

Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 106

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken

von

Ursula Freundt
Ralf Vogt
Sebastian Böning
Dirk Michael

Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt, Weimar

Carsten Könke
Heiko Beinersdorf

Materialforschungs- und Prüfanstalt
Bauhaus-Universität Weimar

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 106

bast

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

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und 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](http://elba.bast.opus.hbz-nrw.de) zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE15.532/2011/HRB:
Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken

Fachbetreuung:
Ralph Holst

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 978-3-95606-101-1
Bergisch Gladbach, Juli 2014

Kurzfassung – Abstract

Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken

Der Brückenbau in Deutschland kann auf eine lange Tradition in der Überwachung der Bauwerke verweisen und die Entwicklung der Rechentechnik gestattet in immer komplexeren Strukturen die Verwaltung der Bauwerksdaten in Datenbanken. Verfügbare Programmsysteme wie zum Beispiel das Bauwerks-Management-System (BMS) erlauben die Erfassung, Verwaltung und Auswertung der Bauwerksdaten.

Die Entwicklung der Rechentechnik wird auch durch die Entwicklung der Messtechnik begleitet, sodass zunehmend intelligente Sensorik den Alltag begleitet. Eine automatisierte Messwerverfassung an Bauwerken und deren Auswertung werden Monitoring genannt. Heute existieren sowohl Monitoringsysteme, die sich durch die technische Ausstattung und entsprechende Auswerteverfahren auszeichnen, als auch jeweils getrennte Komponenten.

Da schließt das Projektziel an, welches die Analyse der Möglichkeiten des Einsatzes von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustandes von Brücken für die Tragfähigkeit und die Restnutzungsdauer beinhaltet.

Es wird eine Literaturanalyse hinsichtlich existierender Monitoringsysteme mit genannter Zielstellung angefertigt. Im Ergebnis wird festgestellt, dass es gegenwärtig keine Monitoringsysteme gibt, die explizite Aussagen zur Tragfähigkeit erlauben. Die gegenwärtigen Systeme zeigen globale Schädigungen auf und bewerten dann auf der Basis notenähnlicher Strukturen.

Im Rahmen des Projektes wird ein Konzept für ein Monitoringsystem entwickelt, welches für konkrete Versagenszenarien – das Festigkeitsversagen und die Ermüdung – quantifizierte, aber unscharfe Aussagen zur Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer für die untersuchte Brücke erlaubt. Der Abstand zum Versagen durch Übergang des Tragwerks in einen Bruchzustand (Tragfähigkeit) wird im konzipierten Monitoringsystem durch den Zuverlässigkeitsindex β und die Versagenswahrscheinlichkeit P_f beschrieben. Die Restnutzungsdauer bei Tragfähigkeitsminderungen ist implizit bei den ver-

änderlichen Basisvariablen und den Schädigungsverläufen abgebildet. Als Maß für Aussagen zur expliziten Restnutzungsdauer infolge Materialermüdung dienen die Schädigungssumme D und die zugehörige Nutzungsdauer t_{zD} . Zur Abgrenzung sicherer und unsicherer Bereiche werden diese Daten für verschiedene Zeitpunkte im Lebenszyklus des Bauwerkes ermittelt und in Relation betrachtet. Monitoringbasiert werden hierfür Kenndaten des Tragsystems ermittelt und Beanspruchungen durch ergänzende Simulationen des aktuellen Verkehrs abgeleitet. Das Monitoringkonzept sieht, den Erkenntnissen der Literaturanalyse folgend, dieses Vorgehen als Interaktion von Rechnung, Messung und Auswertung vor.

Die Untersuchungen werden in diesem Projekt theoretisch geführt, die empfohlenen Auswertelgorithmen zur monitoringbasierten Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer für balkenartige Spannbetontragwerke auf Basis von Beispielen anderer Projekte rechnerisch erprobt.

Use of monitoring systems for the assessment of the condition of bridges

Development and application of methods to assess the structural safety of bridge structures has a long history in Germany. Recent improvements in computer hard- and software enable bridge engineers to maintain more and more complex structural data in data bases. Current programs systems such as the Bauwerks Management System (BMS) offer the possibility of data acquisition, management and assessment of structural status data.

Corresponding to the improvement in computer hard- and software also sensor techniques have been improving recently, by miniaturization and self-sustaining systems. Automated data acquisition and data processing of structural status data is referred to as monitoring system. Today monitoring systems exist which offer combined sensor equipment and automated data processing algorithms as well as separated components.

The project goal has been to investigate and assess the opportunities of monitoring systems in order to

evaluate the structural safety status of bridge structures. Based on the information about current structural safety with respect to ultimate limit states, a prediction about life span and expected service life can be given.

A comprehensive literature review about up-to-date monitoring systems with respect to the project goal has been performed. As a result it can be shown that there are presently no monitoring systems available, which allow precise and robust conclusions about the load bearing capacity of real scale bridge structures. Current systems can detect global structural damage but in general do not localize it and therefore only allow a load bearing capacity assessment via grading systems.

Within the frame of the research project a methodology for a monitoring system is developed which allows the prediction of quantitative but uncertain statements about load bearing capacity and residual service life, based on specific failure scenarios for ultimate limit load and fatigue load. The distance to limit load conditions and therewith the structural safety of a bridge structures can be described by the reliability index β and the probability of failure P_f .

Structural deterioration and damage are implicitly considered in time dependent basis variables and damage evolution laws. Residual service life can be explicitly assessed via damage indicator D and corresponding residual service life t_{zD} . In order to judge on safe and insecure structural situations these measure are evaluated for different instants of time in the structural life time. Based on monitoring data and applying system identification methods the current structural status is assessed and up-to-date data about traffic load conditions is collected. Time variant resistance and demand are then extrapolated by numerical simulations into the future. The proposed monitoring concept is therefore an interaction between numerical simulation, monitoring data acquisition and calibration of both model data.

All investigations within the project are based on artificial data, the developed algorithms have been validated on data of beam-type prestressed concrete structures from different projects.

Inhalt			
Danksagung	7	7.1.1 Allgemein	20
1 Einleitung	7	7.1.2 Einführung	20
2 Projektziel	7	7.1.3 Grenzzustandsfunktion	21
3 Definitionen	8	7.1.4 Sicherheitsindex	22
4 Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken	9	7.1.5 Zufallsvariablen	23
5 Analyse verfügbarer Monitoring- systeme zur Abschätzung der Tragfähigkeit und Restnutzungs- dauer	10	7.1.6 Stochastisches Modell der Einwirkungen	23
5.1 Struktur von Monitoringsystemen	10	7.1.7 Stochastisches Modell der Widerstände	26
5.1.1 Lokales Monitoringsystem	10	7.1.8 Modellunsicherheiten	27
5.1.2 Globales Monitoringsystem	11	7.1.9 Lösungsverfahren – numerische Integrationsverfahren	28
5.2 Verfahrensablauf globaler Monitoringsysteme	13	7.2 Ermittlung der Schädigungssumme und Nutzungsdauer infolge Material- ermüdung	30
5.3 Beschreibung von Schädigungen bestehender Brücken	14	7.2.1 Allgemeines	30
5.3.1 Kennwerte von Schädigungen	14	7.2.2 Beanspruchungskollektive	31
5.3.2 Einsatz von Monitoringsystemen zur Be- wertung von Schädigungen und folgend der Tragfähigkeit von Brücken	15	7.2.3 Ermüdungsfestigkeit	31
6 Konzeptentwicklung für Monitoring- systeme zur Bewertung von Trag- fähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken	16	7.2.4 Schadensakkumulation	31
6.1 Allgemeines	16	8 Ausgewählte Probleme im Rahmen der Konzeptentwicklung	32
6.2 Versagen durch Übergang des Trag- werkes in einen Bruchzustand	17	8.1 Schädigungsprognosen für Beton und Stahlbetontragwerke	32
6.3 Versagen durch Materialermüdung ...	18	8.2 Systemidentifikation	33
6.4 Quantifizierte, aber unscharfe Aussagen	18	8.2.1 Allgemeines	33
7 Grundlagen der Konzept- entwicklung	20	8.2.2 Ungeschädigtes Tragwerk	34
7.1 Probabilistische Ermittlung von Zu- verlässigkeitsindex und Versagens- wahrscheinlichkeit	20	8.2.3 Geschädigtes Tragwerk (Feld)	35
		8.2.4 Geschädigtes Tragwerk (Stütze)	36
		8.3 Modelle für geschädigte Tragsysteme	36
		8.3.1 Ungeschädigtes Tragsystem	37
		8.3.2 Geschädigtes Tragsystem (Feld)	38
		8.3.3 Geschädigtes Tragsystem (Stütze) ...	39
		8.4 Interaktion geschädigte Systeme – Beanspruchungen infolge Verkehrs ...	41
		8.4.1 Grundlagen der stochastischen Beschreibung von Beanspruchungen aus Verkehr	41
		8.4.2 Aktueller und angenommener zukünftiger Verkehr	41
		8.4.3 Auswirkungen von Schädigungen auf den Kennwertverlauf eines Einzelfahr- zeuges	43

8.4.4	Ermittlung von charakteristischen Werten der Verkehrsbeanspruchungen	44	9.6.1	Tragsystemmodell	64
8.4.5	Ableitung von stochastischen Beschreibungen	45	9.6.2	Daten des aktuellen Verkehrs	65
8.5	Anforderungen an Tragsystemmodelle	52	9.6.3	Stochastische Beschreibung von Beanspruchungen aus Verkehr	65
8.5.1	Vorgehensweise	52	9.6.4	Ermittlung von Beanspruchungskollektiven aus Verkehr – Materialermüdung.	66
8.5.2	Modellbeschreibung	53	9.6.5	Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten, Sicherheitsindices	67
8.5.3	Genauigkeitsklassen unterschiedlicher FE-Modelle	54	9.6.6	Ermittlung der Schädigungssummen und Restnutzungsdauern	71
9	Das Monitoringsystem zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken	56	10	Leitfaden zur Ausschreibung eines Monitoringsystems zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken	72
9.1	Ein Überblick	56	10.1	Bestandteile des Monitoringsystems	72
9.2	Anwendungsbereich	58	10.2	Leistungsbeschreibung.	73
9.3	Auswahl des Messequipments	58	11	Korrelation zu Nachrechnungs- und Erhaltungssystemen.	74
9.4	Tragsysteme – Schädigungsprognosemodelle	58	11.1	Monitoringbasierte Nachrechnung	74
9.4.1	Initiales Tragsystem (T_{t0})	58	11.2	Das Monitoringkonzept und das BMS der BAsT	75
9.4.2	Update des Tragsystemmodells (T_{t1} bis T_{tn-1})	58	12	Zielstellung und Ergebnis – ein Quervergleich	75
9.4.3	Tragsystem mit Schädigungen, die zum Bruch durch Überlast führen (T_{tn})	59	12.1	Zielstellung nach Kapitel 2	75
9.5	Auswertemodule	59	12.2	Ergebnis am Projektende	75
9.5.1	Daten des objektbezogenen Verkehrs	59	13	Literatur	76
9.5.2	Stochastische Beschreibung von Beanspruchungen infolge objektbezogenen Verkehrs.	61	Anhang		
9.5.3	Ermittlung von Beanspruchungskollektiven aus Verkehr.	61	A	Analyse Schadenskatalog Hauptbauteil Überbau aus Stahlbeton und Spannbeton	
9.5.4	Stochastische Beschreibung der Widerstände	62	B	Prinzipieller Ablauf bei Monitoringsystemen	
9.5.5	Zuverlässigkeitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit für ein Biegeversagen aus identifiziertem Tragwerksmodell	63	C	Ein kennwertbezogenes Monitoring-System für Brücken – Grundlagen und praktische Empfehlungen	
9.5.6	Schädigungssumme und Restnutzungsdauer.	64			
9.6	Exemplarische Teilergebnisse für die gewählte Beispielbrücke	64			
				Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAsT-Archiv ELBA unter:	
				http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar	

Danksagung

Das Thema Monitoring ist seit langem mit unterschiedlichen Ausrichtungen Gegenstand von Forschungen und auch für Teilgebiete in der praktischen Anwendung. Die steile Entwicklung von Sensorik und Rechentechnik und die verbreitete Anwendung in allen Gebieten fordern den Einsatz im Bauwerksbereich heraus. Vor einer praktischen Anwendung sind jedoch immer Untersuchungen erforderlich. Wir durften einen Beitrag dazu leisten und würden diesen auch gerne in einer praktischen Anwendung unter Beweis stellen.

Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, für die Möglichkeit dieser Untersuchungen.

1 Einleitung

Der Brückenbau in Deutschland kann auf eine lange Tradition in der Überwachung der Bauwerke verweisen. Listen über den Brückenbestand existierten bereits im 19. Jahrhundert und die DIN 1076, welche die Überwachung und Prüfung der Ingenieurbauwerke regelt, gab es bereits am Beginn des 20. Jahrhunderts. Die Entwicklung der Rechentechnik gestattet in immer komplexeren Strukturen die Verwaltung der Bauwerksdaten in Datenbanken und verfügbare Programmsysteme erlauben die Erfassung, Verwaltung und Auswertung der Bauwerksdaten. Ziel war und ist, dem Nutzer gute Verkehrsverbindung, hohe Sicherheit bei minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten sowie größtmögliche Umweltverträglichkeit bereitzustellen [43].

Die Entwicklung der Rechentechnik und die Entwicklung der Messtechnik haben auch dazu geführt, dass zunehmend intelligente Sensorik den Alltag begleitet. Eine temporäre oder permanente automatisierte Messwerterfassung und deren Auswertung an Bauwerken werden Monitoring genannt. Heute existieren sowohl Monitoringsysteme, die sich durch die technische Ausstattung und entsprechende Auswerteverfahren auszeichnen, als auch jeweils getrennte Komponenten. Da schließt das Projektziel an, welches die Analyse der Möglichkeiten des Einsatzes von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustandes und die entsprechenden Konsequenzen für die Tragfähigkeit und die Restnutzungsdauer der untersuchten Brücken beinhaltet.

2 Projektziel

Projektziel ist die Entwicklung eines Konzeptes für ein Monitoringsystem, welches für konkrete Versagensszenarien – das Festigkeitsversagen und die Ermüdung – quantifizierte, aber unscharfe Aussagen zur Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer für die untersuchte Brücke erlaubt.

Auf dem Weg zum Projektziel werden fünf konsequente Schwerpunkte bearbeitet.

Schwerpunkt 1 beinhaltet die Analyse des Standes der Wissenschaft und Technik zu Monitoringsystemen schlechthin und zu den vorliegenden Bewertungsmethoden für Schädigungszustände, Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer im Besonderen.

Schwerpunkt 2 ist dem Ableiten eines Konzeptes aus den Erkenntnissen des Standes der Technik gewidmet. Dabei wird die quantifizierte, aber unscharfe Aussage zur Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer untersetzt.

Ein dritter Schwerpunkt wurde im Laufe der Projektbearbeitung herausgearbeitet. Es erwies sich als erforderlich, in diesem Schwerpunkt die Unter-
setzung einzelner Konzeptpunkte zu vertiefen, die sich im gegenwärtigen Stand der Wissenschaft und Technik nicht widerspiegeln.

Schwerpunkt 4 ist ebenfalls ein ergänzter Schwerpunkt und beinhaltet die beispielhafte Umsetzung kritischer Konzeptpunkte. Es wird hier die theoretische Machbarkeit kontrolliert und vorgestellt.

Schwerpunkt 5 ist der Querbeziehung des Monitoringkonzeptes zum Konzept der Nachrechnungsrichtlinie und zum BMS als Ausblick gewidmet.

Dem Schlussbericht werden einige Definitionen vorangestellt, um Lesen und Bearbeiten zu vereinfachen.

3 Definitionen

Da die im Weiteren verwendeten Begriffe in der Literatur nicht einheitlich belegt sind, werden hier Definitionen vorangestellt, die für dieses Projekt durchgängig verwendet werden. Dabei wird nur im Einzelfall ein Begriff neu belegt, vielmehr werden diese aus dem Stand der Technik abgeleitet.

Monitoring von Ingenieurbauwerken

„Zerstörungsfreie messwertgebundene automatisierte Untersuchungen bzw. Überwachungen an Ingenieurbauwerken. Die derart erhobenen Daten können sowohl für die Einwirkungs- als auch für die Widerstandsseite bereitgestellt werden. Es werden Sensoren temporär oder permanent am Ingenieurbauwerk installiert. Je nach Aufgabenstellung können mit den Sensoren unterschiedliche physikalische oder chemische Parameter statisch und/oder dynamisch gemessen werden“ [55]. Die Messungen können permanent oder zeitlich begrenzt mit und ohne Wiederholungen durchgeführt werden.

Monitoringsystem

Methoden und Werkzeuge der Auswertung der beim Monitoring erhobenen und gespeicherten

Daten. Es umfasst somit die Messtechnik (Monitoring) und die für das Erreichen des Monitoringzieles erforderliche Auswertung.

Schädigung

„Ein Schaden im Sinne der Bauwerksprüfung ist die Veränderung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes gegenüber dem planmäßigen Zustand“ [13].

Eine Schädigung ist die Veränderung der Bauwerkseigenschaften (Kenngrößen) gegenüber den planmäßigen (für die Berechnung angenommenen) Bauwerkeigenschaften.

Tragfähigkeit nach DIN EN 1990

„Mechanische Eigenschaft eines Bauteils oder eines Bauteilquerschnitts im Hinblick auf Versagensformen, z. B. Biege- und Knickwiderstand, Zugwiderstand“ [31].

Tragfähigkeit im Rahmen des Projektes

Im Sinne der vorliegenden Untersuchungen und damit des Projektzieles wird der Begriff Tragfähigkeit im Sinne des Begriffes der Tragsicherheit definiert und beschreibt damit die Fähigkeit eines Bauteiles oder Bauwerkes, dem Versagen zu widerstehen. Sie ist damit der Abstand zwischen Einwirkung und dem Tragwiderstand.

Geplante Nutzungsdauer

„Angenommene Zeitdauer, innerhalb der ein Tragwerk unter Berücksichtigung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden soll, ohne dass jedoch eine wesentliche Instandsetzung erforderlich ist“ [31].

Theoretische Nutzungsdauer

„Erfahrungswert für die mögliche Nutzungsdauer eines Bauwerks oder eines Bauwerksteils. Die theoretische Nutzungsdauer des Bauwerks oder der Bauwerksteile beginnt im Jahr ihrer Fertigstellung“ [14].

Restnutzungsdauer

„Restnutzungsdauer ist die Anzahl der Jahre bis zur voraussichtlichen Erneuerung des Bauwerks oder Bauwerksteils“ [14].

Damage tolerant design

„Entwurfskonzept, welches von der Unvermeidbarkeit von Schädigungen und Rissen in einem Tragwerk ausgeht. Mit Hilfe von Methoden der Schädigungs- und Bruchmechanik bestimmt man über probabilistische Ansätze die noch verbleibende Lebensdauer des Tragwerks, um daraus eine sichere Vorgabe für die Dauer der Inspektionsintervalle sowie die Planung von Wartungs- und Reparaturmaßnahmen abzuleiten“ [49].

Systemidentifikation

Die Systemidentifikation beschreibt Methoden, die Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems validieren.

4 Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken

Um Schäden an Brücken frühzeitig zu erkennen, ist eine regelmäßige Überwachung der Bauwerke erforderlich. Diese Überwachungen und Prüfungen werden gegenwärtig nach DIN 1076 durchgeführt. Im Rahmen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 findet in regelmäßigen Abständen eine handnahe Prüfung durch besonders qualifizierte Bauwerksprüfer statt.

Die Bewertung der im Rahmen der Bauwerksprüfung erkannten Schäden obliegt bei diesen Prüfungen vor Ort dem Bauwerksprüfer, sie ist immer subjektiv und die Qualität der Ergebnisse hängt wesentlich von der Qualifikation und der Erfahrung der Bauwerksprüfer ab.

Eine Analyse des Schadenskataloges nach RI-EBW-PRÜF [13] hinsichtlich einer möglichen Begleitung der Bauwerksüberwachungen durch Monitoring zeigt an einem ausgewählten Beispiel, dem Hauptbauteil Überbau aus Stahl- und Spannbeton, folgende im Schadenskatalog aufgelisteten Schäden:

1. übermäßige Verformung des Überbaues,
2. Durchfeuchtungen/Ausblühungen/Aussinterungen am Überbau,
3. Abplatzungen mit freiliegender korrodierter Tragbewehrung mit Querschnittsminderung bis hin zum teilweisen Ausfall der Tragbewehrung,
4. Unterschreitung der Betondeckung unter Berücksichtigung der Betonqualität,

5. Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront,
6. Eindringtiefe der Chloridfront,
7. Kontrolle von Rissen und Rissweiten unter Berücksichtigung von Einwirkungsbereichen (Sprühnebel-/Spritzwasserbereich/sonstiger Bereich) bis hin zu Rissbewegungen unter Verkehrslasten.

Eine Übersicht zu den Schäden, möglichen Messverfahren und der Eignung der Messverfahren für Monitoringaufgaben ist in tabellarischer Form in Anhang A zusammengestellt.

Die im Text gelisteten Schäden werden durch visuelle Kontrollen erfasst. Ein Monitoring wäre hier nur angebracht, wenn beim Neubau flächig verteilt Sensorik zum Einsatz kommt. Bei den Schäden 2, 5 und 6 könnte damit eine Schwellwertüberwachung angedacht werden, die ein Fortschreiten des Schadens bei sofortigem Eingriff verhindert.

Schaden Nummer 4 ist eine Bauüberwachungsaufgabe und eine Feststellung zur Abnahme der Brücke.

Schaden 1 sollte die Ausnahme sein. Wenn er auftritt, dann ist ein Monitoring im Sinne einer Schwellwertüberwachung sinnvoll.

Für den Schaden Nummer 7 sind für die Rissbewegungen Schwellwertüberwachungen sinnvoll. Allerdings sollte die Ursache mit verfolgt werden.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass die aufgeführten Schäden des Schadenskataloges keine Schäden sind, die im Sinne einer Schädigung der Brücke unerkannt bleiben und somit zu einer Tragfähigkeitseinschränkung aus Nichterkennen führen. Sie sind am Sinn einer Brückenprüfung orientiert.

Zur Auswertung der Schäden, welche im Rahmen einer handnahen Prüfung festgestellt werden können, sind in BRAML [19] Untersuchungen veröffentlicht.

Dabei orientiert er sich für Stahlbeton auf 3 Kategorien:

- betonschädigend: Ausblühungen, Betonkorrosion,
- betonschädigend mit Auswirkungen auf den Betonstahl: Chloridschäden, Karbonatisierung, Risse, Abplatzungen,

- betonstahlschädigend: Korrosion des Betonstahls.

In [19] werden mechanische Modelle vorgestellt, welche den Einfluss von Schädigungen auf die Materialparameter beschreiben:

- Verringerung der Betondruckfestigkeit infolge Frost- und Frost-Tausalzbeanspruchung,
- Änderung der Betondruckfestigkeit infolge Karbonatisierung,
- Verringerung der Betonzugfestigkeit infolge Frost- und Frost-Tausalzbeanspruchung,
- Änderung des Elastizitätsmoduls des Betons infolge Frost- und Frost-Tausalzbeanspruchung,
- Änderung des Verbundverhaltens,
- Degradationsmodelle für die Korrosion von Betonstahl in Abhängigkeit von Karbonatisierung und Chlorideintrag (Änderung der Stahlquerschnittsfläche).

Diese Modelle gestatten eine Beurteilung der Sensitivität der genannten Schädigungen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeitsrelevanz.

5 Analyse verfügbarer Monitoringsysteme zur Abschätzung der Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer

5.1 Struktur von Monitoringsystemen

Monitoringsysteme werden je nach Zielstellung als lokale und/oder globale Systeme eingesetzt. In Bild 1 ist ein entsprechender Überblick gegeben.

