Dauerhaftigkeitsüberwachung eines Bauwerks in Segmentbauweise eingesetzt. In einer zweiten Monitoringanwendung wurden Korrosionsmessungen in einem Pilotbauwerk zur Überprüfung einer möglichen Verlängerung der Lebensdauer bei Einsatz von korrosionsarmem Betonstahl durchgeführt.

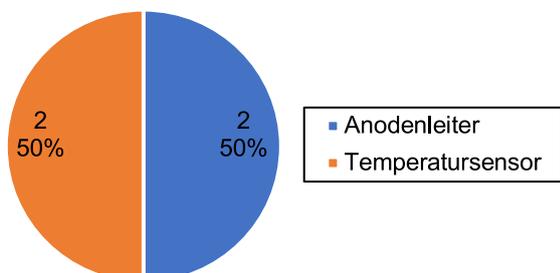


Bild 118: Verwendete Messtechnik (Korrosionsmessung)

Überwachung der Tragwerksverformungen

Die Zunahme von Tragwerksverformungen kann ein Hinweis auf einen möglichen Schädigungsprozess, Steifigkeitsänderungen oder geänderter Beanspruch des Tragwerks sein. In der Beispielsammlung wurden in 7 Monitoringanwendungen die Verformungen überwacht. Als Monitoringanlass wurden die folgenden Gründe angegeben:

- Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten (z. B. rechnerische Defizite, Terrassenbruchgefahr, SpRK-Gefahr)
- Überwachung der Bauwerksreaktion z. B. bei geänderter (4+0) Verkehrsführung

In zwei Anwendungsfällen wurden auf Grund von SpRK-Gefahr tachymetrische Messungen durchgeführt. In beiden Anwendungen wurden die langfristigen Verformungen der Feldbereiche überwacht. Bei zwei weiteren Monitoringanwendungen wurden dynamische Laserdistanzmessungen zur Überwachung der Verformungen in Feldmitte und zur Überwachung der Kragarmverformungen während einer 4+0 Verkehrsführung an SpRK-gefährdeten Bauwerken eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung der globalen Verformung ist die Messung mittels einer digitalen Schlauchwaage. In einem Fall wurden mögliche Verformungen mittels lokaler Dehnungsmessungen überwacht. Bild 119 zeigt den Anteil der verwendeten Messtechnik zur Überwachung der Verformungen. In allen Anwendungen wurden Temperaturmessungen zur Plausibilisierung thermisch bedingter Bauteilverformungen durchgeführt.

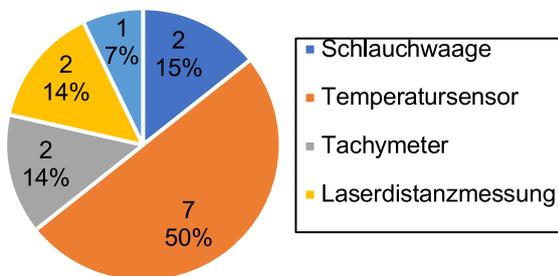


Bild 119: Verwendete Messtechnik (Überwachung der Tragwerksverformungen)

Messung von Verschiebungen

Zur Messung von Verschiebungen wurden in allen Anwendungsbeispielen Wegaufnehmer eingesetzt (Bild 120). In zwei Anwendungen wurden mögliche horizontale und vertikale Verschiebungen der Verankerungsböcke einer externen Vorspannung bei Defiziten in der Verbundfuge überwacht. In einer weiteren Monitoringanwendung wurden die Verformungen der Federelemente an Notunterstützungstürmen zur Kontrolle der Wirksamkeit erfasst. In allen Monitoringanwendungen wurde die Temperatur zur Temperaturkompensation und Abschätzung thermisch bedingter Verschiebungen gemessen.

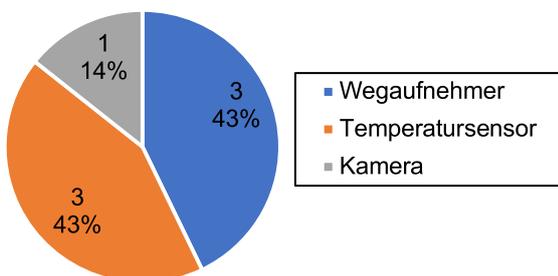


Bild 120: Verwendete Messtechnik (Messung von Verschiebungen)

Messung von Neigungsänderungen

Neigungsänderungen können auf eine mögliche Veränderung des Tragverhaltens z. B. infolge Steifigkeitsänderungen oder infolge einer erhöhten Beanspruchung hinweisen. In zwei Monitoringanwendungen wurden Neigungssensoren jeweils beidseitig der Stützbereiche installiert, um mögliche globale Neigungsänderungen der Feldbereiche zu detektieren. In beiden Maßnahmen wurde das Monitoring im Zuge der Erhaltungsplanung zur Aufrecht-

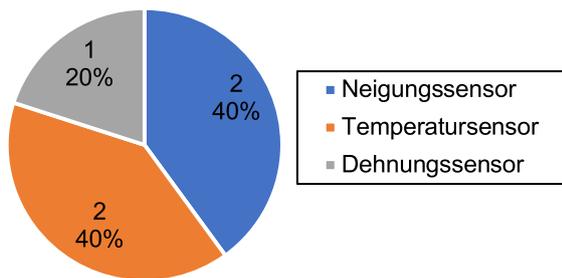


Bild 121: Verwendete Messtechnik (Messung von Neigungsänderungen)

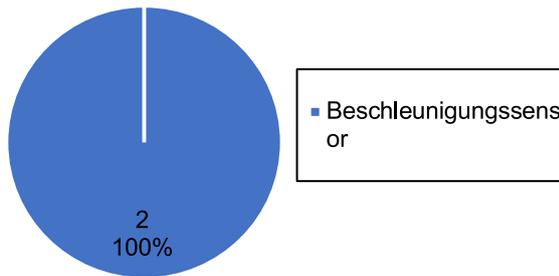


Bild 122: Verwendete Messtechnik (Messung des Schwingverhaltens)

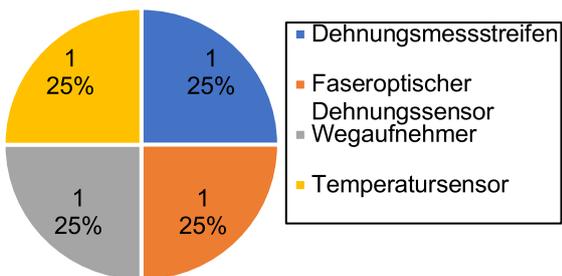


Bild 123: Verwendete Messtechnik (Messung der tatsächlichen Schwingbreite)

erhaltung des Verkehrs während der Restnutzungsdauer trotz Defiziten wie beispielsweise Terrassenbruchgefahr und SpRK eingesetzt.

Messung des Schwingverhaltens

Zur Messung des Schwingverhaltens wurden in zwei Monitoringanwendungen Beschleunigungssensoren verwendet (Bild 122). In einer Monitoringanwendung wurde die Beschleunigungsmessung im Zuge von Kalibrierüberfahrten zur Überprüfung der Steifigkeitsannahmen im Berechnungsmodell der Nachrechnung herangezogen. In einem weiteren Monitoring wurde die Beschleunigungsmessung zur Überwachung möglicher Zustandsveränderungen über die Feststellung einer schädigungsbedingten Eigenfrequenzänderung des Bauwerks durchgeführt. Neben der Zustandsüberwachung konnte messtechnisch eine Überwachung und Klassifizierung von Schwerlasttransporten erfolgen.

Messung der tatsächlichen Schwingbreite

Die Messung der tatsächlichen Schwingbreite kann für den messbasierten Ermüdungsnachweis nach NRR herangezogen werden. In der Beispielsammlung liegen zwei Monitoringanwendungen vor, bei denen die Schwingbreite im Zuge der Nachrechnung zum einen direkt am Betonstahl und zum anderen indirekt über die Messung der Rissentwicklungen in den Koppelfugen erfasst wurde (Bild 123). Zur Messung der Betonstahlspannungen wurden Dehnmessstreifen an der Längsbewehrung und faseroptische Dehnungssensoren

an der Bügelbewehrung installiert. Zur indirekten Messung der Schwingbreite wurde ein Koppelfugenmonitoring über einen Jahreszyklus unter Beachtung der thermischen Abhängigkeit des Grundmoments vorgenommen. In beiden Monitoringanwendungen wurden die Messergebnisse in den Ermüdungsnachweis integriert.

Rissbreitenmessung

In sieben Monitoringmaßnahmen wurden die Rissentwicklungen mit Wegaufnehmern erfasst (Bild 124). Die Wegmessung wurde in allen Maßnahmen durch Temperaturmessungen und in einem Fall durch Verkehrsaufnahmen ergänzt. In vier Monitoringanwendungen wurde ein Koppelfugenmonitoring zur Zustandsüberwachung bei SpRK-Gefahr oder Rissbildung in den Koppelfugen durchgeführt. Bei einigen Maßnahmen ergaben sich in der Nachrechnung rechnerische Ermüdungsdefizite in den Koppelfugen. Als Kompensationsmaßnahmen wurde das tatsächliche ermüdungsrelevante Schwingenspiel lokal überwacht. In drei weiteren Anwendungen wurde ein Rissmonitoring an kritischen oder neu detektierten Rissen zur Schadensüberwachung installiert.

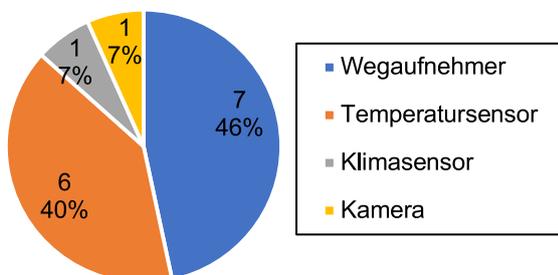


Bild 124: Verwendete Messtechnik (Rissbreitenmessung)

Dehnungsmessung (Stahl)

In vier Monitoringanwendungen wurden Dehnungsmessungen am Stahl durchgeführt. Aus den folgenden Anlässen wurde ein Monitoring notwendig:

- Überwachungsmaßnahme als Kompensation bei bekannten Defiziten (z. B. Terrassenbruchgefahr, Konstruktionsdefizite)
- Überwachung von Schadensfällen (z. B. Ermüdungsschädigung)
- Erfassung der Dehnung unter tatsächlicher Ermüdungsbeanspruchung

In einem Monitoring werden die Spannungen an den Querspannstäben von Verankerungsblöcken einer externen Vorspannung zur kontinuierlichen Überwachung des Anpressdrucks erfasst. In drei weiteren Fällen werden die Dehnungen an den maßgebenden Stahlbauteilen zur Überwachung möglicher Zustandsveränderungen oder zur Erfassung der Dehnung unter der tatsächlichen Ermüdungsbeanspruchung gemessen.

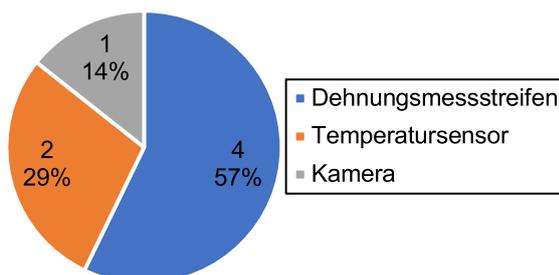


Bild 125: Verwendete Messtechnik (Dehnungsmessung)

In allen Monitoringanwendungen wurde die Stahldehnung mit Dehnungsmessstreifen erfasst (Bild 125). Die Temperaturkompensation wurde bei drei Messsystemen über die Referenzmessung an einem zur Dehnungsrichtung quergeklebten oder von der Bauteildehnung entkoppelten Dehnungsmessstreifen erzielt. Zusätzlich wurde in zwei Anwendungen die Temperatur gemessen. Zur Plausibilisierung der Dehnungsmessungen wurde in einem Fall eine Kamera zur Aufnahme der Verkehrereignisse installiert.

Schallemissionsanalyse

Über die Erfassung von Schallereignissen mit Körperschallsensoren lassen sich Ereignisse wie z. B. Spannstahlbrüche infolge SpRK ermitteln. In einer Monitoringanwendung wurden Körperschallsensoren an einer Stahlbrücke zur Detektion eines möglichen Risswachstums an Schweißnähten installiert. Zur Plausibilisierung temperaturbedingter Schallereignisse wurden zusätzlich Temperaturmessungen durchgeführt. In drei weiteren Monitoringanwendungen wurden Körperschallsensoren zu Detektion von Spannstahl- bzw. Spanndrahtbrüchen an SpRK-gefährdeten Spannbetonbauwerken installiert. Bild 126 zeigt die Verteilung der verwendeten Sensorik.

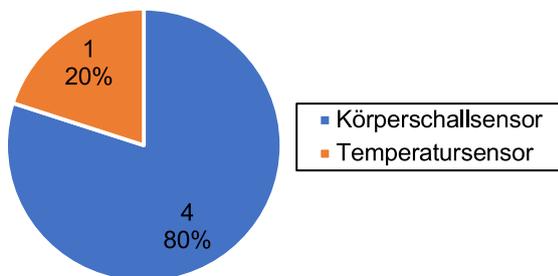


Bild 126: Verwendete Messtechnik (Schallemissionsanalyse)

4.4 Ausschreibung und Vergabe

Im Folgenden werden die Erfahrungswerte zu Ausschreibung und Vergabe der Monitoringssysteme aus den Fragebögen analysiert und dargestellt.

4.4.1 Leistungsbeschreibung

Die Leistungsdefinierung in der Ausschreibung kann als detaillierte oder funktionale Leistungsbeschreibung erfolgen (DBV, 2018). In dem Rücklauf der Fragebögen wurde bei 61 % der Ausschreibungen die Leistung mit einer funktionalen, bei 33 % mit einer detaillierten Leistungsbeschreibung definiert (Bild 127).

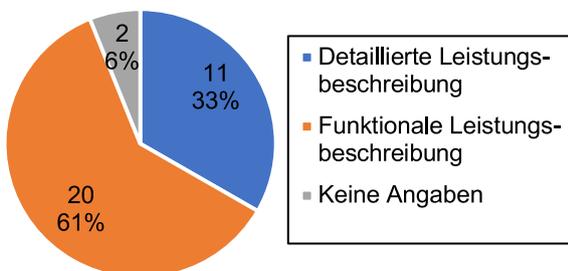


Bild 127: Leistungsbeschreibung der Ausschreibung

In den Fragebögen wurden die Angaben in der Leistungsbeschreibung mit den Kenngrößen aus der Tabelle 2 (siehe S.15) abgefragt. Zu den Angaben in der Leistungsbeschreibung liegen Informationen aus 17 Fragebögen vor. Die Kenngrößen wurden überwiegend in einer

detaillierten Leistungsbeschreibung definiert. In 5 Fragebögen wurden in einer funktionalen Leistungsbeschreibung messtechnische Kennwerte wie z. B. die Messtechnik und der Messbereich vorgegeben.

Die erschöpfende Beschreibung der technischen Daten in einer detaillierten Leistungsbeschreibung ist sinnvoll und möglich, wenn bereits ein definiertes Messziel und definierte Messanforderungen vorliegen z. B. im Zuge der messbasierten Nachweisführung in der Nachrechnung nach Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie. Zur Festlegung der technischen Daten bietet sich das Hinzuziehen eines Fachplaners Monitoring oder Spezialdienstleisters für Messtechnik an. Die technischen Anforderungen umfassen im weitesten Sinne die physikalische Größe, den erforderlichen Messbereich sowie die Messauflösung und erwartete Messungenauigkeit der gesamten Messkette. Je nach Messaufgabe sollten weitere Beschreibungen zur Temperaturkompensation und der Abtastrate gemacht werden. Für besondere Umweltbedingungen sind ggf. Anforderungen an die Betriebstemperatur, Betriebsfeuchtigkeit und sonstige Schutzanforderungen zu stellen. Soll das Messsystem in ein bestehendes System integriert werden, kann die Spezifizierung der Anschlussart und Betriebsspannung notwendig werden. In Bild 128 werden die Angaben zu den technischen Anforderungen in der Leistungsbeschreibung der vorliegenden Anwendungsfälle dargestellt. Es wurden überwiegend die Messgröße, der Messbereich und die Abtastrate definiert.

