

**Intelligente Brücke –
Machbarkeitsstudie für
ein System zur
Informationsbereit-
stellung und ganzheit-
lichen Bewertung
in Echtzeit für
Brückenbauwerke**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 105

bast

Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereit- stellung und ganzheit- lichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke

von

Martina Schnellenbach-Held
Björn Karczewski
Oliver Kühn

Universität Duisburg-Essen,
Institut für Massivbau

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 Öffentlichkeitsarbeit.

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

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

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0509/2011/GRB:
Intelligente Bauwerke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke

Fachbetreuung:
Tabea Neumann

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
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 978-3-95606-090-8

Bergisch Gladbach, Mai 2014

Kurzfassung · Abstract

Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke

Der Bericht enthält die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für das von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) vorgeschlagene System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke, welches im Rahmen des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ entwickelt werden soll. Das System soll auf Grundlage von während einer Bauwerksüberwachung erfassten Messgrößen Informationen wie z. B. Bauwerksschäden feststellen und diese bei der Bewertung des Bauwerks einbeziehen.

Zu Beginn des Berichts werden die grundlegenden Komponenten von Überwachungssystemen erläutert: Diese bestehen aus (1) einer Komponente zur Datenakquisition, die die Sensoren sowie Techniken zur Übertragung, Erfassung und Speicherung der Messdaten umfasst, (2) einer Komponente zur Gewinnung von Informationen aus den Messdaten und (3) einer Komponente zur Bewertung des Bauwerkszustands.

Einen weiteren Schwerpunkt des Berichtes bildet die Darstellung von Konzepten, die bei Überwachungsmaßnahmen in anderen Ingenieurdisziplinen zum Einsatz kommen. Diese werden hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf den Brückenbau beurteilt.

Darüber hinaus werden Anforderungen an die einzelnen Komponenten eines Systems zur Informationsbereitstellung und Bewertung definiert, wobei die Datenakquisition, die Modellierung von Brückenbauwerken sowie die Integration des Systems in das Erhaltungsmanagement im Vordergrund stehen.

Im Rahmen einer Anwendungsanalyse werden Konzepte zur Identifikation und Überwachung der im Brückenbau relevanten Schäden aufgezeigt. Darüber hinaus wird die Umsetzbarkeit des geplanten Systems zur Informationsbereitstellung und Bewertung unter Berücksichtigung derzeitig und zukünftig einsetzbarer Technologien beurteilt. Anhand von Beispielen werden einige Möglichkeiten der Bauwerksüberwachung veranschaulicht.

Abschließend werden Vorschläge zur Fortführung des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ unterbreitet.

Intelligent bridge – feasibility study for a system for the provision of information and holistic assessment in real time for bridge structures

This report contains the results of a feasibility analysis of a system for information and holistic evaluation in real-time for bridge structures proposed by the "Bundesanstalt für Straßenwesen" (BAST), which is subjected being developed within the key project "Intelligent Bridges". Based on data measured during a structural health monitoring campaign the system should be able to capture information such as damages and include them in the evaluation of the buildings' integrity.

Monitoring systems mainly consist of (1) a data acquisition component, which includes the sensors and also techniques for transmitting, gathering and storing the data, (2) a component for extracting information from the measured data and (3) a component for the assessment of the structure.

Another focus of this report was set on the detailed description of concepts that are utilized for monitoring purposes of miscellaneous engineering disciplines. The transferability of these concepts to bridge structures is validated.

Furthermore, requirements to a system for information and holistic evaluation in real-time for bridge structures are defined. In particular, the data acquisition, bridge modeling and the integration of the system into the maintenance management are examined.

In the context of an application analysis concepts for identifying and monitoring common damages of bridge structures are shown. Based on present and future technologies, the implementation of the proposed system for information and holistic evaluation is assessed. By means of examples some possibilities for structural health monitoring are presented.

Finally, further research in the context of the key project "Intelligent Bridges" is suggested.

Inhalt

1	Einleitung	4			
2	Überwachung von Brückenbauwerken.....	4			
2.1	Besonderheiten von Brückenbauwerken	5			
2.2	Bestimmung des Bauwerkszustands.....	7			
2.2.1	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	7			
2.2.2	A-priori-Modellierung.....	7			
2.2.3	Kalibrierung des A-priori- Modells.....	8			
2.3	Datenakquisition	8			
2.3.1	Sensoren zur Erfassung von Bauwerkparametern.....	8			
2.3.2	Sensoren zur Erfassung von Einwirkungsparametern	14			
2.3.3	Datenübertragung	15			
2.3.4	Datenerfassungssystem	15			
2.3.5	Datenspeicherung.....	16			
2.3.6	Drahtlose Sensornetze	16			
2.4	Informationsgewinnung.....	17			
2.4.1	Grundlagen	17			
2.4.2	Globale Bauwerksüberwachung	19			
2.4.3	Lokale Bauwerksüberwachung	27			
2.5	Bewertung.....	29			
2.6	Fallbeispiele für Überwachungssysteme von Brückenbauwerken	31			
2.6.1	Westendbrücke, Berlin.....	31			
2.6.2	Reichsbrücke, Österreich	31			
2.6.3	Europabrücke, Österreich.....	31			
2.6.4	Øresundbrücke (Dänemark / Schweden)	32			
2.6.5	Ponte da Lezíria, Portugal	32			
2.6.6	Zhanjiang-Bay-Brücke, China.....	32			
2.6.7	Brücken in Hongkong	33			
2.6.8	Confederation-Brücke, Kanada	33			
2.6.9	Kings-Stormwater-Brücke, USA	34			
2.7	Zusammenfassung.....	34			
3	Sonstige Überwachungskonzepte und Anwendungen	35			
3.1	Tunnelbau.....	35			
3.1.1	Einleitung	35			
3.1.2	Messverfahren	35			
3.1.3	Schadenserkennung.....	36			
3.1.4	Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau	36			
3.2	Windenergieanlagen	37			
3.2.1	Einleitung	37			
3.2.2	Schadenserkennung.....	37			
3.2.3	Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau	39			
3.3	Hochhäuser und Türme.....	39			
3.3.1	Einleitung	39			
3.3.2	Fallbeispiele für Überwachungsmaßnahmen an Türmen und Hochhäusern	39			
3.4	Talsperren	41			
3.4.1	Einleitung	41			
3.4.2	Schadenserkennung.....	41			
3.4.3	Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau	42			
3.5	Kernkraftwerke	42			
3.5.1	Einleitung	42			
3.5.2	Schadenserkennung.....	42			
3.5.3	Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau	44			
3.6	Rotierende Maschinen	45			

3.6.1	Einleitung	45	3.10.6	Übertragbarkeit der Konzepte.....	64
3.6.2	Schadenserkenung	45			
3.6.3	Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau	46	3.11	Übertragbare Technologien von Überwachungssystemen	65
3.7	Offshore-Plattformen.....	46	4	Anforderungen an ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke	66
3.7.1	Einleitung	46			
3.7.2	Schadenserkenung	47			
3.7.3	Risikobasierte Inspektionsplanung	49	4.1	Intelligente Datenakquisition.....	68
3.7.4	Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau	50	4.1.1	Sensoren zur Schadenserkenung.....	68
3.8	Automobilbau	50	4.1.2	Sensoren zur Identifikation von Verkehrslasten	71
3.8.1	Einleitung	50	4.1.3	Überwachung der Sensorfunktion.....	71
3.8.2	Übersicht der Anwendungsbereiche von Sensoren im Automobilbau.....	51	4.1.4	Drahtgebundene Sensornetze.....	73
3.8.3	Videobasierte Fahrerassistenzsysteme	52	4.1.5	Drahtlose Sensornetze	73
3.8.4	Zustandsüberwachung.....	53	4.2	Intelligente Brückenmodellierung	75
3.8.5	Car-as-Sensor-Konzepte	54	4.2.1	Ausgangslage	76
3.8.6	Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau	54	4.2.2	Objekte und Klassen.....	76
3.9	Luftfahrt.....	55	4.2.3	Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA).....	77
3.9.1	Einleitung	55	4.2.4	Objekthierarchie.....	77
3.9.2	Schadenserkenung	55	4.2.5	Objektmodell.....	78
3.9.3	SHM-Strategien bei Flugzeug-Strukturen	56	4.2.6	Reaktionen.....	81
3.9.4	Monitoringverfahren	57	4.2.7	Verknüpfung zwischen Brückenmodell und einem Finite-Elemente-Modell.....	81
3.9.5	Probabilistische Verfahren	59	4.2.8	Intelligente Bewertungsverfahren.....	82
3.9.6	Übertragbarkeit der Konzepte	59	4.3	Erhaltungsmanagement von Brückenbauwerken	85
3.10	Raumfahrt	60	4.4	Schnittstellen	87
3.10.1	Einleitung	60	5	Machbarkeitsstudie / Anwendungsanalyse	87
3.10.2	Schadenserkenung	61			
3.10.3	Sensoren und Monitoringverfahren	61	5.1	Anwendungsanalyse	87
3.10.4	Anwendungen von Monitoringsystemen.....	62	5.1.1	Entwicklung geeigneter bauwerksspezifischer Überwachungskonzepte	88
3.10.5	Probabilistic Risk Assessment.....	64			

5.1.2	Übersicht häufig auftretender Schäden bei Brückenbauwerken aus Beton.....	88
5.1.3	Konzepte zur Identifikation und Überwachung von häufig bei Betonbrücken auftretenden Schäden	88
5.1.4	Besonderheiten bei der Überwachung von Bestandsbauwerken	93
5.2	Machbarkeitsstudie.....	94
5.2.1	Datenakquisition	94
5.2.2	Informationsgewinnung.....	95
5.2.3	Bewertung.....	96
5.3	Beispielszenario zur Bauwerksüberwachung	96
5.3.1	Brückenbauwerk	96
5.3.2	Überwachungssystem	97
5.4	Anwendung künstlicher neuronaler Netze bei der Schadenserkennung	98
5.4.1	Erzeugung von Messdaten	98
5.4.2	Künstliche neuronale Netze.....	99
5.4.3	Schadenserkennung.....	100
6	Fortführung des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“	103
7	Zusammenfassung	113
8	Literatur	114

1 Einleitung

Mobilität, d. h. die Beweglichkeit von Personen und Gütern, ist Grundvoraussetzung für wirtschaftliches Wachstum und Beschäftigung. Hierbei spielt das Bundesfernstraßennetz – das Netz der Bundesautobahnen und Bundesstraßen – eine entscheidende Rolle. Das Bundesfernstraßennetz stellt mit einer Gesamtlänge von etwa 53.500 km das dichteste Fernstraßennetz in Europa dar [BMVBS07] und weist ein Anlagevermögen von rund 230,8 Milliarden Euro auf [BAST11]. In der Bundesrepublik Deutschland werden fast 50 % der gesamten Fahrleistungen über die Bundesfernstraßen abgewickelt. Die Erhaltung der Qualität und damit der Leistungsfähigkeit des bestehenden Straßennetzes ist daher ein wichtiges Ziel zur Sicherung der Mobilität. Allein für die Erhaltung der Bundesfernstraßen sieht der Bundesverkehrswegeplan 2003 [BMVBS03] für den Zeitraum von 2011 bis 2015 eine Gesamtinvestition von rund 12,5 Milliarden Euro vor.

Im Fernstraßennetz der Bundesrepublik Deutschland befinden sich derzeit etwa 38.000 Brücken mit einem Anlagevermögen von etwa 40 Milliarden Euro [BMVBS06]. Zur Erhaltung dieser Brücken sollen in den Jahren 2011 bis 2015 rund 2,9 Milliarden Euro [BTD17/5325] eingesetzt werden. Um die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel effektiv zur Sicherung des Nutzwertes, der Gebrauchstauglichkeit und der Sicherheit der vorhandenen Bausubstanz einsetzen zu können, ist eine zuverlässige Erfassung des Zustands (und damit möglicher Schäden) der Brückenbauwerke erforderlich.

Die Prüfung von Brückenbauwerken hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit ist in der Bundesrepublik Deutschland in DIN 1076 [DIN1076] geregelt. Mit den Bauwerksprüfungen wird das Ziel der rechtzeitigen Erkennung etwaiger Mängel und Schäden verfolgt. Die Prüfungen werden in regelmäßigen zeitlichen Abständen von sachkundigen Ingenieuren vorgenommen, meist durch Inaugenscheinnahme und „Abklopfen“ der Bauteiloberflächen. Das beschriebene herkömmliche Vorgehen zur Bestimmung von Schäden an Brückenbauwerken weist im Wesentlichen folgende Schwächen auf:

- Schäden, die zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgetreten sind, können erst zum Zeitpunkt der nächsten Brückenprüfung, also mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung, erkannt werden.
- Schäden, die im Innern des Bauwerks auftreten und dadurch äußerlich nicht sichtbar sind, oder Schäden an unzugänglichen Stellen werden unter Umständen erst spät oder gar nicht erkannt.

- Die Ergebnisse der Bauwerksprüfungen sind in starkem Maße abhängig vom Wissen und der Erfahrung der beteiligten Ingenieure und somit subjektiv geprägt.

Zur Unterstützung der herkömmlichen Bauwerksprüfungen verfolgt die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) das Konzept „Intelligente Bauwerke – Adaptive Systeme zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit“. Das Ziel dieses Konzeptes ist die Entwicklung von (Überwachungs-)Systemen, welche es gestatten, relevante Informationen über Einwirkungs- und Widerstandsgrößen direkt am Bauwerk zu erfassen und diese ganzheitlich und in Echtzeit zu bewerten. Hierbei sollen nicht nur der aktuelle Zustand des Bauwerks bestimmt, sondern durch den Einsatz von Prognosemodellen auch zukünftige Entwicklungen vorausgesagt werden. In Kombination mit bekannten Informationen aus Bauwerksdatenbanken sollen die gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage für ein zuverlässigkeitsorientiertes und zustandsbasiertes Echtzeit-Betriebsmanagement bilden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die konzeptionelle Entwicklung eines solchen Systems zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke evtl. auf Basis der Übertragung derartiger Konzepte aus anderen Ingenieurbereichen, die Definition von Anforderungen, die Evaluierung der Umsetzbarkeit sowie das Aufzeigen von weiterem Forschungsbedarf.

2 Überwachung von Brückenbauwerken

Die Überwachung von Strukturen (Structural Health Monitoring, SHM) dient im Allgemeinen der zerstörungsfreien Bestimmung

- der nutzungs- und umweltbedingten Einwirkungen auf ein System,
- der Schäden, die von diesen Einwirkungen verursacht werden und
- der Akkumulation von Schäden während der Nutzung des Systems sowie der zukünftigen Leistungsfähigkeit des Systems in Folge der akkumulierten Schäden [ADAM07].

Das vorrangige Ziel beim Einsatz von Überwachungssystemen ist die frühzeitige Detektion und Identifikation von Schäden. Die Grundlage dabei bildet die Annahme, dass Schädigungsprozesse physikalische oder chemische Veränderungen der Eigenschaften oder des mechanischen Verhaltens einer Struktur – im Folgenden allgemein mit „Pa-

parameter“ bezeichnet – hervorrufen, die sich wiederum auf direkte oder indirekte Art und Weise durch Einsatz geeigneter Sensorik messen bzw. mit Hilfe mathematischer Modelle bestimmen lassen. Weiterhin wird angenommen, dass Veränderungen in diesen Parametern den Schluss auf bestimmte Schädigungsprozesse zulassen. SHM-Methoden sollten möglichst während der planmäßigen Nutzung und Beanspruchung des Systems, d. h. online, eingesetzt werden [WODU04].

Überwachungssysteme bestehen, wie in Bild 1 dargestellt, im Wesentlichen aus

- einer Komponente zur Akquisition von Messdaten (Kapitel 2.3),
- einer Komponente zur Gewinnung von Informationen aus den Messdaten (Kapitel 2.4),
- einer Komponente zur Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse sowie zur Prognose (Kapitel 2.5).

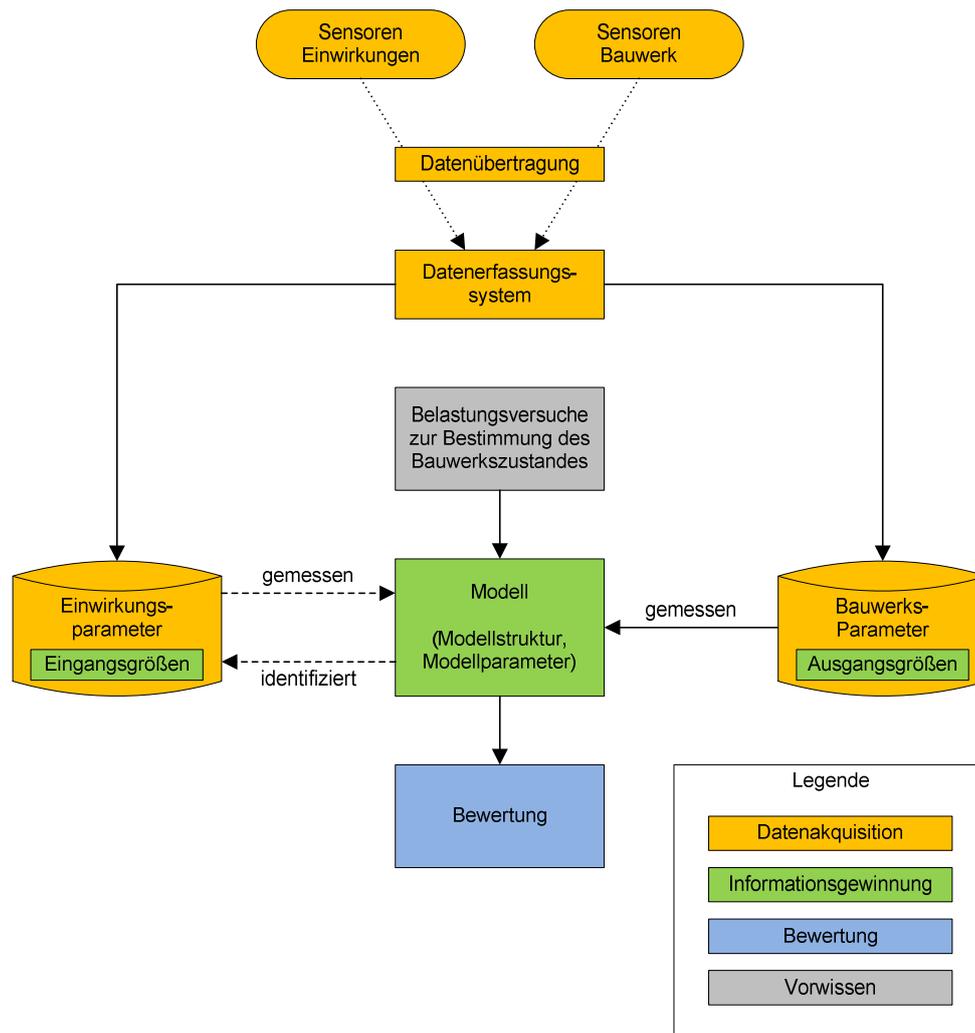


Bild 1: Wesentliche Bausteine eines Überwachungssystems für Brückenbauwerke

2.1 Besonderheiten von Brückenbauwerken

Die Überwachung von Bauwerken, insbesondere von Brücken, stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar [BT04]. Brückenbauwerke weisen eine Vielzahl von Besonderheiten auf, die bei der Entwicklung von Überwachungssystemen berücksichtigt werden müssen. Je schwerwiegender diese Besonderheiten missachtet werden, desto größer

werden die Fehler in den Ergebnissen [MOAK06]. Um die Funktion und Zuverlässigkeit von Überwachungssystemen zu verifizieren, sollten diese daher nicht nur im Rahmen von numerischen Simulationen oder Laborversuchen, sondern insbesondere an realen Brückenbauwerken unter tatsächlichen Bedingungen erprobt werden [CAFA04]. Die wesentlichen Besonderheiten von Brückenbauwerken sind im Folgenden beschrieben (siehe auch [ASCE11, MOAK06]).

Bauwerke werden häufig unter Einsatz verschiedenster Materialien und Querschnitte unterschiedlicher Eigenschaften konstruiert. Der Baustoff Beton, das in Deutschland im Brückenbau am häufigsten verwendete Konstruktionsmaterial, weist bereits auf Materialebene eine sehr heterogene Struktur auf.

Die Boden-Bauwerk-Interaktion ist abhängig von den vorherrschenden Belastungs-, Bodenfeuchte- und Temperaturbedingungen. Die tatsächlichen Steifigkeiten der Brückenaufleger (horizontale und vertikale Stützung, Teileinspannungen) sind daher mit Unsicherheiten behaftet.

Ebenfalls schwierig zu erfassen sind die Kontinuitätsbedingungen zwischen den Traggliedern eines Bauwerks [MOAK06]. Planmäßig starre Anschlüsse (z. B. Einspannungen) oder Verbindungen zwischen verschiedenen Bauteilen (z. B. Schubdübel im Verbundbrückenbau, siehe auch [GOKS10]) weisen häufig nicht das geplante ideal starre Verhalten auf. D. h., es existiert keine vollständige, sondern nur eine teilweise Kontinuität. Im Gegensatz dazu ist bei planmäßig gelenkigen Anschlüssen häufig keine vollständige Unterbrechung der Kontinuität möglich, weshalb es hier ebenfalls zu einer teilweisen Übertragung von Schnittgrößen kommt.

Auf Grund der statischen Unbestimmtheit von Brückenbauwerken rufen die häufig starken Temperaturschwankungen, denen die Bauwerke ausgesetzt sind, Zwangsbeanspruchungen und demnach Änderungen der Tragwerksreaktionen hervor.

Brückenbauwerke weisen häufig physikalische oder geometrische Nichtlinearitäten auf. Auch bestimmte Arten von Schäden können sich nichtlinear auf das Strukturverhalten auswirken, z. B. „atmende“ Risse, die sich bei Belastung öffnen und bei Entlastung wieder schließen [FRIS07].

Eines der größten Probleme bei der Überwachung von Brückenbauwerken sind die zeitlich veränderlichen (instationären) Beanspruchungen aus Temperatur, Feuchtigkeit, Wind und Verkehrslasten und die daraus resultierenden Änderungen der Bauwerkseigenschaften [SOHN07]: (1) Der Einfluss von Temperaturänderungen auf die dynamischen Eigenschaften eines realen Brückenbauwerks wird in [FDCS97] verdeutlicht. Messungen an der Alamosa Canyon Bridge in New Mexico haben gezeigt, dass die Grundfrequenz des Bauwerks im Laufe eines 24-stündigen Messzeitraums in Folge von Änderungen der Fahrbahntemperatur um bis zu 5 % variiert. Im Rahmen einer Dauerüberwachung der Z24-Brücke in der Schweiz wurde ferner beobachtet, dass die Grundfrequenz des Bauwerks bei einer Abnahme der Temperatur der Fahrbahnoberfläche von 0 °C auf -5 °C um ca.

10 % zunimmt. Dies wurde auf die starke Steifigkeitszunahme des Asphalts bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts zurückgeführt. Bei höheren Temperaturen ist der Einfluss des Asphalts dagegen vernachlässigbar [PEMD01]. (2) In [SDSK99] wird erwähnt, dass Betonbrücken bei feuchten Wetterverhältnissen eine nicht zu vernachlässigende Menge von Wasser aufnehmen, was zu einer Erhöhung ihrer Masse und somit zu einer Beeinflussung ihrer dynamischen Eigenschaften führt. (3) Ergebnisse einer Studie zur Auswirkung der Fahrzeuggewichte auf das dynamische Verhalten einer Brücke finden sich in [KJKY99]. Messungen an einer Brücke mit einer Spannweite von 46 m bestätigten, dass die Eigenfrequenzen der Struktur auf Grund zusätzlich wirkender Fahrzeuggewichte um mehr als 5 % variieren können.

Bauwerke sind meist „maßgefertigte“ Systeme, für die verallgemeinerte Aussagen nur schwierig zu formulieren sind. Dies erschwert den Aufbau von Datenbanken mit Schadenssignaturen, wie es bei der Schadenserkenkung rotierender Maschinen praktiziert wird.

Auf Grund ihrer Größe und Struktur ist es schwierig, Brückenbauwerke – vor allem weitgespannte Hänge- oder Schrägseilbrücken – gezielt zu Schwingungen anzuregen. Dies gilt insbesondere für die zur Erkennung von Schäden wichtigen höheren Eigenfrequenzen.

Brückenbauwerke können eine Vielzahl unterschiedlicher Schädigungen an unterschiedlichen Stellen aufweisen. Zudem wirken sich wechselnde Umwelt- und Betriebszustände meist deutlicher auf die Tragwerksreaktionen aus als Schädigungsprozesse, wodurch mögliche Schäden „verdeckt“ werden können [SOHN07].

Verschiedene Einflüsse schränken die Datenerfassung bei der Überwachung von Brückenbauwerken ein: (1) Durch die endliche Anzahl der eingesetzten Sensoren können die zu messenden Parameter nur diskret erfasst werden, weshalb sich kontinuierliche Verläufe in den Parametern nicht vollständig beschreiben lassen. (2) Die Qualität der Messwerte ist abhängig von der Messgenauigkeit der verwendeten Sensoren. Besonders sensitive Messaufnehmer reagieren jedoch ebenso empfindlich auf wechselnde Umwelteinflüsse [WFMP07]. (3) An Brücken gewonnene Messaufzeichnungen sind im Allgemeinen durch Rauschen gestört [FRIS07], was insbesondere bei schwachen Signalen zu einem ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio) führt.

2.2 Bestimmung des Bauwerkszustands

Vor der Entwicklung und Einrichtung eines Systems zur Dauerüberwachung sollte zunächst der gegenwärtige Zustand des zu überwachenden Bauwerks bestimmt werden. Das Vorgehen dazu ist in Bild 2 dargestellt. Zur Zustandsbestimmung sind sämtliche bekannten Informationen über das

Bauwerk zusammenzutragen, zu begutachten und zu bewerten.

Zur Überprüfung von Bestandsplänen und zur Aktualisierung des Brückenmodells kann die Bauwerksgeometrie sehr einfach, schnell und präzise mit Hilfe von 3D-Laserscannern erfasst und in ein 3-dimensionales CAD-Modell überführt werden [UBBE12, CLAU11].

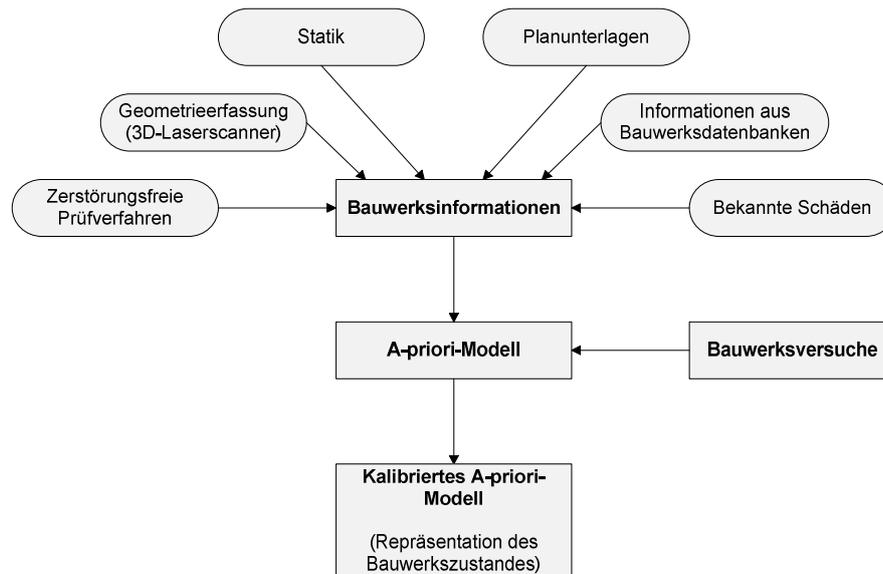


Bild 2: Vorgehensweise bei der Erfassung des Bauwerkszustands

2.2.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die Bauzustandsanalyse kann wirkungsvoll durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP; Nondestructive Testing, NDT) unterstützt werden. Diese Verfahren ermöglichen detaillierte Untersuchungen bereits geschädigter Bereiche sowie potentieller Schwachstellen, wobei auch oberflächlich nicht sichtbare Schäden erkannt und identifiziert werden können. Da jedoch ihr Wirkungsbereich in der Regel lokal stark begrenzt ist, ist die Anwendung der Methoden erst dann wirtschaftlich, wenn ein Schaden bereits im Vorfeld erkannt und lokalisiert wurde [FAWO07]. Eine weitere Voraussetzung für die Anwendbarkeit zerstörungsfreier Prüfverfahren ist die Zugänglichkeit der entsprechenden Stelle am Bauwerk. Zur Untersuchung eines Bauteilbereichs ist neben spezieller und häufig teurer Ausrüstung ebenso geschultes Personal erforderlich, welches die Messungen vor Ort (manuell) durchführt und die gewonnenen Daten auswertet [ADAM07]. Zerstörungsfreie Prüfmethode können ergänzend im Rahmen herkömmlicher Bauwerksprüfungen eingesetzt werden. Im Folgenden sind einige baupraktisch relevante Verfahren genannt (siehe auch [TAWI10]):

- **Akustische Verfahren** (z. B. Ultraschall-Verfahren, Impakt-Echo-Verfahren),
- **elektromagnetische Verfahren** (z. B. Radar, Infrarot-Thermografie, Radiografie),
- **elektrochemische Verfahren** (z. B. Potentialverfahren),
- **magnetische Verfahren** (z. B. Remanenzmagnetismusverfahren),
- **spektroskopische Verfahren** (z. B. Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie).

Da sich zerstörungsfreie Prüfmethode nur eingeschränkt in ein automatisiertes Überwachungskonzept einbinden lassen, wird an dieser Stelle auf eingehende Beschreibungen verzichtet und stattdessen auf entsprechende Literatur verwiesen, z. B. [WAHA12, DAFSTB06, DGZFP10, WITA04, YANA07, WACF01].

2.2.2 A-priori-Modellierung

Vor der Einrichtung eines Überwachungssystems empfiehlt sich auf Basis der zuvor zusammengeführten Bauwerksinformationen die Entwicklung eines physikalischen A-priori-Modells (Baseline-

Modell), z. B. mit der Finite-Elemente-Methode (FEM). Dieses Modell dient der Erfassung des mechanischen Tragverhaltens des Bauwerks sowie der Identifikation potentieller Schwachstellen und bildet die Grundlage für den Entwurf eines geeigneten Überwachungskonzepts [ASCE11]. Außerdem kann das Modell, insbesondere zur Erfassung des Bauwerkszustands auf Grundlage des dynamischen Tragverhaltens, die Auswahl geeigneter Messorte für die Schwingungsmessung unterstützen [ROCA11]. Je nach Komplexität des Bauwerks sowie der geforderten Genauigkeit kann dieses Modell sowohl eine einfache Struktur (z. B. Stabwerkmodell) als auch einen hohen Detaillierungsgrad (z. B. 2- oder 3-dimensionales FE-Modell) aufweisen. Fallweise kann die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten notwendig sein [RUEC12b].

2.2.3 Kalibrierung des A-priori-Modells

Damit das A-priori-Modell eine realitätsnahe Beschreibung des zu überwachenden Bauwerks ermöglicht, sollte eine Modellkalibrierung durchgeführt werden. Dadurch lassen sich die folgenden Informationen gewinnen (siehe auch [RUHR06b]):

- Identifikation tragender oder aussteifender Tragglieder,
- Bestimmung des Einflusses untergeordneter Bauteile, z. B. starre Leitwände oder Brückenkappen aus Beton, auf die Gesamtsteifigkeit des Tragwerks,
- Erkennung von potentiellen Schwachstellen der Struktur, z. B. hochbeanspruchte Bereiche,
- Bestimmung der Eigenschaften von Anschlüssen, Verbindungen und Gelenken (Dehn- und Drehfedersteifigkeiten),
- Bestimmung der tatsächlichen Materialeigenschaften,
- Bestimmung der tatsächlichen Auflagerbedingungen (Dehn- und Drehfedersteifigkeiten),
- Erfassung der Auswirkungen bereits vorhandener Schäden, z. B. eine aus Rissbildung resultierende Abminderung der Bauwerkssteifigkeit.

Die Modellkalibrierung findet meist auf der Grundlage dynamischer oder statischer Versuche statt. Für Einzelheiten wird an dieser Stelle auf Kapitel 2.4.2 verwiesen. Das kalibrierte Modell repräsentiert den aktuellen Bauwerkszustand und stellt somit den Referenzzustand für die folgende Bauwerksüberwachung dar.

2.3 Datenakquisition

Die Kenntnis der zur Bauwerksüberwachung verfügbaren Messtechnik, ihrer Einsatzmöglichkeiten sowie ihrer Vor- und Nachteile ist für die Klärung der Frage nach der Messbarkeit sowie der Messgenauigkeit von Eigenschaften oder Ereignissen und somit für die Entwicklung eines Überwachungskonzeptes von großer Wichtigkeit. In den folgenden Kapiteln werden deshalb die für die Überwachung von Bauwerken relevanten Parameter aufgezeigt und mögliche Messaufnehmer zur Erfassung dieser Parameter genannt. Dabei wurde eine Unterteilung in Bauwerksparameter (Kapitel 2.3.1) und Einwirkungsparameter (Kapitel 2.3.2) vorgenommen. Während einige dieser Parameter direkt gemessen werden können, z. B. Bauteildehnungen, können andere Parameter nur indirekt bestimmt werden, z. B. die Ermittlung von Vorspannkräften in Spanngliedern durch die Messung der Spannstahtdehnungen. Die Auswahl der zu messenden Parameter ist abhängig von den zu bestimmenden Bauwerks- oder Einwirkungsinformationen. Beispielsweise ist die Identifikation eines Schadens anhand eines bestimmten Parameters nur dann möglich, wenn dieser messbar durch den Schädigungsprozess beeinflusst wird.

Nach der Messung der Daten sind diese entweder drahtgebunden oder drahtlos zu übertragen (Kapitel 2.3.3 und 2.3.6), zu erfassen (Kapitel 2.3.4) und zu speichern (Kapitel 2.3.5).

2.3.1 Sensoren zur Erfassung von Bauwerksparametern

Mit dem Begriff „Bauwerksparameter“ werden im Rahmen dieser Arbeit diejenigen mechanischen, physikalischen und chemischen Parameter bezeichnet, die am Bauwerk selbst gemessen werden:

- **Mechanische Bauwerksparameter:** Dehnungen, Verschiebungen, Neigungen, Schwingbeschleunigungen, Schwinggeschwindigkeiten, Verkrümmungen, Spannungen, Kräfte, Vorspannkräfte,
- **physikalische Bauwerksparameter:** Bauteiltemperatur und -feuchte,
- **chemische Bauwerksparameter:** Korrosion.

Mechanische Bauwerksparameter

Dehnungen

Dehnungen können mit einer Vielzahl von Sensoren gemessen werden. Bei der Überwachung von

Brückenbauwerken finden häufig herkömmliche Dehnungsmessstreifen, Schwingsaitendehnungsmesser sowie faseroptische Sensoren Verwendung [ACGP03, ISIS01].

Dehnungsmessstreifen (DMS, Bild 3) bestehen aus einem dünnen gitterförmigen Metallfilm, der einen elektrischen Widerstand aufweist. Die am häufigsten eingesetzten DMS sind Foliendehnungsmessstreifen [ACGP03]. DMS werden direkt auf das Messobjekt geklebt. Erfährt das Messobjekt eine Dehnung, so wird diese auf den DMS übertragen. Die daraus resultierende Änderung des elektrischen Widerstands gibt Aufschluss auf die aufgebrachte Dehnung. DMS sind relativ kostengünstig, weisen jedoch einige Nachteile auf: Sie sind anfällig gegenüber elektromagnetischen Einflüssen, was sich insbesondere bei langen Signalwegen negativ auswirkt, und empfindlich gegenüber hohen Feuchtigkeiten, was ihre Eignung im Rahmen der Dauerüberwachung von Bauwerken einschränkt [ISIS01]. Weiterhin können Foliendehnungsmessstreifen in Folge der während des Betriebs produzierten Wärme überhitzen, was zu einem Drift in den Datenaufzeichnungen führen kann [ACGP03].

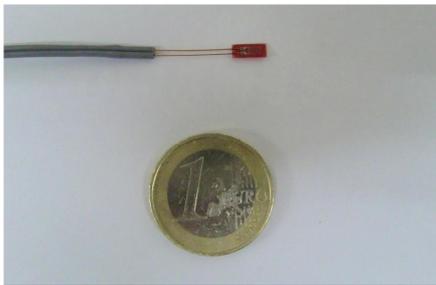


Bild 3: Dehnungsmessstreifen

Schwingsaitenaufnehmer (Bild 4) bestehen aus einer in einem Hüllrohr schwingenden vorgespannten Saite (Vibrating Wire), die an beiden Enden mit Hilfe von Distanzhaltern an den Messpunkten des Messobjekts befestigt wird. Verschieben sich die Messpunkte gegeneinander, so ändert sich die Spannung und damit die Grundfrequenz der Saite. Durch Messung der Grundfrequenz mit Hilfe einer Spule kann die Verschiebung zwischen den Messpunkten ermittelt werden. Schwingsaitenaufnehmer haben ein sehr stabiles Langzeitmessverhalten und können auch bei Kabellängen von 1,5 km eingesetzt werden [ISIS01]. Allerdings eignen sich Schwingsaitenaufnehmer meistens nicht für die Messung von Dehnungsänderungen in Folge dynamischer Beanspruchungen [ACGP03].

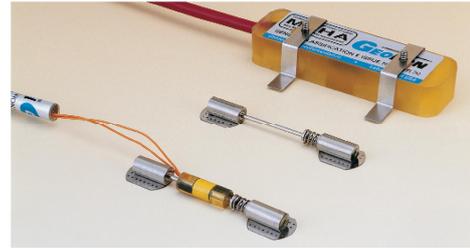


Bild 4: Schwingsaitenaufnehmer zur Messung von Dehnungen [CARB12]

Faseroptische Sensoren (FOS) können grundsätzlich zur Messung einer Vielzahl von mechanischen, physikalischen und chemischen Parametern verwendet werden. Faseroptische Sensorik ist auf Grund der Analyseeinheiten (Interrogatoren) in der Regel teurer als konventionelle Technik. Allerdings weisen sie einige wesentliche Vorteile auf: Sie sind unempfindlich gegenüber elektromagnetischer Strahlung sowie Funk- und Mikrowellen, können die Messsignale mit nur geringer Abschwächung über sehr große Distanzen transportieren, weisen ein stabiles Langzeitverhalten sowie schnelle Reaktionszeiten auf und korrodieren nicht [GLIN07, ACGP03, ISIS01]. Außerdem eignen sie sich für den Einsatz in extremen klimatischen und chemischen Umgebungen [ASCE11]. Faseroptische Sensoren bestehen aus Lichtwellenleitern, meist in Form von Glasfasern, durch die Lichtwellen gesendet werden [GLIN07]. Werden die Sensoren durch äußere Einflüsse beansprucht (z. B. durch Dehnung oder Biegung), so ändern sich die Frequenzeigenschaften der Lichtwellen. Die Auswertung der Frequenzeigenschaften lässt Rückschlüsse auf die verursachende Beanspruchung zu. Gemäß [GLIN07] lassen sich faseroptische Sensoren in drei Gruppen einteilen: Punktsensoren (extrinsische Fabry-Perot-Interferometer und Faser-Bragg-Gittersensoren), Long-Gage-Sensoren (interferometrische SOFO-Sensoren) und verteilte Sensoren (Raman-Scattering-Sensoren und Brillouin-Scattering-Sensoren). Detaillierte Beschreibungen sämtlicher Verfahren finden sich in [GLIN07]. Die häufigsten zur Dehnungsmessung eingesetzten faseroptischen Sensoren sind die extrinsischen Fabry-Perot-Interferometer (EFPI) und Faser-Bragg-Gittersensoren (FBG) [ACGP03]. EFPI-Sensoren bestehen aus einem Siliziumrohr, in welchem zwei durch einen kleinen Spalt getrennte Lichtwellenleiter geführt werden. Wird ein Signal durch eine der Fasern gesendet, so entstehen an den Grenzflächen im Bereich des Spalts Interferenzsignale. Durch Auswertung der Interferenzsignale werden Informationen über die Breite des Spalts gewonnen, die sich bei einer von außen aufgetragenen Dehnung verändert [GLIN07]. FBG-Sensoren (Bild 5) funktionieren nach einem anderen Prinzip: Mit Hilfe von UV-Licht wird der Brechungsindex des Lichtwellenleitermaterials auf

einer Länge von etwa 10 mm modifiziert. Hierdurch entsteht ein Beugungsgitter, welches einen bestimmten Frequenzbereich der Lichtwellen reflektiert und die übrigen Frequenzen passieren lässt. Bei Dehnung des Beugungsgitters ändert sich die Gitterkonstante, wodurch sich der reflektierte Frequenzbereich verschiebt. Anhand des reflektierten Frequenzspektrums kann die zugehörige Dehnung bestimmt werden [GLIN07]. Entlang eines Lichtwellenleiters können bis zu 100 Beugungsgitter verteilt werden [BERG09].



Bild 5: Faser-Bragg-Gittersensor [HBM12]

Verschiebungen

Klassische Messaufnehmer zur Erfassung kleiner Verschiebungen am Bauteil sind induktive Wegaufnehmer (Bild 6). Ein induktiver Wegaufnehmer besteht aus zwei Spulen und einem darin verschieblichen Magneten. Bei einer Verschiebung des Magneten ändern sich die Scheinwiderstände der Spulen, was auf die Größe der Verschiebung schließen lässt. Induktive Wegaufnehmer sind im Allgemeinen teurer als andere Verschiebungsmesser, sind dafür aber sehr haltbar und robust. Sie besitzen außerdem eine gute Auflösung und können auch für dynamische Messungen eingesetzt werden [ACGP03].



Bild 6: Induktiver Wegaufnehmer zur Messung der Durchbiegung eines Stahlbetonbalkens

Verschiebungen können ebenso mit Schwingsaitenaufnehmern gemessen werden. Das Prinzip wurde bereits im Abschnitt „Dehnungen“ beschrieben.

Faseroptische Messaufnehmer zur Bestimmung von Verschiebungen sind die von der Firma SMARTEC und der Roctest-Gruppe vertriebenen SOFO-Sensoren („Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques“, frz. für „Bauwerksüberwachung mit optischen Fasern“) [GLIN07]. Ein SOFO-Sensor besteht aus zwei gemeinsam in einem Schutzschlauch angeordneten Glasfasern – der Messfaser und der Referenzfaser (Bild 7). Die Messfaser ist vorgespannt, wird an ihren Enden fest mit dem Messobjekt verbunden und erfasst die Dehnungen des Messobjektes. Die Referenzfaser wird frei neben der Messfaser geführt und dient der Kompensation von Einflüssen aus Temperaturbeanspruchung. Dadurch sind die mit SOFO-Sensoren gemessenen Längenänderungen sehr präzise und nahezu unbeeinflusst von Temperaturbeanspruchungen [BRWO08]. SOFO-Sensoren können eine Länge von bis zu 20 m aufweisen [GLIN07].

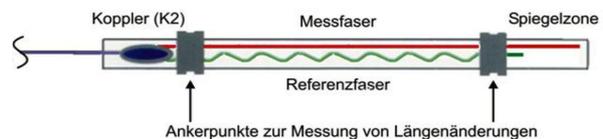


Bild 7: Prinzip eines SOFO-Sensors [BRWO08]

Die Messung von Verschiebungen kann ebenfalls berührungslos durchgeführt werden. Neben Laser- und Mikrowellen-(Radar-)Interferometrie stehen hier unter anderem Tracking-Methoden zur Verfügung, die auf der Beobachtung von am Bauwerk angebrachten Markern mit Hilfe spezieller Kameras basieren [ASCE11].

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der absoluten Position eines Messpunkts ist die Nutzung des Global Positioning System (GPS) [ASCE11]. Hierbei wird der Ort eines am Messpunkt angebrachten GPS-Empfängers durch Messung der Entfernung zu mehreren Satelliten ermittelt. Die Bestimmung der Entfernungen erfolgt durch die Auswertung der Laufzeit der Funksignale zwischen den Satelliten und dem Empfänger. Bei der Messung an Bauwerken wird in der Regel das Differential Global Positioning System (DGPS, auch mit „Real Time Kinematic“ (RTK) bezeichnet) verwendet [ASCE11]. Im Gegensatz zum herkömmlichen GPS werden beim DGPS zusätzlich zu den beweglichen am Bauwerk angebrachten Empfängern (Rover) ortsfeste Referenz- oder Basisstationen eingesetzt, deren bekannte Positionen zur Eliminierung von Messungenauigkeiten bei der Bestimmung der Position der Rover herangezogen werden. Dadurch lässt sich eine Genauigkeit von bis zu 1 cm erreichen [BROW07]. Probleme beim Einsatz von GPS können auftreten, wenn keine direkte Verbindung zwischen Satelliten und Emp-

fängern besteht, oder wenn das Funksignal durch atmosphärische Einflüsse gestört wird.

Weiterhin können Verschiebungen indirekt aus gemessenen dynamischen Strukturantworten bestimmt werden, d. h. durch einfache Integration der Schwinggeschwindigkeiten oder zweifache Integration der Schwingbeschleunigungen über die Zeit. Jedoch kann es bei der numerischen Integration zu einer Verstärkung von Störsignalen kommen.

Neigungen

Die Neigung von Querschnitten in Folge von Beanspruchungen lässt sich mit Neigungsmessern (auch mit „Inklinometer“ oder „Tiltmeter“ bezeichnet) erfassen. Im Allgemeinen wird hierzu die Verdrehung zwischen einer Messachse und dem Vektor der Schwerkraft bestimmt. Im Folgenden werden die am häufigsten eingesetzten Neigungsmesser beschrieben [ACGP03].

Schwingsaitenneigungsmesser wurden speziell für den Einsatz im Rahmen von Langzeitmessungen entwickelt [ACGP03]. Dabei wird die Spannung der Schwingsaite durch ein im Innern des Sensorgehäuses aufgehängtes Pendel verändert. Schwingsaitenneigungsmesser sind nicht zur Messung von Neigungsänderungen in Folge dynamischer Einflüsse (z. B. Verkehr) geeignet [ACGP03].

Elektronische Neigungsmesser, die auf dem Prinzip der Wasserwaage basieren, bestehen aus einem Hohlkörper, der mit einem Elektrolyt und einer Gasblase gefüllt ist. An der Oberseite des Hohlkörpers sind Elektroden angebracht, die eine elektrische Spannung erzeugen. Diese kann auf Grund der Leitfähigkeit des Elektrolyts von einer Elektrode auf der Unterseite des Hohlkörpers gemessen werden. Ändert sich die Neigung des Sensors, so tauchen die Elektroden unterschiedlich stark in die Flüssigkeit ein, was eine Änderung der messbaren Spannung verursacht. Ebenso wie Schwingsaitenneigungsmesser eignen sich elektronische Neigungsmesser nicht zur Messung von sich schnell ändernden Neigungen.

Im Innern von Servo-Neigungsmessern bewegt sich in Folge einer Schiefstellung des Messelements ein Pendel aus seiner Ruhelage heraus, welches mit Hilfe eines Servosystems wieder in seine Ruhelage zurück bewegt wird. Anhand der dazu erforderlichen elektrischen Spannung kann auf die Auslenkung des Pendels und somit die Neigung geschlossen werden. Servo-Neigungsmesser können auch im Rahmen von Schwingungsmessungen eingesetzt werden.

Zur Messung von Neigungen können außerdem optische SOFO-Sensoren eingesetzt werden, deren Funktionsweise bereits im Abschnitt „Verschiebungen“ dargelegt wurde.

Schwingbeschleunigungen

Beschleunigungssensoren (Accelerometer) sind die zur Erfassung von Schwingungen am häufigsten eingesetzten Messelemente [HSHB06]. Sie bestehen aus einer in einem Gehäuse eingebauten federnd gelagerten seismischen Masse, welche durch äußere Anregung in Schwingung versetzt wird. Für die Auswahl eines geeigneten Sensors sind die Frequenzen und die Beschleunigungen der zu erfassenden Bauwerksschwingungen entscheidend: Bei kleinen bis mittelgroßen Spannweiten sollte der Frequenzeinsatzbereich zwischen 3 und 50 Hz und die messbare Beschleunigung bei $\pm 3 \text{ g}$ (3-fache Erdbeschleunigung) liegen; bei weit gespannten Brücken wird ein Frequenzeinsatzbereich zwischen 0 und 10 Hz und eine messbare Beschleunigung von $\pm 0,05 \text{ g}$ empfohlen [ACGP03].

Bei piezoelektrischen Beschleunigungsmessern ist die seismische Masse auf einem piezoelektrischen Element befestigt (Bild 8). Wird die Masse in Schwingung versetzt, so wird die aus der Massenträgheit resultierende mechanische Beanspruchung des Piezowerkstoffes in eine elektrische Spannung umgewandelt [GRDS06]. Piezoelektrische Beschleunigungsmesser werden am häufigsten verwendet, unter anderem wegen ihrer relativ geringen Größe. Sie sind robust, können bei sehr hohen und tiefen Temperaturen sowie in einem vergleichsweise großen Frequenzbereich eingesetzt werden und besitzen eine relativ gute Empfindlichkeit [ACGP03].

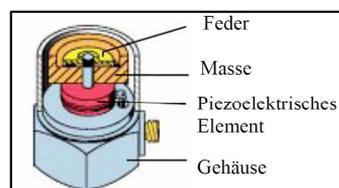


Bild 8: Piezoelektrischer Beschleunigungsmesser [GRDS06]

Bei piezoresistiven Sensoren ist die seismische Masse nicht vertikal federnd gelagert, sondern am freien Ende eines einseitig eingespannten horizontal verlaufenden Biegeelements (Kragarm) befestigt. Wird die seismische Masse in Schwingung versetzt, so entstehen in dem Biegeelement Spannungen, die mit Hilfe eines Piezoelements gemessen werden.

Kapazitive Beschleunigungssensoren messen die Beschleunigung der seismischen Masse mit Hilfe

eines Differentialkondensators, dessen Kapazität sich in Folge der Schwingungen ändert. Sie sind kleiner als piezoelektrische Messelemente, temperaturstabiler, empfindlicher und können auch bei sehr niedrigen Frequenzen eingesetzt werden [SCHM08, ACGP03].

Servo-Beschleunigungssensoren funktionieren grundsätzlich nach dem gleichen Prinzip wie Servo-Neigungsmesser (siehe Abschnitt „Neigungen“). Dabei wird jedoch kein Pendel, sondern die seismische Masse in ihrer Ruhelage festgehalten.

Zur Messung von Beschleunigungen können ebenso optische Faser-Bragg-Gittersensoren eingesetzt werden (siehe auch Abschnitt „Dehnungen“).

Schwinggeschwindigkeiten

Klassische elektrodynamische Sensoren zur Erfassung von Schwinggeschwindigkeiten bestehen aus einer Spule und einem daran gekoppelten Magneten. Diese können sich relativ zueinander bewegen. Wird der Magnet durch Schwingung in Bewegung versetzt, so wird eine zur Bewegungsgeschwindigkeit proportionale elektrische Spannung induziert [KRAM07]. Elektrodynamische Geschwindigkeitssensoren besitzen eine untere Anwendungsgrenze von etwa 5 bis 15 Hz, die bei Verstärkung der Aufnehmerkennlinien auf etwa 1 Hz herabgesetzt werden kann [KRAM07].

Die berührungslose Messung der Geschwindigkeit von Schwingungen kann durch den Einsatz von Laser-Doppler-Vibrometern (LDV) erfolgen. Laser-Doppler-Vibrometer basieren auf der geschwindigkeitsabhängigen Änderung der Frequenz und der Wellenlänge von Lichtwellen (Frequenzverschiebung), die auf ein sich bewegendes Objekt treffen und von diesem reflektiert werden [WIST04]. Diese Frequenzverschiebung ist proportional zur Geschwindigkeit des Messobjekts und wird mit Hilfe der Interferometrie bestimmt [POLY12]. Herkömmliche Laser-Doppler-Vibrometer erfassen die Bewegung des Objekts an einem einzelnen Punkt und müssen daher zur Erfassung mehrerer Punkte manuell neu ausgerichtet werden. Continuous-Scan Laser-Doppler-Vibrometer (CSLDV) bewegen den Laserstrahl mit hoher Geschwindigkeit automatisch über die Oberfläche des Messobjekts und können so ohne Neuausrichtung eine Vielzahl von Punkten gleichzeitig untersuchen [ALSR09]. Laser-Doppler-Vibrometer sind meist kostenintensiv [ASCE11], weisen jedoch eine äußerst hohe Genauigkeit auf und können aus Entfernungen von über 100 m zum Messobjekt eingesetzt werden [OPTO12].

Neben der direkten Messung der Schwinggeschwindigkeiten ist es möglich, diese indirekt durch einfache Integration aufgezeichneter Schwingbeschleunigungen über die Zeit zu berechnen. Dabei ist zu beachten, dass es bei der numerischen Integration zu einer unerwünschten Verstärkung niederfrequenter Rauschteile in den Signalen kommen kann.

Verkrümmungen

Querschnittsverkrümmungen lassen sich indirekt durch Berechnung des Quotienten aus der Differenz der Randdehnungen und der Höhe des Querschnitts bestimmen.

Spannungen

Die Bestimmung von Spannungen erfolgt ebenfalls indirekt über die Messung von Dehnungen und unter Verwendung der Stoffgesetze des Werkstoffs, aus dem das Messobjekt besteht.

Kräfte

Ähnlich wie Spannungen können Kräfte auch nur indirekt bestimmt werden. Hierzu stehen Kraftaufnehmer, auch mit „Kraftmessdose“ oder „Kraftmesszelle“ bezeichnet, zur Verfügung (Bild 9). Diese erfassen die einwirkenden Kräfte mit Hilfe von Dehnungen bzw. Verschiebungen. Sensoren zur Messung von Fahrzeuggewichten sind z. B. Plattensensoren, die in die Fahrbahn eingelassen werden. Zur Messung von Auflagerkräften von Brücken wurden spezielle Brückenlager mit Kraftmessfunktion entwickelt.



Bild 9: Kraftmessdose auf Lasteinleitungsplatte

Vorspannkräfte

Spannkraftänderungen können anhand von Messungen der Spannstahldehnungen ermittelt werden. Dehnungsmesser können auch nachträglich an die Spannglieder bestehender Bauwerke appli-

ziert werden, wie es z. B. in [LIGH09] durchgeführt wurde.

Physikalische Bauwerksparameter

Bauteiltemperatur

Luft- und Bauteiltemperaturen werden häufig bei der Überwachung von Brücken gemessen, wobei die Bauteiltemperaturen wegen thermodynamischer Effekte deutlich größer als die Lufttemperaturen sein können. Der Grund für die Messung der Temperaturen ist ihr oft großer Einfluss auf die Spannungen und Verformungen der Bauwerke. Die Messung von Bauteiltemperaturen kann auf der Bauteiloberfläche oder im Bauteilinneren durchgeführt werden. Die Erfassung von Temperaturgradienten kann eine Vielzahl von verteilt angeordneten Sensoren erfordern.

Thermoelemente bestehen aus zwei parallel verlaufenden Drähten verschiedener elektrisch leitender Materialien, die an einem Ende miteinander verbunden sind. Zwischen den beiden freien Enden der Drähte ist ein Spannungsmesser angeordnet, sodass ein geschlossener Stromkreis entsteht. Herrscht zwischen den verbundenen und den freien Enden der Drähte eine Temperaturdifferenz, so entsteht eine Spannung, die sich mit dem Spannungsmesser erfassen lässt. Durch Verwendung unterschiedlicher Materialien der beiden Drähte lassen sich Thermoelemente für verschiedene Temperaturbereiche herstellen. Thermoelemente werden häufig eingesetzt, weil sie einfach, robust und kostengünstig sind, keine externe Stromquelle benötigen und relativ schnell auf Temperaturänderungen reagieren. Sie zeigen allerdings eine nichtlineare Kennlinie und eine vergleichsweise schlechte Sensitivität. Wegen der nur geringen Spannungen sind sie zudem anfällig gegenüber Rauschen [ACGP03].

Thermistoren sind Widerstände, die ihren Widerstandswert in Abhängigkeit von der Temperatur verändern. Es werden Heißleiter (NTC-Widerstände) und Kaltleiter (PTC-Widerstände) unterschieden. Während der Widerstandswert von Heißleitern bei steigender Temperatur abnimmt, steigt der von Kaltleitern dagegen an. NTC-Widerstände sind empfindlicher als PTC-Widerstände und kommen daher häufiger zum Einsatz. Grundsätzlich sind Thermistoren kostengünstig, stabil, präzise und reaktionsschnell. Allerdings besitzen Thermistoren eine nichtlineare Kennlinie. Ihr Einsatz erfordert eine externe Stromquelle [ACGP03].

Widerstandsthermometer basieren auf dem gleichen Prinzip wie Thermistoren. Häufig kommen

Edelmetalle (vorrangig Platin) als Widerstand zum Einsatz. Widerstandsthermometer besitzen eine lineare Kennlinie, sind sehr stabil und können in einem großen Temperaturbereich eingesetzt werden. Die zu nennenden Nachteile sind ihre hohen Kosten, lange Reaktionszeiten und das Erfordernis einer externen Stromquelle. Widerstandsthermometer werden häufig in Wetterstationen eingesetzt [ACGP03].

Neben den genannten Temperaturfühlern können Schwingsaitenaufnehmer sowie faseroptische Sensoren zur Messung von Bauteiltemperaturen eingesetzt werden.

Bauwerksfeuchte

Die Feuchte in einem Bauteil kann mit Hilfe von Multiring-Elektroden (Bild 10) bestimmt werden. Multiring-Elektroden sind zylinderförmige Sensoren mit einem Durchmesser von ca. 20 mm und einer Gesamtlänge von ca. 50 mm. Sie bestehen aus mehreren übereinander angeordneten Edelstahlringen, die durch Kunststoffringe voneinander getrennt sind. Nach dem Einbau des Sensors in das zu untersuchende Bauteil wird mit Hilfe der Edelstahlringe der Elektrolytwiderstand im Bauteilinneren gemessen. Aus diesem lässt sich die Bauteilfeuchte bestimmen [RDWH07]. Der Einsatz der Sensoren in bestehenden Bauteilen ist möglich.



Bild 10: Multiring-Elektrode [SENS12]

Zur mobilen Messung der Bauwerksfeuchte stehen verschiedene Handgeräte zur Verfügung. Ein Beispiel hierfür ist die Hydromette Compact B der Firma GANN Mess- und Regeltechnik GmbH [GANN12]. Das Gerät misst den Wasseranteil in einem Bauteil mit Hilfe des kapazitiven Hochfrequenzverfahrens, welches auf der Änderung der elektrischen Durchlässigkeit eines Materials in Abhängigkeit des Feuchtegehalts basiert.

Chemische Bauwerksparameter

Korrosion

Der meistverwendete Sensor zur Messung von Korrosion des Beton- oder Spannstahls in Betonbauteilen, z. B. in Folge der Einwirkung von Kohlendioxid oder Chloriden, ist die Anodenleiter (Bild 11) [SENS12]. Eine Anodenleiter besteht aus meh-

renen in unterschiedlichen Tiefenlagen angeordneten Elektroden (Anoden), welche in der Betondeckung des Betonbauteils eingebaut werden, sowie einer Edelmetallkathode. Erreicht die Depassivierungsfront eine Anode und sind ferner ein Elektrolyt und ausreichend Sauerstoff vorhanden, so beginnt die Anode zu korrodieren. Die Korrosionsaktivität kann in Form des entstehenden Stromflusses zwischen der jeweiligen Anode und der Kathode gemessen werden [SDSG06, DSSG08]. Neben der Anodenleiter existieren tiefengestaffelte Drahtsensoren mit runder oder eckiger Form, die auf dem gleichen Messprinzip basieren [HOBW11].

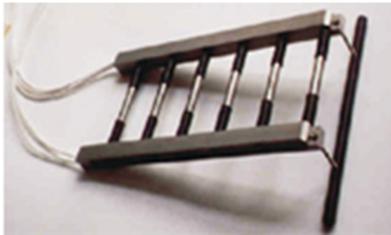


Bild 11: Anodenleiter [SENS12]

Für den Einsatz bei bestehenden Bauwerken können Bohrkernanoden verwendet werden. Dazu wird dem Bauwerk ein Bohrkern entnommen, in den die Bohrkernanode eingebaut wird, und der im Anschluss wieder in das Bauwerk eingesetzt wird [SENS12].

2.3.2 Sensoren zur Erfassung von Einwirkungsparametern

Einwirkungsparameter aus Verkehrsbeanspruchung

Fahrzeuggewichte

Fahrzeuggewichte können mit Hilfe von Weigh-in-Motion(WIM-)Systemen gemessen werden, die entweder in oder auf der Fahrbahn angeordnet werden. Grundsätzlich stehen Streifen- und Plattensensoren zur Verfügung.

Streifensensoren sind piezoelektrische Sensoren mit einer Breite von wenigen Zentimetern, die in Folge der kurzzeitigen Auflast eines vorüberfahrenden Fahrzeugs eine Spannung erzeugen. Die Messung erfolgt nur über einen kleinen Teil der Radaufstandsfläche, weshalb die Radlast im Nachgang durch Integration der Messsignale über die Zeit ermittelt werden muss.

Plattensensoren (Wiegeplatten) messen die Auflast über Dehnungsänderungen innerhalb des Messelements. Durch ihre Größe kann die Radlast eines Fahrzeugs bei einer Überfahrt über die vollständige Radaufstandsfläche erfasst werden. Plat-

zensensoren weisen daher eine größere Genauigkeit auf als Streifensensoren, sind jedoch deutlich kostenintensiver.

Die mit Streifen- und Plattensensoren bestimmten Fahrzeuggewichte sind meist stark von dynamischen Effekten aus Fahrbahnunebenheiten – Streifensensoren außerdem noch durch Temperaturbeanspruchungen – beeinflusst [BUSL07].

Fahrzeuggeschwindigkeiten

Zur Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeiten stehen eine Vielzahl von Messelementen zur Verfügung. Piezosensoren und Induktionsschleifen werden in den Fahrbahnbelag eingebettet und erkennen die Überfahrt eines Fahrzeugs. Werden mindestens zwei Messelemente hintereinander angeordnet, so lässt sich mit Hilfe des räumlichen Abstands zwischen den Messelementen und der verstrichenen Dauer zwischen der Detektion desselben Fahrzeugs durch die beiden Messelemente die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit berechnen.

Die Anwendung von Leitpfosten-Zählgeräten auf Seitenradarbasis zur Zählung und Klassifizierung von Fahrzeugen sowie zur Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeiten wurde im Rahmen der 5-Jahres-Zählung des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg im Jahr 2010 erprobt [ZKPM10]. Die mobilen Geräte wurden für jeweils eine Woche an unterschiedlichen Standorten installiert und mit Hilfe von Akkus betrieben.

Einwirkungsparameter aus Umwelteinflüssen

Wind

Zur Bestimmung von Windgeschwindigkeit und Winddruck während der Dauerüberwachung von Brückenbauwerken werden im Allgemeinen Schalensternanemometer und Ultraschallanemometer verwendet [ACGP03].

Schalensternanemometer (Bild 12 links) können nur die horizontale Windgeschwindigkeit messen [ASCE11]. Die Bestimmung der Windrichtung erfolgt durch den Einsatz von Windfahnen, deren Ausrichtung mit Potentiometern erfasst wird. Schalensternanemometer besitzen bewegliche Teile und müssen deshalb im Winter beheizt werden, um ein Einfrieren zu verhindern.

Ultraschallanemometer (Bild 12 rechts) bestehen aus mehreren sternförmig um eine Achse angeordneten Sensoren zum Senden und Empfangen von Ultraschallsignalen. Da die Übertragungsdauer der Signale abhängig ist von der Windgeschwin-

digkeit und der Windrichtung, können mit Hilfe der Zeitdifferenzen zwischen der Sende- und der Empfangszeit die horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit sowie die Windrichtung berechnet werden. Ultraschallanemometer sind präziser als Schalensternanemometer und besitzen keine beweglichen Teile.



Bild 12 links: Schalensternanemometer; rechts: Ultraschallanemometer [WILM12]

Lufttemperatur

Die Messung der Lufttemperatur wird mit den gleichen Messaufnehmern durchgeführt wie die Messung der Bauteiltemperatur [ACGP03].

Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit wird am häufigsten mit Hilfe kapazitiver Hygrometer gemessen [BANT04]. Diese bestehen aus einer feuchteempfindlichen Polymerschicht als Dielektrikum zwischen zwei Metallschichten (Plattenkondensator). Lagert sich Wasser in der Polymerschicht ein, so ändert sich die Kapazität des Kondensators. Kapazitive Hygrometer haben typische Abmessungen von 7 mm x 4 mm x 0,5 mm [BANT04].

2.3.3 Datenübertragung

Datenübertragungstechniken stellen das Bindeglied zwischen den Sensoren und dem Datenerfassungssystem dar. Die herkömmliche Methode zur Übertragung der Messdaten bei elektrischen Systemen ist die Verwendung von Kupferleitungen. Kupferleitungen haben zwei entscheidende Vorteile: Sie eignen sich zur Übertragung großer Datenmengen in kurzer Zeit und können gleichzeitig die Energieversorgung der Sensoren übernehmen [EBMU12]. Kupferkabel können jedoch Ursache unerwünschter Störsignale (Rauschen) sein. Die am häufigsten verwendeten Kabeltypen sind verdrehte Zweidrahtleitungen und Koaxialkabel. Koaxialkabel sind weniger stör anfällig und weisen insgesamt eine größere Leistungsfähigkeit auf [ACGP03].

Bei der kabelgebundenen Datenübertragung stehen im Wesentlichen zwei mögliche Topologien zur Verfügung. Bei einer Stern-Topologie werden sämtliche Sensoren einzeln an ein zentrales Datenerfassungssystem angeschlossen. Dadurch werden extrem hohe Bandbreiten und eine zeit-synchrone Datenerfassung ermöglicht. Allerdings erfordert die Stern-Topologie große Mengen an Kabeln. Bei einer Bus-Topologie werden mehrere verteilt angeordnete Datenerfassungseinheiten über eine zentrale Leitung (Bus) miteinander verbunden. Jede Einheit erfasst Daten von mehreren Sensoren. Der Vorteil der Bus-Topologie liegt im geringeren Kabelverbrauch. Ein Nachteil ist die tendenziell geringere Bandbreite. Zudem treten meist Schwierigkeiten bei der zeitlichen Synchronisation der Messdaten auf [EBMU12].

Neben der Verwendung von Kabeln besteht die Möglichkeit, drahtlose Datenübertragungstechniken einzusetzen. Drahtlose Techniken werden ausführlich in Kapitel 2.3.6 behandelt.

2.3.4 Datenerfassungssystem

Mit dem Begriff „Datenerfassungssystem“ wird hier die Hardwareeinheit bezeichnet, die die Signale der Sensoren zusammenführt und aufbereitet. Da häufig unterschiedliche Arten von Sensoren bei der Bauwerksüberwachung eingesetzt werden, ist die grundlegende Konfiguration des Datenerfassungssystems abhängig von der Art der Signale, die von den Sensoren erzeugt werden. Z. B. erfordern herkömmliche elektrische Sensoren andere Systemkomponenten als faseroptische Messelemente. Nach der Erfassung werden die Signale konditioniert, d. h., sie werden verstärkt und durch Filterung von unerwünschten Störsignalen (z. B. Rauschen) befreit. Die Umwandlung der konditionierten Signale in digitale Daten wird mit Hilfe entsprechender Konverter durchgeführt. Anschließend kann eine Bereinigung der Daten erfolgen, z. B. durch Entfernung von Ausreißern (Outliers), Ergänzung fehlender Daten oder weitere Filterungsprozesse wie die Medianfilterung [WODU04]. Ebenso kann eine Nulllinienkorrektur der Daten durchgeführt werden [LUBA09]. Das Datenerfassungssystem verfügt über eine Datenübertragungseinheit (drahtgebunden oder drahtlos) zur Übertragung der digitalen Signale an den Zentralrechner sowie eine geeignete Energieversorgung [ACGP03, ASCE11].

Die Datenerfassung erfolgt zeitdiskret oder ereignisbasiert. Bei zeitdiskreten Ansätzen wird das Datenerfassungssystem in zuvor festgelegten zeitlichen Abständen aktiviert und nach Ablauf einer bestimmten Dauer wieder deaktiviert. Dieses Vor-

gehen hat den Nachteil, dass das System unter Umständen keine Messdaten aufzeichnet, wenn wichtige Ereignisse auftreten. Bei einem ereignisbasierten Ansatz wird das Datenerfassungssystem bei Empfang eines Triggersignals aktiviert, z. B. bei einer Überfahrt eines schweren Fahrzeugs. Dazu müssen entsprechende permanent messende Sensoren installiert werden [KRGR07]. Wird ein Triggersignal erfasst, so kann eine beliebige Folge von Reaktionen abgearbeitet werden, die neben dem Aktivieren des Überwachungssystems auch die Aktivierung der Datenverarbeitung sowie die Ausgabe von Alarmmeldungen betreffen können.

2.3.5 Datenspeicherung

Die Datenspeicherung erfolgt auf einem Speicherlaufwerk des Zentralrechners. Um selbst bei umfangreichen Datenmengen die Messdaten eines bestimmten Zeitpunkts schnell in den Arbeitsspeicher des Rechners einlesen zu können, empfiehlt sich die in [LUBA09] beschriebene Methodik. Demnach werden die Daten aus der Dauermessung in übersichtliche Datenpakete aufgeteilt und auf dem Speicherlaufwerk abgelegt. Gleichzeitig wird eine Verwaltungsdatei erstellt, welche Informationen über Anfangs- und Endzeitpunkte der einzelnen Datenpakete enthält. Anhand dieser Verwaltungsdatei lässt sich sehr schnell herausfinden, in welchem Datenpaket sich die Messdaten eines bestimmten Zeitpunkts befinden.

Da die Algorithmen zur Gewinnung von Informationen aus den gemessenen Parametern fortwährend weiterentwickelt werden, können aufgezeichnete Messdaten zur Validierung herangezogen werden. Aus diesem Grunde wird empfohlen, die Daten trotz ihres erheblichen Volumens nicht zu verwerfen, sondern an geeigneter Stelle langfristig zu archivieren [ISIS01].

2.3.6 Drahtlose Sensornetze

Die Nachteile kabelgebundener Übertragungstechniken sind die hohen Anschaffungskosten sowie die zeit- und damit auch kostenaufwändige Verlegung der Leitungen. Kabellos verbundene Sensornetze sind deutlich günstiger als kabelgebundene Systeme und können mit vergleichsweise geringem Aufwand am Bauwerk installiert werden [KRGR07]. Bei einem identischen finanziellen Aufwand sind daher dichtere Sensornetze möglich. Allerdings entfällt mit den Kabeln gleichzeitig auch die Stromversorgung der Sensoren. Bei der Entwicklung drahtloser Sensornetze müssen daher Kompromisse zwischen der Funktionalität der Messeinheiten und dem Energieverbrauch einge-

gangen werden [LYLO06]. Dies betrifft auch Reichweite und Bandbreite der Datenübertragung [EBMU12].

Komponenten drahtlos angebundener Messeinheiten

Eine drahtlos angebundene Messeinheit (auch „Mote“ genannt) besteht aus folgenden Komponenten (siehe auch Bild 13) [LYNC07]:

- **Energieversorgung:** Zur Energieversorgung hat sich der Einsatz herkömmlicher Industriebatterien oder Akkus in Verbindung mit geeigneten Ladeelektroniken bewährt [KRGR07].
- **Messaufnehmer:** Ein Mote verfügt über eine Schnittstelle, an die mindestens ein Sensor, häufig jedoch auch mehrere Sensoren gleichzeitig angeschlossen werden können.
- **Rechenkern** (Prozessor mit Arbeitsspeicher): Zum Betrieb des Motes und zur Datenverarbeitung der Messdaten wird ein Rechenkern, bestehend aus einem Prozessor und einem Arbeitsspeicher, in das Gehäuse integriert.
- **Drahtlose Datenübertragung:** Zum Senden und Empfangen der Daten an einen oder mehrere Zentralrechner ist ein Transceiver erforderlich.

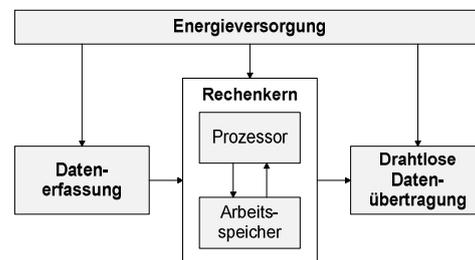


Bild 13: Komponenten einer drahtlosen Messeinheit

Sensornetzwerktopologien

Für den Aufbau von Sensornetzen kommen Stern- oder Multihop-Topologien in Frage [KRGR07]. Bei der Stern-Topologie (Bild 14) werden die Signale von allen Knoten direkt zur Wurzel gesendet. Diese Art der Verbindung eignet sich vorwiegend für kleinere Netze und kurze Distanzen. Die Multihop-Topologie (Bild 15) wird hauptsächlich bei großen Entfernungen zwischen den Knoten und der Wurzel bzw. bei großen Netzen eingesetzt. Hierbei werden die Daten von den Knoten über jeweils benachbarte Knoten weitergesendet; die Daten gelangen über mehrere Zwischenstationen zur Wurzel des Netzes. Diese Topologie bietet den Vorteil eines geringeren Stromverbrauchs, stellt jedoch hohe Anforderungen an die Programmierung und Konfiguration des Netzes [KRGR07].