5.1.1 Lokales Monitoringsystem

Ein lokales Monitoringsystem wird installiert, wenn bereits bekannte Schäden in ihrem weiteren Verlauf beurteilt werden sollen oder es sich um die Verhaltensanalyse einzelner Bauteile handelt, wie zum

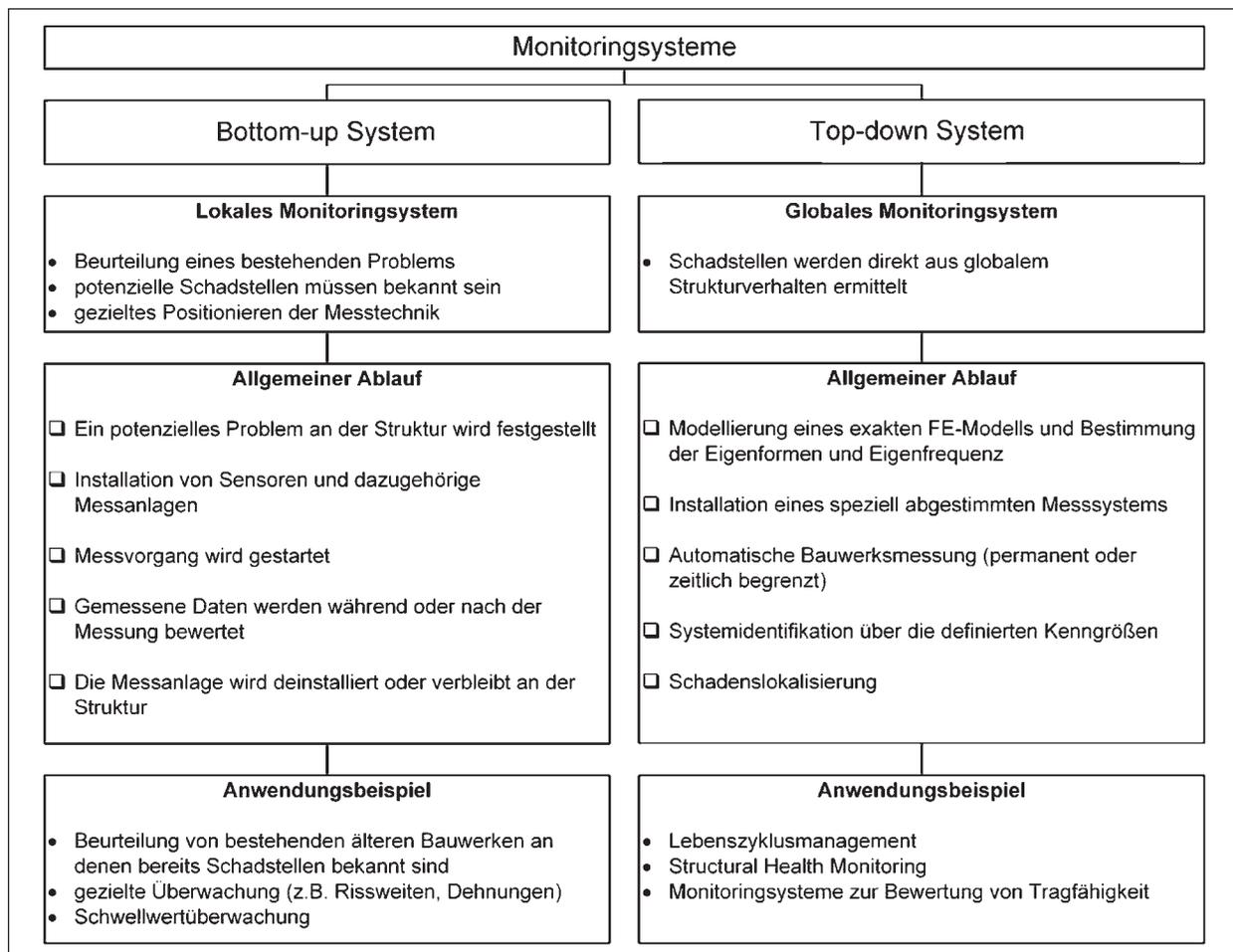


Bild 1: Monitoringsysteme

Beispiel die Bewegungsaufnahme an Fahrbahnübergängen und deren Korrelation zur Temperatur. Vielfach beschränken sich diese Einsätze auf ein reines Monitoring. Die gemessene Kenngröße hat zum Beispiel einen Schwellwert und benötigt keine weitere Auswertung.

Ein Beispiel für ein entsprechendes lokales Monitoring ist ROBOControl der Fa. mageba. SPULER, MOOR, BERGER beschreiben in [66] ein Rissmonitoring am Weyermannshaus Viaduct Bern. Nach 30 Jahren Nutzung wurde das Monitoring zur Beantwortung der Frage verwendet, ob aufgetretene Risse an Koppelfugen schon während des Baus oder erst in der Nutzungsphase entstanden sind. Es wurden kurzzeitige Messungen mit hoher Abtastrate und eine Messung über ein Jahr mit niedriger Abtastrate zur Erfassung des Temperatureinflusses durchgeführt. Ein anderes Beispiel ist in BERGER, FRITZ [9] mit der Fernüberwachung der Incheon-Brücke-Südkorea gegeben. Es wurden Bewegungen und Verdrehungen an einem Lamellenübergang mit einer Bewegungskapazität von 2,0 m mittels Ultraschallsensoren sowie Temperaturen am und außerhalb des Bauwerks gemessen. Dabei wurden sowohl die Gesamtbewegung des Überganges als auch die Bewegungen einzelner Lamellen gemessen und die Lamellenverschiebung der Einzellamellen in Abhängigkeit von der Temperatur aufgezeigt.

An der Autobahnbrücke Gossensaß [63]. wurden mittels Chlorid- und Widerstandssensoren, welche über die Tiefe des Bauteils eingebracht waren, die Feuchtigkeits- und Chloridaufnahme an exponierten Stellen überwacht. Dieses Monitoringsystem wurde mit einem globalen Monitoringsystem kombiniert, welches mittels Verschiebungs-, Dehnungs- und Neigungssensoren die Tragwerksbewegungen sowie Beton- und Spannstahldehnungen zur Untersuchung der mechanischen Beanspruchung und des Verformungsverhaltens erfasste. Begleitend erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojektes (SARA) eine Untersuchung der Tragwerkszuverlässigkeit auf probabilistischer Basis.

Es sind in der Literatur umfängliche Beispiele veröffentlicht. Da das Projektziel sich nicht auf Aufgaben der lokalen Monitoringsysteme orientiert, sei nur noch beispielhaft auf [64] hingewiesen, wo globale und lokale Systeme beschrieben sind.

5.1.2 Globales Monitoringsystem

Das Thema ist hochaktuell. Es arbeiten viele Forscher an der Optimierung von Top-down Systemen. Die Ziele der einzelnen Autoren sind jedoch different. Dennoch kann ganz allgemein formuliert werden:

Ein Ziel der globalen Monitoringsysteme ist es, aus Schädigungen eines Tragwerkes Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit und Nutzungsdauer des Tragwerks zu erlangen. Dabei können die Schädigungen über das Monitoringsystem erkannt, lokalisiert und quantifiziert werden oder die Schädigungen sind aus vorlaufenden Untersuchungen bekannt. Schädigungen eines Bauwerkes sind durch eine Vielzahl von Kenngrößen beschreibbar. Es sind Auswerteverfahren erforderlich, die aus den Messdaten entsprechende Informationen ableiten lassen. Ein Auswerteverfahren für die Messung von Kenngrößen ist die Systemidentifikation. Die zur mathematischen Auswertung angewandten Verfahren können deterministisch oder stochastisch sein.

Ein kommerziell eingesetztes globales Monitoringsystem ist unter dem Namen BRIMOS in der Literatur beschrieben, z. B. [25]. Die Analyse der dynamischen Messdaten liefert Aussagen zu Eigenformen, Eigenfrequenzen und Dämpfungsmaßen. Die Systemidentifikation erfolgt über ein Finite-Elemente-Model-Updating-Verfahren. Aus der Auswertung der Dämpfungswerte werden die Tragwerke in 3 Klassen entsprechend dem Tragwerkszustand eingeteilt. Die Auswertung von Frequenzspektren, Eigenformen und Schwingungsamplituden und der Vergleich mit einem Berechnungsmodell ermöglichen weitere Aussagen zum Tragwerkszustand und möglichen Schädigungen.

Ein weiteres Ziel der globalen Monitoringsysteme ist die Ableitung aktueller Einwirkungen aus den Brückenmessdaten. Zu diesem Zweck wurde an der Professur Verkehrsbau bereits 2007 eine Diplomarbeit durch BÜCHNER [24] angefertigt. Auf der Basis einer umfänglichen Literaturanalyse wurden konkrete Monitoringsysteme hinsichtlich ihrer Ergebnisse gewertet. Ein Auszug der Diplomarbeit mit entsprechenden Beispielen befindet sich im Anhang C zu diesem Bericht.

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Innovationsprogramm Straße“ wurden vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) drei Projekte zum Thema „Adaptive und intelligente Brücken der Zukunft“ gefördert:

- „Adaptive Tube-in-Tube Brücken“,
- „Roadtraffic Management System“,
- „Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem“.

Hierbei wurde das Projekt „Roadtraffic Management System (RTMS)“ von der Professur Verkehrsbau der Bauhaus-Universität Weimar in Zusammenarbeit mit der Firma AVK infotec GmbH aus Meinigen bearbeitet (vgl. [41]). Das Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt setzt die Arbeit der Professur Verkehrsbau fort.

Ein Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Konzeptes zur Ermittlung und Auswertung der Verkehrsdaten. Hierbei werden unter anderem brückenspezifische Kenndaten (Verformungen und Dehnungen) ermittelt, um indirekt Gesamtgewichte und Achslasten der das Brückenbauwerk passierenden Fahrzeuge zu ermitteln. Die fortlaufende Auswertung der erfassten Fahrzeugdaten hinsichtlich Verkehrsstärke, Verkehrszusammensetzung und Gesamtgewichten bildet die Grundlage für Simulationsrechnungen des Verkehrs, aus denen, erweitert um verschiedene Szenarien zukünftiger Verkehrsentwicklung, relevante Werte der Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge des Verkehrs ermittelt werden. Diese Analysen werden ebenso fortlaufend durchgeführt und somit Aussagen zu den Auswirkungen der Verkehrsentwicklung auf Brückenbauwerke ermittelt.

Die Entwicklung des Konzeptes und dessen Anwendung erfolgten im Rahmen des Forschungsprojektes an einem Referenzbauwerk. Hierbei handelte es sich um die Brücke über den Kreisel bei Bonzell/Fulda im Zuge der B 27, eine dreifeldrige Spannbeton-Plattenbalkenbrücke mit einer Gesamtlänge von 91 m.

Das entwickelte und technisch umgesetzte Konzept basiert hinsichtlich der Identifizierung des Verkehrs auf zwei Messsystemen. Durch Traffic-Sensoren der Firma AVK infotec (erstes Messsystem), die in mehreren Reihen vor und hinter einem Brückenbauwerk in die Straßenoberfläche eingelassen werden, wird auf Basis von Messungen der Störung des Erdmagnetfeldes während der Überfahrt eines Fahrzeuges über die Sensoren ein Fahrzeug erkannt, dessen Geschwindigkeit bestimmt, die Zeitspanne der Überfahrt über das untersuchte Brückenbauwerk ermittelt und eine grobe „Vorklassie-

rung“ in Pkw und Lkw vorgenommen. Durch das zweite Messsystem in Form von „klassischen“ Aufnehmern (Dehnungen, Verformungen, Temperatur) wurden Bauwerksreaktion infolge der Überfahrt von Fahrzeugen ermittelt. Hierbei wurden an einer Lagerachse (ein Mittelaufleger) vertikale Relativverschiebungen zwischen Stützenkopf und Überbau gemessen und daraus Auflagerverdrehungen und Auflagereinsenkungen bestimmt. Zusätzlich wurden in dieser Lagerachse Horizontalverschiebungen gemessen. Des Weiteren wurden Betondehnungen an der Stegunterseite und an der Unterseite der Fahrbahnplatte aufgezeichnet und Dehnungen an den Traversen der Fahrbahnübergangskonstruktion ermittelt.

Aus der Verknüpfung der Daten beider Messsysteme konnten durch inverse Auswertemethoden analog der Auswertung der dynamischen Messungen detaillierte Fahrzeugerkennungen realisiert werden. Für jedes erfasste Fahrzeug des Lkw-Verkehrs wurden Gesamtgewicht, Achslasten, Achsabstände, Geschwindigkeit und Fahrzeugabstand ermittelt. Aus der Achskonfiguration (Anzahl und Abstände) ist eine Einordnung der erfassten Lkw in definierte Typen möglich (z. B. zweiachsiger Lkw ohne Anhänger oder Sattelschlepper).