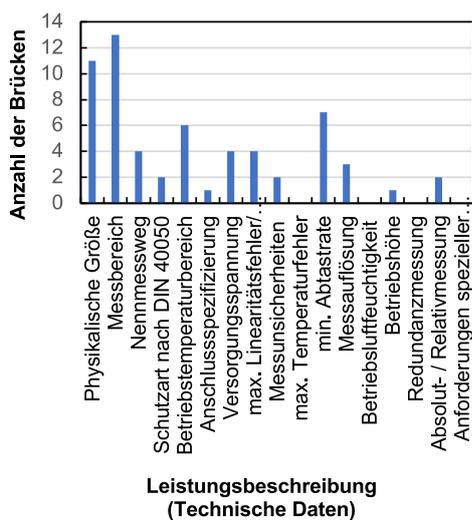


Bild 128: Beschreibung der technischen Daten in der Leistungsbeschreibung

Bild 129 zeigt die Kennwerte der Ausführungsbeschreibung. Hierbei können in Abhängigkeit des Anwendungsfalls Angaben über den elektrischen Anschluss, die maximale Anschlusslänge der Zuleitung (z. B. für die Planung von Messverstärkern) sowie Ort und Anzahl der Messstellen notwendig werden. In Abhängigkeit der vorhandenen Infrastruktur ist der Netzwerkanschluss zur Datenübertragung und ggf. für die Fernwartung anzugeben. Es sind Angaben zu den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit auch hinsichtlich der Kabelverlegung zu machen. Für beengte Bauwerksverhältnisse sind ggf. die maximale Größe und das Gewicht der Gesamtanlage bzw. Einzelkomponenten zu definieren. Zum Zeitpunkt der Ausschreibung wurde in 13 Fällen bereits die Anzahl der Messstellen und in 11 Fällen der Ort der Messstellen festgelegt. Neben dem Messort wurden in mehreren Fällen der elektrische Anschluss (z. B. vorhandener Stromanschluss oder batteriebetriebenes System), der Netzwerkanschluss (z. B. Kabel-, Mobilfunkanschluss) und Anforderungen an die Dauerhaftigkeit definiert.

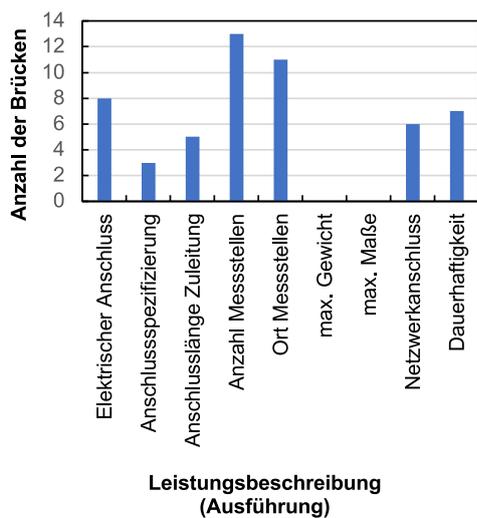


Bild 129: Anforderungen an die Ausführung des Messsystems in der Leistungsbeschreibung

In der Leistungsbeschreibung sind in Abhängigkeit des Messziels und der weiteren Verwendung der Messdaten in der Nutzungsdauer des Bauwerks Anforderungen an das Datenmanagement zu stellen. Diese umfassen zum einen die Datenerfassung, die Datenübertragung an eine externe Stelle (z. B. zum Fachplaner Monitoring oder zur Straßenbauverwaltung) und die Datenspeicherung (z. B. vor Ort, Server, Cloud). Zum anderen wird der Datenumgang hinsichtlich der Aufbereitung (z. B. Datenaggregation zu Minimal- und Maximalwerten), Auswertung (z. B. Trendwertanalyse, graphische Auswertung) und Einbindung in einer Alarmierungsplan (z. B. Festlegung von Schwellwerten) definiert. In Bild 130 werden die Erfahrungen aus den Fragebögen in der Leistungsbeschreibung zum Datenmanagement dargestellt. In mehr als sechs Anwendungsfällen wurde die Datenspeicherung und der Speicherzeitraum, die Datenübertragung, die Alarmierung und die Datenaufbereitung (z. B. in Form von Messberichten) festgelegt. In den Anwendungsfällen wurden außerdem Angaben zur Datenschnittstelle zur Datenübergabe an eine externe Stelle definiert.

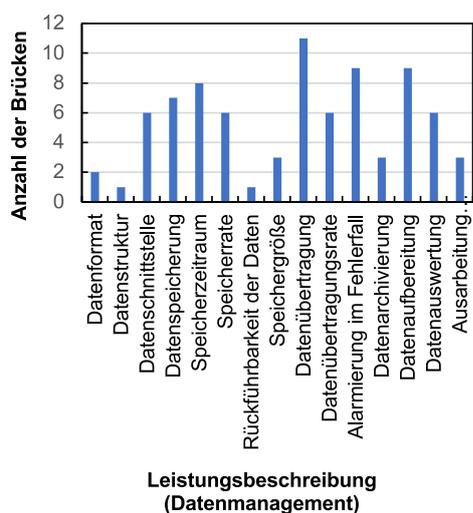


Bild 130: Anforderungen an das Datenmanagement in der Leistungsbeschreibung

In der Ausschreibung können zur Einholung vergleichbarer Angebote bereits Angaben zur Installationsstelle der Sensoren und zum Standort ggf. erforderlicher Messzentralen zur Aufwandsabschätzung gemacht werden. Hierzu sind ebenfalls Angaben zur Zugänglichkeit für die Planung und Kalkulation der Zugangstechnik zu geben. Es ist auf Bereiche hinzuweisen, in denen Störeinflüsse auf die Messtechnik auftreten können, z. B. elektromag-

netische Störeinflüsse im Bereich von elektrifizierten Bahntrassen oder verkehrsbedingte Vibration, sodass eine geeignete Messtechnik mit entsprechenden Installationsmethoden geplant und angeboten werden kann. Bild 131 stellt die Erfahrungswerte aus den Fragebögen zu den Installationsangaben in der Leistungsbeschreibung dar. In über 8 Monitoringanwendungen wurden in der Ausschreibung Angaben zu der Installationsstelle der Sensortechnik (z. B. Messstellen an den Koppelfugen), zur Installationsstelle des Messzubehörs (z. B. Standort der Messanlage innerhalb des Hohlkastens) und der Zugänglichkeit (z. B. Angaben zu Bahntrassen, Straßen- oder Flussüberführung) gemacht. Zudem wurden Anforderungen an den Schutz vor Diebstahl, Vandalismus, Stör- und Witterungseinflüssen gestellt. In einigen Fällen wurden Hinweise zu Montagehilfen und Zugangstechnik gegeben.

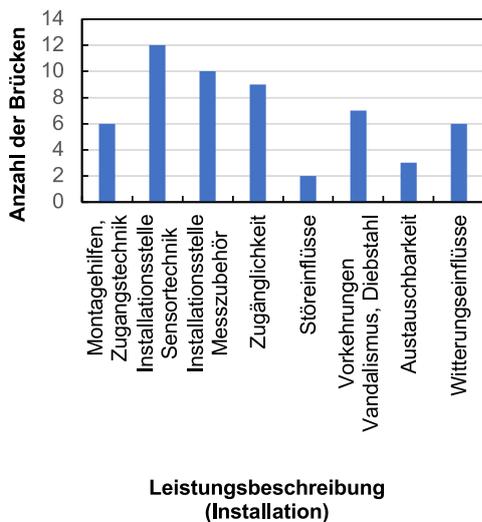


Bild 131: Beschreibung und Anforderungen an die Installation in der Leistungsbeschreibung

Zur Inbetriebnahme der Messanlage werden in Abhängigkeit der Messtechnik und des Messziels in unterschiedlichem Umfang Testmessungen und Funktionskontrollen notwendig. Zur Bewertbarkeit der Daten ist eine Dokumentation der Nullmessung und in einigen Fällen eine Kalibrierung der Messtechnik am Bauwerk erforderlich. Dies kann beispielsweise bei der Überwachung von Änderungen der Bauwerkssteifigkeiten z. B. durch Schwingungsmessungen der Fall sein. Anhand von Kalibrierfahrten wird die Bauwerksreaktion infolge unterschiedlicher Achslasten erfasst und ermöglicht die Bewertung der Messergebnisse und Festlegung von Grenzwerten für eine ggf. erforderliche Alarmierung. Für die Kalibrierung und Kalibrierfahrten werden u. U. temporäre Streckensperrungen notwendig,

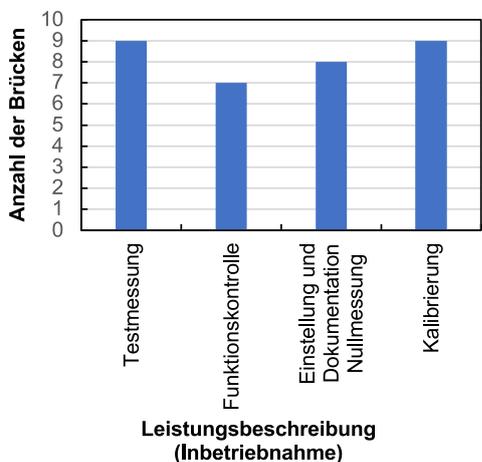


Bild 132: Beschreibung und Anforderungen an die Inbetriebnahme in der Leistungsbeschreibung

deren Zuständigkeit für die Organisation vor dem Hintergrund vergleichbarer Angebote bereits in der Leistungsbeschreibung festzulegen ist.

In Bild 132 werden die Erfahrungswerte der Fragebögen zu den Angaben zur Inbetriebnahme in der Leistungsbeschreibung dargestellt.

Zur Planung der Messanlage hinsichtlich der Wahl der Messtechnik und Schutzanforderungen ist der Betriebszeitraum des Systems vorab festzulegen. Während des Monitoringbetriebs können Wartungsarbeiten oder Austauschmaßnahmen anfallen, für den die Zuständigkeiten festzulegen sind. Leistet das Monitoringsystem einen Beitrag zur sicheren verkehrlichen Nutzung des Bauwerks, die nur einen kurzen Ausfall des Messsystems erlaubt, sind ggf. Ersatzsysteme für den Austausch vorzuhalten. Die maximale Unterbrechungsdauer, Ausfallrate und Mindestverfügbarkeit der Messung ist seitens der Straßenbauverwaltung ggf. mit Unterstützung eines Fachplaners Monitoring (z. B. Ingenieurbüro, Prüfeningenieur) festzulegen. Einige Messsysteme erfordern bei einem Betrieb über mehrere Jahre die Prüfung der Langzeitstabilität zur Qualitätssicherung der Messergebnisse (z. B. Prüfung der Ankopplungsqualität von Körperschallsensoren). Ggf. ist die Zuständigkeit für den Rückbau der Messanlage bereits in der Leistungsbeschreibung zu bestimmen. Bild 133 stellt die Angaben aus den Fragebögen zur Beschreibung der Anforderungen an Betrieb und Wartung in der Ausschreibung dar. In 15 Anwendungsfällen wurde der Betriebszeitraum definiert. In sechs Monitoringmaßnahmen wurden Angaben zum Wartungszyklus, Instandsetzung und der Bereithaltung von der Ersatztechnik gemacht. Die Festlegung der maximalen Unterbrechungsdauer und Ausfallrate sowie die Langzeitstabilität, Garantie der Messtechnik und Zuständigkeiten für den Rückbau wurde in den hier vorliegenden Erfahrungswerten nur für wenige Monitoringanwendungen definiert.

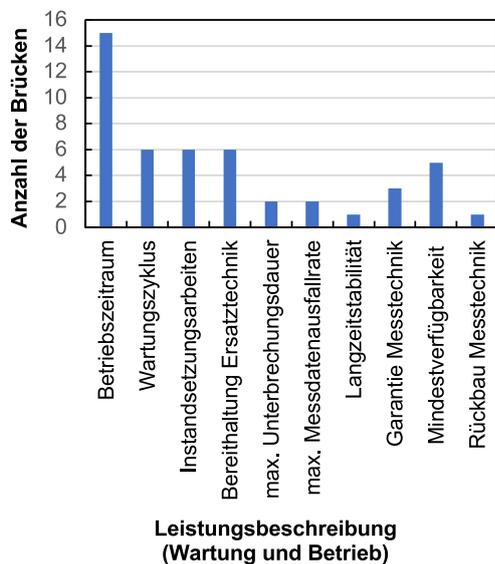


Bild 133: Beschreibung und Anforderungen an Wartung und Betrieb in der Leistungsbeschreibung

Bild 134 zeigt die Bewertung seitens der Straßenbauverwaltung, ob mit der Aufgabestellung in der Leistungsbeschreibung vergleichbare Angebote eingeholt werden konnten. Für die detaillierte Leistungsbeschreibung konnte dies überwiegend bejaht werden. Im Fall der funktionalen Leistungsbeschreibung konnte größtenteils keine Angabe zur Vergleichbarkeit der Angebote gemacht werden.

In 55 % der Anwendungsfälle wurden der Fachplaner Monitoring zusammen mit der Monitoringleistung (Installation, Betrieb, Auswertung) beauftragt (Bild 135). In 15 % der Fälle

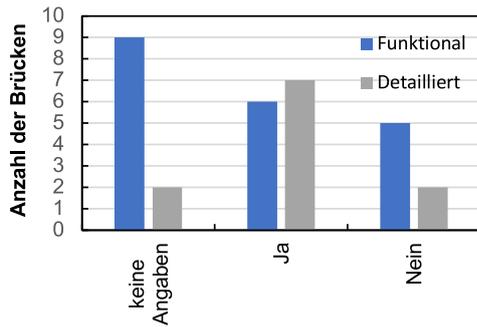


Bild 134: Bewertung der Vergleichbarkeit der Angebote auf Grundlage einer funktionalen oder detaillierten Leistungsbeschreibung

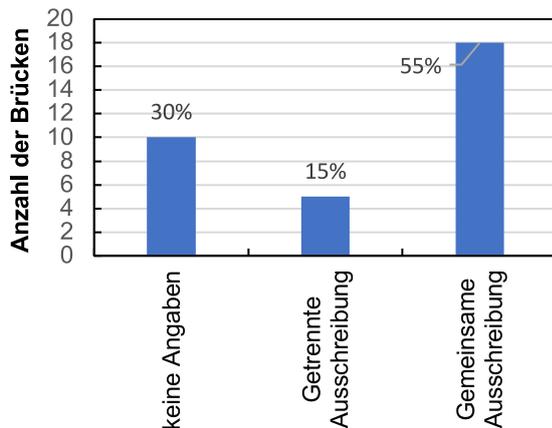


Bild 135: Ausschreibung des Fachplaners Monitoring und der Monitoringleistung

erfolgte eine getrennte Ausschreibung z. B. wenn für das Monitoring ein Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen gesondert beauftragt wurde.

4.5 Monitoringprozess

4.5.1 Lebenszyklus Bauwerksmonitoring

Monitoring kann prinzipiell in allen Lebenszyklen einer Brücke eingesetzt werden. In den ausgewählten Beispielen wurden Monitoringsysteme zu 6 % während der Bauphase und 35 % in der regulären Betriebsphase eingesetzt. Aktuell besteht der Trend Monitoringsysteme überwiegend zur Unterstützung der Erhaltungsplanung am Ende der rechnerischen Restnutzungsdauer (53 %) einzusetzen. In einigen Fällen wurde das Monitoring über mehrere Phasen des Lebenszyklus betrieben. In einem Beispiel wurden Korrosionssensoren bereits im Bauzustand eingebaut und überwachen seit Inbetriebnahme eine mögliche Korrosionsinitiation an ausgewählten Bauteilen. Es liegen in diesem Bericht keine Erfahrungen zum Einsatz von Monitoring während des Rückbaus vor.