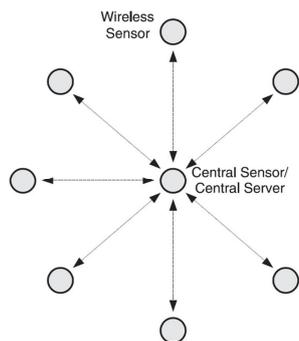


Bild 14: Stern-Topologie [LYLO06]

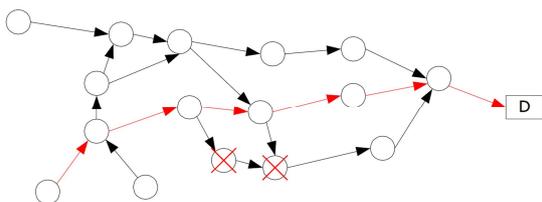


Bild 15: Multihop-Topologie („D“ kennzeichnet den Zielknoten) [MBFK07]

Funkstandards

Die drahtlose Kommunikation basiert auf Funkstandards. Die bekanntesten Technologien sind in diesem Zusammenhang WLAN (Wireless Local Area Network, IEEE 802.11b), Bluetooth (IEEE 802.15.1) und ZigBee (IEEE 802.15.4). Die Kennwerte und Eigenschaften der verschiedenen Protokolle sind in Tab. 1 dargestellt.

	WLAN	Bluetooth	ZigBee
Standard	IEEE 802.11b	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Anwendung	Internet, E-Mail, Video	Kabelersatz	Monitoring, Regelung
Systemressourcen	> 1 MB	> 250 KB	4 bis 32 KB
Batterielebensdauer	0,5 bis 5 Tage	1 bis 7 Tage	100-1000 Tage und mehr
Netzwerkgröße	32	7	praktisch unbegrenzt
Übertragungsrate	> 11000 KB/s	720 KB/s	20 bis 250 KB/s
Reichweite	1 bis 100 m	1 bis 10 m und mehr	1 bis 100 m und mehr
Erfolgskriterien	Geschwindigkeit, Flexibilität	Kosten, Komfort	Zuverlässigkeit, Leistung, Kosten

Tab. 1: Kennwerte drahtloser Übertragungstechnologien (nach [ZIGB13])

WLAN ermöglicht hohe Datenübertragungsraten (bis zu 54 Mbps) über Entfernungen von bis zu 100 m. Der Nachteil von WLAN ist der hohe Energieverbrauch bei der Übertragung kleiner Daten-

mengen, weshalb sich die Technologie nur bedingt für den Einsatz in drahtlosen Sensornetzen eignet.

Bluetooth ist ebenfalls für die Übertragung großer Datenmengen ausgelegt, hat jedoch nur eine Reichweite von etwa 10 m. Das Bluetooth-Protokoll hat zwar einen günstigeren Energieverbrauch als WLAN, eignet sich jedoch trotzdem nicht für einen Batteriebetrieb über längere Zeit. Durch die Nutzung von adaptivem Frequenzhopping über sämtliche verfügbaren Frequenzstufen bei der Datenübertragung ist Bluetooth sehr interferenzresistent. Wird dabei eine Störung einer Frequenz festgestellt, so wird diese bei der nachfolgenden Übertragung ausgeschlossen [AP-PO06].

ZigBee leitet sich gemäß [ZIGB13] ab vom Zickzack-Tanz der Honigbiene, die ihren Artgenossen auf diese Weise Richtung und Entfernung von Futterquellen mitteilt. ZigBee wurde für einen intermittierenden Datentransfer geringer Datenmengen und damit für Monitoring- und Control-Anwendungen optimiert, hat einen sehr niedrigen Energiebedarf und eine Reichweite von über 100 m. Ein weiterer Vorteil von ZigBee ist die Möglichkeit, Netzwerke mit sehr vielen Knoten aufzubauen. Dabei werden die Daten über andere Knoten, die als Zwischenstationen wirken, durch das Netzwerk geleitet (Multihop-Topologie).

2.4 Informationsgewinnung

Die Gewinnung von Informationen aus den zuvor akquirierten Messdaten, d. h. die Identifikation von Einwirkungen und Schäden, stellt die zentrale Aufgabe eines Überwachungssystems dar. Dieser Prozess basiert auf der Analyse der Messdaten mit Hilfe von Modellen.

2.4.1 Grundlagen

Modelle

Ein Modell dient grundsätzlich der Beschreibung eines Systems und setzt sich zusammen aus einer Modellstruktur sowie Modellparametern. Mit Hilfe von Modellen werden Beziehungen zwischen den Eingangsgrößen und den Ausgangsgrößen abgebildet.

Das inverse Problem

Im Allgemeinen werden Probleme im Bauingenieurwesen unterschieden in direkte Probleme (auch

Vorwärtsprobleme genannt) und inverse Probleme (Bild 16).

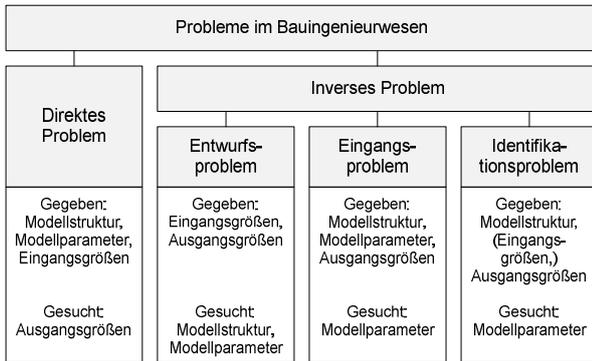


Bild 16: Probleme im Bauingenieurwesen (nach [GEIE04])

Bei der Lösung eines direkten Problems wird von bekannten Eingangsgrößen und einem bekannten Modell auf die resultierenden Ausgangsgrößen geschlossen (Bild 17). Diese Art der Problemstellung tritt z. B. bei der Berechnung von Durchbiegungen (= Ausgangsgrößen) eines Tragglieds mit bekannter Struktur (= Modell) in Folge einer bestimmten Belastung (= Eingangsgrößen) auf.



Bild 17: Das direkte Problem (nach [BAFG06])

Die Lösung von Problemen der Bauwerksüberwachung, z. B. die Bestimmung von Einwirkungen (= Eingangsgrößen) und/oder dem Tragwerkszustand einschließlich möglicher Schädigungen (= Modell) auf Basis von am Bauwerk erfassten Tragwerksreaktionen (= Ausgangsgrößen) erfordert die entgegengesetzte Vorgehensweise. D. h., es müssen von bekannten Ausgangsgrößen Rückschlüsse auf die Eingangsgrößen bzw. das Modell gezogen werden. Diese Art der Problemstellung wird als inverses Problem bezeichnet. Inverse Probleme werden unterschieden in Entwurfsprobleme, Eingangsprobleme und Identifikationsprobleme [GEIE04].

Das Entwurfsproblem

Bei einem Entwurfsproblem sind die Eingangs- und Ausgangsgrößen bekannt, das Modell jedoch unbekannt. Ziel ist es, ein Modell zu finden, das den Zusammenhang zwischen den gegebenen Eingangs- und Ausgangsgrößen herstellt (Bild 18). Derartige Probleme werden auch als Black-Box-Probleme bezeichnet [BAFG06]. Entwurfsprobleme treten z. B. beim Training eines künstlichen neuronalen Netzes auf.



Bild 18: Das Entwurfsproblem (nach [BAFG06])

Das Eingangsproblem

Bei einem Eingangsproblem sind das Modell und die Ausgangsgrößen bekannt, die Eingangsgrößen jedoch unbekannt (Bild 19). Ziel ist es, diejenigen Eingangsgrößen zu finden, die basierend auf dem gegebenen Modell die gegebenen Ausgangsgrößen hervorrufen. Diese Art der Problemstellung tritt z. B. bei der Identifikation von Verkehrslasten bei einem Brückenbauwerk auf, wobei neben den Tragwerksreaktionen auch der Zustand des Tragwerks bekannt sein muss.

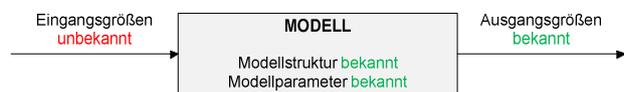


Bild 19: Das Eingangsproblem (nach [BAFG06])

Das Identifikationsproblem

Bei einem Identifikationsproblem sind die Struktur des Modells und die Ausgangsparameter bekannt, die Modellparameter jedoch unbekannt. Die Eingangsgrößen sind entweder bekannt (Input-Output-Identifikationsproblem, Bild 20) oder unbekannt (Output-Only-Identifikationsproblem, Bild 21) [BAFG06]. Ziel ist es, diejenigen Modellparameter zu identifizieren, welche basierend auf der gegebenen Modellstruktur die gegebenen Ausgangsgrößen hervorrufen. Ein Beispiel für ein Input-Output-Identifikationsproblem ist die Kalibrierung des FE-Modells eines Brückenbauwerks auf Grundlage von Belastungsversuchen. Dabei sind die Einwirkungen, die Reaktionen und die Struktur des Modells bekannt und bestimmte Modellparameter (z. B. Materialeigenschaften und Auflagersteifigkeiten) unbekannt. Ein Output-Only-Identifikationsproblem liegt dagegen vor, wenn die FE-Modelladaption nicht im Rahmen von Belastungsversuchen, sondern während der planmäßigen Nutzung des Bauwerks und unbekanntem Wind- und Verkehrsbeanspruchungen durchgeführt wird.



Bild 20: Das Input-Output-Identifikationsproblem (nach [BAFG06])



Bild 21: Das Output-Only-Identifikationsproblem (nach [BAFG06])

Modellarten

Im Rahmen dieses Berichts werden folgende Modelle betrachtet:

- Physikalische Strukturmodelle,
- physikalische Schädigungsmodelle und
- nichtphysikalische (empirische) Modelle.

Eine Übersicht über die Einsatzzwecke der Modelle ist in Bild 22 dargestellt.

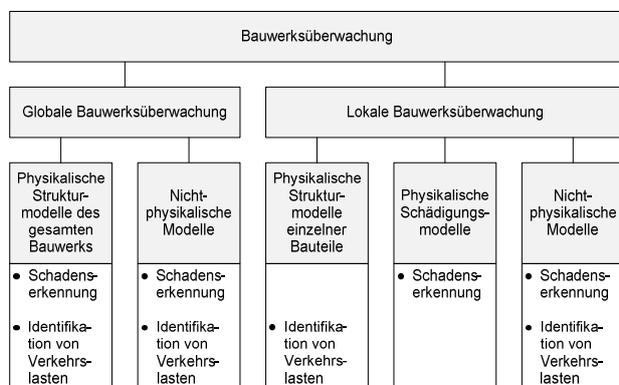


Bild 22: Einsatzzwecke der hier behandelten Modelle

Physikalische Modelle

Grundsätzlich werden Modelle, die die Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems auf Grundlage physikalischer Gesetze abbilden, als „physikalische Modelle“ bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit werden physikalische Modelle unterschieden in physikalische Strukturmodelle und physikalische Schädigungsmodelle.

Physikalische Modelle können wegen der zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten leicht interpretiert werden. Ihre Entwicklung ist jedoch häufig sehr zeit- und kostenaufwändig [ASCE11].

Nichtphysikalische Modelle

Bei nichtphysikalischer (empirischer) Modellierung wird das System durch eine „Black Box“ abgebildet, die die Eingangs- und Ausgangsgrößen ohne die Kenntnis physikalischer Zusammenhänge miteinander verknüpft. Nichtphysikalische Modelle

müssen mit überwachten oder unüberwachten Lernmethoden entwickelt werden.

Der Vorteil nichtphysikalischer Modelle liegt in der kurzen Rechendauer bei der Auswertung, weshalb sie sich insbesondere im Rahmen einer Echtzeit- bzw. Quasi-Echtzeit-Dauerüberwachung einsetzen lassen. Ein Nachteil ist die schlechte Überprüfbarkeit und Interpretierbarkeit der Ergebnisse (Black Box) [ASCE11].

2.4.2 Globale Bauwerksüberwachung

Einwirkungen und bestimmte Schäden, die sich auf die Systemsteifigkeit auswirken (z. B. starke Rissbildung), haben einen direkten Einfluss auf das Tragverhalten eines Bauwerks. Methoden der globalen Bauwerksüberwachung basieren auf der Annahme, dass solche Einwirkungen und Schädigungen des Systems anhand von Änderungen des globalen Tragverhaltens erkannt werden können. Im übertragenen Sinne wird hierbei das gesamte Tragwerk als Messinstrument genutzt.

Modelle

Die häufigsten bei der globalen Bauwerksüberwachung eingesetzten Modelle sind physikalische Strukturmodelle sowie nichtphysikalische Modelle (siehe auch Bild 22).

Bei der globalen Bauwerksüberwachung dienen physikalische Strukturmodelle der Abbildung der Tragstruktur des gesamten Bauwerks. Mögliche physikalische Strukturmodelle sind, je nach Komplexität des Bauwerks, einfache Balkenmodelle oder detaillierte FE-Modelle. Mit Hilfe physikalischer Strukturmodelle lassen sich die Tragwerksreaktionen eines Systems in Folge äußerer Beanspruchung unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen berechnen. Strukturmodelle können wertvolle Informationen über das Verhalten des Bauwerks hervorbringen und dienen z. B. der Berechnung der Tragfähigkeit hinsichtlich zukünftig auftretender Belastungen, Tragwerksmodifikationen oder Schädigungen [ASCE11]. Die Auswertung physikalischer Strukturmodelle – insbesondere komplexer FE-Modelle – kann allerdings sehr aufwändig sein.

Zur Identifikation von Schäden sind geeignete physikalische Schädigungsmodelle in ein Strukturmodell einzubetten. Die Komplexität der Schädigungsmodelle wird von der geforderten Abbildungstiefe des Schadens sowie der Detailtiefe des Strukturmodells vorgegeben: Ein gerissener Bereich eines Bauteils kann z. B. durch einfache Reduzierung der Biegesteifigkeit an der entsprechen-

den Stelle modelliert werden [FRPE02]. Möglich ist jedoch auch eine komplexe bruchmechanische Beschreibung der Schädigung [FRIS07].

Die Art der einsetzbaren nichtphysikalischen Modelle und des Trainingsverfahrens sowie die Struktur der Trainingsdaten sind abhängig von der geforderten Genauigkeit der Ergebnisse.

Eingangsgrößen

Die Eingangsgrößen bei der globalen Bauwerksüberwachung sind die dynamisch oder statisch auf ein Tragwerk wirkenden äußeren Kräfte wie z. B. Eigengewicht, Wind- und Verkehrslasten sowie Temperaturbeanspruchungen.

Äußere Kräfte können sowohl kontrolliert als auch unkontrolliert aufgebracht werden. Bei der Durchführung kontrollierter dynamischer oder statischer Bauwerksversuche lassen sich die Beanspruchungen mit Hilfe entsprechender Aufnehmer messen – die Eingangsgrößen sind daher bekannt. Bauwerksversuche werden häufig zur Bestimmung des Bauwerkszustands vor Beginn der Bauwerksüberwachung durchgeführt (siehe Kapitel 2.2). Werden die Tragwerksreaktionen des Bauwerks dagegen während des planmäßigen Betriebs in Folge der nicht messbaren Beanspruchung aus Wind und Verkehr („ambiente“ Beanspruchung) erfasst, so müssen die Eingangsgrößen als unbekannt betrachtet werden. Eine Übersicht über die Eignung der verschiedenen dynamischen Anregungsmechanismen ist in Tab. 2 dargestellt.

	Schwing- erreg- er	Impulser- erreg- er	Ambiente Erregung
Eigenfrequenzen	+	+	+
Eigenformen	+	+	+
Dämpfungsparameter	-	+	+
Schwingungsintensität während der Nutzung	-	-	+
Untersuchungskosten	-	+/-	+
Anregung im tiefen Frequenzbereich	-	+	+
Anregung im hohen Frequenzbereich	+	+	+/-
Dauerüberwachung, Anwendbarkeit während der Bauwerksnutzung	-	-	+
Periodische Untersuchung	+	+	+
Steuerebare Schwingungsintensität	+	+	-

Tab. 2: Vergleich dynamischer Anregungsmechanismen, + gute Eignung, - schlechte Eignung (aus [GEIE04])

Dynamische Bauwerksversuche

Die Durchführung dynamischer Versuche an Brückenbauwerken (Forced Vibration Test, FVT) erfolgt durch Aufbringen zeitabhängiger äußerer Kräfte an definierten Orten. Die Erregerfrequenz dieser Kräfte ist dabei so einzustellen bzw. zu variieren, dass sämtliche relevanten Eigenfrequenzen angeregt werden. Die Orte, an denen die Kräfte eingetragen werden, sollten nicht mit den Schwingungsknoten der zu identifizierenden Eigenformen (die Stellen, an denen die Schwingung keine Auslenkung besitzt, siehe Bild 23) übereinstimmen. Die während der Versuche erzeugten Schwingungen müssen deutlich größer sein als die Schwingungen, die durch „ungewollte“ Einflüsse (z. B. Wind) hervorgerufen werden [CANT04]. Während der Versuche werden neben der Systemantwort des Bauwerks (d. h. Beschleunigungen, Geschwindigkeiten oder Verschiebungen) ebenso die aufgebrachten Kräfte aufgezeichnet. Die Dauer der Versuche sollte 1.000 bis 2.000 Mal so groß sein wie die Periode der tiefsten Eigenfrequenz der Struktur [ROCA11]. Kontrollierte dynamische Versuche eignen sich vorwiegend zur Anwendung an kleineren Bauwerken [FDCC99, CCMM06]. Die Anregung eines Brückenbauwerks kann auf einem breiten oder einem schmalen Frequenzband erfolgen. Bei einer breitbandigen Anregung einer Struktur wird die zur Verfügung stehende Energie auf einen breiten Frequenzbereich verteilt, sodass alle Eigenfrequenzen innerhalb dieses Bereichs gleichzeitig angeregt werden. Allerdings steht dadurch für die einzelnen Frequenzen ein nur relativ geringer Energieanteil zur Verfügung. Eine breitbandige Anregung kann z. B. mit Hilfe eines Shakers oder eines Impulshammers erfolgen. Bei einer schmalbandigen Anregung wird die gesamte Energie auf einen sehr schmalen Frequenzbereich konzentriert, wodurch sich ein hoher Energieeintrag in den betreffenden Frequenzen ergibt. Der Nachteil beim Einsatz schmalbandiger Erreger liegt im oft hohen Zeitaufwand bei der Bestimmung der Eigenfrequenzen, da hierzu der relevante Frequenzbereich durch langsames Variieren der Erregerfrequenz durchfahren werden muss [CANT04]. Zur schmalbandigen Anregung sind z. B. Unwuchterreger geeignet.

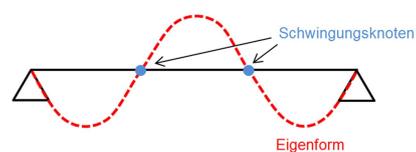


Bild 23: Schwingungsknoten einer Schwingung

Unwuchterreger bestehen aus einzelnen oder mehreren exzentrisch um eine Achse rotierenden Massen (Bild 24 links). Sie besitzen den Nachteil, dass sie bei sehr niedrigen Frequenzen nur geringere Kräfte erzeugen können [CCMM06] und daher nur zuverlässig bei Frequenzen oberhalb von 1 Hz eingesetzt werden können [SAWI95]. Weiterhin sind Unwuchterreger wegen der zum Betrieb erforderlichen Geräte (Aggregate, Steuerung, Kühlung) im Allgemeinen unhandlich, und ihr Einsatz ist relativ kostenaufwändig [FD99].

Eine Alternative zu Unwuchterregern stellen Shaker dar (Bild 24 Mitte). Diese erzeugen Schwingungen mit Hilfe von linear verschieblichen Massen, welche entweder durch elektrodynamische oder servohydraulische Aktuatoren in Bewegung versetzt werden. Elektrodynamische Shaker sind kleiner und handlicher als servohydraulische Geräte, können jedoch nur relativ kleine Kräfte (bis ca. 450 N) erzeugen [ASCE11]. Servohydraulische Shaker können Kräfte in der Größenordnung von mehreren Kilonewton aufbringen. Die Erzeugung von Signalen über 100 Hz ist schwierig [FD99]. Ähnlich wie Unwuchterreger können Shaker meist keine ausreichende Energie zur Anregung niederfrequenter Schwingungen (< 1 Hz) von Brückenbauwerken generieren [CANT04]. Shaker haben im Allgemeinen gegenüber Unwuchterregern den Vorteil, dass sie beliebige Signale wie z. B. Rausch- oder Sweep-Signale (periodische Signale mit sich ändernder Frequenz) erzeugen [FD99]

und das Bauwerk daher in einem breiten Frequenzband anregen können.

Impulse stellen eine weitere Möglichkeit zur Schwingungsanregung eines Bauwerks dar. Ein Impuls ist eine plötzliche Be- und Entlastung, die z. B. mit Hilfe eines Impulshammers (im Vordergrund von Bild 24 links) aufgebracht wird. Hierdurch wird das Bauwerk in einem breiten Frequenzspektrum zu einem Ausschwingvorgang angeregt [KRAM07]. Die beim Aufprall des Hammerkopfes in das Bauwerk eingetragene Energie kann durch Variation der Stärke der Hammerschläge oder des Gewichts des Hammers beeinflusst werden [KOKA10]. Weiterhin lässt sich das Frequenzspektrum, in dem das Bauwerk angeregt wird, durch Einsatz unterschiedlicher Materialien sowie unterschiedlicher Dämpfer verändern: Harte Materialien erzeugen sehr kurze Impulse und damit höhere Frequenzen, weiche Materialien erzeugen längere Impulse und damit tiefere Frequenzen [KRAM07]. Die Vorteile des Impulshammers liegen in der einfachen, schnellen und kostengünstigen Anwendung. Da der Impulshammer nur relativ wenig Energie erzeugen kann und daher das Bauwerk, im Gegensatz zu den vorgenannten Unwuchterregern oder Shakern, nur lokal zu Schwingungen angeregt wird, sollte er an mehreren Stellen der Struktur eingesetzt werden [KOKA10]. Zum Eintrag größerer Energiemengen lassen sich speziell für den Einsatz bei Brücken entwickelte Geräte mit Fallgewichten nutzen (Bild 24 rechts).



Bild 24: links: Unwuchterreger, im Vordergrund Impulshammer [CCMM06]; Mitte: Servohydraulischer Shaker [CANT04]; rechts: System zur stoßförmigen Anregung mit Fallgewichten [PEMD01]

Ein mobiler Schwingungsgenerator mit der Bezeichnung VibroScan® wird in [VIBR10] vorgestellt. Das Fahrzeug eignet sich für die Schwingungsanregung von Brücken im Zuge von Straßen- und Eisenbahnstrecken in einem Frequenzbereich zwischen 8 und 120 Hz. Der Generator eignet sich nur bedingt zur Anregung tiefer Bauwerksschwingungen.



Bild 25: VibroScan-Generator [STE112]

Statische Bauwerksversuche

Bei der Durchführung statischer Bauwerksversuche („Belastungsversuche“) wird das Tragwerk durch statische Lasten bekannter Größe beansprucht. Während der Versuche werden die daraus resultierenden Tragwerksreaktionen (z. B. Dehnungen, Verformungen oder Neigungen) aufgezeichnet. Die Lasten können in Form von auf der Brücke platzierten Fahrzeugen mit definiertem Gewicht, Betonquadern, Wassertanks oder Ähnlichem aufgebracht werden [ASCE11]. Einflusslinien bestimmter Tragwerksreaktionen lassen sich anhand von Überfahrten von Fahrzeugen mit bekanntem Gewicht bestimmen. Zur Minimierung dynamischer Effekte in den Tragwerksreaktionen (z. B. aufgrund von Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche) sollten die Überfahrten jedoch nur mit langsamer Geschwindigkeit erfolgen (Crawl Test). Während eines Belastungsversuchs sind Beanspruchungen durch Verkehr oder durch sonstige relevante Einwirkungen (z. B. starker Wind oder Sonneneinstrahlung) zu vermeiden.

In [GOKS10] wird über die Durchführung von Belastungsversuchen an der Langensand Brücke in

Lucern berichtet. Ziel der Untersuchungen war es, durch Kalibrierung von Finite-Elemente-Modellen des Bauwerks Informationen über die Steifigkeiten der Lagerkonstruktion sowie die Elastizitätsmoduln der verwendeten Materialien zu erhalten. Dazu wurden Durchbiegungen, Verdrehungen und Dehnungen gemessen, die aus fünf unterschiedlichen Anordnungen zweier LKW auf der Brücke resultierten.

Ein spezialisiertes Fahrzeug zur Durchführung von Belastungsversuchen wurde im Rahmen einer Forschungs Kooperation zwischen der Hochschule Bremen, der TU Dresden, der HTWK Leipzig und der Bauhaus-Universität Weimar entwickelt [OQSS01]. Das Belastungsfahrzeug, welches mit dem Namen „BELFA“ bezeichnet ist, eignet sich für Tragfähigkeitsuntersuchungen an Brücken, Durchlässen und ähnlichen Strukturen mit einer Spannweite von bis zu 18 m. Die maximale Prüflast beträgt 1.500 kN. Ein möglicher Versuchsaufbau zur Durchführung von Belastungsversuchen an einer Brücke ist in Bild 26 dargestellt. In [GUSC11] wird über den nunmehr 10-jährigen Einsatz des Fahrzeugs zur Tragfähigkeitsbewertung von Brücken berichtet.

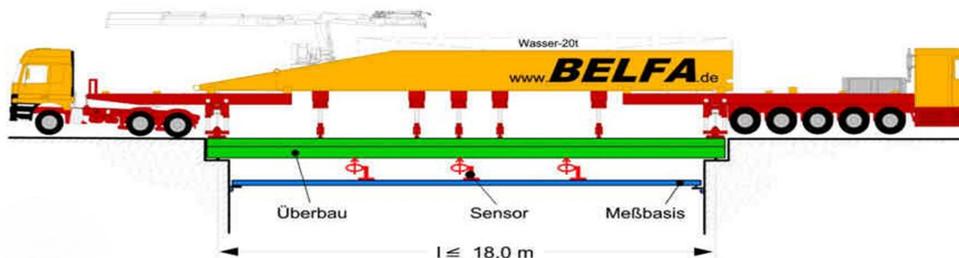


Bild 26: Belastungsfahrzeug BELFA [BELFA12]

Ambiente Beanspruchung

Bei ambierter dynamischer Beanspruchung (Ambient Vibration Test, AVT) werden die Tragwerksreaktionen der Brücke während des Betriebs in Folge von Wind- und Verkehrseinwirkung bestimmt, d. h. ohne den Einsatz zusätzlicher Erreger. Insbesondere bei weitgespannten flexiblen Bauwerken wie z. B. Hänge- oder Schrägseilbrücken, deren relevante Eigenfrequenzen meist im Frequenzbereich unter 1 Hz liegen [SAWI95], stellt die ambiente Anregung die einzig praktische Methode zur Erzeugung von Schwingungen dar. Der Einsatz der Methode ist jedoch ebenso bei kleineren Bauwerken möglich [FD99]. Versuche mit ambierter Anregung können sehr einfach und kostengünstig durchgeführt werden. Außerdem muss die Brücke nicht für den Verkehr gesperrt werden,

was sich insbesondere bei Brücken im Zuge vielbefahrener Strecken als sehr vorteilhaft erweist. Ein Nachteil bei der ambienten dynamischen Beanspruchung liegt in ihrem instationären Charakter, d. h., die hervorgerufenen Bauwerksschwingungen unterliegen einer zeitlichen Veränderlichkeit. Dies führt unter anderem zu Unsicherheiten bei der Bestimmung der Dämpfungswerte der Struktur [SAWI95]. Daneben besteht das Risiko, dass nicht alle Eigenfrequenzen des zu untersuchenden Frequenzbereichs ausreichend angeregt werden und deshalb nicht identifiziert werden können [FD99]. Auch bei ambierter Anregung sollte die Dauer der Messdatenerfassung mindestens dem 1.000- bis 2.000-fachen der Periode der tiefsten Eigenfrequenz der Struktur betragen [ROCA11].

Wind ist bei Bauwerken mit sehr niedrigen Eigenfrequenzen (< 1 Hz) die dominante ambiente Einwirkung. Ein durch Windböen erzeugtes dynamisches Signal verfügt über einen ausgeprägt zufälligen Charakter sowie eine gleichmäßig verteilte Leistungsdichte in einem breiten Frequenzbereich, wodurch es dem Weißen Rauschen, einem Signal mit einem konstanten Leistungsdichtespektrum, sehr ähnelt [ASCE11].

Die ambiente dynamische Anregung in Folge des Verkehrs wird durch die Interaktion der Fahrzeuge mit der Fahrbahnoberfläche hervorgerufen: Trifft ein Rad auf eine Unebenheit, so entsteht eine dynamische Kraft, die Schwingungen des Bauwerks hervorruft. Durch Verkehrseinwirkung erzeugte dynamische Signale zeichnen sich durch ein ungleichförmiges Leistungsdichtespektrum mit Ausprägungen in den Frequenzbereichen von etwa 2 bis 5 Hz, resultierend aus der Schwingung der gefederten Fahrzeugmasse (Body Bounce), und etwa 10 bis 15 Hz, resultierend aus der Schwingung der ungefederten Fahrzeugmasse (Axle Hop), aus. Der Verkehr eignet sich somit vor allem zur Anregung der höheren Eigenfrequenzen eines Bauwerks [DLLK06].

Neben der Beanspruchung durch Wind und Verkehr treten bei einer Dauerüberwachung von Brückenbauwerken unvermeidbar Einwirkungen aus Temperatur und Feuchtigkeit auf. Diese führen zu Veränderungen der Bauwerkseigenschaften sowie des Bauwerksverhaltens und müssen daher bei der Informationsgewinnung berücksichtigt werden.

Ausgangsgrößen

Die Ausgangsgrößen bei der globalen Bauwerksüberwachung stellen die dynamischen und statischen Tragwerksreaktionen dar, die mit Hilfe der Sensorik am Bauwerk erfasst werden (siehe Kapitel 2.3).

Repräsentationsformen dynamischer Tragwerksreaktionen

Zeitabhängig aufgezeichnete dynamische Tragwerksreaktionen des Bauwerks (Schwingbeschleunigungen, Schwinggeschwindigkeiten) können zur besseren Interpretierbarkeit und Identifizierbarkeit von Schädigungen aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert oder weiter mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse ausgewertet werden. Mit jedem Schritt wird die Anzahl der Datenpunkte reduziert, d. h., die Messdaten werden komprimiert [FRIS07]. Dadurch kann es zu

einer Eliminierung schädigungssensitiver Merkmale kommen [FRPE97].

Wird lineares und zeitinvariantes Verhalten des schwingenden Systems unterstellt – was in der Baudynamik wegen der geringen Amplituden in der Regel gegeben ist – so lässt sich jeder periodische Vorgang in eine Summe harmonischer (sinusförmiger) Einzelschwingungen zerlegen. Diese Zerlegung kann mit einer Fourier-Transformation des Ausgangssignals durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Fourier-Transformation stellen die Frequenzen und Amplituden der Einzelschwingungen dar, die eine Darstellung des Ausgangssignals im Frequenzbereich ermöglichen. Die niedrigste Frequenz wird mit „Grundfrequenz“ oder „Grundton“ bezeichnet, die Frequenzen aller weiteren Schwingungen mit „Obertöne“ oder „Harmonische“.

Sollen neben den Frequenzen der Schwingungen (Eigenfrequenzen) auch die Schwingformen (Eigenformen) und die Dämpfungseigenschaften des Tragwerks bestimmt werden, so ist eine experimentelle Modalanalyse durchzuführen. Die Anwendbarkeit von Verfahren der experimentellen Modalanalyse ist abhängig davon, ob die Schwingung verursachende Anregung der Struktur bekannt oder unbekannt ist. Bei bekannter Anregung (Input-Output-Identifikationsproblem, siehe Kapitel 2.4.1) werden zunächst die Übertragungsfunktionen (Frequency Response Functions, FRF) bestimmt, die die Anregung und das Antwortverhalten des Systems miteinander verknüpfen. Aus den Übertragungsfunktionen können durch Anwendung verschiedener Methoden der Kurvenanpassung (Curve Fitting) die modalen Eigenschaften ermittelt werden [CUCA06]. Wird die Tragstruktur dagegen durch unbekannte Beanspruchungen wie z. B. Verkehr oder Wind (ambiente Anregung) zu Schwingungen angeregt (Output-Only-Identifikationsproblem, siehe Kapitel 2.4.1), so ist die Bestimmung der Übertragungsfunktionen nicht möglich. Zwei häufig angewendete Strategien zur Lösung von Output-Only-Identifikationsproblemen sind die Stochastische Unterraumidentifikation (Stochastic Subspace Identification, SSI, Details siehe [OVMO96]) und die Frequenzbereichszerlegung (Frequency Domain Decomposition, FDD, Details siehe [BRZA99, BRVA00]). Diese Strategien basieren auf der Annahme, dass die Anregung über eine konstante spektrale Leistungsdichte verfügt (Weißes Rauschen) [CUCA06].

Schadenserkennung

Bei der Erkennung von Schäden bietet die Analyse des globalen Strukturverhaltens den Vorteil, dass

potentielle Schwachstellen des Systems nicht im Vorfeld bekannt sein müssen, sondern durch die Analyse der Tragwerksreaktionen erkannt, lokalisiert und charakterisiert werden können („Top-Down“-Vorgehen) [SBWH09]. Grundsätzlich können zur Schadenserkennung sowohl dynamische (z. B. Beschleunigungen der Tragwerkschwingungen) als auch statische Strukturantworten (z. B. Dehnungen und Verformungen des Tragwerks) herangezogen werden.

Stufen der Schadenserkennung

Überwachungssysteme zur Erkennung von Schäden auf Grundlage des globalen Tragverhaltens können gemäß [RYTT93] und unter Berücksichtigung der in [WODU04] vorgeschlagenen Zwischenstufe zur Klassifikation von Schäden in die folgenden Stufen eingeordnet werden:

- | | |
|---------|---|
| Stufe 1 | Das System kann feststellen, ob ein Schaden in der Struktur vorhanden ist. |
| Stufe 2 | Das System kann den Ort feststellen, an dem ein Schaden aufgetreten ist. |
| Stufe 3 | Das System kann einen Schaden klassifizieren (Feststellung des Schadenstyps). |
| Stufe 4 | Das System kann das Ausmaß eines Schadens (quantitativ) bestimmen. |
| Stufe 5 | Das System kann Vorhersagen über die Restlebensdauer der Struktur treffen. |

Hierbei erfordert die Identifikation eines Schadens auf einer bestimmten Stufe das Vorhandensein der Schadensinformationen aus allen tiefer liegenden Stufen.

Während Überwachungssysteme der Stufen 1 und ggf. 2 gemäß [CAFA04] durch den Einsatz nicht-physikalischer Modelle des Bauwerks umgesetzt werden können, erfordern Systeme der Stufen 3 bis 5 den Einsatz physikalischer Modelle [DOFP98].

Zur Schadenserkennung der Stufe 4 ist zunächst abzugrenzen, wann ein Schaden als solcher erkannt werden soll, z. B. durch die Definition eines Grenzwertes eines identifizierten Parameters. Dabei sind auch komplexere Definitionen möglich, die mehr als nur einen einzelnen Parameter betreffen [WODU04].

Untersuchung dynamischer Tragwerksreaktionen zur Schadenserkennung

Die Untersuchung dynamischer Tragwerksreaktionen zur Schadenserkennung stellt die am häufigs-

ten praktizierte Vorgehensweise dar [GOKS10]. Der überwiegende Teil der in der Literatur vorgestellten Ansätze behandelt die Analyse der modalen Eigenschaften von Tragwerken. Ursächlich dafür ist die gute Interpretierbarkeit der Eigenfrequenzen und Eigenformen [CAFA04]. Die wesentliche Schwierigkeit bei der Untersuchung dynamischer Tragwerksreaktionen zur Schadenserkennung liegt darin begründet, dass Schäden üblicherweise lokale Phänomene mit nur geringer räumlicher Ausdehnung darstellen. Die meist während dynamischer Belastungsversuche oder ambien-ter Beanspruchung gemessenen niederfrequenten globalen Tragwerksschwingungen mit entsprechend großen Wellenlängen werden durch lokale Schäden jedoch nicht wesentlich beeinflusst [FADO99]. Zur Identifikation lokaler Schäden sind dagegen Schwingungen mit kleiner Wellenlänge zu untersuchen, z. B. die höheren Eigenformen des Bauwerks, die jedoch auf Grund des dazu benötigten hohen Energiebedarfs nur schwierig anzuregen sind [DOFP98]. Ein weiterer Nachteil der Schwingungsanalyse ist der instationäre Charakter der dynamischen Bauwerkseigenschaften, d. h. die Abhängigkeit der Parameter von den vorherrschenden Umwelt- und Betriebseinflüssen (siehe Kapitel 2.1), wodurch vorhandene Schäden verdeckt werden können [SOHN07, MUEL03]. Ansätze zur Schadensidentifikation auf Grundlage dynamischer Tragwerkseigenschaften finden sich z. B. in [MZWW12, HWSR07, WEPI05, TEDE05].

Eine mögliche Vorgehensweise zur schwingungsbasierten Schadenserkennung stellt die Untersuchung der im Rahmen einer experimentellen Modalanalyse ermittelten Eigenfrequenzen des Bauwerks dar. Eigenfrequenzen können mit einer Genauigkeit von 0,1 % bestimmt werden. Jedoch weisen diese eine vergleichsweise geringe Sensitivität hinsichtlich der Schadenserkennung auf, weshalb sie sich nur zur Erkennung (Stufe 1) ausgeprägter Schäden eignen [FRPE97]. Gemäß [CAFA04] ist die ausschließliche Betrachtung von Eigenfrequenzen zur Erkennung von Schäden an Brückenbauwerken nicht zielführend.

Neben den Eigenfrequenzen lassen sich die Eigenformen der Schwingungen zur Schadenserkennung heranziehen. Die Messung der Eigenformen erfordert eine größere Anzahl von Sensoren als die Messung der Eigenfrequenzen [CAFA04]. Der mögliche Fehler bei der Messung von Eigenformen liegt bei etwa 10 % [FRPE97]. Anhand der Untersuchungen der Eigenformen ist eine detailliertere Erkennung von Schäden möglich, z. B. die Lokalisation (Stufe 2).

Die Schadenserkennung erfolgt durch den Vergleich der am Bauwerk erfassten dynamischen Kennwerte mit den entsprechenden Kennwerten

des ungeschädigten Referenzzustands. Bei diesem Vergleich festgestellte Abweichungen können Indizien für die Existenz eines Schadens darstellen. Während Eigenfrequenzen direkt miteinander verglichen werden können, erfolgt die Überprüfung der Ähnlichkeit zweier Eigenformen z. B. mit Hilfe des Modal Assurance Criterion (MAC). Beträgt der MAC-Wert 0, so sind die Eigenformen identisch; beträgt der MAC-Wert dagegen 1, so kann von einer Schädigung des Tragwerks ausgegangen werden [SBWH09].

Weiterhin ist eine Vielzahl von Methoden verfügbar, die auf Ableitungen der Eigenfrequenzen und Eigenformen basieren, z. B. die modale Verzerungsenergie, die Krümmungen der Eigenformen und die Flexibilität. Für umfassende Darstellungen wird auf die Literatur verwiesen [SBWH09, CAFA04, DOFP98, DFPS96].

Untersuchung statischer Tragwerksreaktionen zur Schadenserkennung

Durch die Untersuchung statischer bzw. quasi-statischer Tragwerksreaktionen können tiefere Einblicke in die lokalen Reaktionsmechanismen gewonnen werden als durch Schwingungsanalysen [ASCE11, HASO90], was vor allem in der größeren Empfindlichkeit statischer Tragwerksantworten auf lokale Schäden begründet ist [HEHW06]. Dies wurde auch im Rahmen vergleichender statischer und dynamischer Versuche an Stahlbetonbalken und Spannbeton-Hohlplatten festgestellt [WBWD09]. Statische Reaktionen wie Dehnungen und Verformungen können zudem kostengünstig und präzise gemessen werden [ABDO12].

In [SFBF11] wird über die Überwachung einer Brücke in Portugal berichtet. Der überwiegende Anteil der verwendeten Sensoren dient der Messung statischer Reaktionen wie Dehnungen, Verdrehungen und Verschiebungen. In [GOKS10] wird ein Vorgehen beschrieben, bei dem ein physikalisches FE-Modell einer Brücke auf Basis von Verformungen, Verdrehungen und Dehnungen kalibriert wird, welche im Rahmen statischer Belastungsversuchen gemessen wurden. Weitere Ansätze zur Verwendung statischer Reaktionen zur globalen Überwachung von Tragstrukturen finden sich z. B. in [HBSP07, HJSH97, BABH94].

Einsatz physikalischer Strukturmodelle zur Schadenserkennung

Mit Hilfe physikalischer Strukturmodelle kann eine Schadenserkennung der Stufen 3 bis 5 erreicht werden. Die Schadenserkennung auf Grundlage

physikalischer Strukturmodelle basiert auf der Erstellung eines Rechenmodells des Bauwerks (z. B. ein FE-Modells) und der anschließenden Kalibrierung der unbekanntenen bzw. unsicheren Modelleigenschaften einschließlich der Parameter eingebetteter physikalischer Schädigungsmodelle. Dieser Prozess wird mit den Begriffen „Modelladaption“ oder „Model-Updating“ bezeichnet [FRMO95]. Die Kalibrierung erfolgt durch die Minimierung der Abweichungen zwischen den am Bauwerk bestimmten dynamischen oder statischen Tragwerksreaktionen (Beobachtung) und den entsprechenden Tragwerksreaktionen des Rechenmodells (Vorhersage). Meist werden dazu entsprechende Optimierungsverfahren eingesetzt. Schäden werden durch die Interpretation der Eigenschaften identifizierter Modelle erkannt.

Abhängig davon, ob die Eingangsgrößen (Beanspruchungen) bei der Modelladaption bekannt oder unbekannt sind, handelt es sich dabei entweder um Input-Output- oder Output-Only-Identifikationsprobleme.

Dynamische Struktureigenschaften können unabhängig von der Kenntnis der Anregung bestimmt werden. Bei bekannter Anregung lassen sich die Eigenfrequenzen und Eigenformen einer Struktur mit Hilfe der Übertragungsfunktionen feststellen. Bei unbekannter Anregung dagegen können diese mittels der stochastischen Unterraumidentifikation oder der Frequenzbereichszersetzung ermittelt werden.

Statische Tragwerksreaktionen sind gleichermaßen von den Einwirkungen und vom Zustand der Struktur abhängig. Bei der Durchführung von Belastungsversuchen sind die Einwirkungen bekannt. Hingegen sind die während einer Dauerüberwachung wirkenden Kräfte unbekannt. Zur eindeutigen Identifizierbarkeit der Rechenmodelle im Rahmen einer Dauerüberwachung sind daher Methoden zur gleichzeitigen Kalibrierung der Belastungs- und der Modelleigenschaften zu erarbeiten. Ein derartiger Ansatz wird derzeit am Institut für Massivbau entwickelt [SCKA12, SCKA11, SCKA10, KASC09].

Einsatz nichtphysikalischer Modelle zur Schadenserkennung

Nichtphysikalische Modelle zur Schadenserkennung der Stufe 1 können mit Hilfe unüberwachter Lernverfahren trainiert werden. Beim unüberwachten Training werden nur Daten, die eine Wirkung beschreiben (ohne das Wissen über die zugrunde liegende Ursache) verwendet. Ziel des Trainings ist es, dem Modell die Datenstruktur in den Daten zu vermitteln – das Modell „erlernt“ somit einen

Referenzzustand, z. B. den ungeschädigten Bauwerkszustand. Werden nach erfolgtem Training neue dem Modell unbekannte Messwerte (Messwerte, die nach dem Training am Bauwerk erfasst wurden) angelegt, so werden diese mit dem antrainierten Referenzzustand verglichen. Stellt das Modell dabei Abweichungen fest, so kann dies möglicherweise auf eine aufgetretene Schädigung hindeuten. Damit dabei auch der Einfluss von sich ändernden Umwelt- und Betriebszuständen berücksichtigt werden kann, sollten Trainingsdaten aus einem möglichst langen Zeitraum vorliegen. Der Zeitraum sollte zur Erfassung jahreszeitlicher Einflüsse ein Jahr nicht unterschreiten. Um die Menge der erforderlichen Trainingsdaten zu minimieren, kann die Dimensionalität der Daten (z. B. durch Anwendung der Hauptkomponentenanalyse, Principle Component Analysis, PCA) reduziert werden [WODU04]. Ein Beispiel für ein nichtphysikalisches Modell, das mit unüberwachten Lernverfahren trainiert werden kann, ist die Ausreißeranalyse (Novelty Detection, Anomaly Detection) [WODU04].

Die Entwicklung nichtphysikalischer Modelle zur Schadenserkenkung der Stufe 2 erfordert die Anwendung eines überwachten Lernverfahrens. Ein überwachtes Lernen basiert auf zusammengehörigen Trainingsdatensätzen, die jeweils die Ursache (d. h. einen Schaden) und die daraus folgende Wirkung auf die Tragwerksreaktionen repräsentieren. Neben Trainingsdaten des ungeschädigten Zustands sind auch solche erforderlich, die von Schädigungen an unterschiedlichen Orten des Tragwerks beeinflusst sind. Soll ein nichtphysikalisches Modell z. B. zwischen Schäden im Feld- und Stützbereich eines Durchlaufträgers unterscheiden können, so müssen Messgrößen entsprechend geschädigter Systeme in den Trainingsprozess einbezogen werden. Durch Anlegen der Trainingsdaten an das Modell erlernt dieses die Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen. Die Menge der erforderlichen Trainingsdaten ist abhängig von der Dimensionalität der Daten sowie der Komplexität der Zusammenhänge. Nach erfolgtem Training kann das Modell ihm unbekannte Messgrößen einem der erlernten Zustände zuordnen (Klassifikation).

Die Entwicklung eines nichtphysikalischen Modells zur Schadenserkenkung entspricht der Lösung eines Entwurfsproblems.

Identifikation von Verkehrslasten

Verkehrslasten können direkt gemessen (siehe Kapitel 2.3.2), jedoch ebenso indirekt durch Erfassung und Auswertung des globalen Tragverhaltens

des Bauwerks bestimmt werden (B-WIM, Bridge Weigh-in-Motion). Die Anwendung von B-WIM-Methoden hat gegenüber der direkten Messung folgende Vorteile: (1) Die erforderliche Sensorik wird nicht direkt durch den Verkehr beansprucht, (2) die Installations- und Wartungskosten sind geringer und (3) das globale Tragverhalten ist weniger empfindlich gegenüber dynamischen Einflüssen [LUSB11, LUBA09]. B-WIM-Ansätze beruhen meist auf der Analyse statischer Tragwerksreaktionen.

Das bei der Identifikation von Einwirkungen zu lösende Problem ist das Eingangsproblem. Es ist zu beachten, dass eine Veränderung der Bauwerkseigenschaften während der Überwachung (z. B. das Auftreten eines Schadens) ebenso eine Veränderung der Modellstruktur darstellt. Dies kann zu Fehlern bei der Identifikation der Fahrzeuggewichte führen.

Einsatz physikalischer Strukturmodelle zur Identifikation von Verkehrslasten

Verkehrslasten können durch die Adaption von FE-Modellen identifiziert werden, wobei ausschließlich die Eigenschaften der auf das Modell wirkenden Belastungen kalibriert werden.

Am Institut für Massivbau wurde in der Vergangenheit der IIM-Algorithmus (Identification in Motion) zur Identifikation von Verkehrslasten entwickelt und erfolgreich an einem Brückenbauwerk im Zuge der A61 eingesetzt [LUBA09]. Die Identifikation der Verkehrslasten erfolgt im Rahmen eines zweistufigen Optimierungsverfahrens: Ein Optimierungskern dient der Erfassung übergeordneter Fahrzeugkennwerte (Auftrittszeitpunkt, Gesamtgewicht, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung) aus statisch gemessenen globalen Tragwerksreaktionen. Der andere Optimierungskern wird zur Bestimmung von Achszahl und Achslasten aus statisch gemessenen lokalen Reaktionen der Fahrbahnplatte eingesetzt. Zur Unterstützung des Optimierungsprozesses wird zusätzlich ein nichtphysikalisches Modell in Form eines künstlichen neuronalen Netzes eingesetzt, welches zur Detektion des Auftretens von Achsen herangezogen wird. Die Anpassung des Algorithmus an die Charakteristik einer Brücke erfolgt anhand von Kalibrierfahrten.

Einsatz nichtphysikalischer Modelle zur Identifikation von Verkehrslasten

Die für das Training nichtphysikalischer Modelle erforderlichen Trainingsdaten werden durch Mess-

daten repräsentiert, die im Rahmen von Kalibrierfahrten mit Fahrzeugen unterschiedlicher Gewichte erfasst werden. Das Modell erlernt somit die Reaktion eines Tragwerks auf bestimmte Belastungen. Durch den Vergleich von am Bauwerk erfassten Messgrößen mit den Trainingsdaten kann das Modell die zugrunde liegenden Verkehrslasten identifizieren. Die Kalibrierfahrten sind auf Grund der Einzigartigkeit von Brückenbauwerken an dem zu überwachenden Bauwerk durchzuführen.

Ein Beispiel für eine Verkehrslastidentifikation anhand des Vergleichs von Messdaten findet sich in [CZZW11]. Durch Analyse der kontinuierlich während der Überfahrt von Fahrzeugen aufgezeichneten Tragwerksreaktionen konnten die Fahrzeugeigenschaften ermittelt werden. Während die Fahrzeuggeschwindigkeiten mit Hilfe von Einflusslinien berechnet wurden, wurden die Fahrzeuggewichte durch Vergleich der gemessenen maximalen Verformungen und Dehnungen mit den Reaktionen in Folge einer Kalibrierbelastung bestimmt. Die Identifikation der Fahrzeugeigenschaften erfolgte manuell, kann jedoch ebenso durch den Einsatz entsprechend trainierter nichtphysikalischer Modelle automatisiert werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wird in [ORFR10] beschrieben. An einer aus vier Längsträgern bestehenden Stahlbrücke wurden Crawl Tests durchgeführt, die zur Bestimmung der Querverteilung auftretender Verkehrslasten auf die einzelnen Längsträger herangezogen wurden. Durch den Vergleich von während einer Dauerüberwachung erfassten Messdaten mit den im Rahmen der Crawl Tests gewonnenen Daten konnte die Ermüdungsbeanspruchung der Längsträger an kritischen Stellen ermittelt werden.

2.4.3 Lokale Bauwerksüberwachung

Im Gegensatz zur globalen Bauwerksüberwachung werden die Sensoren bei der lokalen Bauwerksüberwachung nicht am gesamten Bauwerk installiert, sondern gezielt an bestimmten Stellen des Bauwerks angebracht, z. B. an potentiell gefährdeten Bereichen (Hot Spots) oder einzelnen Bauteilen, die sich durch ein ausgeprägt lokales Tragverhalten auszeichnen.

Modelle

Die am häufigsten bei der lokalen Bauwerksüberwachung eingesetzten Modelle sind physikalische Strukturmodelle, physikalische Schädigungsmodelle sowie nichtphysikalische Modelle (siehe auch Bild 22).

Physikalische Strukturmodelle dienen der Abbildung einzelner aus der Gesamtstruktur herausgelöster Bauteile, die über ein lokales Tragverhalten verfügen und nicht maßgeblich vom globalen Tragverhalten der Gesamtstruktur beeinflusst werden. Beispiele hierfür sind die Schrägseile von Schrägseilbrücken.

Physikalische Schädigungsmodelle dienen der Modellierung mechanischer, physikalischer oder chemischer Schädigungsprozesse. Ein Beispiel für ein physikalisches Schädigungsmodell zur Beschreibung eines chemischen Schädigungsprozesses ist das Modell der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion. Mit Hilfe dieses Modells wird die Konzentration von Chloridionen in einem Betonbauteil in Abhängigkeit von der Konzentration der Chloridionen an der Bauteiloberfläche, der Diffusionskonstante des Materials und der Zeit bestimmt.

Nichtphysikalische Modelle können sowohl zur Abbildung einer Schädigung als auch zur Abbildung des Verhaltens eines einzelnen Bauteils eingesetzt werden. Die Art der einsetzbaren Methoden und die erforderlichen Trainingsdaten sind abhängig vom Einsatzzweck der Modelle.

Eingangsgrößen

Die Eingangsgrößen von Strukturmodellen zur lokalen Bauwerksüberwachung werden von den dynamisch oder statisch auf ein Tragwerk wirkenden äußeren Kräfte wie z. B. Eigengewicht, Wind- und Verkehrslasten sowie Temperaturbeanspruchungen repräsentiert.

Die Eingangsgrößen physikalischer Schädigungsmodelle sind abhängig von der Art der Schäden, die durch diese Modelle beschrieben werden. Bei dem bereits zuvor genannten Modell zur Beschreibung der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion stellen die Konzentration der Chloridionen an der Bauteiloberfläche, die Diffusionskonstante des Materials und die Zeit die Eingangsgrößen dar. Bei einem physikalischen Schädigungsmodell zur Berechnung des Feuchtetransports in einem Bauteil kann dagegen die Porosität des Materials eine maßgebliche Eingangsgröße darstellen.

Bei Verwendung nichtphysikalischer Modelle existiert eine Vielzahl verschiedener Eingangsgrößen, die stark abhängig sind vom Einsatzzweck der Modelle.

Weitere mögliche Eingangsgrößen bei der lokalen Bauwerksüberwachung sind dynamisch wirkende Kräfte, die mit Hilfe von Patches aus piezoelektrischen Materialien in ein Bauteil eingetragen werden und dieses kurzzeitig zu Schwingungen mit

Frequenzen von mehr als 30 kHz anregen („Active Sensing“) [LSLS04, SFHS04]. Zur Messung der Schwingungsantwort können dieselben Piezo-Patches dienen, die auch zur Anregung eingesetzt werden. Weil die Auflösung bei der Lokalisation von Schäden anhand von dynamischen Bauteilreaktionen stark abhängig ist von der Wellenlänge der erzeugten Schwingung, können mechanische Schäden (z. B. Risse, Verbundversagen o. ä.) anhand der Analyse hochfrequenter Schwingungen mit sehr großer Genauigkeit bestimmt werden; allerdings muss sich der Schaden in der Nähe des Aktuators bzw. Sensors befinden [FRPE97]. Hochfrequente Schwingungen reagieren außerdem relativ unempfindlich auf wechselnde Temperatureinflüsse. In [SOHN07] wird über die Anwendung von Active Sensing an einer Stahlbrücke berichtet. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von Piezo-Patches Risse an den Hauptträgern und den Anschlüssen der Trägersteifen erkannt werden können.

Ausgangsgrößen

Die Ausgangsgrößen bei der lokalen Bauwerksüberwachung repräsentieren die am Bauwerk gemessenen Parameter. Z. B. stellt die Ausgangsgröße bei der Beschreibung der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion die Konzentration von Chloridionen im Innern eines Betonbauteils dar, die mit Hilfe entsprechender Sensoren erfasst werden kann. Weitere mögliche Ausgangsgrößen sind Schwingungen, Verformungen und Dehnungen.

Schadenserkennung

Da die Lage der Hot Spots vor Beginn der Bauwerksüberwachung bekannt sein muss, wird die lokale Bauwerksüberwachung auch als „Bottom-Up“-Ansatz bezeichnet [SBWH09]. Bottom-Up-Strategien werden bei der Bauwerksüberwachung derzeit am häufigsten verfolgt [SBWH09].

Einsatz physikalischer Schädigungsmodelle zur Schadenserkennung

Zwei Beispiele für den Einsatz physikalischer Schädigungsmodelle zur Schadenserkennung finden sich in [DSSG08]:

- Unter Einsatz von Anodenleitern wurde an einer Vielzahl von Bauwerken das Eindringen von korrosionsauslösenden Chloriden in das Bauwerksinnere überwacht. Mit Hilfe der Anodenleiter und der physikalischen Zusammenhänge

können Rückschlüsse auf die Korrosionsaktivität des Bewehrungsstahls gezogen werden.

- Durch den physikalischen Zusammenhang zwischen dem mit Hilfe von Multiring-Elektroden gemessenen Elektrolytwiderstand und dem Wassergehalt eines Bauteils kann die Durchfeuchtung des Bauteils bestimmt werden. Auf diese Weise wurde die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung von Betonfahrbahnen überwacht.

Bei Kenntnis physikalischer Schädigungsmodelle ist eine Vielzahl weiterer Anwendungsfälle vorstellbar, z. B. die Beschreibung der Karbonatisierung.

Einsatz nichtphysikalischer Modelle zur Schadenserkennung

Nichtphysikalische Modelle werden häufig zur Grenzwertüberwachung eingesetzt. In [SFBF11] wird z. B. das Monitoringkonzept einer Brücke in Portugal vorgestellt. Die Informationsgewinnung basiert auf einer Grenzwertüberwachung einzelner dynamischer und statischer Tragwerksreaktionen und Umweltbedingungen.

Die lokale Schadenserkennung auf Grundlage von Active Sensing basiert meist ebenso auf der Anwendung nichtphysikalischer Modelle. Dabei wird die gemessene Schwingungscharakteristik mit den entsprechenden Kennwerten eines Referenzzustands, z. B. dem ungeschädigten Zustand, verglichen.

Identifikation von Verkehrslasten

Einsatz physikalischer Strukturmodelle zur Identifikation von Verkehrslasten

Ein Beispiel für den Einsatz physikalischer Strukturmodelle zur Identifikation der wirksamen Kräfte in Schrägseilen von Schrägseilbrücken wird in [GEIE04] vorgestellt. Durch die Untersuchung der Schwingungscharakteristik der Seile können die entsprechenden Eigenfrequenzen, die Biegesteifigkeit und die Dämpfungsparameter abgeleitet werden. Mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens können die Kabelkräfte mit einer Genauigkeit von etwa 1 % ermittelt werden. Eine ähnliche Anwendung findet sich auch in [MOCA12].

Einsatz nichtphysikalischer Modelle zur Identifikation von Verkehrslasten

Ein Vorgehen zur Identifikation von Verkehrslasten auf Grundlage der im Rahmen einer lokalen Bau-

werksüberwachung gewonnenen Messgrößen wird in [LIGH09] beschrieben. Der Ansatz basiert auf Verformungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion (Durchbiegungen der Lamellen, Dehnungen der Traversen). Um das Verformungsverhalten der Fahrbahnübergangskonstruktion hinsichtlich unterschiedlicher Beanspruchungen feststellen zu können, wurden im Vorfeld der Überwachung Kalibrierfahrten (Fahrzeuge mit 25 t, 40 t und 60 t Gesamtgewicht) durchgeführt.

2.5 Bewertung

Einer der Gründe für die Überwachung von Brücken ist die frühzeitige Identifikation schädigender Prozesse. Mit Hilfe von Bewertungsmethoden können die Auswirkungen identifizierter Schädigungen auf die Tragsicherheit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit des Bauwerks abgeschätzt werden. Dabei sind sowohl die momentane als auch zukünftige Situationen zu betrachten. Um Aussagen zur Fortentwicklung des Zustands und damit der Zuverlässigkeit eines Bauwerks treffen zu können, sind entsprechende Modelle zur Beschreibung der Schädigungsprozesse sowie der Verkehrslastentwicklung erforderlich.

Gemäß [RUHR06a] kann die Bewertung eines Bauwerks durch unterschiedliche Ansätze erfolgen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der benötigten Informationen, des Aufwands und der Genauigkeit. Die Einteilung erfolgt in fünf Bewertungsstufen.

Bewertungsstufe 0 – Qualitative Bewertung

Ein Bewertungsverfahren der Stufe 0 basiert auf der qualitativen Abschätzung von visuell erfassten Abnutzungserscheinungen und Schädigungen eines Bauwerks auf Grundlage von Erfahrungen.

Dieses Vorgehen wird bei herkömmlichen Brückenprüfungen angewandt und eignet sich weder für eine objektive Zustandsbestimmung noch für die Integration in ein automatisiertes Überwachungssystem.

Bewertungsstufe 1 – Messdatenbasierte Bewertung

Bei Anwendung eines Bewertungsverfahrens der Stufe 1 erfolgt die Abschätzung der Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks durch Vergleich der im Rahmen einer Überwachung erfassten Messwerte mit entsprechenden zulässigen Grenzwerten, die technischen Regelwerken oder

Richtlinien entnommen werden. Hierbei wird keine rechnerische Untersuchung des Tragwerksverhaltens durchgeführt.

Bewertungsverfahren der Stufe 1 werden üblicherweise mit Hilfe nichtphysikalischer Modelle umgesetzt. Einfache Modelle basieren auf einer Grenzwertüberwachung. Modelle, die mit überwachtem Lernverfahren trainiert werden, eignen sich für eine detailliertere Interpretation der Messgrößen. Mit ihnen kann unter anderem festgestellt werden, ob Schwankungen in den Messgrößen aus Umwelt- oder Betriebseinflüssen resultieren, oder ob diese Hinweise auf mögliche Schäden darstellen. Um fehlerhafte Warnmeldungen zu vermeiden, sollten die Trainingsdaten ein möglichst breites Spektrum von Tragwerksbeanspruchungen sowie zugehörigen Reaktionen abdecken.

Bewertungsstufe 2 – Bewertung auf Grundlage vereinfachter Rechenmodelle

Eine Bewertung der Stufe 2 basiert auf der Abschätzung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks durch Analyse eines meist vereinfachten Rechenmodells der Struktur, welches anhand von bekannten Bauwerksinformationen (statische Berechnung, Planunterlagen, ggf. Ergebnisse von Bauwerksprüfungen, weitergehenden örtlichen Untersuchungen oder Materialprüfungen) entwickelt wird. Es werden keine Messdaten aus einer Bauwerksüberwachung verwendet. Die Nachweisführung erfolgt semi-probabilistisch mit normativen Teilsicherheitsbeiwerten.

Bewertungsstufe 3 – Bewertung auf Grundlage verbesserter Rechenmodelle

Bei einer Bewertung der Stufe 3 erfolgt die Abschätzung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks durch Analyse eines verbesserten Rechenmodells der Struktur (ggf. auch unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten), welche anhand von Messgrößen aus Belastungsversuchen oder aus einer Bauwerksüberwachung kalibriert wurde. Die Nachweisführung erfolgt semi-probabilistisch mit normativen Teilsicherheitsbeiwerten.

Zur quantitativen Bewertung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit muss ein physikalisches Modell der Struktur entwickelt werden, welches im Rahmen eines Model-Updateings zu kalibrieren ist. Ein häufig verfolgtes Ziel bei der Kalibrierung physikalischer Modelle ist die Identifikation von Bauteilsteifigkeiten. Insbesondere bei der Be-

trachtung von Spannbetonstrukturen sind jedoch Diskrepanzen zwischen der Bauwerkssteifigkeit und der Tragfähigkeit möglich: Durch den Ausfall von Spanngliedern wird die Tragfähigkeit des Bauwerks stark beeinträchtigt. Die Bauwerkssteifigkeit jedoch, die hauptsächlich von der Steifigkeit des Betonquerschnitts und nur geringfügig von der Steifigkeit der Spannglieder abhängt, bleibt im Wesentlichen unbeeinflusst [FRIS07]. Eine Bewertung der Tragsicherheit basierend auf identifizierten Bauwerkssteifigkeiten ist demnach nur eingeschränkt möglich.

Bewertungsstufe 4 / Bewertungsstufe 5 – Bewertung auf Grundlage probabilistischer Verfahren

Bei einer Bewertung der Stufen 4 und 5 wird der Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks durch Analyse eines verbesserten Rechenmodells der Struktur (ggf. auch unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten) geführt, welches anhand von Messgrößen aus Belastungsversuchen oder aus einer Bauwerksüberwachung kalibriert wird. Die Nachweisführung erfolgt entweder mit probabilistischen Näherungsverfahren (FORM, First-Order Reliability Method bzw. FORM, First-Order Reliability Method bzw. FORM, First-Order Reliability Method), wobei die geforderten Zielwerte der Zuverlässigkeitsanforderungen bauwerksspezifisch angepasst werden, oder mit vollprobabilistischen Methoden (z. B. Monte Carlo Simulation, MCS).

Mit probabilistischen Verfahren kann die Zuverlässigkeit eines Bauwerks, d. h. die Wahrscheinlichkeit, mit der ein definierter Grenzzustand für einen vorgegebenen Bezugszeitraum nicht überschritten wird, individuell berechnet werden. Durch die Abbildung von Einwirkungen und Widerständen in Abhängigkeit von der Zeit ist auch die Untersuchung zukünftiger Entwicklungen möglich. Da sowohl die Funktionen der Einwirkungen als auch die der Widerstände gewissen Streuungen unterliegen und daher nicht eindeutig beschrieben werden können, müssen die zugrunde liegenden physikalischen Modelle (Modelle zur Beschreibung der Einwirkungen, des Bauwerks sowie möglicher Schädigungen) probabilistisch formuliert werden [MUVO11]. Anhand des Überschneidungsbereichs zwischen den Verteilungskurven der Einwirkungen und der Widerstände kann die Schädigungswahrscheinlichkeit ermittelt werden. In Bild 27 ist ersichtlich, wie das Zuverlässigkeitsniveau sowie die Restnutzungsdauer eines Bauwerks durch Verkehrslasterhöhungen, Tragwerksschäden und Instandsetzungsmaßnahmen beeinflusst werden können.

Möglichkeiten zur zuverlässigkeitsbasierten Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen wurden im Rahmen des gleichnamigen Teilprojekts des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ erarbeitet [FSTR13].

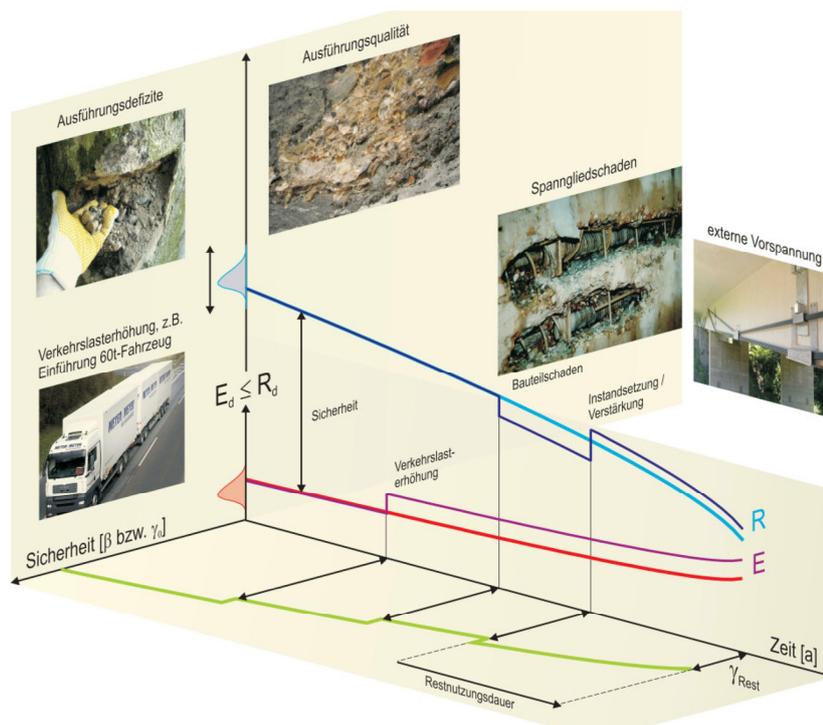


Bild 27: Qualitative Darstellung von zeitabhängigem Sicherheitsabstand und Restnutzungsdauer [AHMA11]

2.6 Fallbeispiele für Überwachungssysteme von Brückenbauwerken

In diesem Kapitel werden einige in der Literatur dokumentierte Fallbeispiele für Überwachungssysteme von Brückenbauwerken aufgezeigt. Anhand der Beispiele soll ein Überblick über die in der Praxis angewandten Technologien und Methoden vermittelt werden. Dabei werden insbesondere das Ziel der Überwachung und die Komponenten zur Datenakquisition, zur Informationsgewinnung sowie zur Bewertung dargestellt.

2.6.1 Westendbrücke, Berlin

Bei der Westendbrücke handelt es sich um eine achtfeldrige Spannbetonbrücke mit Feldlängen zwischen 5 und 38 m und einer Gesamtlänge von 242 m. An dem Bauwerk traten seit der Fertigstellung wiederholt Schäden auf, die durch Instandsetzungsmaßnahmen behoben wurden [RRSS03]. Die Westendbrücke wird nunmehr seit 19 Jahren dauerhaft überwacht (vgl. [CANT97]). Die Überwachung dient zur Erfassung statischer und dynamischer Verkehrslasten sowie des Verkehrsaufkommens, zur Überwachung des globalen Tragwerkszustands anhand gemessener Schwingungen und Neigungen, zur Aufzeichnung maximaler Beanspruchungen und Deformationen und zur Beobachtung bekannter Schäden [RUEC12a].

Das Sensornetz der Westendbrücke besteht aus insgesamt 36 Sensoren, darunter 4 Dehnungsmesser, 20 Schwinggeschwindigkeits- und 3 Beschleunigungssensoren sowie Aufnehmern zur Messung von Rissbreiten und Temperaturen [WENZ09].

Die Identifikation der Verkehrslasten erfolgt anhand des Vergleichs aktuell erfasster Messgrößen mit Daten, die im Rahmen von Kalibrierfahrten gewonnen wurden. Der Tragwerkszustand wird anhand der gemessenen Schwingungen beobachtet. Zur lokalen Überwachung der Koppelfugenrisse des Bauwerks werden die Rissöffnungen aufgezeichnet und hinsichtlich ihrer Korrelation mit den Bauteiltemperaturen untersucht [RRSS03].

Die Anwendung eines Ansatzes zur quantitativen Bewertung der im Rahmen der Überwachung gewonnenen Informationen ist nicht bekannt.

2.6.2 Reichsbrücke, Österreich

Die Reichsbrücke in Wien ist eine zweigeschossige Spannbetonbrücke mit einer maximalen Feld-

länge von 169 m. Die Brücke wird seit dem Jahr 2004 einer Dauerüberwachung unterzogen, um Schäden am Bauwerk festzustellen, zu lokalisieren, ihr Ausmaß zu bestimmen und die Sicherheit des Tragwerks abzuschätzen [REIC13].

Zur Messdatenerfassung werden Beschleunigungs-, Verformungs- und Temperatursensoren eingesetzt. Die Beschleunigungssensoren wurden derart an das Bauwerk angebracht, dass sämtliche relevante Eigenformen erfasst werden können. Die Datenerfassung erfolgt mit mehreren Datenloggern, wobei kontinuierliche sowie ereignisbasierte Konzepte verfolgt werden. Die Datenlogger sind mit einem zentralen Server verbunden, der die Daten synchronisiert und über eine Breitband-Internetverbindung an die Monitoringzentrale überträgt. Dort findet schließlich die Auswertung der Daten statt. Um die Ergebnisse der Überwachung jederzeit abrufen zu können, wurde ein entsprechendes Internetportal [REIC13] eingerichtet.

Vor Beginn der Überwachung erfolgte zunächst eine Basisuntersuchung, bei der unter Einsatz der Stochastischen Unterraumidentifikation die modalen Eigenschaften der Brücke (Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfungskoeffizienten) aus den ambienten Schwingungsmessungen ermittelt worden sind. Darüber hinaus wurde ein FE-Modell der Brücke erstellt und angepasst (Model-Updating). Während der Überwachung werden die Eigenfrequenzen des Bauwerks mittels einer Fast-Fourier-Transformation bzw. der Stochastischen Unterraumidentifikation ermittelt und bei Bedarf visuell dargestellt. Durch die Analyse des Schwingungsverhaltens über längere Zeiträume in Kombination mit den Bauwerkstemperaturen ist lt. [GEDE05] eine sehr zuverlässige Bauwerksüberwachung realisierbar. Neben den Schwingungsdaten werden ebenso statisch gemessene Verformungen in den Überwachungsprozess einbezogen. Dadurch lassen sich zusätzliche Informationen über das Bauwerk gewinnen, was bei einer ausschließlichen Untersuchung von Schwingungsdaten nicht möglich wäre.

Zur Bewertung der aktuellen Sicherheit und Zuverlässigkeit der Reichsbrücke wird anhand des kalibrierten FE-Modells ein Zuverlässigkeitsindex berechnet [GEDE05]. Weitere Informationen über dieses Vorgehen sind nicht bekannt.

2.6.3 Europabrücke, Österreich

Bei der Europabrücke handelt es sich um eine in der Nähe von Innsbruck gelegene Stahlbrücke im Zuge der Brennerautobahn. Das Bauwerk besitzt eine Gesamtlänge von 657 m. Auf Grund der starken Schwingungsintensitäten und der daraus re-

sultierenden Ermüdungsbeanspruchung wurde im Jahr 2003 ein System zur Dauerüberwachung installiert, mit dem die tatsächliche Ermüdungsbeanspruchung und die Auswirkungen auf die Lebensdauer des Bauwerks abgeschätzt werden können [WENZ09].

Zur Datenakquisition werden Aufnehmer zur Messung von Beschleunigungen, Verformungen (Widerlager), Temperaturen und Windgeschwindigkeiten eingesetzt. Die erfassten Daten werden langfristig in einer Datenbank abgelegt. Vor der Analyse der Daten werden Ausreißer eliminiert und Verformungen aus den gemessenen Beschleunigungen berechnet. Zur Information des Bauwerksbetreibers wird einmal pro Woche ein Bericht generiert.

Bei der Datenanalyse werden zunächst durch Anwendung des Rainflow-Verfahrens die auftretenden Belastungszyklen bestimmt. Diese bilden die Grundlage für die anschließende Ermüdungsbeurteilung und die Lebensdauervorhersage auf globaler und lokaler Ebene, wobei ebenso die FE-Methode zum Einsatz kommt. Einzelheiten zum angewendeten Verfahren können [VEWE06] entnommen werden.

2.6.4 Øresundbrücke (Dänemark / Schweden)

Die Øresundbrücke (Øresundsbron) ist eine zwei-stöckige Schrägseilbrücke für kombinierten Fahrzeug- und Eisenbahnverkehr. Das Bauwerk weist eine Gesamtlänge von mehr als 7.800 m auf und ist mit einem System ausgestattet, welches kontinuierlich die Schwingungen und Verformungen der Schrägseile und des Überbaus misst und analysiert.

Zur Datenerfassung wurden 22 dreiachsige Beschleunigungsaufnehmer mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz, 19 Dehnungsmesser und 12 Temperatursensoren an verschiedenen Stellen der Schrägseile und des Überbaus angebracht. Die Umgebungsbedingungen werden von zwei Wetterstationen aufgezeichnet. Während die Beschleunigungsaufnehmer ereignisbasiert aktiviert werden, erfolgt die Erfassung statischer Größen auf kontinuierlicher Basis. Die aufgezeichneten Daten werden an einen Kontrollraum gesendet und können dort nahezu in Echtzeit visualisiert werden.