Die Auswertung der Erfassungsdaten über definierte Zeitintervalle (z. B. ein Tag oder eine Woche) gestattete die Ableitung von Angaben zur Verkehrsstärke (Lkw und Pkw), zur Zusammensetzung des Lkw-Verkehrs, zu Gesamtgewichtsverteilungen ausgewählter Fahrzeugtypen des Lkw-Verkehrs und zu Mittelwerten von Achslastverteilungen und Achsabständen. Die Struktur der ermittelten Daten gliedert sich damit in vorliegende Verkehrserfassungsdaten von Weigh-In-Motion-Anlagen ein.

Analysen der Genauigkeit der Bestimmung von Gesamtgewichten und Achslasten entsprechend den Empfehlungen der COST323 (in [11]) ergeben für die Gesamtgewichtsbestimmung die Klasse B bis C und für die Bestimmung der Achslasten die Klasse E. Die Gesamtgewichtsermittlung liefert damit eine für die vorgesehene Anwendung der Daten zur Erfassung des Verkehrsaufkommens und dessen zukünftige Entwicklung, jedoch nicht für strafrechtliche Verfolgung von Überladungen, praktikable Genauigkeit, während bei der Achslastermittlung Genauigkeitsdefizite vorliegen. Weiterentwicklungen der verwendeten Algorithmen lassen hier eine Genauigkeitsverbesserung erwarten.

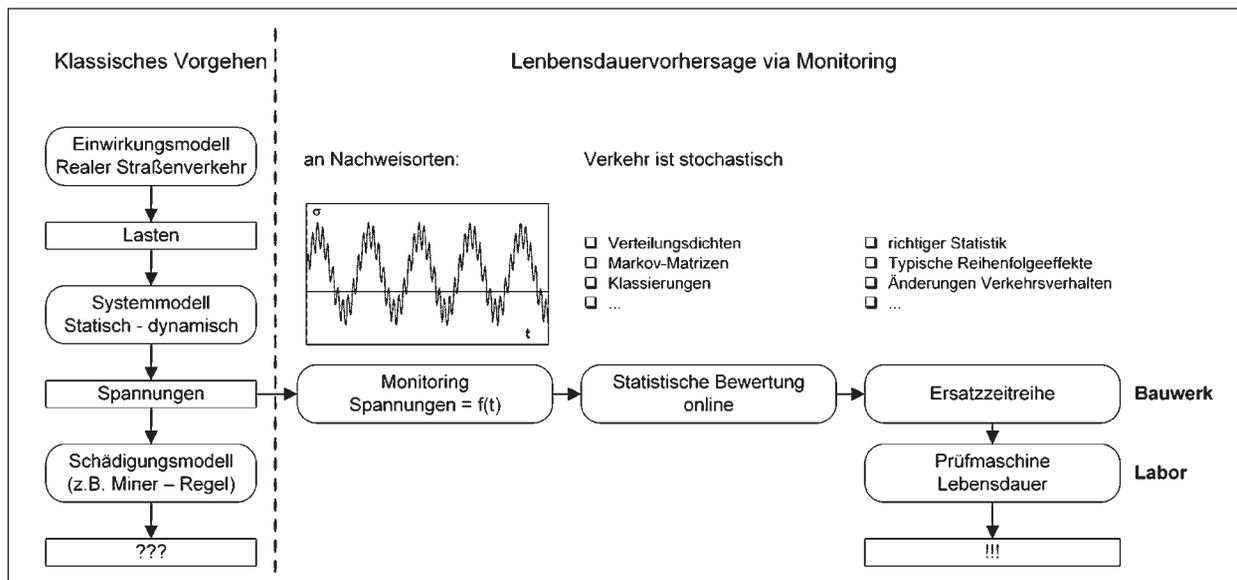


Bild 2: Überblick Lebensdauervorhersage via Monitoring nach [56]

Das entwickelte Konzept kann und muss für Messungen an anderen Brückenbauwerken adaptiert werden, da Umfang und Art der Messungen an das zu untersuchende Tragwerk anzupassen sind. Die grundsätzliche Aufteilung in zwei Messsysteme muss dabei beibehalten werden, um aus den Traffic-Sensoren notwendige Informationen des Verkehrs für die Anwendung der Algorithmen zur Fahrzeugidentifikation (Geometrie und Lasten) aus den Messungen der Bauwerksreaktionen zu erhalten.

Eine andere Form globaler Monitoringsysteme wurde im Rahmen des SFB 477 [57] dargelegt und erprobt. Es wurde von den Autoren Lebensdauervorhersage via Monitoring genannt. Einen Schemaüberblick gibt Bild 2.

In [56] wird die Vorgehensweise wie folgt beschrieben:

„Im ersten Schritt werden in diesem System kontinuierlich oder nichtkontinuierlich die Beanspruchungen an den kritischen Nachweispunkten gemessen (Monitoring). Die Zeitschriebe werden statistisch bewertet. Mit Hilfe der statistischen Kennwerte werden anschließend künstliche, endliche Ersatzzeitschriebe generiert, die das tatsächliche Verkehrsverhalten – z. B. mit Clusterbildung durch Lkw-Gruppen – richtig erfassen. Der Ersatzzeitschrieb hat eine endliche Länge, im Beispiel wurde mit ca. einstündigen Dauern gearbeitet. Durch die kontinuierliche (gelegentlich auch diskontinuierliche) Überwachung der kritischen Nachweispunkte sind die örtlichen Beanspruchungen also genau bekannt, die Modellgenauigkeiten anderer Systeme

(Einwirkung und Systemübertragungsverhalten) können entfallen. Die Zeitschriebe könnten dann wie üblich – z. B. mit Hilfe des Rainflow-Verfahrens – klassiert werden. Das Ergebnis sind Beanspruchungskollektive, die einer klassischen Lebensdaueruntersuchung zugrunde gelegt werden könnten.

Es könnte dann z. B. eine Abschätzung der Lebensdauer mit Hilfe einer linearen oder inkrementellen Schadensakkumulationshypothese oder mit Hilfe von Mehrstufen-Ermüdungsversuchen (Gassner-Kollektiv) durchgeführt werden. Beide Vorgehensweisen beinhalten aber relativ große Unsicherheiten der Lebensdauervorhersage, was der hier angestrebten Aussagegenauigkeit zuwiderläuft. Deshalb wird der zuvor ermittelte synthetische Ersatzzeitschrieb, der alle wesentlichen Ereignisse der Bauwerksbeanspruchung erhält, als Belastungs-Zeitverlauf für parallel durchgeführte Ermüdungsversuche verwendet. Nach Beendigung des synthetischen Beanspruchungsverlaufes wird dieser so lange wiederholt, bis ein Anriss auftritt. (...) Als Probekörper werden die gleichen Details wie im Originalbauwerk verwendet, sodass auch die Genauigkeit der Einschätzung des Kerbdetails – ein häufig schwieriges Problem in der Bemessungspraxis – entfällt.“

5.2 Verfahrensablauf globaler Monitoringsysteme

Der Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustandes und folgend der

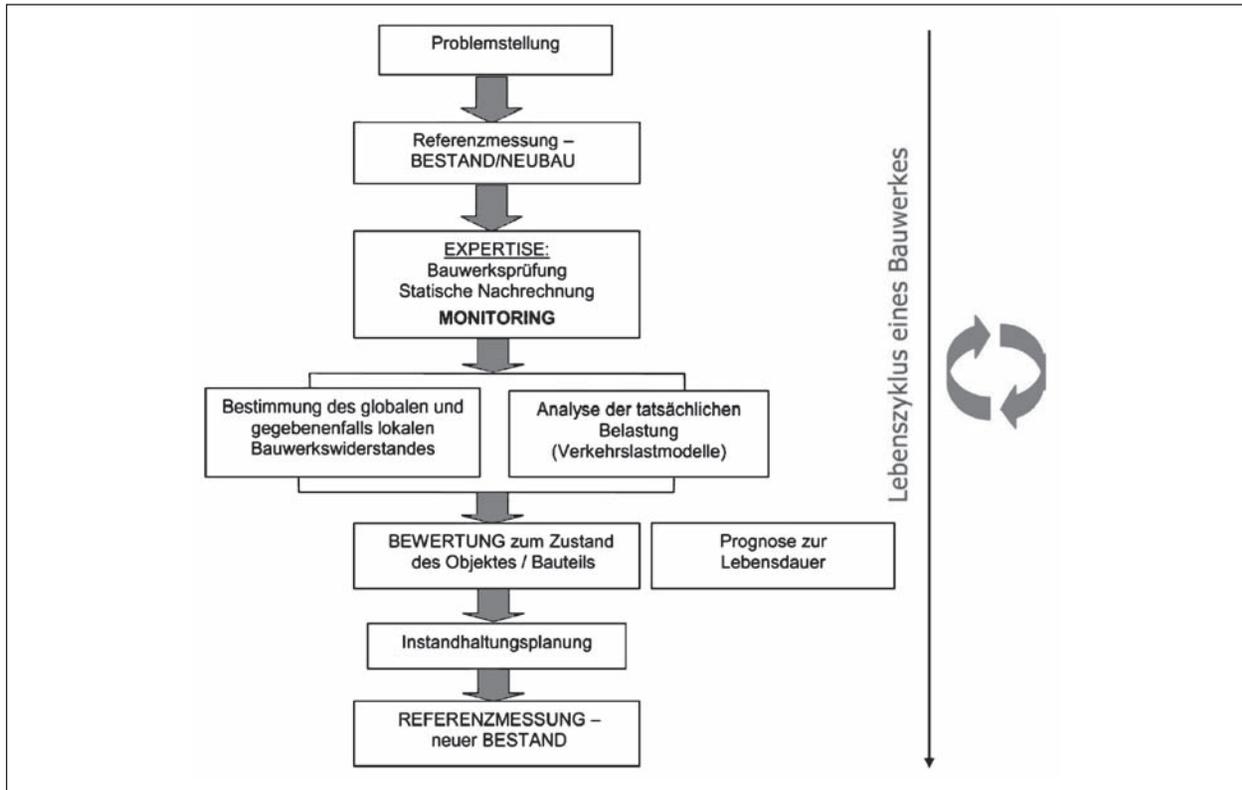


Bild 3: Prinzip des begleitenden Monitorings aus [55]



Bild 4: Ablaufdiagramm Bauwerksmonitoring nach [55]

Tragfähigkeit von Brücken ist prinzipiell in zwei Vorgehensweisen gliederbar, diese sind in Bild 3 und Bild 4 dargestellt. Die Darstellungen wurden aus [55] entnommen.

Im praktischen Einsatz verschmelzen die beiden Verfahrenswege.

5.3 Beschreibung von Schädigungen bestehender Brücken

5.3.1 Kennwerte von Schädigungen

Schäden wirken sich insbesondere auf die Dauerhaftigkeit und die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks aus. Schädigungen, die zum Beispiel durch die Veränderung der Materialkennwerte und ggf. der Querschnittsabmessungen z. B. infolge Korrosion der Bewehrung oder Betonabplatzungen gekennzeichnet sind, verändern zeitabhängig auch den Bauteilwiderstand [19]. Damit sind Schädigungen für die Tragfähigkeit relevant.

Die im Kapitel 5.1 vorgestellten Monitoringsysteme liefern Ergebnisse, aus denen ein Schädigungszustand einer Brücke direkt bestimmt oder aus denen Rückschlüsse auf vorhandene Schädigungen gezogen werden können.

Trotz umfänglicher Literaturanalyse konnten keine Beispiele mit reproduzierbaren Angaben zu Kennwerten einer Rechnung am ungeschädigten System und zu den ermittelten Kennwerten aus der Messung gefunden werden. In der bereits zitierten Veröffentlichung [10] wird der Verlauf der aus der Systemidentifikation ermittelten relativen Steifigkeit bezogen auf die Steifigkeit im ungerissenen Zustand bildlich dargestellt, jedoch sind Quantitäten dem Bild nicht entnehmbar.

Weitere Kennwerte von Schädigungszuständen sind nicht in der Literatur zu finden. Als solche sollten aber alle Abweichungen Dehnungen, Bewegungen usw. von einem angenommenen Idealzustand dienen.

Messauswertungen, die es gestatten, stochastische Beschreibungen von Einwirkungen oder Widerständen zu bilden, fehlen bislang.