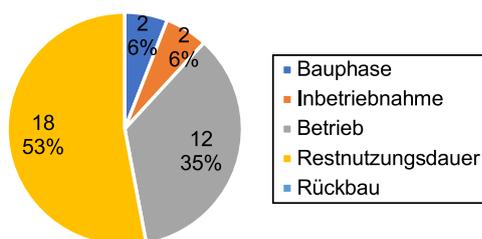


Bild 136: Lebenszyklus des Bauwerks, in dem ein Bauwerksmonitoring erforderlich wurde

4.5.2 Notwendigkeit Monitoring

Als Notwendigkeit für ein Monitoringsystem können mehrere Anlässe vorliegen (Bild 137). In 21 % der Monitoringmaßnahmen aus dem Rücklauf der Fragebögen wurde die messtechnisch basierte Nachweisführung in der Nachrechnung nach NRR angegeben. Bauwerksmessungen können hierbei z. B. zur Überprüfung und Anpassung der Steifigkeitsannahmen im FE-Modell herangezogen werden. Je nach Messziel sind die Messungen hierfür über einen längeren Zeitraum oder im Zuge eines Belastungsversuchs (4 %) durchzuführen. In 18 % Prozent der Fälle wurde ein Monitoring zur Überwachung zur Kompensation von baulichen und rechnerischen Defiziten eingesetzt. In 17 % der Maßnahmen wurden Bauwerksmessungen zur Bewertung und Überwachung bekannter Schäden herangezogen. Häufig wurden als Schadensfall auffällige Rissentwicklungen oder Rissneubildungen überwacht. In 12 % der Monitoringmaßnahmen wurde die Unterstützung der Erhaltungsplanung als Anlass angegeben. Monitoringsysteme können hierbei einen Beitrag in einem Gesamtkonzept an Kompensations- und Erhaltungsmaßnahmen leisten, das Bauwerk unter verkehrlicher Nutzung bis zum Ersatzneubau zu halten oder als Ankündigungssystem für eine Instandsetzungsmaßnahmen zu dienen. Zustandsverschlechterungen oder eine Zunahme der Beanspruchung können sich durch die Änderung der Bauwerksreaktion ankündigen. Über die Erfassung der Bauwerksreaktion (12 %) können außerdem Zustandsannahmen überprüft werden oder die Wirksamkeit von Instandsetzungsmaßnahmen (3 %) kontrolliert werden. In Einzelfällen kann Monitoring als Unterstützung der Bauwerksprüfung (1 %) und Sonderprüfung (1 %) dienen. Dies bietet sich insbesondere für Bauwerksbereiche mit erschwerter Zugänglichkeit an.

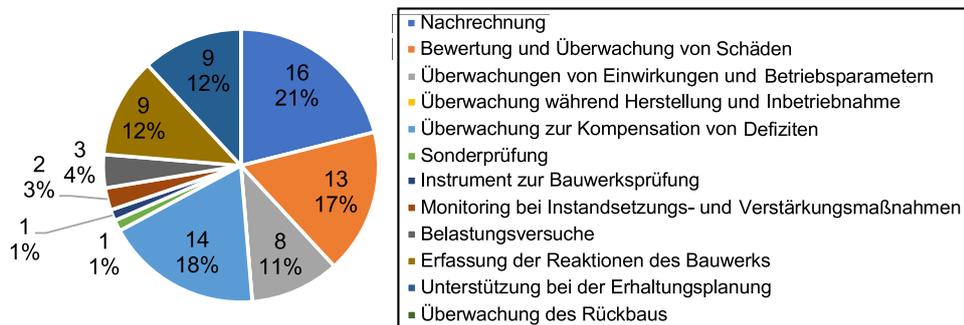


Bild 137: Notwendigkeit bzw. Anlass des Monitorings

4.5.3 Monitoringdauer

Je nach Messziel werden Monitoringsysteme von wenigen Stunden z. B. im Zuge eines Belastungstests bis zu mehreren Jahren betrieben. In 67 % der noch laufenden Monitoringanwendungen wird das Monitoring als Dauermonitoring bis zum Ersatzneubau betrieben. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn das Monitoring zur Überwachung und frühzeitigen Detektion möglicher Zustandsveränderungen dient und einen Beitrag in der Erhaltungsplanung zur Aufrechterhaltung der verkehrlichen Nutzung leistet. In 12 % der Anwendungen wurde das Monitoring zwischen 6 Monaten und einem Jahr betrieben. In einigen Anwendungsbeispielen wurden Messungen über einen Jahreszyklus angestellt zur Erfassung des tatsächlich auftretenden Schwingspiels infolge Verkehrs- und Temperatureinwirkung im Zuge eines messbasierten Ermüdungsnachweises nach Stufe 3 der Nachrechnungslinie. Kürzere Messungen von wenigen Wochen bis zu 3 Monaten (9 %) erfolgten überwiegend vor dem Hintergrund einer messbasierten Nachweisführung in der Nachrechnung z. B. zur Ermittlung eines modifizierten Ermüdungslastmodells. Für Kurzzeitmo-

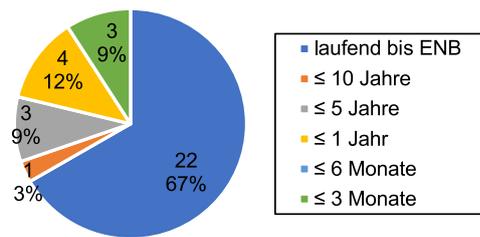


Bild 138: Dauer des Monitorings

Monitorings von wenigen Stunden z. B. im Zuge von Belastungstests liegen in diesem Bericht keine Erfahrungswerte vor.

4.5.4 Komplexität Bauwerksmonitoring

Die Komplexität der Aufgabenstellung des Bauwerksmonitorings wurde in den Umfragen überwiegend von der Straßenbauverwaltungen eingeschätzt. Die Komplexität wurde hierbei in eine einfache Aufgabenstellung und eine komplexe Aufgabenstellung nach DBV (2018) unterteilt. In 52 % der Monitoringanwendungen wurde die Aufgabenstellung als einfach, in 48 % als komplex bewertet (Bild 139).

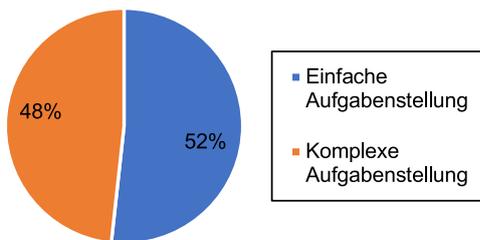


Bild 139: Einschätzung der Komplexität der Aufgabenstellung

Bild 140 zeigt die gewählte Art der Leistungsbeschreibung in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung. Auf Grund der geringen Datenlage lässt sich keine Aussage treffen, ob eine einfache oder komplexe Aufgabenstellung eher in einer funktionalen oder detaillierten Leistungsbeschreibung ausgeschrieben wird. In den vorliegenden Erfahrungswerten wurden komplexe Aufgabestellungen jedoch häufiger in einer funktionalen Leistungsbeschreibung über die Beschreibung eines globalen Erkenntnisgewinns ausgeschrieben.

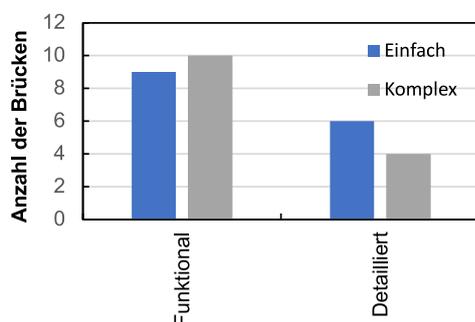


Bild 140: Art der Leistungsbeschreibung in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung

4.5.5 Zuständigkeit der Akteure im Monitoringprozess

Im Folgenden werden die Zuständigkeiten der Akteure in den einzelnen Monitoringphasen nach DBV (2018) dargestellt. Die Definition der Akteure wurde entsprechend der Beschreibung in DBV (2018) gewählt. Es liegen Informationen aus 30 Fragebögen vor. Es konnten nicht alle Fragestellungen zu den Zuständigkeiten im Monitoringprozess in den Fragebögen

vollständig beantwortet werden. In der Beispielsammlung werden lediglich die Hauptverantwortlichen der Monitoringphasen genannt.

Machbarkeitsstudie und Definition der Fragestellung

Bild 141 zeigt die Verteilung der teilnehmenden Akteure bei der Fragendefinition und Machbarkeitsüberprüfung (Phase 1 nach DBV (2018)). In der Verteilung zeigt sich kein eindeutiger Trend. In 6 Anwendungsbeispielen wurde die Phase 1 von der Straßenbauverwaltung alleine und in 15 Fällen mit Unterstützung eines Fachplaners oder Spezialdienstleisters Monitoring erarbeitet. In 5 Anwendungen wurden die Erarbeitung der Fragestellung und Überprüfung der Machbarkeit vom Fachplaner Monitoring umgesetzt. Beispielsweise, wenn die Anforderungen an das Monitoring und der gewünschte Erkenntnisgewinn anhand der Ergebnisse der Nachrechnung definiert und die Ergebnisse für den messbasierten Nachweis nach Stufe 3 der NRR verwendet werden. Es zeigt sich jedoch, dass bei der Mehrheit der Monitoringanwendungen die Leistung der Phase 1 vom Bauherrn zum Teil mit fachlicher Unterstützung eines Fachplaners oder Spezialdienstleisters bei komplexer Aufgabenstellung erbracht wurde.

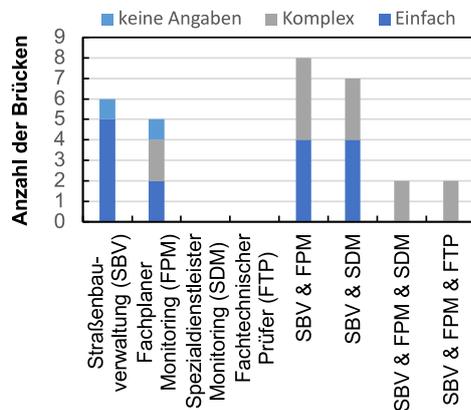


Bild 141: Beteiligte Akteure bei der Definition der Fragestellung und Überprüfung der Machbarkeit in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)

Als Fachplaner Monitoring wurden in der Beispielsammlung folgende Sachverständige angegeben:

- Ingenieurbüro (Tragwerksplaner, Brückeningenieur, Prüfeningenieur)
- Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern ZfP, Instandsetzung, Bauwerksmonitoring
- Ingenieurbüro mit Fachgebiet Bauwerkserhaltung
- Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern Strukturdynamik, Bauwerksdiagnose, Bauwerksmonitoring
- Vermessungsbüro/ Ingenieurbüro für Vermessung und Überwachungsmessung
- Dienstleister für Bauwerksdiagnostik und Bauforschung
- Dienstleister für zerstörungsfreie Prüfung
- Wissenschaftliche Einrichtung
- (Wissenschaftliche) Einrichtung für Baustoff- und Bauteiluntersuchungen
- Als Spezialdienstleister für Bauwerksmessung waren in den Monitoringanwendungen der Beispielsammlung folgende beteiligt:
- Messdienstleister (mit Spezialisierung auf ausgewählte Sensorik)

- Sensorhersteller
- Ingenieurbüro mit Tätigkeitsfeldern ZfP, Instandsetzung, Bauwerksmonitoring
- Ingenieurbüro für Messtechnik
- Dienstleister für Sondermesstechnik für Windkraftanlagen und Ingenieurbauwerke
- Dienstleister für ZfP

Erstellung des Monitoringkonzepts

Bild 142 zeigt die Verteilung der beteiligten Akteure an der Erstellung des Monitoringkonzepts (Phase 2 nach DBV (2018)). Das Monitoringkonzept wurde von der Straßenbauverwaltung ohne weitere fachliche Unterstützung erstellt, wenn die Aufgabenstellung als einfach bewertet werden konnte. Für Monitoringanwendungen mit komplexer Aufgabenstellung wurde die fachliche Unterstützung eines Fachplaners Monitoring, Spezialdienstleisters oder in zwei Fällen die eines Fachtechnischen Prüfers herangezogen.

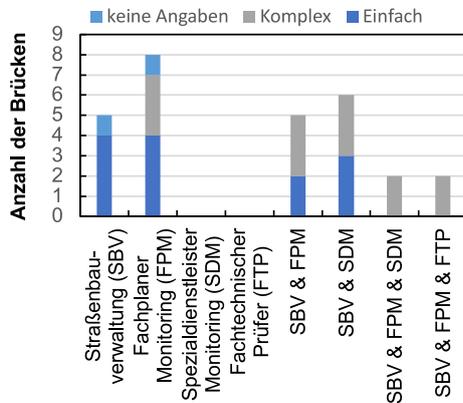


Bild 142: Beteiligte Akteure bei der Erstellung des Monitoringkonzepts in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)

Ausschreibung und Vergabe

Bild 143 zeigt die Verteilung der beteiligten Akteure im Ausschreibungs- und Vergabeprozess. Zur Definition einer hinreichend präzisen Aufgabenstellung wurden bei komplexen Aufgabestellung ein Fachplaner Monitoring, Spezialdienstleister oder Fachtechnischer Prü-

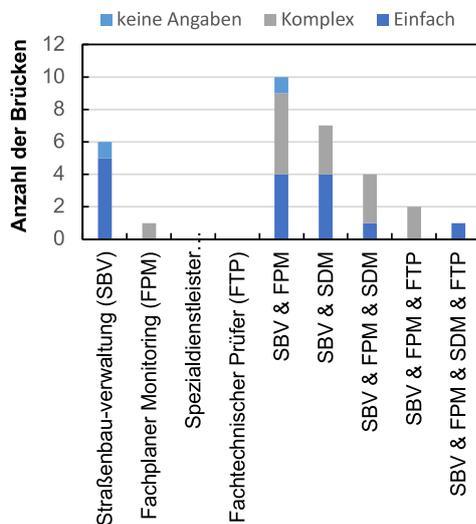


Bild 143: Beteiligte Akteure bei Ausschreibung und Vergabe in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)

fer von der Straßenbauverwaltung herangezogen. In einer Mehrheit der Anwendungsfälle wurde die Leistungsbeschreibung von der Straßenbauverwaltung zusammen mit einem Fachplaner Monitoring aufgestellt.

Ausführungsplanung des Messsystems

Bild 144 und Bild 145 zeigen die Verteilung der beteiligten Akteure an der Erstellung der Ausführungsplanung des Messsystems (Phase 3 nach DBV (2018)). Bei einfachen Aufgabenstellungen wurde die Auswahl und Kriterien der Messverfahren überwiegend eigenständig von der Straßenbauverwaltung erstellt (Bild 144). Für komplexere Aufgabenstellungen wurde die Wahl der Messverfahren mit Unterstützung eines Fachplaners und Spezialdienstleisters Monitoring durchgeführt. Es ist zu beachten, dass je nach fachlicher Qualifikation des eingebundenen Sachverständigen akteurübergreifende Aufgaben übernommen werden können (DBV, 2018). In der Statistik ist deshalb eine Vermischung des Fachplaners mit dem Spezialdienstleister, ggf. auch mit dem Fachtechnischen Prüfer zu beachten.

Die Ausführungsplanung des Messsystems, wie z. B. Planung der Messstellen oder Planung der Messsystemarchitektur wurde in 18 Anwendungsfällen von einem Fachplaner Monitoring bzw. einem Spezialdienstleisters für Bauwerksmessung durchgeführt (Bild 145). In vier

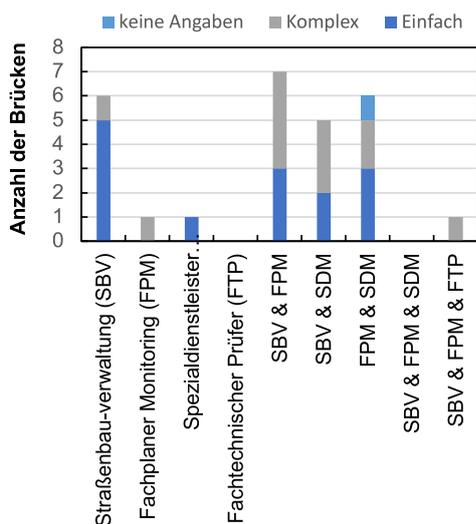


Bild 144: Beteiligte Akteure bei der Auswahl des Messverfahrens und Festlegung der Kriterien des Messverfahrens in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)

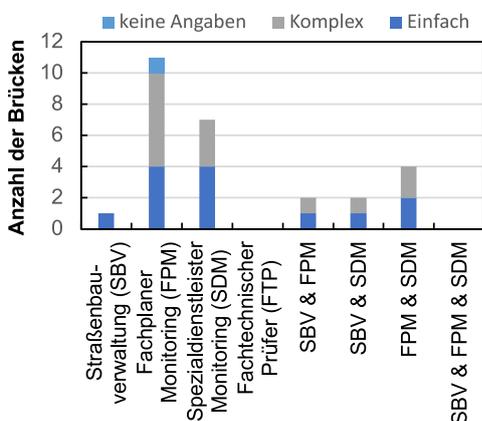


Bild 145: Beteiligte Akteure bei der Erstellung der Ausführungsplanung in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)

Anwendungsfällen wurde die Ausführungsplanung in Zusammenarbeit von einem Fachplaner und Spezialdienstleister erstellt. In 5 Monitoringanwendungen war der Bauherr bei der Erstellung der Ausführungsplanung involviert.