Die automatisierte Datenanalyse erfolgt anhand von Vergleichen der gemessenen Werte mit zuvor festgelegten Grenzwerten. Übersteigen beispielsweise die erfassten Schwingungen der Schrägseile, der Pylone oder der Fahrbahn ein bestimmtes

Niveau, so wird automatisch eine Warnmeldung an den Bauwerksbetreiber übermittelt [PEET09].

Über den Einsatz von Verfahren zur weiterführenden Informationsgewinnung oder zur Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse ist nichts bekannt. In [PEET09] werden jedoch Vorgehensweisen zur automatisierten Bestimmung der dynamischen Eigenschaften des Bauwerks sowie der Kräfte in den Schrägseilen anhand der erfassten Schwingungsdaten vorgestellt. Die Verfahren werden „offline“ angewendet – eine Echtzeit-Anwendung erscheint auf Grund des Rechenaufwands schwierig.

2.6.5 Ponte da Lezíria, Portugal

Das Sensornetz der Ponte da Lezíria, einer Spannbeton-Balkenbrücke mit einer Gesamtlänge von 11.670 m, besteht zu 80 % aus herkömmlichen elektrischen Messaufnehmern zur Erfassung von Dehnungen, Neigungen, Verformungen, Korrosion, Auskolkung sowie Umweltbedingungen, zu 5 % aus dreiachsigen Beschleunigungsmessern zur Erfassung von Bauwerksschwingungen in Folge von Erdbeben oder Schiffsanprall und zu 15 % aus faseroptischen Sensoren zur Messung von Verformungen, Dehnungen und Temperaturen [SFBF11]. Die Aufnehmer sind am Bauwerk selbst, an der Gründung sowie im Baugrund platziert. Zur Datenübertragung wurde auf Grund der großen Entfernungen der Knoten zueinander ein kabelgebundenes Kommunikationsnetzwerk eingerichtet. Die Daten werden an einen dezentral angeordneten Server übertragen und werden dort visualisiert und ausgewertet.

Die Analyse der Messdaten geschieht durch Vergleich mit festgelegten Grenzwerten. Für einige Messgrößen konnten noch keine entsprechenden Grenzwerte definiert werden, da hierzu noch keine ausreichenden Informationen bzw. Erfahrungen vorliegen.

Vorgehensweisen zur Bewertung der gewonnenen Informationen hinsichtlich der Auswirkungen auf die Bauwerkszuverlässigkeit sind nicht dokumentiert.

2.6.6 Zhanjiang-Bay-Brücke, China

Die Zhanjiang-Bay-Brücke ist eine Schrägseilbrücke mit einer Gesamtlänge von fast 4.000 m. Auf Grund seiner Bedeutung für die Region wird das Bauwerk einer Echtzeit-Dauerüberwachung unterzogen [CZZW11]. Vor der Einrichtung des Sensornetzes wurden anhand eines FE-Modells Sensitivitätsstudien durchgeführt. Dabei wurden diejenigen Parameter (Verformungen, Neigungen, Dehnun-

gen, Kräfte, Temperaturen, Eigenfrequenzen, Windgeschwindigkeiten) identifiziert, die sich zur Bestimmung des Bauwerkszustands besonders gut eignen. Auf diese Weise konnte die Anzahl der Sensoren und damit der Umfang der erfassten Messdaten deutlich reduziert werden. Insgesamt wurden 60 Sensoren eingesetzt, darunter 16 elektromagnetische Sensoren zur Erfassung der Kräfte und Temperaturen der Schrägkabel, 18 Schwing-saitendehnungsmesser, ein Anemometer, ein Beschleunigungssensor, 20 Temperaturfühler, 3 GPS-Rover sowie eine GPS-Basisstation. Die Daten der Sensoren werden von 3 dezentral angeordneten Datenerfassungssystemen aufgezeichnet, synchronisiert, gefiltert und an einen zentralen Server übertragen, wo sie in einer Datenbank abgelegt werden.

Gemäß [CZZW11] wurden viele Möglichkeiten zur Gewinnung von Informationen aus den Messdaten untersucht. Die meisten der analysierten Verfahren wurden jedoch entweder für zu schwierig umzusetzen (genannt werden an dieser Stelle wissensbasierte Systeme) oder für zu theoretisch befunden, um sie bei komplizierten Tragstrukturen anwenden zu können (als Beispiel werden hier neuronale Netze angeführt). Stattdessen wurde ein lt. Aussage der Autoren „praktischer und effektiver Ansatz“ gewählt, der auf dem Vergleich der erfassten Messwerte mit 3 zuvor definierten Grenzwerten basiert. Die Grenzzustände kennzeichnen den Gebrauchszustand, den Bemessungszustand und den Traglastzustand. Darüber hinaus werden die Messdaten einer statistischen Auswertung unterzogen, bei der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte bestimmt und in Berichten dokumentiert werden.

Eine weiterführende Messdatenanalyse sowie eine Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse wird nicht durchgeführt.

2.6.7 Brücken in Hongkong

Die Tsing-Ma-Brücke, die Kap-Shui-Mun-Brücke, die Ting-Kau-Brücke, die Brücken im Shenzhen Western Corridor und die Stonecutters-Brücke in Hongkong gehören zu den längsten Hänge- und Schrägseilbrücken der Welt. Zur Überwachung der Bauwerke wird das sogenannte „Wind And Structural Health Monitoring System“ (WASHMS, siehe auch [WONG04]) eingesetzt. Das System dient im Wesentlichen der Erkennung von Unregelmäßigkeiten beim Betrieb, Abnutzungserscheinungen und Schädigungen, jedoch ebenso zur Erfassung von Einwirkungen und zur Entwicklung und Verbesserung von Entwurfsprinzipien. Das WASHMS setzt sich zusammen aus dem Sensorsystem, dem Datenerfassungs- und Übertragungssystem, dem

Datenverarbeitungssystem, dem System zur Bestimmung des Bauwerkszustands, dem Datenmanagementsystem und dem Inspektions- und Wartungssystem.

Die Sensornetze der genannten Brücken bestehen aus bis zu etwa 1.500 Messaufnehmern (Stonecutters-Brücke) zur Erfassung verschiedener Parameter wie z. B. Umweltbedingungen, Verkehrslasten, Bauwerkseigenschaften und Tragwerksreaktionen. Die Datenübertragung erfolgt sowohl drahtlos als auch drahtgebunden.

Zur Darstellung und Verarbeitung der Messdaten werden speziell entwickelte Softwarekomponenten in Verbindung mit FE-Softwarepaketen eingesetzt. Die Analyse der Daten geschieht online (d. h. in Echtzeit) sowie offline. Die Online-Überwachung erfolgt durch den Vergleich der statisch und dynamisch gemessenen Größen mit zuvor definierten Grenzwerten, welche einen Rückschluss auf den Zustand der Bauwerke zulassen. Bei den Offline-Untersuchungen werden die Messdaten mit einer Vielzahl von Verfahren untersucht, z. B. durch die Anwendung von Model-Updating-Verfahren oder von datengetriebenen Algorithmen [NIWX11]. Ebenso sind Ermüdungsberechnungen und entsprechende Lebensdauerprognosen möglich.

Die Möglichkeiten und Einsatzbereiche des Überwachungssystems WASHMS sind sehr vielfältig und werden fortwährend erweitert und auch für die Anwendung in anderen Bereichen (z. B. bei Hochhäusern) angepasst.

2.6.8 Confederation-Brücke, Kanada

Die Confederation-Brücke ist eine Mehrfeldbrücke mit einer Gesamtlänge von 12,9 km und gehört damit zu den längsten Brücken der Welt. An der Brücke ist seit dem Jahr 1997 ein Dauerüberwachungssystem installiert, welches die Bauwerksreaktionen infolge von Wind, Verkehr, anprallendem Treibeis sowie Erdbeben aufzeichnet und analysiert. Im Folgenden wird das in [DLLK06] vorgestellte Konzept beschrieben.

Das Sensornetz des Bauwerks besteht im Wesentlichen aus 76 Piezo- und Servobeschleunigungsaufnehmern, die zur Erfassung der Bauwerks-schwingungen dienen. Die Datenerfassung geschieht entweder kontinuierlich oder ereignisbasiert. Nach der Erfassung der Messgrößen werden diese konditioniert, gefiltert, in digitale Daten konvertiert und mittels einer Internetplattform zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt. Im Anschluss erfolgt eine Vorverarbeitung, bei der die Daten sortiert, synchronisiert, ergänzt, bereinigt und gefiltert werden. Ebenso werden durch zwei-

fache Integration der Schwingbeschleunigungen die zugehörigen Verformungsvektoren berechnet. Zur Visualisierung der Daten dient eine grafische Benutzerplattform.

Zur Datenanalyse wurden zwei Methoden in das Überwachungssystem integriert: (1) Mittels einer Spektralanalyse können die Schwingungsdaten aus dem Zeit- in den Frequenzbereich transformiert werden. (2) Zur Bestimmung der modalen Eigenschaften des Bauwerks wird die Stochastische Unterraumidentifikation angewendet.

Außer dem Vergleich der Analyseergebnisse mit Erwartungswerten, welche z. B. im Rahmen von FE-Untersuchungen ermittelt wurden, kommen keine weiteren Bewertungsverfahren – wie etwa eine zuverlässigkeitsbasierte Bewertung – zum Einsatz.

2.6.9 Kings-Stormwater-Brücke, USA

In [KAGU09] wird das internetbasierte Überwachungssystem der Kings-Stormwater-Brücke vorgestellt. Bei dem Bauwerk handelt es sich um eine etwa 20 m lange Zweifeldbrücke, die unter Einsatz von faserverstärktem Kunststoff und Beton errichtet wurde. Die Brücke ist mit einem Sensornetz bestehend aus 63 einachsigen Beschleunigungsmessern zur Erfassung ambienter Schwingungen, 20 Dehnungsmessern, 4 Sensoren zur Messung der Durchbiegungen, einem Temperatursensor und einer Kamera ausgerüstet. Die Messdatenerfassung erfolgt in festgelegten Intervallen sowie bei Eintreten besonderer Ereignisse (z. B. Erdbeben). Zur Übertragung der Daten an einen zentralen Server dient eine Funkverbindung.

Nach der Datenerfassung werden zunächst die Eigenfrequenzen und Eigenformen aus den Schwingungsmessdaten extrahiert. Im Anschluss erfolgt die automatisierte Kalibrierung eines FE-Modells auf Grundlage der zuvor extrahierten dynamischen Eigenschaften. Eine Veränderung der Eigenfrequenzen und Eigenformen kann z. B. auf eine Veränderung der Bauteilsteifigkeiten zurückzuführen sein. Auf diese Weise konnte eine gelöste Verbindung zwischen den Längsträgern und der Fahrbahnplatte erkannt werden, die zu Rissbildung und demzufolge einer Abnahme der Bauwerkssteifigkeit führte.

Eine Untersuchung erkannter Schäden hinsichtlich des Einflusses auf die Zuverlässigkeit des Bauwerks wird nicht durchgeführt.

2.7 Zusammenfassung

Systeme zur Bauwerksüberwachung werden eingesetzt, um aus kontinuierlich am Bauwerk gemessenen Parametern Informationen über unbekannte, nicht direkt messbare Größen wie Einwirkungen und Schädigungen zu extrahieren.

Um den Ausgangszustand eines Bauwerks festzustellen, ist vor Beginn der Überwachung eine Bauzustandsanalyse durchzuführen.

Bei der Bauwerksüberwachung sind zunächst Sensoren zur Erfassung von Bauwerks- und Einwirkungsparametern auszuwählen, die sich zur Schadenserkenkung bzw. zur Identifikation von Verkehrslasten eignen. Die Datenübertragung zwischen den Sensoren und den Datenerfassungssystemen kann mit Hilfe drahtgebundener oder drahtloser Techniken erfolgen. Der Vorteil drahtloser Sensornetze im Vergleich zu drahtgebundenen Lösungen liegt vor allem im geringeren Aufwand bei der Installation sowie den geringeren Kosten.

Die Gewinnung von Informationen aus den Messdaten geschieht mit Hilfe von Modellen, welche entweder auf der datenbasierten Analyse der Messwerte (nichtphysikalische Modelle, z. B. Ausreißererkenkung oder künstliche neuronale Netze) oder auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhen (physikalische Modelle, z. B. FE-Modelle). Nichtphysikalische Modelle erfordern ein teilweise aufwändiges Training und werden vorwiegend zur Bestimmung der Präsenz eines Schadens eingesetzt. Da sie sich jedoch äußerst schnell auswerten lassen, eignen sie sich vor allem für die Bauwerksüberwachung und Schadenserkenkung in Echtzeit. Mit Hilfe physikalischer Modelle lassen sich Schäden, vorausgesetzt, es sind entsprechende Modelle zur Beschreibung der Schäden verfügbar, außerdem lokalisieren, klassifizieren und quantifizieren. Jedoch ist die Entwicklung und Auswertung physikalischer Modelle häufig sehr zeit- und kostenaufwändig. Aus diesem Grunde ist ihr Einsatz im Rahmen einer Echtzeit-Schadenserkenkung nur eingeschränkt möglich. Methoden zur Bauwerksüberwachung lassen sich unterteilen in globale und lokale Ansätze. Lokale Ansätze beruhen auf der gezielten detaillierten Überwachung kritischer, potentiell gefährdeter Problemstellen eines Bauwerks (Hot Spots), die jedoch, um sie mit entsprechenden Sensoren auszurüsten zu können, im Vorfeld der Überwachung bekannt sein müssen. Globale Ansätze basieren auf der Identifikation von Schäden und Verkehrslasten durch Messung des globalen Bauwerksverhaltens und können zur Erkennung von Schäden außerhalb der Hot Spots eingesetzt werden.

Bei der Bewertung von Bauwerkszuständen können verschiedene Ansätze unterschiedlicher Genauigkeitsstufen verfolgt werden. Das Spektrum reicht hier von einem mit wenig Aufwand verbundenen Vergleich der Messwerte mit zulässigen Grenzwerten bis hin zu komplexen probabilistischen Nachweismethoden, mit denen eine quantitative Beschreibung der Bauwerkszuverlässigkeit und der Restnutzungsdauer vorgenommen werden kann. Diese Methoden sind jedoch häufig sehr aufwändig und erfordern die Erstellung entsprechender probabilistischer Modelle.

Im Rahmen einiger Fallbeispiele für Überwachungssysteme von Brückenbauwerken wurde schließlich dargestellt, welche Ansätze und Technologien konkret zum Einsatz kommen. Zudem wurde dargestellt, in welchen Fällen eine Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse vorgenommen wird. Es stellte sich heraus, dass in allen Fällen Schwingungsdaten verarbeitet werden, welche jedoch in den meisten Fällen durch statisch gemessene Größen (z. B. Verformungen) ergänzt werden. Physikalische Modelle der Bauwerke werden nur vereinzelt eingesetzt, meist ausschließlich für Voruntersuchungen oder zur Identifikation von Grenzwerten für bestimmte Messgrößen. Bei der überwiegenden Anzahl der Beispiele wird die Überwachung auf Grundlage des Vergleichs gemessener Größen mit entsprechenden zulässigen Grenzwerten durchgeführt. Eine zuverlässigkeitsbasierte Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse oder eine Lebensdauervorhersage wird nur in Ausnahmefällen vorgenommen.

Anhand der Ergebnisse der umfangreichen durchgeführten Literaturstudie zur Überwachung von Brückenbauwerken kann abschließend herausgestellt werden, dass bislang keine durchgängigen Überwachungsansätze bekannt sind, die mit der Gesamtkonzeption „Intelligente Bauwerke“ vergleichbar wären. Die Kombination von intelligenten Methoden der Informationsgewinnung und einer ganzheitlichen zuverlässigkeitsbasierten Bewertung in Echtzeit sind für ein zustandsbasiertes Erhaltungsmanagement einerseits und kurze Reaktionszeiten im Falle von Schäden andererseits sehr erstrebenswert. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden Möglichkeiten erarbeitet und dargestellt, mit denen sich die Gesamtkonzeption „Intelligente Bauwerke“ erweitern lässt. So ist es aus Sicht der Verfasser empfehlenswert, neben lokalen Methoden zur Bauwerksüberwachung auch globale Ansätze einzubinden, um Schäden außerhalb der Hot Spots erkennen zu können. Weiterhin können durch die Adaption von FE-Modellen wichtige Informationen zum Bauwerkszustand gewonnen werden, auch wenn dies nur eingeschränkt in Echtzeit möglich ist. Für weitere

Einzelheiten und Empfehlungen zum Aufbau von Überwachungssystemen wird an dieser Stelle auf Kapitel 5.2 verwiesen.

3 Sonstige Überwachungskonzepte und Anwendungen

3.1 Tunnelbau

3.1.1 Einleitung

Die Errichtung von Tunnelbauwerken oder auch Baugruben führt insbesondere im innerstädtischen Bereich zu Problemen. Während einer Tunnelaufahrung kommt es in den umgebenden Bodenschichten zu Spannungsumlagerungen und Bewegungen („Konvergenz“) mit möglichen Auswirkungen auf die Gründung und damit die Standsicherheit benachbarter Gebäude [WIKN04]. Im Allgemeinen sind geotechnische Ingenieurbaumaßnahmen auf Grund der Heterogenität des Bodens mit großen Unsicherheiten verbunden [FASC10]. Hinzu kommen die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk, bautechnischem Eingriff, Baugrund und Grundwasser, die bei rechnerischen Prognosen des Trag- und Verformungsverhalten des Bodens zu Ungenauigkeiten führen [KNIT10]. Mit Hilfe von Überwachungssystemen können während der Durchführung geotechnischer Baumaßnahmen kontinuierlich Informationen über das Verhalten des Bodens und des Tunnels erfasst werden. Diese ermöglichen eine Beurteilung der Standsicherheit des Bauwerks sowie der Auswirkungen auf die Nachbarbebauung, sodass im Bedarfsfall Gegenmaßnahmen zeitnah eingeleitet werden können [JAKO04].

3.1.2 Messverfahren

Die am häufigsten bei der Überwachung von Tunnelbauwerken gemessenen Größen sind die Verformungen der Tunnelschale (Konvergenz), der Geländeoberfläche und des umgebenden Bodens (siehe auch Bild 28) [KAVV03].

Herkömmliche Messverfahren

Zur Konvergenzmessung werden vorwiegend geodätische Messgeräte genutzt, z. B. Tachymeter [KAVV03]. Hierzu werden an den einzumessenden Punkten auf der Innenseite der Tunnelschale Reflektoren angebracht, deren Absolutpositionen mit Hilfe des Tachymeters bestimmt werden (Bild 29).

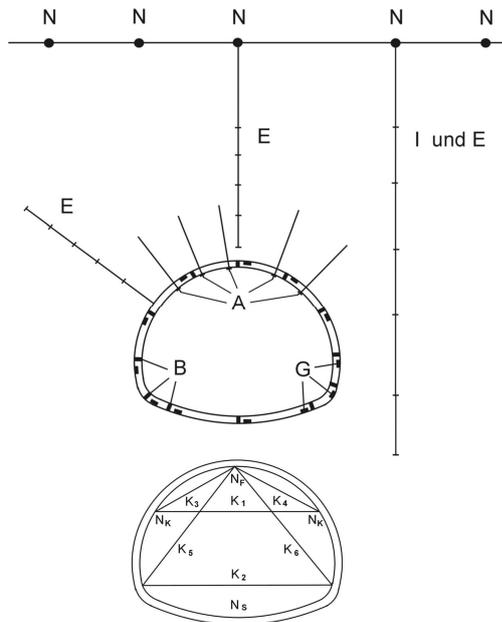


Bild 28: Geotechnische Messungen (K = Konvergenzmessung, H = Höhennivellement, E = Extensometermessung, I = Neigungsmessung, G = Gebirgsdruckmessung, B = Betondruck- oder Betonverformungsmessung, A = Ankerkraft- oder Druckmessung) [GIF04]

Verformungen der Geländeoberfläche können mit geodätischen (Tachymeter) oder geotechnischen Geräten bestimmt werden. Beispiele für letztere sind Druckschlauchwaagensysteme oder Oberflächenneigungsmesser.

Die Messung von Verformungen im Boden kann z. B. mit Hilfe von Extensometern, die in Bohrlöcher eingesetzt und innerhalb des Bohrlochs im Boden verankert werden, oder Neigungsmessern zur Erfassung der Neigung der Geländeoberfläche erfolgen [KAVV03].



Bild 29 Tachymeter in einem Tunnel (die Prismen sind als helle Punkte zu erkennen) [BROW07]

Radarinterferometrie

Die Radarinterferometrie zur Langzeitüberwachung von Veränderungen der Erdoberfläche, z. B. mit Hilfe von Satelliten, ist in vielen geowissenschaftlichen Bereichen ein häufig angewendetes Standardverfahren. Gegenwärtig befinden sich mehr als vier europäische Erkundungssatelliten im Umlauf. Diese erfassen Daten in Form von hochauflösenden Radaraufnahmen, die sich zur millime-

tergenauen Bestimmung und Überwachung der Verschiebungen von ortsideutischen Punkten auf der Erdoberfläche – und damit auch von Bauwerken wie Brücken, Dämmen und Hochbauten – nutzen lassen [KRNS12]. Einsatzgebiete der Radarinterferometrie sind z. B. die Erdbebenforschung, die Vulkanologie, die Glaziologie, die Untersuchung von Hangrutschungen oder die Rohstoffgewinnung im Bergbau [WHAK04].

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des DFG-Sonderforschungsbereichs 837 („Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“) wurde das Verfahren der Radarinterferometrie während des Baus der U-Bahnstrecke „Wehrhahnlinie“ in Düsseldorf zur Überwachung und Interpretation von Boden- und Gebäudebewegungen als mögliche Folge des maschinellen Vortriebs der Tunnelröhren eingesetzt. Zur Auswertung standen Daten des DLR-Satelliten TerraSAR-X zur Verfügung, die jeweils im Abstand von 11 Tagen erfasst wurden [KRNS12].

3.1.3 Schadenserkennung

In den meisten Fällen erfolgt die Schadensdetektion bzw. die Erkennung kritischer Zustände durch den Vergleich der gemessenen Größen (z. B. Setzungen an der Geländeoberfläche) mit zulässigen Grenzwerten [BTTT04].

Physikalische Modelle geotechnischer Baumaßnahmen werden, trotz der in der jüngeren Vergangenheit entwickelten komplexen Stoffgesetze zur genaueren Beschreibung des Bodenverhaltens, meist nur zur Ursachenfindung für bereits entstandene Schäden eingesetzt [FASC10]. Durch die Einbindung physikalischer Modelle in die Bauwerksüberwachung und die fortlaufende Anpassung der unsicheren Modellparameter anhand der während des Baufortschritts gemessenen Größen lassen sich jedoch das Bauwerks- und Bodenverhalten besser vorhersagen, wodurch sich die Sicherheit bei der Durchführung geotechnischer Baumaßnahmen steigern und Anzahl der Schadensfälle reduzieren lassen [FASC10].

3.1.4 Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau

Auf Grund der schwierigen physikalischen Modellierbarkeit des aus Baugrund und Tunnelbauwerk bestehenden Gesamtsystems beschränken sich Überwachungsmaßnahmen im geotechnischen Bereich fast ausschließlich auf Grenzwertüberwachungen. Bei der Überwachung von Brückenbauwerken wird diese Vorgehensweise ebenfalls ver-

folgt. Eine Einbindung physikalischer Modelle in den Überwachungsprozess von Tunnelbauwerken findet nicht derzeit statt.

Geodätische Messgeräte (z. B. Tachymeter) werden nicht nur im geotechnischen Bereich, sondern ebenso bei Brücken zur Bestimmung von Positionen, Längen oder Winkeln eingesetzt. Die dabei erzielbare Genauigkeit liegt im Millimeterbereich. Der Vorteil geodätischer Messverfahren liegt vor allem in ihrer berührungslosen Funktionsweise. Während die Vertikalverformungen von Brückenbauwerken unter Einsatz herkömmlicher Berührungssensoren (z. B. induktive Wegaufnehmer) nur mit Hilfe aufwändig zu installierender Messgerüste, an denen die Sensoren angebracht werden, aufgezeichnet werden können, ist dies bei geodätischen Verfahren nicht erforderlich. Darüber hinaus eignen sich viele geodätische Messgeräte auch zur Erfassung von Daten zur experimentellen Modalanalyse von Brückenbauwerken. Ergebnisse eines Vergleichs zur Untersuchung der Messgenauigkeiten zwischen herkömmlichen Beschleunigungssensoren und geodätischen Messgeräten enthält [NNWL12]. Im Rahmen der durchgeführten Studien wurde festgestellt, dass insbesondere Laserscanner großes Potential zur Erfassung von Bauwerksschwingungen aufweisen. Der Nachteil geodätischer Verfahren liegt vor allem in den meist hohen Anschaffungskosten der Messgeräte.

Durch den Einsatz der satellitengestützten Radarinterferometrie zur Überwachung der Verformungen von Brücken können Bauwerkssetzungen mit guter Genauigkeit langfristig und automatisiert überwacht werden. Da bereits große Mengen von Daten verfügbar sind, ist hier ebenso die Untersuchung von Setzungsprozessen möglich, die in der Vergangenheit stattgefunden haben und möglicherweise zu Schäden an Bauwerken geführt haben. Eine Anwendung im Brückenbau ist bislang nicht bekannt. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

3.2 Windenergieanlagen

3.2.1 Einleitung

Windenergieanlagen bestehen aus einem Fundament, einem Turm, einem am Kopf des Turms angeordneten Maschinenhaus mit Antriebsstrang und einem Rotor.

Die Türme wurden zu Beginn der Entwicklung häufig als Stahlgittertürme, mittlerweile jedoch überwiegend als Stahlrohtürme ausgeführt. Bei Höhen ab etwa 85 m werden auf Grund ihres günstigeren Schwingungsverhaltens meist Betontürme anstelle von Stahltürmen eingesetzt [CILB08]. Daneben

existieren Hybridtürme mit einem Unterteil aus Beton und einem Oberteil aus Stahl. Die Höhe der Türme kann, je nach Nennleistung der Anlage, bis zu 120 m betragen [BWE12].

Der Rotor besteht aus der Rotornabe und den Rotorblättern. Moderne Rotorblätter sind aus glas- oder kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen gefertigt und sind aus mehreren Teilen (Oberseite, Unterseite, stabilisierende Stege), meist unter Verwendung von Epoxidharz [JUGK08], zusammengesetzt.

3.2.2 Schadenserkennung

Um Ausfällen oder gar Schäden vorzubeugen, werden Windenergieanlagen in regelmäßigen Abständen hinsichtlich ihrer Sicherheit und Funktionsfähigkeit geprüft. Auf Grund der Höhe der Türme und der meist abgelegenen Standorte der Anlagen (teilweise auf See) ist dies jedoch nur unter Einschränkungen möglich. Die Einrichtung von Systemen zur dauerhaften Überwachung von Windenergieanlagen ermöglicht:

- Eine frühzeitige Erkennung von Fehlfunktionen, die möglicherweise zu Schäden oder Ausfällen der Anlagen führen können,
- eine zustandsbasierte anstelle einer zeitbasierten Instandsetzungsstrategie, wodurch sich die Lebenszykluskosten senken lassen,
- eine Kontrolle der Anlagen aus großer Entfernung,
- eine bessere Planbarkeit von Instandsetzungsmaßnahmen, z. B. in einem Zeitraum, in dem nur wenig Wind auftritt sowie
- die Evaluierung von Konstruktionsprinzipien, die zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit nachfolgender Anlagengenerationen führt.

Windenergieanlagen sind auf Grund der dynamischen Beanspruchung ermüdungsgefährdet. Weitere Ursachen für Schäden sind z. B. Feuchtigkeitsabsorption, starke Windböen, Temperaturbeanspruchungen, Korrosion, Feuer sowie Blitzschläge.

Schäden treten am häufigsten an den Rotoren bzw. den Rotorblättern sowie dem Turm auf. Typische Schäden an Rotorblättern sind Ablösungen der Klebestellen, die die Einzelteile der Rotorblätter miteinander verbinden (Delamination). Charakteristische Turmschäden sind witterungsbedingte Korrosionserscheinungen an den Schraub- bzw. Schweißverbindungen bei Gittertürmen bzw. temperaturbedingte Rissbildung bei Betontürmen [CILB08].

Bei der Schadensdetektion werden zwei unterschiedliche Strategien verfolgt: (1) Überwachung

des globalen Strukturverhaltens des Turms und (2) gezielte Überwachung von Hot Spots wie z. B. der Rotorblätter, der Verbindungen zwischen den Füßen und dem Turm bei Dreibeinstrukturen sowie den wasserbenetzten Flächen am Fuß von Offshore-Anlagen [CILB08].

Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Schallemissionsanalyse

Schallemissionen (Acoustic Emission, AE) sind transiente elastische Wellen, die auf Grund einer kurzfristigen Freisetzung von Dehnungsenergie während einer strukturellen Umlagerung innerhalb eines festen Werkstoffs entstehen. Beispielsweise gehören die Entstehung und das Wachstum von Rissen, wie es bei plastischen Verformungen vorkommt, zu den Hauptursachen für das Auftreten von Schallemissionen.

Für die Schallemissionsanalyse werden meist piezoelektrische Sensoren mittels einer Klebung, die gleichzeitig als Übertragungsmedium wirkt, oder magnetischen Halterungen auf den zu untersuchenden Teilen befestigt. Die Anordnung und Orientierung der Sensoren ist bei der Schallemissionsanalyse auf Grund der häufigen Reflexionen der Signale innerhalb des Bauteils nur von untergeordneter Bedeutung. Zur Auswertung der Signale werden Messverstärker und ein Signalprozessor benötigt.

Bei der Schallemissionsanalyse werden mit Hilfe der Sensoren hochfrequente Schwingungen gemessen. Bei den gemessenen Parametern handelt es sich meist um die maximale Amplitude und die Anzahl der Überschreitungen eines festzulegenden Schwellwertes während eines erfassten Ereignisses.

Bei Windenergieanlagen wird die Schallemissionsanalyse häufig eingesetzt, um Schäden an den Rotorblättern festzustellen. Anhand der Analyse von Amplitude und Energiegehalt der gemessenen Emissionen können Rückschlüsse auf die Art eines Schadens gezogen werden. Für präzise Aussagen ist jedoch meist eine große Anzahl von Sensoren erforderlich. Die Schallemissionsanalyse ist sehr leistungsfähig bei der Detektion, jedoch weniger geeignet für eine weitere Charakterisierung von Schäden.

Infrarot-Thermografie

Mit Hilfe von Infrarot-Thermografie-Verfahren können Temperaturdifferenzen, die in Folge von Schädigungen am Bauteil auftreten, erkannt wer-

den. Identifizierbare Schäden sind z. B. Delamination sowie Hohlräume und Risse. Unterschieden werden aktive und passive Methoden: Bei aktiven Methoden wird dem Bauteil Wärme von außen zugeführt und über die Ausbreitung der Wärme auf den Bauteilzustand geschlossen. Bei passiver Vorgehensweise wird die Wärme durch den Schaden selbst erzeugt, z. B. durch Reibung zwischen zwei Bauteilen, deren Klebeverbindung geschädigt ist.

Ultraschall-Verfahren

Ultraschall-Verfahren eignen sich besonders zur Untersuchung der inneren Struktur von massiven Bauteilen oder Verbundbauteilen. Dabei werden Schallwellen mit Hilfe eines Senders an einer Stelle in das Bauteil eingeleitet und die Bauteilreaktion mit Hilfe von Empfängern an einer entfernten Stelle gemessen. Anhand der Übertragungszeit sowie den Amplituden der gemessenen Signale können Schäden lokalisiert und Schadensausmaße abgeschätzt werden. Erkennbare Schäden sind z. B. gelöste Klebeverbindungen [JUGK08]. Die Anwendung von Ultraschall-Verfahren beschränkt sich im Regelfall auf Bauteile mit einfacher Geometrie. Komplexe Geometrien führen zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Übertragungszeit der Signale.

Dauerüberwachung

Die Analyse von Schwingungen gehört auf Grund ihrer einfachen Anwendbarkeit zu den gebräuchlichsten Ansätzen zur Dauerüberwachung von Windenergieanlagen. Schwingungen können durch künstliche oder ambiente Anregung hervorgerufen werden. Bei der Anwendung von Verfahren der Schwingungsanalyse muss weder die Anlage außer Betrieb genommen noch die zu untersuchenden Komponenten demontiert werden.

Globale Methoden der Schwingungsanalyse basieren auf der Untersuchung des globalen Schwingungsverhaltens der Anlage mit Hilfe der Modalanalyse. Schäden werden durch Vergleich der dynamischen Eigenschaften identifiziert. Die Schadendetektion kann sowohl durch Anwendung physikalischer als auch nichtphysikalischer Modelle stattfinden. Der Nachteil bei der Anwendung globaler Methoden ist die Unempfindlichkeit des Schwingungsverhaltens hinsichtlich lokaler Schädigungen. Lokale Überwachungsverfahren basieren dagegen auf der Untersuchung der kritischen Bereiche einer Windenergieanlage, z. B. mit Hilfe von Dehnungs- oder Neigungsmessern [RUEC12b]. Da hierbei keine dynamische Analyse

der gesamten Anlage erforderlich ist, können lokale Vorgehensweisen in der Regel leichter umgesetzt werden als globale Ansätze.

Dauerüberwachung in Kombination mit probabilistischen Ansätzen

Eine Möglichkeit zur probabilistischen Bewertung der Ergebnisse einer Dauerüberwachung wird in [HASL11] vorgestellt. Der Ansatz basiert auf der Adaption von FE-Modellen einer Windenergieanlage durch Vergleich gemessener Schwingbeschleunigungen, Schwinggeschwindigkeiten und Horizontalverschiebungen. Die während des Modell-Updateings angepassten Modellparameter beschreiben die Steifigkeiten der Verbindungen zwischen dem Anlagenfundament und dem Turm, der Verbindungen zwischen den einzelnen Turmabschnitten sowie der Verbindung zwischen dem Turm und der Gondel. Die Überwachung erfolgt während des Anlagenbetriebes, d. h. unter ambienter Schwingungsanregung. Aus diesem Grunde werden Output-Only-Identifikationstechniken eingesetzt (siehe auch Kapitel 2.4.2). Die Automatisierung des Adaptionprozesses erfolgt durch Einsatz evolutionärer Algorithmen. Die identifizierten Systemparameter werden im Anschluss einer probabilistischen Betriebsfestigkeitsanalyse unterzogen, wobei die stochastischen Charakteristika der Beanspruchungen und der gemessenen Dehnungen berücksichtigt werden.

3.2.3 Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau

Zur Zustandserfassung von Windenergieanlagen können eine Vielzahl zerstörungsfreier Prüfverfahren eingesetzt werden, die jedoch häufig ein manuelles Eingreifen sowie die Außerbetriebnahme der Anlage erfordern. Eine Ausnahme bildet die Schallemissionsanalyse, die auch im Rahmen einer Dauerüberwachung durchgeführt werden kann. Dabei können Methoden zur automatisierten Erkennung der Ankunftszeit erfasster Emissionen (Ersteinsatzbestimmung) angewendet werden. Die Leistungsfähigkeit dieser Methoden ist jedoch insbesondere bei der Ersteinsatzbestimmung gestörter Signale beschränkt. Hier besteht erhebliches Entwicklungspotential. Weiterhin ist eine Katalogisierung der von den relevanten Schäden ausgehenden Signale erforderlich, damit diese in den aufgezeichneten Messdaten identifiziert werden können. Um die tatsächlich vorhandenen Bedingungen bei der Anwendung der Schallemissionsanalyse im Brückenbau zu berücksichtigen, sollten Weiterentwicklungen des Verfahrens anhand von

Versuchen an realen Brückenbauwerken verifiziert werden.

Bei der Dauerüberwachung von Windenergieanlagen werden – ähnlich wie bei Brückenbauwerken – globale und lokale Überwachungsansätze verfolgt. Globale Überwachungsansätze basieren auf der Messung des Schwingungsverhaltens der gesamten Anlage, lokale Ansätze auf der lokalen Überwachung von z. B. Dehnungen an bekannten Problemstellen. Da globale Methoden eine dynamische Analyse der Windenergieanlagen erfordern, sind diese deutlich schwieriger umzusetzen als lokale Verfahren. Es kann geschlussfolgert werden, dass sich die grundsätzlichen Vorgehensweisen bei der Überwachung von Brücken kaum von den Ansätzen für Windenergieanlagen unterscheiden.

3.3 Hochhäuser und Türme

3.3.1 Einleitung

Die ursprünglichen Gründe für die Überwachung von Hochhäusern und Türmen liegen hauptsächlich im Bestreben, Einwirkungs- und Reaktionsmechanismen während Erdbeben- oder Starkwinderignissen besser verstehen sowie Schäden in Folge derartiger Einwirkungen einzuschätzen zu können [BROW07].

Hinsichtlich ihrer Eigenschaften, ihrer Struktur, der verwendeten Materialien und ihrer Schwingungsanfälligkeit weisen Hochhäuser, Türme und Brückenbauwerke viele Gemeinsamkeiten auf (Kapitel 2.1). Aus diesem Grunde kommen bei Hochhäusern und Türmen im Allgemeinen die gleichen Überwachungskonzepte zum Einsatz wie bei Brücken, was unter anderem in [ASCE11] und [JEAR04] verdeutlicht wird. Im Folgenden werden einige Fallbeispiele für Überwachungsmaßnahmen an Türmen und Hochhäusern dargelegt.

3.3.2 Fallbeispiele für Überwachungsmaßnahmen an Türmen und Hochhäusern

Dynamische Bauwerksversuche und FE-Modell-Updateing

In [ASCE11] wird über die Durchführung dynamischer Versuche an Gebäuden berichtet. Die Versuche wurden durchgeführt, um tiefere Einblicke in die durch das Northridge-Erdbeben im Jahr 1994 verursachten Versagensprozesse am Four Seasons Building in Sherman Oaks, Kalifornien, zu erlangen. Bei dem Erdbeben sind zahlreiche

Schäden an dem 4-stöckigen Gebäude aufgetreten, z. B. Durchstanzen bei Deckenplatten, starke Rissbildung im Bereich von Stützen und Anschlüssen sowie örtliches Druckversagen des Betons. Zur Schwingungsanregung des Bauwerks wurden zwei Unwuchterreger sowie ein Shaker auf der Dachdecke installiert. Die Tragwerksreaktionen wurden mit 36 Beschleunigungsmessern, 20 induktiven Wegaufnehmern und 94 Dehnungsmessensoren aufgezeichnet. Die Datenübertragung erfolgte drahtlos. Im Anschluss an die Versuche wurde anhand der Messdaten ein FE-Modell-Updating durchgeführt, wobei die Massen, Trägheitsradien und Steifigkeiten von Balken, Stützen und Decken kalibriert wurden. Die auf diese Weise identifizierten Modelleigenschaften stimmten mit guter Genauigkeit mit den am Bauwerk festgestellten Schäden überein.

Statische Bauwerksversuche zur experimentellen Tragsicherheitsbewertung

Bei Hochbauwerken können, ebenso wie bei Brücken, Belastungsversuche zur experimentellen Bewertung der Tragsicherheit durchgeführt werden [DAFSTB00], z. B. bei mangelhaften oder fehlenden Unterlagen (statische Berechnung, Planunterlagen), Mängeln in der Bauausführung, Schädigung der Werkstoffe, unklarem Lastpfad oder unzutreffender Modellbildung [STEF98]. Bei der experimentellen Tragsicherheitsbewertung wird das Tragverhalten der untersuchten Bauteile unter Berücksichtigung der tatsächlichen Randbedingungen (z. B. Teileinspannungen, Mitwirken des Estrichs bei Deckenplatten) ermittelt, wodurch ggf. Tragreserven erschlossen werden können. Belastungsversuche können beispielsweise zur Bewertung von Deckenplatten, Balken, Bindern, Dächern und Stützen dienen. Zahlreiche Anwendungen finden sich in [IFEM12, STEF98].

Ambiente Beanspruchung und FE-Modell-Updating

In [BROW05] wird die Nutzung ambienter Einflüsse (Wind- und Erdbebeneinwirkung) zur Schwingungsanregung eines 280 m hohen Bürogebäudes in Singapur beschrieben. Ziel der Studie war es, Erkenntnisse über die tatsächlich auftretenden Einwirkungen und die daraus resultierenden Tragwerksreaktionen des Gebäudes zu erlangen. Die Gebäudeschwingungen wurden mit Hilfe von Beschleunigungsmessensoren auf unterschiedlichen Geschossebenen erfasst. Die Messdaten wurden zur Kalibrierung eines FE-Modells herangezogen. Wegen der ambienten Anregung kamen hierbei

Output-Only-Identifikationstechniken zum Einsatz. Das so kalibrierte Modell kann nach Angaben der Autoren als Seismometer zur Erfassung ambienter Anregungen genutzt werden.

Dauerüberwachung statischer Tragwerksreaktionen

Über die vier Jahre andauernde Überwachung von Dehnungen eines 19-stöckigen Hochhauses in Singapur wird in [GILM05] berichtet. Zur Dehnungsmessung wurden faseroptische SOFO-Sensoren eingesetzt, die in die Stützen des Erdgeschosses einbetoniert wurden. Hierdurch konnten Erkenntnisse über die Beanspruchung einzelner Stützen (lokal) bzw. des ganzen Geschosses (global) erlangt werden, woraus sich Rückschlüsse auf das Setzungsverhalten und auf Lastumlagerungsprozesse ziehen ließen.

Dauerüberwachung eines Turms mit aktivem Dämpfungssystem

Wegen seiner extremen Höhe von 610 m, seiner außergewöhnlichen Form und seiner strukturellen Komplexität wurde der Guangzhou-Fernsehturm in China mit einem Monitoringsystem zur permanenten Überwachung der Sicherheit während der Bauphase sowie des späteren Betriebs ausgerüstet. Das Monitoringsystem basiert auf einem modularen Konzept, welches erstmalig zur Überwachung von weitgespannten Brücken in Hongkong eingesetzt wurde. Zur Datenerfassung am Guangzhou-Fernsehturm wurden insgesamt 800 Sensoren (16 verschiedene Sensortypen) zur Messung von Einwirkungen, Tragwerksreaktionen und Witterungsbedingungen eingesetzt. Die Überwachung basierte auf der Entwicklung eines FE-Modells, welches anhand von Schwingungsantworten in Folge ambienter Anregung kalibriert wurde.

Zur Reduzierung von Bauwerksschwingungen besitzt das Bauwerk ein aktives Dämpfungssystem, welches am oberen Ende des Turms sowie an der Antenne angebracht ist. Da das System Informationen über das gegenwärtige strukturelle Verhalten des Turms benötigt, wurde die Regelung der Schwingungsdämpfung an das Überwachungssystem gekoppelt. Das Überwachungssystem dient somit nicht nur der Erkennung von Unregelmäßigkeiten im Bauwerksverhalten, sondern auch der aktiven Reduzierung von Bauwerksschwingungen.

3.4 Talsperren

3.4.1 Einleitung

Talsperren sind aus historischer Sicht die ersten Strukturen, die einer Bauwerksüberwachung unterzogen wurden [BROW07]. Auf Grund der Bauwerkshöhen sowie zur Verbesserung der Entwurfs- und Bemessungsmethoden sind Überwachungssysteme bei Talsperren inzwischen unverzichtbar. Sie dienen im Wesentlichen der Sicherheit sowie der Funktionstüchtigkeit der Bauwerke während der Errichtung, der Erstbefüllung und des Dauerbetriebs [USGW00].

3.4.2 Schadenserkenkung

Häufige an Talsperren auftretende Schädigungen resultieren aus einem Anstieg des Wasserspiegels oder gar einem Überströmen des Bauwerks, z. B. in Folge verstopfter Entlastungsanlagen, Erosion in Folge von Durchsickerung sowie Material- oder Konstruktionsfehlern. Ein Versagen tritt häufig ein bei Starkregen- oder Hochwasserereignissen, unzureichender Wartung oder Fehlern bei der Betriebsführung [ODPS11]. Eine Übersicht der Messgrößen, die bei Talsperren und ihren Gründungen beobachtet werden, ist in Tab. 3 dargestellt.

Im Rahmen der Wartung von Talsperren sind regelmäßige visuelle Kontrollen durchzuführen. Diese dienen unter anderem der qualitativen Erfassung von Rissen, Abplatzungen, Setzungen, Rutschungen oder sichtbaren Wasseraustritten.

Zur quantitativen Erfassung bestimmter Größen lassen sich verschiedene Messverfahren einsetzen [BOES11, BROW07]:

- Verformungen von Talsperren: geodätische (z. B. GPS) oder laserbasierte Verfahren, Neigungsmesser, Nivellement, Winkel- und Distanzmessung, Gewicht- und Schwimmlote, Polygonzüge in den Kontrollgängen von Staumauern,
- Verformungsmessung von Gründungen: Extensometer, Schwimmlote, Inklinometer, Nivellement, Setzpegel, Schlauchwaagensysteme,
- Dehnungen von Staumauern: Dehnungsmesssensoren,
- Wasserspiegelhöhe: hydraulische oder pneumatische Messgeber,
- Sickerwassermenge: Durchflussmessungen,
- Auftrieb: Auftriebsmessung in der Kontaktfläche zwischen Beton und Felsuntergrund oder in der Tiefe,

- Porenwasserdruck bei Staudämmen: elektrische, pneumatische oder hydraulische Druckmesszellen in den Kernen.

Staumauern	Staudämme	Gründung
Verformung des Bauwerkskörpers	Verformung des Dammkörpers	Verformungen und Verschiebungen, Verschiebungen der Widerlager
Spezielle Bewegungen (Risse, Fugen)	Spezielle Bewegungen (Kontaktbereiche zu Betonbaukörpern)	Spezielle Bewegungen (Risse, Klüfte)
Temperatur im Innern des Bauwerks	eventuell Temperatur im Innern des Dammkörpers, um Durchsickerungen festzustellen	eventuell Temperatur in der Gründung, um Durchsickerungen festzustellen
Auftrieb (in der Kontaktfuge zwischen Beton und Gründung sowie im Fels)	Porenwasserspannungen im Innern des Dammkörpers, Sickerlinie	Porenwasserspannungen, Auftrieb an der Kontaktfläche zwischen Beton und Gründung, Sickerlinie/Grundwasserspiegel
Sicker- und Drainagewassermengen	Sicker- und Drainagewassermengen	Sicker- und Drainagewassermengen, Abflüsse von Quellen
Chemische Zusammensetzung des durchgesickerten Wassers, evtl. Trübung	Chemische Zusammensetzung des durchgesickerten Wassers, Trübung	Chemische Zusammensetzung des durchgesickerten Wassers, evtl. Trübung

Tab. 3: Messgrößen zur Beobachtung von Talsperren einschließlich ihrer Gründungen [BOES11]

Dauerüberwachung

Die automatisierte Überwachung von Talsperren basiert häufig auf einer Grenzwertüberwachung [ARC12, USSD08]. Daneben können nichtphysikalische Modelle zur Erkennung von Auffälligkeiten im Tragverhalten von Talsperren eingesetzt werden. Mit Hilfe von Autoregressionsmodellen und autoassoziativen neuronalen Netzen kann beispielsweise der Einfluss von Temperatureinwirkungen auf die Tragwerksreaktionen von Talsperren erfasst und entsprechende Schwankungen aus den Messdaten herausgefiltert werden. In [LOCH11] wurde gezeigt, dass sich insbesondere autoassoziative neuronale Netze zur Bestimmung von Trends in statischen Tragwerksantworten einsetzen lassen.

Der Einsatz physikalischer Modelle bei der Dauerüberwachung von Talsperren ist bislang nicht bekannt.

Durchführung dynamischer Versuche

Der strukturelle Zustand von Talsperren kann im Rahmen dynamischer Versuche festgestellt werden. Hierfür werden zunächst parametrisierte FE-Modelle entwickelt, die anhand der während der Versuche aufgezeichneten Bauwerksschwingungen kalibriert werden. Eine entsprechende Vorgehensweise findet sich z. B. in [CANT00]. Die Schwingungsanregung des Bauwerks erfolgte mit Hilfe eines servohydraulischen Shakers (Bild 30). Aus den gemessenen Schwingbeschleunigungen wurden die ersten zwölf Eigenformen extrahiert, die im Anschluss zur Adaption des FE-Modells herangezogen wurden. Dabei wurden der E-Modul des verwendeten Materials sowie die Steifigkeitsparameter der Gründung kalibriert.

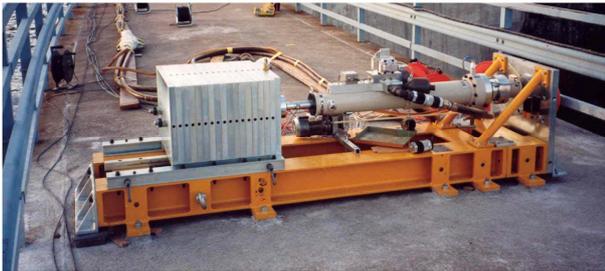


Bild 30: Servohydraulischer Shaker zur Schwingungsanregung an einer Talsperre [CANT04]

3.4.3 Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau

Die Dauerüberwachung von Talsperren basiert meist auf statischen Messgrößen. Zudem werden kritische Parameter wie z. B. Wasserspiegelstände, Sickerwassermengen oder Auftriebskräfte beobachtet. Üblicherweise erfolgt die Detektion von Anomalien anhand von Grenzwertüberwachungen.

Die Bestimmung des Zustands der Bauwerke erfolgt im Rahmen dynamischer Versuche. Hierbei wird das Bauwerk zu Schwingungen angeregt, die zur Kalibrierung von FE-Modellen des Tragwerks herangezogen werden.

Beide Vorgehensweisen werden bereits im Brückenbau angewendet; es konnten keine neuartigen übertragbaren Konzepte gefunden werden.

3.5 Kernkraftwerke

3.5.1 Einleitung

Die Betreiber von Kernkraftwerken haben, nicht erst seit der Naturkatastrophe in Japan im Jahr 2011, ein wachsendes Interesse an der Verbesserung der Sicherheit, der Zuverlässigkeit, der Leistungsfähigkeit und der Verfügbarkeit der Kraftwerksanlagen, indem sie geeignete, teilweise automatisierte Methoden der Fehlererkennung und Diagnose einsetzen [MAJI11]. Mit Hilfe dieser Methoden werden die kritischen Bereiche von Kernkraftwerken, vor allem jene Einrichtungen und Systeme, die die geregelte Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern und die Kontrolle der gezielten Kernspaltung sicherstellen, überwacht.

Vom sicherheitstechnischen Standpunkt betrachtet bietet eine Überwachung von Kernkraftanlagen folgende Vorteile [MAJI11]:

- Verringerung der Strahlenbelastung für das Bedien- und Servicepersonal,
- Erhöhung der Zuverlässigkeit von Anlagenteilen durch die Früherkennung von Fehlern,
- Vermeidung von Fehlalarmen sowie
- Anhebung des Sicherheitsniveaus durch eine verbesserte Überwachung des Reaktorkerns.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Kernkraftwerken ergeben sich durch den Einsatz von Überwachungssystemen nachfolgend aufgeführte Vorteile [MAJI11]:

- Optimierter Wartungsplan durch Anwendung der zustandsbasierten Wartung,
- Verbesserung der Verfügbarkeit der gesamten Anlage durch die Reduzierung der Anzahl von Abschaltungen,
- Vermeidung von Störfällen durch frühes Erkennen von Fehlern sowie
- Erhöhung des Wirkungsgrades und Verlängerung der Laufzeit durch verbesserte Leistungsüberwachung und Lebensdauerprognose.

3.5.2 Schadenserkenkung

Um den sicheren Betrieb von Kernkraftwerken zu gewährleisten, kommen verschiedene Methoden zur Dauerüberwachung von sensiblen und kritischen Bauwerksbereichen zum Einsatz. Ziel dabei ist die Erkennung der folgenden möglichen Fehler bzw. Fehlfunktionen [MAJI11]:

- Verschlechterung der Leistungsfähigkeit von Sensoren im Dauerbetrieb,
- Verschlechterung der Reaktionszeit von Messinstrumenten,

- Fehler in der maschinentechnischen Ausstattung,
- lose und lockere Teile im Reaktor-Kühlsystem,
- Unregelmäßigkeiten im Reaktorkern und
- Transienten des gesamten Prozesses.

Überwachung der Gerätekalibrierung der Messinstrumente

Im Dauerbetrieb kann die Genauigkeit von Messinstrumenten und Sensoren in Folge von systematischen Messfehlern (Bias) und sich kontinuierlich verändernden Abweichungen (Drift) nachlassen. Daher müssen diese regelmäßig kalibriert werden. Die Kalibrierung erfordert üblicherweise eine vorübergehende Abschaltung des betroffenen Anlagenteils. Durch die Überwachung der Gerätekalibrierung können die Wartung optimiert und die Zuverlässigkeit der Instrumente gesteigert werden. Hierzu werden üblicherweise nichtphysikalische Modelle eingesetzt, z. B. künstliche neuronale Netze, multivariate Schätzverfahren (MSET), Hauptkomponentenanalyse oder autoassoziiative inhaltsorientierte Systemkerne (AAKR).

Die Grundlage für den Einsatz dieser Methoden bildet die Abschätzung des erwarteten Ausgangssignals des überwachten Sensors. Durch den Vergleich des von einem Sensor erfassten Messwertes mit dem entsprechenden Erwartungswert lassen sich Rückschlüsse auf mögliche Sensor- und Kalibrierungsfehler ziehen. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Fehlererkennung werden grundsätzlich Messgrößen von mehreren redundanten Sensoren erfasst und miteinander verglichen (Cross-Checking). Der Durchschnitt der Signale eines Sets von Sensoren wird dann als wahre Größe des erfassten Messwerts angenommen. Ein fehlerhafter Sensor in einem Set kann anhand der Abweichung seines Messsignals vom Durchschnittswert des Sets erkannt werden. Einschränkungen dieser Methode ergeben sich aus der zusätzlich einzubauenden Anzahl der Sensoren und dem daraus resultierenden finanziellen Mehraufwand [MAJI11].

Überwachung der Reaktionszeit der Messinstrumente

Insbesondere an Temperatur- und Druckmessgeräten, von denen sicherheitsrelevante Systeme und die Prozesssteuerung abhängen, werden hohe Anforderungen hinsichtlich der Reaktionszeiten gestellt. Wie bei der konventionellen Kalibrierung erfordert die Überprüfung der Reaktionszeiten der Sensorik eine Außerbetriebnahme des Messsystems (Offline-Test). Neben den aus dem Stillstand

der Anlage resultierenden Kosten liegt der Nachteil dieser Vorgehensweise darin, dass bei einem Offline-Test die tatsächlich auftretenden Betriebsbedingungen und -zustände nicht realistisch reproduziert werden können.

Das Reaktionsverhalten von Messgeräten wird mit Hilfe von Zeitkonstanten beschrieben, für die im Rahmen von Sicherheitsanalysen Grenzwerte festgelegt werden. Die Abweichungen zwischen den gemessenen Reaktionszeiten und den Grenzwerten bilden die Grundlage für die Überwachung. Bei der Überwachung wird eine Rauschanalyse durchgeführt, bei der das Antwortspektrum der Sensordaten untersucht wird. Unter der Annahme, dass die Schwankungen der Messsignale den Charakter von Weißem Rauschen aufweisen, kann durch Autoregression ein nichtphysikalisches Modell erzeugt werden. Dieses lässt sich zur Ermittlung der Reaktionszeit heranziehen. Eine Verschlechterung der Reaktionszeit kann durch Vergleich der so ermittelten mit der erwarteten Reaktionszeit diagnostiziert werden. Die Rauschanalyse stellt derzeit die einzige Methode zur Überwachung der Reaktionszeit von Druck- und Temperatursensoren dar [MAJI11].

Überwachung der maschinentechnischen Ausrüstung

In einem Reaktorblock befinden sich bis zu 350 Elektromotoren, die beispielsweise für den Betrieb von Pumpen, Ventilen und Kompressoren benötigt werden. Ausfälle oder Störungen von Elektromotoren sind für 15 % aller Schnellabschaltungen von Atomreaktoren verantwortlich [MAJI11]. Zur Überwachung von Motoren und anderen Einrichtungen mit sich drehenden Teilen werden Methoden aus dem Bereich rotierender Maschinen eingesetzt (siehe Kapitel 3.6).

Detektion von losen oder lockeren Teilen

Lose Teile treten vor allem im Kühlkreislauf eines Atomkraftwerkes auf. Gründe hierfür können Korrosion, Reibung oder Ermüdung, jedoch auch Fehler bei der Ausführung von Arbeiten sein. Ein loses Teil kann nicht nur erhebliche Schäden an Pumpen und Ventilen anrichten, sondern auch mechanisch betätigte Sicherheits- und Steuerelemente (Steuerstäbe) im Innern des Reaktors blockieren und somit außer Kraft setzen.

Grundlage von Überwachungssystemen zur Detektion von losen oder lockeren Teilen sind akustische Signale, die bei Kollision der Teile mit anderen Komponenten des Kühlsystems verursacht

werden. Diese akustischen Signale werden mit Hilfe von Beschleunigungssensoren erfasst, die an ausgewählten Positionen auf der Außenseite des Reaktordruckgefäßes angebracht werden. Nach der Erfassung der Signale wird zunächst das Hintergrundrauschen herausgefiltert. Im Anschluss erfolgt eine Spektralanalyse der gefilterten Daten. Übersteigt der Pegel einer bestimmten Frequenz einen zuvor festgelegten Schwellwert, so kann auf die Präsenz eines losen Teils geschlossen werden. Durch den Laufzeitunterschied der Messungen von paarweise angeordneten Sensoren kann zudem eine Lokalisation durchgeführt werden. Die Abschätzung der Masse eines losen Teils kann durch eine Analyse der Frequenzcharakteristik des Antwortsignals erfolgen.

Überwachung des Reaktorkerns

Die maßgebenden Parameter für die Überwachung des Reaktorkerns und der Kernreaktion sind unter anderem die Energieverteilung im Innern des Reaktors, die Differenz der aktuellen Temperatur zur nuklearen Siedetemperatur und die Koeffizienten zur Beschreibung des Reaktorverhaltens bei wechselnden Betriebszuständen.

Die Überwachung des Reaktorkerns wird im Regelfall unter Einsatz nichtphysikalischer Modelle realisiert. Die Modelle dienen der Extrahierung von Informationen aus den Prozessdaten der Reaktorsteuerung (z. B. Position der Steuerstäbe, Neutronenfluss sowie verschiedene thermo-hydraulische Parameter). Unregelmäßigkeiten werden anhand von Abweichungen der extrahierten Informationen zu einem Regel- oder Sollzustand erkannt.

Weitere Möglichkeiten zur Überwachung des Reaktorkerns bieten Methoden zur Analyse der Signale von Neutronendetektoren, die innerhalb oder auf der Außenseite des Druckgefäßes angebracht sind. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf Vibrationen unterschiedlicher Strukturelemente im Innern des Reaktors ziehen, welche durch die Reaktivität freigesetzter Neutronen hervorgerufen werden.

Unter Einsatz von Methoden der Zeit-Frequenz-Analyse oder durch Untersuchung der spektralen Leistungsverteilung von Rausch- und Vibrations-signalen lassen sich weiterhin Zustandsmerkmale der Brennstäbe, der Steuerstäbe, der Zerfallsrate des Reaktorkerns oder der Moderatoreigenschaften sowie diverse zur Steuerung erforderliche Parameter ableiten.

Identifikation von Transienten

Unter dem Begriff „Transiente“ versteht man Abweichungen der Betriebsparameter eines Kernkraftwerkes (z. B. Leistung, Druck, Temperatur oder Kühlmitteldurchsatz) von den entsprechenden Sollwerten, die zu einem Ungleichgewicht zwischen Wärmezeugung und Wärmeabfuhr im Reaktor führen können [KOEL12]. Eine Abweichung kann durch das Versagen von Anlagenteilen oder durch äußere Störungen begründet sein. Automatisierte Systeme zur Erkennung von Transienten werden zur Unterstützung des Aufsichts- und Bedienpersonals eingesetzt.

Transienten können grundsätzlich mit Hilfe von Methoden der Mustererkennung identifiziert werden. Die meisten Systeme basieren auf der Entwicklung künstlicher neuronaler Netze. Zur Erkennung einer bestimmten Transiente werden die Netze mit entsprechenden Messdaten trainiert, welche die charakteristische Signatur der Transiente enthalten.

Überwachung der Tragstruktur

Neben den technischen Systemen werden außerdem die sicherheitskritischen Tragstrukturen von Kernreaktoren hinsichtlich ihres Verhaltens überwacht [BROW07]. Bei den in Großbritannien stark verbreiteten gasgekühlten Kernreaktoren stellt der Druckbehälter aus Spannbeton eine solche kritische Tragstruktur dar. Obwohl auch Verformungen des Tragwerks permanent gemessen und aufgezeichnet werden, ist die Temperatur in den bisherigen Anwendungen der maßgebende Parameter für die Überwachung. Die Messdaten werden hauptsächlich zur Kalibrierung von Rechenmodellen herangezogen, die der Beschreibung des temperaturabhängigen Strukturverhaltens dienen.

3.5.3 Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau

Die Zustandserfassung von verschiedenen Anlagenteilen innerhalb eines Kernkraftwerkes erfolgt gegenwärtig im Wesentlichen automatisiert. Dabei kommen sowohl im Bereich der maschinellen Einrichtungen als auch bei den Tragstrukturen Verfahren zum Einsatz, die sich bereits in verschiedenen Industriebereichen etabliert haben. Während signalbasierte Ansätze zur Beobachtung relevanter Parameter in den wichtigsten Prozessbereichen teilweise bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt werden [MAJI11], kommen modellbasierte Methoden dagegen kaum zur Anwendung.

Ein interessanter auf den Brückenbau übertragbarer Aspekt ist die Überwachung des Messsystems selbst. Ein defektes Messsystem kann zu unerwünschten Fehlalarmen führen, die eine Sperrung des Bauwerks sowie kostenaufwändige außerplanmäßige Bauwerksprüfungen nach sich ziehen können.

3.6 Rotierende Maschinen

3.6.1 Einleitung

Die Überwachung rotierender Maschinen wird im Allgemeinen mit dem Begriff „Condition Monitoring“ (CM) bezeichnet. Im Fokus stehen hier Anlagen mit sich drehenden Komponenten, z. B. Motoren und Generatoren, Getriebe, Pumpen und Kompressoren, Zentrifugen sowie Maschinen in Walzstraßen bei der Stahlherstellung oder zur Papierherstellung. Das wesentliche Ziel bei der Überwachung der Anlagen ist die rechtzeitige Erkennung von Fehlfunktionen oder Schädigungen, sodass ein möglichst frühzeitiges Handeln ermöglicht und Produktionsausfälle o. ä. vermieden werden.

3.6.2 Schadenserkenkung

Typische Fehlfunktionen von rotierenden Maschinen sind gemäß [BEHA03]:

- **Unwucht:** Eine Unwucht wird durch nicht rotationssymmetrisch um die Achse verteilte Masse hervorgerufen.
- **Wellendurchbiegung:** Unterschieden werden (1) elastische Durchbiegungen in Folge radial gerichteter Kräfte, z. B. Schwerkraft, (2) temporäre Durchbiegungen in Folge ungleichmäßiger Temperaturverteilung innerhalb einer Maschine, z. B. während des Hochfahrens, und (3) permanente Durchbiegungen in Folge plastischer Verformungen der Welle.
- **Ausrichtfehler:** Ausrichtfehler kennzeichnen Abweichungen in der Ausrichtung zweier Achsen. Es wird unterschieden zwischen einem Längsversatz (hierbei sind zwei parallele Achsen gegeneinander versetzt) und einem Winkelversatz (hierbei verlaufen die Achsen nicht parallel). Ausrichtfehler können durch fehlerhaften Einbau von Maschinenteilen, Temperaturbeanspruchungen, Verformungen des Maschinengehäuses, ungleichmäßige Fundamentsetzungen oder lose Befestigung des Maschinenfußes (Kippfuß) verursacht werden.
- **Lagerfehler:** Die häufigsten Fehler in Verbindung mit Lagern sind ungewollter Kontakt zwi-

schen rotierenden und festen Teilen (Reibung) sowie lose Lager (zu großes Lagerspiel).

Im Folgenden werden einige häufig angewandte Methoden beschrieben, die sich zur Erkennung von Fehlfunktionen oder Schäden von rotierenden Maschinen eignen.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Neben der visuellen Prüfung stellt die Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren die einfachste und kostengünstigste Vorgehensweise bei der Untersuchung von rotierenden Maschinen dar. Zerstörungsfreie Prüfverfahren erfordern meist eine entsprechende Zugänglichkeit der Maschine.

Bei der Anwendung von Stroboskopern und kontaktlosen Techniken wie Thermographie und Radiographie ist ein direkter Sichtkontakt zwischen dem Prüfer und dem zu untersuchenden Anlagenteil notwendig. Der Vorteil kontaktloser Verfahren liegt darin, dass hierbei die Untersuchung auch aus größerer Entfernung durchgeführt werden kann. Z. B. ist mit Hilfe thermographischer Verfahren auch die Prüfung von Komponenten im Bereich von Hochspannung möglich, in dem aus Sicherheitsgründen ein Mindestabstand zu den Anlagenteilen eingehalten werden muss. Zur Messung von Maschinenschwingungen aus der Entfernung können z. B. Laser-Doppler-Vibrometer eingesetzt werden.

Schmiermittel- und Abriebanalyse

Eine Schmiermittel- und Abriebanalyse setzt Flüssigkeitskreisläufe wie z. B. einen Ölkreislauf zur Schmierung oder als hydraulischen Antrieb voraus. Durch eine Untersuchung des Öls lassen sich anhand der Art und Menge des darin enthaltenen Abriebs bzw. der Schwebeteilchen und Sedimente Rückschlüsse auf den aktuellen Zustand der Maschine ziehen. Dadurch können Schäden an einer Anlage weit vor ihrem tatsächlichen Eintreten vorausgesagt werden. Die Erfassung des Verschmutzungsgrades ermöglicht zudem einen bedarfsorientierten Zyklus von Ölwechseln und Wartungsarbeiten. Insbesondere bei Maschinen mit minimierten Spaltmaßen ist die Reinheit der Schmierflüssigkeit von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grunde wird der Filterung der Flüssigkeit häufig eine zusätzliche Überwachung des Reinheitsgrades nachgeschaltet.

Die Schmiermittel- und Abriebanalyse kann online, d. h. während des laufenden Betriebs, oder offline, d. h. nach dem Herunterfahren der Anlage, durchgeführt werden. Online-Methoden ermöglichen

eine Überwachung in Echtzeit, erreichen in der Regel jedoch nicht die Genauigkeit von Verfahren, die offline und teilweise sogar in einem Labor durchgeführt werden.

Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse stellt ein wichtiges Werkzeug für die Zustandsüberwachung von Komponenten rotierender Maschinen dar. Dies trifft insbesondere auf die Lager zu. Im Gegensatz zu vielen anderen Verfahren ist mit Hilfe der Schallemissionsanalyse die Erkennung lokaler Defekte bereits in einem sehr frühen Stadium möglich.

Dauerüberwachung

Bei der Dauerüberwachung von rotierenden Maschinen ist die Vibrationsanalyse auf Grund ihrer Effektivität, Zuverlässigkeit und der einfachen Anwendbarkeit sehr weit verbreitet. Mit Hilfe der Vibrationsanalyse kann eine Vielzahl möglicher Fehler und Schäden identifiziert werden. Die Erkennung von Schäden basiert dabei überwiegend auf der Messung der während des Betriebs auftretenden Beschleunigungen und der anschließenden Untersuchung der Messdaten im Zeit- oder Frequenzbereich. Im Rahmen einer Dauerüberwachung werden häufig serienmäßig produzierte und daher kostengünstige Sensoren eingesetzt. Für temporäre Messungen eignen sich ebenso berührungslos messende tragbare Geräte wie z. B. Laser-Doppler-Vibrometer. Die Auswahlkriterien für Sensoren sind Empfindlichkeit, Masse, Frequenzverlauf, dynamischer Messbereich und Anschlussposition. Ebenso sind spezielle Sensoren für besondere Anwendungsbereiche verfügbar, wie etwa bei hohen Temperaturen, bei sehr niedrigen Frequenzen oder bei großer Stoßbeanspruchung. Eine Miniaturisierung der Sensoren wird durch den Einsatz piezoelektrischer Materialien erreicht. Piezosensoren erfordern auf Grund der schwachen Ausgangssignale eine Signalverstärkung, welche direkt an den Sensor angebracht oder in den Sensor integriert werden kann.

Rotierende Maschinen sind bislang die am erfolgreichsten überwachten Strukturen [FAWO07]. Dies ist auf die meist gute Zugänglichkeit, die konstanten Umgebungsbedingungen und ihre vergleichsweise geringe Größe zurückzuführen [CAFA04].

Rotierende Maschinen besitzen eine charakteristische „Vibrationssignatur“, welche durch die überwiegende Anzahl der Schäden beeinflusst wird [RAND04]. Da bei rotierenden Maschinen nur wenige mögliche Schadenstypen und -orte existieren

und sich das Schwingungsverhalten vieler Maschinen zudem sehr ähnelt, sind die spezifischen Auswirkungen der Schäden auf die Vibrationssignaturen weitestgehend bekannt. Zum heutigen Zeitpunkt sind umfangreiche Datenbanken verfügbar, in denen die Signaturen geschädigter Maschinen gemeinsam mit den Beschreibungen der zugehörigen Schäden katalogisiert wurden [FALI07]. Durch den direkten Vergleich der gemessenen Schwingungssignatur einer zu überwachenden geschädigten Maschine mit den in den Datenbanken hinterlegten Signaturen können Rückschlüsse auf mögliche Schäden gezogen werden. Die Schadenserkenkung erfolgt fast ausschließlich mit Hilfe nichtphysikalischer Modelle [FADO99].

3.6.3 Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau

Die manuelle Inspektion rotierender Maschinen, entweder auf visueller Grundlage oder durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren, ähnelt der Prüfung von Brückenbauwerken durch ausgebildete Brückenprüfer. Die meisten bei rotierenden Maschinen angewendeten zerstörungsfreien Prüfverfahren werden ebenso bei Brückenbauwerken eingesetzt.

Automatisierte Methoden zur Dauerüberwachung rotierender Maschinen basieren fast ausschließlich auf der Analyse von Schwingungsdaten. In den meisten Fällen wird der Zustand einer Maschine durch die Gegenüberstellung von Vibrationssignaturen bestimmt. Dabei werden die an der zu überwachenden Maschine gewonnenen Vibrationssignaturen mit den entsprechenden in Datenbanken hinterlegten Signaturen geschädigter Maschinen verglichen. Eine festgestellte Übereinstimmung kann ein Indiz für eine Schädigung darstellen. Der Vergleich erfolgt mit Hilfe von Methoden der Mustererkennung. Eine erfolgreiche Anwendung dieses Konzeptes im Brückenbau konnte bislang nicht festgestellt werden. Durch eine Übertragung wäre eine äußerst effektive und vor allem nahezu in Echtzeit durchführbare Erkennung von Schäden möglich. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

3.7 Offshore-Plattformen

3.7.1 Einleitung

Offshore-Plattformen werden unterschieden in mobile Bohrplattformen und Förderplattformen. Mobile Plattformen sind z. B. Hubbohrplattformen („Jack-up Rigs“) und Halbtaucherbohrplattformen

(„Semi-submersible Rigs“), siehe auch Bild 31 [CHHC05]. Förderplattformen werden bei geringeren Tiefen hauptsächlich als biegesteif im Boden verankerte Stahlkonstruktionen („Jackets“) oder als Schwergewichtskonstruktionen aus Beton (siehe Bild 32) ausgeführt; bei größeren Tiefen muss auf nachgiebige Strukturen oder schwimmende Plattformen zurückgegriffen werden [CHHC05].

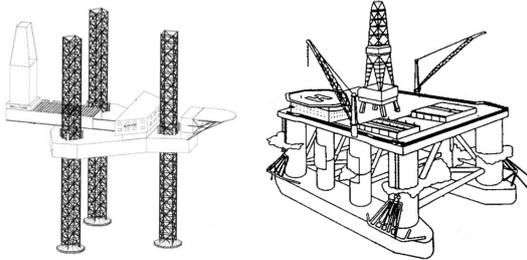


Bild 31: Bohrplattformen (links: Hubbohrplattform [CHHC05]; rechts: Halbttaucherbohrplattform [DCCE12])

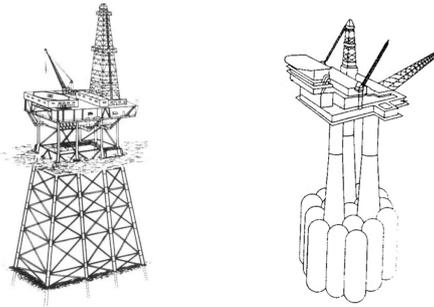


Bild 32: Förderplattformen (links: Jacket-Plattform; rechts: Betonplattform) [DCCE12]

3.7.2 Schadenserkennung

Bei Offshore-Plattformen können Schäden zum einen an der Tragstruktur selbst, zum anderen an der Gründung sowie dem Untergrund auftreten. Die häufigsten Ursachen für Schäden an Offshore-Plattformen sind gemäß [MAMT09]:

- Extreme Wetterbedingungen (hohe Beanspruchungen aus Wellengang, Strömung und Wind),
- geologische und geotechnische Ursachen (Instabilität des Untergrunds oder Versagen der Gründung)
- Ermüdung in Folge der Beanspruchung aus Wellengang und Wind,
- Korrosion in Folge von Chloridangriff,
- herabfallende Objekte (z. B. Kranlasten),
- Schiffskollisionen,
- Feuer und Explosionen,
- Fehler bei der Positionsregulierung über dem Bohrloch bei schwimmenden oder nachgiebig gelagerten Plattformen und
- Nutzungsänderungen (betrifft hauptsächlich das Aufbringen zu hoher Lasten auf der Plattform).