5.3.2 Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung von Schädigungen und folgend der Tragfähigkeit von Brücken

Die Monitoringsysteme selbst umfassen die Messung, Aufzeichnung und Auswertung von zeitbezogenen Informationen zur Brücke. Die gesuchten Aussagen zu Schädigungen und zur bewerteten Tragfähigkeit bestehender Brücken sind aber nur in Relation von einem Null-Zustand (Brücke geht in Verkehr) und dem fiktiven Endzustand (Brücke ist so geschädigt, dass sie gesperrt werden muss) zu ermitteln und einzuordnen. Es besteht also die Aufgabe, aus innerhalb einer bestimmten Zeitspanne und in einem bestimmten Umfang gewonnenen Messwerten Angaben über die aktuelle und noch zu erwartende Tragfähigkeit abzuleiten.

Aus dem gemessenen Zustand kann nicht ohne weiteres auf das zukünftige Verhalten des Tragwerkes oder des Bauteiles geschlossen werden. Hierzu ist immer der Abgleich der gemessenen und ausgewerteten Daten mit einem Vorhersagemodell erforderlich. Der Vorgang des Abgleichs zwischen gemessenen Daten und einem theoretisch/numerischen Vorhersagemodell wird in der Strukturmechanik als System- und Parameteridentifikationsprozess bezeichnet. Die mathematischen Methoden hierfür basieren auf Lösungsverfahren für inverse Problemstellungen beispielsweise durch den Einsatz von Optimierungsverfahren, siehe z. B. ZABEL [71], HOFFMANN [45] und die Kurzbeschreibungen in Kapitel 5.2.

Jede Vorhersage der zukünftigen Tragwerksantwort kann aufgrund der vielfältigen unscharfen Randbedingungen nur als stochastische Größe erhalten werden. Dabei nimmt die Unschärfe bzw. Streubreite der erhaltenen Aussage mit zunehmendem Abstand des Vorhersagezeitpunkts vom aktuellen Zeitpunkt zu. Durch einen fortlaufenden Abgleich gemessener Daten mit einem mitgeführten Prognosemodell lässt sich die Aussageschärfe wieder erhöhen.

Aussagen zur aktuellen und zukünftigen Tragfähigkeit bestehender Bauwerke sind nur über den Einsatz probabilistischer Methoden möglich.

Monitoringsysteme dienen dabei als Lieferant von Basisdaten und Basiswissen. Im Sinne der zuvor und definierten Vorgehensweise der System- und Parameteridentifikation lassen sich aus den im Monitoring gewonnenen Daten stochastische Beschreibungen der Bauteilwiderstände und der aktuellen Einwirkungen gewinnen und durch die Vorhersagemodelle auch prognostisch erweitern. Mit diesen und den ebenfalls aus Monitoringdaten gewonnenen Tragwerkseigenschaften können Versagenswahrscheinlichkeiten ermittelt werden und auch die Kennwerte semi-probabilistischer Nachweise abgeleitet werden. Ob die in den Vorhersagemodellen enthaltenen Modellannahmen, beispielsweise bezüglich der Materialmodelle und Grenzlastkriterien, richtig sind, ist durch die Monitoringdaten allerdings nicht gewährleistet. Um die Qualität der Aussage aus den Vorhersagemodellen bewerten zu können und diese Modelle im Bedarfsfall zu adaptieren, kann ein kontinuierlicher Abgleich von gemessenen Daten mit den theoretisch/-numerischen Prognosemodellen erfolgen. Große Abweichungen zwischen der Vorhersage des Tragwerkszustands in der Zukunft und den später zu diesem Zeitpunkt gemessenen Daten weisen auf Fehler in der Modellbildung hin, die dann gezielt korrigiert werden können. Sinnvoll wäre es in einem solchen Konzept, von einer Null-Messung zu Beginn des Tragwerkslebens aus zu starten.

Obwohl diese Grundsatzaussagen in der Literatur und in der praktischen Ingenieurwelt unumstritten sind, fehlt bislang eine Musteranwendung, quasi ein Monitoringsystem, installiert ab dem Neubau, gewidmet konkreten Schädigungen und kontinuierlich fortgeschrieben.

Die umfänglichen in der Praxis eingesetzten Systeme, die meist nur kurze Zeiträume umspannen,

sind dennoch zwingend erforderlich, um den Wissens- und Erfahrungsstand stetig fortzuschreiben.

Die normative Tragfähigkeit ist eine Planungsgröße, welche unter Anwendung der zur Bauzeit geltenden technischen Regeln entsprechend dem Erkenntnisstand ermittelt wurde. Entsprechend dem angewendeten Sicherheitskonzept wird sie an einem Sicherheitsmaß normiert.

Die Tragfähigkeit kann sich im Laufe der Lebensdauer eines Bauwerks verändern durch

- Änderung der Bauteilwiderstände = aktuelle Tragfähigkeit infolge Alterung, Schädigungen und Ermüdung,
- Änderung der Einwirkungen gegenüber der Planungsgrundlage.

Entsprechend diesen aktuellen Eingangsgrößen kann die aktuelle Tragfähigkeit mit probabilistischen Methoden bestimmt werden.

BRAML [19] untersuchte die Modellierung der Widerstände unter Berücksichtigung von Schädigungen auf der Basis von Sensitivitätsuntersuchungen der Eingangsparameter für die Grenzzustände der Tragfähigkeit infolge Biegung und Querkraft für definierte Brücken. Schädigungen wurden in den probabilistischen Untersuchungen durch die Wahl angepasster, d. h. meist hoher Variationskoeffizienten für die Verteilungsfunktionen der Widerstände, wie Beton- und Stahlfestigkeiten, berücksichtigt. Als Ergebnis wurde in der Arbeit gezeigt, dass die einwirkenden Verkehrslasten den größten Einfluss auf die Tragfähigkeit besitzen. Von den Schädigungen haben die betonstahlschädigenden Merkmale, insbesondere die Korrosion des Stahls, den größten Einfluss auf die Tragfähigkeit von Stahlbetonbrücken.

Die Erprobung von Monitoringsystemen zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer sollte deshalb diese Schwerpunkte aufnehmen und um die Schädigung Materialermüdung erweitern.

Der aktuelle Kenntnisstand zur Existenz und zum Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer auf der Basis der Literaturanalyse kann wie folgt zusammengefasst werden:

Die Ableitung gesicherter Aussagen zur Tragfähigkeit und/oder Restnutzungsdauer bestehender Brücken auf der Basis des Einsatzes von Monitoringsystemen ist eine sehr komplexe Aufgabe.

Die Grundlagen dieser Aufgabe, Sensorik, mathematische Auswertemethoden und Erfahrungen in der Beurteilung von bestehenden Brücken, sind vorhanden. Vorhersagemodelle zur Schadensentwicklung sind vereinzelt verfügbar. Probabilistische Berechnungen sind aktuelle Ingenieuraufgaben.

Der praktische Einsatz und erforderliche Erfahrungen sind laut Literatur vereinzelt vorhanden. Entsprechende nachvollziehbare Dokumentationen dazu fehlen allerdings.

Gesicherte Kosten-Nutzen-Aussagen sind zurzeit nicht möglich.

Teilaufgaben werden jedoch durch Monitoringsysteme auch bereits praktisch gut gelöst.

Ein verstärkter Einsatz kann zur beschleunigten Entwicklung führen.

Ein Monitoringsystem dient immer der Erfassung eines definierten Monitoringziels und ist deshalb streng auf die Erfüllung der auf das zu untersuchende Objekt orientierten definierten Monitoringaufgabe ausgerichtet. Ein universelles Monitoringsystem als „Steckerlösung“ wird es in naher Zukunft nicht geben.

6 Konzeptentwicklung für Monitoringsysteme zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken

6.1 Allgemeines

Monitoringsysteme und ihre Abläufe wurden im Kapitel 5 vorgestellt. Dabei wurde herausgearbeitet, dass Monitoringsysteme, die zu gesicherten Aussagen der Tragfähigkeit und der Restnutzungsdauer von bestehenden Brücken führen, nur vereinzelt und dann nur in Teilaspekten vorhanden sind.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist die Modellentwicklung von Monitoringsystemen, die für konkrete Versagensszenarien quantifizierte, aber unscharfe Aussagen zur Tragfähigkeit und zur Restnutzungsdauer ermöglichen. Die konzipierten Monitoringsysteme basieren auf der Annahme einzelner Versagensszenarien. Eine Überlagerung von Versagensszenarien ist nicht vorgesehen. Die Untersuchungen werden in diesem Projekt nur

theoretisch geführt. Lediglich die empfohlenen Auswertelgorithmen werden an einem praktischen Beispiel eines anderen Projektes rechnerisch getestet. Der praktische Nachweis fehlt und kann hoffentlich in einem Folgeprojekt erbracht werden.

Unter Berücksichtigung des aktuellen Wissens- und Erfahrungsstandes wurden die Konzepte von Beginn an auf definierte Versagensszenarien orientiert. Dies sind

- das Versagen durch übermäßige Verformung bzw. Übergang des Tragwerks oder seiner Teile in einen Bruchzustand. (Festigkeitsversagen, hier mit der Aussage Tragfähigkeit benannt),
- das Versagen des Tragwerks oder seiner Teile durch Materialermüdung (hier mit der Aussage Restnutzungsdauer benannt).

Obwohl es sich um ein geschlossenes Konzept eines Monitoringsystems für beide Versagensszenarien handelt, werden die Grundlagen des Konzeptes konsekutiv dargestellt.

6.2 Versagen durch Übergang des Tragwerkes in einen Bruchzustand

Das Monitoringsystem zur Bewertung dieser Versagensart zeichnet sich durch folgende Grundlagen aus:

- ein monitoringbasiertes identifiziertes Tragwerksmodell,
- eine monitoringbasierte stochastische Beschreibung des aktuellen Verkehrs,
- eine bauwerksprüfungs-basierte stochastische Beschreibung der Geometrie des Bauwerks,
- eine literaturbasierte stochastische Beschreibung der restlichen Basisvariablen,
- Vorhersagemodelle der Tragwerksschädigung und das entsprechende Tragwerksmodell,
- Vorhersagemodelle für Schädigungsentwicklungen der Basisvariablen und Beschreibung dieser,