Die Anforderungen an die Messstellen wie Ort und Anzahl wurden in der Planung des Monitoringkonzepts z. B. nach den folgenden Kriterien festgelegt:

- Maßgebende Bauwerksabschnitte aus der statischen Berechnung (z. B. Bauwerksstellen mit maximaler Verformung)
- Kritische Bauwerksabschnitte aus der Nachrechnung (z. B. Bauwerksstellen mit rechnerischer Spannungsüberschreitung)
- Bekannte Schadensstellen (z. B. kritische Risse)
- Bauwerksstellen mit Dauerhaftigkeitsrisiken (z. B. Segmentfugen)
- Bauwerksabschnitte mit erschwerter Zugänglichkeit (z. B. Überführung von Bahntrassen)
- Maßgebende Koppelfugen bei SpRK

Installation, Betrieb und Wartung

Für die Wartung der Messanlage ist bei einer Mehrzahl der Monitoringsysteme der Spezialdienstleister für Bauwerksmessungen verantwortlich (Bild 147). In 31 % der Monitoringanwendungen kam es während des Betriebs zu messtechnischen Herausforderungen (Bild 148).

Beispielsweise können je nach Sensitivität der Sensorik insbesondere bei schlanken Bauteilen durch verkehrsbedingte Vibration Messrauschen oder Messfehler in den Messergeb-

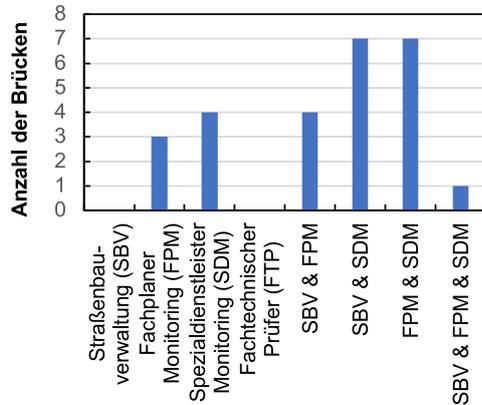


Bild 146: Beteiligte Akteure beim Betrieb der Messanlage

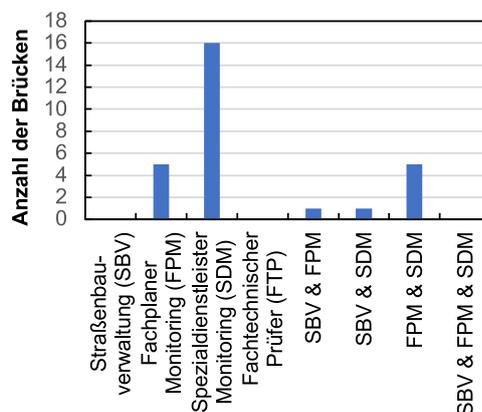


Bild 147: Beteiligte Akteure bei der Wartung der Messanlage

nissen entstehen, die während der Ausführungsplanung ggf. nicht abzusehen und nachträglich zu korrigieren sind.

Da die Monitoringsysteme objektspezifisch ausgelegt sind, ist zu beachten, dass in Abhängigkeit der Aufgabenstellung und der Messtechnik eine Kalibrier- und Lernphase zur Anpassung messtechnischer Einstellungen, Schwellwerte oder Auswertelgorithmen notwendig werden kann. In 25 % der Monitoringanwendungen wurden Austauschmaßnahmen der Sensorik erforderlich (Bild 149).

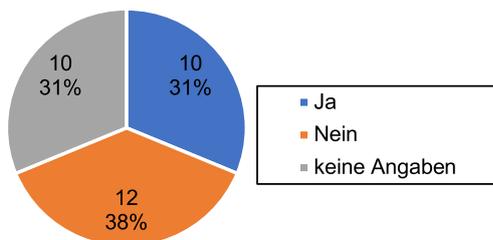


Bild 148: Messtechnische Herausforderungen während des Monitoringbetriebs

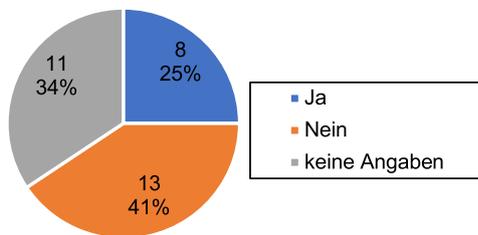


Bild 149: Erforderliche Austauschmaßnahmen während des Monitoringbetriebs

Auswertung und Bewertung der Messergebnisse

Bild 150 zeigt die Verteilung der Zuständigkeiten der Akteure bei der Auswertung der Messergebnisse (Phase 5 nach DBV (2018)). Die Auswertung wurde in allen Anwendungen vom Fachplaner Monitoring oder Spezialdienstleister durchgeführt. Jedoch lässt sich ein Trend erkennen, dass für die Messauswertung überwiegend der Fachplaner Monitoring zuständig ist.

Bild 151 veranschaulicht die Verteilung der Zuständigkeiten der Akteure bei der Bewertung der Messergebnisse (Phase 6 nach DBV (2018)). Die Bewertung wurde in 18 Anwendungsfällen vom Fachplaner Monitoring durchgeführt. In 11 Fällen erfolgte die Bewertung durch die Straßenbauverwaltung allein, in 2 Fällen in Zusammenarbeit mit dem Fachplaner Monitoring.

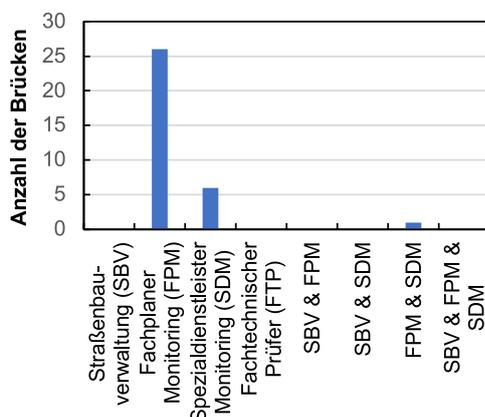


Bild 150: Beteiligte Akteure bei der Auswertung der Messergebnisse

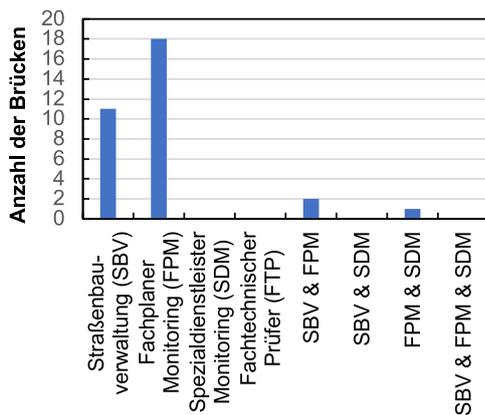


Bild 151: Beteiligte Akteure bei der Bewertung der Messergebnisse

4.5.6 Verfügbarkeit der Daten

In 37 % der Monitoringanwendungen wurden die Daten dem Auftraggeber in digitaler Form übergeben (Bild 152). Oftmals werden die Messergebnisse in Berichtsform an den Auftraggeber versendet. Die Berichte enthalten z. B. eine grafische Darstellung der Messergebnisse und eine Bewertung der Daten.

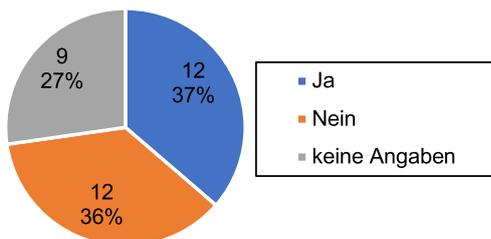


Bild 152: Datenübergabe und Datenarchivierung beim Bauherrn

Die Daten wurden zu 58 % als prozessierte Daten an den Auftraggeber weitergegeben (Bild 153). In 42 % der Fälle wurden die Rohdaten und prozessierten Daten übergeben. Bei keinem der Anwendungsfälle wurden nur die Rohdaten unausgewertet an die Straßenbauverwaltung weitergegeben.

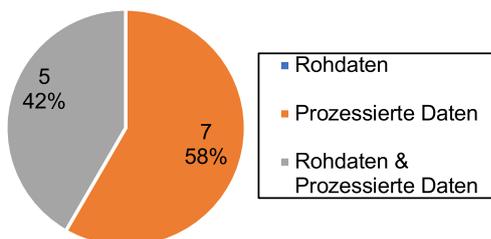


Bild 153: Datenverarbeitung der übergebenen Daten

In 46 % der Maßnahmen wurde keine Datenübergabe in der Leistungsbeschreibung festgelegt (Bild 154). Lediglich bei 27 % wurde die Datenübergabe in der Ausschreibung definiert. Zu den restlichen Maßnahmen konnten keine Angaben zur Datenübergabe in der Leistungsbeschreibung gemacht werden.

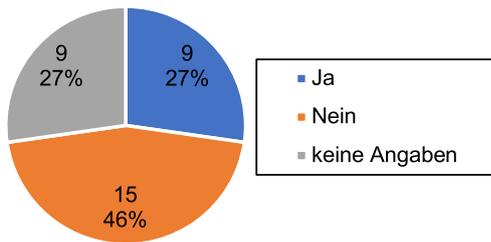


Bild 154: Festlegung der Datenübergabe in der Leistungsbeschreibung

Wenn eine Datenübergabe an den AG stattfand, so waren diese zu 75 % noch beim Auftraggeber verfügbar (Bild 155).

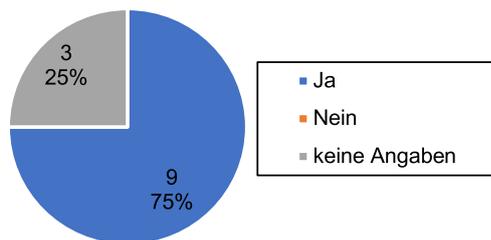


Bild 155: Verfügbarkeit der Daten beim Baulastträger

Literatur

AB RAHMAN, W. S.; WAN MOHD JAAFAR, K. N.; ABDUL M. et al. (2019) Applications of Drones in Emerging Economies: A case study of Malaysia. In 2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), pp. 35–40.

AL-QADI, I.; WANG H.; OUYANG, Y.; GRIMMELSMAN, K. and PURDY J.E. (2016) LTBP Program's Literature Review on Weigh-in-Motion Systems.

ANAY R.; LANE A.; JÁUREGUI D. V. et al. (2020) On-Site Acoustic-Emission Monitoring for a Prestressed Concrete BT-54 AASHTO Girder Bridge. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 34(3): 4020034, 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001440.

ANDRADE, C. (2020) Electrochemical methods for on-site corrosion detection. *Structural Concrete* 21(4): 1385–1395, 10.1002/suco.201900426.

ANDRADE, C. and ALONSO, C. (2004) Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures* 37(9): 623–643, 10.1007/BF02483292.

ANGST, U. and BÜCHLER, M. (2019) Elektrochemische Erfassung der Korrosionsgeschwindigkeit bei lokaler Korrosion in Stahlbeton. Détermination électrochimique de la vitesse de corrosion en cas de corrosion localisé dans le béton armé / Electrochemical determination of the corrosion rate for localized corrosion in reinforced concrete.

AZARI, H.; O'SHEA, D. and CAMPBELL, J. (2021) Application of Unmanned Aerial Systems for Bridge Inspection. *Transportation Research Record* 2676(1): 401–407, 10.1177/036119812111031896.

BARRIAS, A.; CASAS, J. R. and VILLALBA, S. (2016) A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors* 16(5), 10.3390/s16050748.

BARTHOLMAI, M. (2017) RFID-Sensoren für sichere Brücken und Bauwerke. *Stahlbau* 86(5): 451, 10.1002/stab.201770506.

BASSt Straßenbrücken - Nachrechnung und Ertüchtigung: Fachthemen. See <https://www.BASSt.de/DE/ingenieurbau/Fachthemen/b1-nachrechnung.html> (accessed 20/11/2022).

BAYANE, I. and BRÜHWILER, E. (2020) Structural condition assessment of reinforced-concrete bridges based on acoustic emission and strain measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 10(5): 1037–1055, 10.1007/s13349-020-00433-0.

BERGMEISTER, K. (ed.) (2022a) *Beton-Kalender 2022: Schwerpunkte: Instandsetzung, Beton und Digitalisierung*. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, Newark.

BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F. and WÖRNER, J-D. (eds) (2010) *2010 Beton-Kalender: Brücken - Betonbau im Wasser*, 99th edn. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

BERGMEISTER, K.; MARK, P.; ÖSTERREICHER, M. et al. (2015) Innovative Monitoringstrategien für Bestandsbauwerke. In *Beton-Kalender 2015 Schwerpunkte: Bauen im Bestand Brücken* (SOHN, E.; FINGERLOOS, F. and WÖRNER, J-D. (eds)). Wiley, Hoboken, pp. 315–458.

BERGMEISTER, K. and SANTA, U. (2004) *Beton-Kalender 2004: Brücken, Parkhäuser: Brückeninspektion und -überwachung*. 34330166.

- BERGMEISTER, K.; STRAUSS, A. and HOFFMANN, M. (2022b) Digitale Zustandserfassung von Gebäuden, Infrastrukturbauwerken und Naturgefahren. In Beton-Kalender 2022: Schwerpunkte: Instandsetzung, Beton und Digitalisierung (BERGMEISTER, K. (ed.)). Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, Newark, pp. 533–606.
- BERNHARD, F. (ed.) (2014) Handbuch der Technischen Temperaturmessung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- BERNSTONE, C. and HEYDEN, A. (2009) Image analysis for monitoring of crack growth in hydropower concrete structures. *Measurement* 42(6): 878–893, 10.1016/j.measurement.2009.01.007.
- BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E. and POLDER, RB. (2013) Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. John Wiley & Sons.
- BIGELOW, H.; PAK, D.; HERRMANN, R. et al. (2017) Dynamische Messungen an einer Eisenbahnbrücke als Stahlbetonverbundrahmen. *Stahlbau* 86(9): 778–788, 10.1002/stab.201710524.
- BMDV (2022) Brücken an Bundesfernstraßen: Bilanz und Ausblick. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Bonn. See https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/bruecken-an-bundesfernstrassen-bilanz-und-ausblick.pdf?__blob=publicationFile (accessed 10/06/2022).
- BMVBS (2011) Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- BMVBS (2013) Bauwerksprüfung nach DIN 1076: Bedeutung, Organisation, Kosten. See https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/dokumentation-bauwerkspruefung-nach-din-1076.pdf?__blob=publicationFile (accessed 20/11/2022).
- BMVI (2020) Stand der Modernisierung von Brücken der Bundesfernstraßen: Bericht an den Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages, Berlin. See https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bericht-modernisierung-bruecken-0212.pdf?__blob=publicationFile (accessed 20/11/2022).
- BOLLE, G.; MERTZSCH, O. and MARX, S. (2017) Messtechnische Dauerüberwachung zur Absicherung der Restnutzungsdauer eines spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brückenbauwerks. *Beton- und Stahlbetonbau* 112(2): 75–84, 10.1002/best.201600067.
- BOROS, V.; NOVÁK, B.; PELKE, E. and KOSTER, G. (2016) Messtechnische Überwachung extern vorgespannter Betonbrücken. *Bautechnik* 93(10): 725–729, 10.1002/bate.201600066.
- BRAMESHUBER, W.; CVETKOVIC, V.; SAENGER, D.; SPÖREL, F. and RAHIMI, A. (2009) Messung des tiefenabhängigen Feuchtegehaltes. *KURZBERICHTE AUS DER BAUFORSCHUNG* 50(6).
- BRAMESHUBER, W.; RAHIMI, A. and WEISE, F. (2016) Tiefenabhängige Feuchtemessung in Betonbauwerken: Vergleichende Untersuchungen mit der Multiring-Elektrode und dem Kernspinresonanz-Verfahren. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- BRIAUD, J-L.; HURLEBAUS, S.; CHANG, K-A. et al. (2011) Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology.
- BS2 Sicherheitssysteme GmbH CorroDec®2G: Feuchtigkeitssensor. See <https://www.bs2-sicherheitssysteme.de/de/produkte/corrodec2g-feuchte-potenzial-korrosions-sensoren/systemvarianten#feuchtigkeitssensor> (accessed 05/05/2022).