Untersuchungen von über 3.200 Unterwasserinspektionen der Plattformen im Golf von Mexiko und der Nordsee haben ergeben, dass der überwiegende Anteil der Schäden aus Schiffskollisionen und/oder fallenden Objekten resultiert. Bei den Plattformen in der Nordsee resultieren 56 % aller erkannten Schäden aus mechanischen Defiziten, 17 % der Schäden betreffen Schweißnähte oder Anschlüsse und 27 % der Schäden resultieren aus Korrosion [OBDW05].

Visuelle Inspektion und zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die herkömmliche Vorgehensweise bei der Schadenserkennung beruht auf der Durchführung von Inspektionen. Gemäß [API-RP-2SIM] werden bei fest verankerten Plattformen die folgenden Untersuchungen vorgenommen:

- Untersuchung kritischer Tragwerksteile in der Spritzwasserzone sowie oberhalb der Wasseroberfläche (z. B. Standbeine und Träger) sowie deren Verbindungen (z. B. Schweißnähte) hinsichtlich Schäden, Form, Korrosion und sonstigen Unregelmäßigkeiten,
- Untersuchung von Korrosionsschutz-Beschichtungen, insbesondere Maßnahmen in der Spritzwasserzone,
- Untersuchung des kathodischen Korrosionsschutzsystems unterhalb der Wasseroberfläche,
- Untersuchung der Ausrüstung, der Anbauteile und Sicherheitseinrichtungen (z. B. Handläufe, Treppen, Hubschrauberlandeplätze, Krane, Rettungskapseln usw.) sowie
- Untersuchung von Teilen unterhalb der Wasseroberfläche hinsichtlich Korrosion, Schäden an Verbindungen (Schweißnähte), Kolkbildung, Instabilität des Meeresbodens, Ablagerungen und übermäßigem marinen Bewuchs (Pflanzen, Muscheln).

Zur Begutachtung von Bauteilen, die sich unterhalb der Wasseroberfläche befinden, müssen entweder Taucher oder ROV's (Remotely Operated Vehicle) eingesetzt werden. Bestehen nach der visuellen Prüfung Zweifel hinsichtlich der Integrität einzelner Bauteile, so können zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet werden.

Bei der visuellen Inspektion besteht die Gefahr, dass bestimmte Schäden (z. B. innere Risse oder bestimmte Korrosionsprozesse) nicht erkannt werden. Zudem ist der Einsatz von Tauchern oder ROV's meist sehr kostenintensiv. Zerstörungsfreie Prüfverfahren erlauben Einblicke in das Bauteilinnere, eignen sich jedoch in der Regel nur für lokale Untersuchungen [NICH03].

Monitoringverfahren

Monitoringsysteme ermöglichen die Überwachung kritischer oder nur schwer zugänglicher Bereiche von Offshore-Strukturen mit Hilfe von Sensoren, deren Messwerte in einen Kontrollraum übertragen und dort entweder manuell oder automatisiert analysiert werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren dargestellt. Die Ausführungen dazu basieren auf [MAMT09].

Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse wird seit mehr als zehn Jahren erfolgreich zur Untersuchung von Offshore-Plattformen eingesetzt, in erster Linie zur Detektion von sich bildenden bzw. vergrößerten Ermüdungsrissen. Auf Grund des hohen manuellen Aufwandes bei der Auswertung der Messdaten und der damit verbundenen hohen Kosten wird die Schallemissionsanalyse nur in kritischen Bereichen angewendet, z. B. bei Verbindungen oder Anschlüssen der Standbeine von Jacket-Plattformen.

Air-Gap-Überwachung

Der Begriff „Air Gap“ bezeichnet den Abstand zwischen der Unterkante des Kellerdecks und der Wasseroberfläche, der während eines Ereignisses mit einer festgelegten Wiederkehrperiode gemessen wird. Die Überwachung des Air Gap dient der Erkennung von Setzungen, die auf kritische Zustände der Gründungsbauteile bzw. des Untergrunds schließen lassen. Während der Air Gap früher zeitdiskret und häufig mit einfachen Mitteln, z. B. mit Hilfe von Maßbändern, ermittelt wurde, werden heute überwiegend Radar oder GPS eingesetzt. In den meisten Fällen ist es ausreichend, den Air Gap in zeitlichen Abständen zu kontrollieren; in seismisch aktiven Regionen kann jedoch auch eine kontinuierliche Auswertung erforderlich sein. Bei der Verwendung von GPS im Rahmen der Air-Gap-Überwachung ist zu berücksichtigen, dass bei der Positionsbestimmung Ungenauigkeiten von bis zu 10 m auftreten können. Im Nachgang der Messung sollte daher eine Positionskorrektur durchgeführt werden, z. B. mit Hilfe von Referenzstationen (siehe Kapitel 2.3.1).

GPS

GPS wird insbesondere zur Positionsbestimmung schwimmender Plattformen eingesetzt, damit diese ihre Position über dem Bohrloch eigenständig mit

Hilfe ihrer Antriebe korrigieren können. Auch hier ist zu beachten, dass die mit GPS bestimmten Positionen fehlerbehaftet sein können.

Leckageüberwachung

Die Erkennung von Leckagen ist insbesondere bei Halbtaucherplattformen wichtig, bei denen ein Wassereintritt in die Schwimmkörper eine Gefährdung der Stabilität der Anlage nach sich ziehen kann. Zur Leckageüberwachung existieren unterschiedliche Sensoren, z. B. Punkt-, Linien- und Oberflächenwassermelder, die bei Berührung mit Wasser ein Signal erzeugen [BRAN12].

Schwingungsanalyse

Vibrationsbasierte Verfahren zur Schadenserken- nung werden im Offshore-Bereich seit den späten 1970er Jahren angewendet. Dazu werden die Schwingungen (Beschleunigungen) des Tragwerks in Folge der Anregung durch Wellen- und Wind- einwirkung mit Hilfe von Beschleunigungssensoren aufgezeichnet. Im Anschluss werden die Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfungswerte der Struktur ermittelt. Die Schadenserken- nung erfolgt entweder durch Vergleich der identifizierten dyna- mischen Eigenschaften des Tragwerks mit denen aus früheren Untersuchungen (d. h. ungeschädigte Zustände) oder durch Kalibrierung von Finite- Elemente-Modellen [IDGA90], z. B. unter Anwen- dung von Optimierungsalgorithmen [LIHS11].

Bei der vibrationsbasierten Detektion von Schäden an Offshore-Plattformen treten insbesondere die im Folgenden genannten Schwierigkeiten auf, die die Anwendbarkeit des Verfahrens einschränken [CAFA04]:

- Der starke Einfluss von Störgrößen wie z. B. Rauschen,
- die aggressive Umgebung, verursacht sowohl durch Chloridangriff als auch durch mechanische Beanspruchung,
- die variierende Masse in Folge von marinem Bewuchs sowie veränderlichen Lasten auf den Decks [IDGA90], was zu einer Beeinflussung des Schwingungsverhaltens der Strukturen führt, sowie
- die Frequenz der Wellenbewegung, durch die hauptsächlich niederfrequente Schwingungen und nicht die zur Erkennung lokaler Schäden wichtigen höherfrequenten Schwingungen angeregt werden.

Überwachung von Dehnungen

Dehnungsmessungen werden durchgeführt, um Spannungen in den sich überwiegend unterhalb der Wasseroberfläche befindlichen Traggliedern zu bestimmen und damit Rückschlüsse auf die Belastung ziehen zu können. Durch Vergleichsberechnungen an Finite-Elemente-Modellen lassen sich die gemessenen Werte verifizieren. Die Überwachung von Dehnungen ist relativ genau und wird häufig durchgeführt.

Überwachung von Steigrohren und Ankerketten

Bei der Überwachung der Steigrohre, durch die das Rohöl aus der Lagerstätte an die Oberfläche geführt wird, und der Verankerungen von nachgiebigen Türmen oder schwimmenden Plattformen wird häufig Sonar eingesetzt. Dabei werden unterhalb der Plattform Schallsignale ausgesendet, die von den Steigrohren und Ankerketten reflektiert werden und somit eine kontinuierliche Bestimmung ihrer gegenwärtigen Positionen ermöglichen.

3.7.3 Risikobasierte Inspektionsplanung

Die risikobasierte Inspektionsplanung (RBI) ist ein Verfahren zur Optimierung der Inspektionszeiträume bei gleichzeitiger Minimierung des Risikos beim Betrieb einer Anlage. Die RBI wird seit den 1980er Jahren [SGSF06] insbesondere von der Öl- und Gasindustrie angewendet.

Auf Grund von Produktions- und Materialfehlern, Abnutzungsprozessen oder dem Auftreten von Schäden ändert sich die Versagenswahrscheinlichkeit von Komponenten einer Anlage während ihrer Lebensdauer. Bild 33 zeigt den typischen Verlauf der Versagenswahrscheinlichkeit technischer Komponenten in Abhängigkeit von der Zeit. Die Kurve wird auf Grund ihrer Form auch als „Badewannenkurve“ bezeichnet und kann in drei charakteristische Bereiche unterteilt werden:

- **Phase der Frühausfälle:** Zu Beginn der Lebenszeit einer technischen Komponente ist die Versagenswahrscheinlichkeit relativ hoch. Ursächlich für Ausfälle in dieser Phase (auch mit „Säuglingssterblichkeit“ bezeichnet) sind Material-, Konstruktions- und Herstellungsfehler sowie Fehler während der Inbetriebnahme.
- **Nutzungsphase:** Der zweite Abschnitt zeichnet sich durch eine nahezu konstante Fehlerrate aus. Diese Phase beschreibt denjenigen Zeitraum, in dem noch keine Alterungs- oder Verschleißerscheinungen an der Komponente auf-

treten. Ausfälle während dieser Nutzungsphase ereignen sind meist zufallsbedingt.

- **Verschleißphase:** Der dritte Abschnitt beschreibt das Ende der Lebensdauer einer Komponente. In dieser Phase nimmt die Versagenswahrscheinlichkeit auf Grund von Alterungs- und Verschleißprozessen zu.

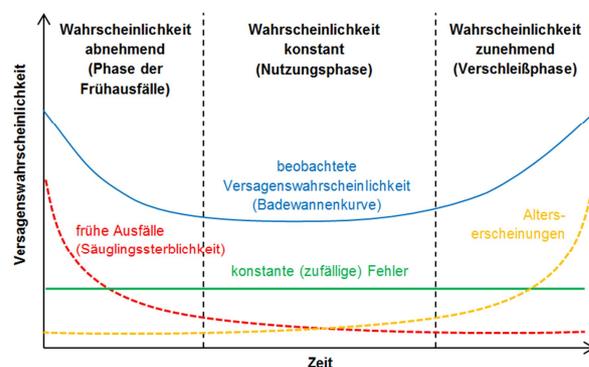


Bild 33: Versagenswahrscheinlichkeit technischer Komponenten in Abhängigkeit von der Zeit

Mit Hilfe von Inspektionen, jedoch auch durch die Einbindung von während einer Bauwerksüberwachung gewonnenen Erkenntnissen, kann die Versagenswahrscheinlichkeit einer Komponente aktualisiert werden (siehe Bild 34). Die Effektivität von Inspektionen wird beschrieben durch die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Inspektion ein Fehler an der Konstruktion entdeckt wird („Probability of Detection“, PoD).

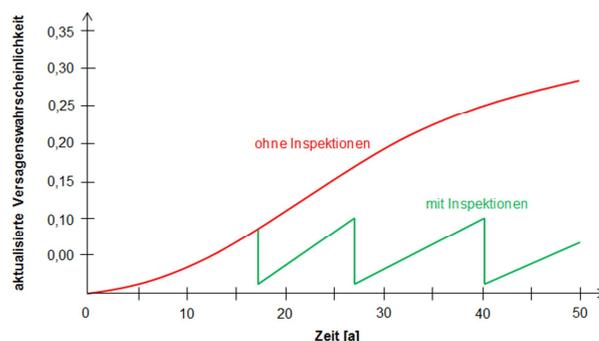


Bild 34: Aktualisierung der Versagenswahrscheinlichkeit einer Komponente durch Inspektionen

Bei der Inspektionsplanung können zwei extreme Strategien unterschieden werden [PATE05]:

- Falls gar keine oder nur sehr wenige Inspektionen mit langen Intervallen durchgeführt werden, müssen Defekte einzelner Teile oder sogar der gesamten Anlage und daraus resultierende kostenaufwändige Instandsetzungsmaßnahmen hingenommen werden. Diese Strategie ist, abhängig von den Folgen eines Defekts für Mensch und Umwelt, oftmals nicht akzeptabel.
- Durch sehr häufig durchgeführte Inspektionen mit kurzen Intervallen lässt sich die Sicherheit

einer Anlage erhöhen. Dies führt jedoch zu einem starken Anstieg der mit den Inspektionen verbundenen Kosten.

Mit Hilfe der RBI können die Wertigkeiten von Systembereichen und deren Komponenten sowie das zugeordnete Inspektionskonzept unter Risikoaspekten hinsichtlich Sicherheit, Verfügbarkeit und Kosten bestimmt und bewertet werden [VDI4003]. Dazu wird zunächst bestimmt, welche Konsequenzen aus einem Komponentenversagen resultieren („Consequence of Failure“, CoF), und wie groß die Wahrscheinlichkeit eines solchen Versagens ist („Probability of Failure“, PoF). Das Risiko, das mit einer Anlagenkomponente verbunden ist, ist definiert als das Produkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit und der zugehörigen Konsequenz. Auf Basis des Risikos wird der Inspektionsaufwand festgelegt: Bauteile mit einem nur geringen Risiko müssen nur selten inspiziert zu werden, was zu einer Verringerung der Kosten führt. Dagegen müssen Bauteile, deren Versagen mit weitreichenden Konsequenzen verbunden ist, öfter und intensiver untersucht werden. Beispiele zur Anwendung der RBI finden sich z. B. in [STFA06, SGSF06, FSTS05].

Zu Beginn einer risikobasierten Inspektionsplanung erfolgt die Erfassung der für die Bewertung einer Anlage bzw. ihrer Komponenten erforderlichen Informationen (z. B. Aufbau und Eigenschaften der Komponenten, Ergebnisse aus Inspektionen, durchgeführte Reparaturen, Betriebsbedingungen, Sicherheitssysteme, Schadens- bzw. Verschleißmechanismen sowie Angaben zu Kosten für Inspektionen, Reparaturen und Komponentenaustausch). Diese Informationen dienen als Grundlage für die Bestimmung der Risiken für die einzelnen Anlagenkomponenten. Nach der Risikoabschätzung erfolgt ein Risiko-Ranking, z. B. in Form einer Risikomatrix (Bild 35). Im Anschluss werden die komponentenspezifischen Inspektionsintervalle festgelegt. Das im Rahmen einer RBI entwickelte Inspektionskonzept gewährleistet einen sicheren Anlagenbetrieb bei gleichzeitiger Optimierung des Einsatzes der finanziellen Mittel.

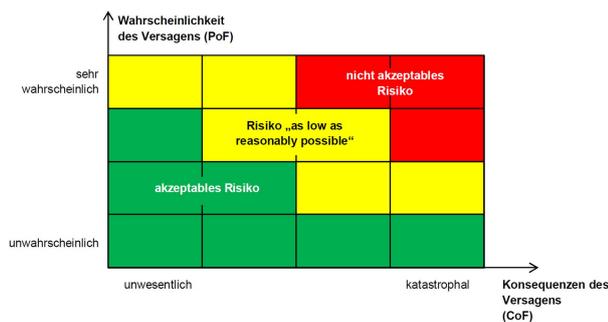


Bild 35: Risikomatrix

3.7.4 Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau

Ausgereifte Methoden zur Überwachung von Offshore-Plattformen sind insbesondere die Schallemissionsanalyse, die Air-Gap-Überwachung, GPS, die Leckageüberwachung, die Schwingungsanalyse, die Überwachung von Bauteildehnungen und der Einsatz von Sonar zur Überwachung von Steigrohren und Ankerketten. Die genannten Verfahren werden, mit Ausnahme der Air-Gap-Überwachung, der Leckageüberwachung und der Überwachung von Steigrohren und Ankerketten, ebenso im Brückenbau angewendet.

Ein Konzept, welches seit den 1980er Jahren im Bereich der Offshore-Industrie zum Einsatz kommt, ist die risikobasierte Inspektion (RBI). RBI-Konzepte finden bis heute in vielen Ingenieurdisziplinen Anwendung. Durch Übertragung der Konzepte auf den Brückenbau ließen sich die derzeit fest in DIN 1076 vorgeschriebenen Prüfintervalle an das Risiko, das mit einem Bauwerk verbunden ist, anpassen. Dies würde einen weiteren bedeutenden Schritt in Richtung einer zustandsbasierten Erhaltung der Bausubstanz bedeuten.

3.8 Automobilbau

3.8.1 Einleitung

Um dem Fahrer und den Insassen ein Optimum an Sicherheit, Komfort und Fahrvergnügen bieten zu können, kommen in modernen PKW's nach derzeitigem Stand bis zu 150 Sensoren in den unterschiedlichsten Bereichen zum Einsatz (siehe Bild 36). Die maßgebenden Auswahlkriterien für die Sensoren sind Herstellungskosten, eine kompakte Bauweise sowie eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Anwendungen. Eine besonders hohe Robustheit und Zuverlässigkeit wird dabei durch eine entsprechende Materialgüte, durch Redundanz bei der Instrumentierung, eine autarke Energieversorgung sowie die Fähigkeit zur Selbstdiagnose erreicht [ZAEN11].

Eine Vielzahl der Funktionen in Kraftfahrzeugen, die mit Hilfe von Sensoren realisiert werden, können als aktiv geregelte Prozesse charakterisiert werden. Als Eingangsgrößen für diese Prozesse dienen die mit den Sensoren erfassten Zustandsdaten wie z. B. Neigungen, Beschleunigungen, Temperaturen, Abstände, Kontakt und Füllstände.

Für das Motormanagement werden beispielsweise physikalische, stöchiometrische und mechanische Messgrößen benötigt, die unter anderem mit Hilfe

von Drehzahl-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren, Druck-, Temperatur-, Vibrations- und Füllstandssensoren sowie Sonden und weiteren Messeinrichtungen erfasst und in Regelprozessen verarbeitet werden [FLEM01].

Bei den sicherheitsrelevanten Anwendungen (z. B. elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP), Bremsassistentensysteme, aktiver Insassenschutz mit präventiv wirkender Sensorik, Abstandswarner, Spurhalteassistent, elektronisch unterstützte Lenkung, Umfelderkennung und adaptiver Tempomat

[PROS07]) werden unter anderem Positions- und Radarsensoren sowie optoelektronische Messfühler eingesetzt [ZAEN11]. Auf Grund der Komplexität der zahlreichen miteinander vernetzten elektronischen Komponenten werden auch die Komponenten selbst überwacht, wobei z. B. Spannungen, Ströme oder Temperaturen gemessen werden.

Weiterhin werden Sensoren für Funktionen benötigt, bei denen mechanische Verbindungen gelöst und durch elektronische Entwicklungen ersetzt werden.

Motor

Einspritzdruck
Lufttemperatur
Treibstofftemperatur
Treibstoffdruck
Klopfen
Kühlmitteltemperatur
Ventilposition
Luftmasse, -menge
Sauerstoffgehalt

Hybrid- und Brennstoffzellenantrieb

Wasserstoff Leckage-Detektion
Spannungsüberwachung
Druck
Durchfluss
Temperatur
Motorgeschwindigkeit, -position

Fahrzeugkontrolle

Hydraulikdruck
Längs-/
Querbeschleunigung
Radgeschwindigkeit
Lenkmoment, -position
Fahrwerkposition

Unfallvermeidung

Adaptiver Tempomat
Parkensoren
Spurverlassenswarner
Fahrerüberwachung



Insassen – Komfort

Temperatur (Heizung, Lüftung)
Luftfeuchtigkeit
Luftauslass-Position
Sitzposition
Fensterposition

Insassen – Bequemlichkeit

Fernbedienung / Keyless Entry
Regensensor
Automatisches Abblendlicht
Füllstände
Scheinwerfer-Nivellierung

Sicherheit und Sicherung

Einbruchschutz
Insassen Airbag-System
Gurtstraffer
Reifendruck-Überwachung
Insassen-Detektion
Fußgänger-Erkennung

Bild 36: Übersicht Sensoren im Automobilbau (adaptiert aus [PROS07])

3.8.2 Übersicht der Anwendungsbereiche von Sensoren im Automobilbau

Antriebsstrang

Mikroprozessorbasierte Motormanagement-Systeme (Engine Management Systems, EMS) dienen der Reduzierung des Verbrauchs, der verursachten Emissionen sowie der Effizienzsteigerung der Verbrennungsmotoren [HOWL96]. In den einzelnen Anwendungsbereichen werden folgende Aufgaben erfüllt:

- **Motorsteuerung:** Verbrennungsbasierte Regelung, variable Ventilsteuerung, Deaktivierung einzelner Zylinder,

- **Motordiagnose:** Fehlzündungen, Klopfen, Verringerung der Katalysatorleistung, Abweichungen der Lambda-Sonde (O_2 -Sensor),
- **Getriebe:** Elektronisch unterstützte Schaltung, fließende Schaltvorgänge, optimaler Schaltzeitpunkt, stufenlose Getriebeübersetzungen.

Fahrwerk

Sensorbasierte Anwendungen im Bereich des Fahrwerks dienen der Fahrsicherheit, aber auch der Manövrierfähigkeit und dem Fahrkomfort. Im Bereich der Handhabung und Fahrbarkeit wird hauptsächlich die Erhöhung der Fahrzeugstabilität angestrebt. Zur Überwachung und Kontrolle der Fahrzeugdynamik werden mit Hilfe von im Fahrbe-

trieb gemessenen Parametern unten aufgeführte Fahrzeugsysteme realisiert:

- **Bremsen/Traktion/Fahrzeugstabilität:** Anti-Blockier-System (ABS), Traktionskontrolle (ASR), elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP), Überwachung von Verschleißprozessen (z. B. bei Bremsbelägen),
- **Lenkung:** Geschwindigkeitsabhängige Lenkung, variable Lenkungsunterstützung,
- **Reifen:** Integrierte Sensorik, Reifendrucküberwachung,
- **Fahrwerk:** Adaptive Federung, vollständig aktives Fahrwerk.

Karosserie

In diesem Anwendungsgebiet werden vornehmlich Funktionen umgesetzt, die dem Insassenschutz, dem Fahrkomfort und der Informationsbereitstellung dienen. Diese können wie folgt kategorisiert werden:

- **Unfallvermeidung:** Hinderniserkennung, Spurassistent, Fahrerüberwachung, adaptiver Tempomat mit Abstandsüberwachung, Überwachung des „toten Winkels“, Aufprallwarner,
- **Insassenschutz:** Front-, Seiten- und Überschlag-Airbags, adaptive Rückhaltesysteme, Ermittlung der Präsenz, Gewicht und Position der Insassen,
- **Komfort:** Klima-Regelung, Luftfeuchtigkeit, Sitzposition, Fensterposition,
- **Bequemlichkeit:** Schlüsselloser Zugang („Keyless Entry“), Regensensor, Dämmerungssensor,
- **Sicherheit:** Fußgängererkennung, Verkehrszeichenerkennung, Bildflussanalyse,
- **Diebstahlschutz:** Wegfahrsperrung, Alarmsysteme, Einbrucherkennung und -schutz.

3.8.3 Videobasierte Fahrerassistenzsysteme

Als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme, bei denen visuelle Informationen aus dem Fahrzeugumfeld verarbeitet werden, dienen Daten, die mit Hilfe von Video-, Infrarot-, Ultraschall- und Radarsensoren erfasst werden. In Abhängigkeit von der Anwendung variieren dabei die Anforderungen an deren Leistungsfähigkeit (Auflösung), Reichweite und Aufnahmecharakteristik (Kontrast, mono oder stereo usw.). Videobasierte Assistenzsysteme umfassen die ultraschallbasierte Einparkhilfe, Nachtsichtsysteme, bei denen Infrarotkameras das Umfeld vor dem Fahrzeug erfassen, Spurverlassenswarner und Spurerkennung, Verkehrszeichenerkennung, Erkennung von Hindernissen vor dem Fahrzeug sowie Systeme zur Kollisionswarnung. Zukünftig werden videobasierte Systeme in der Lage sein, erfasste Objekte klassifizieren und sogar bevorstehende Szenarien vorhersagen zu können. Von den in [KNOL10] beschriebenen Anwendungen werden im Folgenden die grundlegenden Systeme vorgestellt.

chenerkennung, Erkennung von Hindernissen vor dem Fahrzeug sowie Systeme zur Kollisionswarnung. Zukünftig werden videobasierte Systeme in der Lage sein, erfasste Objekte klassifizieren und sogar bevorstehende Szenarien vorhersagen zu können. Von den in [KNOL10] beschriebenen Anwendungen werden im Folgenden die grundlegenden Systeme vorgestellt.

Bildverarbeitungssysteme

Die im Fahrzeugumfeld aufgezeichneten Bildinformationen werden zunächst von einem rechnergestützten Bildverarbeitungssystem ausgewertet und aufbereitet. Dabei filtert der Bildverarbeitungsrechner verschiedene charakteristische Eigenschaften (Prädikate) in Form von Objektlisten aus den Aufzeichnungen, anhand derer ein virtuelles Bild der Fahrzeugumgebung erzeugt wird. Zu diesen Merkmalen zählen z. B. Spurverlauf, Geschwindigkeitsbegrenzungen oder die Entfernung zu Gegenständen, die sich in der Nähe des Fahrzeugs befinden. Anhand der Objektlisten können dann wiederum Informationen wie die Position innerhalb der eigenen Fahrbahn, der Krümmungsradius der Fahrbahn, Verkehrszeichen, Abstände zu Objekten sowie die relative Geschwindigkeit von Objekten abgeleitet und ggf. Objektklassifikationen vorgenommen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die erlangten Informationen mit Hilfe einer Datenverbindung auch anderen Komponenten von Fahrzeugsystemen zur Verfügung zu stellen.

Spurverlassenswarner und Spurhalteassistent

Das Verlassen der Fahrspur, bedingt z. B. durch Müdigkeit und Ablenkung des Fahrers, stellt eine der häufigsten Unfallursachen im Straßenverkehr dar. Spurverlassenswarner dienen der Ausgabe von Warnmeldungen, sobald das Fahrzeug die Fahrspur verlässt. Dazu wird die Fahrbahnmarkierung automatisiert anhand von Kontrastunterschieden in den Bilddaten erkannt.

Verkehrszeichenerkennung

Zur Verkehrszeichenerkennung extrahiert der Bildverarbeitungsrechner zunächst eine Vielzahl von Merkmalen aus den aufgezeichneten Bilddaten. Im Anschluss daran werden Methoden der Mustererkennung eingesetzt, wodurch Ähnlichkeiten zwischen den extrahierten Merkmalen und katalogisierten Eigenschaften von Verkehrsschildern festgestellt werden.

Ausblick auf zukünftige videobasierte Anwendungen

Ausgehend von stetig zunehmender Rechen- und Sensorleistung bei gleichzeitig sinkenden Kosten sind zukünftig weitere Funktionen zur Unfallvermeidung realisierbar. Bei der Bildflussanalyse werden Veränderungen zwischen aufeinanderfolgenden Einzelbildern von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen verglichen und im Hinblick auf sich bewegende Hindernisse untersucht. Auf diese Weise können herannahende Gefahrensituationen, die beispielsweise durch Fußgänger verursacht werden können, frühzeitig detektiert werden. Dies ermöglicht die Einleitung unfallvermeidender Manöver. Mit Hilfe von Stereo-Videosystemen kann zudem eine Entfernungsmessung durchgeführt werden. Die Fusion der Erkenntnisse aus Bildflussanalyse und Entfernungsmessung lässt Aussagen zur Bedeutsamkeit eines erkannten Objekts in einer bestimmten Entfernung zu.

Autonome Fahrzeuge

In den 1970er Jahren wurden in den USA, ursprünglich aus militärischen Beweggründen, erstmals autonome Fahrzeuge entwickelt, die mit Hilfe videobasierter Systeme und unter Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz vollständig ohne menschliche Unterstützung navigieren können [RAND12]. Seit dem Jahr 2004 werden unter der Bezeichnung „DARPA-Challenge“ [DARPA12] in den USA Wettkämpfe ausgetragen, bei denen internationale Forschergruppen gegeneinander antreten. Ziel der Wettkämpfe ist die möglichst schnelle Absolvierung einer festgelegten Strecke bzw. eines Parcours. In Deutschland werden autonome Fahrzeuge z. B. im Rahmen der Forschungsprojekte „Stadtpilot“ (Technische Universität Braunschweig [STPI12]) und „Spirit of Berlin“ (Freie Universität Berlin [SPBE12]) entwickelt.

3.8.4 Zustandsüberwachung

Schwingungsanalyse von Fahrzeugkarosserien

Bei Kraftfahrzeugen stellt die Karosserie die tragende Komponente des gesamten Fahrzeugsystems dar. Schwierigkeiten bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen ergeben sich durch das Auftreten von ungewollten Vibrationen, d. h. mechanischen Schwingungen, die durch äußere Belastungen und Einflüsse sowie durch entstehende innere Kräfte in Teilbereichen der Karosserie ausgelöst werden. Die Untersuchung, die Erfassung und die Analyse des dynamischen Verhaltens der Fahrzeugkaros-

serie sind mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse möglich. Dazu wird die zu untersuchende Karosserie gezielt mit Hilfe eines Impulshammers bzw. eines Shakers zu Schwingungen angeregt, welche durch den Einsatz von Beschleunigungssensoren an diskreten Stellen erfasst werden. Ein möglicher Versuchsaufbau ist in Bild 37 dargestellt. Anhand der Messdaten können die Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfungsparameter der Karosserie ermittelt und grafisch dargestellt werden. Darüber hinaus können mit Hilfe derartiger dynamischer Untersuchungen mögliche Schäden und mechanisches Versagen festgestellt werden.



Bild 37: Versuchsaufbau zur Schwingungsanalyse [SRNK11]

Überwachung von Verformungen an Fahrzeugkarosserien

Die Überwachung von Verformungen in kritischen Bereichen der tragenden Fahrzeugkarosserie stellt eine unterstützende Methode bei der strukturellen Optimierung dar. Dazu werden Dehnungssensoren in den sensiblen Bereichen sowohl des tragenden Rahmens (A-, B-, C-Säule) als auch der Bodengruppe unmittelbar im Zuge der werksmäßigen Ausrüstung und Montage appliziert und anschließend zu einem Netzwerk verknüpft. Der Einsatz faseroptischer Dehnungssensoren, die direkt in polymere Materialien des Fahrzeuginnenraums eingearbeitet werden können, ist in [SMCG09] eingehend untersucht worden. Der Vorteil dieser Technik ist die unmittelbare Einbindung des Sensors in die zu untersuchende Struktur schon während des Fertigungsprozesses sowie die universelle Anwendbarkeit bei unterschiedlichsten Fahrzeugtypen.

Das Ziel der Dehnungsüberwachung ist der Aufbau einer „Strain Map“, die in Echtzeit Rückschlüsse auf Fahrzeugverformungen und Beanspruchungen ermöglicht (Bild 38). Durch den Vergleich der gemessenen Dehnungen mit zulässigen Grenzwerten werden kritische Veränderungen der Ka-

rosserie erkannt, welche dem Fahrzeugführer anhand eines entsprechenden Signals („Dashboard Light Sign“) angezeigt werden. Nach dem Eintreten derartiger Ereignisse kann der Fahrzeughersteller unter Einsatz entsprechender Diagnosegeräte zusätzliche Analysen der erhobenen Messdaten durchführen und die Ursache für den ausgelösten Alarm feststellen [SMCG09].

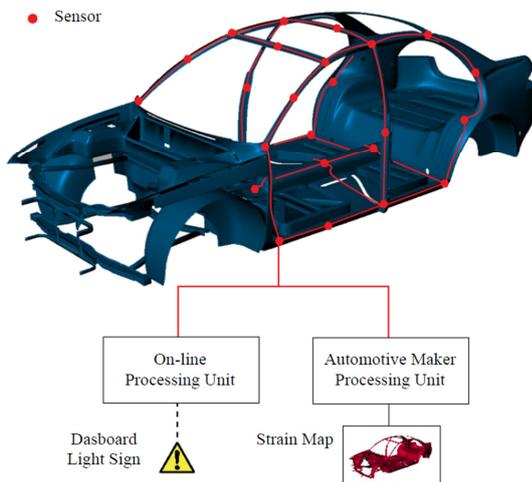


Bild 38: Funktionen des Monitoring-Systems [SMCG09]

Monitoring von elektronischen Fahrzeugsystemen

Seit längerer Zeit ist im Automobilbau ein zunehmender Einsatz von teil- oder vollelektronischen (E&E) Fahrzeugsystemen anstelle von herkömmlichen mechanischen Verbindungen zu verzeichnen. Diese werden mit dem Begriff „By-Wire“ bezeichnet und sind in vielen Anwendungsbereichen bei Kraftfahrzeugen Stand der Technik. Bei der elektronischen Lenkungsunterstützung (Steer-by-Wire) existiert beispielsweise keine mechanische Verbindung zwischen dem Lenkrad und den zu lenkenden Rädern. Vielmehr werden Informationen über den Lenkvorgang (Lenkeinschlag, Lenkmoment) von entsprechenden Sensoren erfasst und nach der Verarbeitung in einer elektronischen Kontrolleinheit (Electronic Control Unit, ECU) als Stellgröße an einen oder mehrere Aktuatoren weitergegeben, welche den Lenkvorgang schließlich ausführen. Bei ca. 90 % aller eingesetzten E&E-Systeme kommen ECU's mit eingebetteter Software zum Einsatz. Die ECU's übernehmen meist weit verteilte Funktionen (siehe Bild 39, unten). Eine verteilte Funktion erfordert zudem häufig die Interaktion mehrerer ECU's. Beispiele für derartige Anwendungen sind der adaptive Tempomat, das Infotainment und Systeme zum Insassenschutz.

Auf Grund der zunehmenden Komplexität der elektronischen Systemarchitektur in modernen

Automobilen erfolgt eine Überwachung der eingesetzten Systemkomponenten (Sensoren, Aktuatoren, ECU's). Dabei werden Unregelmäßigkeiten oder Störungen erkannt und lokalisiert. In Bild 39 ist der Aufbau eines fahrzeugseitigen Monitoring-systems für E&E-Systeme dargestellt. Als Eingangsdaten dienen die aktuellen Zustandsgrößen wie z. B. Spannungen, Ströme oder Temperaturen der Systemkomponenten. Durch den Vergleich mit den entsprechenden in Healthmonitoring-Datenbanken hinterlegten Daten fehlerfreier Zustände oder mit in der Vergangenheit erfassten Messdaten lassen sich Veränderungen in den erhobenen Daten erkennen und der gegenwärtige Zustand der überwachten Komponenten diagnostizieren [AMJO11].

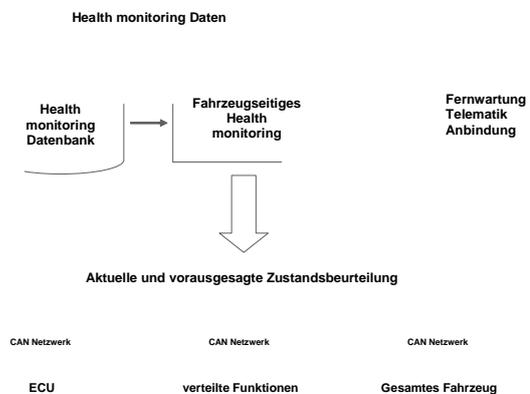


Bild 39: Monitoring bei verteilten Funktionen [AMJO11]

3.8.5 Car-as-Sensor-Konzepte

Eine sehr interessante neuartige Entwicklung stellen „Car-as-Sensor“-Konzepte dar. Diese basieren darauf, die von verschiedenen Bordsystemen aufgezeichneten Messdaten für eine anderweitige Verwendung heranzuziehen. Das Konzept beruht auf der Kartierung des gegenwärtigen Zustands der gesamten Verkehrsinfrastruktur, bei der die relevanten Informationen unmittelbar von den Fahrzeugen der einzelnen Verkehrsteilnehmer erfasst bzw. bereitgestellt werden. Gegenwärtig liegen die zentralen Ziele der Forschung und Entwicklung bei Anwendungen auf den Gebieten der Verkehrsflussanalyse und der Fahrzeugsicherheit. Weitere Anwendungsmöglichkeiten stehen in Aussicht [RWS-DVS09].

3.8.6 Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau

Im Automobilbau werden Sensoren zur Lösung vielfältiger Aufgabenstellungen eingesetzt. Die Sensoren sollten zum einen kostengünstig und klein sein, müssen zum anderen jedoch, insbe-

sondere bei sicherheitsrelevanten Anwendungen, eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit aufweisen.

Videobasierte Fahrerassistenzsysteme beruhen auf der Analyse von Video-, Infrarot-, Ultraschall- und Radaraufnahmen. Die Bilddaten werden zur Erzeugung von Modellen der Fahrzeugumgebung eingesetzt oder mit Methoden der Mustererkennung hinsichtlich der Präsenz bestimmter Objekte (z. B. Personen oder Verkehrszeichen) untersucht. Im Brückenbau werden videobasierte Systeme zur automatisierten Erkennung der Eigenschaften von Fahrzeugen anhand ihrer Silhouetten genutzt. Ein Ansatz zur Verwendung von Videodaten bei der Überwachung von Brückenbauwerken ist in [ZACA07] beschrieben. Dabei werden von Videokameras aufgezeichnete Bilder zur Bestimmung von Fahrzeugkategorien und Fahrzeuggeschwindigkeiten sowie zur Lokalisation der Fahrzeuge auf der Brücke herangezogen. Um die Bestimmung der Fahrzeugkategorie zu ermöglichen, muss das System im Vorfeld mit entsprechenden Daten, d. h. Silhouetten unterschiedlicher Fahrzeugarten, trainiert werden. Durch die Anwendung von Methoden der Mustererkennung auf die an der Brücke aufgenommenen Fahrzeugsilhouetten kann dann eine Zuordnung zu einer entsprechenden antrainierten Fahrzeugkategorie und damit eine Abschätzung des Fahrzeuggewichtes stattfinden. Die Bestimmung von Fahrzeuggeschwindigkeiten und Fahrzeugpositionen wird ebenfalls durch die Analyse der Bilddaten vorgenommen, wobei Tracking-Methoden zur „Verfolgung“ der Fahrzeuge während der Überfahrten eingesetzt werden. Anhand der zwischen zwei Einzelbildern der Videoaufnahme von einem Fahrzeug zurückgelegten Wegstrecke sowie der währenddessen verstrichenen Zeitspanne kann dann die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet werden. Ein ähnliches Verfahren wird ebenso in [ECMF03] beschrieben.

Die Zustandsüberwachung von Fahrzeugkarosserien geschieht auf Grundlage von gemessenen Dehnungen oder Schwingungsdaten.

Die Überwachung des Zustands elektronischer Fahrzeugkomponenten erfolgt durch die Messung von Spannungen, Strömen und Temperaturen der Komponenten. Im Brückenbau könnte ein derartiger Ansatz zur Überwachung der Funktionsfähigkeit der Sensoren verfolgt werden, z. B. durch die Analyse der von den Sensoren aufgezeichneten Messsignale.

Ein Konzept, welches im Automobilbau vielfach Anwendung findet, ist die Integration von Sensoren in Bezugstoffe. Eine Übertragung dieses Konzeptes auf den Brückenbau ist ebenfalls denkbar. Beispielsweise könnten Dehnungssensoren direkt in

Kohlefaserwerkstoffe zur Bauteilverstärkung eingewebt werden, woraufhin eine unmittelbare Überwachung der Verstärkungsmaßnahme erfolgen kann.

Car-as-Sensor-Konzepte basieren auf der anderweitigen Verarbeitung der von den Fahrzeugsensoren erfassten Messdaten. Diese lassen sich z. B. zur Bestimmung des Zustands von Straßen einsetzen. Ein möglicher Ansatz ist die automatisierte Erkennung von Schlaglöchern anhand von Videodaten [KOB11], die etwa von den Rückfahrkameras der Fahrzeuge aufgezeichnet werden können. Dieser Ansatz erfordert die Entwicklung von ereignisbasierten Methoden zur Aktivierung der Kameras, beispielsweise in Folge von Schwingungen der Karosserie, die von einem Schlagloch hervorgerufen werden. Für die Straßenbauverwaltungen bedeuten Car-as-Sensor-Konzepte grundsätzlich, dass eine extrem große Anzahl von Sensoren allgegenwärtig und weiträumig den Zustand der Infrastruktur erfassen kann. Neben der Bestimmung des Fahrbahnzustands ist eine Vielzahl weiterer Anwendungen denkbar, die sich im Rahmen des Erhaltungsmanagements nutzen lassen, z. B. die Messung von Bauwerkschwingungen oder die Erfassung der Verkehrslastentwicklung. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

3.9 Luftfahrt

3.9.1 Einleitung

Die Ursprünge des Structural Health Monitoring bei Flugzeugen lassen sich nicht eindeutig datieren, jedoch waren unter anderem die Abstürze mehrerer De Havilland Comet-Flugzeuge in den frühen 1950er Jahren auslösend für die Überwachung der beim Flugbetrieb auftretenden Belastungen, um insbesondere die Ermüdungsbeanspruchung der Rumpfkonstruktionen beurteilen zu können. Weiterhin sollten die durch die Überwachung gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage zur Einführung von Regularien dienen, die eine Simulation der Belastungen an Testflugzeugen unter Laborbedingungen forderten [GOBO09, IKBO09]. Neben den Fluggesellschaften hatte vor allem das Militär großes Interesse daran, aufgetretene Schäden an Flugzeugstrukturen sowie deren weiteren Fortschritt zu erfassen und zu überwachen.

3.9.2 Schadenserkennung

Bei Flugzeugen können Schäden an der Tragstruktur (Rumpf, Flügel, Leit- und Fahrwerk) sowie

am Antrieb und der weiteren Systemtechnik auftreten. In den geltenden Vorschriften zur Wartung von Verkehrsflugzeugen wird grundsätzlich zwischen zufallsbedingten Schäden sowie umgebungs- und einsatzbedingten Schäden unterschieden [GOBO09, BEMA09].

Zufallsbedingte Schäden

Zufallsbedingte Schäden resultieren z. B. aus Kollisionen mit Bodenfahrzeugen und sonstigen Fremdkörpern, jedoch ebenso aus menschlichem Versagen. Die Schadensorte können unter Einschränkung vorhergesagt werden. Beispielsweise treten Schäden aus Kollisionen mit Fahrzeugen auf dem Rollfeld meist an denselben Stellen der Flugzeuge auf. Schäden aus Steinschlag auf der Start- und Landebahn konzentrieren sich in der Regel auf Teile des Fahrwerks. Schäden aus Hagel betreffen am häufigsten die Landeklappen [GOBO09].

Umgebungs- und einsatzbedingte Schäden

Umgebungs- und einsatzbedingte Schäden werden z. B. durch Ermüdung, Überladung, Abnutzung, Abrieb sowie Flug- und Landungsmanöver hervorgerufen [GOBO09, MEAL09, BEMA09].

Während metallische Werkstoffe häufig von Schäden wie Korrosion und Spannungsrisskorrosion betroffen sind, treten bei Verbundwerkstoffen wie CFK Schäden wie Delamination, Porosität, Einschlüsse, Faserbrüche, Layer-Porosität und Verlust des Verbundes auf [TELG09].

3.9.3 SHM-Strategien bei Flugzeugstrukturen

An dieser Stelle wird ein Überblick über die Möglichkeiten des Structural Health Monitoring bei Tragstrukturen von Flugzeugen und dem dadurch erzielbaren Nutzen zur Optimierung von Wartung, Instandhaltung und Design aufgezeigt.

Wartung

Early Crack Detection

Ergänzend zu zerstörungsfreien Prüf- und Inspektionsmethoden, die auf der Anwendung von Ultraschall- und Wirbelstromverfahren sowie der visuellen Inspektion basieren [BOBU07], können Überwachungssysteme in Bereichen einer Flugzeugstruktur eingesetzt werden, die ansonsten nur

durch zeit- und kostenintensiven Rückbau untersucht werden können. Neben der Verringerung der Ausfallzeit sowie der anfallenden Kosten sinkt dabei auch das Potential für Fehler und Schäden, die bei der Demontage und dem erneuten Zusammenbau der Komponenten auftreten können [MEAL09, TELG09].

Damage Monitoring

Bei dieser noch nicht für die Anwendung in der zivilen Luftfahrt zugelassenen Methode werden erkannte Schäden nicht unmittelbar behoben, sondern zunächst toleriert und individuell mit Hilfe von Sensoren, in manchen Fällen ergänzt durch konventionelle zerstörungsfreie Prüfverfahren, überwacht [MEAL09, TELG09, BOBU07].

Corrosion Monitoring

Aufgrund des hohen Anteils metallischer Werkstoffe in Flugzeugstrukturen muss eine mögliche Korrosionsgefährdung der Bauteile schon in der Entwurfsphase berücksichtigt werden. Dabei ist insbesondere die galvanische Korrosion zu beachten, die in den Übergangsbereichen von metallischen zu Kohlenstofffaser-Werkstoffen auftreten kann. Hersteller wie beispielsweise Airbus entwickeln daher Technologien, mit denen sich z. B. die metallischen Komponenten an den Hot Spots von Flugzeugen überwachen lassen [TELG09, BEMA09].

In-Service Problems

Unter bestimmten Bedingungen treten Schwachstellen der Struktur erst nach der Inbetriebnahme eines Flugzeugtyps oder in zeitgleich durchgeführten Ermüdungsversuchen an realitätsnahen Versuchsmodellen auf. Die im Rahmen einer Überwachung gewonnenen Erkenntnisse können für Prognosen sowie die Planung von Maßnahmen zur Behebung der Schwachstellen herangezogen werden [TELG09].

Life Extension

Überwachungssysteme können bei einer Verlängerung der ursprünglich vorgesehenen Nutzungsdauer eines Flugzeugs wertvolle Informationen zum gegenwärtigen Zustand der Tragstruktur liefern [TELG09].

Design

Durch die Integration von Überwachungssystemen in neuartige Flugzeugstrukturen lässt sich eine Optimierung von Entwurfsansätzen erreichen. Insbesondere bei der Verwendung von Faserverbundwerkstoffen bestehen äußerst konservative Entwurfsprinzipien. So fordern die Zulassungsbehörden bei der Bemessung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen beispielsweise den Ansatz eines Sicherheitsbeiwertes von $\gamma = 3$ [HBLT07, BOBU07, DODS09]. Überwachungssysteme können detaillierte Informationen zum Tragverhalten neuartiger Werkstoffe hervorbringen und somit der Weiterentwicklung von Bemessungskonzepten dienen.

3.9.4 Monitoringverfahren

Durch den Einsatz der im Folgenden aufgeführten Technologien und Verfahren lassen sich detaillierte und objektive Informationen gewinnen, die ergänzend zur konventionellen Inspektion der Beurteilung des Zustands von Flugzeugstrukturen dienen können. Dabei werden insbesondere die auf der Innenseite des Flugzeugrumpfes angeordneten Längsverstärkungen (Stringer) und Rahmentteile überwacht, die in der Regel von der Kabinenverkleidung verdeckt werden. Ebenso werden die Tragstrukturen der Flügel sowie die Außenhaut der Flugzeuge untersucht.

Dehnungsbasierte Strukturüberwachung

Überwachungssysteme können zur Erfassung der während des Betriebes auf die Struktur wirkenden Beanspruchungen (Loads Monitoring, LM) eingesetzt werden. Dabei sind neben der Geschwindigkeit, der Flughöhe und der Außentemperatur vor allem die hervorgerufenen Dehnungen von Interesse. Zur Messung der Dehnungen kommen sowohl herkömmliche Dehnungsmessstreifen als auch faseroptische Sensoren, die den neuesten Stand der Technik repräsentieren, zum Einsatz [HBLT07]. Die Vorteile faseroptischer Sensorik liegen in ihrem einfachen Aufbau, der prinzipiellen Möglichkeit der Integration in Verbundwerkstoffe, wodurch auch Schäden wie Delamination festgestellt werden können [TELG09], und in der störungsfreien Übertragbarkeit der Messsignale auch bei großen Entfernungen und elektromagnetischen Einflüssen. Durch Multiplexing können die Messgrößen von mehr als hundert Sensoren simultan erfasst werden, wodurch sich auch großflächige Bauteile untersuchen lassen [WEIS08, BOBU07].

Grundlage für die dehnungsbasierte Schadensidentifikation ist die Kenntnis der Dehnungsverläufe innerhalb des ungeschädigten Bauteils [HBLT07]. Stellt sich in einem belasteten Bauteil ein Schaden ein, so kommt es zu einem Ausfall von Lastpfaden und demzufolge zu Spannungsumlagerungen, die sich mit den Dehnungssensoren erfassen lassen. Anhand der Veränderungen des Bauteilverhaltens können Rückschlüsse auf Schäden gezogen werden [WEIS08, BOBU07].

Vibrationsbasierte Strukturüberwachung

Durch vibrationsbasierte Verfahren der Strukturüberwachung lassen sich Schäden anhand der Änderung des Schwingungsverhaltens eines untersuchten Bauteils erkennen. Zur Bestimmung des Schwingungsverhaltens können z. B. piezoelektrische Beschleunigungs- oder faseroptische Sensoren eingesetzt werden [HBLT07].

Active Sensing

Active Sensing-Methoden basieren auf dem Einsatz von Piezoelementen, mit denen die zu untersuchende Struktur in einem Frequenzbereich innerhalb des akustischen Spektrums bis in den Ultraschallbereich angeregt wird. Die Schadensdetektion erfolgt mit Hilfe von geeigneten Algorithmen zur Bestimmung der Laufzeitunterschiede der erzeugten Messsignale. Die gewählte Erregerfrequenz ist dabei von großer Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Verfahrens und muss daher individuell an die zu untersuchende Struktur angepasst werden [WEIS08, TELG09, ROAC09].

Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse wird bei Flugzeugen erfolgreich zur Detektion von sich ausbreitenden Rissen in metallischen Werkstoffen sowie zur Detektion von sich lösenden Klebefugen oder Faserbrüchen bei Faserverbundwerkstoffen eingesetzt. Daneben eignet sie sich ebenso für Aufgaben des Loads Monitoring [IKBO09, HBLT07] oder zur Erkennung von Korrosion.

Wirbelstromverfahren

Wirbelstromverfahren können ausschließlich bei elektrisch leitenden Werkstoffen eingesetzt werden. Wirbelströme (Eddy Current) werden mit Hilfe von Spulen erzeugt, an die ein Wechselstrom angelegt wird. Da der Wechselstromwiderstand eines

Werkstoffs von Unstetigkeiten beeinflusst wird, können durch die Analyse der empfangenen Antwortsignale Schäden festgestellt werden.

Zur Zustandsüberwachung können z. B. Wirbelstromfolien eingesetzt werden, die sich unmittelbar in die zu untersuchende Struktur integrieren lassen [ROAC09, IKBO09].

Comparative Vacuum Monitoring

Das Comparative Vacuum Monitoring eignet sich zur Erkennung von Rissen auf ebenen Oberflächen sowie an Schweißnähten und Nietverbindungen. Die hierbei eingesetzten Sensoren bestehen in der Regel aus einer selbstklebenden Folie, auf der sich Kapillaren befinden. Die Kapillaren sind dabei abwechselnd unterschiedlichen Drücken ausgesetzt. Beim Auftreten eines Risses im Bereich des Sensors kommt es zwischen den Kapillaren zu einem Druckausgleich. Der dabei messbare Volumenstrom kann unmittelbar zur Bestimmung der Eigenschaften eines Risses, z. B. der Risslänge, herangezogen werden [TELG09, WEIS08, HBLT07, ROAC09, IKBO09].

Überwachung von Korrosionsprozessen

Korrosionsprozesse sowie die dadurch hervorgerufenen Schäden lassen sich z. B. mit Hilfe galvanischer Sensoren feststellen. Galvanische Sensoren reagieren empfindlich auf korrosive Umgebungsbedingungen und korrodieren dabei selbst. Die dabei über den zeitlichen Verlauf umgesetzte Ladungsmenge kann mit der Korrosivität der jeweiligen Umgebung in Bezug gesetzt werden [WEIS08, ROAC09, BEMA09].

Bauteilüberwachung mit Kohlenstofffasern als Sensoren

Für die Überwachung von Bauteilen aus Verbundwerkstoffen wie CFK lassen sich einzelne Kohlenstofffasern selbst als Sensoren nutzen. Kohlenstofffasern sind elektrisch leitfähig. Erfahren sie eine Dehnung, so ändert sich ihr elektrischer Widerstand. Kohlenstofffasern lassen sich zur Überwachung von Aushärtungsprozessen, Dehnungen und Temperaturen einsetzen [WEIS08].

Taxi Vibration Test

In derzeit geltenden Vorschriften wird die experimentelle Ermittlung der Schwingungseigenschaften von Flugzeugen im Rahmen eines Stand-

schwingungsversuchs gefordert (Ground Vibration Test, GVT, Bild 40). Probleme bereiten dabei die Größe und das Gewicht der Flugzeuge, die Zugänglichkeit der Erregerpunkte, die großen Schwingungsamplituden der Struktur in Verbindung mit dem begrenzt verfügbaren Hub der Schwingungserreger sowie die Eigendynamik der Stative, an denen die Schwingungserreger angebracht werden. Ziel der Standschwingversuche ist die Untersuchung der bei Flugzeugstrukturen auftretenden Schwingungen sowie deren Auswirkungen auf ihre Leistungsfähigkeit sowie ihre Lebensdauer.



Bild 40: Aufbau eines Standschwingversuchs des Airbus A380 [RICH09]

Der „Taxi Vibration Test“ (TVT) stellt eine effiziente Alternative zum Standschwingversuch dar. Dabei wird das mit Beschleunigungssensoren ausgerüstete Flugzeug über die Rollbahn („Taxiway“) bewegt und durch Bodenunebenheiten in Schwingung versetzt. Neben der Untersuchung der Tragflächen ist darüber hinaus ebenso eine Prüfung der Fahrwerke möglich.

Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung des TVT ist die Anregung sämtlicher für die Charakterisierung der Struktur relevanten Eigenformen. Durch Variation der Fahrgeschwindigkeit und der Massenverteilung des zu untersuchenden Flugzeugs, beispielsweise durch unterschiedliche Betankungskonfigurationen, können die Erregerkräfte beeinflusst und unterschiedliche Eigenformen angeregt werden. Da bei einer derartigen ambienten Anregung keine Informationen über die Erregerkräfte gewonnen werden können, erfolgt die Bestimmung der Eigenformen durch Anwendung von Output-Only-Identifikationsverfahren. Die ermittelten Eigenformen werden im Anschluss zur Adaption von FE-Modellen der Flugzeugstruktur herangezogen.

In Kooperation zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Hersteller Airbus ist die Eignung des Verfahrens zur Ermitt-

lung der Schwingungseigenschaften von Flugzeugstrukturen in Ergänzung zu den herkömmlichen GVT an einem mit insgesamt 140 Beschleunigungssensoren ausgestatteten Demonstrator (Bild 41) erfolgreich nachgewiesen worden [BOGO09, RICH09].



Bild 41: Demonstrator „ATRA“ des DLR bei Rollversuchen auf dem Taxiway [RICH09]

3.9.5 Probabilistische Verfahren

Die Boeing 787 („Dreamliner“) ist das erste Flugzeug, dessen Rumpf nahezu vollständig aus Kohlefaserverbundwerkstoffen besteht. Insgesamt beträgt der Gewichtsanteil der Faserverbundwerkstoffe am Gesamtgewicht des Dreamliner etwa 50 % [HBLT07]. An Kohlefaserverbundwerkstoffe werden hohe Anforderungen hinsichtlich Schadenstoleranz und Zuverlässigkeit gestellt [CHLS08, LIST06].

Während bei den gewöhnlich im Flugzeugbau eingesetzten Aluminiumlegierungen häufig Schäden in Form prognostizierbarer Ermüdungsrisse auftreten, liegt die Hauptursache von Schäden an Faserverbundwerkstoffen in Aufprallvorgängen. Die dadurch hervorgerufenen Schäden und insbesondere die Folgen für die Tragstruktur können jedoch nicht eindeutig vorausgesagt werden. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte im Umgang mit Faserverbundwerkstoffen bestehen zudem Schwierigkeiten bei der Festlegung der Wartungsintervalle [LICG11, CHLS08, LIST06].

Durch die Anwendung probabilistischer Verfahren unter Berücksichtigung der stochastischen Verteilung der Eingangsparameter können die Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Bauteile sowie der gesamten Tragstruktur von Flugzeugen ermittelt werden.

Die Entwicklung probabilistischer Verfahren erfolgt derzeit z. B. im Rahmen einer Kooperation zwischen Boeing, der Universität von Washington und der Institution AMTAS (Advanced Materials in

Transport Aircraft Structures, Washington, USA) [LICG11, CHLS08, LIST06]. Zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von Flugzeugkomponenten werden dabei die folgenden deterministischen und probabilistischen Eingangsgrößen benötigt, welche im Rahmen von Softwaresimulationen verarbeitet werden:

- Informationen zu Betriebsbedingungen wie z. B. die während des Flugbetriebs gemessenen mechanischen oder thermischen Beanspruchungen sowie die bisherige Nutzungsdauer des Flugzeugs,
- Informationen zur Tragstruktur und zum Tragverhalten, z. B. in Form eines FE-Modells,
- statistische Informationen zu möglichen Schäden, z. B. Art, Schwere, Ort oder Häufigkeit bestimmter Schadenstypen, welche aus Datenbanken extrahiert werden können, sowie
- Informationen zur Wartung, z. B. die angewendeten Inspektions- oder Reparaturmethoden sowie Wartungsintervalle.

Durch die Anwendung der erarbeiteten Verfahren lassen sich schadenstolerante Strukturen aus Verbundwerkstoffen wie CFK bei vorgegebener Zuverlässigkeit entwickeln. Die Erkenntnisse aus der probabilistischen Analyse zeigen die Abhängigkeit des Zuverlässigkeitsniveaus von den Inspektionsintervallen, den dabei angewendeten Verfahren und schließlich der Qualität von durchgeführten Reparaturen auf. Neben den Kosten für die Wartung lässt sich insbesondere das Risiko von strukturellem Versagen minimieren [CHLS08, LIST06].

3.9.6 Übertragbarkeit der Konzepte

Die Komponenten der Tragstrukturen von Verkehrsflugzeugen sind während ihres Betriebs extremen mechanischen Beanspruchungen und extremen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Aufgrund des sehr hohen Sicherheitsanspruchs und der sehr komplexen Belastungsgeschichte im Laufe der Einsatzdauer eines Flugzeugs, insbesondere bei Passagierflugzeugen, wird großes Augenmerk auf die Wartung und die Inspektion der Maschinen gelegt. In fest vorgeschriebenen Intervallen, abhängig von der Anzahl der Flüge und den abgeleiteten Flugstunden, werden zeit- und kostenintensive Inspektionen durchgeführt. Zudem werden visuelle Untersuchungen an den zugänglichen Bereichen sogar vor und nach jedem Flug vorgenommen.

Die Anforderungen an Überwachungssysteme zur Anwendung bei Brückenbauwerken sind mit denen des Flugzeugbaus vergleichbar:

- Die Belastungen und Einflüsse aus Umweltbedingungen sind ebenso komplex und schwer vorhersagbar,
- das geforderte Sicherheitsniveau ist ebenfalls sehr hoch,
- Schäden treten häufig an schwer zugänglichen Stellen auf und sind somit nicht direkt erfassbar und
- die Herausforderung an die Systeme besteht ebenfalls darin, eine verhältnismäßig große Struktur mit relativ wenigen Sensoren bzw. Eingangsparametern zu überwachen.

Das Konzept des Damage Monitoring basiert darauf, bereits erkannte Schäden an einer Struktur nicht unmittelbar instand zu setzen, sondern diese zunächst zu tolerieren und zu überwachen. Dabei können wichtige Erkenntnisse über den Zustand und die weitere Ausbreitung des Schadens gewonnen werden. Die Tolerierung und Überwachung eines an einem Brückenbauwerk aufgetretenen Schadens kann dann sinnvoll sein, wenn der Schaden nicht unmittelbar behoben werden kann oder falls Zweifel an der Dringlichkeit einer Instandsetzungsmaßnahme bestehen. Die Ergebnisse aus der Schadensüberwachung können unter Berücksichtigung der durch den Schaden verursachten Nutzungsbeeinträchtigung sowie der Kosten zur Schadensbehebung zu einer zuverlässigen Beurteilung der Dringlichkeit führen. Ein Beispiel für eine solche Schadensüberwachung im Brückenbau findet sich in [MOCA12]. Dort wird über eine Brücke berichtet, an deren Koppelfugen auffällige Rissbilder festgestellt wurden. Um die Ursache der Risse sowie die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Bauwerks zu bestimmen, wurden induktive Wegaufnehmer an das Bauwerk angebracht, die die Rissbreitenänderungen während der Nutzung aufzeichneten. Anhand der Ergebnisse der länger als ein Jahr durchgeführten Schadensüberwachung konnte nachgewiesen werden, dass die überwachten Koppelfugenrisse keinen wesentlichen Einfluss auf die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks ausübten. Auf größere Instandsetzungsarbeiten konnte daher verzichtet werden.

Aufgrund der vergleichbaren Anforderung hinsichtlich der Messtechnik und der einsetzbaren Sensorik im Allgemeinen ist es möglich, verfügbare Technologien aus dem Flugzeugbau für die Anwendung im Brückenbau zu adaptieren. In der Luftfahrt werden häufig Sensoren direkt in verarbeitete Materialien integriert. Dieses Prinzip kann z. B. auf Kohlefaserlamellen oder -gelege zur Verstärkung von Betonbauteilen übertragen werden. Da der elektrische Widerstand von Kohlefasern von ihrem Dehnungszustand abhängt, könnten bauteilverstärkende CFK-Lamellen gleichzeitig als

Sensoren genutzt werden, mit Hilfe derer die Funktionstüchtigkeit der Verstärkungsmaßnahme überwacht werden kann. Mit dem Thema der Integration von Sensorik in Werkstoffe und Bauteile beschäftigt sich derzeit der DFG-Sonderforschungsbereich/Transregio 39 („Großserienfertige Produktionstechnologien für Leichtmetall- und faserverbundbasierte Komponenten mit integrierten Piezosensoren und -aktoren“) [DFGSFB/TR39]. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Beim Taxi Vibration Test (TVT) wird die Tragstruktur eines Flugzeugs nicht durch den Einsatz von Erregern, z. B. Shaker, zu Schwingungen ange-regt, sondern durch die Fahrt über unebenen Untergrund. Ähnliche Ansätze werden beim Ambient Vibration Test (AVT) von Brückenbauwerken verfolgt (siehe auch Kapitel 2.4.2). Der AVT basiert auf der Aufzeichnung und Analyse von Bauwerks-schwingungen, die durch die ambiente Einwirkung von Verkehr und Wind hervorgerufen werden.

Probabilistische Ansätze werden bei Flugzeugen moderner Bauart, über die nur wenige Erfahrungen vorliegen und bei denen grundsätzlich eine abweichende Schadenscharakteristik gegenüber den bislang üblichen Bauweisen gilt, für die Bewertung und die Vorhersage der Ausfallwahrscheinlichkeit eingesetzt. Zuverlässigkeitsbasierte Konzepte werden ebenfalls bei der Überwachung von Brückenbauwerken angewendet. In [KLIN08] wird beispielsweise ein Ansatz zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Brücken auf Grundlage langfristig erfasster Messdaten vorgestellt. Dabei können auch zukünftige Entwicklungen und Zustände prognostiziert werden. In [SCHN08] wird zudem beschrieben, wie sich die Methoden zur zuverlässigkeitsbasierten Systembewertung von überwachten Brückenbauwerken weiterentwickeln und optimieren lassen.

3.10 Raumfahrt

3.10.1 Einleitung

Das Monitoring der Strukturen und Systeme von Raumfahrzeugen ist entscheidend für den Erfolg einer jeden Mission im Weltall. Dabei wird eine Vielzahl von Sensoren zur Bereitstellung von Informationen über den Zustand der Konstruktionen während der Herstellung, der Testphase und schließlich des Betriebs eingesetzt. Die Anforderungen an die bei Raumfahrzeugen genutzte Sensortechnik werden im Wesentlichen durch die besonderen Umgebungsbedingungen und Beanspruchungen bestimmt. Zu diesen Beanspruchungen zählen neben den starken Vibrationen und Stößen

während des Starts auch die Schwerelosigkeit, das Ausgasungen verursachende Vakuum, die vorhandene ionisierende Strahlung und die großen Temperaturspannen. Gemäß [MCKA05] werden die jeweils erforderlichen Spezifikationen der für eine Überwachungsaufgabe bei Raumfahrzeugen einzusetzenden Sensortechnik in der Regel abhängig von Art der Mission, Einsatzdauer, orbitaler Flughöhe und Lage bzw. Einsatzort des Sensors festgelegt.

3.10.2 Schadenserkennung

Im Bereich der Raumfahrt und der Weltraumforschung liegt die Aufmerksamkeit aufgrund der besonderen Einsatzbedingungen und den damit verbundenen Herausforderungen auf Ereignissen und Umständen, von denen eine Gefährdung der hochsensiblen und wertvollen Apparaturen und ggf. der Besatzung ausgehen kann.

Bei Raumfähren, Trägerraketen, Satelliten, Teleskopen und Orbitalstrukturen können während des Starts aufgrund der großen Beschleunigung und der daraus resultierenden mechanischen Belastung, aber auch durch Einschläge von abgelösten Bestandteilen oder Eis (dem sogenannten „Ascent Debris“) Schäden und Beschädigungen an der eigentlichen Tragstruktur und der schützenden Außenverkleidung verursacht werden.

In der Umlaufbahn unterliegen die Tragstrukturen und Apparaturen von Satelliten, Raumfahrzeugen und Modulen aufgrund der Schwerelosigkeit anders gearteten mechanischen Beanspruchungen als auf der Erde. Im Einsatz befindliche Satelliten, Mikrometeoriten und kleinste Überreste (Micro Meteorits and Orbital Debris, MMOD) von beispielsweise zerstörten, ausgedienten Satelliten wie auch von jeglichen anderen Objekten, die erst im Zuge der Raumfahrt und Weltraumforschung durch den Menschen in den Orbit gebracht wurden, stellen eine potentielle Gefährdung für jede Mission dar. Die Geschwindigkeit, mit der diese meist weniger als 1 cm großen Partikel bei einem Einschlag (Impact) auf Weltraumstrukturen auftreffen, kann dabei bis zu 10 km/s betragen. Gegenmaßnahmen werden in Form von Schutzschilden (Ripple-Shields), die eine Art Bremsschicht darstellen, getroffen. Wesentlich für die Vermeidung von Einschlägen und Kollisionen mit umherfliegenden Objekten ist aber vor allem die genaue Ortung und die anschließende Kartierung der sich in der Umlaufbahn befindenden Gegenstände in der NASA Debris Assessment Software (DAS) [NAOD12].

3.10.3 Sensoren und Monitoringverfahren

Faseroptische Sensoren

Faseroptische Sensoren, hauptsächlich Faser-Bragg-Gitter Sensoren, werden vielfach bei der Überwachung der Tragstruktur von Raumfahrzeugen z. B. an den Flügeln von Raumfähren eingesetzt. Sie sind langlebig, besitzen ein geringes Gewicht und sind unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Einflüssen. Weiterhin ermöglicht das Multiplexing, mit einer optischen Faser gleichzeitig mehrere auch unterschiedliche Größen bei unwesentlichem Signalverlust zu messen. Am NASA Langley Research Institute wurden Fasern entwickelt und erprobt, bei denen mehr als 3.000 faseroptische Sensoren, vorwiegend für Dehnungs- und Temperaturmessungen, zum Einsatz kamen [WINF09]. Faseroptische Sensoren lassen sich grundsätzlich in Faserverbundwerkstoffe integrieren und können daher der Erkennung von Verbundversagen oder Rissen in Faserlaminaten dienen.

Aktuelle Entwicklungen der NASA im Bereich der Echtzeitüberwachung basieren auf der Kombination von drei unabhängig voneinander dehnbaren optischen Fasern, die in einer Ummantelung zu einem Bündel zusammengefasst sind. Jede dieser Fasern verfügt über in regelmäßigen Abständen angeordnete Bragg-Gitter zur Dehnungsmessung. Über die unterschiedlichen Relativdehnungen der einzelnen Fasern lassen sich dreidimensionale Dehnungs- und Verformungszustände auch mit hohen Abtastraten präzise erfassen und abbilden (siehe Bild 42) [PERE11]. Beispielsweise können durch den Einbau eines einzigen Sensors entlang des Flügels einer Raumfähre selbst komplexe räumliche Bewegungen des Bauteils aufgezeichnet werden.

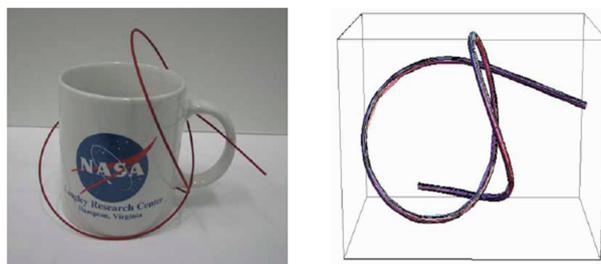


Bild 42: Form- und Dehnungsüberwachung auf Basis von dreidimensionalen FBG-Sensoren [PERE11]

MEMS-Sensoren

MEMS-Sensoren (Micro Electro Mechanical System) sind mechanische Messaufnehmer im Kleinformat, die über die Belichtung von licht-

empfindlichem Fotolack und dem anschließenden Ätzen (Fotolithographie) auf einem Träger-Substrat hergestellt werden (Halbleitertechnik). Sie zeichnen sich außerdem durch niedrige Herstellungskosten sowie eine einfache Applizierbarkeit aus. Die Miniaturisierung macht es darüber hinaus möglich, nicht nur mehrere Sensoren, sondern auch Elemente der Signalverarbeitung und Filter in einen einzigen Mikrochip zu integrieren [MATG06]. Bei der NASA werden mit Surface Acoustic Wave (SAW) Filtern ausgerüstete MEMS-Sensoren für den Einsatz in Raumfahrzeugen entwickelt. Diese teil-passiven, drahtlosen Sensoren besitzen einen geringen Energieverbrauch, da sie für die Datenübertragung extern mit Mikrowellen angeregt werden. Sie eignen sich prinzipiell für vielseitige Messaufgaben, z. B. für die Messung von Temperatur, Druck oder Dehnung. Außerdem sind Ultraschall- und chemische Sensoren realisierbar.

Elektrische Widerstandsmessung

Auch bei Raumfahrzeugen lassen sich einzelne Fasern in Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen durch Messung ihres elektrischen Widerstands als Sensoren heranziehen. Es ergeben sich die bereits in Kapitel 3.9 aufgeführten Vorteile.

Bauteilüberwachung mit Nanotube-Sensoren

Als eine der jüngsten Entwicklungen erfährt die Anwendung neuer, smarterer Materialtechnologien auch im Bereich der Überwachung immer mehr Beachtung. Nanotube-Materialien (Piezo-Nano-Gemische auf Basis von Kohlenstoff, Graphen oder Boron-Nitrid [PERE11]) sind Werkstoffe, die zur Fertigung von Sensoren und Aktuatoren verwendet werden können. Jedoch ist ihr Einsatz nicht auf die Herstellung von Sensoren beschränkt. Ebenso können aus ihnen Bestandteile von Tragstrukturen gefertigt werden, die neben der lasttragenden Funktion auch sensorische und aktuatorische Fähigkeiten besitzen. Die wesentlichen Merkmale von Nanotube-Materialien liegen in ihrer hohen Festigkeit, dem geringen Gewicht, dem höchst elastischen Verhalten und der Temperaturbeständigkeit. Trotz des frühen Entwicklungsstadiums sind die Möglichkeiten, die sich unter Einsatz derartiger Materialien bei der Entwicklung von Raumfahrzeugen ergeben können, vielversprechend [WINF09]. So können Nanotube-Sensoren bereits während des Herstellungsprozesses in die Struktur integriert werden, um im späteren Einsatz beispielsweise Dehnungen, Drücke oder Temperaturen zu messen [MATG06].

Schallemissionsanalyse

Wie auch im Bereich der Luftfahrt wird die Schallemissionsanalyse zur Detektion von akuten Schädigungsvorgängen an Raumfahrzeugen, vor allem aber bei Schäden, die durch Aufprallereignisse und Einschläge hervorgerufen werden, eingesetzt. Da sich herkömmliche piezoelektrische Sensoren auf Grund ihres vergleichsweise hohen Gewichts und des hohen Energiebedarfs nur bedingt für den Einsatz in der Raumfahrt eignen, ist hier die Verwendung hochsensibler faseroptischer Sensoren vorzuziehen [MATG06].

Active Sensing

Active Sensing-Verfahren werden nicht nur in der Luftfahrt (siehe auch Kapitel 3.9), sondern ebenso in der Raumfahrt angewendet. Eine sowohl in der Raum- als auch in der Luftfahrt einsetzbare Entwicklung stellt das SMART LayerTM (Stanford Multi-Actuator Receiver Transduction) Diagnostiksystem dar. Dieses System besteht aus einem dünnen dielektrischen Film mit eingebettetem Sensor-Array, der in Bauteile aus Verbundwerkstoffen jeder Form und Größe integriert werden kann und dabei in Temperaturbereichen von bis zu 200 °C einsetzbar ist.

3.10.4 Anwendungen von Monitoringsystemen

Überwachung von Tragstrukturen

Weltraumstrukturen sind bei ihren Einsätzen rauen Bedingungen ausgesetzt, verfügen jedoch aufgrund der auferlegten Gewichtsgrenzen im Wesentlichen über keine nennenswerten Tragfähigkeitsreserven. Daraus ergibt sich eine Schadensanfälligkeit bei thermischen und mechanischen Beanspruchungen. Zusätzlich besteht die Forderung nach hoher Formtreue und Stabilität, insbesondere bei hochpräzisen Apparaturen wie beispielsweise Weltraumteleskopen. Aus diesen Gründen sollte der Zustand der Tragstrukturen überwacht werden. Durch den Einsatz entsprechender faseroptischer Sensoren, meist FBG-Sensoren, lassen sich Dehnungs- und Temperaturverteilungen von der Herstellung bis zum dauerhaften Betrieb im Weltraum erfassen. Die erhobenen Messdaten dienen der Feststellung von Deformationen der Tragstruktur, der Unterdrückung störender Vibrationen, der Erkennung und Klassifizierung der Einschläge von MMOD sowie der Validierung des thermischen Regelungssys-

tems durch die Temperaturüberwachung der Wärmeleiter [MCKA05].