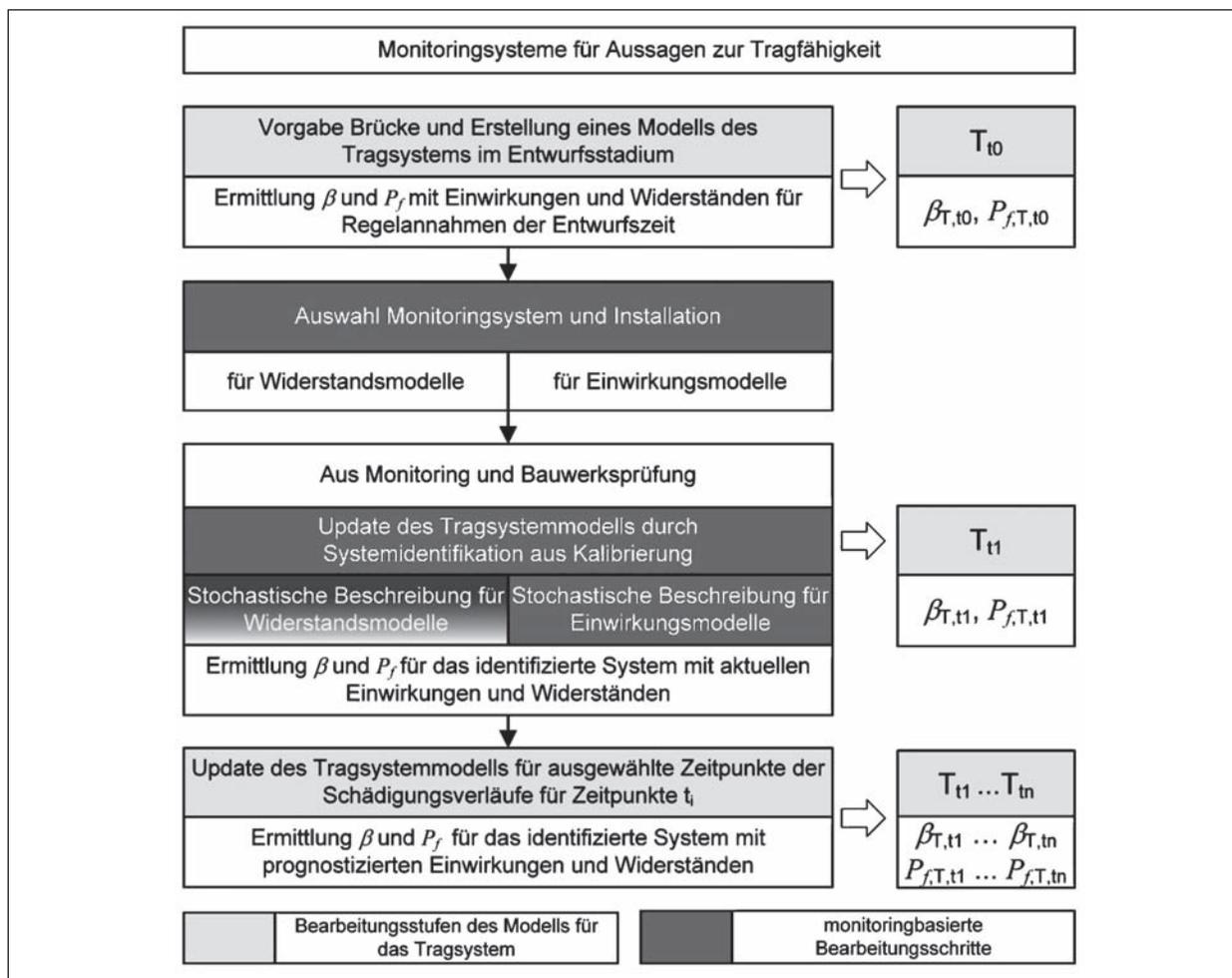


Bild 5: Prinzipieller Ablauf Monitoringsystem – Tragfähigkeit

- eine um Prognose und Tragwerksschädigung weiterentwickelte stochastische Beschreibung des versagensrelevanten aktuellen Verkehrs,
- probabilistische Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit P_f

Das prinzipielle Vorgehen ist in Bild 5 dargestellt.

6.3 Versagen durch Materialermüdung

Aus dieser Versagensart wird die Restnutzungsdauer ermittelt. In Bild 2 wurde die Lebensdauerbewertung bei Materialermüdung entsprechend dem SFB 477 vorgestellt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der monitoringbasierten Ermittlung der Beanspruchungskollektive aus Verkehr. Diese wurden rechnerisch für einen Betriebsfestigkeitsnachweis oder experimentell zur Versagensermittlung genutzt.

Das Konzept des hier vorgestellten Monitoringsystems greift diese Grundlagen auf, diese bestehen aus

- einem monitoringbasierten Tragsystemmodell analog zu Kapitel 6.2,

- einem monitoringbasierten Beanspruchungskollektiv aus aktuellem Verkehr,
- einem empirischen Modell der Materialermüdung (Wöhler),
- einer linearen Schadensakkumulation,
- einen um Prognose erweiterten monitoringbasierten Beanspruchungskollektiv,
- einer deterministischen Ermittlung von Schädigungssummen D und zugehörigen Nutzungsdauern t_{zD} .

Das prinzipielle Vorgehen ist in Bild 6 dargestellt.

6.4 Quantifizierte, aber unscharfe Aussagen

In Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3 wurden die Grundlagen des Konzeptes bzw. der Modellentwicklung der Monitoringsysteme genannt. Auf dieser Basis werden nun die postulierten quantifizierten, aber unscharfen Aussagen zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer untersetzt. Der Ab-

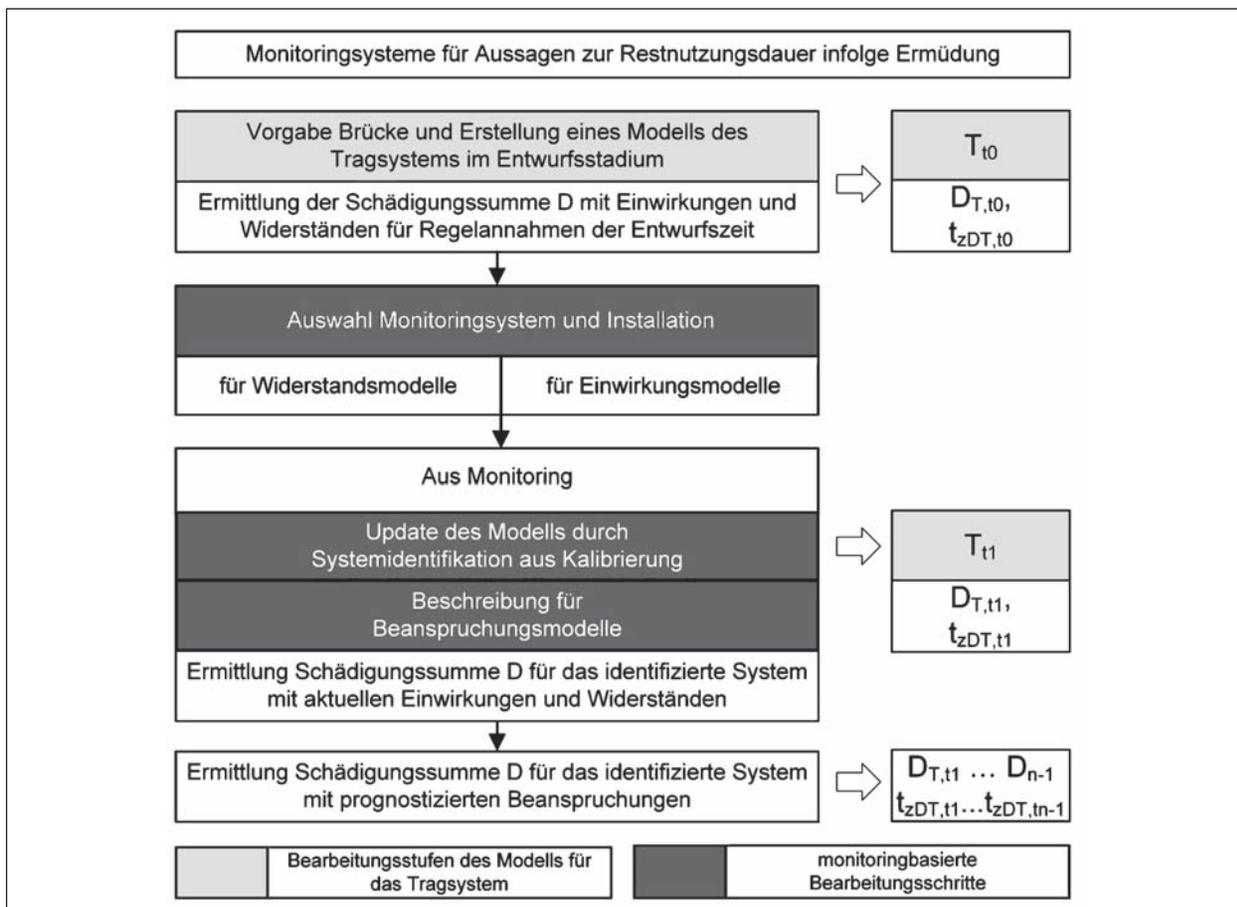


Bild 6: Prinzipieller Ablauf Monitoringsystem – Restnutzungsdauer infolge Ermüdung

stand zum Versagen durch Übergang des Tragwerks in einen Bruchzustand (Tragfähigkeit) wird im konzipierten Monitoringsystem durch den Zuverlässigkeitsindex β und P_f beschrieben.

Zur Ermittlung werden die Zuverlässigkeitsmethoden 1. Ordnung (Stufe II) FORM entsprechend DIN EN 1990 genutzt. Der Zuverlässigkeitsindex als Maß für die Zuverlässigkeit ist eine Funktion der Versagenswahrscheinlichkeit. Die Versagenswahrscheinlichkeit und der zugehörige Zuverlässigkeitsindex sind jedoch keine scharfen bzw. absoluten Werte. Es sind Zahlenwerte (quantifizierte), aber nur zu einer Kalibrierung (unscharf) geeignete Werte.

Im konzipierten Monitoringsystem wird die Kalibrierung bzw. Einordnung entsprechend Bild 7 vorgenommen. Eine Kalibrierung an der Norm selbst ist wegen einer begrenzten Anzahl von Basisvariablen im Rahmen des Monitoringkonzeptes nicht geeignet.

Für die Restnutzungsdauer basierend auf dem Versagen durch Materialermüdung ist prinzipiell der gleiche Weg wie beim Versagen durch Übergang des Tragwerks in einen Bruchzustand möglich. Auch hier kann der Zuverlässigkeitsindex als Bewertungsmaß dienen. Die Ermittlung des Sicherheitsindex bei Ermüdung infolge sich zufällig ändernder Beanspruchungen kann auf der Basis von Ergebnissen von Einstufenversuchen und einer Schadensakkumulationshypothese erfolgen. Dabei wird das Ermüdungsverhalten unter einer komplexen Beanspruchungsgeschichte auf ein Verhalten unter konstanter Beanspruchung zurückgeführt.

dernder Beanspruchungen kann auf der Basis von Ergebnissen von Einstufenversuchen und einer Schadensakkumulationshypothese erfolgen. Dabei wird das Ermüdungsverhalten unter einer komplexen Beanspruchungsgeschichte auf ein Verhalten unter konstanter Beanspruchung zurückgeführt.

Im hier konzipierten Monitoringsystem für die Beurteilung der Restlebensdauer wird jedoch der probabilistische Weg verlassen, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine messtechnische Erfassung vorhandener Ermüdungsschäden nicht verfügbar ist. Der Schwerpunkt wird auf die Ermittlung des „realen“ aktuellen Beanspruchungskollektives gelegt. Dieses wird aus einer direkten Dehnungsmessung und aus einer Beanspruchungssimulation infolge aktuellen Verkehrs gewonnen.

Als Maß für Aussagen zur Restnutzungsdauer dienen die Schädigungssumme D und die zugehörige Nutzungsdauer t_{zD} .

Obwohl im Konzept dieses Versagen weitgehend deterministisch ermittelt wird, handelt es sich bei den Ergebnissen D und t_{zD} zwar um quantifizierte, aber dennoch unscharfe Aussagen. Die Bewertung erfolgt in Analogie zur Tragfähigkeit, wobei die Schädigungssumme des initialen Tragsystems als Grenzwert dient. Mittels Ermittlungen von D am

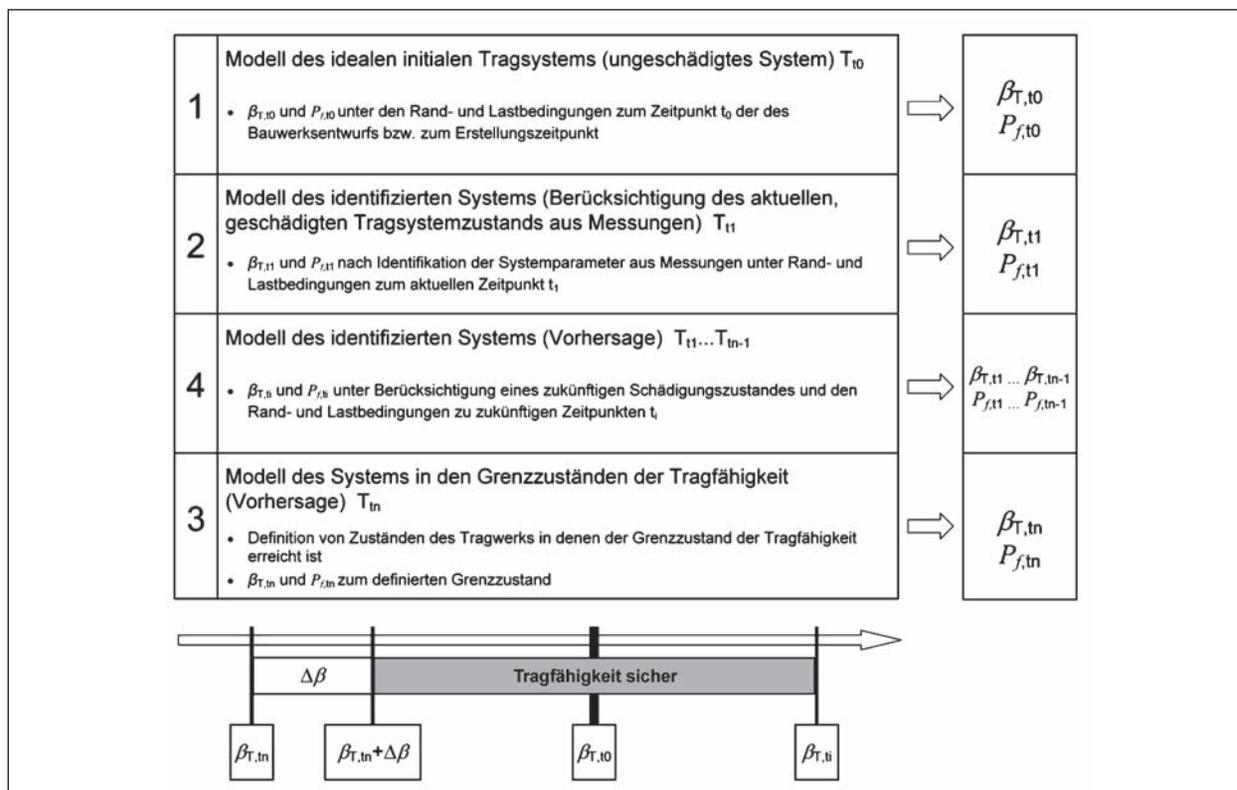


Bild 7: Einordnung von Versagenswahrscheinlichkeiten im Konzept des Monitoringsystems