- BUDELMANN, H.; HOLST, A. and WICHMANN, H-J. (2009) Magnetoelastische Spannkraftmessung in Bauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau* 104(6): 330–339, 10.1002/best.200900675.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2009) Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen: Teile 1 - 4. Wirtschaftsverl. NW, Verl. für neue Wiss, Bremerhaven.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007) Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ).
- BURDET, O. (1998) Automatic Deflection and Temperature Monitoring of a Balanced Cantilever Concrete Bridge. In 5th International Conference of Short and Medium Span Bridges, Calgary, Canada.
- BUSCHMEYER, W.; RODER, C. and GUSIA, P.J. (2009) Erfahrungen bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonbrücken. *Bautechnik* 86(3): 133–141, 10.1002/bate.200910012.
- BENZ, C.; DEBUS, P.; HA, H. K. and RODEHORST, V. (2019) Crack Segmentation on UAS-based Imagery using Transfer Learning. In 2019 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), pp. 1–6.
- CASAS, J. R. and CRUZ, P. J. S. (2003) Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring. *Journal of Bridge Engineering* 8(6): 362–373, 10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(362).
- DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken (2000). Beuth, Berlin, Köln.
- DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken (2020), 2020th edn. Beuth, Berlin.
- DBV (2018) DBV-Merkblatt Brückenmonitoring:2018-08. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V, Berlin.
- DGZfP (2018) Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken, 2018th edn. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, Berlin.
- DGZfP (2022) Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- DGZfP-Fachausschuss (2018) Kompendium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT): Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung. Version 2018.
- DIN 1076:1999-11 (1999), 1999th edn. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 1319-1 (1995). Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN 1330-9 (2017). Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIRK, S. and HAUKE, S. (2017) Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen. In 9. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (CURBACH, M.; OPITZ, H.; SCHEERER, S. and HAMPEL, T. (eds)). Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dresden, vol. Heft 43.
- DORAFSHAN, S.; MAGUIRE, M.; HOFFER, NV.; COOPMANS, C. and THOMAS, R.J. (2017) Unmanned aerial vehicle augmented bridge inspection feasibility study.

Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (2019) Amtsblatt der Europäischen Union.

ELSENER, B. (1996) Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton: Forschungsauftrag 85/88 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenunterhaltsforschung = Méthodes d'évaluation de la corrosion dans le béton armé. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich.

FECKER, E. (2018) Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

FHWA-1 (2018) Weigh-In-Motion Pocket Guide: Part 1 WIM Technology, Data Acquisition, and Procurement Guide, FHWA-PL-18-015.

FHWA-3 (2018) Weigh-In-Motion Pocket Guide: Part 3 WIM Calibration and Maintenance Guide, FHWA-PL-18-015.

Fraunhofer IMS Duisburg (2016) Passiver Sensor zur Korrosionserkennung. See <https://www.ims.fraunhofer.de/content/dam/ims/de/documents/Downloads/20121220%20GF%203%20-%20Passiver%20Sensor%20zur%20Korrosionserkennung.pdf> (accessed 22/12/2022).

FREUNDT, U.; VOGT, R.; BÖNING, S.; PIERSON, C. and EHRLE, P. (2014) Roadtraffic Management System (RTMS): Roadtraffic Management System (RTMS). Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Heft B 100.

FRICKER, S. and VOGEL, T. (2010) Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch: Forschungsauftrag Nr. AGB 2005/014 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB) = Surveillance acoustique d'un pont de béton précontraint et évaluation de l'état pendant son démolition. Schweizerischer Verb. der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich.

FRIESE, M.; FEDAN, M.; HINDERSMANN, I. and REINHARDT, M. (2018) Der Blick ins Bauwerk: Monitoring und zerstörungsfreie Prüfverfahren. See http://www.bmdv-experten-netzwerk.bund.de/DE/Termine/2018/Daten-VIT/Poster-1-2.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (accessed 05/05/2022).

FRIESE, M. and REINHARDT, M. (eds) (2021) Prüfverfahren Zustandserfassung Bau: Modul „Zerstörungsfreie Prüfverfahren“. Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, Dresden.

FSV (2022) Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.

FURENSTAM, K. (2020) Monitoring and Modelling of the Abiskojärka Bridge. Degree Project.

FURTNER, P.; STÖGER, M. and SCHREYER, M. (2013) SHM DATA - Management, Treatment, Analysis and Interpretation - a Solution for Permanent Monitoring Systems, Wien.

GAMPER, A.; DIETSCH, P.; MERK, M. and WINTER, S. (2013) Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtgradienten in Holzbauteilen. Bautechnik 90(8): 508–519, 10.1002/bate.201300010.

GEIER, R.; ANGELMAIER, V.; GRAUBNER, C-A. and KOHOUTEK, J. (2017) Integrale Brücken: Entwurf, Berechnung, Ausführung, Monitoring. Ernst & Sohn, Berlin.

- GEIER, R. and BINDER, F. (2009) Die Überwachung der Wiener Erdberger Brücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 104(8): 530–536, 10.1002/best.200900009.
- GEIER, R.; MACK, T. and KREBES, E. (2014) Monitoring der Seitenhafenbrücke in Wien. *Beton- und Stahlbetonbau* 109(7): 486–495, 10.1002/best.201400023.
- GEIER, R.; MENGE, M.; MACK, T. and PETRASCHKEK, T. (2016) ÖBB Steyrtalbrücke - Belastungsprobe und Langzeitmessungen. *Beton- und Stahlbetonbau* 111(8): 505–515, 10.1002/best.201600025.
- GEIER, R.; ÖSTERREICHER, M. and PIRCHER, M. (2008) Langzeitmessungen an einer Eisenbahnbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 103(6): 378–387, 10.1002/best.200800620.
- GEIER, R. and PETZ, J. (2004) Kraftbestimmung in Schrägseilen durch dynamische Messung. *Beton- und Stahlbetonbau* 99(12): 985–991, 10.1002/best.200490285.
- GEIER, R.; SCHIMETTA, G.; ÖSTERREICHER, M. and UNTERBERGER, W. (2006) Dynamische Untersuchungen von Eisenbahnbrücken. *Beton- und Stahlbetonbau* 101(6): 413–420, 10.1002/best.200600480.
- GEIßLER, K.; REINTJES, K-H. and RODEMANN, J. (2009) Ganzfertigteile bei der Verbundfahrbahnplatte der Bahretalbrücke – Eine Revision nach Ausführung und baubegleitender messtechnischer Überwachung. *Stahlbau* 78(12): 897–906, 10.1002/stab.200910105.
- GEVATTER, H-J. and GRÜNHAUPT, U. (eds) (2006) *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- GILLINS, D.; PARRISH, C.; GILLINS, M. and SIMPSON, C. (2018) *Eyes in the sky: Bridge inspections with unmanned aerial vehicles*.
- GLÄSER, C.; BRAND, W.; KUHN, E. and MACK, T. (2014) Prüfung, Überwachung und Wartung von Litzenbündelseilen. *Beton- und Stahlbetonbau* 109(7): 463–472, 10.1002/best.201400012.
- GROßE, C. and SCHUMACHER, T. (2013) Anwendungen der Schallemissionsanalyse an Betonbauwerken. *Bautechnik* 90(11): 721–731, 10.1002/bate.201300074.
- GROSSE, CU.; OHTSU, M.; AGGELIS, DG. and SHIOTANI, T. (eds) (2022) *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Applications in Engineering*. Springer International Publishing, Cham.
- Günther GmbH Temperaturmesstechnik 1. Aufbau und Funktionsweise von Widerstandsthermometern. See <https://www.mts.ch/produkte-messtechnik-schaffhausen-gmbh/guenther-gmbh-temperaturmesstechnik-thermoelemente-widerstandsthermometer/technische-informationen/technische-informationen-zu-widerstandsthermometern/1-aufbau-und-funktionsweise-von-widerstandsthermometern.html/280> (accessed 03/08/2021).
- GUTERMANN, M. (2003) Ein Beitrag zur experimentell gestützten Tragsicherheitsbewertung von Massivbrücken. Dresden, Techn. Univ., Diss., 2003.
- HAARDT, P.; DABRINGHAUS, S.; FRIEBEL, WD. et al. (2017) Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn. *Bautechnik* 94(7): 438–444, 10.1002/bate.201700035.
- HALLENBECK, M. AND WEINBLATT, H. (2004) *Equipment for Collecting Traffic Load Data: Report 509*, Transportation Research Board, 509.
- HALLERMANN, N.; HELMRICH, M.; MORGENTHAL, G. et al. (2018) UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken. *Bautechnik* 95(10): 720–726, 10.1002/bate.201800066.

- HANSEN, M. and MARX, S. (2014) Monitoringgestützte Risikobewertung bestehender Massivbauwerke, Stuttgart.
- HAY, DR.; CAVACO, JA. and MUSTAFA, V. (2009) Monitoring the civil infrastructure with acoustic emission: bridge case studies. *Journal of Acoustic Emission* 27.
- HEGGER, J. and MARK, P. (eds) (2021) Stahlbetonbau-Fokus: Brückenbau: Beispiele zu Entwurf, Bemessung und Konstruktion. Beuth, Berlin.
- HEINRICH, J.; MAURER, R.; LECKEY, K.; MÜLLER, CH. and ICKSTADT, K. (2021) Detektieren ermüdungsbedingter Spannstahlbrüche mittels Rissmonitoring im Versuch und am Bauwerk/Detection of fatigue induced fracture of prestressing steel by means of monitoring of experiment and structure. *Bauingenieur* 96(03): 92–101, 10.37544/0005-6650-2021-03-60.
- HEINRICH, M. (2019) Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken. Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 48, 10. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen.
- HERING, E. and SCHÖNFELDER, G. (eds) (2012) Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- HERMANN, R.; SCHNEIDER, R.; SIMON, P. et al. (2021) Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung. In 11. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (CURBACH, M.; MARX, S.; SCHEERER, S. and HAMPEL, T. (eds)), pp. 66–76.
- HERRMANN, R. (2018) Reference Vibration Measurement of Mensa Bridge Hannover.
- HINDERSMANN, I. (2021) Dauerüberwachung von Bestandsbrücken Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Heft B 163.
- HOLST, A. (2007a) Korrosionsmonitoring und Bruchortung vorgespannter Zugglieder in Bauwerken. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2007, Braunschweig.
- HOLST, A.; BUDELMANN, H.; HARIRI, K. and WICHMANN, H-J. (2007b) Korrosionsmonitoring und Bruchortung in Spannbetonbauwerken – Möglichkeiten und Grenzen. *Beton- und Stahlbetonbau* 102(12): 835–847, 10.1002/best.200700587.
- HOLST, A.; BUDELMANN, H. and WICHMANN, H-J. (2010) Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken als Element des Lebensdauermanagements. *Beton- und Stahlbetonbau* 105(12): 536–549, 10.1002/best.201000066.
- HOLST, A.; WICHMANN, H-J.; HARIRI, K. and BUDELMANN, H. (2006) Monitoring of tension members of civil structures - New concepts and testing. *Structural Health Monitoring 2006: Proceedings of the Third European Workshop*: 117–124.
- HOLST, R. (2018) Grundlagen - Einsatzgebiete - rechtliche Rahmenbedingungen für Drohnensysteme. *Bautechnik* 95(10): 699–704, 10.1002/bate.201800067.
- HOSSER, D.; BUDELMANN, H.; DEHNE, M.; HARIRI, K. and HOLST, A. (2003) Monitoring und Schwachstellenidentifizierung bei Spannbetonbauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau* 98(4): 217–225, 10.1002/best.200301170.
- HUNKELER, F. (1999) Korrosionsüberwachung von Bauwerken. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 117(26): 580, 10.5169/seals-79757.

- INGENSAND, H. (1995) Neue digitale Nivellierertechniken und ihre Anwendungen. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik VPK = 1995(93): 221–226.
- JACOB, B. (2001) Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE): General Report of the 4th FP Transport, RTD project, RO-96-SC, 403, LCPC, Paris.
- JAUREGUI, DV. and FARRAR, CR. (1996) Comparison of damage identification algorithms on experimental modal data from a bridge. Proceedings of SPIE - The international society of optical engineering 1996: 1423–1429.
- JESSE, F. and KUTZNER, T. (2013) Digitale Photogrammetrie in der Bautechnik. Bautechnik 90(11): 703–714, 10.1002/bate.201300059.
- KÄDING, M, SCHACHT G, BOLLE G and Marx S (2019a) Schallemissionsmonitoring an einer Spannbetonbrücke in Deutschland. 22. Kolloquium Schallemission, DGZFP AE.
- KÄDING M.; SCHACHT, G.; MARX, S. and BOLLE, G. (2019b) Continuous Acoustic Monitoring of a Prestressed Concrete Bridge in Germany. 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures.
- KAPLAN, F.; STEINBOCK, O.; SALOGA, K.; EBELL, G. and SCHMIDT, S. (2022) Überwachung der Brücke am Altstädter Bahnhof. Bautechnik 99(3): 222–230, 10.1002/bate.202200008.
- KEIL, A. and WENGER, P. (2015) Die semiintegrale Grubentalbrücke – Besonderheiten bei der Bauausführung. Bautechnik 92(2): 134–143, 10.1002/bate.201500005.
- KEMKES, E.; RÜFFER, J.; OMIDALIZARANDI, M. et al. (2019) Ein neues Verfahren zum MEMS-basierten Brückenmonitoring - Zielsetzung und Statusbericht.
- KEßLER, S.; GEHLEN, C.; EBELL, G. and BURKERT, A. (2011) Die Aussagegenauigkeit der Potenzialfeldmessung. Beton- und Stahlbetonbau 106(7): 481–489, 10.1002/best.201100025.
- KIM, B. and CHO, S. (2018) Automated Vision-Based Detection of Cracks on Concrete Surfaces Using a Deep Learning Technique. Sensors 18(10), 10.3390/s18103452.
- Kistler Group (2020) WIM Data Logger Type 5204AC...: for dynamic vehicle weighing with Lineas sensors. Kistler Group. See https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-133e.pdf (accessed 10/08/2023).
- Kistler Instrumente GmbH Montage/Installation eines Beschleunigungssensors. See <https://www.kistler.com/de/glossar/begriff/montage-installation-eines-beschleunigungssensors/> (accessed 27/07/2021).
- KOHM, M. and STAMPNIEWSKI, L. (2021) Entwicklung eines modal basierten Brückenmonitoring-Systems: Labortechnische Sensitivitätsanalyse der modalen Parameter. Beton- und Stahlbetonbau 116(3): 222–231, 10.1002/best.202000085.
- KOSNIK, DE. (2009) Acoustic emission testing of a difficult-to-reach steel bridge detail. Journal of Acoustic Emission 27: 11–17.
- KROHN, S. (2014) Messwertgestützte Ermüdungsnachweise an bestehenden Straßenbrücken. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2013. Shaker, Aachen.
- KÜHNE, J.; GÜNDEL, M.; EBERT, C. and COLOMER, C. (2021) Die Digitalisierung der Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen und Brücken im Vergleich. Stahlbau 90(2): 128–137, 10.1002/stab.202000093.
- KUTTNER, T. and ROHNEN, A. (eds) (2019a) Praxis der Schwingungsmessung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