Überwachung des Antriebs- und Treibstoffsystems von Satelliten

Das Antriebssystem eines Satelliten ist für die mitunter im All erforderlichen Kurskorrekturen oder Ausweichmanöver zuständig. Die Überwachung der Komponenten des Antriebs- und Treibstoffsystems ist deshalb wichtig für den Umgang mit den knapp bemessenen Treibstoffreserven. Dabei wird eine Vielzahl von Parametern wie z. B. Drücke (0 bis 45 bar) und Temperaturen in unterschiedlichen Bereichen des Antriebs wie der Düse (-40 °C bis 400 °C), den Treibstofftanks und den Treibstoffleitungen (-40 °C bis 70 °C) gemessen. Bislang wurden diese Messaufgaben von elektrischen Sensoren erfüllt. Faseroptische Sensoren stellen jedoch aufgrund ihres wesentlich günstigeren dynamischen Verhaltens und der präziseren Auflösung eine leistungsfähige Alternative zu elektrischen Sensoren dar und werden deshalb bereits seit Jahren erprobt und weiterentwickelt [MCKA05].

Sowohl bei dem eingestellten Space Shuttle-Programm als auch bei aktuellen Tests möglicher Nachfolgekonzepte spielen die Tanks der Raumfähren eine große Rolle. Als Treibstoff kommen flüssiger Wasser- und Sauerstoff zum Einsatz. Die Aufgabe der Überwachung der Tanks besteht in der Detektion möglicher Leckagen sowie der mechanischen Beanspruchungen, wobei sowohl elektrische als auch faseroptische Sensoren zur Messwerterfassung verwendet werden [WINF09].

Fluglage und Kontrolle der Umlaufbahn

Für die Sicherstellung der gewünschten Fluglage und der Kontrolle der Umlaufbahn von Satelliten werden bei zahlreichen Missionen Gyroskope verwendet. Diese kommen überwiegend bei kurzzeitigen Missionen ohne wesentliche Anforderungen hinsichtlich der Strahlungseinflüsse zum Einsatz. In den letzten Jahren wurden faseroptische Gyroskope als eine Alternative entwickelt und erprobt, die selbst bei starker Strahlung störungsfrei funktionieren [MCKA05].

Überwachung von Trägerraketen

Wiederverwendbare Trägerraketen bieten das Potential einer wesentlichen Kostenreduzierung bei der Durchführung von Weltraummissionen. Das Angebot verfügbarer Trägerraketen für den Transport von Satelliten, Forschungseinrichtungen, Ver-

sorgungsmaterial und Besatzung ist stark begrenzt. Insbesondere nach dem Ende des Space Shuttle-Programms werden große Bemühungen unternommen, unter Einsatz von neuartigen Materialien und Fertigungsverfahren sowie in Verbindung mit effizienten Überwachungssystemen innovative Konzepte für gewichtsoptimierte, mehrfach einsetzbare Raketen zu entwickeln. Der bei der Entwicklung dieser Raketen-Plattformen entstehende Messaufwand verteilt sich dabei auf das Antriebs- und Tanksystem, den Hitzeschild und die zu optimierende Tragstruktur. Die gemessenen Parameter sind z. B. Temperaturen, Beschleunigungen, Dehnungen und Drücke. Während in der Erprobungs- und Entwicklungsphase die Messdaten von mehr als 1.000 konventionellen Sensoren ausgewertet wurden, kann beim tatsächlichen Einsatz der Raketen auf Grund des hohen Gewichts und des hohen Energiebedarfs der Messaufnehmer eine nur sehr kleine Anzahl von Sensoren eingesetzt werden. Durch die Verwendung faseroptischer Messtechnik lassen sich diese Einschränkung umgehen (siehe Bild 43) [MCKA05].

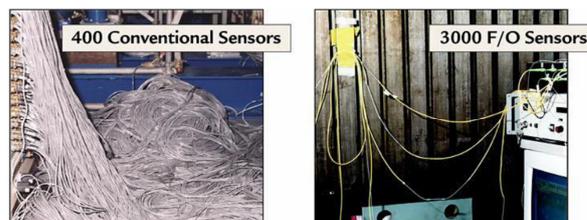


Bild 43: Vergleich konventioneller (links) und faseroptischer Messsysteme (rechts) [WINF09]

Überwachung von Aufklärungssatelliten

Die amerikanische Luftwaffe und das Operationally Responsive Space Office (ORS Office) entwickeln derzeit Überwachungssysteme, die bereits während der Montage- und Testphase von Aufklärungssatelliten eingesetzt werden können, und mit deren Hilfe sich Dauer und Aufwand für das Erreichen der angestrebten Zuverlässigkeit minimieren lassen. Bisher kann der Bau eines Satelliten auf konventionelle Art aufgrund umfangreicher Testläufe mitunter mehr als drei Jahre in Anspruch nehmen. Der Forderung nach einer kurzfristigen Reaktionsfähigkeit auf mögliche Bedrohungen soll nachgekommen werden, indem die Entwicklungszeit von Satelliten zukünftig durch einen modularen Aufbau und die Überwachung einzelner Baugruppen bereits während des Herstellungsprozesses nach Möglichkeit auf Tage bzw. Wochen verkürzt wird.

Mit Hilfe von bereits während der Konstruktion erstellten dynamischen Modellen der geplanten Satellitenkonstruktion können Fehler in einzelnen

Komponenten, in der Verkabelung, in den mechanischen Schnittstellen oder gar strukturelle Schäden der Bauteile erkannt werden. Dazu werden die Eigenschaften der Modelle permanent mit den tatsächlichen Eigenschaften des Satelliten verglichen. Anhand von dabei festgestellten Abweichungen können Schäden und Defekte erkannt, lokalisiert und identifiziert werden. Durch Anwendung des Systems lässt sich die Funktionsfähigkeit der Komponenten sowie der ordnungsgemäße Zusammenbau unter Verzicht auf herkömmliche Testverfahren sicherstellen [ARWH08].

Erkennung von Aufprallschäden beim Space Shuttle

Die Ursache für den Absturz der Raumfähre „Columbia“ war ein Schaden am Hitzeschutzschild eines Flügels, der durch den Aufprall eines abgelösten Teils der Wärmeisolierung hervorgerufen wurde. Zur Minimierung des Risikos derartiger Vorfälle bei nachfolgenden Missionen wurde ein Überwachungssystem zur Feststellung von Aufprallschäden im Bereich der Flügel entwickelt. Das System für das Shuttle umfasste insgesamt 132 Beschleunigungs- und ca. 20 Temperatursensoren, die jeweils in den vorderen Teil der Flügelstruktur integriert wurden. Die erfassten Messdaten wurden drahtlos in die Raumfähre übertragen und nach der Weiterverarbeitung in komprimierter Form zur Auswertung an die Bodenstation gesendet. Potentiell geschädigte Stellen, die anhand von Spitzenwerten in den Messdaten erkannt und lokalisiert werden konnten, ließen sich mit Hilfe von Videoaufnahmen und Radarmessungen genauer untersuchen. Für diese Untersuchungen wurde das Orbiter Boom Sensor System, ein mit Sensoren und Kameras ausgestatteter Manipulator-Arm als fester Bestandteil des Shuttles eingerichtet. Kleinere Schäden an der Raumfähre konnten mit dessen Hilfe noch im Weltall behoben werden [PMSG09].

3.10.5 Probabilistic Risk Assessment

Bereits in den 1960er Jahren setzte die NASA Methoden des Probabilistic Risk Assessments (PRA) ein, um Risiko- und Zuverlässigkeitsbeurteilungen von Raumfahrzeugen bzw. Komponenten vornehmen zu können. Mit Hilfe der PRA lässt sich das Risiko bestimmen, welches mit dem Einsatz eines Raumfahrzeugs, eines Bauteils oder einer Systemkomponente verbunden ist. Dazu werden die Auftrittswahrscheinlichkeiten möglicher Schäden und die daraus resultierenden Konsequenzen betrachtet und miteinander kombiniert. Beispielswei-

se können sowohl wenig wahrscheinliche Einzelergebnisse mit allerdings verheerenden Auswirkungen auftreten als auch Ereignisse, die bei einem einmaligen Auftreten unkritisch sind, bei häufigem Auftreten jedoch eine Katastrophe nach sich ziehen können [STDE11].

Durch Einsatz des PRA können die folgenden Ziele erreicht werden:

- Abschätzung der Häufigkeit unterschiedlicher, unerwünschter Auswirkungen während des Lebenszyklus einer Systemkomponente,
- Festlegung des Fokus bei der Entwicklung,
- Beurteilung von Alternativen zur Minimierung des Risikos eines Systems,
- Analyse des Risiko-Kosten-Verhältnisses von Modifikationen,
- Identifikation von Unsicherheiten [THOF97].

Während noch zu Beginn der Entwicklung Methoden der Ausfalleffektanalyse eingesetzt wurden, basierten erste Weiterentwicklungen auf der quantitativen Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Systemkomponenten [FUQU86]. Später wurden Fehler- und Ereignisbäume, die um Fehlerraten und Wahrscheinlichkeitsdaten erweitert wurden, integriert. Ebenso wurden Gefahren einbezogen, die während einer Weltraum-Mission zu einem Verlust der Besatzung und des Shuttles führen können [HCBT09]. Einflüsse auf das Risiko stellen beispielsweise Hardwareversagen, strukturbedingtes Versagen, Lecks, Umwelteinflüsse wie MMOD, menschliches Versagen und Softwarefehler dar [BOHA11, HCBT09].

3.10.6 Übertragbarkeit der Konzepte

Raumfahrzeuge, Satelliten und Orbitalstrukturen unterliegen während ihrer Einsatzdauer starken Beanspruchungen, die z. B. aus den großen Beschleunigungen während des Starts oder aus Einschlägen von Mikrometeoriten bzw. sonstigen Objekten resultieren. Zudem erfordern die hohen Kosten von Weltraummissionen ein großes Maß an Zuverlässigkeit sowie die genaue Prognostizierbarkeit des Verhaltens der eingesetzten hochkomplexen technischen Systeme.

Generell bestehen zwischen dem Brückenbau und der Raumfahrt die folgenden Parallelen:

- Komplexe und schwer vorhersagbare Beanspruchungen,
- raue Einsatz- und Umweltbedingungen, denen die Überwachungssysteme ausgesetzt sind,
- hohe Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit und

- der Einsatz einer relativ geringen Anzahl von Sensoren zur Überwachung verhältnismäßig großer Strukturen.

Viele der im Bereich der Raumfahrt eingesetzten Sensoren und Verfahren (faseroptische Sensoren, MEMS-Sensoren, Schallemissionsanalyse, Ultraschallverfahren) werden vielfach bereits im Brückenbau genutzt. Eine Ausnahme bildet hier ein im Bereich der faseroptischen Messtechnik entwickelter Faser-Bragg-Gittersensor, der aus drei einzelnen Fasern zusammensetzt ist. Dieser kann zur Erfassung räumlicher Dehnungs- oder Bewegungszustände angewendet werden. Die Technologie eignet sich auch für dynamische Messungen. Im Brückenbau könnte dieser Sensortyp als Alternative zu dreiachsigen Beschleunigungsmessern zur Erfassung von Bauwerksschwingungen installiert werden.

Das Verfahren der elektrischen Widerstandsmessung wird ebenso im Bereich der Luftfahrt angewendet. Die Übertragbarkeit wurde bereits in Kapitel 3.9.6 beurteilt.

Eine Vielzahl der in der Raumfahrt eingesetzten Monitoring-Methoden ist meist zu sehr an die spezifischen Probleme angepasst, weshalb sie in der Regel nicht auf den Brückenbau übertragen werden kann. Daneben werden jedoch auch Metho-

den angewendet, die in ähnlicher Form bereits bei der Überwachung von Brückenbauwerken zum Einsatz kommen. Als Beispiele seien hier die modellbasierte Überwachung der Herstellung von Aufklärungssatelliten oder die Untersuchung von Schwingungen zur Schadenserkenung genannt.

Die Übertragbarkeit von Ansätzen der risiko- und zuverlässigkeitsbasierten Bewertung von Systemkomponenten wurde bereits in Kapitel 3.7.4 und Kapitel 3.9.6 beurteilt.

3.11 Übertragbare Technologien von Überwachungssystemen

Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Übersicht sämtlicher Technologien von Überwachungssystemen, die in den verschiedenen Ingenieurdisziplinen zur Anwendung kommen, und die Potential für die Übertragung auf den Brückenbau aufweisen bzw. weitere Forschungstätigkeiten erfordern. Diese sind in Tab. 4 zusammengefasst. Der zur Übertragung der genannten Technologien erforderliche Forschungsbedarf ist ausführlich in Kapitel 6 dargestellt.

Disziplin	Übertragbare Konzepte	Anwendung bei Brücken
Diverse	Schallemissionsanalyse	Wird im Brückenbau bereits zur Erkennung von Rissen, Spanngliedbrüchen usw. eingesetzt. Forschungsbedarf besteht jedoch hinsichtlich des automatisierten Einsatzes zur Schadenserken- nung.
Tunnelbau	Radarinterferometrie	Überwachung von Setzungen
Windenergieanlagen	(keine neuartigen Konzepte)	
Hochhäuser und Türme	(keine neuartigen Konzepte)	
Talsperren	(keine neuartigen Konzepte)	
Kernkraftwerke	Überwachung des Messsystems	Überwachung der Sensorfunktion
Rotierende Maschinen	Datenbanken zur Anwendung von Methoden der Mustererkennung bei der Schadensdetektion	Schadenserken- nung anhand von Mess- daten, ohne dass die Kalibrierung physikalischer Modelle erforderlich ist
Offshore-Plattformen	Risikobasierte Inspektionsplanung (RBI)	Optimierung der Zeiträume zwischen den Bauwerksprüfungen
Automobilbau	Überwachung von elektronischen Fahr- zeugkomponenten	Überwachung der Sensorfunktion
	Integration von Sensoren in Bezugsstof- fe	Integration von Dehnungssensoren z. B. in Kohlefaserlamellen bei der nachträglichen Verstärkung
	Car-as-Sensor-Konzepte	Erfassung von für das Erhaltungsma- nagement relevanten Informationen über Einwirkungen und Bauwerkszustände
Luftfahrt	Elektrische Widerstandsmessung bei einzelnen Kohlefasern	Nutzung einzelner Fasern von Kohlefa- serlamellen als Sensoren. Dadurch ließe sich eine Überwachung von Verstär- kungsmaßnahmen erreichen.
Raumfahrt	Elektrische Widerstandsmessung bei einzelnen Kohlefasern	Nutzung einzelner Fasern von Kohlefa- serlamellen als Sensoren. Dadurch ließe sich eine Überwachung von Verstär- kungsmaßnahmen erreichen.
	Dreiadrige Faser-Bragg-Gittersensoren zur Erfassung von räumlichen Dehnungs- oder Bewegungszuständen	Positionsbestimmung und Erfassung von Bauwerksschwingungen

Tab. 4: Zusammenfassung der auf den Brückenbau übertragbaren Technologien

4 Anforderungen an ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke

Gemäß Bundesfernstraßengesetz (FStrG) gehören Bau, Unterhaltung, Erweiterung und Verbesserung von Bundesfernstraßen zu den Aufgaben der Träger der Straßenbaulast. Um die zur Erhaltung von Brückenbauwerken zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel auch langfristig mit größtmöglicher Effektivität einsetzen zu können, ist die

Kenntnis der aktuellen Bauwerkszustände allein nicht ausreichend. Ebenso wichtig ist es, eine Entwicklung der Bauwerkszustände und der Einwirkungen zur Feststellung des zukünftigen Erhaltsbedarfs prognostizieren zu können.

Mit Hilfe eines Systems zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke sollen sich nicht nur gegenwärtige Einwirkungen und Bauwerkszustände ermitteln, sondern auch zukünftige Entwicklungen ableiten lassen. Ein solches System basiert auf Überwachungskonzepten, deren Grundlagen bereits ausführlich in Kapitel 2 erörtert wurden. Dabei werden Sensornetze zur Erfassung von Einwirkungs- und/oder Bauwerksparametern eingesetzt. Durch Anwendung von Methoden zur Informati-

ongsgewinnung lassen sich aus den Messungen die auftretenden Verkehrslasten und vorhandenen Schädigungen bestimmen. Zur Speicherung und Vorhaltung der erfassten Messdaten und der extrahierten Informationen dient ein Brückenmodell. Die Bewertung und Prognose der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt auf Basis probabilistischer Verfahren. Zu gewährleisten ist die Integrierbarkeit des Systems in das Erhaltungsmanagement von Brückenbauwerken. In Bild 44 sind sämtliche Komponenten eines Systems zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke, die Ver-

knüpfungen zwischen den Komponenten sowie die Anbindung des Systems an das Erhaltungsmanagement dargestellt.

Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Definition von Anforderungen an ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke, wobei insbesondere die Akquisition von Einwirkungs- und Bauwerkparametern (Kapitel 4.1), die Brückenmodellierung (Kapitel 4.2) und die Integration des Systems in das Erhaltungsmanagement (Kapitel 4.3) untersucht werden.

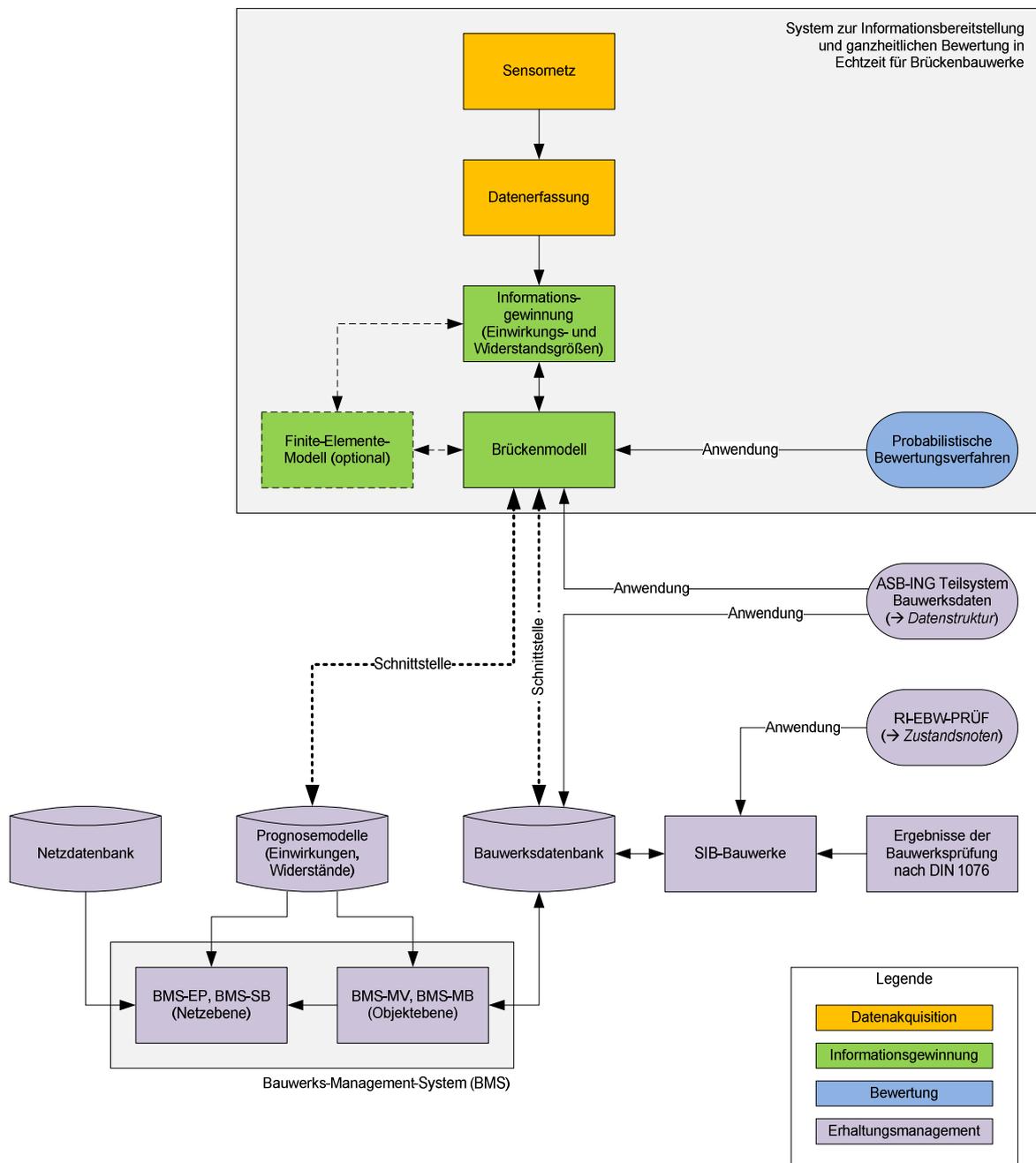


Bild 44: Konzept eines Systems zur Informationsgewinnung und Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke und Integration in das Erhaltungsmanagement

4.1 Intelligente Datenakquisition

In diesem Kapitel werden Anforderungen aufgezeigt, welche eine intelligente Datenakquisitionskomponente erfüllen muss, sodass die erfassten Messdaten möglichst genaue Aussagen zu auftretenden Verkehrslasten und möglichen Schäden zulassen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Auswahl, Platzierung und Funktionsüberwachung geeigneter Messelemente und den Aufbau drahtgebundener und insbesondere drahtloser Sensornetze.

4.1.1 Sensoren zur Schadenserkenkung

Die Definition von Anforderungen an Sensoren zur Schadenserkenkung erfolgt in mehreren Schritten.

Schritt 1: Ermittlung der relevanten Schäden (Schwachstellenanalyse)

Die Identifikation von Schäden an Brückenbauwerken basiert auf der Annahme, dass Schäden bestimmte Parameter (Bauteilreaktionen oder Bauteileigenschaften) beeinflussen und daher durch Messung und Interpretation dieser Parameter identifiziert werden können. Im Brückenbau existiert eine Vielzahl möglicher Schadensarten und Schadensorte – eine vollständige Berücksichtigung sämtlicher Möglichkeiten würde unmittelbar zu einer sehr großen Anzahl von zu messenden Parametern führen. Daraus resultieren (1) große Datenmengen, die jedoch nicht gleichzusetzen sind mit Wissen, (2) Schwierigkeiten bei der Interpretation der Daten und (3) hohe Kosten, insbesondere für die Sensorik. Aus diesem Grunde sollte vor Beginn einer Bauwerksüberwachung ermittelt werden, welche Schwachstellen (Hot Spots) das vorliegende Bauwerk aufweist und welche relevanten Schäden daraus hervorgehen (Beantwortung der Frage „Was versagt wie?“), sodass das Sensornetz gezielt zur Überwachung dieser Schwachstellen entwickelt werden kann. Informationen zu den Hot Spots können z. B. durch die Untersuchung vergleichbarer Bauwerke gewonnen werden.

Schritt 2: Ermittlung der zur Identifikation der Schäden zu messenden Parameter (Messgrößen) und der Messorte

In diesem Schritt sind die Auswirkungen der in Schritt 1 ermittelten relevanten Schäden zu untersuchen, sodass Aussagen zu den zur Identifikation

der Schäden zu messenden Parametern sowie den Messorten gewonnen werden können. Schäden lassen sich hinsichtlich ihrer Auswirkungen grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen:

- Schäden mit Auswirkungen auf die Steifigkeit von Bauteilen beeinflussen das globale Tragverhalten des Bauwerks und lassen sich mit Hilfe von Verfahren der globalen Bauwerksüberwachung identifizieren. Dabei sind die Tragwerksreaktionen (z. B. Schwingbeschleunigungen, Dehnungen, Verformungen, Neigungen usw.) in der Regel an mehreren Stellen der Tragstruktur zu erfassen.
- Schäden, die keinen Einfluss auf das globale Tragverhalten von Bauteilen ausüben, können nur durch Messungen im unmittelbaren Schadensbereich erkannt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass sich Schäden mit zunächst nur lokalen Auswirkungen im Laufe der Zeit zu tragfähigkeitsrelevanten Schäden fortentwickeln können. Z. B. führen lokale Korrosionsprozesse von Betonstahl bei fortschreitender Dauer zu einer Abnahme der Querschnittsfläche der Bewehrung und somit zu verstärkter Rissbildung, die mit einer Abnahme der Bauteilsteifigkeit sowie der -tragfähigkeit einhergeht.

Die eingesetzten Überwachungsverfahren (lokale Verfahren, globale Verfahren, Kombinationen) sind demnach stark abhängig von der Art und den Auswirkungen der in Schritt 1 ermittelten relevanten Schäden.

Die erforderliche Anzahl von Sensoren zur Überwachung von Strukturen wird meist überschätzt [BROW07]. Neben der Ermittlung von sensitiven Messgrößen sind die Optimierung der Anzahl der Sensoren sowie der Sensorplatzierung für die Zuverlässigkeit und die Wirtschaftlichkeit eines Überwachungssystems von großer Bedeutung.

Messgrößen und Messorte bei globaler Bauwerksüberwachung

Methoden der globalen Bauwerksüberwachung können auf der Analyse des dynamischen oder statischen Tragverhaltens basieren.

Während sich die zur Erkennung eines Schadens zu erfassenden Messgrößen durch Interpretation des Schädigungsprozesses bzw. des Schädigungsmodells bestimmen lassen, wird die maximale Anzahl der einzusetzenden Sensoren in der Regel von wirtschaftlichen Aspekten wie z. B. den Kosten eines Sensors und den verfügbaren finanziellen Mitteln bestimmt [RORS05]. Bei der Erfassung von Bauwerksschwingungen muss die Anzahl der eingesetzten Sensoren mindestens der

Anzahl der zu identifizierenden Eigenformen entsprechen. Ggf. muss die Lage der Sensoren zur Erfassung einer größeren Anzahl von Freiheitsgraden während der Messung variiert werden.

Nach der Bestimmung der Anzahl der Sensoren erfolgt die Festlegung der Messorte (Optimierung der Sensorplatzierung, engl. „Sensor Placement Optimization“, SPO). Eine mögliche Vorgehensweise bei der Sensorplatzierung zur Messung des dynamischen Verhaltens ist die Untersuchung der Eigenformen der niederfrequenten Bauwerksschwingungen anhand eines FE-Modells. Die Sensoren sollten möglichst nicht an den Stellen angeordnet werden, an denen die Bauwerksschwingungen keine oder eine nur eine sehr geringe Amplitude besitzen (Schwingungsknoten, siehe Bild 23) [ROCA11].

Bei großen und komplexen Brückenbauwerken können die Messorte mit Hilfe automatisierter Verfahren ermittelt werden, die entweder auf einem sequenziellen Vorgehen oder auf der Anwendung von Optimierungsalgorithmen basieren. Beide Vorgehensweisen erfordern die Definition von Kriterien zur Bewertung eines potentiellen Messortes. Diese dienen der Bestimmung des Informationsgehalts, der sich bei Anbringen eines Sensors an ebendiesem Ort ergibt. Solche Kriterien sind z. B. das Modal Assurance Criterion (MAC), die kinetische Energie des entsprechenden Freiheitsgrades der Schwingungsform oder verschiedene Größen aus dem Gebiet der Informationstheorie (z. B. Fisher-Information, Transinformation oder Entropie) [YIL12, BAWO09].

Bei der sequentiellen Vorgehensweise werden aus einem zu Beginn angelegten Sensorset mit einer bewusst großen Anzahl von Sensoren an unterschiedlichen Orten nacheinander (sequenziell) diejenigen Sensoren entfernt, die den geringsten Informationsgehalt liefern. Ebenso möglich ist das entgegengesetzte Vorgehen, d. h., einem zu Beginn leeren Sensorset werden nacheinander diejenigen Sensoren hinzugefügt, die den größten Informationsgehalt liefern. Die Optimierung ist abgeschlossen, wenn eine vorab definierte Anzahl von Sensoren erreicht wurde. In [RORS05] wird ein auf der Entropie basierendes Verfahren vorgestellt, welches im Rahmen einer Laboranwendung zur Platzierung von induktiven Wegaufnehmern verifiziert wurde. Ziel des Versuchs war die Bestimmung der Materialeigenschaften, Auflagersteifigkeiten und Belastungsparameter eines Holzträgers durch Interpretation der gemessenen Durchbiegungen.

Alternativ zum sequenziellen Ansatz können Optimierungsalgorithmen zur Bestimmung der optimalen Messorte eingesetzt werden. Dabei werden die

Sensoren nicht sequenziell, sondern gleichzeitig platziert. Grundsätzlich stehen deterministische oder stochastische Optimierungsverfahren zur Verfügung. Deterministische Verfahren (z. B. Newton-Verfahren) können in lokalen Extrema „steckenbleiben“ und eignen sich daher vorwiegend bei Lösungsräumen, die keine bzw. nur wenige lokale Extrema aufweisen. Dagegen eignen sich stochastische Verfahren (z. B. evolutionären Algorithmen) auch für das Auffinden globaler Optima in komplexen Lösungsräumen, die eine größere Anzahl von lokalen Extremstellen aufweisen. Eine Studie zum Einsatz genetischer Algorithmen zur Sensorplatzierung findet sich in [GZZZ04]. Unter anderem wurden am Beispiel einer zweidimensionalen Fachwerkstruktur die Ergebnisse verschiedener Algorithmen zur Bestimmung der optimalen Platzierung von Dehnungssensoren miteinander verglichen. Ziel war die Optimierung der Sensorplatzierung zur Erkennung von Schäden an einzelnen Traggliedern der Struktur.

Messgrößen und Messorte bei lokaler Bauwerksüberwachung

Die Bestimmung der zur Identifikation eines Schadens zu messenden Größen erfolgt durch die Interpretation lokaler Schädigungsprozesse bzw. der entsprechenden Schädigungsmodelle. Im Gegensatz zur globalen Bauwerksüberwachung erfolgt die Messung jedoch nicht an der Struktur verteilt, sondern lokal im Bereich der Hot Spots. Das Vorgehen zur Bestimmung der Messgrößen soll am Beispiel des Modells zur Beschreibung der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion veranschaulicht werden: Hier ist die Konzentration der Chloridionen in einem Betonbauteil abhängig von der Konzentration der Chloridionen an der Bauteiloberfläche, der Diffusionskonstante des Materials und der Zeit. Durch entsprechende Messung der Konzentration der Chloridionen an der Oberfläche und der Diffusionskonstante des Materials kann also auf die Konzentration der Chloridionen im Bauteil geschlossen werden.

Die Bestimmung der Messorte erfolgt im Rahmen der Schwachstellenanalyse (siehe Schritt 1), bei der die für das vorliegende Bauwerk relevanten Schäden festgestellt werden. Stellt sich bei der Schwachstellenanalyse z. B. ein Problem an der Koppelfuge eines Bauwerks heraus, so sollten dort gezielt Sensoren angebracht werden. Ebenso können Bauwerksbereiche, die offensichtlich einer starken Beanspruchung unterliegen, mit Hilfe eines dichteren Sensornetzes überwacht werden.

Schritt 3: Definition der messtechnischen Anforderungen an Sensoren

Nach der Ermittlung der zu messenden Parameter können die Anforderungen an die messtechnischen Eigenschaften der Sensoren zur Erfassung dieser Parameter definiert werden. Im Folgenden werden einige dieser Eigenschaften erläutert (siehe auch [DIN1319-1]):

- **Messbereich:** Im angegebenen Messbereich eines Sensors liegen die Messabweichungen innerhalb der festgelegten Grenzen. Außerhalb dieses Bereichs kann die angegebene Genauigkeit nicht mehr garantiert werden.
- **Übertragungsverhalten:** Das Übertragungsverhalten ist die Beziehung zwischen den Werten der Eingangsgröße und den zugehörigen Werten der Ausgangsgröße unter Ausschluss der Rückwirkung des Sensors.
- **Ansprechschwelle:** Die Ansprechschwelle kennzeichnet die kleinste Änderung des Wertes der Eingangsgröße, die zu einer erkennbaren Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Sensors führt.
- **Empfindlichkeit:** Die Empfindlichkeit beschreibt die Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Sensors bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße.
- **Auflösung:** Die Auflösung ist eine Angabe zur quantitativen Erfassung des Merkmals eines Sensors, zwischen nahe beieinanderliegenden Messwerten eindeutig zu unterscheiden.
- **Messgerätedrift:** Der Messgerätedrift bezeichnet eine langsame zeitliche Änderung des Wertes eines messtechnischen Merkmals eines Sensors.
- **Einstelldauer:** Die Einstelldauer beschreibt die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt einer sprunghaften Änderung des Wertes der Eingangsgröße eines Sensors und dem Zeitpunkt, ab dem der Wert der Ausgangsgröße dauernd innerhalb vorgegebener Grenzen bleibt.
- **Messabweichung:** Die Messabweichung kennzeichnet die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem wahren Wert der Messgröße.

Die Bestimmung des erforderlichen Messbereichs der eingesetzten Sensoren basiert auf dem minimalen und dem maximalen Erwartungswert der in Schritt 2 ermittelten Messgrößen. Soll z. B. eine Verformung mit erwarteten Werten zwischen 0 und 100 mm überwacht werden, so muss ein eingesetzter Wegaufnehmer diesen Messbereich abdecken. Ebenso sollte ein Sensor zur Messung der Schwingbeschleunigung einer weitgespannten

Hängebrücke die niedrigen Schwingbeschleunigungen zuverlässig erfassen können.

Häufig weisen Sensoren kein lineares Übertragungsverhalten auf. Mögliche Nichtlinearitäten im Übertragungsverhalten können z. B. mit Hilfe von Verfahren der Signalkonditionierung oder entsprechenden nichtlinearen Umkehrfunktionen korrigiert werden.

Die Anforderungen an die Ansprechschwelle, die Empfindlichkeit, die Auflösung und die Messabweichung eines Sensors sind abhängig zum einen von der Sensitivität der Messgröße hinsichtlich der Identifikation eines Schadens, zum anderen von dem Messbereich, in dem sich die Größe bewegt: Je weniger eine Messgröße von einem Schaden beeinflusst wird und je kleiner der Messbereich ist, desto höher sind die Anforderungen an die messtechnischen Eigenschaften des Sensors. Der durch Messung eines Parameters mögliche Informationsgewinn darf nicht durch die Messungenauigkeit des eingesetzten Sensors beeinträchtigt werden. Bei geringem Einfluss des Schadens auf die Messgröße sinkt auf Grund des Hintergrundrauschens außerdem das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio, SNR), d. h., die Qualität des Messsignals verschlechtert sich. Eine Verbesserung der Signalqualität lässt sich durch Anwendung verschiedener Verfahren zur Rauschunterdrückung erzielen (z. B. Verstärken oder Filtern bestimmter Frequenzen).

Die Einstelldauer eines Sensors ist insbesondere bei sich schnell ändernden Messgrößen von großer Bedeutung. Bei Schwingungsmessungen werden daher Sensoren mit entsprechend kurzer Einstelldauer benötigt.

Schritt 4: Definition der umgebungsbedingten Anforderungen an Sensoren

Ungünstige Umgebungsbedingungen, d. h. Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse, Einwirkung von Schadstoffen, elektromagnetische und sonstige Strahlung, können die Funktionsfähigkeit von Sensoren beeinträchtigen. Im Brückenbau eingesetzte Sensoren müssen daher besondere Anforderungen erfüllen (siehe [ACGP03]).

Brückenbauwerke unterliegen stark wechselnden klimatischen Beanspruchungen. Die eingesetzten Sensoren müssen innerhalb der zu erwartenden Temperatur- und Feuchtigkeitsbereiche zuverlässig funktionieren. Feuchtigkeitseinflüsse können insbesondere bei elektrischen Sensoren zu Störungen und Messungenauigkeiten führen. Zur Bestimmung der spezifischen Temperatur- und

Feuchtigkeitsbereiche sollten an Ort und Stelle repräsentative Messungen durchgeführt werden.

Auf Grund der Witterungseinflüsse sollten Sensoren aus möglichst widerstandsfähigen und unempfindlichen Materialien hergestellt sein. Außerdem sollten sie z. B. durch abgedichtete Gehäuse vor Feuchtigkeit, Nässe, Tausalz, Staub und weiteren Schadstoffen geschützt werden.

Die Genauigkeit der von elektrischen Sensoren erfassten Messwerte kann durch elektromagnetische Strahlung, Funkwellen, elektrische Felder usw. beeinträchtigt werden. Gegebenenfalls sollten die Sensoren eine Isolierung erhalten, z. B. in Form eines abschirmenden Gehäuses. Alternativ können faseroptische Systeme eingesetzt werden, die gegenüber elektrischen Strahlen, Wellen oder Feldern unempfindlich sind.

Schritt 5: Definition der wirtschaftlichen Anforderungen an Sensoren

Bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Sensors müssen neben den Beschaffungskosten auch die Kosten für die Installation, die Inbetriebnahme und die Wartung berücksichtigt werden. Die Beschaffungskosten werden von der Komplexität der eingesetzten Messtechnologie, der Verbreitung sowie der Verfügbarkeit des Sensors beeinflusst. Die Kosten für die Inbetriebnahme ermitteln sich auf Grundlage des Aufwandes für das Anbringen des Sensors, ggf. die Verlegung von Kabeln und das Anbringen von externen Schutzmaßnahmen (z. B. Gehäuse). Die Wartungskosten sind im Wesentlichen abhängig von der Robustheit und der Dauerhaftigkeit des eingesetzten Sensors [ACGP03].

Schritt 6: Sensorauswahl

Im letzten Schritt erfolgt schließlich die Auswahl der Sensoren, die die in den vorherigen Schritten definierten Anforderungen bei der spezifischen Messaufgabe erfüllen.

4.1.2 Sensoren zur Identifikation von Verkehrslasten

Für die Identifikation von Verkehrslasten stehen zwei Vorgehensweisen zur Verfügung: (1) Die direkte Messung der Fahrzeuggewichte mit Hilfe von WIM-Systemen (Kapitel 2.3.2) und (2) die Bestimmung der Verkehrslasten mit globalen oder lokalen Verfahren der Bauwerksüberwachung (B-WIM, siehe Kapitel 2.4.3). Um Aussagen in Echtzeit zu

erhalten, sollte das eingesetzte Verfahren eine möglichst schnelle Gewinnung von Informationen aus den Messdaten erlauben.

Zur Bewertung der Genauigkeit eines Systems zur Verkehrslastidentifikation wurden im Rahmen der COST (Cooperation in Science and Technology) Aktion 323 [COST323] die folgenden Genauigkeitsklassen erarbeitet. Darin wurden die Anforderungen an die Genauigkeit eines WIM-Systems in Abhängigkeit von der Anwendung definiert:

- Bei generellen statistischen Untersuchungen, z. B. zur Ermittlung von Verkehrs- oder Frachtaufkommen auf Straßen oder Brücken, ist es ausreichend, Systeme der Genauigkeitsklassen D+ oder D einzusetzen.
- Für detaillierte Untersuchungen zur Optimierung der Instandhaltung von Straßen und Brücken und zur Erfassung von Achs- und Gesamtlasten von Fahrzeugen sollten Systeme der Genauigkeitsklassen B oder C eingesetzt werden.
- Zur Erkennung und Strafverfolgung überladener Fahrzeuge müssen sehr genaue Systeme der Genauigkeitsklasse A oder B+ eingesetzt werden.

Beim Einsatz von WIM-Systemen sollte die Messstelle gemäß [COST323] möglichst nicht auf einem Streckenabschnitt angeordnet werden, auf dem besonders stark gebremst oder beschleunigt wird, z. B. in der Nähe von Ampelanlagen. Weiterhin sollte der Straßenabschnitt im Bereich von 50 m vor bis 25 m nach einer Messstelle die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Fahrbahnlängsneigung < 2 % (besser < 1 %),
- Fahrbahnquerneigung < 3 %,
- Kurvenradius > 1.000 m (besser: gerade Strecke),
- keine Unebenheiten oder plötzliche Neigungsänderungen [E-DIN8113].

WIM-Systeme müssen außerdem angepasst werden an die auftretende Verkehrsintensität, die Fahrzeuggeschwindigkeiten, Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse, ggf. elektromagnetische Strahlung und mechanische Beanspruchungen [E-DIN8113].

4.1.3 Überwachung der Sensorfunktion

Die Zuverlässigkeit eines Überwachungssystems zur Identifikation von Schäden und Verkehrslasten hängt entscheidend von der Qualität der erfassten Messwerte ab. Störungen in den Messwerten können Fehlinterpretationen oder falsche Schadensmeldungen verursachen. Während falsch-positive Befunde, d. h. Meldungen von Schäden, obwohl

keine Schäden aufgetreten sind, zu aufwändigen Untersuchungen oder gar Sperrungen eines Bauwerks und damit zu wirtschaftlichen Folgekosten führen können, sind falsch-negative Befunde, d. h. aufgetretene Schäden bleiben unerkannt, als deutlich kritischer einzustufen. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Sensoren werden in [WERT06] die folgenden Methoden genannt, die bei Sensoren der Prozessmesstechnik eingesetzt werden, dies sich jedoch ebenso auf andere Sensortypen übertragen lassen:

- Prozesskopplung,
- Auswerten von Vor- und Erfahrungswissen und
- interne Überwachung im autarken Sensor.

Prozesskopplung

Die Überwachung eines Sensors mit Hilfe der Prozesskopplung basiert auf dem Vergleich des Messsignals des überwachten Sensors mit den Signalen mehrerer benachbarter Sensoren (übergreifende Überwachung, siehe [VDI/VDE2650]). Dadurch kann z. B. eine von einem Sensor gemessene Dehnung als fehlerhaft erkannt werden, wenn sämtliche Sensoren in der Umgebung davon abweichende Messwerte liefern.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz modellbasierter Verfahren. Hier wird mit Hilfe eines Prozessmodells der Erwartungswert einer Messung bestimmt, welcher im Anschluss mit dem tatsächlich erfassten Messwert verglichen wird. Eine deutliche Abweichung zwischen dem erwarteten und dem tatsächlichen Wert kann ein Indiz für eine Fehlfunktion des Sensors darstellen. Modellbasierte Verfahren erfordern die Kenntnis des Prozessverhaltens [WERT06].

Auswerten von Vor- und Erfahrungswissen

Bei der Einbindung von Vor- und Erfahrungswissen werden in der Vergangenheit erfasste Messwerte für Plausibilitätsprüfungen herangezogen. Dabei können ebenso Grenzwerte, Trends, statistische Parameter oder qualitative Signalverläufe verwendet werden, die jedoch an das Prozessverhalten angepasst werden müssen.

Interne Überwachung im autarken Sensor

Im Gegensatz zu den beiden vorgenannten Methoden erfolgt die Überwachung autarker Sensoren (Selbstüberwachung) unabhängig vom Prozessverhalten sowie ohne Informationen, die nicht aus dem Sensor selbst stammen. Derartige Selbst-

überwachungsmethoden müssen im Regelfall seitens der Sensorhersteller entwickelt, umgesetzt und in die Sensoren integriert werden. Einige dieser Verfahren werden im Folgenden erläutert (siehe auch [MUEL06]).

Einsatz von Redundanz

Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Messeinheiten (Redundanz) innerhalb eines Sensors können einzelne fehlerhafte Messungen identifiziert werden. Für eine Mehrheitsentscheidung werden mindestens drei Einheiten benötigt. Unterschieden werden homogene und diversitäre Redundanz. Bei homogener Redundanz werden Messeinheiten eingesetzt, die auf dem gleichen Messprinzip beruhen. Diversitäre Redundanz basiert dagegen auf der Anwendung unterschiedlicher Messprinzipien, sodass die Auswirkungen von Umwelteinflüssen, Störgrößen und Entwicklungsfehlern auf die unterschiedlichen Messprinzipien kompensiert werden können.

Erzeugung einer Referenzgröße

Referenzgrößen dienen der Kalibrierung bzw. der Rekalibrierung von Sensoren. Bei einer Kalibrierung wird die Referenzgröße an den Sensor angelegt und mit der vom Sensor erzeugten Ausgangsgröße verglichen. Kann der Sensor die Referenzgröße selbst erzeugen, so kann er sich selbst überwachen und ggf. sogar selbst kalibrieren.

Analyse des Messsignals

Die Analyse des Messsignals umfasst die Überwachung sensorspezifischer Grenzwerte und Trends. Dabei können z. B. aus den höheren Frequenzanteilen in den Messgrößen durch Filterung und Dateninterpretation Informationen über den Zustand des Sensors gewonnen werden.

Analyse des Einflusses einer Störgröße

Störgrößen beeinflussen die Aufnahme der Messgröße und verfälschen so das Übertragungsverhalten der Messkette. Zur Selbstüberwachung kann eine auftretende Störgröße in einem separaten Kanal erfasst und mit dem von der Störgröße verfälschten Übertragungsverhalten verglichen werden.

Analyse von Zusatzsignalen und Zusatzgrößen

Durch die Analyse interner Signale von Komponenten eines Messinstruments kann eine Bestimmung des Zustands des Gerätes erfolgen. Dieses Verfahren wird häufig bei der Durchführung von Selbsttests nach der Aktivierung eines Messinstruments eingesetzt.

4.1.4 Drahtgebundene Sensornetze

Drahtgebundene Sensornetze bestehen aus den Sensoren sowie den zur Vernetzung der Sensoren benötigten Leitungen.

Bei elektrischen Sensoren eingesetzte Kupferleitungen sind anfällig gegenüber externen Störeinflüssen, weshalb entsprechende Kabelquerschnitte und eine ausreichende Abschirmung erforderlich sind. Auf Grund der wesentlich geringeren Störanfälligkeit der digitalen gegenüber der analogen Datenübertragung sollten analoge Messsignale vor der Datenübertragung möglichst in digitale Daten konvertiert werden.

Faseroptische Leitungen sollten vor dem Einbau durch stabile Ummantelungen oder Gehäuse vor mechanischer Beanspruchung geschützt werden. Trotz dieser Schutzmaßnahmen sollte der Einbau faseroptischer Leitungen bzw. Sensoren mit besonderer Sorgfalt und Vorsicht erfolgen.

4.1.5 Drahtlose Sensornetze

Die größte Herausforderung beim Aufbau drahtloser Sensornetze ist die Energieversorgung der Bauteile der Motes, d. h. der Sensoren, der Rechenkerne und der Transceiver zur Datenübertragung. Dabei weist die drahtlose Datenübertragung in heutigen Sensornetzen den weitaus größten Energiebedarf auf (siehe Bild 45).

Um die Effektivität drahtloser Sensornetze zu erhöhen, sollten die im Folgenden aufgeführten Anforderungen erfüllt werden.

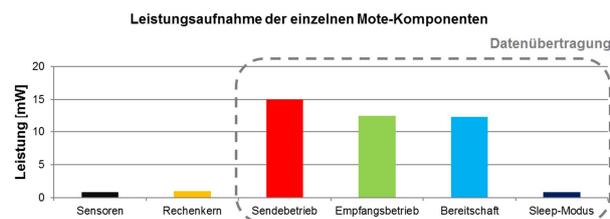


Bild 45: Leistungsaufnahme der einzelnen Mote-Komponenten auf Grundlage von [PFTH07]

Sensoren

Neben den in Kapitel 4.1.1 aufgeführten grundsätzlichen Anforderungen werden an Sensoren in drahtlosen Sensornetzen Anforderungen an den Stromverbrauch gestellt. Sensoren mit einem niedrigen Energiebedarf sind daher besonders für den Einsatz in drahtlosen Sensornetzen geeignet. In diesem Zusammenhang sind MEMS-Sensoren hervorzuheben. MEMS-Sensoren (Bild 46) sind bereits in Ausführungen zur Messung von Schwingbeschleunigungen, Temperaturen und Feuchtigkeit erhältlich. Sie verfügen über eine äußerst geringe Leistungsaufnahme und werden zudem wegen ihrer geringen Größe und der Möglichkeit der Massenproduktion in Zukunft sehr kostengünstig herstellbar sein. In [KRGR10] werden beispielsweise Herstellungskosten von nur wenigen Euro prognostiziert. Außerdem bieten sie vielfach integrierte Funktionen wie z. B. Temperaturkompensation oder bestimmte Kalibriermechanismen [KRGR10].



Bild 46: Größenvergleich zwischen herkömmlichen Beschleunigungsmessern und MEMS-Sensoren [KRGR10]

Neben MEMS-Sensoren können auch herkömmliche Dehnungsmessstreifen und induktive Wegaufnehmer in drahtlose Sensornetze integriert werden [KRGR07], da diese meist ebenfalls einen nur geringen Energieverbrauch aufweisen. Die von diesen Sensoren erzeugten analogen Messsignale müssen vor der Übertragung in digitale Daten umgewandelt werden. Dies geschieht mit Hilfe von in den Mote integrierten Analog/Digital-Wandlern (A/D-Wandler), welche über eine Auflösung von mindestens 16 Bit verfügen sollten [LYNC07].

Energieversorgung

Zur Energieversorgung der Komponenten eines Motes stehen herkömmliche Batterien oder Akkumulatoren (Akkus) zur Verfügung.

Herkömmliche Batterien müssen über eine ausreichende Kapazität verfügen. Die Kapazität einer

Batterie wird beeinflusst von den verwendeten Materialien. In [LYNC07] wurden Ergebnisse eines Vergleichs der Einsatzdauer verschiedener Batterietypen veröffentlicht. Es wurde festgestellt, dass bei gleichem Energieverbrauch mit Lithium-Eisen-sulfid-(LiFeS₂-)Batterien eine fast doppelt so lange Einsatzdauer erreicht werden konnte als mit Alkali-Mangan-(ZnMnO₂-)Batterien. Batterien sollten außerdem mit vertretbarem Aufwand ausgewechselt werden können.

Akkus können im Gegensatz zu Batterien mit Hilfe verschiedener Techniken wiederaufgeladen werden. Konzepte, die auf der „Ernte“ und Umwandlung mechanischer, solarer, thermischer oder chemischer Energie aus der lokalen Umgebung basieren, werden auch mit dem Begriff „Energy Harvesting“ bezeichnet. Die Technologien befinden sich noch in den Anfängen der Entwicklung, haben sich jedoch im Rahmen von prototypischen Anwendungen als vielversprechend erwiesen.

Eine der effektivsten Energy-Harvesting-Methoden ist die Umwandlung von Bewegungsenergie [PFT07]. Diese Form der Energiegewinnung eignet sich besonders für den Einsatz bei Brücken, da diese ständig durch Verkehr und Wind zu Schwingungen angeregt werden [EBFR12]. Zur Umwandlung der Bewegungsenergie einsetzbare Wandler beruhen auf unterschiedlichen Prinzipien.

Wandler mit einer seismischen Masse basieren auf dem gleichen Prinzip wie Sensoren zur Messung von Schwingbeschleunigungen. Dabei werden entweder piezoelektrische Materialien (Piezowandler) oder federnd in einer Spule gelagerte Magnete (elektromagnetische Wandler) eingesetzt. Piezowandler erzeugen in der Regel große Spannungen, jedoch nur geringe Stromstärken. Die von elektromagnetischen Wandlern erzeugten Spannungen und Stromstärken können dagegen justiert werden, indem die bewegte Masse oder die Steifigkeit der Feder verändert werden. Laut [POSC04] eignen sich Wandler auf Basis piezoelektrischer Materialien besonders für den Einsatz bei Mikrosystemen, während Wandler nach dem elektromagnetischen Prinzip eher für größere Systeme empfohlen werden. In [SLCP09] wird über den Einsatz eines elektromagnetischen Wandlers an einer Brücke berichtet, der sich gemäß Aussagen der Autoren besonders für die Gewinnung von Energie aus den niederfrequenten Brückenschwingungen eignet. Mit Hilfe des Wandlers konnte genügend Energie zur Versorgung eines drahtlos angeschlossenen Temperatursensors erzeugt werden.

Neben Wandlern mit seismischer Masse existieren Flächenwandler, die aus einer dünnen piezokeramischen Folie bestehen. Diese wird direkt auf die

Bauteiloberfläche aufgeklebt, sodass sich eine Dehnung des Bauteils unmittelbar auf die Folie überträgt und auf diese Weise Energie erzeugt wird. Eine kommerziell erhältliche Lösung ist z. B. der Flächenwandler DuraAct der Firma Invent GmbH [INVE12], der bereits erfolgreich an einem Brückenbauwerk zur Energieversorgung von Beschleunigungssensoren eingesetzt werden konnte [EBFR12].

Eine weitere Methode zur Energiegewinnung an Brückenbauwerken ist die Umwandlung von Solarenergie mit Hilfe von Solarzellen. Die erzeugbare Energiemenge ist jedoch in starkem Maße abhängig von der Sonneneinstrahlung, sodass eine kontinuierliche Versorgung der angeschlossenen Verbraucher nicht immer gewährleistet werden kann. Für größtmögliche Effektivität sollten die Solarzellen an einer stark besonnten Stelle angebracht werden. Befinden sich die zu versorgenden Sensoren in häufig verschatteten Bereichen, so können die an sonnigen Stellen aufgestellten Solarzellen mit Kabeln an die Sensoren angeschlossen werden. Ein Prototyp eines Motes mit integriertem Solarwandler wird z. B. in [RKHF05] vorgestellt.

Datenerfassungsstrategie

Wie bereits in Kapitel 2.3.4 dargestellt, können diskrete oder ereignisbasierte Messdatenerfassungsstrategien verfolgt werden.

Eine zeitdiskrete Strategie eignet sich typischerweise für die Erfassung von Temperatur- und Feuchtedaten, Korrosion und chemischem Angriff [KRGR10]. Die Zeitintervalle, in denen die Messwerterfassung durchgeführt wird, sollten zwecks Energieeinsparung optimiert werden. Anhaltswerte dazu finden sich in [KRGR10].

Das ereignisbasierte Vorgehen wird häufig auch mit „intelligente Messdatenerfassung“ bezeichnet [KRGR10]. Für die Erkennung von Triggersignalen zur Aktivierung des Datenerfassungssystems eignen sich insbesondere MEMS-Sensoren. Messgrößen, die ereignisbasiert erfasst werden sollten, sind z. B. Tragwerksreaktionen in Folge der Beanspruchung durch Verkehr, Wind, Schnee oder Regen sowie Erdbeben und Überflutung, jedoch ebenso kritische Veränderungen der Bauwerksstruktur [KRGR10].

Datenverarbeitung

Die zentrale Aufgabe der Datenverarbeitung ist die Reduzierung der zu übertragenden Datenmenge. Dies kann mittels unterschiedlicher Vorgehensweisen geschehen.

Einfache Vorgehensweisen sind z. B. die Bestimmung von Minimal-, Maximal- oder Mittelwerten der Messdaten innerhalb einer bestimmten Messdauer, sodass anstelle sämtlicher Messdaten nur wenige charakteristische Informationen übertragen werden müssen.

Daneben können Datenkomprimierungsalgorithmen implementiert werden. Diese reduzieren die Menge der erfassten Messdaten, ohne dabei jedoch Informationen aus den Messdaten zu extrahieren. Unterschieden werden verlustfreie und verlustbehaftete Verfahren. Mit verlustbehafteten Verfahren können in der Regel höhere Komprimierungsraten erzielt werden, allerdings müssen bei der Dekomprimierung (Wiederherstellung) der Daten Fehler akzeptiert werden. Auf Grund der hohen Anforderungen an die Genauigkeit und Fehlerfreiheit sollten im Rahmen von Überwachungsmaßnahmen möglichst verlustfreie Verfahren eingesetzt werden [LYNC07].

Die größte Reduktion des Datenumfangs lässt sich durch die Integration komplexer Algorithmen in den Rechenkern der Motes erzielen, welche der Gewinnung von Informationen aus den erfassten Messdaten dienen. In diesem Fall wird das Sensornetz als „intelligentes Sensornetz“ bezeichnet [KRGR10]. Durch eine vor der Datenübertragung durchgeführte Messdatenverarbeitung können Energieeinsparungen von bis zu 99 % erzielt werden [LYNC07]. Integrierbare Analyseverfahren sind z. B. die Fast Fourier-Transformation zur Überführung von Messdaten aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich, die Wavelet-Transformation oder Algorithmen zur Entwicklung von Regressionsmodellen [LYNC07]. In Abhängigkeit von der Komplexität der angewendeten Verfahren werden erhöhte Anforderungen an die Hardware gestellt, die die Leistungsfähigkeit des Prozessors und des Arbeitsspeichers betreffen.

Während bestimmte Informationen aus der isolierten Betrachtung der Messdaten eines einzelnen Sensors gewonnen werden können, müssen z. B. bei der Bestimmung der Eigenformen oder der Erkennung bestimmter Schäden die Messdaten mehrerer Sensoren gleichzeitig untersucht werden. Dazu können Clusterdatenanalysen durchgeführt werden, was die Zusammenfassung der entsprechenden Sensoren zu Sensorclustern erfordert (Bild 47). Nachdem die Messdaten erfasst und in den einzelnen Motes ausgewertet wurden (Sensordatenanalyse), werden diese an einen zentralen Mote übertragen, fusioniert und erneut analysiert (Clusterdatenanalyse). Im Anschluss erfolgt die Übermittlung der Clusterdaten an einen Zentralrechner, der sämtliche Informationen bündelt (Bauwerksdaten) und weitere Untersuchungen vornimmt. Dabei kann die zur Durchführung der

Analysen erforderliche Rechenleistung sehr unterschiedlich sein.

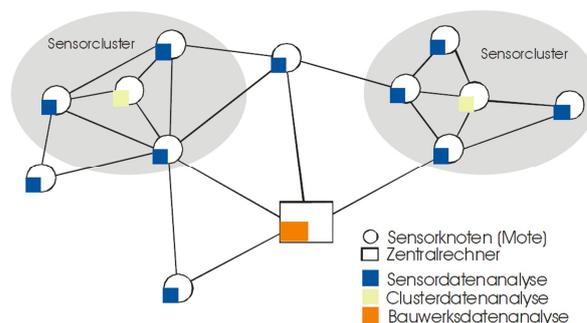


Bild 47: Schema eines Multihop-Sensornetzes mit Clusterbildung [KRGR10]

Eine Schwierigkeit in drahtlosen Sensornetzen ist die zeitliche Synchronisation der Motes bzw. der erfassten Messdaten. Jeder Mote besitzt eine individuelle interne Uhrzeit. Insbesondere bei der Analyse von Schwingungsdaten ist die Synchronität der Messdaten für die fehlerfreie Bestimmung von Eigenfrequenzen und Eigenformen von großer Bedeutung. Die Synchronisation der Daten kann durch Anwendung unterschiedlicher Verfahren erfolgen, z. B. die Reference Broadcast Synchronisation (RBS), das Flooding Time Synchronisationsprotokoll (FTSP) und das Timing-sync Protokoll für Sensornetzwerke (TPSN) [NASP07]. Mit Hilfe von Synchronisationstechniken können die Abweichungen zwischen den Messdaten unterschiedlicher Sensoren auf bis zu weniger als 0,1 ms reduziert werden [LYNC07].

4.2 Intelligente Brückenmodellierung

In diesem Kapitel werden Anforderungen an Konzepte zur intelligenten Modellierung von Brücken im Rahmen eines Systems zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit formuliert. Mit Hilfe dieses Brückenmodells werden die unterschiedlichen bei der Überwachung von Brückenbauwerken auftretenden Daten und Informationen strukturiert, beliebig miteinander verknüpft, vorgehalten und zuverlässigkeitsbasiert bewertet. Zur Unterstützung des Bauwerksbetreibers bei der Analyse der Daten soll das Modell weiterhin selbstständig auf bestimmte kritische Veränderungen in den Daten und Informationen reagieren.

Die Entwicklung einer geeigneten Konzeption zur Modellierung von Brücken basiert auf der Darstellung und Analyse der Ausgangslage, d. h. der bei der Bauwerksüberwachung auftretenden Daten, der Datengruppen und der Abhängigkeiten in den Daten. Im Anschluss wird ein geeigneter Aufbau

des Brückenmodells dargelegt. Neben der Anbindung zuverlässigkeitsbasierter Bewertungsverfahren wird außerdem untersucht, wie sich Berechnungsmodelle (z. B. in Form von Finite-Elemente-Modellen) mit dem Brückenmodell verknüpfen lassen.

4.2.1 Ausgangslage

Datengruppen

Bei der Überwachung von Brückenbauwerken tritt eine Vielzahl unterschiedlicher Datengruppen auf. Die in diesem Zusammenhang wichtigsten Datengruppen sind Bauwerksdaten, Schädigungsdaten und Einwirkungsdaten. Die Bestimmung der Daten kann entweder durch direkte Messung (siehe Kapitel 2.3.1 und 2.3.2) oder durch Identifikation (siehe Kapitel 2.4) erfolgen.

Bauwerksdaten

Vor Beginn der Überwachung einer Brücke sollte eine eingehende Analyse des Bauwerks durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.2). Ziel dieser Analyse ist die Erfassung von Informationen über das Bauwerk („Bauwerksdaten“), d. h. Brückentyp, Anzahl der Überbauten, Anzahl der Felder, Feldlängen, Querschnittsart und -abmessungen, Komponenten des Querschnitts, Beton- und Spannstahlmengen, Spanngliedführung, Materialeigenschaften usw.

Schädigungsdaten

Schädigungsdaten beschreiben am Bauwerk aufgetretene Unregelmäßigkeiten und Schäden. Zur Bestimmung der Schädigungsdaten können die Ergebnisse vorangegangener Bauwerksprüfungen sowie die Resultate objektbezogener Schadensanalysen herangezogen werden. Bei Bedarf lassen sich die vorhandenen Informationen durch die Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren oder vergleichende FE-Simulationen ergänzen.

Es können zwei grundsätzliche Arten von Schädigungsdaten unterschieden werden:

- Schädigungsdaten mit unmittelbarer Auswirkung auf die Geometrie- oder Materialeigenschaften des Bauwerks können durch Modifikation der entsprechenden Bauwerksdaten ausgedrückt werden, z. B. lässt sich eine korrosionsbedingte Abrostung von Betonstahlbewehrung durch Abminderung der entsprechenden Querschnittsfläche modellieren.

- Schädigungsdaten, die keine unmittelbare Auswirkung auf die Bauwerksdaten haben, müssen als zusätzliche Attribute in das Brückenmodell integriert werden. Beispiele für solche Schäden sind Aussinterungen und Feuchstellen.

Einwirkungsdaten

Die Einwirkungsdaten umfassen sämtliche Beanspruchungen des Tragwerks, z. B. Wind- und Verkehrslasten, Temperatureinwirkungen und Angriff durch Chloride.

Abhängigkeiten in den Daten

Die Modellierung von Abhängigkeiten zwischen den Daten erfolgt mit Hilfe von Datenverweisen.

Datenverweise werden u. a. zur Verknüpfung der Daten von physisch miteinander verbundenen Bauteilen eingesetzt. Beispiele sind die Verknüpfung zwischen einer Stütze und ihrem Fundament oder die Verknüpfung zwischen dem Brückenüberbau und den Lagern.

Daneben sind Datenverknüpfungen erforderlich, um eine Beanspruchung eines Bauwerks ausdrücken zu können. Wird z. B. ein Bauteil durch ein Fahrzeug beansprucht, so ist in den Datensatz des Bauteils (Datengruppe „Bauwerksdaten“) ein Verweis auf den Datensatz der Belastung (Datengruppe „Einwirkungsdaten“) einzufügen.

Datenverweise können weiterhin der Modellierung von Schädigungsvorgängen dienen. Beispielsweise lässt sich durch Einfügen einer Verknüpfung zwischen einem Datensatz „Korrosionsaktivität“ und einem Datensatz „Bewehrung“ die Abrostung eines Bewehrungsstabes in Abhängigkeit von der Korrosionsaktivität abbilden.

4.2.2 Objekte und Klassen

Für den Aufbau des intelligenten Brückenmodells bietet sich die objektorientierte Modellierung (OOM) an, welche die Grundkonzepte objektorientierter Programmiersprachen aufgreift.

Objekte eignen sich dazu, zusammengehörige Daten in systematischer und logischer Form zu kapseln. Objekte können weitere Objekte beinhalten, wodurch sich hierarchischen Datenstrukturen aufbauen lassen. Z. B. kann ein Objekt vom Typ „Bauwerk“ ein oder mehrere Objekte des Typs „Teilbauwerk“ (siehe Kapitel 4.2.4) enthalten. Auf diese Weise lassen sich bestimmte Informationen

implizit durch Interpretation der angelegten Objekte gewinnen, z. B. kann die Anzahl der Teilbauwerke eines Bauwerks automatisch ermittelt werden, indem die mit dem Bauwerk-Objekt verknüpften Teilbauwerk-Objekte gezählt werden.

Zur Erstellung eines Objekts ist zunächst die Entwicklung einer objektspezifischen Klasse erforderlich. Eine Klasse repräsentiert den Bauplan für das entsprechende Objekt und muss daher Deklarationen sämtlicher Variablen und Verweise auf weitere mit dem jeweiligen Objekt verknüpfte Objekte enthalten.

4.2.3 Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA)

Auf der objektorientierten Modellierung basiert ebenso der Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA [OKSTRA12]), der die informationstechnische Umsetzung der fachlichen Vorgaben der Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) darstellt. Der OKSTRA ist ein offener Standard zur Beschreibung der Daten von Infrastrukturprojekten.

Im Fachbereich „Bauwerksdaten“ werden die Daten zur Modellierung von Brückenbauwerken zusammengefasst. Die Struktur orientiert sich an der Anweisung Straßeninformationsbank Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING) [ASB-BAUW08]. Das entsprechende Datenschema ist in [POKO99] dargestellt.

Der OKSTRA eignet sich grundsätzlich zur Beschreibung von Brückenbauwerken, muss jedoch zur Modellierung von Brücken im Rahmen einer Bauwerksüberwachung erweitert werden.

4.2.4 Objekthierarchie

Das Objektmodell zur Abbildung von Brückenbauwerken sollte, analog zum OKSTRA, der logischen Strukturierung sämtlicher Datengruppen dienen. Die Grundlage hierfür bildet zunächst die in der Anweisung Straßeninformationsbank Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING) [ASB-BAUW08] definierte Struktur, die jedoch nur wenige Hierarchieebenen umfasst und demnach eine nur vergleichsweise grobe Beschreibung eines Brückenbauwerks erlaubt. Um eine tiefergehende Bauwerksbeschreibung zu ermöglichen, sollte die Struktur des Modells der ASB-ING wie in Bild 48 dargestellt erweitert werden.

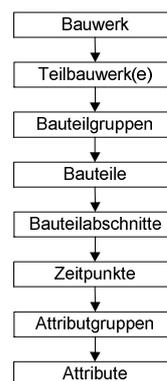


Bild 48: Objekthierarchie von Brückenbauwerken im Rahmen einer Bauwerksüberwachung

Bauwerk

Das Bauwerk beschreibt das gesamte Brückenbauwerk.

Teilbauwerk(e)

Jedes Bauwerk besteht aus mindestens einem Teilbauwerk. Im Falle von Brücken entspricht ein Teilbauwerk jeweils einem Überbau.

Bauteilgruppen

Jedes Teilbauwerk umfasst die in ASB-ING beschriebenen Bauteilgruppen „Überbau“, „Unterbau“, „Vorspannung“, „Gründung“, „Erd-/Felsanker“, „Brückenseile“, „Lager“, „Fahrbahnübergang“, „Abdichtung“, „Beläge“, „Kappen“, „Schutzeinrichtungen“ und „Sonstiges“.

Bauteile

Die Bauteilgruppen sollten weiter in einzelne Bauteile untergliedert werden. Die Bauteilgruppe „Überbau“ einer Hohlkastenbrücke kann sich z. B. zusammensetzen aus der Fahrbahnplatte, dem linken Steg, dem rechten Steg und der Bodenplatte. Die Bauteilgruppe „Unterbau“ kann die Widerlagerwände, Flügelwände, Kammerwände und Auflagerbänke der Widerlager sowie Stützen umfassen.

Bauteilabschnitte

Zur Beschreibung lokaler Bereiche eines Bauteils ist eine Unterteilung der Bauteile in Bauteilabschnitte erforderlich. Stabförmige Bauteile werden

dabei in Längenabschnitte, flächige Bauteile in Flächenabschnitte und ggf. räumliche Bauteile in Volumenabschnitte aufgeteilt. Durch Verkleinerung der Abmessungen der Bauteilabschnitte können beliebig feine Unterteilungen der Bauteile erreicht werden, die wiederum detaillierte Beschreibungen der Bauteileigenschaften ermöglichen.

Zeitpunkte

Um die zeitliche Veränderlichkeit der Daten, z. B. zur Modellierung eines Schädigungsfortschritts oder zur Beschreibung der Tragwerksreaktionen infolge eines sich über das Bauwerk bewegenden Fahrzeugs, berücksichtigen zu können, ist die Einführung einer Zeit-Hierarchieebene notwendig.

Attributgruppen/Attribute

Jedem Zeitpunkt sind die Attribute eines Bauteilabschnitts zugeordnet, die wiederum in Attributgruppen zusammengefasst werden können. Folgende Attributgruppen sollten umgesetzt werden:

- **Eigenschaften**, z. B. Geometrie- oder Materialeigenschaften wie Bauteilstärke, Querschnittsfläche der Bewehrung, Druckfestigkeit oder Elastizitätsmodul,
- **Verhalten**, z. B. Dehnungen oder Verformungen,
- **Schäden**, welche keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Eigenschaften oder das Verhalten des Bauteils ausüben, z. B. Aussinterungen oder oberflächennahe Rissbildung,
- **Einwirkungen**, z. B. Verkehrslasten oder Temperaturbeanspruchungen, die auf einen Bauteilabschnitt einwirken,
- **Sonstige Attribute**, z. B. Bauwerksnummer, Bauwerksname, Teilbauwerksnummer und Baujahr.

4.2.5 Objektmodell

Das Objektmodell basiert auf der zuvor entwickelten Hierarchie. Jede Hierarchieebene wird durch ein oder mehrere Objekte repräsentiert, welche weitere Objekte oder Attribute enthalten. Objektzugehörigkeiten und Abhängigkeiten werden mit Hilfe von Verweisen modelliert. Attribute werden durch numerische Werte oder Zeichenketten ausgedrückt.

In Bild 49 ist beispielhaft ein Objektmodell in Form einer Baumstruktur dargestellt. Jeder grau schattierte Knoten innerhalb der Baumstruktur entspricht einem Objekt, welches ggf. Verweise auf weitere

Objekte enthalten kann. Weiße Knoten kennzeichnen Attribute. Die Darstellungsform ist zur besseren Übersicht an die eines Dateimanagers zur Organisation von Verzeichnissen auf der Festplatte eines Computers angepasst. D. h., die Inhalte (verknüpfte Objekte und Attribute) eines Objekts können durch Erweiterung („Aufklappen“) sichtbar gemacht und durch Minimierung („Einklappen“) verdeckt werden. In Bild 49 sind aufgeklappte Objekte mit einem roten Rahmen gekennzeichnet. Der aufgeklappte Pfad endet bei den Dehnungen bzw. Verformungen des linken Steges im Längenabschnitt zwischen 1 m und 2 m, welche zum Zeitpunkt t_2 gemessen wurden.

Modellierung von Bauteilabhängigkeiten

Durch das Einfügen von Objektverweisen können Abhängigkeiten zwischen einzelnen Teilen des Bauwerks modelliert werden. In Bild 50 ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen den Bauteilen „Mittelstütze 1“ aus der Bauteilgruppe „Unterbau“ und ihrem zugehörigen Fundament „Fundament 4“ aus der Bauteilgruppe „Gründung“ dargestellt. Auf diese Weise können z. B. Setzungsmaße eines Fundamentes sehr einfach auf die Stütze übertragen werden. Weiterhin ist in Bild 50 eine Verknüpfung zwischen dem Bauteil „Mittelstütze 1“ und der Bauteilgruppe „Überbau“ eingefügt, sodass sich die Setzung des Bauteils „Fundament 1“ auch auf den Überbau auswirkt. Durch das Einfügen von Objektverweisen zwischen Bauwerkskomponenten ist die Definition einer beliebig großen Anzahl von Zugehörigkeitsbedingungen möglich.

Modellierung von Schädigungsprozessen

Grundsätzlich können mit Hilfe von Verweisen beliebige Schädigungsprozesse modelliert werden. Die dazu erforderlichen Verknüpfungen zwischen den Objekten des Brückenmodells lassen sich durch Interpretation des zugrunde liegenden Schädigungsmodells bestimmen. Die Modellierung von Schädigungsprozessen soll beispielhaft anhand der Auswirkung eines im Bauteil gemessenen Chloridgehalts und der daraus resultierenden Korrosionsaktivität demonstriert werden. In Bild 51 wurde dazu eine entsprechende Verknüpfung eingefügt.

Ebenso können Objektverweise zur Verknüpfung von Attributen mit unterschiedlichen Zeitstempeln eingesetzt werden. Dies wird am Beispiel einer zeitabhängigen Berechnung der Karbonatisierungstiefe verdeutlicht (siehe Bild 52).