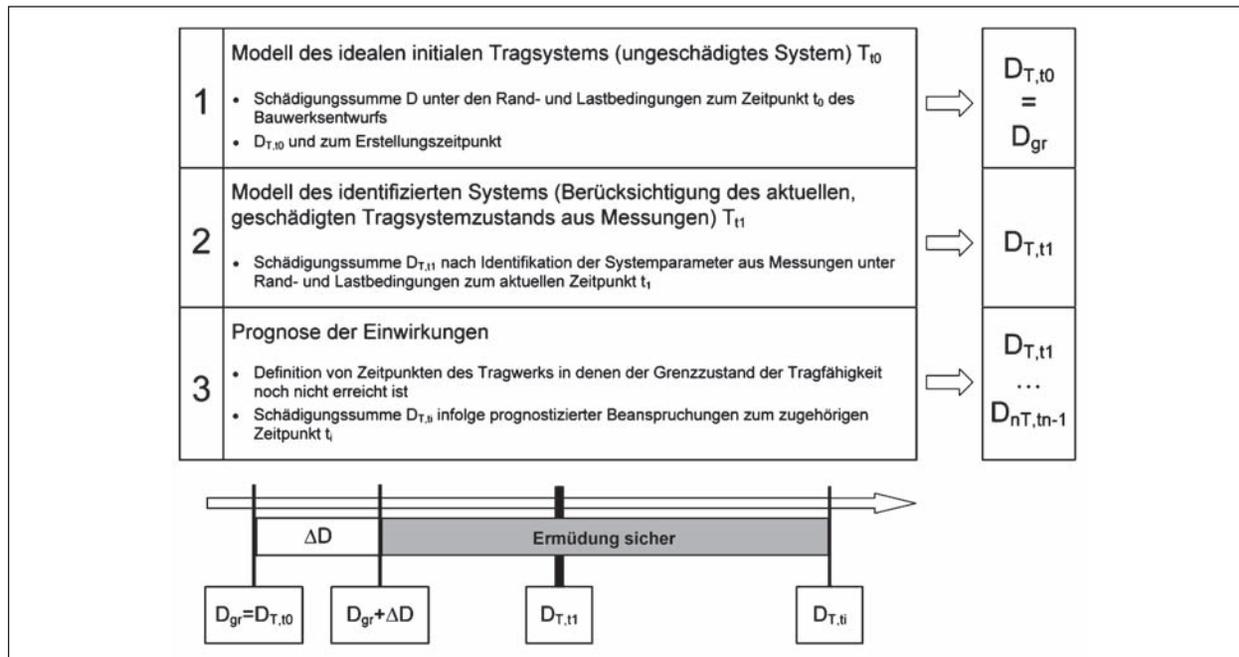


Bild 8: Einordnung von Schädigungssummen im Konzept des Monitoringsystems

initialen Tragsystemmodell und am kalibrierten update wird die Einordnung vorgenommen. Bild 8 verdeutlicht das Vorgehen.

7 Grundlagen der Konzeptentwicklung

7.1 Probabilistische Ermittlung von Zuverlässigkeitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit

7.1.1 Allgemein

Eine Brücke soll für den aktuellen Nutzungszeitpunkt hinsichtlich Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer probabilistisch bewertet werden. Die Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken im Bestand [15] ermöglicht es, in der 4. Stufe wissenschaftliche Methoden zum Nachweis ausreichender Tragfähigkeit einzusetzen. Dies umfasst auch die Ermittlung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit mit Hilfe probabilistischer Methoden. In der Literatur ist eine große Bandbreite an Verfahren zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit zu finden. Die wichtigsten Verfahren und Konzepte werden in diesem Kapitel kurz beschrieben. Dabei wird verwiesen auf folgende Literaturquellen und ihre Literaturreferenzen [23, 53, 59, 62] sowie weiterer einschlägiger Literatur.

Folgend soll ein praktikables Vorgehen bei der Bewertung von Brücken unter Zuhilfenahme der Zuverlässigkeitstheorie aufgezeigt werden. Dabei werden allgemeine Kenntnisse der Wahrscheinlichkeitstheorie, deskriptiven und imperativen Statistik vorausgesetzt. Es sei auf einen großen Umfang an Grundlagen-Literatur in diesem Bereich verwiesen. Grundlagen zur Zuverlässigkeitstheorie, speziell im Bauwesen, werden in [65, 51, 60, 35, 23] beschrieben.

7.1.2 Einführung

Ziel einer Bemessung bzw. Bewertung eines Ingenieurbauwerkes ist es, die Tragfähigkeit des Tragwerkes zu garantieren. Dazu werden im Bauingenieurwesen unterschiedliche Sicherheitskonzepte angewendet, welche die Sicherheit mit qualitativen und quantitativen Größen beschreiben.

Sicherheitskonzepte:

- deterministisch: globaler Sicherheitsfaktor ν ,
- semi-probabilistisch: Teilsicherheitsfaktor γ ,
- probabilistisch: Zuverlässigkeitsindex β , Versagenswahrscheinlichkeit P_f .

Allgemein wird von Versagensszenarios eines Tragwerkes ausgegangen, wenn die Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit eines Brückenbauwer-

kes nicht mehr geben ist. Ein Versagenszenario kann das Versagen eines einzigen Bauteils bezüglich eines einzigen Kriteriums beinhalten oder auch ein paralleles oder in Reihe geschaltetes Versagen, bei dem viele Grenzzustände des Tragwerks erreicht werden können. Je nachdem, ob das Erreichen eines der definierten Grenzzustände oder nur eine Kombination dieser Zustände die Nutzungsfähigkeit des Tragwerks beendet, sind unterschiedliche mathematische Beschreibungen und Verfahren erforderlich.

Die dazu nötigen Definitionen der Grenzzustände sind in mathematischen Grenzzustandsfunktionen (GZF) zu beschreiben. Hilfe zur Ermittlung und Erstellung der GZF bieten die unterschiedlichsten Normen und Bemessungsrichtlinien des Ingenieurwesens. In ihnen werden zur Bemessung eines Bauwerks bzw. Bauteils Grenzzustände der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Regeln der Bauausführung definiert.

Von Sicherheit kann man nur sprechen, wenn Unsicherheiten vorhanden sind. Diese umfassen die Unsicherheit und Streuungen maßgebender Variablen auf der Seite der Einwirkungen auf ein Bauwerk und auf der Seite der Widerstände, die das Bauwerk den Einwirkungen entgegenhält. Ein Versagen tritt dann ein wenn die Beanspruchungen (Einwirkungen E) größer werden als die Beanspruchbarkeit (Widerstände R) im Falle eines Versagens infolge Bruchs bei statischer Festigkeit. Im Falle des Versagens infolge Materialermüdung tritt der Bruch ein, wenn die aktuelle Schädigungssumme größer als die Grenzschädigungssumme ist. Sicherheit ist gewährleistet, wenn

$$E < R \quad \text{oder} \quad D_{\text{vorh}} < D_{\text{grenz}} \quad (7.1)$$

Da die Einwirkungen, Widerstände und Schädigungssummen am Bauwerk keine deterministischen Größen, sondern streuende Größen sind, muss in obiger Formel ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen Einwirkungen und Widerständen garantiert werden. Ein globaler Sicherheitsfaktor ν kann gewährleisten, dass ausreichend hohe Einwirkungen bei der Bemessung vorausgesetzt werden bzw. die Widerstände unterbewertet werden und die Sicherheit (Abstand $E-R$) somit erhöht wird (s. Gleichung (7.2)).

$$\nu E < R \quad \text{oder} \quad E < \frac{R}{\nu} \quad (7.2)$$

Die Unsicherheit kann aber auch direkt quantifiziert werden. Setzt man voraus, dass die ein-

wirkenden Lasten, die Geometriegrößen und Materialparameter eines Tragwerkes Zufallsvariablen darstellen, so sind die Beanspruchbarkeiten R und Beanspruchungen E ebenfalls Zufallsvariablen welche einer multivariaten (mehrdimensionale) Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen:

$$E(\mathbf{X}) > R(\mathbf{X}) \quad (7.3)$$

mit Zufallsvektor \mathbf{X} :

Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f lässt sich dann wie folgt ermitteln:

$$P_f = P(E(\mathbf{X}) > R(\mathbf{X})) \quad (7.4)$$

Die Zuverlässigkeit eines Bauwerks wird mit der komplementären Größe zur Versagenswahrscheinlichkeit P_f als Überlebenswahrscheinlichkeit

$$P_s = 1 - P_f \quad (7.5)$$

definiert.

In den folgenden Kapiteln werden allgemeine Ausführungen zu den Grenzzustandsfunktionen, zum stochastischen Modell der Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten eines Brückenbauwerkes dargelegt. An einem praktischen Anwendungsbeispiel soll das Vorgehen konkret dargelegt werden.

7.1.3 Grenzzustandsfunktion

Durch Umformulieren der Gleichungen (7.3) bis (7.5) ergibt sich ein Maß für die Sicherheit, die Zustandsfunktion (state function oder state performance function):

$$g(\mathbf{X}) = (R(\mathbf{X}) - E(\mathbf{X})) \quad (7.6)$$

Sie entspricht einer mehrdimensionalen Verteilungsfunktion (joint distribution function), dargestellt in Bild 9.

Für eine Realisierung \mathbf{x} von \mathbf{X} kann man nun den Sicherheitszustand wie folgt festlegen.

Ist $g(\mathbf{x}) > 0$, so befindet man sich im sicheren Bereich (safe state/domain). Ist $g(\mathbf{x}) \leq 0$, so befindet man sich mit der Realisation im Versagensbereich (failure domain) zu

$$g(\mathbf{x}) = 0 \quad (7.7)$$

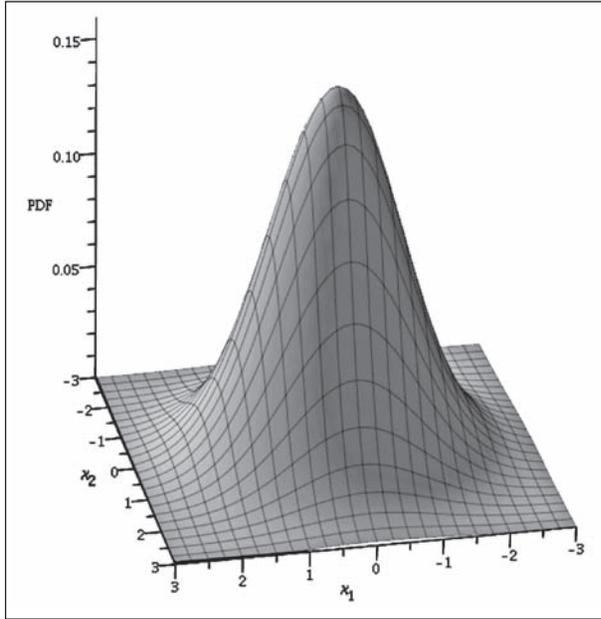


Bild 9: Verbunddichte (2D-Standardnormalverteilung)

Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f ist somit das Integral der Verbunddichte der Zustandsfunktion $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ über den Versagensbereich:

$$P_f = P(E(\mathbf{X}) > R(\mathbf{X})) = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (7.8)$$

Die Lösung des Integrals ist abhängig von der Komplexität der Verbunddichte und der Grenzzustandsfunktion und in den seltensten Fällen direkt analytisch möglich. Daher werden Verfahren wie FORM, SORM, ISPUD usw. eingesetzt, die einhergehen mit einem außerordentlichen numerischen Simulationsaufwand je nach Problemklasse.