- KUTTNER, T. AND ROHNEN, A. (2019b) Signalverarbeitung. In Praxis der Schwingungsmessung (KUTTNER, T. AND ROHNEN, A. (eds)). Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 201–268.
- Leica Geosystems AG (2020) Datenblatt: Leica Nova ms60, Heerbrugg, Schweiz. See https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_nova_ms60_ds.ashx?la=de-de&hash=85C0022824F14AC65A49153B47312544 (accessed 29/11/2021).
- Leica Geosystems AG (2021) Leica LS Digitalnivelliere: Datenblatt. See <https://leica-geosystems.com/de-de/products/levels/automatic-levels/leica-na300-series> (accessed 18/11/2021).
- Lindorf, A. (2018) DBV-Merkblatt Brückenmonitoring:2018-08: Brückenmonitoring - Planung, Ausschreibung und Umsetzung, 2018th edn. Eigenverlag, Berlin.
- LINK, M.; WEILAND, M. and FEHLING, E. (2016) Structural health monitoring of the Gaertnerplatz bridge over the Fulda river in Kassel considering environmental conditions. In Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. CRC Press, pp. 1924–1928.
- LINK, M.; WEILAND, M. and HAHN, T. (2008) Structural Health Monitoring of the Gaertnerplatz Bridge. In Proc. of the 2nd. International Symposium on Ultra High Performance Concrete (Kassel University Press (ed.)), vol. H.10, No.10.
- LÖHR, M. (2015) Einsatz der Schallemissionsanalyse als Dienstleistung an Brückenbauwerken. 20. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse.
- LUBASCH, P.; SCHNELLENBACH-HELD, M. and BUSCHMEYER, W. (2011) Computergestützte Identifikation von Verkehrslasten-Ergänzendes Bauwerksmonitoring/Computer-aided identification of traffic loads-Supplemented structural health monitoring. Bauingenieur 86(10).
- LUDESCHER, H. and BRÜHWILER, E. (2009) Dynamic Amplification of Traffic Loads on Road Bridges. Structural Engineering International 19: 190–197, 10.2749/101686609788220231.
- Luna Innovations (2022) ODiSI 6000 Series Optical Distributed Sensor Interrogators. See [https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/data-sheet/Luna %20ODiSI %206000 %20Data %20Sheet.pdf](https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/data-sheet/Luna%20ODiSI%206000%20Data%20Sheet.pdf) (accessed 17/12/2022).
- MAAS, H-G. (2012) Digitale Nahbereichsphotogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen. Bautechnik 89(11): 786–793, 10.1002/bate.201200037.
- MACK, T.; GEIER, R.; KAHL, T. and KASPER, M. (2016) Monitoring der neuen Schrägseilbrücke über den Chao Phraya, Nonthaburi, Thailand. Bautechnik 93(10): 730–741, 10.1002/bate.201600070.
- MANSPERGER, T. and JUNG, R. (2015) Stabbogenbrücke im Zuge der Saale-Elster-Talbrücke - die schnellste im Netz der DB. Stahlbau 84(3): 162–170, 10.1002/stab.201510253.
- MARX, S.; KRONTAL, L. and TAMMS, K. (2015) Monitoring von Brückenbauwerken als Werkzeug der Bauüberwachung. Bautechnik 92(2): 123–133, 10.1002/bate.201500002.
- MARX, S.; SCHACHT, G.; MAAS, H-G. and KOSCHITZKI, R. (2011) Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.

- MARX, S. and WENNER, M. (2015) Structural Health Monitoring (SHM) an der Scherkondalbrücke: eine semi-integrale Eisenbahn-Betonbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 110(S2): 2–8, 10.1002/best.201500501.
- MAYER, TF (2010a) Korrosionssensor „ANODENLEITER“. Sortotec GmbH. See http://www.sortotec.de/images/pdf/Datenblatt_Anodenleiter_de.pdf (accessed 30/05/2022).
- MAYER, TF. (2010b) Specification of the Anode Ladder Corrosion Sensor. Sortotec GmbH. See http://www.sortotec.de/images/pdf/Installation_manual_AL_eng.pdf (accessed 30/05/2022).
- MAYER, TF. (2013) Feuchtesensor „MULTIRINGELEKTRODE“. Sortotec GmbH. See http://www.sortotec.de/images/pdf/Datenblatt_Multiringelektrode_de.pdf (accessed 05/05/2022).
- MEHLHORN, G. and CURBACH, M. (eds) (2014) *Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- MEYER, C.; BOSSHARD, M. and BRÜHWILER, E. (2012) Nachweis der Ermüdungssicherheit von Brücken – Teil 1: Veranlassung, Ziel und Messkonzept des Monitoring-Projekts „Bahnbrücke Eglisau“. *Stahlbau* 81(7): 504–509, 10.1002/stab.201201575.
- Micro-Epsilon (2022a) Datenblatt - Laser-Wegsensoren (Triangulation). See <https://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--optoNCDT--de.pdf> (accessed 04/11/2021).
- Micro-Epsilon (2022b) Produktblatt: Laseroptische Distanzsensoren. See <https://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--optoNCDT-ILR--de.pdf> (accessed 04/11/2021).
- MISCHO, H.; SANIO, D.; STROHBUSCH, J. et al. (2022) Monitoring für Ingenieurbauwerke – Ein Anwenderbericht aus der Sicht eines Ingenieurbüros. *Bautechnik* 99(7): 556–564, 10.1002/bate.202200048.
- MISTLER, M. and HEILAND, D. (2015) Experimentelle modale Dämpfungsermittlung an bestehenden Bauwerken, VDI-Tagung Baudynamik, Kassel.
- MONSBERGER, CM. and LIENHART, W. (2021a) Distributed fiber optic shape sensing along shotcrete tunnel linings: Methodology, field applications, and monitoring results. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 11(2): 337–350, 10.1007/s13349-020-00455-8.
- MONSBERGER, CM. and LIENHART, W. (2021b) Distributed Fiber Optic Shape Sensing of Concrete Structures. *Sensors* 21(18): 6098, 10.3390/s21186098.
- MONSBERGER, CM., LIENHART, W. and MORITZ, B. (2018) In-situ assessment of strain behaviour inside tunnel linings using distributed fibre optic sensors. *Geomechanics and Tunneling* 11(6): 701–709, 10.1002/geot.201800050.
- MORDINI, A.; VEIT-EGERER, R. and WENZEL, H. (2008) Damage identification on steel torsional bracings based on dynamic monitoring. In 7th International Conference on Steel Bridges (7 ICSB'08), Guimarães, Portugal.
- MORGENTHAL, G.; HALLERMANN, N.; KERSTEN, J. et al. (2019) Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges. *Automation in Construction* 97: 77–95, 10.1016/j.autcon.2018.10.006.
- MORGENTHAL, G.; RODEHORST, V.; HALLERMANN, N.; DEBUS, P. and BENZ, C.: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte). Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Heft B 171.

- MÖSER, M. (2004) Bauwerksüberwachungsmessungen: Vorlesungsskriptum. Vorlesungsskriptum.
- MOUHASSEB, H. (2007) Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens. Karlsruhe, Univ., Diss., 2007.
- MÜLLER, A.; SODEIKAT, C.; SCHÄNZLIN, J. et al. (2020) Die Gänstorbrücke in Ulm – Untersuchung, Probelastung und Brückenmonitoring. *Beton- und Stahlbetonbau* 115(3): 164–178, 10.1002/best.201900071.
- NASER, AF. and WANG, Z. (2012) Experimental monitoring of the strengthening construction of a segmental box girder bridge and field testing of external prestressing tendons anchorage. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 6(3): 308–320, 10.1007/s11709-012-0140-3.
- NASSIF, HH.; GINDY, M. and DAVIS, J. (2005) Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration. *NDT & E International* 38(3): 213–218, 10.1016/j.ndteint.2004.06.012.
- NEITZEL, F. and SCHWARZ, W. (2017) Schwingungsuntersuchungen. In *Ingenieurgeodäsie* (SCHWARZ, W. (ed.)). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 463–506.
- NOVÁK, B.; REINHARD, J.; STEIN, F. and DUDONU, A. (2022) Progress in the application of distributed fibre optic sensors for monitoring existing bridges, *Proceedings for the 6th fib International Congress 2022*.
- NOVÁK, B.; STEIN, F.; REINHARD, J. and DUDONU, A. (2021) Einsatz kontinuierlicher faser-optischer Sensoren zum Monitoring von Bestandsbrücken. *Beton- und Stahlbetonbau* 116(10): 718–726, 10.1002/best.202100070.
- NOWAK, M.; FISCHER, O. and MÜLLER, A. (2020) Realitätsnahe Verkehrslastansätze für die Nachrechnung der Gänstorbrücke über die Donau. *Beton- und Stahlbetonbau* 115(2): 91–105, 10.1002/best.201900060.
- OLASZEK, P.; WYCZAŁEK, I.; SALA, D.; KOKOT, M. and ŚWIERCZ, A. (2020) Monitoring of the Static and Dynamic Displacements of Railway Bridges with the Use of Inertial Sensors. *Papworths Construction Testing Equipment & Tools Crack Meter*. See <https://www.pcte.com.au/>.
- PARTHIER, R. (ed.) (2016) *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- PEETERS, B. (2000) *System identification and damage detection in civil engineering*. Dissertation, Leuven.
- PEETERS, M. (2017) *Überwachungskonzepte für Brückenverstärkungen - Notwendigkeit, Grundlagen und messtechnische Umsetzung*. Dissertation, Duisburg.
- PEIRIS, A.; SUN, C. and HARIK, I. (2018) Lessons learned from six different structural health monitoring systems on highway bridges. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 39(3): 616–630, 10.1177/1461348418815406.
- PELKE, E.; BERGER, D.; GEIßLER, K. and STEIN, R. (2020) Bewertung der Trag- und Ermüdungssicherheit der Kaiserleibrücke über den Main – Beispiel einer objektbezogenen Anwendung der Nachrechnungsrichtlinie (NRR). *Stahlbau* 89(9): 749–766, 10.1002/stab.202000025.

- PENKA, E. (2004) Beurteilung der Ermüdungssicherheit von Koppelfugenquerschnitten bestehender Spannbetonbrücken durch Langzeitmessungen. München, Techn. Univ., Diss., 2005.
- PIRSKAWETZ, S.; STEINBOCK, O.; HILLE, F.; SCHMIDT, S. and HOFMANN, D. (2022) Erfahrungen aus dem Rückbau der Brücke am Altstädter Bahnhof in der Stadt Brandenburg – Teil 2: Schadensmonitoring bei zerstörenden Versuchen. *Beton- und Stahlbetonbau* 117(8): 581–589, 10.1002/best.202200052.
- Polytec GmbH (2021a) Datenblatt - VibroOne. See <https://www.polytec.com/de/vibrometrie/produkte/einpunkt-vibrometer/vibroone?lhash=841dab67993c485cbe7a> (accessed 29/11/2021).
- Polytec GmbH (2021b) Laser-Doppler-Vibrometrie. See <https://www.polytec.com/de/vibrometrie/technologie/laser-doppler-vibrometrie> (accessed 29/11/2021).
- Proceq SA (2009) Bedienungsanleitung: Korrosionsanalysegerät.
- PUENTE LEÓN, F. (2017) Praxis der Digitalen Signalverarbeitung. KIT Scientific Publishing.
- RAUPACH, M.; DAUBERSCHMIDT, C. and WARKUS, J. (eds) (2003) Bestimmung der Feuchteverteilung in zementösen Baustoffen mit Einbausensoren; Soil Moisture Group der Universität Karlsruhe.
- REITERER, M. and LACHINGER, S. (2020) Untersuchung der dynamischen Kennwerte einer Eisenbahnbrücke bei unterschiedlichen Ausbauständen. *Beton- und Stahlbetonbau* 115(2): 117–127, 10.1002/best.201900055.
- REITERER, M.; PRAXMARER, L. and KAMMERSBERGER, A. (2008) Maintenance und Monitoring. Dauermonitoring zur Optimierung der Nutzungsdauer einer Brücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 103(2): 103–111, 10.1002/best.200700599.
- RETZE, U. (2007) Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke. Dissertation, München.
- RIAD, K. (2006a) Überwachung der Vorspannkraft Externer Spannglieder mit Hilfe der Modalanalyse. Kassel, Univ., Diss., 2006.
- RIAD, K. and LINK, M. (2006b) Überwachung der effektiven Kräfte externer Spannglieder mittels Schwingungsmessungen. VDI-Berichte Nr. 1941: 179–188.
- RILL, D. (2021a) Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen, Bergisch Gladbach, Heft B 168.
- RILL, D.; BUTZ, C. and TAHEDL, M. (2021b) Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn–Digitale Bauwerkskomponenten: Instrumentierte Lager und Fahrbahnübergänge. 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur: Tagungshandbuch 2021 1: 167.
- ROOKE, A. (2015) S2_Guidelines for Monitoring of Existing Structures, Queensland.
- SAB Bröckskes GmbH & Co. KG (2022) MTE und MWT: Mantel-Thermoelemente und Mantel-Widerstandsthermometer. See https://www.sab-kabel.de/fileadmin/user_upload/pdf/catalog_dt/Thermotechnik_dt/Thermoelemente/MTE_und_MWT.pdf/temperaturmesstechnik/widerstandsthermometer.html (accessed 09/08/2021).

SAKIYAMA, F.; LEHMANN, F. and GARRECHT, H. (2022) Deployment of a High Sensor-Count SHM of a Prestressed Concrete Bridge Using Fibre Optic Sensors. In Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020): Volume 3: Service Life Extension of Existing Structures (SENA-CRUZ, J.; CORREIA, L. and AZENHA, M. (eds)). Springer International Publishing; Imprint Springer, Cham, vol. 34, pp. 183–195.

SAMIEC, D. (2011) Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Auflösung. *Photonik*(06/2011): 34–37.

SANIO, D.; AHRENS, M.; MARK, P. and RODE, S. (2014) Untersuchung einer 50 Jahre alten Spannbetonbrücke zur Genauigkeitssteigerung von Lebensdauerprognosen. *Beton- und Stahlbetonbau* 109(2): 128–137, 10.1002/best.201300079.

SANIO, D.; MARK, P. and MARX, S. (2017) Genauigkeit monitoringbasierter Lebensdauerprognosen von Betonbrücken bei Spannstahlermüdung David Sanio ; Gutachter: Peter Mark, Steffen Marx. Dissertation, Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2016. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

SCHACHT, G.; BOLLE, G. and MARX, S. (2013) Messen bei Querkraftversuchen. *Beton- und Stahlbetonbau* 108(12): 875–887, 10.1002/best.201300050.

SCHACHT, G.; KÄDING, M.; BOLLE, G. and MARX, S. (2019) Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr. *Beton- und Stahlbetonbau* 114(2): 85–94, 10.1002/best.201800087.

SCHACHT, G.; MÜLLER, L.; PIEHLER, J.; MARX, S. and MEICHNER, E.: Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Planung und Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen. In *Mauerwerk Kalender 2018*, pp. 93–112.

SCHIEGG, Y. (2002) Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten. Dissertation, Zürich.

SCHIEGG, Y. and BÖHNI, H. (2000) Online-Monitoring der Korrosion an Stahlbetonbauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau* 95(2): 92–103, 10.1002/best.200000150.

SCHNELLENBACH-HELD, M.; PEETERS, M.; Brylka, A.; Fickler, S. and Schmidt, I. (2015a) Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Heft B 116*.

SCHNELLENBACH-HELD, M.; PEETERS, M. and MIEDZINSKI, G. (2015b) Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Heft B 110*.

SCHÖNEKEß, H.C. (2009) Bestimmung statischer und dynamischer Zugspannungen in Stahlverseilungen mittels Wirbelstrom-Multisensoren und Ansätzen zu einer Sensordatenfusion. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2009. Kassel Univ. Press, Kassel.

SCHRAMM, N. and FISCHER, O. (2019) Deutschlandweit erstmalige Anwendung von UHPFRC im Eisenbahnbrückenbau. *Beton- und Stahlbetonbau* 114(5): 307–314, 10.1002/best.201900008.

SCHUBERT, M.; FABER, M. H.; BETZ, W. et al. (2020) Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Heft B 156*.