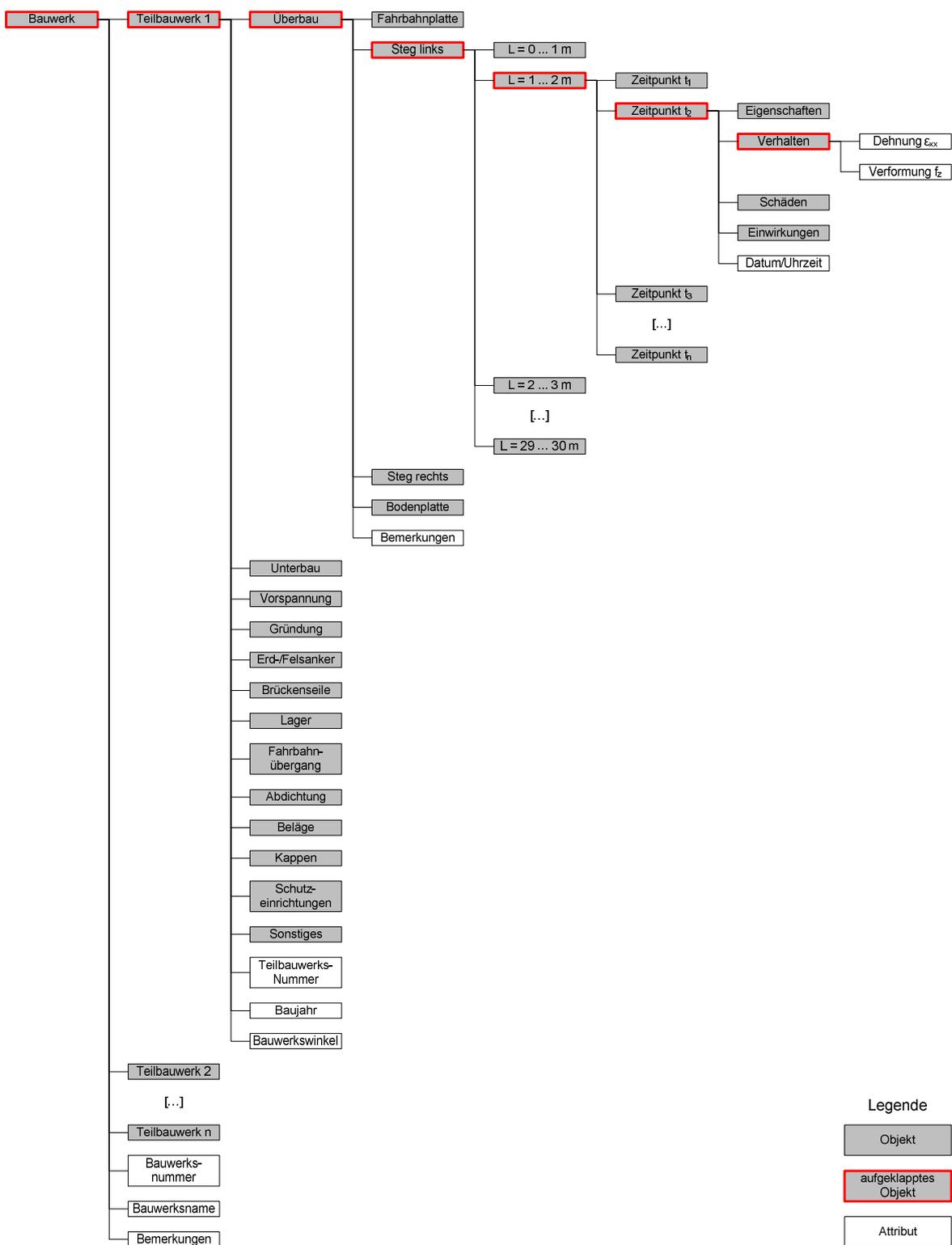


Bild 49: Objektmodell eines Brückenbauwerks im Rahmen einer Bauwerksüberwachung

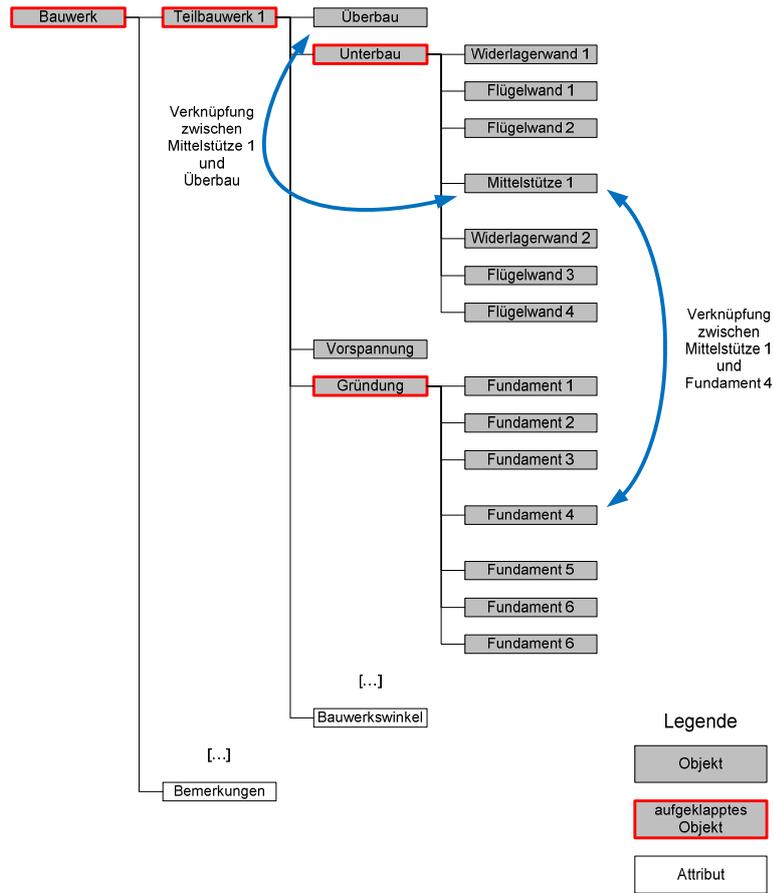


Bild 50: Objektverweise zur Modellierung von Bauteilabhängigkeiten

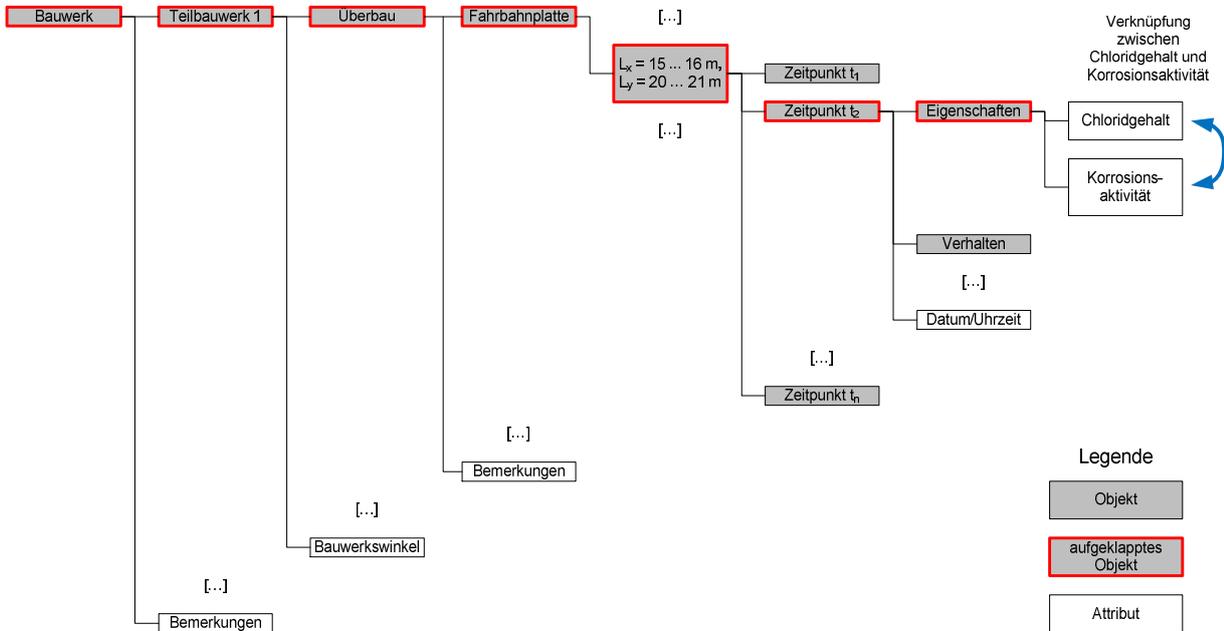


Bild 51: Objektverweis zur Modellierung der Auswirkung eines gemessenen Chloridgehalts und der Korrosionsaktivität

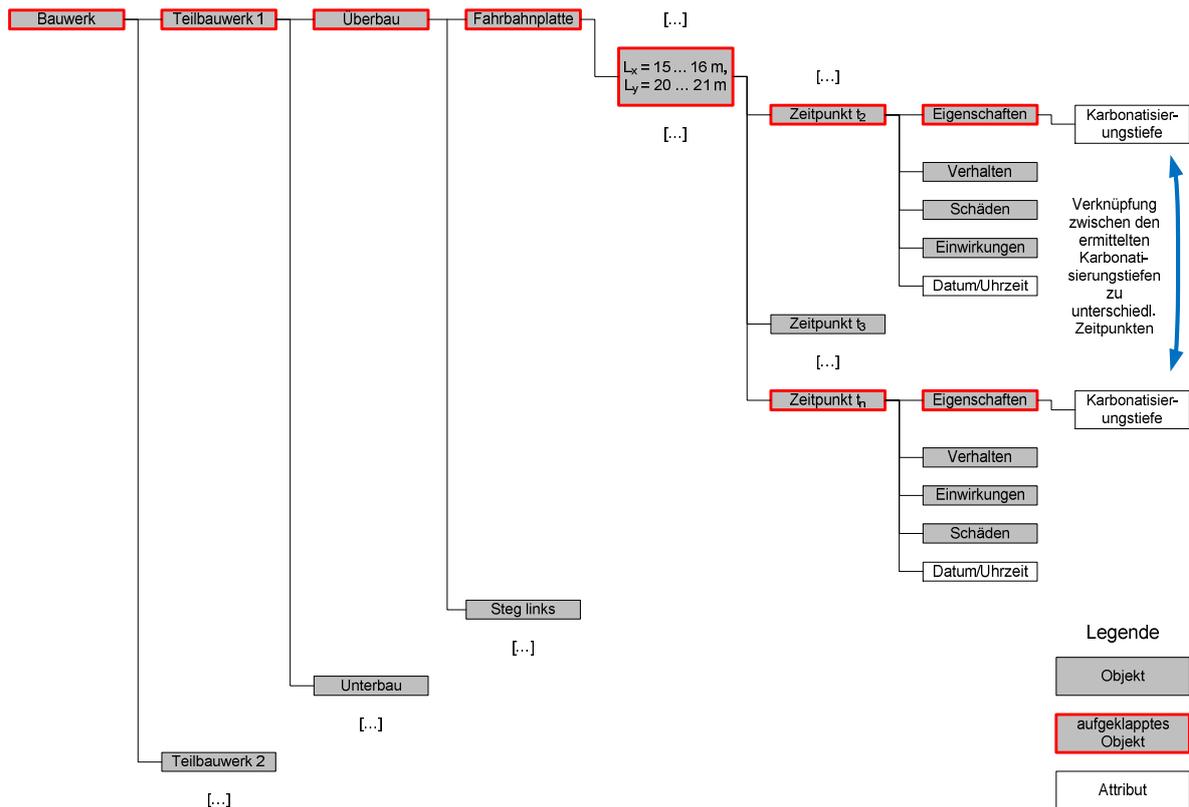


Bild 52: Objektverweis zur Modellierung der Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von der Zeit

4.2.6 Reaktionen

Ein System zur Überwachung von Brückenbauwerken muss selbstständig auf bestimmte Ereignisse reagieren können, z. B. durch automatisiertes Auslösen einer Warnmeldung, falls ein von einem Sensor erfasster Dehnungsmesswert einen kritischen Grenzwert überschreitet. Als weiteres Beispiel sei die ereignisbasierte Messdatenerfassung bei Eintreten eines relevanten Lastereignisses genannt.

Die Detektion von Ereignissen und die darauffolgenden Reaktionen können mit Hilfe von „Beobachtern“ auf Softwarebasis realisiert werden. Ein solcher Beobachter wird mit einem Objekt verknüpft und überwacht permanent den gegenwärtigen Zustand des Objektes. Treten Abweichungen zu vorgegebenen Referenz- oder Grenzzuständen auf, so kann der Beobachter durch Ausführung von Befehlen darauf reagieren. Durch Verknüpfung eines Beobachters mit mehreren Objekten können sämtliche überwachten Objektzustände in das Verhalten des Beobachters mit einbezogen werden.

4.2.7 Verknüpfung zwischen Brückenmodell und einem Finite-Elemente-Modell

In Kapitel 2.4.2 wurde der Einsatz von FE-Modellen zur Schadenserkenkung sowie zur Identifikation von Verkehrslasten erläutert.

Objektverweise können ebenso zur Verknüpfung eines FE-Modells mit dem Brückenmodell eingesetzt werden, sodass zum einen Veränderungen des Brückenmodells auf das FE-Modell übertragen werden können, zum anderen jedoch ebenso der Transfer der im Rahmen eines Model-Updating gewonnenen Erkenntnisse auf das Brückenmodell ermöglicht wird. Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit einer offenen Schnittstelle zur verwendeten FE-Software.

In Bild 53 ist beispielhaft eine Verknüpfung eines Lager-Objektes des Brückenmodells mit dem entsprechenden Auflager des FE-Modells dargestellt. Wird z. B. im Zuge der Bauwerksüberwachung festgestellt, dass ein ursprünglich horizontal verschiebliches Brückenlager in Folge eines Schadens keine Verschiebungen mehr zulässt, so kann eine Übertragung des Schadens auf das FE-Modell durch Einführung einer zusätzlichen horizontalen Auflagerbedingung an der entsprechenden Stelle stattfinden.

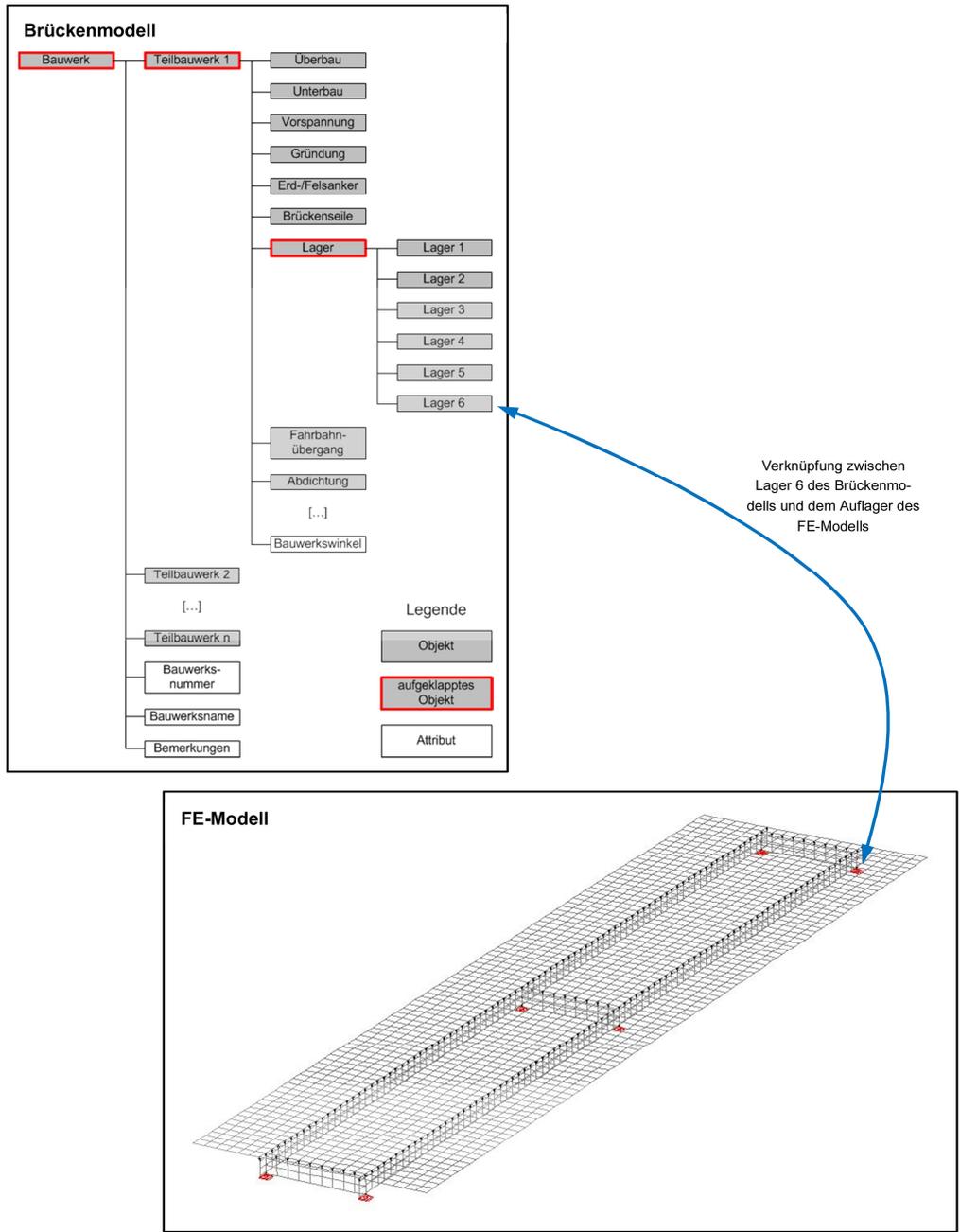


Bild 53: Verknüpfung zwischen Brückenmodell und FE-Modell

4.2.8 Intelligente Bewertungsverfahren

Die Aufgabe der intelligenten Bewertung besteht in der Bestimmung des derzeitigen und zukünftigen Zustands des Brückenbauwerks. Grundlage bilden die im Brückenmodell enthaltenen gemessenen bzw. identifizierten Bauwerks-, Schädigungs- und Einwirkungsparameter. In Folge der Unsicherheiten in den Bauwerks- und Einwirkungsparametern erfolgt die Bewertung auf Grundlage probabilistischer Konzepte. Nach der Bestimmung der Zuverlässigkeiten der einzelnen Bauwerksteile (Komponenten) wird die Zuverlässigkeit des Gesamttragwerks (Systemzuverlässigkeit) ermittelt. Dazu sind

die Komponenten mit Hilfe eines Systemmodells zu verknüpfen, welches der Modellierung von Auswirkungen eines Komponentenversagens auf die Systemzuverlässigkeit dient. Die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit kann nach dem in Bild 54 dargestellten Ablauf erfolgen. Erläuterungen zu den einzelnen Schritte erfolgen im Anschluss.



Bild 54: Ablauf einer Systemzuverlässigkeitsanalyse nach [NABL07]

Systemanalyse

Ziel der Systemanalyse ist die Untersuchung des Zusammenwirkens der Systemkomponenten untereinander [MUEL10]. Hierzu werden sämtliche Komponenten, aus denen das System besteht, ermittelt, untergliedert und entsprechend ihrer Zusammengehörigkeit und ihrer Wechselwirkungen miteinander verbunden.

Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse

Bei der qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse werden die Systemkomponenten hinsichtlich ihrer Versagensmöglichkeiten untersucht und der Einfluss eines Komponentensversagens auf die Funktionalität des Systems bewertet [NABL07]. In der Industrie haben sich dabei insbesondere die Ausfalleffektanalyse und die Fehlerbaumanalyse durchgesetzt [PICK09].

Ausfalleffektanalyse

Die Ausfalleffektanalyse (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) ist ein systematisches Vorgehen zur Analyse eines Systems, um mögliche Fehlzustandsarten, ihre Ursachen und ihre Auswirkungen auf das Systemverhalten zu ermitteln [DINEN-60812]. Das grundlegende Ziel ist die Identifikation potentieller Schwachstellen, die durch das Zusammenwirken der Komponenten in komplexen Systemen entstehen können [PICK09]. Dabei wird ein induktives (d. h. von einer niedrigeren zu einer höheren Systemebene gerichtetes) Vorgehen verfolgt. Eine FMEA dient unter anderem der Feststellung aller unerwünschten Auswirkungen innerhalb eines Systems und der Ereignisfolgen, die durch jede erkannte Ausfallart einer Einheit auf verschiedenen Ebenen der Funktionshierarchie eines Systems ausgelöst wurden, sowie der Entwicklung eines Instandhaltungskonzeptes, um die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen zu verringern [DINEN60812]. Eine Ausfalleffektanalyse liefert für eine anschließende Fehlerbaumanalyse wichtige Vorabinformationen über Ausfallarten und Ausfalleffekte [WERN04].

Eine Ausfalleffektanalyse basiert auf der Systemanalyse einer Struktur. Nach der Systemanalyse wird anhand einer Funktionsanalyse die Funktionsstruktur bestimmt. Dabei werden die einzelnen Systemelemente logisch miteinander verbunden (z. B. mit Hilfe von UND- oder ODER-Verknüpfungen) [PICK09]. Die Darstellung der Funktionsstruktur erfolgt in einem Blockschaltbild (BSB). Unterschieden werden Serien- und Parallelstrukturen sowie kombinierte Strukturen (siehe auch Bild 55).

Bei einer Serienstruktur führt der Ausfall einer einzelnen Komponente zum Ausfall des gesamten Systems. Bei Parallel- und Mischstrukturen sind dagegen Redundanzen, d. h. alternative Pfade, vorhanden. Abschließend wird eine Bewertung der Risiken für die definierten möglichen Fehlerursachen durchgeführt, bei der auf Grund der Fehlersehvere, der Auftretenswahrscheinlichkeit und der Entdeckungswahrscheinlichkeit die Risikoprioritätszahlen der Fehlerursachen (RPZ) bestimmt werden [PICK09]. Die Risikoprioritätszahlen wiederum bilden die Basis für eine mögliche Optimierung des Systems.

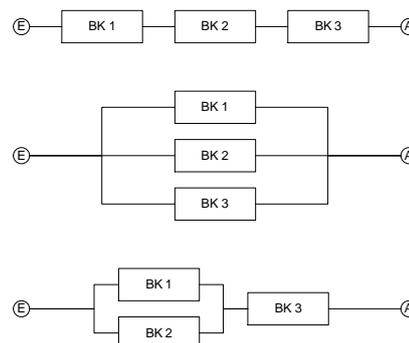


Bild 55: Grundstrukturen von Zuverlässigkeitsschaltbildern als Blockschaltbild (oben: Serienstruktur; Mitte: Parallelstruktur; unten: Mischstruktur; Abkürzungen: BK – Bauelementkomponente, E – Eingang, A – Ausgang)

Das Ergebnis einer Ausfalleffektanalyse am Beispiel einer korrodierten Spannbewehrung ist in Bild 56 dargestellt.

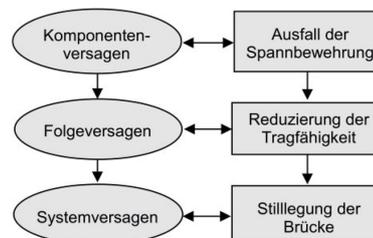


Bild 56: Ausfalleffektanalyse am Beispiel einer korrodierten Spannbewehrung [MUVO11]

Fehlerbaumanalyse

Bei einer Fehlerbaumanalyse (Failure Tree Analysis, FTA) werden Bedingungen und Einflussgrößen, die zum Auftreten oder potentiell möglichen Auftreten eines festgelegten Hauptereignisses führen oder dazu beitragen können, aufgezeigt und untersucht [DINEN61025]. Dabei werden erkannte Bedingungen und Einflussgrößen wiederum zu Hauptereignissen erklärt, d. h. es wird deduktiv (von einer höheren zu einer niedrigeren Systemebene) vorgegangen. Die Fehlerbaumanalyse wird so lange fortgeführt, bis ausschließlich elementare Ursachen identifiziert werden konnten

[WERN04], welche keiner weiteren Untersuchung bedürfen. Das Ergebnis der Analyse wird als Fehlerbaum dargestellt. Dabei stehen verschiedene Symbole zur Kennzeichnung von Ereignissen („Events“) und logischen Verknüpfungen (logische Tore, „Gates“) zur Verfügung. Einige gebräuchliche Symbole sind in Bild 57 dargestellt. Für eine vollständige Übersicht sämtlicher verfügbarer Symbole wird auf [DINEN61025], Anhang A, verwiesen. Wie bei der Ausfalleffektanalyse können auch bei der Fehlerbaumanalyse durch Verwendung der entsprechenden logischen Tore Serien- und Parallelstrukturen sowie kombinierte Strukturen modelliert werden. Die Besonderheit der Fehlerbaumanalyse liegt darin, dass sie auch zur quantitativen Beschreibung der Zuverlässigkeit eingesetzt werden kann, wobei die logischen Tore zur Berechnung etwa von Systemverfügbarkeiten genutzt werden [PICK09].

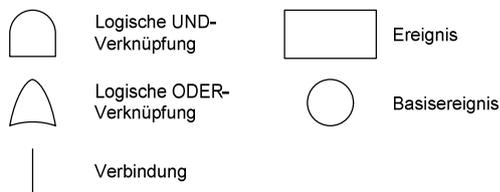


Bild 57: Häufige Symbole in Fehlerbäumen

Bild 58 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Fehlerbaumanalyse zum Versagen einer Bewehrung in Folge karbonatisierungs- und chloridinduzierter Korrosion.

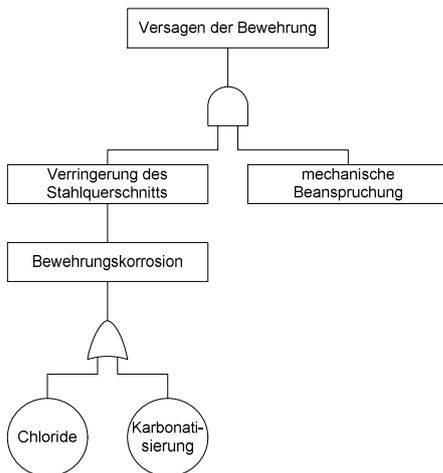


Bild 58: Fehlerbaumanalyse am Beispiel einer karbonatisierungs- und chloridinduzierten Bewehrungskorrosion (nach [MUVO11])

Quantitative Zuverlässigkeitsanalyse

Bei der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse wird das Ausfallverhalten der bei der vorausgegangenen qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse erkannten kritischen Systemelemente bestimmt und darauf

aufbauend Rückschlüsse auf das Ausfallverhalten des Systems gezogen [NABL07]. Dies erfolgt unter Einsatz von Methoden der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie [PICK09] (siehe auch Kapitel 2.5, Bewertungsstufen 4 und 5).

Um die komplexen Einflüsse von Schäden auf die Systemzuverlässigkeit von Brückenbauwerken im Rahmen einer Schadensbewertung abbilden zu können, ist bei einer „intelligenten Brücke“ die Durchführung quantitativer Zuverlässigkeitsanalysen unumgänglich. Dabei ist es notwendig, anstelle der Boole'schen Logik ein flexibleres Konzept zur Verknüpfung der Systemelemente untereinander zu implementieren, welches die Durchführung zuverlässigkeitsbasierter Betrachtungen ermöglicht. Ein Ansatz, der sich insbesondere hierzu eignet, ist der im Rahmen des Teilprojekts „Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse“ des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ entwickelte auf dem Konzept des Fehlerbaums basierende Einflussbaum. Für Einzelheiten zu diesem Konzept wird auf [BFDW13] verwiesen.

Umsetzung innerhalb des Brückenmodells

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, inwiefern sich Zuverlässigkeitsanalysen unter Verwendung des Brückenmodells durchführen lassen. Grundvoraussetzung ist zunächst die Zerlegung des Bauwerks in sämtliche Bestandteile, sodass diese entsprechend ihrer Zusammengehörigkeit und ihrer Wechselwirkungen miteinander verknüpft werden können (siehe Abschnitt „Systemanalyse“).

Das in diesem Kapitel vorgestellte Brückenmodell basiert auf einer Untergliederung des Bauwerks (bzw. des Teilbauwerks) in Bauteilgruppen, Bauteile und Bauteilabschnitte (vgl. Bild 49). Verknüpfungen zwischen den einzelnen Komponenten werden durch den Einsatz von Verweisen realisiert (vgl. Bild 50). Das Brückenmodell erfüllt daher die Grundvoraussetzung für die Durchführung einer Zuverlässigkeitsanalyse.

Zur Modellierung von Blockschaltbildern (Ausfalleffektanalyse) und Fehlerbäumen anhand des Brückenmodells müssen logische Verknüpfungen zwischen bestimmten Ereignissen eingefügt werden können. Ereignisse können durch Veränderungen in den Bauwerks-, Schädigungs- oder Einwirkungsdaten identifiziert bzw. ausgelöst werden. Beispielsweise tritt ein Ereignis „Korrosion“ dann auf, wenn ein entsprechender Sensor eine Korrosionsaktivität meldet. Weiterhin kann eine querschnittsmindernde Auswirkung auf den Bewehrungsstahl in Folge eines Ereignisses „Korrosion“

durch Reduzierung der Querschnittsfläche der Bewehrung umgesetzt werden.

Die Ergebnisse einer quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse lassen sich in Form eines leicht zu interpretierenden Ampelsystems darstellen. Ein solches Ampelsystem lässt sich zu jeder Zeit für jede beliebige Systemkomponente umsetzen (Bauteilabschnitt, Bauteil, Bauteilgruppe, Teilbauwerk, Bauwerk). Dazu müssen für jede Systemkomponente akzeptable (grünes Ampelsymbol), kritische (gelbes Ampelsymbol) oder inakzeptable Zustände (rotes Ampelsymbol) definiert werden. In Abhängigkeit von den Ergebnissen der Zuverlässigkeitsanalyse ändern die betroffenen Ampeln automa-

tisch ihren Zustand, wodurch der Bauwerksbetreiber visuell über aufgetretene Probleme informiert werden kann. Bild 59 verdeutlicht beispielhaft die Übertragung des in Bild 58 dargestellten Fehlerbaums auf das Brückenmodell. Darin wurden für alle Komponenten Ampelsysteme zur Visualisierung der Ergebnisse aus der Zuverlässigkeitsanalyse implementiert. Durch das Ereignis „Versagen der Bewehrung“ wurde das Ampelsymbol des Abschnitts der unteren Bewehrung auf „rot“ geändert, d. h. der Zustand der Bewehrung ist „inakzeptabel“. In Folge dessen wurden die Zustände der unteren Bewehrung der Fahrbahnplatte sowie des Teilbauwerks als „kritisch“ eingestuft.

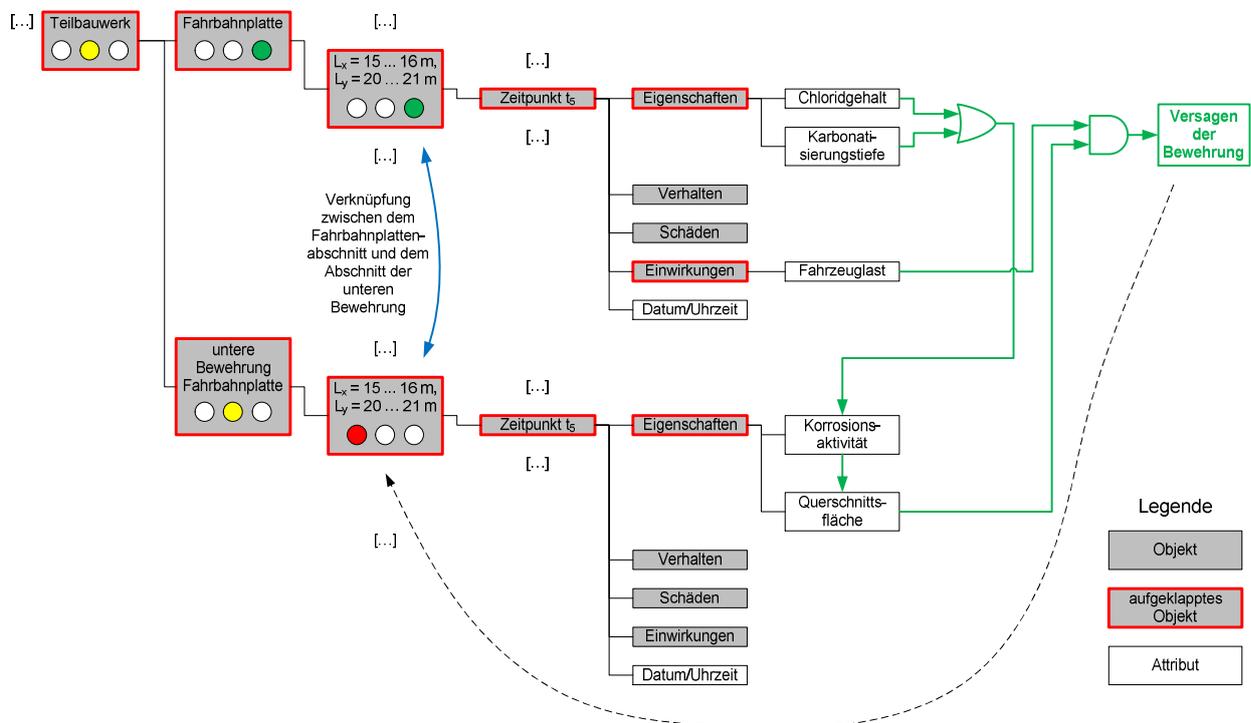


Bild 59: Übertragung des in Bild 58 dargestellten Fehlerbaums auf das Brückenmodell (zum besseren Verständnis wurden logische Verknüpfungen mit Pfeilen anstelle von Linien eingefügt)

4.3 Erhaltungsmanagement von Brückenbauwerken

Bei der Planung und Umsetzung von Erhaltungsmaßnahmen wird grundsätzlich unterschieden zwischen der Erhaltung auf Objektebene und der Erhaltung auf Netzebene. Die Erhaltung auf Objektebene (d. h. des einzelnen Brückenbauwerks) basiert zunächst auf der Erfassung des Bauwerkszustands, wobei die Bauwerksprüfungen gemäß DIN 1076 eine wesentliche Rolle spielen. Zur Er-

haltung der gesamten Verkehrsinfrastruktur, also des Verbundes sämtlicher Bauwerke innerhalb des Straßennetzes, ist die isolierte Betrachtung eines einzelnen Objektes jedoch nicht ausreichend. Stattdessen sind sämtliche Objekte innerhalb des Netzes gleichzeitig zu untersuchen. Um dabei nicht nur gegenwärtige Einwirkungen und Widerstände, sondern auch zukünftige Entwicklungen berücksichtigen zu können, werden entsprechende Prognosemodelle eingebunden.

Bauwerksdatenbank

Die Grundlage für die Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken bilden detaillierte und zuverlässige Informationen zum Bestand und Zustand der Bauwerke [HAGP04], welche in den Bauwerksdatenbanken der Länder sowie der zentralen Bauwerksdatenbank des Bundes vorgehalten werden (siehe Bild 44). Diese Bauwerksdaten werden anhand der im Rahmen der Bauwerksprüfungen gewonnenen Erkenntnisse von den Straßenbauverwaltungen der Länder aktualisiert. Zweimalig pro Jahr übertragen die Länderverwaltungen die aktualisierten Bauwerksdaten an den Bund, woraufhin die zentrale Bauwerksdatenbank fortgeschrieben wird [BMVBS-BASTxx].

Die Grundstruktur der Bauwerksdaten ist in der Straßeninformationsbank (ASB-ING), Teilsystem Bauwerksdaten, festgelegt [ASB-BAUW08].

SIB-Bauwerke

Um den Einsatz der EDV bei der Erfassung, Aktualisierung und Verwaltung der Bauwerksdaten zu ermöglichen, wurde von Bund und Ländern das Programmsystem „SIB-Bauwerke“ (SIB = StraßenInformationsBank) entwickelt [SIB-BW12] und im Jahr 1998 eingeführt. SIB-Bauwerke ist eng an die Festlegungen der ASB-ING geknüpft und existiert in zwei Ausbaustufen: Die Ausbaustufe „Erfassungsprogramm“ wird von den Bauwerksprüfern eingesetzt und dient der Eingabe und Aktualisierung von Bauwerksdaten sowie der Ausgabe von Prüfberichten und Bauwerksbüchern nach DIN 1076; die Ausbaustufe „Verwaltungsprogramm“ wird von den Straßenbauverwaltungen genutzt und ermöglicht zudem die Durchführung von Auswertungen [HAAR03].

Bauwerksprüfung

Zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Jahr 1988 die gleichnamige Richtlinie (RI-EBW-PRÜF) eingeführt, die zuletzt im Jahr 2007 überarbeitet wurde [RI-EBW-PRÜF07]. Gemeinsam mit der ersten Fortschreibung im Jahr 1994 erfolgte die Entwicklung des Programmsystems „BW-PRUF“ zur Unterstützung der Bauwerksprüfung [HAGP04]. Später wurde die RI-EBW-PRÜF in SIB-Bauwerke integriert.

Der Prozess der Bauwerksprüfung unter Verwendung von SIB-Bauwerke läuft wie folgt ab: Vor ei-

ner Prüfung übermittelt die zuständige Straßenbauverwaltung dem Bauwerksprüfer den Bauwerksdatensatz des zu untersuchenden Bauwerks. Werden bei der im Anschluss durchgeführten Bauwerksprüfung neue bzw. noch nicht registrierte Bauwerksschäden festgestellt, so werden diese mit Hilfe von SIB-Bauwerke aufgenommen und gemäß RI-EBW-PRÜF hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) mit Noten von 1 bis 4 bewertet. Hierzu wurde in SIB-Bauwerke ein umfangreicher Beispielkatalog für typische Schäden und deren Bewertung hinterlegt [NAUM04]. Nach Aufnahme und Bewertung sämtlicher Einzelschäden ermittelt SIB-Bauwerke unter Anwendung des Algorithmus aus [HAAR99] die Zustandsnote für das Bauwerk bzw. Teilbauwerk. Abschließend erfolgt die Übermittlung der aktualisierten Bauwerksdaten an die jeweilige Straßenbauverwaltung.

Bauwerks-Management-System (BMS)

Das Bauwerks-Management-System (BMS) ist ein Instrument, welches die Straßenbauverwaltungen der Länder bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen und das BMVBS bei der Realisierung übergeordneter Ziele und Strategien unterstützt [HAGP04]. Das BMS besteht aus vier Modulen:

- **Modul BMS-MV:** Das Modul BMS-MV („Maßnahmevarianten“) dient der Entwicklung von Erhaltungsmaßnahmen auf der Grundlage von Bauwerks-, Schadens- und Zustandsdaten [GWNE11].
- **Modul BMS-MB:** Im Modul BMS-MB („Maßnahmenbewertung“) werden die mit dem Modul BMS-MV entwickelten und aufgezeigten möglichen Maßnahmevarianten auf Objektebene bewertet [GWNE11] und hinsichtlich ihrer Dringlichkeit gereiht [HAGP04].
- **Modul BMS-EP:** Mit Hilfe des Moduls BMS-EP („Erhaltungsplanung“) erfolgt die Optimierung der Erhaltungsplanung auf Netzebene [HAGP04].
- **Modul BMS-SB:** Das Modul BMS-SB ermöglicht die Bewertung von Erhaltungsstrategien hinsichtlich der Konsequenzen auf den prognostizierten Zustand einer großen Zahl von Bauwerken sowie der finanziellen Auswirkungen [HAGP04].

Netzdatenbank

Netzdatenbanken – am Beispiel der Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen (NWSIB) [NWSIB13] – dienen der Auswertung und Pflege der Daten für die Straßen des überörtlichen Verkehrs

und werden darüber hinaus zur Bereitstellung von Basisinformationen für Anwendungen mit Straßenbezug eingesetzt. Die NWSIB besteht aus

- der Komponente „Netz“ (basierend auf der Anweisung Straßeninformationsbank Teilsystem Netzdaten (ASB-ING) [ASB-NETZ11]), welche Informationen über Straßennetz, Verwaltungsaspekte, straßenrechtliche Sachverhalte sowie verkehrliche Perspektiven enthält, und
- der Komponente „Bestand“ (basierend auf der Anweisung Straßeninformationsbank Teilsystem Bestandsdaten (ASB-ING) [ASB-BEST11]), welche die Straße einschließlich ihrer Querschnittsabmessungen, stofflichen Bestandteile, Verknüpfungspunkte, Ausstattung und Einrichtungen im Straßenumfeld beschreibt.

Die Netzdaten sind insbesondere zur Erhaltungsplanung und Strategiebewertung auf Netzebene erforderlich.

Prognosemodelle

Prognosemodelle dienen der Voraussage zukünftiger Veränderungen auf Einwirkungs- und Widerstandsseite, z. B. die Entwicklung des Schwerverkehrs oder die Auswirkung eines sich ausbreitenden Schadens auf den Bauwerkszustand. Grundsätzlich können hierzu deterministische und stochastische Modelle herangezogen werden [HAAR03]. Um das Ziel eines zuverlässigkeitsorientierten Erhaltungsmanagements zu erreichen, ist der Einsatz probabilistischer (stochastischer) Modelle zur Beschreibung der Streuungen in den Einwirkungs- und Widerstandsgrößen erforderlich [HAAR10].

Die Prognosemodelle werden in entsprechenden Datenbanken hinterlegt und dem BMS bei der Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt.

4.4 Schnittstellen

Die automatisierte Übertragung von Informationen und Daten zwischen dem System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke und den Bausteinen des Erhaltungsmanagements erfordert die Einführung entsprechender Schnittstellen. Diese Schnittstellen sind ebenfalls in Bild 44 dargestellt.

Schnittstelle zwischen Brückenmodell und Bauwerksdatenbank

Mit Hilfe einer Schnittstelle zwischen dem Brückenmodell und der Bauwerksdatenbank können mögliche während der Bauwerksüberwachung erkannte Schadensinformationen sowie daraus resultierende objektbezogene Versagenswahrscheinlichkeiten (bzw. Zuverlässigkeiten) automatisch in die Bauwerksdatenbank übertragen und dort als Basis für die Erhaltungsplanung vorgehalten werden. Um eine solche Schnittstelle zu ermöglichen, ist die Struktur der in der Datenbank abgelegten Bauwerksdaten um die entsprechenden zu übertragenden Informationen zu erweitern (siehe hierzu auch Kapitel 4.2).

Schnittstelle zwischen Brückenmodell und Datenbank „Prognosemodelle“

Die Schnittstelle zwischen dem Brückenmodell und der Datenbank, die die Prognosemodelle für die langfristige Analyse von Erhaltungsstrategien beinhaltet, kann zur Aktualisierung (Kalibrierung) der Prognosemodelle auf Grundlage der an verschiedenen Brückenbauwerken gewonnenen Informationen genutzt werden. So lassen sich z. B. Prognosen zur Entwicklung des Schwerverkehrs direkt mit den an den Bauwerken gemessenen bzw. identifizierten Verkehrslasten vergleichen und ggf. Korrekturen der Voraussagen vornehmen. Ebenso können aus der Bauwerksüberwachung resultierende neue Erkenntnisse zur Beschreibung von Schädigungsprozessen in die entsprechende Datenbank übertragen werden, wodurch sich die Genauigkeit der Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen steigern lässt.

5 Machbarkeitsstudie / Anwendungsanalyse

5.1 Anwendungsanalyse

Im Rahmen einer Anwendungsanalyse wird dargestellt, wie sich die am häufigsten an Brückenbauwerken auftretenden Schäden durch den Einsatz von Überwachungssystemen erkennen lassen, und welche Überwachungskonzepte sich dazu besonders eignen.

5.1.1 Entwicklung geeigneter bauwerksspezifischer Überwachungskonzepte

Die Umsetzbarkeit von Überwachungssystemen wird beeinflusst von den relevanten Schäden, die mit Hilfe des Systems erkannt bzw. überwacht werden sollen. Die Schäden wiederum sind unter anderem abhängig von der Konstruktionsweise und dem Bautyp der jeweiligen Brücke.

Ausführliche Untersuchungen von häufig bei Betonbrücken auftretenden Schäden – ausgewertet nach Bauwerksart (Hohlkasten-, Plattenbalken-, Plattenbrücke und sonstige Brücken), verwendetem Baustoff, Baujahr und den einzelnen Bauteilgruppen (Überbau, Unterbau, Lager, Ausrüstung) – wurden im Rahmen des Teilprojekts „Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton“ [SCPM13] durchgeführt, welches dem Themenschwerpunkt „Intelligente Bauwerke“ der BAST untergeordnet ist. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden dabei in Form eines Handbuchs aufgearbeitet, sodass die für das zu überwachende Bauwerk relevanten Schäden einschließlich der zu ihrer Erkennung zu messenden Parameter in Abhängigkeit von der Bauwerksart, dem Baustoff und dem Baujahr unmittelbar abgelesen werden können. Die Auswirkungen der relevanten Schäden auf die Eigenschaften bzw. das Tragverhalten des Brückenbauwerks bilden die Grundlage für die Entwicklung des Überwachungskonzepts (Bild 60).

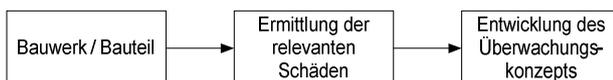


Bild 60: Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Überwachungskonzepts

Der Einsatz von Überwachungssystemen ist nicht allein auf die Schadenserkenkung beschränkt. Beispielsweise kann die Überwachung von Brücken mit kurz- oder langfristig nur schwer prognostizierbarem Verhalten wertvolle Informationen liefern, um die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit zu verifizieren, Erfahrungen im Umgang mit neuartigen Bauweisen zu sammeln und Entwurfgrundsätze weiterzuentwickeln. Dies betrifft vor allem Bauwerke, die unter Einsatz neuartiger Baustoffe bzw. der Anwendung innovativer Konstruktionsprinzipien errichtet wurden, oder solche mit besonders anspruchsvollen sowie stark ausgenutzten Tragwerken.

5.1.2 Übersicht häufig auftretender Schäden bei Brückenbauwerken aus Beton

Im Folgenden werden die im Teilprojekt „Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton“ des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ herausgearbeiteten häufig an den einzelnen Bauteilgruppen von Betonbrücken auftretenden Schäden zusammengefasst [SCPM13]:

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

5.1.3 Konzepte zur Identifikation und Überwachung von häufig bei Betonbrücken auftretenden Schäden

Die in Kapitel 5.1.2 aufgeführten häufig auftretenden Schäden lassen sich grundsätzlich mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Konzepte erkennen bzw. überwachen.

Überbau

Rissbildung

Im Folgenden wird explizit zwischen der *Identifikation* von neu aufgetretenen Rissen und der *Überwachung* von bereits vorhandenen Rissen unterschieden.

Die *Identifikation* gerissener Bereiche kann mit Hilfe eines globalen Überwachungskonzepts durchgeführt werden (vgl. Kapitel 2.4.2). Dazu müssen die Bauwerksreaktionen jedoch ausreichend von der Rissbildung beeinflusst werden (ausgeprägte tiefe Risse, siehe auch Bild 62). Bei Spannbetonbauwerken können sich durch kurzzeitige Beanspruchungen entstandene Risse nach dem Entfernen dieser Beanspruchung in Folge der Vorspannkraft wieder schließen (atmende Risse). Derartige Risse beeinflussen die dynamischen Eigenschaften des Bauwerks nur äußerst gering-

fällig, weshalb sie mit schwingungsbasierten Methoden nur eingeschränkt identifiziert werden können. In [UNTD06] wird beispielsweise über ein schwingungsbasiertes Verfahren zur Erkennung, Lokalisation und Quantifizierung von Rissen an einem Spannbetonträger berichtet. Dabei wurden durch das Aufbringen statischer Kräfte mit stufenweise zunehmender Amplitude verschiedene Risszustände in den Träger eingeprägt. Nach dem Aufbringen der einzelnen Laststufen wurden die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Trägers bestimmt und zur Identifikation des Verlaufs der Biegesteifigkeit entlang der Trägerachse herangezogen. Es wurde festgestellt, dass eingeprägte Risse erst dann lokalisiert und quantifiziert werden konnten, wenn die Belastung, die die Risse verursachte, etwa 80 % der Versagenslast beträgt.

Die *Überwachung* von gerissenen Bereichen, Einzelrissen (z. B. Koppelfugenrisse) oder oberflächennahen Rissen kann mit Hilfe eines lokalen Überwachungsansatzes erfolgen (vgl. Kapitel 2.4.3). Die Beurteilung aufgetretener Risse geschieht durch die Analyse der aufgezeichneten Messgrößen mit entsprechenden Modellen, welche ebenso der zuverlässigkeitsbasierten Bewertung der Ergebnisse dienen können.

Schäden in Folge Korrosion

Die Korrosion der Bewehrung stellt bei Stahlbeton- und Spannbetonbrücken den bedeutendsten Schadenstyp dar [SCPM13]. Insbesondere die Korrosion in Folge von Chlorideintrag verursacht ca. 66 % aller Schäden an Brücken [DSSG08]. Typische Folgen von Bewehrungskorrosion sind Abplatzungen und freiliegende Bewehrung.

Korrosion von Bewehrungsstahl kann weitreichende Konsequenzen nach sich ziehen: (1) Die bei der Korrosion entstehenden Korrosionsprodukte besitzen ein um den Faktor 2 bis 6 größeres Volumen als das Ausgangsprodukt, was zu einer Sprengwirkung mit lokaler Rissbildung und Betonabplatzungen führt. (2) Durch die Korrosion kommt es zu einem Abtrag des Bewehrungsquerschnitts, woraus sich langfristig eine mit starker Rissbildung einhergehende Abminderung der Steifigkeit sowie der Tragfähigkeit des Bauteils bis hin zum Versagen ergeben kann. Die Ursachen und Folgen von Bewehrungskorrosion sind in Bild 61 dargestellt.

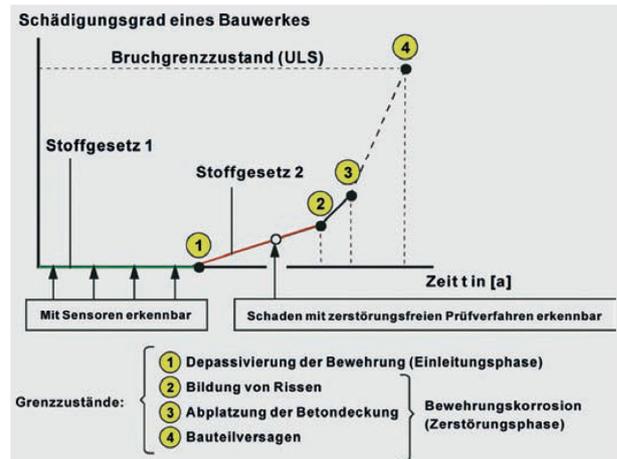


Bild 61: Zeitlicher Verlauf der Schädigung in Folge von Bewehrungskorrosion [DSSG08]

Der Prozess der Bewehrungskorrosion wird begünstigt durch:

- Risse,
- Hohlstellen und Kiesnester,
- Poren und Fehlstellen,
- Abwitterung, z. B. in Folge von Frost-Tau-Beanspruchung.

Zur Überwachung des Korrosionsprozesses der Bewehrung sind die folgenden Ansätze denkbar (siehe auch Bild 62):

Durch die Messung der Feuchtigkeit im Bauteil kann überwacht werden, ob bzw. wann eine der Grundvoraussetzungen für die Bewehrungskorrosion erfüllt ist. Dabei sollten vorwiegend gefährdete Bauwerksbereiche mit entsprechenden Sensoren (z. B. Multiring-Elektroden) ausgestattet werden. Die erfassten Messdaten können anhand eines lokalen Ansatzes überwacht werden, indem sie z. B. mit zulässigen maximalen Grenzwerten verglichen werden.

Der Einbau z. B. von Anodenleitern kann direkt Aufschluss geben über eine mögliche Korrosionsaktivität innerhalb des Betons. Die Einbauorte sind durch eine entsprechende Schwachstellenanalyse des Bauwerks zu bestimmen. Auch zur Korrosionsüberwachung bietet sich ein lokaler Überwachungsansatz an, der auf der Ausgabe von Warnmeldungen bei Erreichen einer bedenklichen Korrosionsaktivität basiert.

In Fällen, in denen eine durch Korrosion bedingte deutliche Reduzierung der Querschnittsfläche der Bewehrung mit daraus resultierender Zunahme der Rissbildung eingetreten ist, können globale Überwachungsverfahren eingesetzt werden, die der Erkennung, Lokalisation und Quantifizierung der gerissenen Bereiche dienen. Hierzu wird auf den vorhergehenden Abschnitt „Rissbildung“ verwiesen.

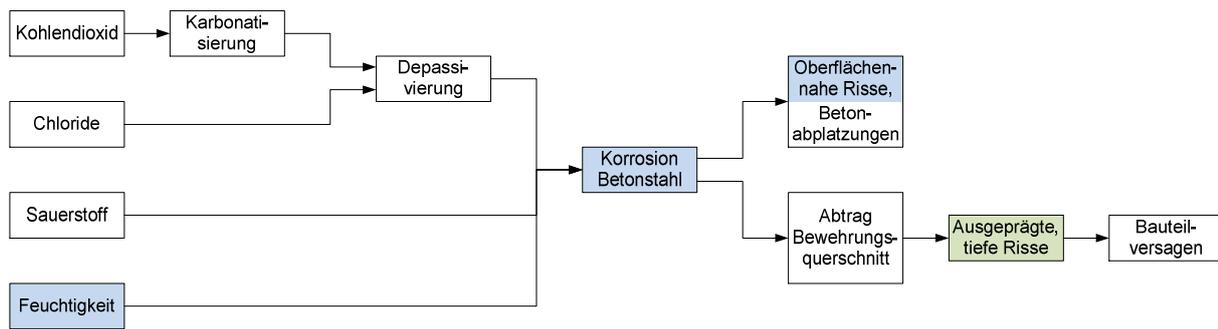


Bild 62: Ursachen und Folgen der Bewehrungskorrosion (blauer Hintergrund: Anwendung eines lokalen Überwachungsansatzes, grüner Hintergrund: Anwendung eines globalen Überwachungsansatzes)

Vorspannsystem

Rissbildung im Bereich von Koppelfugen

Risse im Bereich von Koppelfugen treten hauptsächlich bei Brücken mit einem Baubeginn vor 1969 auf. Bauwerke mit einem Baubeginn nach 1977 sind dagegen im Koppelfugenbereich weitgehend ungerissen [SCPM13]. Bei Neubauten ist das Auftreten von Koppelfugenschäden nicht zu erwarten. Koppelfugen sind ermüdungsgefährdet. Dies kann unter Umständen zu einem Spanngliedversagen führen.

Zur Erkennung bzw. Überwachung von Koppelfugenrissen sollten verschiedene Messgrößen erfasst und untersucht werden. Zunächst ist die Rissbreitenänderung des Koppelfugenrisses z. B. mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern zu messen. Um das Verformungsverhalten der gerissenen Koppelfuge mit dem der angrenzenden ungerissenen Bauteilbereiche vergleichen zu können, sind neben der Koppelfuge Sensoren zur Dehnungsmessung am Beton anzubringen. In [BAST98] wird bei der Beurteilung der Ermüdungsbruchgefährdung unter Verwendung von am Bauwerk erfassten Messgrößen zusätzlich die Messung der Spannstahldehnungen gefordert. Da die Breite von Koppelfugenrissen nicht nur abhängig ist von der auftretenden Verkehrsbelastung, sondern auch von der Temperaturbeanspruchung des Tragwerks, sind weiterhin entsprechende Temperaturmessungen (Luft- und Bauwerkstemperaturen) vorzunehmen.

Zur langfristigen Überwachung einer gerissenen Koppelfuge eignet sich insbesondere ein lokaler Überwachungsansatz unter Einsatz nichtphysikalischer Modelle. Die Modelle können mit Hilfe von Messdaten aus Kalibrierfahrten entwickelt werden. Durch die Einbindung von Temperaturmessgrößen kann die Korrelation zwischen der Rissbreitenänderung und der Temperaturbeanspruchung be-

rücksichtigt werden. Die bei der Überwachung gewonnenen Erkenntnisse können zur Unterstützung einer rechnerischen Beurteilung der tatsächlich auftretenden Ermüdungsbeanspruchung der Spanngliedkopplungen dienen.

Spanngliedbrüche

Spanngliedbrüche können insbesondere auftreten, wenn bei der Herstellung des Bauwerks spannungsrissskorrosionsgefährdeter Spannstahl verwendet wurde. Abhängig vom Anteil der ausgefallenen Vorspannkraft können Spanngliedbrüche in Kombination mit entsprechend großen Beanspruchungen eine ausgeprägte Rissbildung und eine Änderung messbarer Tragwerksreaktionen nach sich ziehen. Daher eignen sich zur Identifikation von Spanngliedbrüchen globale Überwachungsansätze, welche häufig auf der Identifikation von FE-Modellen (Model-Updating) basieren.

Auch bei der schwingungsbasierten Identifikation von Spanngliedbrüchen ist es nicht auszuschließen, dass entstandene Risse trotz des Ausfalls der Vorspannkraft überdrückt werden und sich daher nur geringfügig auf die dynamischen Eigenschaften des Bauwerks auswirken. In [MZWW12] wird beispielsweise über Feldversuche an zwei vorgespannten Brücken berichtet, bei denen die Spannglieder progressiv durchtrennt und somit Spanngliedbrüche künstlich herbeigeführt wurden. Während der Versuche wurden sowohl statische (Durchbiegungen, Dehnungen) als auch dynamische Tragwerksreaktionen (Eigenfrequenzen, Eigenformen) erfasst und bezüglich ihrer Sensitivität im Hinblick auf die Detektion des Schadens ausgewertet. Bei der ersten Brücke nahmen die in Feldmitte gemessenen Verformungen des geschädigten gegenüber dem ungeschädigten Bauwerk um bis zu 15 % und die am Betonstahl im Bereich der Trennschnitte gemessenen Dehnungen um bis zu 35 % zu. Die Änderung der Eigen-

frequenzen der Brücke betrug dagegen lediglich etwa 1 %. Bei der zweiten Brücke wurde festgestellt, dass sich die Eigenfrequenzen des Bauwerks in Folge der Schädigung zwar um bis zu ca. 17 % veränderten, die statischen Durchbiegungen der Brücke jedoch deutlich stärker beeinflusst wurden. Insgesamt erscheint die Untersuchung gemessener statischer Tragwerksreaktionen daher zur Erkennung von Spanngliedbrüchen geeigneter als die Analyse von Schwingungen.

Unterbau

Schäden in Folge Korrosion

Aus Bewehrungskorrosion resultierende Schäden wie Abplatzungen und freiliegende Bewehrung können durch eine rechtzeitige Erkennung der Korrosionsaktivität innerhalb der Bauteile vermieden werden. Hierzu sollten Widerlager, analog zu Brückenüberbauten, mit flächig verteilten Korrosions- oder Feuchtigkeitssensoren ausgerüstet werden. Die Anzahl bzw. der Abstand der Sensoren sollte an die auftretende Beanspruchung (z. B. Spritzwasser- oder Sprühnebelbereich) angepasst werden. Für die Überwachung dieser Messgrößen eignen sich auch vor allem lokale Überwachungsansätze, z. B. eine Grenzwertüberwachung.

Rissbildung

Ausgeprägte Risse am Unterbau gehen mit einer Steifigkeitsabminderung einher und beeinflussen daher das Tragverhalten des jeweiligen Bauteils. Insbesondere bei biegebeanspruchten Bauteilen des Unterbaus ermöglichen physikalische Modelle (z. B. FE-Modelle) Einblicke in das tatsächliche Tragverhalten. Dies gilt vor allem für integrale Brückenbauwerke (Rahmenbrücken), bei denen der Überbau biegesteif mit dem Unterbau verbunden ist (Bild 63). Durch entsprechende Modifikationen der Eigenschaften des FE-Modells wie etwa der Steifigkeiten der Bauteile, der Anschlüsse zwischen Überbau und Unterbau oder des Baugrundes kann das Tragverhalten des Modells an das des Brückenbauwerks angepasst werden (Model-Updating).

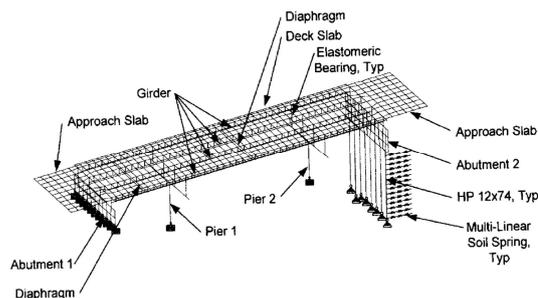


Bild 63: Dreidimensionales FE-Modell einer integralen Brücke [FELL05]

Fundamentsetzungen

Mögliche Setzungen der Fundamente, die sich auf den Brückenüberbau auswirken und dort Schäden verursachen können, lassen sich besonders effektiv mit geodätischen Messgeräten bestimmen. Mit Hilfe von elektronischen Tachymetern können beispielsweise Lagebestimmungen von Reflektoren durchgeführt werden, welche an den aufgehenden Bauteilen (Widerlager, Pfeiler, Stützen) angebracht werden. Neben Tachymetern existieren weitere Geräte zur Messung von Setzungen, z. B. Laser-Entfernungsmesser oder Extensometer (siehe auch Kapitel 3.1 und 3.4). Eine Beurteilung der gemessenen Setzungen kann durch Vergleiche mit den bei der Bemessung des Bauwerks angesetzten Stützensenkungen oder im Rahmen statischer Analysen vorgenommen werden.

Ein Beispiel zur Überwachung von Fundamentbewegungen mit Hilfe von Extensometern findet sich in [GEB109]. Das Tragwerk der dort betrachteten Brücke besteht aus tonnenförmigen Zylinderschalen. Der im Bereich der Kämpfer auftretende Gewölbeschub wird über die Fundamente in den Baugrund eingeleitet. Zur Erfassung der Horizontalverschiebungen der Fundamente wurden bei der Errichtung der Brücke manuell abzulesende Extensometer eingebaut. Im Zuge der Bauwerksüberwachung wurden nachträglich Wegaufnehmer angebracht, die eine automatisierte Erfassung der Fundamentbewegungen ermöglichten.

Zur Messung von Setzungen kann ebenso das im Bereich des Tunnelbaus eingesetzte Verfahren der satellitengestützten Radarinterferometrie (Kapitel 3.1) herangezogen werden. Dadurch können Bewegungen der gesamten Fahrbahnoberfläche langfristig und mit großer Genauigkeit ohne den Einsatz manuell zu bedienender Messgeräte oder das aufwändige Einbringen von Extensometern in den Boden erfasst werden.

Da größere Setzungen von Stützenfundamenten zwangsläufig zu Rissbildung im Überbau führen, lassen sich Setzungen auch indirekt anhand einer

globalen Überwachung erkennen, bei der die Steifigkeit des Überbaus identifiziert wird. Über die Machbarkeit eines solchen Vorgehens wird in [TEDE04] berichtet. Im Rahmen von zerstörenden Versuchen an einer mehrfeldrigen Spannbetonbrücke wurde gezeigt, dass eine künstlich herbeigeführte Stützensenkung anhand der Rissbildung im Überbau durch ein FE-Model-Updating mit guter Genauigkeit lokalisiert und quantifiziert werden konnte.

Lager

Die Überwachung der Lager eines Brückenbauwerks erlaubt die Verifizierung ihrer Funktionstüchtigkeit sowie die Erkennung von Lagerschäden bzw. Verschleißerscheinungen. Grundsätzlich können hierzu beispielsweise die folgenden Parameter herangezogen werden:

- Neigungen im Bereich des Lagers,
- Horizontal- und Vertikalverschiebungen zwischen den Bestandteilen des Lagers und angrenzenden Bauteilen,
- Kraftmessungen.

Zur Erkennung von Schäden an den Lagern eignen sich insbesondere lokale Überwachungsansätze. Dabei werden die von den o. g. Sensoren erfassten Messwerte zur Bestimmung von Unregelmäßigkeiten, z. B. stetiges Ansteigen bestimmter Größen, mit entsprechenden in der Vergangenheit gewonnenen Größen oder zulässigen Grenzwerten verglichen.

Über eine Langzeitüberwachung von zwei Topfgleitlagern einer Spannbetonbrücke durch Anwendung eines lokalen Überwachungsansatzes wird in [MURS06] berichtet. Neben dem Öldruck im Innern des Lagers zur Erfassung der auftretenden Vertikalkräfte wurden auch die Lagerverdrehung sowie die Höhe des Gleitspalts zwischen dem Deckel des Lagers und der Gleitplatte gemessen. Die Gleitspaltmessung erlaubte Rückschlüsse auf die Abnutzung des Gleitteils, wobei die gemessene Gleitpalthe anhand von [ARS14/1986] bewertet wurde.

Ein weiteres Beispiel für eine Langzeitüberwachung von Brückenlagern findet sich in [HOBE07]. Bei dem dort betrachteten Brückenbauwerk handelt es sich um eine Hängebrücke, die durch Straßen- und Eisenbahnverkehr beansprucht wird. Insbesondere bei Zugüberfahrten treten im Bereich der Gleitlager extreme Verschiebungen auf, die den Einsatz neuartiger Materialien anstelle von herkömmlichem PTFE (Teflon) erforderten. Zur Kontrolle der Funktionstüchtigkeit der Gleitlager wurden Sensoren installiert, welche die in Richtung

der Längsachse auftretenden Bewegungen kontinuierlich aufzeichneten. Anhand der Messungen konnte der akkumulierte Gleitweg zur Beurteilung der tatsächlich auftretenden Beanspruchung und der Abnutzung der Gleitmaterialien ermittelt sowie die Freigängigkeit der Lager festgestellt werden.

Ausrüstung

Fahrbahnübergangskonstruktionen

Zur Überwachung von Fahrbahnübergängen eignen sich, ähnlich wie bei der Überwachung von Lagern, vorwiegend lokale Ansätze. Mit Hilfe von Messungen, die im Bereich von Fahrbahnübergängen vorgenommen werden, können nicht nur die auftretenden Bewegungen des Überbaus sowie des Fahrbahnübergangs erfasst, sondern ebenso die Gewichte der überfahrenden Fahrzeuge bestimmt werden.

In [MOCA12] wird beispielsweise über das Monitoring einer Lamellenfuge einer Brücke mit einer Hauptspannweite von 800 m berichtet. Die zu erwartenden Längenänderungen des Bauwerks erforderten den Einbau einer Lamellenfuge mit einer maximalen Bewegungskapazität von 2 m. Auf Grund der komplexen und schwer vorhersehbaren Bewegungscharakteristik der Fugenkonstruktion wurde ein System zur Dauerüberwachung eingesetzt, welches in Echtzeit Informationen zu Bewegungen und Verdrehungen des Bauteils liefert und bei Überschreitungen von zuvor festgelegten Grenzwerten Warnmeldungen per SMS oder E-Mail versenden konnte. Da die Sensoren über eine Funkverbindung mit dem Datenlogger verbunden waren, wurde ein autarkes Energieversorgungskonzept auf Basis von Solarpanels in Kombination mit Pufferbatterien verfolgt.

Ein Konzept zur Bestimmung von Verkehrslasten auf Grundlage von Messungen an einer Fahrbahnübergangskonstruktion wird in [GRTU12] vorgestellt. Dort wurden mit Hilfe von faseroptischen Rosetten die durch die Fahrzeuggewichte hervorgerufenen Dehnungsänderungen der Stützträger, auf die die verschieblichen Lamellen aufgelegt sind, erfasst. Die Kalibrierung des Systems, d. h. die Zuordnung von gemessenen Dehnungswerten zu den entsprechenden Fahrzeuggewichten, erfolgte anhand von Überfahrten unterschiedlicher Fahrzeuge mit Gewichten von etwa 1 t bis etwa 24 t und variierenden Fahrgeschwindigkeiten. Im Rahmen von Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich das Verfahren – mit Ausnahme unbeladener LKW – zur zuverlässigen Identifikation der Fahrzeuggewichte eignet.

Undichtigkeiten des Belags oder der Abdichtung

Undichtigkeiten des Belags oder der Abdichtung führen langfristig zu einer Durchfeuchtung der Tragkonstruktion. Der Feuchtegehalt von Bauteilen kann mit Hilfe von Feuchtesensoren bestimmt werden.

Anwendungsbeispiele für die lokale, punktuelle Überwachung der Fahrbahnabdichtungen mehrerer Brücken sind in [DSSG08] aufgeführt. Hier wurden Multiring-Elektroden nachträglich im Anschlussbereich der Fahrbahnübergänge und der Abläufe eingebaut. Durch den Vergleich der an diesen Stellen gemessenen Elektrolytwiderstände mit den entsprechenden an trockenen Stellen der Brücke erfassten Werten konnten Rückschlüsse auf die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung gezogen werden.

Zur flächigen Feuchteüberwachung wurde von der Unternehmensgruppe Unger und der TU Chemnitz ein textilbasiertes Sensorsystem zur Messung der Feuchtigkeit in Betonen und Mörteln entwickelt und zur Marktreife geführt. Die Einsatzgebiete des Systems sind bisher Estrichflächen und große Parkdecks [CTM2/12]. Der Einsatz im Brückenbau ist gemäß Aussage der Entwickler unter Berücksichtigung der spezifischen Einbaubedingungen jedoch ebenfalls möglich.

5.1.4 Besonderheiten bei der Überwachung von Bestandsbauwerken

Datenakquisition

Ein Unterschied bei der Überwachung von Bestandsbauwerken gegenüber Neubauten besteht bei der Auswahl bzw. dem Einbau der Sensoren. Während Sensoren bei Neubauten an nahezu jeder beliebigen Stelle eingeplant werden können, ist der Einbau bei Bestandsbauwerken nicht immer oder nur mit erhöhtem Aufwand möglich.

Sensoren zur Erfassung der Dehnung von einbetonierten Bewehrungsstäben (bzw. Spanngliedern) können zwar nachträglich appliziert werden, jedoch sind die Bewehrungsstäbe zuvor an den jeweiligen Stellen freizulegen und die entstandenen Fehlstellen nach dem Anbringen der Sensoren wieder zu verschließen. Beim Einsatz faseroptischer Sensoren, z. B. Faser-Bragg-Gittersensoren, muss der einbetonierte Bewehrungsstab auf der entsprechenden Länge freigelegt und zudem mit einer Nut versehen werden, in die die Glasfaser eingeklebt wird. In einem solchen Fall sollte geprüft werden, ob der hohe Aufwand tatsächlich erforderlich ist, oder ob die benötigte Information nicht anderweitig gewonnen werden kann, z. B.

durch Analyse und Interpretation der Betondehnungen.

Die Erfassung von Auflagerkräften mit Hilfe von Brückenlagern mit Kraftmessfunktion ist bei Bestandsbauwerken durch Nachrüstung der entsprechenden Lager möglich. Aus Kostengründen sollte eine Nachrüstung möglichst dann erfolgen, wenn die vorhandenen Lager z. B. auf Grund von Abnutzungsprozessen ohnehin auszutauschen sind.

Sensoren zur Messung physikalischer Bauwerksparameter (Bauteiltemperatur, Bauwerksfeuchte) und chemischer Bauwerksparameter (Korrosion) können im Falle einer nachträglichen Installation in Öffnungen eingesetzt werden, die zuvor im Bauwerk anzulegen sind (z. B. Bohrkernanoden bei Bestandsbauwerken gegenüber Anodenleitern bei Neubauten).

Bei der Erfassung der Verkehrsbeanspruchung mit Hilfe von Weigh-in-Motion-Systemen eignen sich insbesondere Streifensensoren. Diese lassen sich mit geringem Aufwand in die Fahrbahn einbauen, verursachen jedoch größere Messungenauigkeiten als Plattensensoren.

Informationsgewinnung

Die Gewinnung zuverlässiger Informationen aus den Messdaten gestaltet sich bei Bestandsbauwerken grundsätzlich schwieriger als bei Neubauten. Der Grund dafür liegt zunächst in den Unsicherheiten bei der Bestimmung des Zustands eines bestehenden Bauwerks, da dieses bereits durch nicht erkannte Schädigungen geschwächt sein kann.

Physikalische Modelle

Um Aussagen zu bereits vorhandenen unentdeckten Schädigungen zu erhalten, ist die Erstellung und Kalibrierung eines entsprechend parametrisierten physikalischen A-priori-Modells der Brücke (z. B. unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode) möglich (siehe hierzu Kapitel 2.2).

Nichtphysikalische Modelle

Alternativ bzw. ergänzend zu physikalischen Modellen können nichtphysikalische Modelle der Bestandsbrücke (z. B. künstliche neuronale Netze) entwickelt werden, die der Echtzeit-Erkennung von Anomalien während einer Bauwerksüberwachung dienen. Bei Neubauten erfolgt das Training der Modelle üblicherweise mit Messdaten, die unmittelbar nach der Fertigstellung des Bauwerks ge-

wonnen werden. Der Referenzzustand, der dem Modell „eingepägt“ wird, repräsentiert daher den ungeschädigten Bauwerkszustand.

Dagegen liegt den am Bestandsbauwerk gewonnenen Referenzdaten ein Bauwerkszustand zugrunde, der unter Umständen bereits durch Abnutzungsprozesse oder Vorschädigungen beeinträchtigt sein kann. Messdaten des ungeschädigten Bauwerkszustands sind meist nicht vorhanden. Hier kann das nichtphysikalische Modell demnach nur zur Feststellung einer weiteren Verschlechterung des Bauwerkszustands gegenüber dem möglicherweise bereits beeinträchtigten Referenzzustand dienen.

Bewertung

Bei der zuverlässigkeitsbasierten Bewertung bestehender Bauwerke müssen mögliche Abnutzungsprozesse und Vorschädigungen einbezogen werden. Da diese nicht immer offenkundig sind, kann es bei der Bewertung von Bestandsbauwerken zu Ungenauigkeiten kommen.

5.2 Machbarkeitsstudie

Die Umsetzbarkeit eines Überwachungssystems und der Erfolg einer Überwachungsmaßnahme hängen in starkem Maße ab von der Detailtiefe und der Zuverlässigkeit der durch das System bereitzustellenden Informationen. Je detaillierter, genauer und zuverlässiger die Informationen sein sollen, desto größer sind die Anforderungen an die Komponenten zur Datenakquisition, zur Informationsgewinnung und zur Bewertung (Bild 64). Dies wiederum erhöht die Komplexität des Systems und führt zu Erschwernissen bei seiner Umsetzung sowie der Interpretation der Ergebnisse.