- SCHULZE, J. and BREIT, W. (2016) Experimentalgebäude aus Infraleichtbeton – monolithisch und hochwärmedämmend. *Beton- und Stahlbetonbau* 111(6): 377–384, 10.1002/best.201600015.
- SCHWARZ, W. (ed.) (2017) *Ingenieurgeodäsie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- SCHWARZ, W. and HENNES, M. (2017) Qualitätsbewertung in der Ingenieurgeodäsie. In *Ingenieurgeodäsie* (SCHWARZ, W. (ed.)). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 371–402.
- SICK Sensor Intelligence (2017) TIC102, TIC501, TIC502 – Zuverlässige Fahrzeugklassifizierung über mehrere Spuren: (Produktinform.). See https://cdn.sick.com/media/docs/8/28/528/product_information_tic102_tic501_tic502_de_im0076528.pdf (accessed 03/05/2022).
- SICK Sensor Intelligence (2022) LMS511-10100S01 - 2D LIDAR SENSORS: (Produktinform.). See https://cdn.sick.com/media/pdf/5/45/945/dataSheet_LMS511-10100S01_1055659_en.pdf (accessed 03/05/2022).
- SIEGEL, S. (2018) Zustandsbestimmung von externen Spanngliedern und Schrägseilen mit Frequenzanalysen. Dissertation, Karlsruhe.
- SIEGERT, C.; HOLST A.; EMPELMANN, M. and BUDELMANN, H. (2015) Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Bremen, Heft B 118.
- SIEŃKO, R.; BEDNARSKI, Ł. and HOWIACKI, T. (2021) Smart Composite Rebars Based on DFOS Technology as Nervous System of Hybrid Footbridge Deck: A Case Study. In *European Workshop on Structural Health Monitoring* (RIZZO, P. and MILAZZO, A. (eds)). Springer International Publishing, Cham, pp. 331–341.
- SIEŃKO, R.; BEDNARSKI, Ł. and HOWIACKI, T. (2022) Distributed fibre optic sensing for safety monitoring of concrete, steel and composite bridges. In *Bridge safety, maintenance, management, life-cycle, resilience and sustainability: Proceedings of the eleventh International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2022)*, Barcelona, Spain, July 11-15, 2022 (CASAS, JR.; FRANGOPOL, DM. and TURMO, J. (eds)). CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, pp. 1612–1620.
- SIMON, A. (2017) Untersuchungen zur Holzfeuchteentwicklung an geschützten Holzbrücken. *ce/papers* 1(5-6): 341–346, 10.1002/cepa.604.
- SIMON, P.; HELMRICH, M.; HERRMANN, R. et al. (2022) Maintalbrücke Gemünden: Bauwerksmonitoring und -identifikation aus einem Guss. *Bautechnik* 99(3): 163–172, 10.1002/bate.202100102.
- SKI Ingenieurgesellschaft mbH Verschiebungen. See <https://ski-consult.de/taetigkeitsbereiche/messtechnik/verschiebungen/> (accessed 20/10/2021).
- SODEIKAT, C. (2010) Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung. *Beton- und Stahlbetonbau* 105(12): 770–777, 10.1002/best.201000058.
- SODEIKAT, C.; DAUBERSCHMIDT, C.; SCHIEßL, P.; GEHLEN, C. and KAPTEINA, G. (2006) Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken für Public Private Partnership Projekte: Dauerhaftigkeit sichtbar gemacht. *Beton- und Stahlbetonbau* 101(12): 932–942, 10.1002/best.200600517.

- SODEIKAT, C.; GROSCHUP, R.; KNAB, F. and OBERMEIER, P. (2019) Acoustic Emission in der Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen. *Beton- und Stahlbetonbau* 114(10): 707–723, 10.1002/best.201900041.
- SPULER, T. and BERGER, R. (2010) Structural Health Monitoring - Saving Disruptive Works on Urban Bridges. IABSE Symposium Report 97, 10.2749/222137810796025483.
- STADLER, M.; PENKA, E. and ZILCH, K. (2007) Ermittlung der freien Schwingungslänge zur Bestimmung der Vorspannkraft externer Bandspannglieder durch dynamische Messungen/ Evaluation of the vibration length for the determination of external tendons prestressing force using dynamic measurements. *Bauingenieur* 82(1).
- STEFFENS, N. (2019) Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring. Dissertation, Düren.
- STEMPNIEWSKI, L. Verfahren zur Prüfung des Zustands von externen Spanngliedern und Schrägseilen: [Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 15.410/2004/ARB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung], Bremerhaven.
- SUNG, Y-C.; LIN, T-K.; CHIU, Y-T. et al. (2016) A bridge safety monitoring system for prestressed composite box-girder bridges with corrugated steel webs based on in-situ loading experiments and a long-term monitoring database. *Engineering Structures* 126: 571–585, 10.1016/j.engstruct.2016.08.006.
- THUNICH, O. (2017) Eliminierung des Temperatureffekts bei Brückenmonitoringdaten: Vergleich zwischen linearer Regression und Kriging-Modellen.
- TOMICZEK, A. P.; WHITLEY, T. J.; BRIDGE, J. A. and IFJU, P. G. (2019) Bridge Inspections with Small Unmanned Aircraft Systems: Case Studies. *Journal of Bridge Engineering* 24(4): 5019003, 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001376.
- TONELLI, D.; LUCHETTA, M.; ROSSI, F.; MIGLIORINO, P. and ZONTA, D. (2020) Structural Health Monitoring Based on Acoustic Emissions: Validation on a Prestressed Concrete Bridge Tested to Failure. *Sensors* 20(24), 10.3390/s20247272.
- TREACY, MA. and BRÜHWILER, E. (2015) A direct monitoring approach for the fatigue safety verification of construction joint details in an existing post-tensioned concrete box-girder bridge. *Engineering Structures* 88: 189–202, 10.1016/j.engstruct.2015.01.036.
- TUE, NV. and DIETZ, J. (2005) Brücken aus hochfestem Beton: Praxiserfahrungen mit Pilotprojekten in Sachsen und Thüringen. *Beton- und Stahlbetonbau* 100(2): 106–115, 10.1002/best.200590026.
- UDD, E (1996) Fiber optic smart structures. *Proceedings of the IEEE* 84(6): 884–894, 10.1109/5.503144.
- ULLERICH, C. (2012) Permanentes Echtzeit-Monitoring von Verkehrslasten auf der Koehlbrandbrücke/Permanent real-time monitoring of traffic loads on the Koehlbrand-Bridge. *Bauingenieur* 87(10).
- VEIT-EGERER, R.; WENZEL, H.; REISCHL, J. and HINTRINGER, H. (2011) Traunbrücke Steyermühl – Sprengungsüberwachung mit BRIMOS® Structural Health Monitoring. *Bautechnik* 88(3): 189–198, 10.1002/bate.201110019.
- VILL, M.; VOSPERNIG, M.; REITERER, M.; HÜNGSBERG, A. and KARI, H. (2022) Langzeitmessungen an einer vorgespannten integralen Rahmenbrücke mit bewehrten Betongelenken –

Vergleich Messergebnisse mit numerischen Simulationen – eine Gegenüberstellung nach 8 Jahren Messdauer. *Beton- und Stahlbetonbau* 117(10): 772–785, 10.1002/best.202200054.

WANG, M. and YIM, J. (2010) Monitoring of the I-39 Kishwaukee Bridge: Research Report ICT-10-061.

WEIHER, H. and GLÄSER, C. (2008) Maintenance and Inspection of Stay Cables using prestressing steel at a German Bridge. *Life-Cycle Civil Engineering: Proceedings of the International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*, 10.1201/9780203885307.ch83.

WEIHER, H. and RUNTEMUND, K. (2015) Monitoring based assessment of fatigue resistance of 40 year old pc bridges. *Multi-Span Large Bridges*, 10.1201/b18567-115.

WEIHER, H.; RUNTEMUND, K. and ULLERICH, C. (2015) Monitoringbasierter Nachweis der Spannstahlermüdung an den Koppelfugen der Köhlbrandbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 110(8): 529–538, 10.1002/best.201500029.

WEISS, F. and SPINDLER, T.: Weigh-In-Motion on the Köhlbrand Bridge in the Port of Hamburg. In 6th International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM 6) International Society for Weigh-In-Motion Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTARR) International Transport Forum Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL) Transportation Research Board Federal Highway Administration.

WENNER, M.; MEIER, T.; WEDEL, F. and MARX, S. (2019) Versuchsgestützte Ermittlung der Unterbausteifigkeit einer großen Eisenbahnbrücke. *Bautechnik* 96(2): 99–111, 10.1002/bate.201800019.

WENZEL, H. (2009) *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.

WENZEL, H. and PICHLER, D. (2005) *Ambient Vibration Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.

WINKLER, E. (2021) Ein Laser für alle Fälle: Triangulationssensoren mit verschiedenen Laser-Technologien für verschiedene Anwendungen. *messtec drives Automation*: 14–16.

WOLF, A. (2010) Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bremerhaven, Heft S 61.

ZDANOWICZ, K.; BEDNARSKI, Ł.; HOWIACKI, T. and SIEŃKO, R. (2022) Verteilte Dehnungsmessungen von Spannbetonbauteilen mit faseroptischen Sensoren. *Beton- und Stahlbetonbau* 117(7): 539–547, 10.1002/best.202200035.

ZILCH, K.; HENNECKE, M.; BUBA, R. and Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (2001) Kombinationsregeln für Ermüdung - Untersuchung der Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise bei Spannbetonbrücken. Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Strassenbau, Strassenverkehr.

ZILCH, K. and WEIHER, H. (2007) Sicherheit von Spannbetonbrücken - Zustand von Großbrücken im Zuge von Bundesfernstraßen. *Bauingenieur* 82: 14–24.

ZILCH, K.; WEIHER, H. and GLÄSER, C. (2009) Monitoring im Betonbau. In 2009 Beton-Kalender: Konstruktiver Hochbau Aktuelle Massivbaunormen (FINGERLOOS, F.; WÖRNER, JD. and BERGMEISTER, K. (eds)). Ernst & Sohn, Berlin, vol. 2009, pp. 135–183.

Übersicht der Publikationen der Bundesanstalt für Straßenwesen zum Thema Monitoring von Brückenbauwerken

- B 178 Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn; Sarah Windmann
- B 177 Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten; Ursula Freundt, SeBASTian Böning, Stefan Fischer, Florian-Lennert Lau
- B 171 Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte); Guido Morgenthal, Volker Rodehorst, Norman Hallermann, Paul Debus, Christian Benz
- B 168 Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen; Daniel Rill
- B 164 Intelligente Bauwerke: Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten; Markus Kleinert, Felix Sawo
- B 163 Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen; Iris Hindersmann
- B 160 Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager; Christiane Butz
- B 156 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Komzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten; Matthias Schubert, Michael H. Faber, Matrisk GmbH, Affoltern a. A. (CH), Eileen Niemeier, Daniel Ziegler, Christoph Walther, PTV Group, Karlsruhe
- B 151 Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken; Marian Ralbovsky, Dominik Prammer, Stefan Lachinger, Alois Vorwagner
- B 139 Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie; Martin Sperber, Rainer Gößmann, Corinna Reget, Jörg Müller, Jürgen Nolden, Ralf Köhler, Lukas Kremkau
- B 118 Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit; Corinna Siegert, Alexander Holst, Martin Empelmann, Harald Budelmann
- B 116 Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton; Martina Schnellenbach-Held, Michael Peeters, Adrain Brylka, Silvia Fickler, Irina Schmidt
- B 114 Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform; Felix Sawo, Vesa Klumpp, Frederk Beutler
- B 110 Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton; Martina Schnellenbach-Held, Michael Peeters, Gregor Miedzinski

- B 106 Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken; Ursula Freundt, Ralf Vogt, SeBAStian Böning, Dirk Michael, Carsten Könke, Heiko Beinersdorf
- B 105 Intelligente Brücke - Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke; Martina Schnellenbach-Held, Björn Karczewski, Oliver Kühn
- B 104 Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse; André Borrmann, Oliver Fischer, Gergö Dori, Matthias Wild
- B 100 Roadtraffic-Management-System (RTMS); Ursula Freundt, Ralf Vogt, SeBAStian Böning, Christian Pierson, Peter Erle
- B 99 Intelligente Brücke - Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen; Johannes Fischer, Ronald Schneider, SeBAStian Thöns, Werner Rücker, Daniel Straub
- B 64 Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessungen an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4; Wolfgang Brameshuber, Frank Spörel, Jürgen Warkus
- B 41 Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahntafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht; M. Eilers, E. Küchler, B. Quass

Bilder

Bild 1:	Tragfähigkeitsverteilung für Brücken im Zuge der Bundesfernstraßen (B) und Bundesautobahnen (BAB) anteilig nach Anzahl der Teilbauwerke (BMDV, 2022).....	14
Bild 2:	Zustandsnotenverteilung für Brücken an Bundesfernstraßen im Jahresvergleich anteilig nach Brückenfläche (BMDV, 2022)	14
Bild 3:	Erforderlicher Mittelaufwuchs für die Modernisierung von Autobahnbrücken (BMDV, 2022).....	15
Bild 4:	Angewandtes WIM-System auf der Köhlbrandbrücke in Hamburg, Sensoraufbau (oben) sowie das Sensorfeld mit Sensoren (I-IV) und Induktionsschleifen (A-C) (unten) (ULLERICH, 2012)	26
Bild 5:	Laser-Scanner zur Verkehrsmessung und detektierten Fahrzeuge im Abgleich mit Bildaufnahmen der Webcam (NOWAK et al., 2020)	28
Bild 7:	Kamera an einer Stabbogenbrücke (STEFFENS, 2019)	29
Bild 8:	Messzentrale im Inneren des Hohlkastens der Köhlbrandbrücke (ULLERICH 2012)	30
Bild 9:	Messgenauigkeit entsprechend unterschiedlicher Anordnungsmöglichkeiten der Quarz-Piezo-Sensoren nach (Kistler Group, 2020)	31
Bild 10:	Beispiel eines Platin-Widerstandsthermometers (GEIER et al., 2014)	33
Bild 11:	Pt100 Temperatursensor an der ÖBB Steyrtalbrücke (GEIER et al., 2016)	33
Bild 12:	Jahresverlauf der Betontemperatur an einer Eisenbahnbogenbrücke in Massivbauweise im Vergleich mit den gemessenen Längenänderungen (GEIER et al., 2016)	35
Bild 13:	Temperaturmessstellen einer Beispielbrücke (MÜLLER et al., 2020)	35
Bild 14:	Temperaturmessungen an der Maintalbrücke in Längsrichtung des Brückentragwerks (HERMANN et al., 2021)	35
Bild 15:	Vergleich der Anordnung von Geophonen und Beschleunigungssensoren für das Monitoring der Maintalbrücke (HERMANN et al., 2021).....	36
Bild 16:	Temperaturmessungen an der Maintalbrücke - Anordnung der Sensoren im Querschnitt (HERMANN et al., 2021)	36
Bild 17:	Montage eines Temperatursensors zur Erfassung der Bauteiltemperatur (WEIHER et al., 2015)	36
Bild 18:	Multiringelektrode zur Bestimmung der Feuchteverteilung (SODEIKAT, 2010)..	38
Bild 19:	Installationsbeispiel einer Multiringelektrode (SCHULZE and BREIT, 2016)	39
Bild 20:	Anordnung von Holzfeuchteelektroden (Beispielsammlung Monitoring 3.1; Quelle: KBauMV FH Wismar).....	40
Bild 21:	Auswertung der Feuchtedaten mit dem Alarmwert (FRIESE et al., 2018)	41