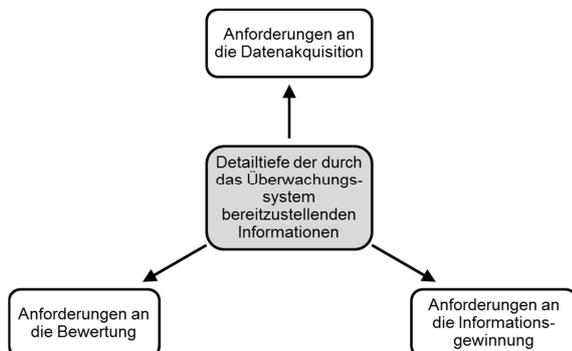


Bild 64: Abhängigkeit zwischen Detailtiefe der geforderten Informationen und den Anforderungen an die Komponenten eines Überwachungssystems

5.2.1 Datenakquisition

Sensoren

Elektrische Sensoren

Eine Vielzahl von Sensoren basiert auf der Veränderung elektrischer Größen (Spannung, Stromstärke, Widerstand, Kapazität) durch das zu messende Phänomen. Beispiele hierfür sind Dehnungsmessstreifen, induktive Wegaufnehmer, Schwingsaitenaufnehmer, piezoresistive und kapazitive Beschleunigungsmesser sowie diverse Sensoren zur Erfassung von Feuchte und Temperaturen. Der große Nachteil elektrischer Sensoren ist ihre Anfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Störquellen, die zu einer Verfälschung der Messresultate führen kann, sowie die Signalabschwächung bei großen Kabellängen. Dehnungsmessstreifen können zudem in Folge von Temperatureinflüssen Drifts in den Messdaten hervorrufen. Sind sie über lange Zeiträume rauen Umweltbedingungen ausgesetzt, so besteht die Gefahr von Kurzschlüssen [GLWO07].

Faseroptische Sensoren

Trotz der im Vergleich zu konventionellen elektrischen oder kapazitiven Aufnehmern höheren Kosten bieten faseroptische Sensoren einige entscheidende Vorteile, welche die höheren Kosten häufig überwiegen [GLIN07]. Zu nennen sind hier insbesondere Langzeitstabilität, Präzision, Zuverlässigkeit, geringe Abschwächung des Messsignals auch bei großen Leitungslängen, kurze Ansprechdauern und Unempfindlichkeit gegenüber chemisch aggressiven Umgebungen sowie elektromagnetischen Feldern. Zudem ist der Installationsaufwand bei faseroptischen Sensoren meist geringer als bei herkömmlichen Aufnehmern, da die Fasern und die Sensoren eine Einheit bilden. Bei der Verwendung von Faser-Bragg-Gittersensoren wird dieser Vorteil besonders deutlich, da hier mit dem Verlegen einer einzelnen Faser gleichzeitig eine große Anzahl von Sensoren in das Bauteil eingebracht wird. Mit Hilfe neuartiger dreiadriger Faser-Bragg-Gittersensoren, die im Bereich der Raumfahrt entwickelt wurden (siehe Kapitel 3.10), lassen sich selbst komplexe räumliche Dehnungs- und Bewegungszustände oder Schwingungen mit einem einzigen Sensor erfassen. Dieser Sensortyp kann bei der Überwachung von Brückenbauwerken zur Positionsbestimmung und Beschleunigungsmessung eingesetzt werden. Faseroptische Messtechnik bietet sich bei gleichermaßen hohen Anforderungen an Präzision, Robustheit und langfristige Zuverlässigkeit an.

Geodätische Messverfahren

Für bestimmte Messaufgaben, wie z. B. die Bestimmung von Entfernungen, Positionsänderungen oder Schwingungseigenschaften, können auch geodätische Verfahren eingesetzt werden. Diese basieren auf dem berührungslosen Abtasten der Bauteiloberfläche und unterliegen dadurch geringeren Verschleißbeanspruchungen als Berührungssensoren. Geodätische Messgeräte sind häufig kostenintensiv, bieten jedoch eine hohe Genauigkeit bei der Erfassung der Messgrößen. Durch ihren Einsatz lässt sich beispielsweise die Durchbiegungsmessung eines Bauwerks sehr einfach realisieren.

Neuartige Messverfahren

Durch die Nutzung einzelner Kohlefasern von CFK-Lamellen als Dehnungssensoren – ein Ansatz, der im dem Bereich der Luft- und Raumfahrt zur Anwendung kommt (Kapitel 3.9 und 3.10) – lassen sich beispielsweise Verstärkungsmaßnahmen von Koppelfugen sehr effektiv überwachen.

In Zukunft können Fahrzeuge zur Erfassung von Straßen- und Bauwerksschäden herangezogen werden (Car-as-Sensor, siehe Kapitel 3.8.5). Dieser Ansatz basiert auf der Nutzung der in den Fahrzeugen eingebauten Messeinrichtungen. Dadurch ist eine flächendeckende Erfassung von Informationen möglich, die der Bestimmung von Einwirkungen und der Bewertung des Zustands der Infrastruktur dienen.

Zusammenfassung

Nach derzeitigem Stand der Technik steht eine große Anzahl von Verfahren zur Messung unterschiedlichster Größen zur Verfügung. Welche Messgenauigkeit bzw. Empfindlichkeit dabei zur Erfüllung der entsprechenden Aufgabe gefordert wird, hängt wesentlich ab von den zu messenden Größen und deren Sensitivität hinsichtlich der zu erkennenden Schädigungen. Allerdings ist zu beachten, dass eine große Sensitivität hinsichtlich der Schadensidentifikation ebenso zu einer zunehmenden Empfindlichkeit hinsichtlich wechselnder Umwelt- und Betriebszustände führt. Dies ist bei der Informationsgewinnung zu berücksichtigten [WFMP07].

Überwachung des Sensornetzes

Zur Steigerung der Zuverlässigkeit erfasster Messgrößen sollte die Überwachung der Sensoren

selbst – ein aus den Bereichen der Kernkraftwerke und des Automobilbaus (Kapitel 3.5 und 3.8), jedoch auch der Prozessmesstechnik übertragbares Verfahren – durchgeführt werden. Dies führt ebenso zu einer Verbesserung der Zuverlässigkeit bei der Schadenserkennung. Zudem kann durch die Überwachung der Sensorfunktion sehr effektiv festgestellt werden, ob defekte auszutauschende Sensoren im Netz vorhanden sind.

Drahtlose Sensornetze

Das wesentliche Problem drahtloser Sensornetze besteht in der Energieversorgung der Motes. Hier werden Strategien zum Energiemanagement und zur Gewinnung von Energie aus der Umgebung benötigt, sodass die Motes ohne zusätzliche Energie betrieben werden können.

Die Entwicklung von Methoden der Energiegewinnung befindet sich derzeit noch in einem frühen Stadium. Die weitere Forschung wird in Zukunft Techniken hervorbringen, die eine effektive Energieversorgung drahtloser Sensorknoten ermöglichen.

Active Sensing

Zur lokalen Bauwerksüberwachung empfiehlt sich insbesondere der Einsatz von Active Sensing. In [WODU04] und in [CHFL03] wird die Kombination von Active Sensing und globalen Überwachungsverfahren vorgeschlagen.

5.2.2 Informationsgewinnung

Methoden der globalen und lokalen Bauwerksüberwachung

Bei der Entwicklung eines Systems zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke sollten lokale und globale Überwachungskonzepte kombiniert angewendet und somit die Vorteile beider Ansätze genutzt werden (hybrider Überwachungsansatz). Während auf diese Weise die Hot Spots des Bauwerks hinsichtlich der relevanten Schädigungsprozesse durch Einsatz entsprechend sensibler Messsysteme direkt überwacht werden können (lokale Bauwerksüberwachung, siehe Kapitel 2.4.3), ist durch die Erfassung des globalen Tragverhaltens die Erkennung von Schädigungen in den übrigen Bauwerksbereichen außerhalb der Hot Spots möglich (globale Bauwerksüberwachung, siehe Kapitel 2.4.2). Eine derartige Vorge-

hensweise wurden bereits in [WODU04] und [CHFL03] als zielführend erachtet.

Physikalische und nichtphysikalische Modelle

Um detaillierte Aussagen zum Ist-Zustand eines Brückenbauwerks in Echtzeit erhalten zu können, sollten sowohl nichtphysikalische als auch physikalische Modelle zur Abbildung der Struktur in das Überwachungssystem eingebunden werden.

Nichtphysikalische Modelle eignen sich vor allem zur Erkennung von Unregelmäßigkeiten in den erfassten Tragwerkeigenschaften, die auf mögliche Schäden hindeuten können. Eine Lokalisation, Quantifizierung oder Klassifikation von Schädigungsprozessen ist allenfalls nur sehr eingeschränkt möglich. Da nichtphysikalische Modelle sehr schnell ausgewertet werden können, können Auffälligkeiten im Tragverhalten nahezu in Echtzeit festgestellt werden. Nach der Feststellung einer Anomalie müssen jedoch weitere Untersuchungen zur Feststellung der Ursache durchgeführt werden, z. B. die Kalibrierung eines physikalischen Modells. Zukünftig steht gegebenenfalls die Entwicklung von Datenbanken mit Signaturen der häufigsten Bauwerksschäden in Aussicht, welche sich – ähnlich dem Vorgehen bei der Überwachung rotierender Maschinen – als Lerndaten für das Training der Modelle einsetzen lassen. Dadurch könnten nichtphysikalische Modelle auch zur Lokalisierung, Quantifizierung und Klassifikation von Schädigungen an Brücken eingesetzt werden.

Mit Hilfe physikalischer Modelle der Struktur ist es möglich, Schäden nicht nur zu detektieren, sondern auch zu lokalisieren, zu klassifizieren und zu quantifizieren. Ebenso können physikalische Modelle für Aussagen zur Restlebensdauer der Struktur herangezogen werden. Die Genauigkeit, mit der das Verhalten von Strukturen oder Schädigungsprozessen beschrieben werden können, ist dabei in starkem Maße abhängig von der Komplexität der verwendeten Modelle. Mit steigender Komplexität nimmt jedoch auch der Rechenaufwand bei der Auswertung der Modelle zu. Dieser Rechenaufwand kann z. B. durch Anwendung von Methoden des verteilten Rechnens (Distributed Computing) auf mehrere über eine Netzwerk- oder Internetverbindung zusammenhängende leistungsfähige Computer verteilt werden.

5.2.3 Bewertung

Zur probabilistischen Bewertung geschädigter Brückenbauwerke werden geeignete Modelle sämtlicher relevanter Schädigungsvorgänge einschließ-

lich Beschreibungen der Auswirkungen dieser Vorgänge auf die Komponentenzuverlässigkeit benötigt. Eine Zusammenstellung probabilistischer Modelle für eine Vielzahl von Schädigungsprozessen findet sich z. B. in [ZSDF11]. Zu berücksichtigen ist außerdem die Interaktion zwischen den einzelnen Schädigungsmechanismen [MUEL10].

Eine ganzheitliche und detaillierte Zuverlässigkeitsbewertung von Brückenbauwerken erfordert entsprechend detaillierte Systemmodelle. Der Aufbau dieser Modelle stellt eine besondere Herausforderung dar, da das Bauwerk einschließlich seiner strukturellen Zusammenhänge vollständig und in allen Einzelheiten abgebildet werden muss (siehe auch Teilprojekt „Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse“, [BFDW13]). Nur auf diese Weise können Ursachen unterschiedlichster Schäden sowie deren Auswirkungen auf den betroffenen Bauteilabschnitt, das Bauteil, die Bauteilgruppe und schließlich das gesamte Bauwerk abgebildet und die jeweiligen Zuverlässigkeiten ermittelt werden. Um Prognosen zur Fortschreitung möglicher Schädigungsprozesse zu ermöglichen und damit eine Aussage zur Restnutzungsdauer der Bauwerke treffen zu können, ist weiterhin die zeitliche Entwicklung der Schädigungen mit in die Modellierung einzubeziehen. Der erhebliche Aufwand, der beim Aufbau derart komplexer Systemmodelle zu bewältigen ist, wird anhand des Beispiels in Bild 59 deutlich.

Die praktischen Möglichkeiten und Grenzen bei der Anwendung probabilistischer Bewertungsverfahren werden derzeit im Rahmen des Teilprojektes „Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells“ untersucht [SFDT13].

5.3 Beispielszenario zur Bauwerksüberwachung

Im Folgenden wird beispielhaft ein System zur Überwachung eines Brückenbauwerks dargestellt. Dabei werden sowohl derzeit als auch zukünftig einsetzbare Technologien berücksichtigt.

5.3.1 Brückenbauwerk

Bei der zu überwachenden Struktur handelt es sich um eine dreifeldrige Spannbetonbrücke. Um das Konzept der Nutzung einzelner Kohlefasern als Sensoren einbringen zu können, wurde ein Bestandsbauwerk angenommen, welches zwei mit CFK-Lamellen sanierte Koppelfugen aufweist. Die

übrigen Überwachungsverfahren können ebenso bei Neubauten eingesetzt werden.

5.3.2 Überwachungssystem

Das System, welches zur Überwachung des Bauwerks eingesetzt wird, besteht aus fünf Systemkomponenten (siehe auch Bild 65).

Pos. 1 Komponente zur lokalen Überwachung der Koppelfugenverstärkung

Die Überwachung der Verstärkungsmaßnahme basiert auf der Verwendung einzelner Kohlefasern der CFK-Lamellen als Dehnungssensoren. Zur Detektion von Schädigungen an den CFK-Lamellen wird eine Grenzwertüberwachung durchgeführt: Überschreiten die gemessenen Dehnungen entsprechende Grenzwerte, so wird per E-Mail eine Warnmeldung an den Bauwerksbetreiber übermittelt.

Pos. 2 Komponente zur lokalen Überwachung der Korrosionsaktivität im Bereich der Stütze

Um die Korrosionsaktivität im Bereich der Fahrbahnplatte über der Stütze dauerhaft zu erfassen, werden nachträglich Bohrkernanoden in das Bauwerk eingesetzt. Anhand der Interpretation der Messgrößen lässt sich die Karbonatisierungstiefe auf der Oberseite der Platte feststellen. Auch hier erfolgt eine Grenzwertüberwachung. Erreicht die Karbonatisierungsfrente eine zuvor festgelegte Tiefe, wird eine Warnmeldung per E-Mail generiert.

Pos. 3 Komponente zur globalen Überwachung des Schwingungsverhaltens

Durch die Aufzeichnung des globalen Schwingungsverhaltens des Bauwerks werden Schäden in sonstigen Bauwerksbereichen identifiziert. Aus den mit Hilfe von drahtlosen MEMS-Beschleunigungsmessern erfassten Schwingbeschleunigungen werden unter Einsatz von Output-Only-Identifikationsverfahren die Eigenfrequenzen und Eigenformen der Struktur ermittelt. Diese können zur Kalibrierung der Eigenschaften eines FE-Modells herangezogen werden (Model-Updating). Alternativ ist es ebenso möglich, die Daten mit Hilfe von neuronalen Netzen hinsichtlich des Auftretens von Unregelmäßigkeiten zu untersuchen, wie es z. B. in Kapitel 5.4 demonstriert wird.

Pos. 4 Komponente zur Überwachung von Bauwerkssetzungen

Zur langfristigen Überwachung der Bauwerkssetzungen wird das Verfahren der satellitengestützten Radarinterferometrie eingesetzt. Die gemessenen Setzungen werden mit zulässigen Grenzwerten verglichen und können außerdem dem Model-Updating-Verfahren (Pos. 3) zugeführt werden.

Pos. 5 Car-as-Sensor-Konzept zur Erfassung des Fahrbahnzustandes

Mit Hilfe der Rückfahrkameras von Fahrzeugen werden Bilddaten von der Oberfläche der Fahrbahn erfasst. Die aufgezeichneten Daten werden dem Überwachungssystem per Funk übermittelt und durch Anwendung von Methoden der Mustererkennung hinsichtlich Fahrbahnschäden analysiert. Informationen über festgestellte Schäden werden dem Bauwerksbetreiber gemeldet.

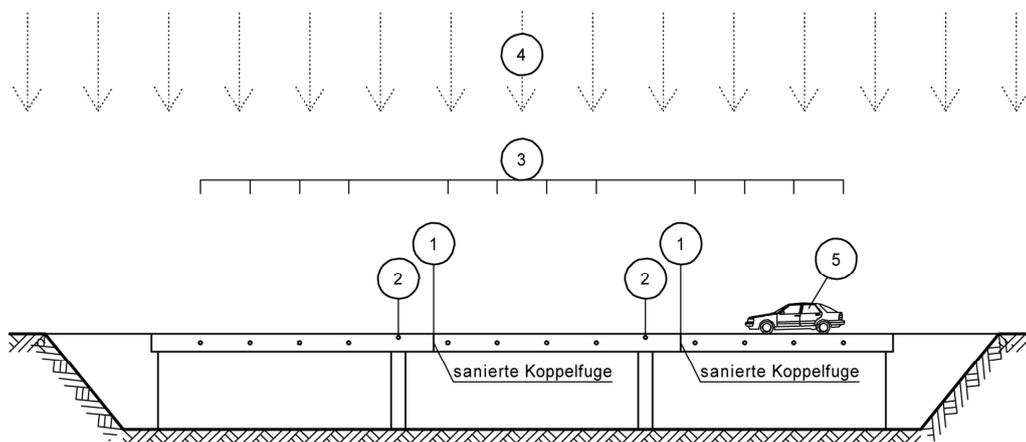


Bild 65: Eingesetztes Überwachungssystem

5.4 Anwendung künstlicher neuronaler Netze bei der Schadenserkenkung

In diesem Kapitel wird anhand eines einfachen Beispiels aufgezeigt, wie sich künstliche neuronale Netze zur Schadenserkenkung implementieren lassen. Dabei werden die Netze zur Klassifikation herangezogen. D. h., sie sollen erkennen, ob Messdaten einem ungeschädigten oder einem geschädigten Bauwerkszustand entstammen. Hierzu wurde ein System zur Schadenserkenkung im Rahmen einer prototypischen Softwareapplikation umgesetzt.

Da keine „echten“ an Brückenbauwerken gewonnenen Messgrößen vorhanden sind, basiert die Demonstration auf künstlich im Rahmen von Simulationen erzeugten Messdaten. Die Messdaten entsprechen dabei den berechneten Tragwerksreaktionen eines Finite-Elemente-Brückenmodells, welches durch die auftretenden Fahrzeuggewichte belastet wird. Im Verlauf der Simulationen wird das Bauwerk zunächst im ungeschädigten Zustand betrachtet. Zu einem bestimmten Zeitpunkt wird eine Schädigung in das Modell eingetragen, woraufhin sich gegenüber dem ungeschädigten Zustand Veränderungen in den Tragwerksreaktionen ergeben.

Ein Teil der erzeugten Messdaten des ungeschädigten und geschädigten Zustands wird nach Abschluss der Simulationen zum Training der künstlichen neuronalen Netze herangezogen. Diese erlernen dabei, zwischen den beiden Zuständen zu unterscheiden. Mit den übrigen Messgrößen wird die Klassifizierungsfähigkeit der trainierten Netze überprüft, d. h., es wird evaluiert, ob die Netze eine

korrekte Zuordnung der Messgrößen zu den beiden möglichen Zuständen vornehmen können.

5.4.1 Erzeugung von Messdaten

Brückenmodell

Zur Gewinnung der Messdaten wird eine Zweifeld-Plattenbrücke mit einer Feldlänge von je 20 m und einem Rechteckquerschnitt mit Abmessungen von $b/h = 700/100$ cm herangezogen (Bild 66). Das Bauwerk wird mit Hilfe einer Finite-Elemente-Software unter Verwendung von Stabelementen modelliert. Das dabei eingesetzte Material ist ein Beton der Festigkeitsklasse C35/45. Bei sämtlichen Untersuchungen wird vereinfacht linear-elastisches Materialverhalten angenommen.

Der Eintrag von Schädigungen erfolgt durch Abminderung der Biegesteifigkeit des Querschnitts auf einer Länge von 5 m im Bereich der Mittelstütze (Bild 66). Dadurch lässt sich z. B. der Effekt einer starken Rissbildung simulieren.

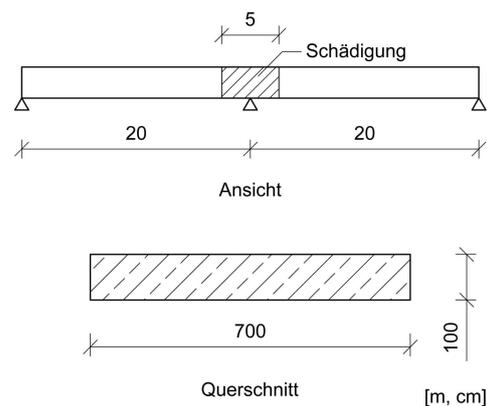


Bild 66: Betrachtetes Brückenbauwerk

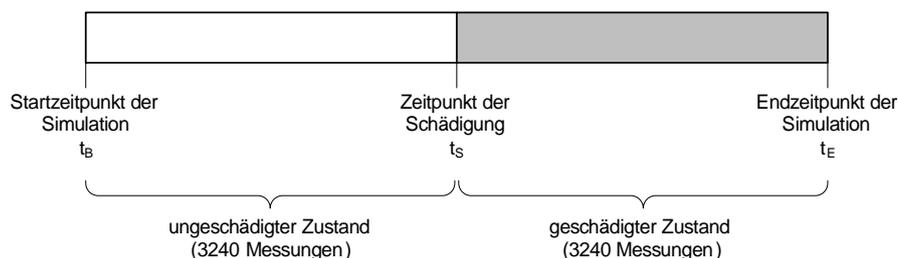


Bild 67: Während der Simulation gewonnene Messdaten

Ablauf

Im Rahmen der durchgeführten Simulationen wird die Zeit durch einzelne Zeitschritte diskretisiert. Jede Simulation beginnt zu einem Startzeitpunkt t_B und endet zu einem Endzeitpunkt t_E . Bei den

durchgeführten Untersuchungen beträgt die Dauer einer Simulation 30 Tage. Zu einem Zeitpunkt t_S – hier nach 15 Tagen – wird eine Schädigung in das Modell eingetragen. Die Abtastfrequenz des Sensorsystems wurde mit 0,0025 Hz angenommen, d. h. die Dauer zwischen zwei Messungen beträgt

6:39 min. Insgesamt ergeben sich somit für jede Simulation 3240 Messungen des ungeschädigten und 3240 Messungen des geschädigten Tragwerkszustands (Bild 67). Es werden drei Simulationen durchgeführt, die sich einzig im Ausmaß der eingetragenen Schädigung unterscheiden. In Simulation 1 beträgt die Steifigkeitsabminderung im Bereich der Mittelstütze 10 %, in Simulation 2 beträgt sie 25 % und in Simulation 3 wird die Steifigkeit in Folge des Schadens um 40 % reduziert.

Im Folgenden wird der Ablauf bei der Erzeugung der Messdaten beschrieben (siehe auch Bild 68).

Zu Beginn jedes Zeitschritts wird die Verkehrssituation aktualisiert. Dabei werden bereits auf der Brücke befindliche Fahrzeuge entsprechend ihrer Fahrtrichtung und Fahrgeschwindigkeit verschoben. Außerdem werden, basierend auf einer zuvor definierten durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke von 20.000 sowie realitätsnahen an einem Brückenbauwerk beobachteten Fahrzeuggewichtsverteilungen, neue Fahrzeuge erzeugt, die die Brücke befahren. Die Festlegung der Fahrtrichtung und der Fahrzeuggeschwindigkeiten erfolgt zufällig. Bei der Aktualisierung der Verkehrssituation werden Mindestabstände zwischen den Fahrzeugen zugrunde gelegt, welche nicht unterschritten werden dürfen. Auf diese Weise wird ausgeschlossen, dass schnellere Fahrzeuge zu dicht auf langsamere vorausfahrende Fahrzeuge auffahren.

Nach der Aktualisierung der Verkehrssituation werden die Fahrzeuggewichte in Einzellasten umgewandelt. Zur Berücksichtigung von Fahrbahnunebenheiten oder gar Ausbrüchen werden zu Beginn einer Simulation zufällig Unebenheiten auf der Fahrbahn erzeugt. Befindet sich ein Fahrzeug im Bereich einer dieser Unebenheiten, so wird die entsprechende Einzellast durch Kombination des Fahrzeuggewichts und einem dynamischen Vergrößerungsfaktor berechnet. Der Vergrößerungsfaktor hängt dabei ab von der Profiltiefe der Unebenheit sowie dem Gewicht und der Geschwindigkeit des darüberfahrenden Fahrzeugs.

Vor der Erzeugung des FE-Modells des Brückentragwerks wird durch Vergleich des aktuellen Zeitpunkts mit dem Entstehungszeitpunkt der Schädigung t_s überprüft, ob sich das Bauwerk noch im ungeschädigten oder bereits im geschädigten Zustand befindet. Dementsprechend wird ein ungeschädigtes oder ein geschädigtes Modell generiert.

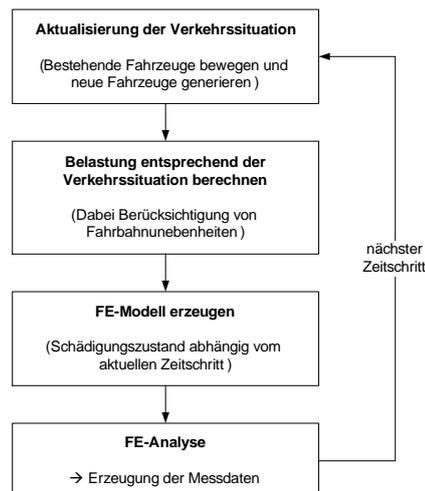


Bild 68: Ablauf bei der Erzeugung der Messdaten

Abschließend erfolgt die Erzeugung der Messdaten des aktuellen Zeitschritts im Rahmen einer statischen FE-Analyse. Dabei werden die in Bild 69 dargestellten Neigungen und Durchbiegungen im Bereich der Auflager und der Viertelpunkte der einzelnen Felder berechnet.

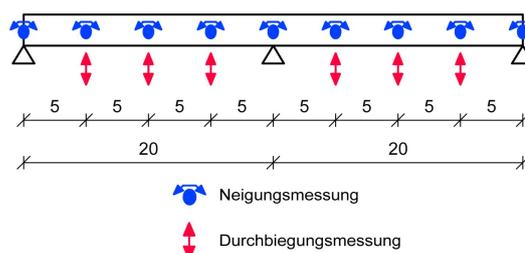


Bild 69: Messgrößen und Messorte

5.4.2 Künstliche neuronale Netze

Grundlagen

Künstliche neuronale Netze (KNN) sind mathematische Modelle der Gehirne von Säugetieren. Sie bestehen meist aus einer großen Anzahl einfacher Einheiten (Neuronen), die über gerichtete Verbindungen miteinander verknüpft sind und sich dadurch – in Abhängigkeit von der „Stärke“ der Verbindung (Wichtung) – Informationen zusenden können. Die herausragende Eigenschaft von KNN ist ihre Lernfähigkeit, d. h., sie können selbstständig Aufgaben anhand von Beispielen (Trainings- bzw. Lerndaten) erlernen, ohne explizit zur Erfüllung dieser Aufgaben programmiert zu werden. KNN sind im Allgemeinen fehlertolerant und robust gegenüber Störungen oder verrauschten Daten [ZELL03]. Ein weiterer Vorteil von KNN ist die geringe Rechendauer bei der Auswertung. Als nachteilig zu bezeichnen ist die schlechte Nachvollziehbarkeit des Lösungswegs (Black Box).

Künstliche Neuronen

Ein einzelnes künstliches Neuron als Bestandteil eines KNN ist eine relativ simpel aufgebaute Einheit, welche Informationen von vorgeschalteten Neuronen empfangen, verarbeiten und an nachgeschaltete Neuronen weiterleiten kann. Die Datenverarbeitung innerhalb des Neurons erfolgt in drei Schritten (siehe auch Bild 70): Zunächst werden die gewichteten Eingaben des Neurons, welche diesem von vorgeschalteten Neuronen zugesendet werden, zur Netzeingabe aufaddiert (Propagierungsfunktion). Auf Basis der Netzeingabe und unter Verwendung der Aktivierungsfunktion sowie eines Schwellenwertes wird die Aktivierung des Neurons berechnet. Schließlich wird die Ausgabe des Neurons anhand der Ausgabefunktion bestimmt. Eine häufig eingesetzte Ausgabefunktion ist die Identität, d. h. die Ausgabe des Neurons entspricht seiner Aktivierung. Die Ausgabe wird an nachgeschaltete Neuronen gesendet und von diesen wiederum als Eingabe empfangen.

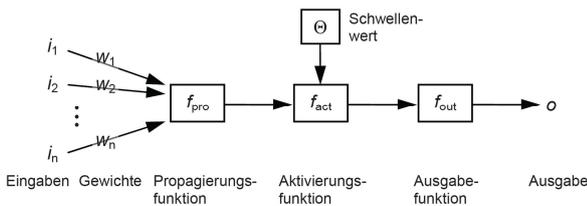


Bild 70: Datenverarbeitung innerhalb eines künstlichen Neurons [LUBA09]

Topologie

In Bild 71 ist beispielhaft ein einzelnes künstliches Neuron sowie ein KNN als Verbund mehrerer Neuronen dargestellt. KNN weisen meist drei oder mehr Schichten auf. Über die Eingangsschicht werden Informationen von außen in das Netzwerk eingegeben, die verdeckten Schichten dienen der Verarbeitung der eingegebenen Informationen und mit Hilfe der Ausgangsschicht werden die verarbeiteten Informationen wieder an die Außenwelt abgegeben. Bei der in Bild 71 dargestellten Struktur handelt es sich um ein sogenanntes Feedforward-Netz, d. h., die Neuronen einer Schicht werden ausschließlich mit den Neuronen der unmittelbar nachfolgenden Schicht verbunden.

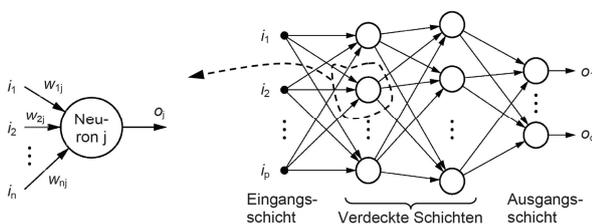


Bild 71: Künstliches neuronales Netz [LUBA09]

Lernprozess

KNN können das Bearbeiten von Aufgaben, z. B. das Lösen von Problemen oder Aufgaben der Schadenserkennung, nur anhand entsprechender Beispiele erlernen. Dazu wird eine ausreichend große Menge von Lerndaten benötigt, welche jeweils durch zusammengehörige Eingangs- und Ausgangsdaten repräsentiert werden. Mit Hilfe dieser Datenpaare werden dem KNN gewünschte Reaktionen auf Eingangsreize aufgezeigt, d. h., es wird vermittelt, welche entsprechenden Ausgangsdaten das Netz produzieren soll, wenn bestimmte Eingangsdaten an das Netz angelegt werden. Im Rahmen des Lernprozesses werden nacheinander die zur Verfügung stehenden Lerndaten an die Eingangs- und Ausgangsschicht des KNN angelegt und dabei durch Anwendung von Optimierungsverfahren die Gewichte der Verbindungen sowie die Schwellenwerte der Neuronen kalibriert, bis das KNN die Zusammenhänge in den Lerndaten mit ausreichender Genauigkeit reproduziert. Häufig wird dazu der Backpropagation-Algorithmus eingesetzt.

Auswertung

Nach Abschluss des Lernprozesses kann das KNN die den Lerndaten zugrunde liegenden Zusammenhänge auf neue ihm unbekannte Daten anwenden. Dazu werden die neuen Daten an die Eingangsschicht angelegt. Das KNN berechnet daraufhin entsprechend der Verbindungsgewichte und Schwellenwerte den Netzausgang.

5.4.3 Schadenserkennung

Ziel

Das Ziel dieser Studie ist eine Klassifikation von Messdaten unter Einsatz von KNN, d. h., die Netze sollen erkennen, ob Messdaten einem ungeschädigten oder einem geschädigten Bauwerkszustand entstammen. Dazu erlernen die KNN zunächst anhand eines Teils der erzeugten Messdaten (Lerndaten), zwischen ungeschädigten und geschädigten Zuständen des in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Brückenmodells zu unterscheiden. Im Anschluss erfolgt die Auswertung der trainierten Netze durch Anlegen der übrigen Messdaten, bei der die KNN die Daten entweder dem ungeschädigten oder dem geschädigten Bauwerkszustand zuordnen.

Topologie

Zur Schadenserkenkung wird ein Feedforward-Netz mit einer verdeckten Schicht eingesetzt. Die Anzahl der Neuronen in der Eingangsschicht beträgt 15 und entspricht der Gesamtanzahl der bei der Erzeugung der Messdaten verwendeten Sensoren zur Neigungs- und Durchbiegungsmessung. Die Anzahl der Neuronen in der Ausgangsschicht beträgt 1. In der verdeckten Schicht hat sich im Rahmen der Studien eine Neuronenanzahl von 3 als ausreichend herausgestellt (Bild 72).

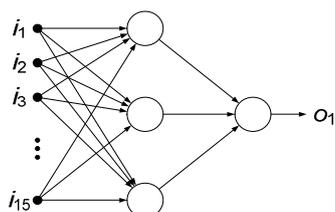


Bild 72: Topologie des zur Schadenserkenkung eingesetzten künstlichen neuronalen Netzes

Lernprozess und Auswertung

Der Lernprozess und die Auswertung des trainierten Netzes basiert auf den zuvor im Rahmen der numerischen Simulationen erzeugten Messdaten. Für jede der drei Simulationen (Schädigungsausmaße 10 %, 25 % und 40 %) wird ein neuronales Netz erzeugt, trainiert und ausgewertet. Dazu wer-

den die je 6480 Messungen der Simulationen (3240 Messungen des ungeschädigten und 3240 Messungen des geschädigten Zustands) entsprechend Bild 73 in mehrere Blöcke aufgeteilt:

Der erste (2160 Messungen des ungeschädigten Zustands) und der dritte Block (2160 Messungen des geschädigten Zustands) repräsentieren die Lerndaten. Während des Lernprozesses werden die Verbindungen zwischen den Neuronen derart kalibriert, dass das Ausgangsneuron eine Ausgabe von 0 erzeugt, wenn Messdaten des ungeschädigten Zustands an die Neuronen der Eingangsschicht angelegt werden, und eine Ausgabe von 1, wenn Messdaten des geschädigten Zustands angelegt werden.

Nach Abschluss des Trainings werden die Messungen des zweiten (1080 Messungen des ungeschädigten Zustands) und des vierten Blocks (1080 Messungen des geschädigten Zustands) nacheinander an die Neuronen der Eingangsschicht angelegt. Für jede Messung wird dabei die Ausgabe des Neurons in der Ausgangsschicht berechnet. In Abhängigkeit davon, ob der Wert der berechneten Ausgabe näher an 0 oder 1 liegt, wird jede Messung entweder eher dem ungeschädigten oder dem geschädigten Zustand zugeordnet. Im Idealfall produziert das Netz demnach für die ersten 1080 Messungen eine Ausgabe von 0 und für die darauffolgenden 1080 Messungen eine Ausgabe von 1.

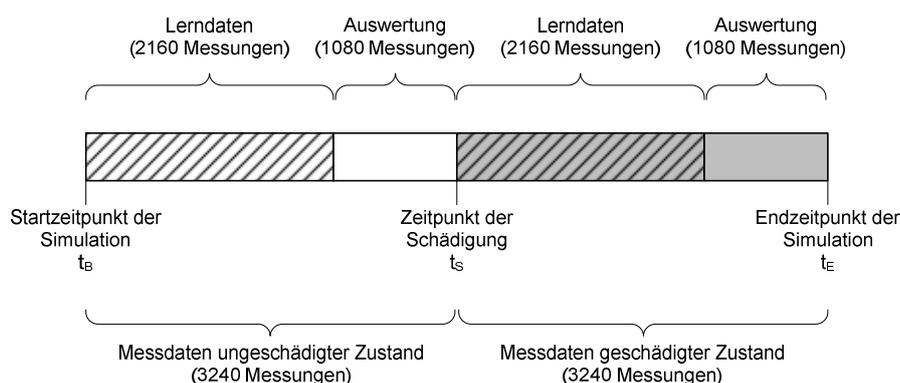


Bild 73: Aufteilung der simulierten Messdaten in Lerndaten und Auswertungsdaten

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung der drei neuronalen Netze hinsichtlich der 1080 Messungen des ungeschädigten und der 1080 Messungen des geschädigten Zustands sind in Bild 74, Bild 75 und Bild 76 dargestellt.

Die Ausgabe des Netzes, welches anhand der Messdaten aus Simulation 1 trainiert wurde, ent-

spricht sowohl für die an die Eingangsschicht angelegten Messgrößen des ungeschädigten Zustands (Messungen 1 bis 1080) als auch für die des geschädigten Zustands (Messungen 1081 bis 2160) einem Wert von etwa 1 (Bild 74). Dies lässt in allen Fällen auf das Vorhandensein eines Schadens schließen. Das Netz kann demnach nicht zwischen dem ungeschädigten und dem geschädigten Zustand unterscheiden.

Die Ausgabe des Netzes aus Simulation 2 entspricht bei Anlegen der Messungen 1 bis 1080 überwiegend einem Wert von etwa 0.2 und bei Anlegen der Messungen 1081 und 2160 einem Wert von etwa 1 (Bild 75). Das bedeutet, dass das Netz in den meisten Fällen richtig erkennt, ob ein Schaden im Tragwerk vorhanden ist (zweite Hälfte des Messdatenumfangs) oder ob das Tragwerk

ungeschädigt ist (erste Hälfte des Messdatenumfangs).

Noch deutlicher sind die Ergebnisse des dritten Netzes (Simulation 3). Hier findet in der ersten Hälfte des Messdatenumfangs eine ausschließlich korrekte Zuordnung zum ungeschädigten, in der zweiten Hälfte eine ausschließlich korrekte Zuordnung zum geschädigten Zustand statt.

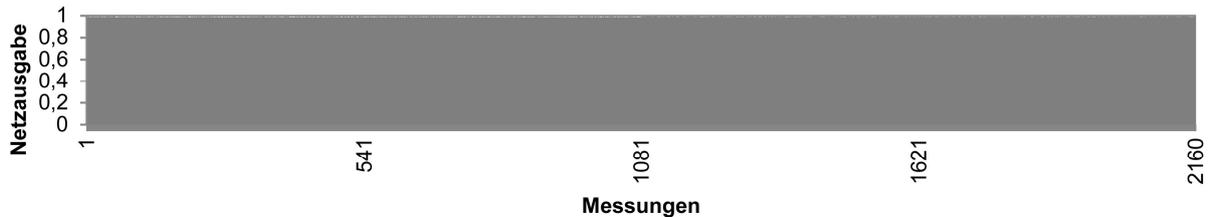


Bild 74: Netzausgabe für Daten aus Simulation 1 (Steifigkeitsreduktion von 10 %, Eintritt des Schadens bei Messung 1081)

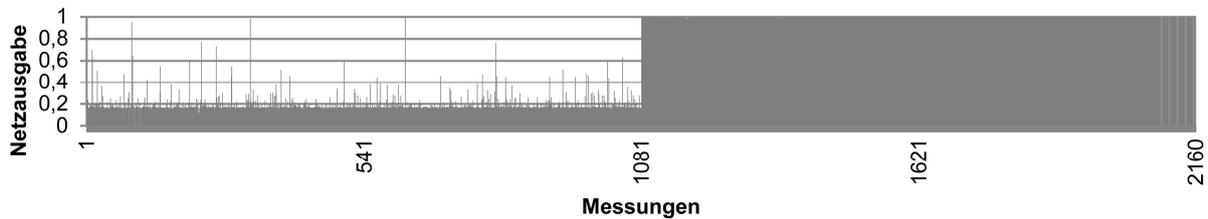


Bild 75: Netzausgabe für Daten aus Simulation 2 (Steifigkeitsreduktion von 25 %, Eintritt des Schadens bei Messung 1081)

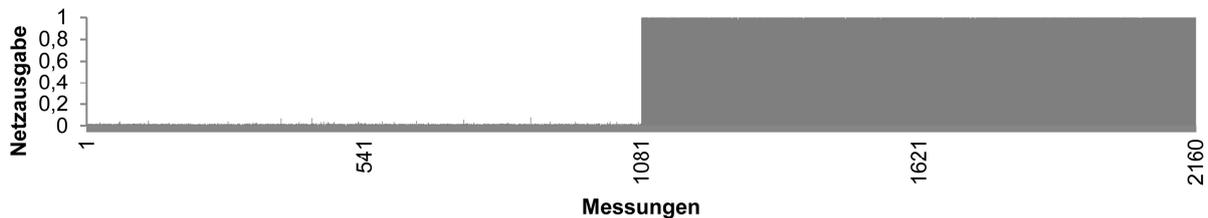


Bild 76: Netzausgabe für Daten aus Simulation 3 (Steifigkeitsreduktion von 40 %, Eintritt des Schadens bei Messung 1081)

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der hier durchgeführten Studie wurde gezeigt, dass sich neuronale Netze grundsätzlich dazu eignen, die Messgrößen ungeschädigter Zustände von denen geschädigter Zustände zu unterscheiden und den entsprechenden Zuständen zuzuordnen.

Anhand der Ergebnisse kann verallgemeinert werden, dass die Genauigkeit der Netze (d. h. die Erzeugung einer Ausgabe von 0 für Messdaten aus den ungeschädigten und einer Ausgabe von 1 für Messdaten aus den geschädigten Zuständen) mit steigendem Schädigungsmaß zunimmt. Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass für eine eindeutige Zuordnung von Messungen zum ungeschädigten bzw. zum geschädigten Zustand mindestens eine Steifigkeitsreduktion von etwa 25 % vorhan-

den sein muss. An dieser Stelle wird angemerkt, dass ein Steifigkeitsabfall bei einem Stahlbetonbauteil nicht gleichbedeutend ist mit einer Abnahme der Tragfähigkeit. Dies wird anhand des Steifigkeitsabfalls eines Stahlbetonbauteils beim Übergang vom ungerissenen in den gerissenen Zustand deutlich, welcher – je nach Beanspruchung und statischem System – bis zu 70 % und mehr betragen kann. Ein starker Steifigkeitsabfall stellt also nicht zwangsläufig einen Schaden dar. Im Rahmen weiterer Studien sollte beispielsweise durch Variieren der Topologie des neuronalen Netzes oder durch die Anwendung alternativer Aktivierungsfunktionen evaluiert werden, ob sich auch Schäden mit einem geringeren Ausmaß erkennen lassen. Ebenso sollte die Sensitivität weiterer Messparameter, z. B. Dehnungen oder Schwingungen, hinsichtlich der Schadenserken- nung untersucht werden.

Es ist anzumerken, dass im Rahmen der präsentierten Studien einige vereinfachende Annahmen getroffen wurden:

- Die Messdaten wurden anhand eines Stabwerkmodells gewonnen, welches eine Vielzahl von Vereinfachungen aufweist (z. B. ideale Querschnittsabmessungen und Lagerungsbedingungen sowie linear-elastisches Materialverhalten).
- Die Messdaten sind weder durch Messfehler noch durch Messungenauigkeiten verunreinigt (Idealbedingungen).
- Fahrbahnebenheiten wurden vereinfacht durch die Einführung dynamischer Vergrößerungsfaktoren berücksichtigt. Tragwerkschwingungen wurden vernachlässigt.
- Der untersuchte Schaden wurde durch Reduzierung der Biegesteifigkeit des Trägerquerschnitts in einem vorgegebenen Bereich abgebildet.

Bei zukünftigen numerischen Untersuchungen sollten das tatsächliche Verhalten von Brückenbauwerken und Schäden sowie die tatsächlich auftretenden Bedingungen besser berücksichtigt werden. Abschließend sollte die Verifizierung und Weiterentwicklung des Konzeptes an „echten“ Bauwerken erfolgen.

6 Fortführung des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“

Die Entwicklung „intelligenter Bauwerke“ erfordert zusätzlich zu den zum heutigen Zeitpunkt geplanten bzw. bereits abgeschlossenen Teilprojekten weitere Forschungstätigkeit. Diese wird anhand von konkreten Projektvorschlägen dargelegt, welche entsprechend Bild 77 in die Konzeption des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ eingegliedert werden.

Bereich M 1.1: „Einwirkungen und Eigenschaften“

Teilprojekt 2: „Zustandsbestimmung von Brückenbauwerken als Grundlage der Bauwerksüberwachung“

Vor der Einrichtung einer Bauwerksüberwachung ist eine Zustandsbestimmung des zu überwachen- den Bauwerks erforderlich. Dabei sollten zunächst

die Bauwerksgeometrie, die Tragwerkseigenschaften (d. h. Tragwerkskonzept, Vorspannsystem, Bewehrungsführung usw.), die Eigenschaften der eingesetzten Materialien sowie mögliche aufgetretene Schädigungen erfasst werden. Hier kann der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren oder die Durchführung statischer oder dynamischer Belastungs- bzw. Schwingversuche erforderlich sein.

Im Rahmen dieses Teilprojektes ist zu erarbeiten, welche Voruntersuchungen bzw. Prüfungen im Einzelnen durchzuführen sind, um zuverlässige Systemmodelle zur Bewertung von Brückenbauwerken erstellen zu können. Ziel ist es, durch Minimierung von Unsicherheiten in den Bauwerksinformationen möglichst belastbare Aussagen zum Bauwerkszustand als Grundvoraussetzung für eine zuverlässigkeitsbasierte Bewertung zu gewinnen. Die im Rahmen der Voruntersuchungen gewonnenen Informationen dienen bei der anschließenden Bauwerksüberwachung als Referenzdaten (Ausgangszustand), mit Hilfe derer die Erkennung von neu aufgetretenen Schäden ermöglicht wird.

Bei der Projektbearbeitung sollten insbesondere die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Welche zerstörungsfreien Prüfverfahren sollten im Rahmen einer Zustandsbestimmung von Brückenbauwerken eingesetzt werden? Dabei sollten insbesondere die am häufigsten bei Betonbrücken auftretenden Schädigungen bzw. Schwachstellen behandelt werden. Wie lassen sich die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung auf das Brückenmodell bzw. das Systemmodell übertragen?
- Wann ist der Einsatz bzw. die Kalibrierung von FE-Modellen sinnvoll und welche Parameter sollten bei einer Modelladaptation angepasst werden? Ist die FE-Modellanpassung in Folge statischer oder dynamischer Bauwerksversuche (Belastungs- oder Schwingversuche) durchzuführen? Wie sind die Versuche zu konzipieren? Welche Daten sind während der Versuche zu erfassen? Welche Art der Anregung ist bei Schwingversuchen (erzwungene oder ambiente Anregung) zu wählen und wie wird die Wahl durch die Bauwerkslänge bzw. die Bauwerkssteifigkeit beeinflusst? Wie lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse weiterverarbeiten und auf das Brückenmodell bzw. das Systemmodell übertragen?

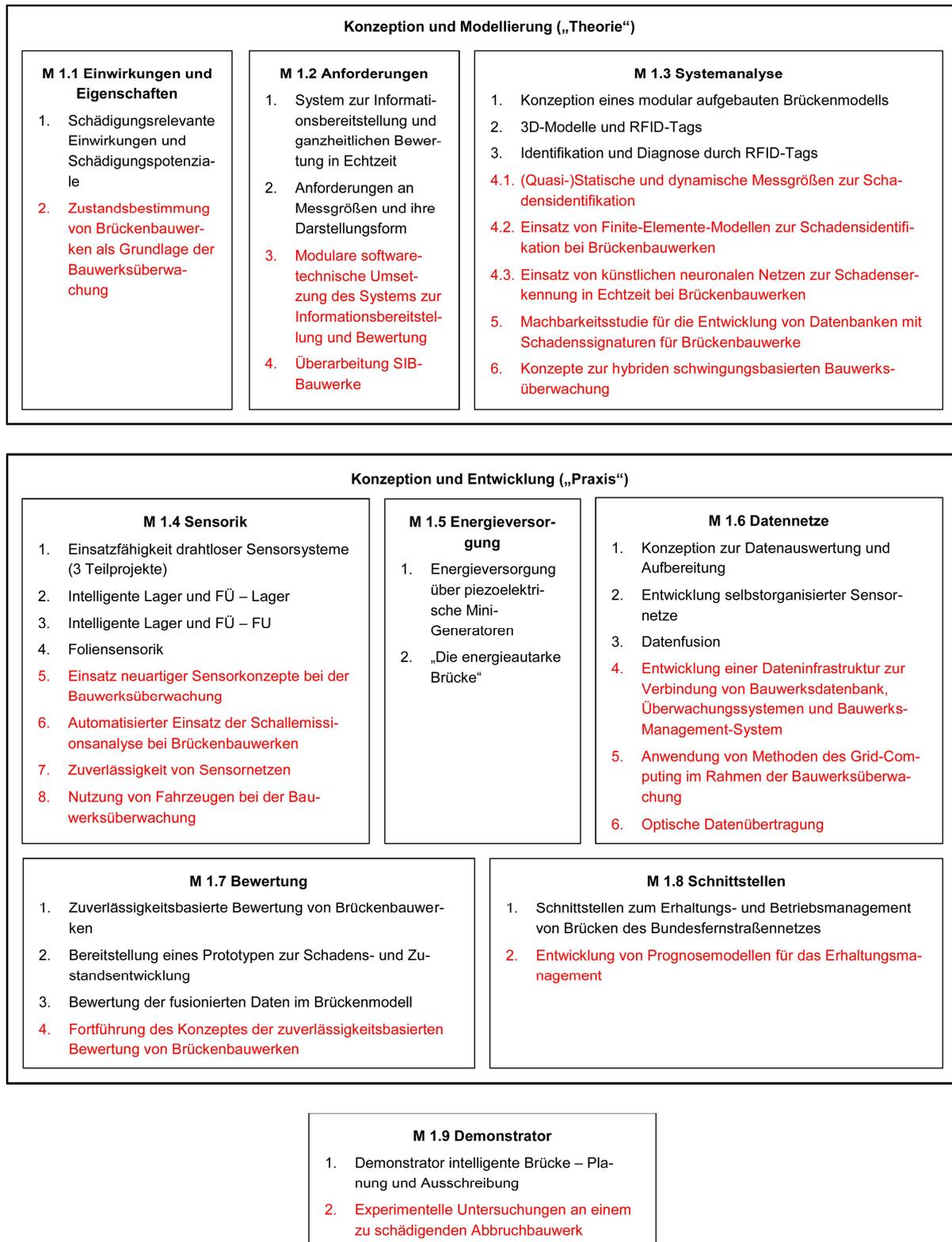


Bild 77: Konzeption des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ (neue Projektvorschläge rot)

Bereich M 1.2: „Anforderungen“

Teilprojekt 3: „Modulare softwaretechnische Umsetzung des Systems zur Informationsbereitstellung und Bewertung“

Die im Rahmen des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ entwickelten Konzepte zur Überwachung von Brückenbauwerken sollten gegen Ende der gesamten Bearbeitung softwaretechnisch implementiert werden. Die zu entwickelnde Plattform sollte beispielsweise die folgenden Funktionalitäten bereitstellen:

- Visualisierung des Bauwerks,
- Management des Sensornetzes, d. h. Aktivierung und Deaktivierung von Sensoren sowie Darstellung des Zustands der Sensoren (z. B. verbleibende Ladung der Akkus drahtloser Messeinheiten),
- Vorverarbeitung (Filterung, Nulllinienkorrektur, Mittelwertbildung, statistische Analysen etc.) und Visualisierung der von den Sensoren erfassten Messdaten,
- Einbindung der zur Informationsgewinnung vorgesehenen nichtphysikalischen und/oder physikalischen Modelle sowie der erforderlichen Methoden zum Training, zur Adaption und zur Auswertung mit Möglichkeiten zur Darstellung der extrahierten Informationen (z. B. Darstellung von Schäden anhand des visualisierten Bauwerks),
- Durchführung einer Zuverlässigkeitsbewertung der gewonnenen Informationen mit Darstellung kritischer Bauwerksbereiche,
- Anbindung an die Bauwerksdatenbank zur Aktualisierung der Bauwerksdaten,
- Möglichkeiten zur Definition von Schwellwerten für sämtliche Messgrößen, bei deren Überschreitung Warnmeldungen ausgegeben werden.

Die Software sollte modular aufgebaut sein, sodass sie an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Bauwerke angepasst werden kann.

Um einen Zugriff durch die Straßenbauverwaltung o. ä. zu ermöglichen, sollte das entwickelte System über eine Internetverbindung steuerbar sein.

Es wird angemerkt, dass vor der Ausschreibung des Teilprojektes eine Feinkonzeption für den Aufbau „intelligenter Bauwerke“ erarbeitet werden sollte, in der sämtliche im Rahmen des Themenschwerpunkts erarbeiteten Ansätze und Ergebnisse zusammengeführt werden sollten.

Teilprojekt 4: „Überarbeitung SIB-Bauwerke“

Um SIB-Bauwerke langfristig an eine vollständig vernetzte Dateninfrastruktur (siehe Bereich M 1.6, Projekt „Entwicklung einer Dateninfrastruktur zur Verbindung von Bauwerksdatenbank, Überwachungssystemen und Bauwerks-Management-System“) anbinden, und um moderne Methoden sinnvoll bei der Bauwerksprüfung einsetzen zu können, sollte das Softwaresystem grundlegend überarbeitet werden.

Bei der Überarbeitung sollten die folgenden Aufgabenstellungen behandelt:

- Anpassung von SIB-Bauwerke an die hinsichtlich der Eingliederung von Daten aus der Bauwerksüberwachung (Messdaten, Informationen wie z. B. Schäden, Ergebnisse aus der Bewertung) zu erweiternde Bauwerksdatenstruktur (siehe auch Kapitel 4.2.4).
- Entwicklung einer Internetanbindung zur Integration von SIB-Bauwerke in die o. g. Dateninfrastruktur.
- Einbindung von 3D-Modellen der Bauwerke zur visuellen Darstellung ihrer Eigenschaften sowie möglicher Schäden.
- Entwicklung von Schnittstellen, mit Hilfe derer sich z. B. Tablet-PCs, Digitalkameras sowie sonstige bei der Bauwerksprüfung eingesetzte elektronische Hilfsmittel vollautomatisch mit SIB-Bauwerke verknüpfen lassen. Es erscheint sinnvoll, dass etwa Fotos, die ein Bauwerksprüfer aufnimmt, unmittelbar an SIB-Bauwerke übermittelt und dem 3D-Modell an der entsprechenden Stelle angeheftet werden. Dabei könnte z. B. ein GPS-Empfänger, den der Prüfer mit sich führt, zur Bestimmung des Aufnahmeortes genutzt werden. Ebenso möglich ist die darauffolgende Anwendung von Methoden der Mustererkennung, um bestimmte Schäden auf den Fotos erkennen und kategorisieren zu können.
- Erarbeitung von Möglichkeiten und Darstellungsformen zur Dokumentation der Bauwerkshistorie.

Bereich M 1.3: „Systemanalyse“

Teilprojektkombination 4

Die im Folgenden aufgeführten Teilprojekte können sowohl als Einzelprojekte als auch zusammengefasst ausgeschrieben werden.

Teilprojekt 4.1: „(Quasi-)Statische und dynamische Messgrößen zur Schadensidentifikation“

Bei der globalen Bauwerksüberwachung werden die an einer Brücke erfassten globalen statischen oder dynamischen Tragwerksreaktionen zur Identifikation von Unregelmäßigkeiten im Tragverhalten und möglichen Bauwerksschäden herangezogen. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile beider Vorgehensweisen beschrieben:

- „Echte“ statische Größen lassen sich im Rahmen von statischen Belastungsversuchen ermitteln. Werden Dehnungen, Durchbiegungen, Neigungen o. ä. dagegen während des Betriebs eines Bauwerks erfasst, so handelt es sich dabei allenfalls um quasi-statische Reaktionen. Statische (bzw. quasi-statische) Strukturantworten lassen sich leicht messen und reagieren im Allgemeinen sensibler auf Schädigungen als Tragwerksschwingungen. Bei der Dauerüberwachung treten jedoch Schwierigkeiten in Folge der dynamischen Vergrößerung der statischen Lasten auf Grund von Fahrbahnebenheiten usw. auf.
- Dynamische Tragwerksreaktionen, d. h. die Eigenschaften der Bauwerksschwingungen (Eigenfrequenzen, Eigenformen), lassen sich sowohl bei dynamischen Bauwerksversuchen als auch während einer Dauerüberwachung (ambiente Schwingungen) messen. Durch Anwendung geeigneter Verfahren können die Messdaten aus dem Zeitbereich in den Frequenz- oder Modalbereich transformiert und weiter interpretiert werden. Die Eigenschaften von Bauwerksschwingungen werden in starkem Maße von Temperaturbeanspruchungen beeinflusst und reagieren im Allgemeinen wenig sensibel auf lokale Schädigungen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sind die folgenden Aspekte herauszuarbeiten:

- Welche für Brücken relevanten Schädigungen lassen sich insbesondere durch statische bzw. quasi-statische, welche durch dynamische Tragwerksreaktionen identifizieren? Wo liegen die Möglichkeiten und Grenzen beider Vorgehensweisen? Welche Schadensausmaße sind für eine erfolgreiche Detektion erforderlich? Welche Algorithmen zur Schadenserkenkung lassen sich einsetzen? Weiterhin ist zu charakterisieren, welche Messgrößen besonders zuverlässig erfasst werden können. Bei der Messung von Schwingungen muss geklärt werden, wie viele Eigenfrequenzen bzw. Eigenformen für die Schadenserkenkung herangezogen werden sollten bzw. müssen.

- Wie können (quasi-)statische Tragwerksreaktionen im Rahmen einer Dauerüberwachung zur Identifikation von Verkehrslasten genutzt werden?
- Wie lassen sich (quasi-)statische und dynamische Strukturantworten bei der Schadenserkenkung kombinieren, sodass ein größtmöglicher Informationsgewinn erzielt werden kann?

Teilprojekt 4.2: „Einsatz von Finite-Elemente-Modellen zur Schadensidentifikation bei Brückenbauwerken“

Die Kalibrierung von Finite-Elemente-(FE-)Modellen (Model-Updating oder Modelladaption) ist ein häufig praktiziertes Vorgehen bei der Überwachung von Brückenbauwerken und insbesondere bei der Identifikation von Schäden, die außerhalb der bekannten Hot Spots auftreten. Dazu wird ein FE-Baseline-Modell des Bauwerks erstellt, welches hinsichtlich der unbekanntenen Modelleigenschaften parametrisiert wird. Die unbekanntenen Parameter werden im Anschluss derart modifiziert, dass die statischen oder dynamischen Tragwerksreaktionen des Modells mit den am Bauwerk gemessenen Größen übereinstimmen.

Im Zusammenhang mit Problemen der Modelladaption treten die folgenden Schwierigkeiten auf, zu denen im Rahmen dieses Projektes Lösungskonzepte erarbeitet werden sollten:

- Was muss bei der statischen und dynamischen Modellierung von Brückenbauwerken mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode beachtet werden? Wie sollten die Modelle parametrisiert werden, d. h., welche Eigenschaften (Auflagersteifigkeiten, Anschlüsse, Gelenke, Biegesteifigkeiten, Schädigungen usw.) sollten im Rahmen der Modelladaption identifiziert werden?
- Welche Schädigungsmodelle lassen sich in das FE-Modell integrieren, sodass auch die Eigenschaften dieser Schäden im Rahmen der Modelladaption erkannt werden können?
- Wie lassen sich die Einflüsse der Umgebungs- und Bauwerkstemperatur bei der Modelladaption behandeln?

Teilprojekt 4.3: „Einsatz von nichtphysikalischen Modellen zur Schadenserkenkung in Echtzeit bei Brückenbauwerken“

Mit Hilfe nichtphysikalischer Modelle kann das zu überwachende Bauwerk ohne die Kenntnis physi-

kalischer Zusammenhänge und ausschließlich unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Messdaten abgebildet werden. Die Entwicklung nichtphysikalischer Modelle erfolgt im Rahmen eines Trainings durch die Anwendung überwachter oder unüberwachter Lernverfahren. Je nach angewendetem Lernverfahren lassen sich die trainierten Modelle zur Ausreißeranalyse, zur Klassifikation oder zur Regressionsanalyse einsetzen. Auf Grund der kurzen Rechendauer bei der Auswertung lassen sich nichtphysikalische Modelle insbesondere zur Echtzeit-Schadenserkennung einsetzen.

Im Rahmen dieses Projektes ist Folgendes zu untersuchen:

- Welche nichtphysikalischen Modelle (z. B. künstliche neuronale Netze, Wavelet-Analyse, Support Vector Machines usw.) eignen sich insbesondere zur Erkennung von Schäden an Brückenbauwerken?
- Welche Lernverfahren lassen sich anwenden und welche Einsatzmöglichkeiten ergeben sich in Abhängigkeit der Lernverfahren?
- Welcher Lerndatenumfang ist für eine zuverlässige Anwendung erforderlich?
- Temperaturbeanspruchungen üben häufig einen großen Einfluss auf die Tragwerksreaktionen und demnach auch auf die Messgrößen aus. Wie lassen sich Temperaturmessungen (Lufttemperaturen, Bauwerkstemperaturen) in das Training und die Auswertung der Modelle einbinden?
- Die zu einem Zeitpunkt gewonnenen Messdaten lassen sich zu einem Vektor zusammenfassen, dessen Dimensionalität der Anzahl der eingesetzten Sensoren entspricht. Durch eine Reduktion der Dimensionalität des Messdatenvektors lässt sich der Umfang der für das Training der Modelle erforderlichen Lerndaten und damit letztendlich der Trainingsaufwand mindern. Es ist zu untersuchen, welche Techniken zur Dimensionalitätsreduktion eingesetzt werden können.

Teilprojekt 5: „Machbarkeitsstudie für die Entwicklung von Datenbanken mit Schadenssignaturen für Brückenbauwerke“

Ein bei rotierenden Maschinen häufig und erfolgreich angewandtes Verfahren zur Schadenserkennung basiert auf dem Vergleich von aktuell an einer Maschine gewonnenen Schwingungsdaten mit entsprechenden in Datenbanken hinterlegten Daten, die an unterschiedlich geschädigten Maschinen beobachtet wurden (Schadenssignaturen,

siehe auch Kapitel 3.6). Diese Vorgehensweise ist möglich, da sich die meisten rotierenden Maschinen in ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten sehr ähneln, und außerdem nur durch eine kleine Anzahl möglicher Schäden an wenigen möglichen Orten beeinträchtigt sein können. Zudem sind rotierende Maschinen meist an vor Temperatur- und Witterungseinflüssen geschützten Standorten aufgestellt.

Im Rahmen dieses Projektes soll die Übertragbarkeit des vorgestellten Verfahrens auf die Schadenserkennung im Brückenbau überprüft werden. Die Projektbearbeitung erfordert zwingend die Verfügbarkeit von Schwingungsmessdaten, die an verschiedenen geschädigten Brücken gewonnen wurden. Während der Projektlaufzeit sollten insbesondere die folgenden Fragestellungen bearbeitet werden:

- Welche Schäden üben einen ausreichend großen Einfluss auf die globalen dynamischen Kennwerte einer Struktur (Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfung) aus, sodass diese anhand der Analyse der Schwingungen erkannt werden können? Können für die unterschiedlichen Schäden spezifische Muster (Signaturen) in den Daten festgestellt werden? Die zu untersuchenden Schäden sollten im Vorfeld in Zusammenarbeit mit der BAST definiert werden.
- Welche Stufe der Schadenserkennung (Detektion, Lokalisation, Klassifikation) ist für welche Schäden möglich?
- Welche Methoden der Mustererkennung lassen sich einsetzen, um an einem überwachten Bauwerk erfasste Schwingungsmuster mit den entsprechenden Mustern geschädigter Bauwerke vergleichen und auf diese Weise Schäden erkennen zu können?

Teilprojekt 6: „Konzepte zur hybriden schwingungsbasierten Bauwerksüberwachung“

Methoden der schwingungsbasierten Schadenserkennung basieren auf der Annahme, dass Schädigungsprozesse entweder die Steifigkeit, die Masse oder die Dämpfungsbeiwerte und damit auch das Schwingungsverhalten einer Struktur beeinflussen. Im Umkehrschluss können Schäden demnach durch die Analyse und Interpretation gemessener Bauwerksschwingungen erkannt werden. Die Identifizierbarkeit eines Schadens ist im Wesentlichen abhängig vom Einfluss des Schadens auf die untersuchten Schwingungen. Globale niederfrequente Bauwerksschwingungen weisen eine große Wellenlänge auf und reagieren daher meist unempfindlich auf lokale Schädigungen. Um Schäden

anhand globaler Schwingungen erkennen zu können, müssen diese ein entsprechendes Ausmaß (Schwere) oder eine entsprechende räumliche Ausdehnung aufweisen. Zur Feststellung von Schäden geringer Größe muss die Struktur zu Schwingungen mit kleiner Wellenlänge angeregt werden. Dies ist z. B. durch Einsatz piezoelektrischer Bauteile (Aktuatoren/Sensoren in Form von Piezo-Patches) möglich, die auf das Bauwerk aufgeklebt werden, und mit denen ein lokal eingegrenzter Bauwerksbereich gezielt in hochfrequente Schwingungen im Ultraschallbereich versetzt werden kann (Active Sensing). Durch Analyse der von den gleichen Piezo-Patches erfassten Schwingungsantworten können selbst kleine Schädigungen im Innern des Bauteils erkannt werden, allerdings ist eine Schadenserkenkung nur in unmittelbarer Umgebung der Patches möglich.

Durch die Kombination globaler und lokaler schwingungsbasierter Überwachungsverfahren können die Vorteile beider Ansätze genutzt werden: Während Active Sensing-Verfahren an denjenigen Stellen eingesetzt werden können, an denen die Schädigungswahrscheinlichkeit am größten ist (Hot Spots), können globale Verfahren zur Erkennung von Schäden in den übrigen Bereichen der Struktur dienen. Als globales Verfahren sollte eine Methode auf Grundlage der Finite-Elemente-Modelladaption zum Einsatz kommen.

Die Projektbearbeitung sollte auf die Beantwortung der folgenden Fragestellungen abzielen:

- Inwieweit lassen sich Active Sensing-Methoden bei massiven Stahl- und Spannbetonbauwerken einsetzen und wo liegen die Grenzen der Verfahren? Neben drahtgebundenen sind auch drahtlose Techniken zu untersuchen und entsprechende Konzepte zu erarbeiten. Bei welchen Schädigungen können Active Sensing-Methoden eingesetzt werden? Wie müssen die Eigenschaften der Anregung (z. B. Frequenz) zur Erkennung unterschiedlicher Schäden eingestellt werden? Welche Reichweiten sind mit den Aktuatoren/Sensoren möglich? Welchen Einfluss hat die Bauwerksstruktur (Querschnittsform, Querschnittsabmessungen) auf die Dichte des Aktuator-/Sensornetzes?
- Welche Schäden sollten demgegenüber mit globalen Verfahren erkannt werden? Wie lässt sich das FE-Modell für die Adaption kalibrieren? Wie sollte die Adaption erfolgen?
- Wie lassen sich beide Verfahren sinnvoll kombinieren? Z. B. können drahtlose in einem Hot Spot angeordnete Aktuatoren/Sensoren erst dann aktiviert werden, wenn das globale Überwachungsverfahren eine Unregelmäßigkeit erkannt hat. Umgekehrt können die bei der lokalen Überwachung gewonnenen Informationen

bei der globalen Bauwerksüberwachung weiterverarbeitet werden, z. B. durch Eingrenzung des möglichen Wertebereichs von zu adaptierenden Parametern des FE-Modells. Welche weiteren Mechanismen sind sinnvoll und wie lassen sich diese automatisiert umsetzen?

Bereich M 1.4: „Sensorik“

Teilprojekt 5: „Einsatz neuartiger Sensorkonzepte bei der Bauwerksüberwachung“

Durch den Einsatz neuartiger Sensorkonzepte, die in anderen Ingenieurdisziplinen zur Erfassung von Messgrößen eingesetzt werden, lassen sich auch bei der Überwachung von Brückenbauwerken wertvolle Informationen zur Bestimmung von Einwirkungen und Widerständen erfassen. Bei den Technologien handelt es sich im Einzelnen um:

- Satellitengestützte Radarinterferometrie,
- Nutzung von Kohlefasern als Sensoren,
- Nanotube-Materialien mit sensorischen und aktuatorischen Fähigkeiten,
- faseroptische Sensorik (z. B. mehrradrige Faser-Bragg-Gittersensoren).

Im Rahmen dieses Projektes sollten die folgenden Fragen geklärt werden:

- Wie lassen sich die o. g. Konzepte sinnvoll im Rahmen der Überwachung von Brückenbauwerken einsetzen? Welche Kosten-Nutzen-Verhältnisse sind möglich?
- Welche Voraussetzungen müssen zum Einsatz der Sensorik erfüllt sein?
- Wie können die Messdaten übermittelt und weiterverarbeitet werden? Wie können Fusion und Analyse der Daten erfolgen?

Teilprojekt 6: „Automatisierter Einsatz der Schallemissionsanalyse bei Brückenbauwerken“

Die Schallemissionsanalyse ist ein häufig eingesetztes Verfahren zur Erkennung von Schädigungen im Innern von Bauteilen. Schallemissionen sind hochfrequente mechanische Schwingungen im Ultraschallbereich, die bei der Entstehung von Rissen, bei Reibungsprozessen, plastischen Verformungen, Delamination usw., jedoch auch beim Auftreten von Spanngliedbrüchen hervorgerufen werden, und die sich mit Hilfe von Piezosensoren erfassen lassen. Da unterschiedliche Schädigungsprozesse unterschiedliche Emissionen verursachen, lassen sich die Ursachen durch Interpre-

tation der gemessenen Signale feststellen. Durch die Analyse der von mehreren Sensoren zeitgleich erfassten Messgrößen lässt sich die Emissionsquelle lokalisieren.

Im Rahmen von Laborversuchen hat sich die Schallemissionsanalyse bereits vielfach als wirkungsvolle Möglichkeit zur Erkennung bestimmter Schädigungsprozesse erwiesen. Um jedoch das Verfahren bei einer automatisierten Bauwerksüberwachung zuverlässig einsetzen zu können, sind folgende Untersuchungen erforderlich:

- Schwierigkeiten beim Einsatz des Verfahrens im Beton- und Betonbrückenbau bereitet die Unterscheidung von Emissionen, die von Schäden ausgehen, und unbedenklichen Signalen, die durch Umwelt- und Betriebseinflüsse wie z. B. Einwirkung von Wind, Temperatur und Verkehr hervorgerufen werden. Hierzu müssen Datenbanken aufgebaut werden, die die entsprechenden Charakteristiken der von relevanten Schäden ausgehenden Signale enthalten, sodass diese in den aufgezeichneten Messdaten identifiziert werden können.
- In Abhängigkeit der relevanten Schäden müssen Einsatzkonzepte entwickelt werden, wobei ebenso die Anzahl und die Anordnung der Sensoren am Bauwerk berücksichtigt werden muss.
- Es ist zu untersuchen, wie die Schallemissionsanalyse in Kombination mit drahtlosen Datenübertragungstechniken eingesetzt werden kann. Da auf Grund der hohen Abtastfrequenzen große Datenmengen anfallen, die nur mit einem entsprechenden Energieaufwand übertragen werden können, sollte hier unter anderem die Erarbeitung von geeigneten Datenerfassungsstrategien im Mittelpunkt stehen. Ebenso sind Algorithmen zur Gewinnung von Informationen aus den Messdaten zu entwickeln, die sich zur Reduzierung der zu übertragenden Datenmenge in die drahtlosen Messeinheiten integrieren lassen.
- Bisher verfügbare Methoden zur automatisierten Ersteinsatzbestimmung von Schallemissionen (Autopicker) weisen insbesondere bei gestörten Signalen Schwächen auf. Es ist zu untersuchen, wie sich die automatisierte Ersteinsatzbestimmung von Schallemissionen verbessern lässt. Ein möglicher Ansatz ist die Einbindung von Methoden des Soft Computing.
- Durch die langen Laufwege der Schallemissionen in Brücken können neben den häufig untersuchten Primärwellen (P-Wellen) auch die Sekundärwellen (S-Wellen), ggf. ebenso Oberflächenwellen, erfasst und für die Schadenserkenkung herangezogen werden. S-Wellen werden weniger stark durch Beton gedämpft und bieten daher Potential bei der Verbesserung

der Lokalisierung von Emissionsquellen. Die Nutzung von S-Wellen zur Schadenserkenkung ist bislang nur unzureichend untersucht worden.

Die entwickelten Konzepte und Methoden sollten zur Berücksichtigung der tatsächlichen Umgebungsbedingungen an realen Brückenbauwerken verifiziert werden.

Teilprojekt 7: „Zuverlässigkeit von Sensornetzen“

Bei der Bauwerksüberwachung beruht die Erkennung von Schäden auf der Analyse der mit Hilfe von Sensornetzen erfassten Messgrößen. Aufgrund dessen kann nicht ausgeschlossen werden, dass von fehlerhaften Sensoren übermittelte Daten zu falschen Schadensmeldungen führen. Um Fehlalarme und ggf. damit verbundene Maßnahmen (z. B. eine daraufhin initiierte außerordentliche Bauwerksprüfung oder gar eine Sperrung des Bauwerks) zu vermeiden, sind zuverlässige Sensornetze erforderlich.

Die Zuverlässigkeit von Sensoren kann durch verschiedene Ansätze evaluiert und überwacht werden. Die einfachste (jedoch auch kostenaufwändigste) Möglichkeit ist die Nutzung von Redundanz, z. B. in Form von paarweise eingebauten Sensoren. Komplexere Ansätze, die im Bereich der Prozessmesstechnik angewendet werden, sind (1) die Prozesskopplung bzw. das Einbringen von Vor- und Erfahrungswissen durch den Anwender oder (2) die interne Überwachung im autarken Sensor, die im Regelfall durch den Sensorhersteller implementiert wird (siehe auch Kapitel 4.1.3).

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung von Konzepten, anhand derer sich die Zuverlässigkeit von an Brückenbauwerken installierten Sensornetzen verbessern lässt. Dabei ergeben sich die folgenden Fragestellungen:

- Wie lassen sich homogene oder diversitäre Redundanz, d. h. unter Verwendung des gleichen oder eines anderen Messprinzips, effektiv und möglichst kostengünstig im Rahmen der Überwachung von Brückenbauwerken einsetzen? Wie lässt sich im Falle eines Sensorausfalls sicherstellen, dass das Sensornetz dennoch ausreichend viele Informationen zur Erkennung von Schäden liefert? Wie kann eine derartige Optimierung der Sensorplatzierung erreicht werden? Hierbei sind ebenso Lösungen für drahtlose Sensornetze zu erarbeiten, z. B. sollten aus Gründen der Energieeinsparung nicht immer sämtliche redundante Sensoren einer Messstelle zeitgleich, sondern dem Rotati-

onsprinzip folgend zur Datenerfassung herangezogen werden.