Bild 22:	Beispiel der Installationsvorbereitung von Multiringelektroden (SODEIKAT, 2010)	41
Bild 23:	Einbaustellen der Feuchtesensoren an der duraBAST-Brücke und Kernbohrungen (HINDERSMANN, 2021).....	42
Bild 24:	Korrosionsphasen, Monitoringstufen sowie Grenzzustände der Stahlkorrosion (HOLST et al., 2007b)	44
Bild 25:	Konzept einer möglichen Korrosionsmonitoringstrategie (HOLST et al., 2007b) 44	
Bild 26:	Makroelement auf Bauwerken durch Trennen der Bewehrung (schematisch) (ELSENER, 1996).....	46
Bild 27:	Prinzip der Potenzialmessung auf der Betonoberfläche (KEßLER et al., 2011) ..	47
Bild 28:	Aufbau und Beispiel einer Mangandioxid-Elektrode (DGZfP, 2018)	47
Bild 29:	Aufbau einer Anodenleiter (SODEIKAT et al., 2006)	48
Bild 30:	Instrumentierte Bohrkerne im Konsolkopf einer Brücke (SCHIEGG and BÖHNI, 2000).....	49
Bild 31:	Aufbau und Befestigung des Datenerfassungssystems (ohne Abdeckung) (SCHIEGG and BÖHNI, 2000; SCHIEGG, 2002)	49
Bild 32:	Ausführungsbeispiel der Anodenleiter auf der Bewehrung vor dem Betonieren (SODEIKAT, 2010).....	50
Bild 33:	Schematische Darstellung einer elektrischen Schlauchwaage (GEIER et al., 2014)	53
Bild 34:	Grundprinzip einer Digital-Nivelliere (INGENSAND, 1995)	54
Bild 35:	Messschema eines Tachymeters (BERGMEISTER et al., 2010)	54
Bild 36:	Prinzip der Laser-Doppler-Vibrometrie (Polytec GmbH, 2021b)	55
Bild 37:	Monitoring-System mit Schlauchwaagen (Si) an einer Straßenbrücke (REITERER et al., 2008)	56
Bild 38:	Montage einer elektronischen Schlauchwaage (REITERER et al., 2008).....	56
Bild 39:	Faser-Bragg-Gitter-Sensor an einer Brücke (TUE and DIETZ, 2005)	57
Bild 40:	Anwendungsbeispiel eines Wegaufnehmers für die Messung von Verformungen am Pfeilerkopf der Scherkondetalbrücke (MARX and WENNER, 2015) 57	
Bild 41:	Einsenkung eines Brückentragwerks in Feldmitte (oben) und zugehörige Temperatur an der Tragwerksoberfläche (unten) (GEIER et al., 2008)	58
Bild 42:	Messwerte der Wegaufnehmer im Vergleich zur Temperaturmessung (BOROS et al., 2016)	58
Bild 43:	Installationsbeispiel eines Tachymeters für Verformungsmessungen (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2015a) (Beispielsammlung Monitoring 5.2)	59
Bild 44:	Laserdistanzmessung an der ÖBB Steyrtalbrücke (links) und Reflektoren (rechts) (GEIER et al., 2016).....	61
Bild 45:	Reflektorplatte (GEIER et al., 2014)	62

Bild 46:	Laser-Distanzsensoren an der Kammerwand einer semi-integralen Rahmenbrücke (GEIER et al., 2014).....	62
Bild 47:	Installation eines laseroptischen Sensors an den Kämpfern einer Bogenbrücke in Massivbauweise (GEIER and BINDER, 2009).....	63
Bild 48:	Sensoranordnung an einer semi-integralen Rahmenbrücke (GEIER et al., 2014).....	63
Bild 49:	Montage eines elektrischen Seilzugsensors an der Fahrbahnübergangskonstruktion (MACK et al., 2016)	63
Bild 50:	Montage von Wegaufnehmern hinter dem Endverankerungsblock (BOROS et al., 2016)	64
Bild 51:	Applikation eines Neigungssensors (GEIER et al., 2016).....	66
Bild 52:	Konzept zur Ermittlung der Durchbiegung (oben) und die Positionierung der Sensoren (unten) (RETZE, 2007).....	66
Bild 53:	Installation eines Neigungssensors an der Seitenhafenbrücke (GEIER et al., 2014).....	67
Bild 54:	Neigungsmessungen an Brücken (BERGMEISTER and SANTA, 2004)	68
Bild 55:	Veränderung des Neigungswinkels aufgrund einer lokalen Schädigung (RETZE, 2007).....	68
Bild 56:	Beteiligte Verformungskomponenten bei der Bestimmung der Unterbausteifigkeit (WENNER et al., 2019)	69
Bild 57:	Prinzipielle Sensoranbringung zur Messung des Schwingverhaltens (HERRMANN, 2018).....	72
Bild 58:	Anordnung der Sensorpositionen aus geometrischer Überlagerung der Amplitudenverhältnisse der maßgebenden Eigenformen (RETZE, 2007).....	73
Bild 59:	Aufstellpositionen zweier Schwingerreger (Long-Stroke-Shaker) sowie der Beschleunigungssensoren zur Detektion verschiedener maßgebender Eigenformen (REITERER and LACHINGER, 2020)	73
Bild 60:	Installation eines Beschleunigungssensor mit Klebemittel (PIRSKAWETZ et al., 2022).....	74
Bild 61:	Befestigung eines Beschleunigungssensors mittels einer Stahlplatte und Schrauben (GEIER et al., 2006)	74
Bild 62:	Temperaturabhängigkeit der ersten Biegeeigenfrequenzen einer Brücke in Massivbauweise nach (PEETERS, 2000)	76
Bild 63:	Temperaturmessungen an einer Hohlkastenbrücke (PEETERS, 2000).....	77
Bild 64:	Wegaufnehmer am Riss zur Erfassung der Rissdoppelamplitude (WEIHER et al., 2015).....	78
Bild 65:	Aliasing-Effekt (BERGMEISTER et al., 2015)	79
Bild 66:	Installation eines Dehnungsmessstreifens auf Baustahl (links) und auf Bewehrungsstahl (rechts) (KROHN, 2014).....	80
Bild 67:	DMS auf Spanndraht nahe der Kopplung nach (KROHN, 2014)	81

Bild 68:	Lageskizze des DMS (oben), und DMS am Spannstahl (unten) (KROHN, 2014)..	81
Bild 69:	Induktiver Wegaufnehmer zur integralen Messung mit 50 cm Messabstand (KROHN, 2014).....	81
Bild 70:	Videoabgleich zur Interpretation gemessener Dehnungsschwingbreiten (SANIO et al., 2014)	83
Bild 71:	Beispiel für Rissbreitenmessung während einer Lkw-Überfahrt (ZILCH et al., 2009).....	83
Bild 72:	Funktionsprinzip eines Wegaufnehmers (BERGMEISTER et al., 2015)	84
Bild 73:	Installation eines Wegaufnehmers an einer Koppelfuge (Quelle: Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart).....	85
Bild 74:	Systembeschreibung des photogrammetrischen Rissmonitorings an der Alvik-Brücke in Stockholm (BERNSTONE and HEYDEN, 2009)	86
Bild 75:	Installation von DMS auf Beton (SCHACHT et al., 2013).....	87
Bild 76:	Sensoranordnung an den Verankerungsblöcken (BOROS et al., 2016).....	90
Bild 77:	Dehnungsmessstreifen montiert auf Spannstab (BOROS et al., 2016).....	90
Bild 78:	Veränderung der magnetischen Hystereseschleife eines Spannstahls unter Zugbeanspruchung (BUDELMANN et al., 2009).....	92
Bild 79:	Schnitt durch einen magnetoelastischen Sensor (BUDELMANN et al., 2009)	93
Bild 80:	Magnetoelastischer Sensor am Spannanker (BUDELMANN et al., 2009).....	93
Bild 81:	Amplituden der Spanngliedschwingung im Frequenzschrieb (ZILCH et al., 2009)	94
Bild 82:	Blockschaltbild der iBMB/MPA-Messanlage zur Auslesung von bis zu 24 magnetoelastischen Sensoren (BUDELMANN et al., 2009)	94
Bild 83:	Montage magnetoelastischer Sensoren zur Kraftmessung (GLÄSER et al., 2014)	95
Bild 84:	Befestigung der Beschleunigungssensoren auf runden Hüllrohren (links) und rechteckigen Hüllrohren (rechts) (RIAD, 2006a).....	96
Bild 85:	Befestigung des Beschleunigungssensors auf einem Schrägseil (GEIER and PETZ, 2004).....	96
Bild 86:	Anordnung der Sensoren im Grundriss und die aufgezeichneten Signale bei Drahtbruch (Nr. 3) (FRICKER and VOGEL, 2010).....	99
Bild 87:	Schallsignal (Amplituden/Zeitverlauf) (SODEIKAT et al., 2019)	100
Bild 88:	Anordnung der Sensoren sowie Zeit-Amplituden-Kurven des an der Stenertbrücke erzeugten Drahtbruchsignals (Referenzsignal) (KÄDING et al., 2019b)	100
Bild 89:	Untersuchung der Transmissionseigenschaften verschiedener Kopplungsmittel (KÄDING et al., 2019a)	101
Bild 90:	Anordnung der AE-Sensoren an Magnethaltern (links) und eines externen Vorverstärkers (rechts) (PIRSKAWETZ et al., 2022).....	102

Bild 91:	Beispiel für den UAS-Einsatz bei Brückeninspektionen (MORGENTHAL et al.).	106
Bild 92:	Beispiel für eine Flugroutenplanung (MORGENTHAL et al.).....	106
Bild 93:	Beispiel typischer Störquellen (MORGENTHAL et al.)	108
Bild 94:	OFDR Messprinzip verteilter faseroptischer Sensoren (nach LUNA Innovations Inc.) (SAMIEC, 2011)	109
Bild 95:	Anordnung der faseroptischen Sensoren am Träger (ZDANOWICZ et al., 2022)	110
Bild 96:	Dehnungsmessung der faseroptischen Sensoren über einen Zeitraum weniger Minuten (ZDANOWICZ et al., 2022).....	110
Bild 97:	Exemplarischer Vergleich der Dehnungsmessergebnisse der verteilten faseroptischen Sensoren mit den Rechenergebnissen aus dem FE-Modell für die Lastfälle Eigengewicht und Schwinden (SIENKO et al., 2021).....	110
Bild 98:	Auswahl handelsüblicher Messfasern (NOVÁK et al., 2021).....	111
Bild 99:	Einsatzbeispiel der faseroptischen Sensoren zur Messung in zwei orthogonalen Richtungen (Schramm and Fischer, 2019).....	111
Bild 100:	Installationsmöglichkeit in einer Nut nahe der Stegunterkante (NOVÁK et al., 2021).....	112
Bild 101:	Die 96 aufgebrauchten Stoßimpulse und die 5 Referenzmesspunkte R1-R5 auf der Gärtnerplatzbrücke in Kassel bei den Vorversuchen (LINK et al., 2008)	113
Bild 102:	Erddruckaufnehmer (GEIER et al., 2014)	114
Bild 103:	Beispiel für die Installation eines Erddruckaufnehmers (VILL et al., 2022).....	114
Bild 104:	Vorgesehene Nische für die Monitoringzentrale am Widerlager an der Seitenhafenbrücke in Wien (GEIER et al., 2014).....	115
Bild 105:	Übersicht über den theoretischen Widerstand anhand der Brückenklasse (Länderabfrage)	117
Bild 106:	Übersicht über die Baustoffe der überwachten Brücken (Länderabfrage).....	117
Bild 107:	Übersicht über die Bauart der überwachten Brücken (Länderabfrage).....	117
Bild 108:	Übersicht über den theoretischen Widerstand anhand der Brückenklasse (Länderabfrage)	118
Bild 109:	Übersicht über den Anlass des Monitorings (Länderabfrage)	118
Bild 110:	Dauer des Monitorings (Länderabfrage)	119
Bild 111:	Übersicht der verwendeten Messtechnik (Länderabfrage)	120
Bild 112:	Übersicht über Datenerfassung und Datenübertragung (Länderabfrage)	120
Bild 113:	Baujahr der Bauwerke (Fragebögen).....	120
Bild 114:	Brückenklassen (Fragebögen).....	121
Bild 115:	Hauptbaustoff (Fragebögen)	121

Bild 116: Verwendete Messtechnik (Messung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung).....	121
Bild 117: Verwendete Messtechnik (Feuchtigkeitsmessung)	122
Bild 118: Verwendete Messtechnik (Korrosionsmessung)	122
Bild 119: Verwendete Messtechnik (Überwachung der Tragwerksverformungen)	123
Bild 120: Verwendete Messtechnik (Messung von Verschiebungen)	123
Bild 121: Verwendete Messtechnik (Messung von Neigungsänderungen)	124
Bild 122: Verwendete Messtechnik (Messung des Schwingverhaltens).....	124
Bild 123: Verwendete Messtechnik (Messung der tatsächlichen Schwingbreite)	124
Bild 124: Verwendete Messtechnik (Rissbreitenmessung).....	125
Bild 125: Verwendete Messtechnik (Dehnungsmessung)	125
Bild 126: Verwendete Messtechnik (Schallemissionsanalyse).....	126
Bild 127: Leistungsbeschreibung der Ausschreibung	126
Bild 128: Beschreibung der technischen Daten in der Leistungsbeschreibung	127
Bild 129: Anforderungen an die Ausführung des Messsystems in der Leistungsbeschreibung	128
Bild 130: Anforderungen an das Datenmanagement in der Leistungsbeschreibung	128
Bild 131: Beschreibung und Anforderungen an die Installation in der Leistungsbeschreibung	129
Bild 132: Beschreibung und Anforderungen an die Inbetriebnahme in der Leistungsbeschreibung	129
Bild 133: Beschreibung und Anforderungen an Wartung und Betrieb in der Leistungsbeschreibung	130
Bild 134: Bewertung der Vergleichbarkeit der Angebote auf Grundlage einer funktionalen oder detaillierten Leistungsbeschreibung	131
Bild 135: Ausschreibung des Fachplaners Monitoring und der Monitoringleistung.....	131
Bild 136: Lebenszyklus des Bauwerks, in dem ein Bauwerksmonitoring erforderlich wurde	131
Bild 137: Notwendigkeit bzw. Anlass des Monitorings.....	132
Bild 138: Dauer des Monitorings.....	133
Bild 139: Einschätzung der Komplexität der Aufgabenstellung	133
Bild 140: Art der Leistungsbeschreibung in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung.....	133
Bild 141: Beteiligte Akteure bei der Definition der Fragestellung und Überprüfung der Machbarkeit in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)	134
Bild 142: Beteiligte Akteure bei der Erstellung des Monitoringkonzepts in Abhän-	

gigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)	135
Bild 143: Beteiligte Akteure bei Ausschreibung und Vergabe in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)	135
Bild 144: Beteiligte Akteure bei der Auswahl des Messverfahrens und Festlegung der Kriterien des Messverfahrens in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)	136
Bild 145: Beteiligte Akteure bei der Erstellung der Ausführungsplanung in Abhängigkeit der Komplexität der Aufgabenstellung (einfach, komplex)	136
Bild 146: Beteiligte Akteure beim Betrieb der Messanlage	137
Bild 147: Beteiligte Akteure bei der Wartung der Messanlage.....	137
Bild 148: Messtechnische Herausforderungen während des Monitoringbetriebs	138
Bild 149: Erforderliche Austauschmaßnahmen während des Monitoringbetriebs	138
Bild 150: Beteiligte Akteure bei der Auswertung der Messergebnisse.....	138
Bild 151: Beteiligte Akteure bei der Bewertung der Messergebnisse	139
Bild 152: Datenübergabe und Datenarchivierung beim Bauherrn	139
Bild 153: Datenverarbeitung der übergebenen Daten	139
Bild 154: Festlegung der Datenübergabe in der Leistungsbeschreibung.....	140
Bild 155: Verfügbarkeit der Daten beim Baualtträger	140

Tabellen

Tab. 1:	Übersicht der Messziele und beschriebener Messverfahren in Kapitel	15
Tab. 2:	Mögliche Kriterien und Kenngrößen einer detaillierten Leistungsbeschreibung	23
Tab. 3:	WIM-Systeme und Sensorarten (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009)	25
Tab. 4:	Typische Messwerte für Korrosion und die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten - Bereiche des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der erwarteten Korrosionsrate (ANDRADE, 2020).....	52
Tab. 5:	Bereiche der Korrosionsrate in Bauwerken - Typische Messwerte (ANDRADE, 2020)	52
Tab. 6:	Montagemöglichkeiten von Beschleunigungssensoren (Kistler Instrumente GmbH).....	74

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

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

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

Purtak, Möbius

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

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

Staeck

€ 15,00

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

Freundt, Böning, Fischer, Lau

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

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

Windmann

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

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

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

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

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

Schreck, Decker, Wawrzyniak

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

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten

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

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

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

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

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

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brenninger, Zulauf, Locher

€ 18,00

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

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag

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

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

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens

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

2023

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

Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund

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

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

Friedrich

€ 18,00

B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau

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

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

Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt

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

B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, 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 Entwicklung 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.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

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



ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-777-8
<https://doi.org/10.60850/bericht-b197>

www.bast.de