- Wie lassen sich die o. g. Ansätze aus der Prozessmesstechnik, d. h. Prozesskopplung, Einbringen von Vor- und Erfahrungswissen sowie interne Überwachung im autarken Sensor, aus dem Bereich der Überwachung von Kernkraftwerken sowie aus dem Automobilbau (siehe Kapitel 3.5 und 3.8) zur Validierung der von den Sensoren übermittelten Messgrößen auf den Brückenbau übertragen?
- Welche weiteren Ansätze zur Überprüfung der erfassten Messgrößen bzw. Steigerung der Zuverlässigkeit, z. B. die Feststellung von Korrelationen in den Messdaten, sind im Brückenbau sinnvoll?
- Lassen sich ambiante Schwingungen von Brückenbauwerken mit Hilfe mit der vorhandenen und nutzbaren Fahrzeugsensorik erfassen?
- Erarbeitung von Konzepten zum Aufbau von verteilten Sensornetzen durch Nutzung der Sensor- und Kommunikationstechnik in modernen Fahrzeugen, bei denen Kraftfahrzeuge als Sensor, Datenspeicher und zur Datenübertragung genutzt werden.
- Wie können die bei der Nutzung der in den Fahrzeugen vorhandenen Sensorsysteme anfallenden großen Datenmengen durch eine Vorverarbeitung oder Filterung reduziert und fusioniert werden?
- Ein wichtiges Kriterium für die Durchsetzung eines solchen Vorhabens ist der Datenschutz. Mit welchen Konzepten lässt sich dieser erreichen?

Teilprojekt 8: „Nutzung von Fahrzeugen bei der Bauwerksüberwachung“

Die Nutzung der Sensordaten aus Bordsystemen moderner Fahrzeuge in Car-as-Sensor-Konzepten hat großes Potential für die Zustandserfassung bei Infrastrukturbauwerken. Moderne Fahrzeuge sind mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, mit denen Parameter für zahlreiche Sicherheits- und Komfortsystemen erfasst werden. Per Funk oder durch stationäres Auslesen geloggtter Daten könnten nicht nur Informationen wie Zeitpunkt, Fahrzeugposition, Geschwindigkeit und Gewicht, sondern auch Daten von Beschleunigungsaufnehmern des ESP bzw. des Airbag-Systems oder von Gyrosensoren und Wegaufnehmern von adaptiven Fahrwerken übermittelt werden. Diese Informationen wiederum können möglichen Auswertungen in Form von aktuellen automatischen Verkehrszählungen dienen, aus denen sich letztendlich auch die Größe der Beanspruchungen auf die Infrastruktur ableiten ließe. Ebenso möglich erscheint die Erfassung und Bewertung des Zustands von Brückenbauwerken, indem das globale Tragwerksverhalten anhand einer großen Anzahl von Eingangsgrößen und Messreihen analysiert wird.

Eine entsprechende Projektausschreibung sollte die folgenden Aufgaben- bzw. Fragestellungen beinhalten:

- Herausarbeiten von möglichen Anwendungen und Entwicklung von Prüfungs- bzw. Überwachungsmethoden, für die die Vielzahl der Messgrößen herangezogen werden kann.
- Konzeption von Bewertungs- und Analyseverfahren, die Vorhersagen über die Entwicklung der Beanspruchung durch Verkehr (Verkehrsentwicklung, Verkehrsdichte, Schwerverkehr, Geschwindigkeiten, Staus) und des Zustands der Brückenbauwerke ermöglichen.

Bereich M 1.6: „Datennetze“

Teilprojekt 4: „Entwicklung einer Dateninfrastruktur zur Verbindung von Bauwerksdatenbank, Überwachungssystemen und Bauwerks-Management-System“

Langfristig sollte die Entwicklung einer Dateninfrastruktur angestrebt werden, die auf der Vernetzung

- der zentralen Bauwerksdatenbank,
- den an den Brücken eingerichteten Systemen zur Informationsbereitstellung und Bewertung (Überwachungssysteme) sowie
- dem Bauwerks-Management-System (BMS)

basiert. Dabei könnten sämtliche einem Bauwerk zugeordnete Daten (Bauwerksdaten, erfasste Messdaten, Bauteil- und Systemzuverlässigkeiten, kritische Bauteilzustände, mögliche Schädigungen, geplante Erhaltungsmaßnahmen usw.) über den in der Bauwerksdatenbank angelegten Datensatz zugänglich sein. Die Daten könnten entweder zentral in der Bauwerksdatenbank oder dezentral, z. B. auf einem Computer, der zur Bauwerksüberwachung an der Brücke installiert ist, vorgehalten werden. Im Falle dezentraler Datenspeicher könnten die Daten mit Hilfe einer Internetverbindung zwischen der Bauwerksdatenbank und dem Datenträger übertragen werden, wozu sich z. B. auch Methoden des Grid-Computing einsetzen lassen. Der Vorteil einer derartigen Vernetzung wäre der große Zuwachs an Transparenz sowie die Durchgängigkeit bei der Datenhaltung, wodurch sich Verluste an den Schnittstellen, z. B. in Folge von Fehlern beim Datentransfer, vermeiden lassen. Dabei ergäben sich folgende Möglichkeiten:

- Der Bauwerksprüfer hätte bei der Brückenprüfung über eine Internetverbindung Zugang zu sämtlichen bei der Bauwerksüberwachung gewonnenen Daten. Dadurch könnte er mögliche vom Überwachungssystem festgestellte Zustandsveränderungen erkennen, um die entsprechenden Bauwerksbereiche eingehend untersuchen und bewerten zu können. Weiterhin wäre ihm der Zugriff auf sämtliche Messdaten und deren Verläufe möglich, falls ihm dies bei der Bauwerksprüfung sinnvoll oder hilfreich erscheint.
- Die Ergebnisse der Bauwerksprüfung könnten direkt in die zentrale Bauwerksdatenbank übertragen und unmittelbar vom Überwachungssystem des jeweiligen Bauwerks – da dieses ebenfalls mit der Bauwerksdatenbank verbunden ist – weiterverarbeitet werden. Dadurch könnte das Überwachungssystem auf eine bei der Prüfung festgestellte Veränderung eines Bauteils reagieren, z. B. durch die Aktivierung bestimmter Sensoren.
- Die vom Überwachungssystem ermittelten Bauteil- und Systemzuverlässigkeiten könnten direkt bei der objekt- bzw. netzweiten Planung von Erhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden, ohne dass hier eine manuelle Datenübertragung stattfinden muss.

Die Entwicklung einer derartigen Dateninfrastruktur erfordert die Bearbeitung der folgenden Aufgaben:

- Erweiterung der Struktur der Bauwerksdaten, sodass diese den entsprechenden Anforderungen (siehe auch Kapitel 4.2.4) entspricht.
- Erarbeitung eines Datenbankkonzepts für die zentrale Bauwerksdatenbank unter Berücksichtigung der erweiterten Bauwerksdatenstruktur. Hier ist außerdem festzulegen, welche Daten direkt in der Bauwerksdatenbank abgelegt werden können, und welche (z. B. auf Grund ihres Umfangs) dezentral gespeichert werden sollen.
- Entwicklung der Dateninfrastruktur mit entsprechenden Schnittstellen zwischen der zentralen Bauwerksdatenbank, den Überwachungssystemen der Brückenbauwerke sowie dem Bauwerks-Management-System.
- Definition von Sicherheitselementen zum Schutz der vorhandenen Daten (Schutz gegen versehentliches Überschreiben, Backup-Konzepte, Berechtigungen usw.).

Der Schwerpunkt des Projektes sollte auf der Entwicklung der Dateninfrastruktur liegen – die Anwendung von Methoden des Grid-Computing erfolgt im Teilprojekt „Anwendung von Methoden des Grid-Computing im Rahmen der Bauwerksüberwachung“.

Teilprojekt 5: "Anwendung von Methoden des Grid-Computing im Rahmen der Bauwerksüberwachung"

Der Begriff „Grid“ bezeichnet einen Zusammenschluss einer Vielzahl von dezentral angeordneten Rechnern mit dem Hintergrund, die verteilt vorhandenen Ressourcen, Daten und Dienste zu bündeln und zur Verfügung zu stellen. Durch den Aufbau von Grids können bei der Überwachung und dem Management von Brückenbauwerken die folgenden Vorteile entstehen:

- Mit Hilfe von Grids können besonders rechenintensive Aufgaben wie etwa FE-Analysen oder aufwändige Zuverlässigkeitsanalysen auf mehrere Computer verteilt werden. Hierdurch ließe sich z. B. die Dauer einer FE-Modelladaption, bei der zwangsläufig eine Vielzahl von FE-Analysen durchgeführt werden muss, in relativ kurzer Zeit durchführen.
- Durch den Zusammenschluss sämtlicher Computer, die zur Messdatenerfassung an den einzelnen Brückenbauwerken installiert sind, können die erfassten Daten allen anderen Computern innerhalb des Grids zur Verfügung gestellt werden, z. B. zur Visualisierung, Auswertung oder Informationsgewinnung. Ggf. muss auf die Daten einer Vielzahl von Brücken gleichzeitig zugegriffen werden, z. B. bei der Optimierung der Erhaltungsplanung auf Netzebene mit Hilfe des Bauwerks-Management-Systems (BMS).

Unter anderem sollten bei der Projektbearbeitung die folgenden Problemstellungen untersucht werden:

- Welche weiteren Vorteile bietet der Einsatz von Methoden des Grid-Computing bzw. der verschiedenen Grid-Arten im Rahmen der Bauwerksüberwachung? Welche Anwendungen sind denkbar und sinnvoll?
- Wie lassen sich Grids aufbauen? Welche Verbindungen (Internet, Funknetze) können dazu eingesetzt werden?
- Welche Voraussetzungen sind bei der Einrichtung entsprechender Grids zur Bauwerksüberwachung zu erfüllen? Welche Anforderungen werden an Hard- und Software (Computer, Schnittstellen, Protokolle) gestellt? Wie lässt sich der Schutz vor unberechtigtem Zugriff realisieren?

Die Bearbeitung dieses Forschungsprojektes sollte auf der im Rahmen des Projektes „Entwicklung einer Dateninfrastruktur zur Verbindung von Bauwerksdatenbank, Überwachungssystemen und Bauwerks-Management-System“ entwickelten Datenstruktur basieren.

Teilprojekt 6: „Optische Datenübertragung“

Beim Aufbau drahtloser Sensornetze können anstelle von Funkwellen auch Lichtwellen zur Datenübertragung eingesetzt werden. Bei herkömmlicher Funkübertragung sind auf Grund von Überlagerungen mit anderen Funksignalen Übertragungsstörungen möglich. Zudem ist die Breite des nutzbaren Frequenzbandes durch Regularien stark eingeschränkt. Diese Nachteile treffen nicht auf optische drahtlose Datenübertragungstechniken zu. Weitere Vorteile optischer Verfahren sind die hohen möglichen Übertragungsraten bei niedriger Fehlerrate und der geringe Energiebedarf. Da die optische Datenübertragung auf dem Senden und Empfangen von Lichtwellen beruht, sind jedoch ein direkter Sichtkontakt sowie eine exakte Ausrichtung zwischen Sender und Empfänger erforderlich.

Um die Optionen und die Einsatzfähigkeit der optischen Datenübertragung für die Anwendung bei autonomen Sensornetzen an Brückenbauwerken überprüfen zu können, sind folgende Untersuchungen erforderlich:

- Welche Übertragungsentfernungen sind bei der Anwendung an Brückenbauwerken möglich? Wie können größere Entfernungen überwunden werden?
- Wie sehr stören Bauwerksschwingungen die Ausrichtung zwischen den Sensorknoten und der Basisstation? Wie können von Schwingungen verursachte Ausrichtfehler verhindert werden? Welche Störungen werden von umgebungsbedingten Einflüssen wie z. B. Regen- oder Schneefall sowie Nebel verursacht?
- Mit welchen Anordnungen und Konfigurationen von Sensorknoten und Basisstationen lassen sich bei direkter Sichtverbindung möglichst große Bereiche einer Brücke erfassen?
- Welche Netzwerk-Topologien lassen sich sinnvoll einsetzen, um die Vorteile der optischen Datenübertragung ausnutzen zu können?
- Welche besonderen Möglichkeiten bietet die optische Datenübertragung für das Energiemanagement und generell für die Energieversorgung von Sensorknoten?
- Welche Protokolle sind für die Übermittlung großer Datenmengen bei entsprechend hoher Abtastrate in Verbindung mit der optischen Datenübertragung geeignet?
- Wie lässt sich die Verknüpfung von freier und faseroptischer Datenübertragung für den Aufbau von heterogenen Sensornetzen umsetzen?

Bereich M 1.7: „Bewertung“

Teilprojekt 4: „Fortführung des Konzeptes der zuverlässigkeitsbasierten Bewertung von Brückenbauwerken“

Im Rahmen des bereits abgeschlossenen Teilprojektes „Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken“ [FSTR13] des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde ein Konzept zur Zustandsbewertung von Brücken unter Berücksichtigung von an den Bauwerken erfassten Messdaten entwickelt und anhand von zwei Fallstudien evaluiert.

Zur Weiterentwicklung der vorgestellten Methodik wurde der folgende Forschungsbedarf aufgezeigt (siehe auch [FSTR13]):

- Das Verfahren ist für eine größere Zahl von Schadensmechanismen zu entwickeln. Dabei soll ebenso untersucht werden, wie eine Anwendung bei Schäden erfolgen kann, für die keine oder nur ansatzweise Schädigungsmodelle vorliegen.
- Es ist ein Prototyp für eine reale Anwendung zu konzipieren.
- Zur Einbindung des Verfahrens in eine zuverlässigkeitsbasierte Maßnahmenplanung ist die Berücksichtigung des Einflusses von Inspektionsverfahren, Messverfahren und Reparaturmaßnahmen notwendig. Hierzu sind entsprechende Konzepte zu erarbeiten.
- Wichtige Schädigungsmechanismen sollten mit dem Ziel einer umfassenden probabilistischen Modellierung in Verbindung mit einer Systemanalyse weiterentwickelt werden.
- Es sind Ansätze zu erarbeiten, mit denen die Zuverlässigkeit von Inspektions- und Überwachungsverfahren bestimmt werden kann.
- Von großer Relevanz ist die Entwicklung von Methoden, mit denen auf Grundlage lokal erfasster (Schädigungs-)Informationen Schlussfolgerungen auf das ganze Bauwerk gezogen werden können.

Bereich M 1.8: „Schnittstellen“

Teilprojekt 2: „Entwicklung von Prognosemodellen für das Erhaltungsmanagement“

Um die im Rahmen der Überwachung einer Vielzahl von Brücken gewonnenen Einwirkungs- und Widerstandsdaten sowie deren Bewertungen beim Erhaltungsmanagement der Bauwerke nutzen zu

können, sind entsprechende Prognosemodelle aus der Gesamtheit bzw. aus Teilmengen dieser Daten zu entwickeln.

Beispielhaft genannt sei hier die Analyse der Einwirkungsdaten zur Bestimmung von Trends (z. B. Verkehrsaufkommen und Fahrzeuggewichte), die sich in unterschiedlichen Netzabschnitten abzeichnen.

Zudem ist denkbar, dass sich die Ergebnisse der Untersuchungen von Bauwerken eines spezifischen Typs oder in einem bestimmten Streckenabschnitt hinsichtlich ihrer Zustandsveränderungen auf andere Bauwerke mit ähnlichen Eigenschaften oder ähnlichem Standort übertragen lassen.

Die entwickelten Prognosemodelle ließen sich bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen auf Netzebene sowie der Simulation von Erhaltungsstrategien einsetzen.

Die Bearbeitung des Forschungsprojektes dient der Beantwortung der folgenden Fragen:

- Welche Prognosemodelle sind für das Erhaltungsmanagement von Wichtigkeit?
- Welche Daten sind für die Entwicklung der Prognosemodelle erforderlich? Wie lassen sich die erforderlichen Daten aus den Brückenmodellen extrahieren?
- Wie können die Prognosemodelle formuliert werden?

Bereich M 1.9: „Demonstrator“

Teilprojekt 2: „Experimentelle Untersuchungen an einem zu schädigenden Abbruchbauwerk“

Die abschließende Verifizierung des Systems zur Informationsbereitstellung und Bewertung in Echtzeit sollte an einem repräsentativen Brückenbauwerk erfolgen. Im Gegensatz zu einem Einsatz an einem in Betrieb befindlichen Bauwerk können an einem Abbruchbauwerk gezielt auch kritische Schäden eingetragen werden, z. B. das sukzessive Durchtrennen von Spanngliedern, Stützensenkungen oder das Versagen eines größeren Bewehrungsanteils.

Es sollten die folgenden Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

- Auswahl von Schädigungen, die in das Bauwerk eingetragen werden sollen. Um unterschiedliche Schädigungsausmaße untersuchen zu können, sollte beim Eintrag der Schäden stufenweise vorgegangen werden.
- Entwurf und Installation eines Sensornetzes.

- Entwicklung und Durchführung von Bauwerksversuchen (statische Belastungsversuche und/oder dynamische Schwingversuche), die während der Experimente durchgeführt werden. Dabei sind die Tragwerksreaktionen mit Hilfe des Sensornetzes zu erfassen.
- Erarbeitung von Bauwerksmodellen und Analyse der Messdaten mit dem Ziel, die eingetragenen Schädigungsszenarien zu identifizieren.

Die Ausschreibung des Projektes sollte erst dann erfolgen, wenn die Entwicklung des Systems zur Informationsbereitstellung und Bewertung abgeschlossen ist. Weiterhin sollte das zu schädigende Brückenbauwerk bereits bekannt sein, sodass die Projektbearbeitung unmittelbar nach der Vergabe beginnen kann.

7 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für das von der Bundesanstalt für Straßenwesen vorgeschlagene System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit, welches im Rahmen der Überwachung von Brückenbauwerken eingesetzt werden soll. Das System soll auf Grundlage von am Bauwerk erfassten Messgrößen Informationen z. B. über Einwirkungen sowie mögliche vorhandene oder sich entwickelnde Bauwerksschäden feststellen und diese bei der Bewertung der Zuverlässigkeit des Bauwerks einbeziehen. Die Messdatenerfassung soll überwiegend auf dem Einsatz drahtloser Datenübertragungstechniken basieren.

Einleitend wurden die Grundlagen von Überwachungssystemen für Brückenbauwerke vorgestellt. Diese bestehen im Wesentlichen aus drei Komponenten zur Datenakquisition, zur Informationsgewinnung und zur Bewertung der gewonnenen Informationen. Die Komponente zur Datenakquisition umfasst neben den Sensoren zur Messung ebenso die Techniken zur Datenübertragung, zur Datenerfassung und zur Datenspeicherung. Bei der Informationsgewinnung, d. h. der Erkennung von Schäden oder der Identifikation von Einwirkungen, können grundsätzlich globale und lokale Ansätze unterschieden werden, die auf der Messdatenanalyse mit Hilfe nichtphysikalischer oder physikalischer Modelle beruhen. Zur Bewertung des Bauwerks, auch unter Berücksichtigung aufgetretener Schädigungen, stehen Bewertungsverfahren unterschiedlicher Genauigkeitsstufen zur Verfügung, wobei der Aufwand bei der Anwendung der Verfahren mit steigenden Anforderungen an die Genauigkeit ebenso zunimmt.

Einen Schwerpunkt des Berichtes bildet die ausführliche Darstellung von Konzepten, die bei der Überwachung von Tunneln, Windenergieanlagen, Hochhäusern und Türmen, Talsperren, Kernkraftwerken, Offshore-Plattformen, Automobilen sowie Luft- und Raumfahrzeugen zum Einsatz kommen. Dabei wurde vor allem die Übertragbarkeit der Konzepte auf den Brückenbau untersucht und bewertet.

Darüber hinaus wurden Anforderungen an die einzelnen Komponenten eines Systems zur Informationsbereitstellung und Bewertung in Echtzeit definiert. Hier standen insbesondere die Datenakquisition (Anforderungen an Sensoren, Möglichkeiten zur Überwachung der Sensorfunktion, Anforderungen an die drahtgebundene und drahtlose Datenübertragung), die Modellierung von Brückenbauwerken (Bestandteile, Hierarchie und Aufgliederung von Brückenbauwerken, Verknüpfung von Bauwerksdaten, Einbindung von Bewertungsverfahren in das Brückenmodell) sowie die Integration des Systems in das Erhaltungsmanagement von Brückenbauwerken im Vordergrund.

Im Rahmen einer Anwendungsanalyse wurden Konzepte zur konkreten Identifikation und Überwachung der bei Brückenbauwerken relevanten Schäden vorgestellt. Ebenso wurde auf Besonderheiten bei der Installation von Überwachungssystemen bei Bestandsbauwerken eingegangen. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie ist beurteilt worden, inwieweit das geplante System zur Informationsbereitstellung und Bewertung umgesetzt werden kann. Dabei fanden nicht nur derzeitige, sondern auch zukünftige Entwicklungen und Methoden Berücksichtigung. Anhand eines Beispielszenarios wurde ein mögliches System zur Überwachung eines Brückenbauwerks aufgezeigt. Weiterhin wurde im Rahmen eines Anwendungsbeispiels demonstriert, wie sich künstliche neuronale Netze zur Schadenserkennung einsetzen lassen.

Abschließend wurden konkrete Projektskizzen zur Fortführung des Themenschwerpunkts „Intelligente Bauwerke“ der Bundesanstalt für Straßenwesen erarbeitet.

8 Literatur

- [ABDO12] Abdo, M. A.-B.: Parametric study of using only static response in structural damage detection. *Engineering Structures*, Vol. 34, 2012, S. 124-131.
- [ACGP03] Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimbelsman, K. A., Pervizpour, M.: *Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges*. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute, Philadelphia, USA, 2003.
- [ADAM07] Adams, D. E.: *Health Monitoring of Structural Materials and Components – Methods with Applications*. Wiley, 2007.
- [AHMA11] Ahrens, M. A., Mark, P.: Lebensdauersimulation von Betontragwerken – Stochastische Strukturberechnungen über die Zeit am Beispiel einer gealterten Bogenbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Heft 4, S. 220-230.
- [ALSR09] Allen, M. S., Sracic, M.: A New Method for Processing Impact Excited Continuous-Scan Laser Doppler Vibrometer Measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, No. 3, 2010, S. 721-735.
- [AMJO11] Armor-Segan, M., Jones, R. P.: A Framework for Health Monitoring of Automotive and Electronic Control Systems, *IEEE Vehicular Networking Conference*, 2011.
- [API-RP-2SIM] American Petroleum Institute (API): *API RP 2SIM, Recommended Practice for Structural Integrity Management of Fixed Offshore Structures*. Entwurf, Datum unbekannt.
- [APPO06] Apelt, D., Pohle, J.: *ZigBee – A Wireless Personal Area Network. Spezielle Techniken der Rechnerkommunikation*. Humboldt-Universität Berlin, Institut für Informatik, Rechnerorganisation und Kommunikation, 2006.
- [ARC12] Auckland Regional Council (ARC): *Dam Safety Guidelines Part 4 - Investigation, monitoring and surveillance of dams*. 2012.
- [ARS14/1986] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/1986, Sachgebiet 5: Brücken- und Ingenieurbau. Oberste Straßenbauverwaltung der Länder, 30.04.1986.
- [ARWH08] Arritt, B. J., Robertson, L. M., Williams, A. D., Henderson, B. K., Buckley, S. J., Ganley, J. M., Welsh, J. S., et al.: *Structural Health Monitoring: An Enabler for Responsive Satellites*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [ASB-BAUW08] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesanstalt für Straßenwesen: *Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING)*. 2008.
- [ASB-BEST11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesanstalt für Straßenwesen: *Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bestandsdaten (ASB-ING)*. 2011.
- [ASB-NETZ11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesanstalt für

- Straßenwesen: Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Netzdaten (ASB-ING). 2011.
- [ASCE11] ASCE SEI Committee on Structural Identification of Constructed Systems: Structural Identification (St-Id) of Constructed Facilities – Approaches, Methods and Technologies for Effective Practice of St-Id. State-of-the-Art Report, 2011.
- [BABH94] Banan, M.R., Hjelmstad, K.D.: Parameter Estimation of Structures from Static Response. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 11, 1994, S. 3243-3283.
- [BAFG06] Balageas, D., Fritzen, C.-P., Güemes, A.: *Structural Health Monitoring*. Iste Publishing Company, 2006.
- [BANT04] Bantel, M.: *Messgeräte-Praxis*. Carl Hanser Verlag, 2004.
- [BAST98] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Abteilung Brücken- und Ingenieurbau: Handlungsanweisung zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonbrückenüberbauten. Ausgabe 1998.
- [BAWO09] Barthorpe, R.J., Worden, K.: Sensor Placement Optimization. In: Boller, C., Chang, F.-K., Fujino, Y. (Eds.): *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Wiley, 2009.
- [BEHA03] Bently, D. E., Hatch, C. T., Griesom, B. (Ed.): *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*. ASME Press (American Society of Mechanical Engineers), 2003.
- [BELFA12] Internetseite ifem – Ingenieurgesellschaft für experimentelle Mechanik mbH. <http://www.belfa.de>. Letzter Aufruf: 14.05.2012.
- [BEMA09] Bellinger, N., Martinez, M.: Environmental Monitoring of Aircraft. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009, pp. 1523-1530.
- [BERG09] Bergmeister, K.: Monitoring und Lebensdauer von Bauwerken. In: Festschrift zur Festveranstaltung „125 Jahre Materialprüfungsanstalt MPA Universität Stuttgart 1884-2009“, 2009.
- [BFDW13] Borrmann, A., Fischer, O., Dori, G., Wild, M.: „Intelligente Bauwerke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse“. Entwurf Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 15.0538. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2013.
- [BMVBS06] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Bericht über die Qualität, Dauerhaftigkeit und Sicherheit von Spannbetonbrücken. Vorlage an den Ausschuss für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages, Berlin, Januar 2006.
- [BMVBS-BASTxx] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesanstalt für Straßenwesen: *Bauwerkserhaltung – Bauwerksprüfung, Erhaltungsplanung, Ausführung*. Infolyer. Datum unbekannt.
- [BOBU07] Boller, C., Buderath, M.: Fatigue in aerostructures – where structural health monitoring can contribute to a complex subject. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 365(1851), 2007, pp. 561-587.
- [BOES11] Boes, R.: Talsperrensicherheit und Talsperrenüberwachung. Vorlesungsskript Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrogeologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, 17.11.2011.
- [BOGO09] Böswald, M., Govers, Y.: Taxi Vibration Test – Die Anwendung von Output-Only Modalanalyse für Standschwingversuche großer Flugzeuge. *Schwingungsanalyse und Identifikation*, VDI-Berichte 2093, 2008, pp. 339-354.
- [BOHA11] Boyer, R.L., Hamlin, T.L.: Use of Probabilistic Risk Assessment (PRA) in The Shuttle Decision Making Process. *PM Challenge*, Long Beach, CA, USA, 2011. S. 1-21.
- [BRAN12] Internetseite Brandes GmbH. <http://www.brandes.de>. Letzter Aufruf: 22.08.2012.
- [BROW05] Brownjohn, J. M. W.: Long-term monitoring of dynamic response of a tall building for performance evaluation and loading characterisation. In *Proceedings, 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Copenhagen, April 2005.
- [BROW07] Brownjohn, J.M.W.: Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, Vol. 365, 2007, S. 589-622.
- [BRVA00] Brincker, R., Ventura, C., Andersen, P.: Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference*, San Antonio, Texas, 2000.
- [BRWO08] Brunner, Woschitz: Eingebetteter faseroptischer Verformungssensor – Statische und dynamische Messungen. *Messen in der Geotechnik 2008*, TU Braunschweig, 2008.
- [BRZA99] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.: Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, Florida, 1999.
- [BTD17/5325] Bundestagsdrucksache 17/5325. Zustand von Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen in Deutschland. April 2011.

- [BTTT04] Brownjohn, J., Tjin, S.-C., Tan, G.-H., Tan, B.-L., Chakraborty, S.: A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, UK, 2004.
- [BUSL07] Buschmeyer, W., Schnellenbach-Held, M., Lubasch, P.: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 68, 2007.
- [BWE12] Internetseite Bundesverband WindEnergie (BWE). <http://www.wind-energie.de>. Letzter Aufruf: 15.04.2012.
- [CAFA04] Carden, P.E., Fanning, P.: Vibration Based Damage Monitoring – A Review. Structural Health Monitoring, Vol. 3(4), 2004, S. 355-377.
- [CANT00] Cantieni, R.: Assessing a Dam's Structural Properties Using Forced Vibration Testing. Proceedings of IABSE 2000, Malta.
- [CANT04] Cantieni, R.: Experimental Methods Used in System Identification of Civil Engineering Structures. In: Proc. 2nd Workshop: Problemi di vibrazioni nelle strutture civili e nelle costruzioni meccaniche, Perugia, Italia, 10-11 Giugno, 2004.
- [CANT97] Cantieni, R.: Tragfähigkeitsanalysen durch Schwingungsmessungen. Beitrag zur Fachtagung „Sonderkapitel aus dem Brücken- und Ingenieurbau“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 4. Juni 1997.
- [CARB12] Internetseite CARBO. <http://www.carboceramics.com>. Letzter Aufruf: 08.05.2012.
- [CCMM06] Cunha, A., Caetano, E., Magalhaes, C. M., Moutinho, C.: From Input-Output to Output-Only Modal Identification of Civil Engineering Structures. SAMCO Final Report 2006, F11 Selected Papers.
- [CHFL03] Chang, P.C., Flatau, A., Liu, S.C.: Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. Structural Health Monitoring, Vol. 2(3), 2003, 257-267.
- [CHHC05] Chakrabarti, S., Halkyard, J., Capanoglu, C.: Historical Development of Offshore Structures. In: Chakrabarti, S. (Ed.): Handbook of Offshore Engineering. Elsevier, 2005.
- [CHLS08] Cheung, C. H. E., Lin, K. Y., Styuart, A.: Development of Reliability-Based Damage Tolerant Structural Design Methodology." AMTAS Autumn 2008 Meeting", University of Washington, 2008.
- [CILB08] Ciang, C. C., Lee, J.-R., Bang, H.-J.: Structural health monitoring for a wind turbine system – a review of damage detection methods. Measurement Science and Technology 19 (2008) 122001, S. 1-20, 2008.
- [CLAU11] Clauss, U.: Die laserphotogrammetrische Objektaufnahme – ein effizienter Verfahrensansatz für viele Messaufgaben. Messtechnik im Bauwesen, Ernst & Sohn-Special, Februar 2011, S. 18-21.
- [COST323] COST323: European Specification on Weigh-in-Motion of Road Vehicles. EUCO COST/323/8/99, LCPC, Paris, 1999.
- [CTM2/12] Chemnitzer Technische Mitteilungen, Nr. 77, Jahrgang 20: Gestickte Feuchtsensoren überwachen Betonbauteile, Flachdächer und Deponien. VDI Westsächsischer Bezirksverein Chemnitz, Presseinformation vom 28. Februar 2012.
- [CUCA06] Cunha, A., Caetano, E.: Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures. Sound and Vibration, June 2006, S. 12-20, 2006.
- [CZZW11] Cao, Y., Zhang, Y., Zhao, Y., Wang, M. L.: Distributed Health Monitoring System for Zhanjiang Bay Bridge. Advances in Structural Engineering, Vol. 14, No. 1, S. 1-12, 2011.
- [DAFSTB00] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken. Beuth Verlag GmbH Berlin, Wien Zürich, 2000.
- [DAFSTB06] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 565: Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Bauwerksdiagnose im Betonbau. Beuth Verlag GmbH Berlin, Wien Zürich, 2006.
- [DARPA12] Internetseite DARPA-Challenge. <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>. Letzter Aufruf: 29.09.2012.
- [DCCE12] Department of Civil and Coastal Engineering, College of Engineering, University of Florida. <http://users.coastal.ufl.edu/~sheppard/OCE3016/OFFshore%20Structures.pdf>. Letzter Aufruf: 13.08.2012.
- [DFGSFB/TR39] DFG Sonderforschungsbereich/Transregio 39 mit dem Titel „Großserienfertige Produktionstechnologien für leichtmetall- und faserverbundbasierte Komponenten mit integrierten Piezosensoren und -aktoren“. http://www.pt-piesa.tu-chemnitz.de/P_2/de/index.php
- [DFPS96] Doebling S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W.: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechani-

- cal Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. Los Alamos National Laboratory, LA-13070-MS, 1996.
- [DGZFP10] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V.: Informationstag „Moderne Bauwerksprüfung, Technische und rechtliche Aspekte“. 10. November 2010, BAST, Bergisch-Gladbach.
- [DIN1076] DIN 1076. Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. November 1999.
- [DIN1319-1] DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik – Teil 1: Grundbegriffe. Januar 1995.
- [DINEN60812] DIN EN 60812. Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) (IED 60812:2006), November 2006.
- [DINEN61025] DIN EN 61025. Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006), August 2007.
- [DLLK06] Desjardins, S. L., Londono, N. A., Lau, D. T., Khoo, H.: Real-Time Data Processing, Analysis and Visualization for Structural Monitoring of Confederation Bridge. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 9, No. 1, 2006, S. 141-157.
- [DODS09] Derriso, M.M., Olson, S.E., DeSimio, M.P.: Military Aircraft. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009, pp. 1563-1576.
- [DOFP98] Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B.: A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 30, 1998, S. 91-105, 1998.
- [DSSG08] Dauberschmidt, C., Sodeikat, C., Schießl, P., Gehlen, C.: Monitoring von Verkehrsbauten - Kontinuierliche Zustandserfassung, Tiefbau, Vol. 3, S. 135-141, 2008.
- [EBFR12] Ebert, C., Friedmann, H.: Brückenüberwachung zur Lebensdaueroptimierung – technische Voraussetzungen und messtechnische Umsetzung. *Messtechnik im Bauwesen*, Ernst & Sohn Special, 2012.
- [EBMU12] Ebert, C., Müller, D.: Bauwerksüberwachung – Messaufnehmer und Messverfahren. *VDI Wissensforum, Bauwerksüberwachung – Konzepte, Sensorik, Bewertungsverfahren und Anwendungen*, Kassel, 27.04.2012.
- [ECMF03] Elgamal, A., Conte, J. P., Masri, S., Fraser, M., Fountain, T., Gupta, A., Trivedi, M., El Zarki, M.: Health Monitoring Framework for Bridges and Civil Infrastructure. 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, 2003.
- [E-DIN8113] Entwurf DIN 8113: Wägung von Fahrzeugen während der Fahrt. Februar 2009.
- [FADO99] Farrar, C.R., Doebling, S.W.: Damage Detection II - Field Applications to Large Structures. In: Silva, J.M.M, Maia, N.M.M.: *Modal Analysis and Testing: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Sesimbra, Portugal, 3-15 May 1998*, Springer Netherlands 1999, S. 345-378.
- [FALI07] Farrar, C.R., Lieven, N. A. J.: Damage prognosis: the future of structural health monitoring. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol. 365, 2007, S. 623-632.
- [FASC10] Faschingbauer, G.: Simulationsbasierte Systemidentifikation im Rahmen der baubegleitenden geotechnischen Überwachung. *Dissertation am Institut für Bauinformatik, TU Dresden*, 2010.
- [FAWO07] Farrar, C.R., Worden, K.: An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol. 365, 2007, S. 303-315.
- [FDCD99] Farrar, C.R., Duffey, T.A., Cornwell, P.J., Doebling, S.W.: Excitation Methods for Bridge Structures. *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, 1999.
- [FDSC97] Farrar, C.R., Doebling, S.W.; Cornwell, P.J., Straser, E.G.: Variability of Modal Parameters Measured on the Alamosa Canyon Bridge. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, Vol. 3089(1), S. 257-263, 1997.
- [FELL05] Fennema, J. L., Laman, J. A., Linzell, D. G.: Predicted and Measured Response of an Integral Abutment Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 10, No. 6, 2005, S. 666-677.
- [FLEM01] Flemming, W. J.: Overview of Automotive Sensors. *IEEE Sensors Journal*, Vol.1, No. 4, 2001, S. 296-308.
- [FRIS07] Friswell, M.I.: Damage identification using inverse methods. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol. 365, 2007, S. 393-410.
- [FRMO95] Friswell, M.I., Mottershead, J.E.: *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [FRPE97] Friswell, M.I., Penny, J.E.T.: Is Damage Location Using Vibration Measurements Practical? *EUROMECH 365 International Workshop: DAMAS 97*, Sheffield, UK, 1997.

- [FRPE02] Friswell, M.I., Penny, J.E.T.: Crack Modeling for Structural Health Monitoring. *Structural Health Monitoring* Vol. 1, No. 2, S. 139-148, 2002.
- [FSTR13] Fischer, J., Schneider, R., Thöns, S., Rücker, W., Straub, D.: Intelligente Bauwerke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 15.0508/2011/KRB. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2013.
- [FSTS05] Faber, M. H., Sørensen, J. D., Tychsen, J., Straub, D.: Field Implementation of RBI for Jacket Structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Trans. ASME, 127(3), August 2005, pp. 220-226.
- [FUQU86] Fuqua: Investigation of the Challenger Accident: Report of the Committee on Science and Technology, Washington, DC, 1986.
- [GANN12] Internetseite GANN Mess- und Regeltechnik GmbH. <http://www.gann.de>. Letzter Aufruf: 21.05.2012.
- [GEBI09] Geier, R., Binder, F.: Die Überwachung der Wiener Erdberger Brücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 104, Heft 8, 2009, S. 530-536.
- [GEDE05] Geier, R., Deix, S.: On-line Überwachung der Wiener Reichsbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005), Heft 12, S. 997-1002.
- [GEIE04] Geier, R.: Brückendynamik – Schwingungsuntersuchungen von Schrägseilen. Dissertation, Verlag Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2004.
- [GIF04] Geotechnisches Ingenieurbüro Prof. Fecker & Partner GmbH: Geotechnische Messungen im Untertagebau. <http://www.gif-ettlingen.de>. 2004.
- [GILM05] Glisic, B., Inaudi, D., Lau, J. M., Mok, Y. C., Ng, C. T.: Long-term monitoring of high-rise buildings using long-gage fiber optic sensors. In: 7th International conference on multi-purpose high-rise towers and tall buildings, Dubai, UAM, December 10-11, 2005.
- [GLIN07] Glisic, B., Inaudi, D.: *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Wiley-Interscience, 2007.
- [GLWO07] Glaser, S. D., Li, H., Wang, M. L., Ou, J., Lynch, J.: Sensor technology innovation for the advancement of structural health monitoring – a strategic program of US-China research for the next decade. *Smart Structures and Systems*, Vol. 3, No. 2, 2007, S. 221-244.
- [GOBO09] Gordon, G.A., Boller, C.: Commercial Fixed-wing Aircraft. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009, pp. 1695-1710.
- [GOKS10] Goulet, J.A., Kripakaran, P., Smith, I.F.C.: Multimodel Structural Performance Monitoring, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, Issue 10, 2010, S. 1309-1318.
- [GRDS06] Graubner, C.-A., Duda, H., Spengler, M.: Monitoring im Brückenbau - Messverfahren und deren praktische Anwendung. In: „Sicherheitsgewinn durch Monitoring? Zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl“, 2006, S. 185-201.
- [GRTU12] Großwig, Tusche, J., Großwig, S.: Messtechnik in Fahrbahnübergängen für Brücken. Innovationsprogramm Straße FE 88.0113/2011, Vortrag beim Forschungskolloquium „Die Straße im 21. Jahrhundert“, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 31.10.2012.
- [GUSC11] Gutermann, M., Schröder, C.: 10 Jahre Belastungsfahrzeug BELFA – Entstehung, Erfahrungen und Ausblick. *Bautechnik*, Vol. 88, Issue 3, 2011, S. 199–204.
- [GWNE11] Goj, K., Wagner, R., Naturski, R., Ettl, B.: Erhaltung von Ingenieurbauwerken. *bau intern Sonderheft „Erhaltungsmanagement an Straßen in Bayern“*. Zweite, aktualisierte Auflage, August 2011, S. 41-47.
- [GZZZ04] Guo, H. Y., Zhang, L., Zhang, L. L., Zhou, J. X.: Optimal placement of sensors for structural health monitoring using improved genetic algorithms. *Smart Materials and Structures* 13 (2004), pp. 528-534.
- [HAAR03] Haardt, P.: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2. Bericht zum Forschungsprojekt 99245, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Heft B 43, 2003.
- [HAAR10] Haardt, P.: Vom schadensbasierten zum zuverlässigkeitsorientierten Erhaltungsmanagement für Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen. *Berichtsband Abschluss-Symposium des DFG-SFB 477, „Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung*, 2010.
- [HAAR99] Haardt, P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Brücken und Ingenieurbau*, Heft B 22, 1999.
- [HAGP04] Haardt, P., Gehrlicher, K., Prehn, W.: *Bauwerks-Management-System (BMS) – Werkzeug zur Substanzerhaltung für Verkehrs-*

- bauwerke. Bautechnik 81, Heft 10, 2004, S. 794-798.
- [HASL11] Hartmann, D., Smarsly, K., Law, K. H.: Coupling of Sensor-Based Structural Health Monitoring with Finite Element Model Updating for Probabilistic Lifetime Estimation of Wind Converter Structures. In: International Workshop on Structural Health Monitoring 2011, Stanford University, Stanford, California, U.S.A., 2011.
- [HASO90] Hajela, P., Soeiro, F.J.: Recent Developments in damage detection based on system identification methods. Structural Optimization, Vol. 2, No. 1, 1990, S. 1-10.
- [HBLT07] Herszberg, I., Bannister, M.K., Li, H.C.H, Thomson, R.S., White, C.: Review Paper: Structural Health Monitoring For Advanced Composite Structures. In: Proceedings of the The Sixteenth International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan, July 8-13, 2007.
- [HBM12] Internetseite HBM Deutschland. <http://www.hbm.com>. Letzter Aufruf: 08.05.2012.
- [HBSP07] Hoffmann, S., Bergmeister, K., Strauss, A., Preslmayr, M.: Identifying Stiffness Distributions by Direct Influence Measurements. 10th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Tokyo, Japan, 2007.
- [HCBT09] Hamlina, T.L., Cangaa, M.A., Boyera, R.L., Thigpen, E.B.: 2009 Space Shuttle Probabilistic Risk Assessment Overview, Houston, USA, 2009.
- [HEHW06] He, R.-S., Hwang, S.-F.: Damage Detection by an Adaptive Real-Parameter Simulated Annealing Genetic Algorithm. Computers and Structures, Vol. 84, Issues 31-32, 2006, S. 2231-2243.
- [HJSH97] Hjelmstad, K.D., Shin, S.: Damage Detection and Assessment of Structures from Static Response. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 6, 1997, S. 568-576.
- [HKCG11] Ha, D.-H., Kim, D., Choo, J. F., Goo, N.S.: Energy harvesting and monitoring using bridge bearing with built-in piezoelectric material. In: Proceedings of the 7th International Conference on Networked Computing (INC), 26.-28. September 2011, Gumi, Südkorea.
- [HOBE07] Hoffmann, S., Bergmeister, K.: Long-term monitoring of the bearings of the Ponte 25 de Abril in Lisbon. Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Symposium 2007, Weimar, Germany, September 19-21, 2007.
- [HOBW11] Holst, A., Budelmann, H., Wichmann, H.-J.: Einsatz innovativer Sensorik für das Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken. Messtechnik im Bauwesen, Ernst & Sohn-Special, Februar 2011, S. 46-50.
- [HOWL96] Howlett, R.J.: Condition Monitoring and Fault Diagnosis in a domestic car using a Neural Network. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, London, 1996.
- [HSHB06] Hsieh, K.H., Halling, M.W., Barr, P.J.: Overview of Vibrational Structural Health Monitoring with Representative Case Studies. Journal of Bridge Engineering, Vol. 11, Issue 6, 2006, S. 707-715.
- [HWSR07] Hoffmann, S., Wendner, R., Strauss, A., Ralbovsky, M., Bergmeister, K.: AIFIT – Anwenderorientierte Identifikation für Ingenieurtragwerke – Versuchsgestützte Steifigkeitsanalysen. Beton- und Stahlbetonbau. Vol. 102 Heft 10, 2007, S. 699-706.
- [IDGA90] Idichandy, V.G., Ganapathy, C.: Modal Parameters for Structural Integrity Monitoring of Fixed Offshore Platforms. Experimental Mechanics, December 1990, S. 382-391.
- [IFEM12] IFEM Ingenieurgesellschaft für experimentelle Mechanik: Broschüre „30 Jahre Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Bauwerken“ (gemeinsam mit Prof. Dr.-Ing. Steffens Ingenieurgesellschaft mbH). <http://www.ifem-web.de>, 2012.
- [IKBO09] Ikegamy, R., Boller, C.: History of SHM for Commercial Transport Aircraft. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009, pp. 1711-1722.
- [INVE12] Internetseite der Invent GmbH. <http://www.invent-gmbh.de>. Letzter Aufruf: 11.09.2012.
- [ISIS01] ISIS Canada – Intelligent Sensing for Innovative Structures: Guidelines for Structural Health Monitoring, 2001.
- [JAKO04] Jakob, M.: Monitoring von dynamischen Bauwerksbewegungen und -verformungen mit Druckschlauchwaagensystemen zur Steuerung von Sicherungsmaßnahmen. 5. Geokinematischer Tag, Freiberg, 2004.
- [JEAR04] Jeary, A. P.: The Identification of Damage in Large Structures. International Conference on the Behaviour of Damaged Structures DAMSTRUC 2004.
- [JUGK08] Jüngert, A., Grosse, C. U., Krüger, M.: Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit akustischen Verfahren. DACH-

Jahrestagung 2008 – Zerstörungsfreie Materialprüfung, St. Gallen.

- [KAGU09] Karbhari, V. M., Guan, H.: Web-based SHM. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009, pp. 1283-1299.
- [KASC09] Karczewski, B., Schnellenbach-Held, M.: Model-Updating in Structural Health Monitoring: A Novel Genetic Programming and Neural Networks Approach. In: Proceedings of EG-ICE Conference, Berlin, 2009.
- [KAVV03] Kavvadas, M. J.: Monitoring and Modelling Ground Deformations During Tunneling. Proc. 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.
- [KJKY99] Kim, C.-Y., Jung, D.-S., Kim, N.-S., Yoon, J.-G.: Effect of Vehicle Mass on the Measured Dynamic Characteristics of Bridges from Traffic-Induced Vibration Test. Proceedings of the International Society for Optical Engineering Vol. 4359, 2001, S. 1106-1111.
- [KLIN08] Klinzmann, C.: Methodik zur computergestützten, probabilistischen Bauwerksbewertung unter Einbeziehung von Bauwerksmonitoring. Dissertation am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, 2008.
- [KNIT10] Knitsch, H.: Steuerung von Sicherungsmaßnahmen im innerstädtischen Tunnelbau. Tunnel 2/2010, S. 43-49.
- [KNOL10] Knoll, P.: Videobasierte Systeme. Fahrstabilitätssysteme und Fahrerassistenzsysteme, 2010, S.204-209.
- [KOB11] Koch, C., Brilakis, I.: Pothole Detection in Asphalt Pavement Images. Advanced Engineering Informatics 25(3) 507-515, 2011.
- [KOEL12] Koelzer, W.: Lexikon zur Kernenergie. Forschungszentrum Karlsruhe, Version April 2012.
- [KOKA10] Kokavec, J.: Modalanalyse. Aus Möser, M.: Messtechnik der Akustik. Springer, 2010.
- [KRAM07] Kramer, H. Angewandte Baudynamik – Grundlagen und Praxisbeispiele. Ernst & Sohn, 2006.
- [KRGR07] Krüger, M., Große, C.U.: Beitrag zur intelligenten Bauwerksüberwachung mit drahtlosen Sensornetzwerken. Bautechnik, Vol. 84, No. 7, 2007, S. 502-508.
- [KRGR10] Krüger, M., Große, C.: Einsatz von Sensorik an Brückenbauwerken. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 88.0001/2009, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010.
- [KRNS12] Krivenko, A., Riedel B., Niemeier W., Schindler S., Heek P., Mark P., Ziem E.: "Monitoring der Boden- und Gebäudebewegungen beim Bau der Wehrhahnlinie in Düsseldorf mittels Radarinterferometrie", GeoMonitoring, 2012.
- [LIGG11] Lin, K. Y., Cheung, C. H., Gray, P.: Development of Reliability-Based Damage Tolerant Structural Design Methodology – Analysis of Fastener Disbond Arrest Mechanism for Laminated Composite Structures. JAMS Annual Technical Review Meeting, San Diego, USA, 2011.
- [LIGH09] Liebig, J.P.; Grünberg, J.; Hansen, M., Monitoring von Spannbetonbrücken – Auswirkung zunehmenden Schwerverkehrs. Beton- und Stahlbetonbau, 2009, 104, Heft 6, S. 368-371.
- [LIHS11] Liu, J., Huang, W., Shi, X.: An Improved Method of Structure Damage Diagnosis for Jacket Platforms. Journal of Marine Science and Application (2011) 10, S. 485-489.
- [LIST06] Lin, K. L., Stuart, A.: Developments of Reliability-Based Damage Tolerant Structural Design Methodology. The Joint Advanced Materials and Structures Center of Excellence, University of Washington, 2006.
- [LOCH11] Loh, C.-H., Chen, C.-H., Hsu, T.-Y.: Application of advanced statistical methods for extracting long-term trends in static monitoring data from an arch dam. Structural Health Monitoring 10(6), 2011, S. 587-601.
- [LSLS04] Lynch, J. P., Sundararaja, A., Law, K. H., Sohn, H., Farrar, C. S.: Design of a Wireless Active Sensing Unit for Structural Health Monitoring. SPIE 11th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA, 2004.
- [LUBA09] Lubasch, P.: Identifikation von Verkehrslasten unter Einsatz von Methoden des Soft Computing. Dissertation am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen, 2009.
- [LUSB11] Lubasch, P., Schnellenbach-Held, M., Buschmeyer, W.: Computergestützte Identifikation von Verkehrslasten - Ergänztes Bauwerksmonitoring. Bauingenieur, Band 86, Oktober 2011, S. 433-442.
- [LYLO06] Lynch, J.P., Loh, K.J.: A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 2, 2006, S. 91-128.
- [LYNC07] Lynch, J.P.: An overview of wireless structural health monitoring for civil structures, Philosophical Transactions of The Royal Society A, 2007, Vol. 365, S. 345-372.

- [MAJ111] Ma, J., Jiang, J.: Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants. *Progress in Nuclear Energy* 53, 2011, S. 255-266.
- [MAMT09] May, P., Mendy, G., Tallett, P.: *Structural Integrity Monitoring – Review and Appraisal of Current Technologies for Offshore Applications*. Research Report RR685. Health and Safety Executive Books, 2009.
- [MATG06] Mancini, S., Tumino, G., Gaudenzi, P.: Structural Health Monitoring for Future Space Vehicles. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 7, 2006, S. 577-585.
- [MBFK07] Meyer, M., Bischoff, R., Feltrin, G., Krüger, M., Saukh, O., Bachmaier, S.: *Prototype Implementation of a Wireless Sensor Network – Report D5.7. Bericht zum Forschungsprojekt “Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives”*, 2007.
- [MCKA05] McKenzie, I., Karafolas, N.: *Fiber Optic Sensing in Space Structures: The Experience of the European Space Agency*. *Proceedings of SPIE*, Vol. 5855, 2005.
- [MEAL09] Medina, E.A., Aldrin, J.C.: *Value Assessment Approaches for Structural Life Management*. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009, pp. 1673-1687.
- [MOAK06] Moon, F.L., Aktan, A.E.: Impacts of Epistemic (Bias) Uncertainty on Structural Identification of Constructed (Civil) Systems. *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 38, No. 5, 2006, 399-420.
- [MOCA12] Moor, G., Della Ca, D.: *Nutzenorientierte Bauwerksüberwachung*. In: *Tagungsband 22. Dresdner Brückenbausymposium*. Technische Universität Dresden, 12./13.03.2012, pp. 177-191.
- [MUEL03] Müller-Slany, H. H.: *Möglichkeiten und Grenzen der Schwingungsdiagnose für mechanische Systeme auf der Basis numerischer Strukturmodelle*. In *VDI-Bericht 1788*, S. 71-104, VDI-Schwingungstagung, 2003.
- [MUEL06] Müller, R.: *Selbstüberwachung differenzdruckbasierter Durchflussmessverfahren für Flüssigkeiten*. Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt, 2006.
- [MUEL10] Müller, H. S.: *Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der System- und Risikoanalyse*. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 89.0219/2009/AP, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010.
- [MURS06] Müller-Rochholz, J., Recker, C., Schaper, G.: *Langjährige Messung von Kraft- und Verformungsgrößen in Neotopf-Gleitlagern einer Spannbetonstraßenbrücke*. *Beton- und Stahlbetonbau* 101, Heft 12, 2006, S. 943-949.
- [MUVO11] Müller, H. S., Vogel, M.: *Lebensdauerbemessung im Betonbau – Vom Schädigungsprozess auf Bauteilebene zur Sicherheitsanalyse der Gesamtkonstruktion*. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Heft 6, S. 394-402.
- [MZWW12] Maas, S., Zürbes, A., Waldmann, D., Waltering, M., Bungard, V., De Roeck, G.: *Damage assessment of concrete structures through dynamic testing methods – Part 1 – Laboratory tests, Part 2 – Bridge tests*. *Engineering Structures*, Vol. 34, 2012, S. 351-362 und 483-494.
- [MZWW12] Maas, S., Zürbes, A., Waldmann, D., Waltering, M., Bungard, V., De Roeck, G.: *Damage assessment of concrete structures through dynamic testing methods – Part 2: Bridge Tests*. *Engineering Structures* 34, 2012, S. 483-494.
- [NABL07] Naunheimer, H., Bertsche, B., Lechner, G.: *Fahrzeuggetriebe – Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Springer, 2007.
- [NAOD12] NASA Orbital Debris Programm Office, <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photogallery/beeheives.html>, 2012, letzter Zugriff 20.10.2012.
- [NASP07] Nagayama, T., Spencer, B. F.: *Structural Health Monitoring Using Smart Sensors*. NSEL Report Series, Report No. NSEL-001, November 2007.
- [NAUM04] Naumann, J.: *Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Bedeutung, Verantwortung, Durchführung*. In: *Tagungsband 14. Dresdner Brückenbausymposium*. Technische Universität Dresden, 03/2004, pp. 53-64.
- [NICH03] Nichols, J. M.: *Structural Health Monitoring of Offshore Structures Using Ambient Vibration Excitation*. *Applied Ocean Research* 25 (2003), S. 101-114.
- [NIWX11] Ni, Y. Q., Wong, K. Y., Xia, Y.: *Health Checks through Landmark Bridges to Sky-high Structures*. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2011, S. 103-119.
- [NNWL12] Neitzel, F., Niemeier, W., Weisbrich, S., Lehmann, M.: *Investigation of Low-Cost Accelerometer, Terrestrial Laser Scanner and Ground-Based Radar Interferometer for Vibration Monitoring of Bridges*. In: *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring EWSHM*, Dresden, Germany, 2012.

- [NWSIB13] Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen (NWSIB). <http://www.nwsib.nrw.de>. Letzter Aufruf: 10.01.2013.
- [OBDW05] O'Connor, P. E., Bucknell, J. R., DeFranco, S. J., Westlake, H. S., Puskar, F. J.: Structural Integrity Management (SIM) of Offshore Facilities. Offshore Technology Conference, OTC 17545, Houston, Texas, 2005.
- [ODPS11] Ohio Department Of Public Safety (ODPS): State Of Ohio – Hazard Mitigation Plan. 2011.
- [OKSTRA12] Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA). <http://www.okstra.de>. Letzter Zugriff: 29.09.2012.
- [OPTO12] Internetseite OptoMET GmbH, Darmstadt. <http://www.optomet.de>. Letzter Aufruf: 14.02.2012.
- [OQSS01] Opitz, H., Quade, J., Schwesinger, P., Steffens, K.: Das Belastungsfahrzeug BELFA für die experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Massivbrücken und Abwasserkanälen. Bautechnik 78, Heft 6, 2001, S. 391-397.
- [ORFR10] Orcesi, A.D., Frangopol, D.M.: Inclusion of Crawl Tests and Long-Term Health Monitoring in Bridge Serviceability Analysis. Journal of Bridge Engineering, 2010, May/June 2010, 312-326.
- [OVMO96] Van Overschee, P., De Moor, B.: Subspace Identification for Linear System: Theory-Implementation-Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996.
- [PATE05] Patel, R. J.: Risk Based Inspection. In: Proceedings of the 3rd MENDT, Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Bahrain, Manama, 2005.
- [PEET09] Peeters, B.: Continuous Monitoring of the Øresund Bridge: Data Acquisition and Operational Modal Analysis. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009, S. 2159-2174.
- [PEMD01] Peeters, B., Maeck, J., De Roeck, G.: Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects. Smart Materials and Structures, Vol. 10, No. 3, 2001, S. 518-527.
- [PERE11] Perey, D.: Nondestructive Evaluation Science Branch at NASA Langley Research Center. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, http://www.hrp.org/Site/docs/ResourceLibrary/NAS_A_NESB_Overview.pdf, letzter Zugriff 14.12.2012.
- [PFTH07] Park, G., Farrar, C. R., Todd, M. D., Hodgkiss, W., Rosing, T.: Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks. Los Alamos National Laboratory, LA-14314-MS, 2007.
- [PICK09] Pickert, K.: Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen. Dissertation am Institut für Maschinenelemente, Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart, 2009.
- [PMSG09] Prosser, W.H., Madaras, E.I., Studdor, G.F., Gorman, M.R.: Thermal Protection System Monitoring of Space Structures. in Boller, C., Chang, F.-K., Fujino, Y.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring – Volume 4, 2009, S. 1827-1835.
- [POKO99] Portele, C., König, D.: Standardisierung graphischer Daten im Straßen- und Verkehrswesen, Teil 2 – Realisierung, Teilbericht C: Das EXPRESS-Datenschema. Forschungsbericht FE-Nr. 09.092 G95D, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 1999.
- [POLY12] Grundlagen der Vibrometrie. Internetseite der Polytec GmbH, Waldbronn. <http://www.polytec.com/de/loesungen/schwingungen-messen/grundlagen-der-vibrometrie>. Letzter Aufruf: 14.02.2012.
- [POSC04] Poulin, G., Sarraute, E., Costa, F.: Generation of electrical energy for portable devices: Comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system. Sensors and Actuators A, 116, 2004, S. 461-471.
- [PROS07] Prosser, S.J.: Automotive Sensors: past, present and future. Sensors and Applications XIV, Journal of Physics: Conference Series 76, Solihull, 2007.
- [RAND04] Randall, R. B.: State of the Art in Monitoring Rotating Machinery – Part 1. Sound and Vibration 38, 2004, S. 14-20.
- [RAND12] Randelhoff, M.: Wie funktionieren autonome Fahrzeuge? <http://www.zukunft-mobilitaet.net/11299/konzepte/wie-funktionieren-autonome-fahrzeuge>. 2012.
- [RDWH07] Raupach, M., Dauberschmidt, C., Wolff, L., Harnisch, J., Monitoring der Feuchteverteilung in Beton. Beton, 2007, Vol. 1+2, S.20-26.
- [REIC13] Internetseite zur Reichsbrücke. <http://www.reichsbruecke.net>. Letzter Aufruf: 06.07.2013.
- [RICH09] Richter, H.-L.: Mobile Schwingungstests sparen Zeit und Kosten bei der Entwicklung neuer Verkehrsflugzeuge – eine Reportage. Internetseite Deutsches Zentrum für Luft-

- und Raumfahrt - DLR: http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-5098/8578_read-19056/8578_page-2. 2009.
- [RI-EBW-PRÜF07] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF). 2007.
- [RKHF05] Raghunathan, V., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J., Srivastava, M.: Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2005.
- [ROAC09] Roach, D.: Use of Leave-in-place Sensors and SHM Methods to improve Assessment of Aging Structures. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009, pp. 1579-1617.
- [ROCA11] Rosenquist, M. O., Cantieni, R.: Experimentelle Modalanalyse einer Straßenbrücke im Rahmen einer Belastungsanalyse. SGEB-DACH Tagung, Hannover, 2011.
- [RORS05] Robert-Nicoud, Y., Raphael, B., Smith, I.F.C.: Configuration of measurement systems using Shannon's entropy function. Computers & Structures, Volume 83, Issues 8–9, March 2005, pp. 599–612.
- [RRSS03] Rücker, W., Rohrmann, R. G., Said, S., Schmid, W.: Dynamische Verfahren zur Sicherheitsüberwachung von Brückenbauwerken. SIA-Dokumentation D 0198 „Aktuelle Probleme der Brückendynamik“, D-A-CH Tagung 2003.
- [RUEC12a] Rücker, W.: Bauwerksüberwachung – Kontinuierliche Bauwerksüberwachung. VDI Wissensforum, Bauwerksüberwachung – Konzepte, Sensorik, Bewertungsverfahren und Anwendungen, Kassel, 27.04.2012.
- [RUEC12b] Rücker, W.: Bauwerksüberwachung – Konzepte und Aufgaben. VDI Wissensforum, Bauwerksüberwachung – Konzepte, Sensorik, Bewertungsverfahren und Anwendungen, Kassel, 27.04.2012.
- [RUHR06a] Rücker, W., Hille, F., Rohrmann, R.: Guideline for the Assessment of Existing Structures. SAMCO Final Report F08a, 2006.
- [RUHR06b] Rücker, W., Hille, F., Rohrmann, R.: Guideline for Structural Health Monitoring. SAMCO Final Report F08b, 2006.
- [RWS-DVS09] Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart (RWS-DVS): Advanced Inspections Project - Innovative Technologies to improve Highway Condition Monitoring. Bericht D03031/CG9/0M0/001999/ep, D03031.001999, 28. September 2009.
- [RYTT93] Rytter, A.: Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. Dissertation, University of Aalborg, Denmark, 1993.
- [SAWI95] Salawu, O.S., Williams, C.: Review of full-scale dynamic testing of bridge structures. Engineering Structures, Vol. 17, Issue 2, 1995, S. 113–121.
- [SBWH09] Strauss, A., Bergmeister, K., Wendner, R., Hoffmann, S.: System und Schadensidentifikation von Betontragstrukturen. In: Beton-Kalender 2009, Ernst & Sohn.
- [SCHM08] Schmidt, W.-D.: Sensorschaltungstechnik. Vogel, 2008.
- [SCHN08] Schnetgöke, R.: Zuverlässigkeitsorientierte Systembewertung von Massivbauwerken als Grundlage für die Bauwerksüberwachung. Dissertation am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, 2008.
- [SCKA10] Schnellenbach-Held, M., Karczowski, B.: Physical Nonlinear Model Identification in Model-Based Long-Term Structural Health Monitoring. Tagungsband 'iccbe2010', Nottingham, England, 2010.
- [SCKA11] Schnellenbach-Held, M., Karczowski, B.: Nonlinear Model-Updating in Long-Term Structural Health Monitoring: Sensitivity Analyses. In: Proceedings of the EG-ICE Workshop, Twente University, Enschede, The Netherlands, 2011.
- [SCKA12] Schnellenbach-Held, M., Karczowski, B.: Physics-Based Output-Only Model Identification of Reinforced Concrete Structures from Static Response. In: Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring EWSHM, Dresden, Germany, 2012.
- [SCPM13] Schnellenbach-Held, M., Peeters, M., Miedzinski, G.: Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. Entwurf Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 15.0510/2010/DRB. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2013 (unveröffentlicht).
- [SDSG06] Sodeikat, C., Dauberschmidt, C., Schieß, P., Gehlen, C., Kapteina, G.: Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken für Public Partnership Projekte - Dauerhaftigkeit sichtbar machen. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 101 (12), 2006, S. 932-942.
- [SDSK99] Sohn, H., Dzwonczyk, M., Straser, E.G., Kiremidjian, A.S., Law, K.H., Meng, T.: An experimental study of temperature effect on modal

- parameters of the Alamosa Canyon Bridge. Earthquake Engineering and structural dynamics, Vol. 28, 1999, S. 879-897.
- [SENS12] Internetseite Sensortec GmbH. <http://www.sensortec.de>. Letzter Zugriff: 08.05.2012.
- [SFBF11] Sousa, H. and Felix, C. and Bento, J. and Figueiras, J.: Design and implementation of a monitoring system applied to a long-span prestressed concrete bridge. Structural Concrete, Vol. 12, Issue 2, 2011, S. 82-93.
- [SFDT13] Schneider, R., Fischer, J., Dori, G., Thöns, S., Borrmann, A., Straub, D.: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells. 1. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt FE 15.0546/2011/LRB, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2013 (unveröffentlicht).
- [SFHS04] Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R., Czarnecki, J.J.: A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001. LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, 2004.
- [SGSF06] Straub, D., Goyet, J., Sørensen, J. D., Faber, M. H.: Benefits of Risk Based Inspection Planning for Offshore Structures. In: Proceedings of OMAE'06, 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, 2006.
- [SIB-BW12] Internetseite „SIB-Bauwerke“, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). <http://www.sib-bauwerke.de>. Letzter Aufruf: 29.10.2012.
- [SLCP09] Sazonov, E., Li, Haodong, Curry, D., Pillay, P.: Self-Powered Sensors for Monitoring of Highway Bridges. IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No. 11, November 2009.
- [SMCG09] Silva, A. F., Mendes, P. M., Correia, J. H., Goncalves, F. et al.: Inner Car Smart Flooring for Monitoring Chassis Deformation. In: Proceedings of the IEEE Sensors Conference, Christchurch, Neuseeland, 2009.
- [SOHN07] Sohn, H.: Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. Philosophical Transactions of The Royal Society A, Vol. 365, S. 539-560, 2007.
- [SPBE12] Internetseite Projekt „Spirit of Berlin“. <http://autonomos.inf.fu-berlin.de/technology/spirit-of-berlin>. Letzter Aufruf: 29.09.2012.
- [SRNK11] Sani, M. S. M., Rahmann, M. M., Kadirgama, K., Izham, M. H. N.: Identification of Dynamics Modal Parameter for Car Chassis. IOP Conference: Material Science and Engineering 17, 2011.
- [STDE11] Stamatelatos, M., Dezfuli, H.: Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners, 2011.
- [STEF98] Steffens, K.: Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Bauten in situ. Der Prüfenieur, Oktober 1998, S. 14-22.
- [STEI12] Internetseite Steinhauser Erschütterungsschutz. <http://www.steinhauser.eu>. Letzter Zugriff: 23.05.2012.
- [STFA06] Straub, D., Faber, M. H.: Risikobasierte Inspektionsstrategien für den optimalen Unterhalt von Tragwerken. Stahlbau 75 (2006), Heft 5, S. 389-396.
- [STPI12] Internetseite Projekt „Stadtpilot“. <http://stadtpilot.tu-bs.de>. Letzter Aufruf: 29.09.2012.
- [TAWI10] Taffe, A., Wiggerhauser, H.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau). Informationstag Moderne Bauwerkprüfung 2010.
- [TEDE04] Teugels, A., De Roeck, G.: Structural Damage Identification of the Highway Bridge Z24 by FE Model Updating. Journal of Sound and Vibration, Vol. 278, Issue 3, 2004, S. 589-610.
- [TEDE05] Teughels, A., De Roeck, G.: Damage Detection and Parameter Identification by Finite Element Model Updating. Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 12(2), 2005, S. 123-146.
- [TELG09] Telgkamp, J.: Design Principles for Aerospace Structures. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009, pp. 1449-1465.
- [THOF97] Thoft-Christensen, P.: Review of Industrial Applications of Structural Reliability Theory, ESRA, Takamatsu, Kagawa, Japan, 1997, S. 27-36.
- [UBBE12] Ubbelohde, H.-L.: Terrestrisches 3-D-Laserscanning – Messmethodik und Einsatzmöglichkeiten zur Objekterfassung im Bauwesen. In: Bauphysik-Kalender 2012.
- [UNTD06] Unger, J., Teughels, A., De Roeck, G.: System Identification and Damage Detection of a Prestressed Concrete Beam. Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 11, 2006, S. 1691-1698.
- [USGW00] Ujorth, P., Sims, G., Goodwin, P., White, R. et al.: Operations, Monitoring and Decommissioning of Dams. World Commission of Dams (WCD) Thematic Review Options Assessment IV.5, Version November 2000.

- [USSD08] United States Society on Dams (USSD): Why Include Instrumentation in Dam Monitoring Programs? White Paper, Version 1.00, November 2008.
- [VDI4003] VDI-Richtlinie 4003: Zuverlässigkeitsmanagement. März 2007.
- [VDI/VDE2650] VDI/VDE-Richtlinie 2650, Blatt 1: Anforderungen an Selbstüberwachung und Diagnose in der Feldinstrumentierung – Allgemeine Anforderungen. August 2006.
- [VEWE06] Veit, R., Wenzel, H.: Measurement Based Performance Prediction of the Europa-Brücke Against Traffic Loading. Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, 2006, S. 455-456.
- [VIBR10] Künstliche Schwingungsanregung mittels VibroScan®-Schwingungsgenerator. Messtechnik im Bauwesen, Ernst und Sohn-Special, Februar 2010, S. 33-34.
- [WACF01] Wang, X., Chang, C.-C., Fan, L.: Nondestructive Damage Detection of Bridges: A Status Review. Advances in Structural Engineering, Vol. 4, No. 2, 2001, S. 75-91.
- [WAHA12] Walther, A., Hasenstab, A.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Materialparametern im Stahl- und Spannbetonbau. In: Bauphysik-Kalender 2012.
- [WBWD09] Waltering, M., Bungard, V., Waldmann, D., Maas, S.: Vergleich statischer und dynamischer Methoden zur Zustandsbewertung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Beton- und Stahlbetonbau, 104 (2009), Heft 10, S. 628-641.
- [WEIS08] Weis, M.: Beitrag zur Gestaltung von Sensorsystemen für die strukturintegrierte Zustandsüberwachung bei Luftfahrtanwendungen. Dissertation am Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, 2008.
- [WENZ09] Wenzel, H.: Health Monitoring of Bridges. John Wiley & Sons, 2009.
- [WEPI05] Wenzel, H., Pichler, D.: Ambient Vibration Monitoring. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [WERN04] Werner, G.-W.: Praxishandbuch Instandhaltung. Weka Media GmbH & Co. KG, 2004.
- [WERT06] Werthschützky, R.: Selbstüberwachung und Störungstoleranz von Sensoren. In: 20. Messtechnisches Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik, Bayreuth, 2006.
- [WFMP07] Worden, K., Farrar, R. C., Manson, G., Park, G., The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring. Proceedings of The Royal Society A, Vol. 463, 2007, S. 1639-1664.
- [WHAK04] Walter, D., Hoffmann, J., Adam, N., Kampes, B.: Radarfernerkundung zur Erfassung bergbaubedingter Senkungen. 5. Geokinetischer Tag, Freiberg, 2004.
- [WIKN04] Wieland, R., Knipfer, A.: Möglichkeiten einer prädikativen Beurteilung von gefährdeten Objekten infolge Tunnelvortrieben im innerstädtischen Bereich. In: 125 Jahre DMV – 44. Wissenschaftliche Fachtagung, Bochum, 15. bis 18. September 2004.
- [WILM12] Internetseite Wilmers Messtechnik GmbH. <http://www.wilmers.com>. Letzter Zugriff: 08.05.2012.
- [WINF09] Winfree, W.: Overview of Nondestructive Evaluation Science Branch. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, http://technologygateway.nasa.gov/events/presentations/docs/NESB_Overview.pdf, 2009, letzter Zugriff 14.12.2012.
- [WIST04] Winkler, E., Steger, H.: Einsatz der Scanning-Laservibrometrie zur Messung von Schallschnelleverteilungen an Maschinen und Anlagen. 8. Forum Akustische Qualitätssicherung, 2004.
- [WITA04] Wiggenhauser, H., Taffe, A.: Zerstörungsfreie Prüfungen. In: Bauphysik-Kalender 2004, Ernst & Sohn.
- [WODU04] Worden, K., Dulieu-Barton, J.M.: An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. Structural Health Monitoring, Vol. 3(1), 2004, S. 85-98.
- [WONG04] Wong, K.-Y.: Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. Structural Control and Health Monitoring 2004, 11, S. 91-124.
- [YANA07] Yehia, S., Abudayyeh, O., Nabulsi, S., Abdelqader, I.: Detection of Common Defects in Concrete Bridge Decks Using Nondestructive Evaluation Techniques. Journal of Bridge Engineering, Vol. 12, Issue 2, 2007, S. 215-225.
- [YILI12] Yi, T.-H., Li, H.-N.: Methodology Developments in Sensor Placement for Health Monitoring of Civil Infrastructures. International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2012, 2012.
- [ZACA07] Zaurin, R. and Catbas, F. N., Computer Vision Oriented Framework for Structural Health Monitoring of Bridges. Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, 2007.

[ZAEN11] Zänkert, S.: Vehicle Sensors. Seminar: Car-to-Car Kommunikation und selbstorganisierende Netze, Universität München, 2011.

[ZELL03] Zell, A.: Simulation Neuronaler Netze. 4. Auflage, Oldenbourg-Verlag, 2003.

[ZIGB13] Internetseite ZigBee-Alliance. <http://www.zigbee.org>. Letzter Zugriff: 22.03.2013.

[ZKPM10] Ziegler, H., Kathmann, T., Pozybill, M., Mayer-Kreitz, M.: Erfahrungsbericht Verkehrsmonitoring Baden-Württemberg 2010. Straßenverkehrstechnik, Vol. 7, 2011. S. 442-450.

[ZSDF11] Zilch, K., Straub, D., Dier, F., Fischer, J.: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 88.002/2009, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel
Sistenich € 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewehrung
Schröder € 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten
Schröder, Staack € 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff
Eilers € 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (t), Dehn, Orgass, Sint € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-kategorie XF4
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00

B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln
Blosfeld € 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

2010

B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau
Kuhlmann, Euler € 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen
Weschpennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk
Müller € 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes
Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“
Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“
Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“
Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse
Müller, Vogel, Neumann € 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle in Vorbereitung

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn in Vorbereitung

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid in Vorbereitung

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing in Vorbereitung

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Borrmann, Fischer, Dori, Wild
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.