7.1.4 Sicherheitsindex

Ein weiteres schon erwähntes Zuverlässigkeitsmaß ist der Sicherheitsindex β [27]. Er wurde von SPAETHE [65] als „verallgemeinerter Sicherheitsindex“ (Zuverlässigkeitsindex) eingeführt.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (7.9)$$

mit Φ^{-1} als inverse Standardnormalverteilung.

Die Formel setzt voraus, dass die Verbunddichtefunktion $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ aus normalverteilten (oder logarithmisch normalverteilten) Zufallsvariablen unabhängiger Randverteilungen gebildet wird und die Grenzzustandsfunktion eine lineare Funktion darstellt. Mit diesen Bedingungen ist auch eine analytische Lösung möglich.

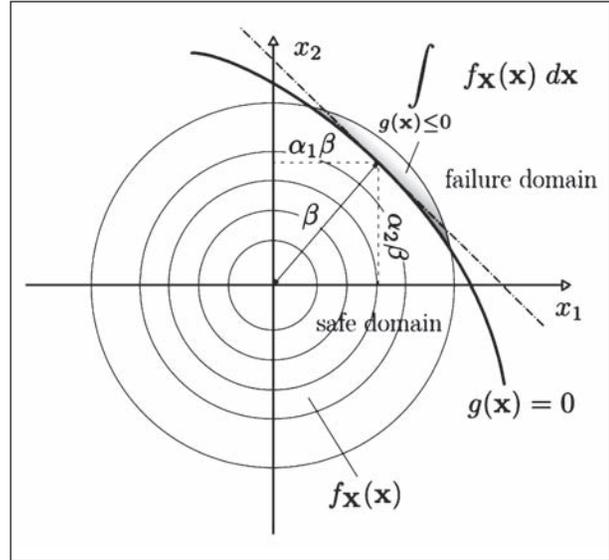


Bild 10: Sicherheitsindex β eines zweidimensionalen Standardnormalraumes

Grenzzustand	Zielwert des Zuverlässigkeitsindex	
	1 Jahr	50 Jahre
Tragfähigkeit	4,7	3,8
Ermüdung		1,5 bis 3,8 ^a
Gebrauchstauglichkeit (nicht umkehrbar)	2,9	1,5

^a Abhängig von der Zugänglichkeit, Wiederinstandsetzbarkeit und Schadenstoleranz

Tab. 1: Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β für Bauteile mit RC2-Anforderungen nach [31]

Der Sicherheitsindex β (siehe Bild 10) lässt sich als kürzester Abstand einer standardnormalverteilten mehrdimensionalen Zustandsfunktion zwischen Mittelwert ($\mathbf{x} = 0$) und Grenzzustandsfunktion $g(\mathbf{x}_B) = 0$ interpretieren bzw. darstellen. Der Punkt \mathbf{x}_B auf der Grenzzustandsfunktion, der den kürzesten Abstand zum Mittelwert hat, wird als Bemessungspunkt bezeichnet. Er bezeichnet den Punkt mit der höchsten Versagenswahrscheinlichkeit im standardisierten Normalraum. Der normierte Vektor \mathbf{x}_B im Standardnormalraum besteht aus den Koeffizienten a_i , welche als Wichtungsfaktoren der einzelnen Zufallsgrößen interpretiert werden können. Je höher der Wert von a_i , desto „wichtiger“ ist diese Zufallsgröße bzw. desto größer ist der Einfluss der Streuung dieser Variable auf die Versagenswahrscheinlichkeit.

In DIN EN 1990 [31] sind Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex für Bauteile mit RC2-Anforderungen gegeben. Die Zielwerte der Tabelle C2 aus [31] sind in Tabelle 1 aufgelistet.

7.1.5 Zufallsvariablen

Die Zufallsvariablen X , welche ein Versagenszenario stochastisch beschreiben und die Variationsbasis der Zustandsfunktion bzw. eines Tragwerkmodells definieren, werden in der Literatur oft auch als Basisvariablen bezeichnet.

Die angenommenen Grenzzustandsfunktionen (Versagensszenario) und das zugrunde liegende Tragsystemmodell bestimmen die möglichen Zufallsvariablen (Basisvariablen). Im Folgenden werden die Basisvariablen in ein stochastisches Modell der Einwirkungen und Widerstände eingeteilt. Eine ausführliche Beschreibung aller möglichen Basisvariablen sprengt den Rahmen dieses Berichts. Es sei daher auf umfassende Literatur verwiesen. Zuerst soll auf den Probabilistic Model Code des Joint Committee on Structural Safety (JCSS) verwiesen werden [47]. Häufig verwendete stochastische Modelle findet man in [59]. Da der Fokus dieses Berichtes auf Stahlbeton- und Spannbetonbauwerke, liegt, beinhalten die Literaturquellen [34, 44, 67, 68] hauptsächlich stochastische Modelle aus diesem Bereich.

7.1.6 Stochastisches Modell der Einwirkungen

Einwirkende Größen sind das Eigengewicht, Ausbaulasten, Verkehrslasten, Windlasten, Temperatur und außergewöhnliche Einwirkungen. Auf die letzten beiden soll hier nicht weiter eingegangen werden. Sie benötigen gesonderte Betrachtungen.

Jede Einwirkung hat auch eine zeitliche Komponente, einen Bezugszeitraum, wobei man bei den meisten Tragwerken das Eigengewicht bzw. die Ausbaulasten als zeitunabhängige Variable interpretieren kann. Ausbaulasten wie Asphalt, Kappen oder die Brückenaufbauten wie Geländer erfahren während der Nutzungszeit der Brücke oft eine Änderung. Asphalt und Kappen werden oft schon nach etwa 30 Jahren, eventuell sogar früher, erneuert. Die Revitalisierungen der Ausbauten mit neuen Technologien bewirkt oft auch eine Änderung des Eigengewichts bzw. es ändert sich die Lasteintragung in den Brückenüberbau. In [20] wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Lasttyp Ausbaulasten insbesondere bei innerstädtischen Brücken zeitlich stark variiert. Es wird daher empfohlen, die Ausbaulasten als separate Basisvariable mit eigenem stochastischen Modell zu modellieren und nicht verschmiert mit den Eigenlasten stochastisch anzusetzen. Falls keine Daten aus Brückenprüfung oder direkter Auf-

nahme der Ausbaulasten vorhanden sind, aus denen sich ein stochastisches Modell ableiten lässt, wird eine Normalverteilung mit einem Variationskoeffizient von 10 % empfohlen [69].

Eigenlasten können gewöhnlich sehr genau bestimmt werden, falls Bau- bzw. Bestandspläne vorliegen und das verwendete Baumaterial genau bekannt ist bzw. sich ermitteln lässt. Im Stahlbetonbau sind die Wichte des Betons und der Bewehrungsgrad maßgebend. Üblicherweise nimmt man für die Stahlbetonwichte einen charakteristischen Wert von 25 kN/m^3 (Bewehrungsgrad 3 %) und einen Variationskoeffizient von 2,5 % an. Im semi-probabilistischen Sicherheitskonzept werden ständige Einwirkungen durch Teilsicherheitsbeiwerte beruhend auf einem Variationskoeffizient von 10 % angesetzt.

Die Einwirkungen aus Verkehr, also die Radlasten der ein Brückenbauwerk passierenden Fahrzeuge, weisen eine hohe Komplexität auf, da es sich hier um zeitveränderliche Zahlen von Lasten mit unterschiedlichen Lastgrößen an zeitveränderlichen Punkten auf dem Bauwerk handelt. In der Literatur werden daher an dieser Stelle im Allgemeinen die resultierenden Beanspruchungen an definierten Stellen des Tragwerkes infolge der Einwirkungen betrachtet.

Für die beiden genannten prinzipiellen Versagensarten (Bruch durch Überlast und Materialermüdung) sind unterschiedliche Anteile des Verkehrs verantwortlich. Für die Überschreitung der statischen Festigkeit ist die maximale Beanspruchung in einer tragwerksbezogenen Lebenszeit relevant, während für die Materialermüdung die zyklische Beanspruchung aus Verkehr Verursacher ist.

In [18] wurde eine Vorgehensweise entwickelt, mit der statische Beanspruchungen infolge Straßenverkehrs und Beanspruchungskollektive für die Ermüdungsbeanspruchung ermittelt werden können. Für Letztere sind in [18] die Grundlagen bereitgestellt und für die statische Beanspruchung sind zusätzlich stochastische Beschreibungen gegeben.

Grundlage dieser Vorgehensweise sind Verkehrssimulationsrechnungen auf Basis von angenommenen oder objektspezifischen Verkehrsdaten unter Berücksichtigung prognostizierter Verkehrsentwicklungen. Hierbei werden zunächst zufällige Fahrzeugfolgen generiert und anschließend Zeitverläufe definierter Kennwerte (z. B. Momente oder Querkräfte) infolge der Überfahrt dieser Fahrzeugfolgen

berechnet. Der Umfang der Simulationsrechnungen, genauer die zeitliche Länge der simulierten Fahrzeugfolgen, ist dabei aufgrund der erforderlichen Rechenzeiten im Vergleich zu Nutzungsdauern von Brückenbauwerken gering (einige Tage bis Wochen simulierter Verkehr). Aus diesem Grund sind statistische Auswertungen der berechneten Zeitverläufe erforderlich, um durch geeignete Extrapolation stochastische Beschreibungen der Beanspruchungen zu erhalten. Die Methoden der statistischen Auswertungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Weiterverwendung.

Für die maximalen Beanspruchungen (statische Festigkeiten) werden in [18] Verteilungsfunktionen des Maximalwertes der Beanspruchung für einen definierten Bezugszeitraum (z. B. ein Jahr oder 100 Jahre) ermittelt. Diese Verteilungsfunktion muss dabei vor allem Unsicherheit hinsichtlich der Kenntnis des aktuellen objektspezifischen Verkehrs und dessen zukünftiger Entwicklung abdecken. Um dies zu realisieren, wurde ein Ansatz aufgestellt, um die Ergebnisse von Analysen unterschiedlicher Verkehrscharakteristiken (gekennzeichnet durch verschiedene Schwerverkehrszusammensetzungen und Schwerverkehrsstärken) miteinander zu überlagern und so zu einer stochastischen Beschreibung der Beanspruchung aus Verkehr zu gelangen. In diesem Ansatz wird die Beanspruchung aus Verkehr durch ein Produkt aus zwei unabhängigen Zufallszahlen abgebildet. Als Verteilungsfunktionen für diese Zufallszahlen wurde die Extremwertverteilung Typ 1 als geeignet identifiziert. Die erste Zufallszahl beschreibt eine mittlere Verteilungsfunktion des Maximalwertes innerhalb des angesetzten Bezugszeitraumes und ist durch einen vergleichsweise kleinen Variationskoeffizienten gekennzeichnet. Die zweite Zufallszahl hat einen Erwartungswert von 1,0 und einen Variationskoeffizienten, der von den in dem Überlagerungsansatz berücksichtigten Simulationsrechnungen für verschiedene Verkehrscharakteristiken abhängig ist. Liegen für eine objektspezifische aktuelle Verkehrscharakteristik und deren zukünftige Entwicklung keine oder nur wenige belegbare Daten vor, so muss in den Simulationsrechnungen ein breites Spektrum von Verkehrscharakteristiken betrachtet werden und die resultierenden Ergebnisse in die entwickelte Überlagerung aufgenommen werden. In Abhängigkeit dieses Spektrums ergeben sich unterschiedlich große Variationskoeffizienten für die zweite Zufallszahl, die im Vergleich zur ersten Zufallszahl deutlich größer sind.

In den vorliegenden Untersuchungen wird diese Vorgehensweise für ein praktisches Beispieltragwerk eingesetzt. Dabei wird erstmalig untersucht, wie sich Schädigungen am Tragwerk auf die stochastischen Beschreibungen von Beanspruchungen auswirken. Auf die hierfür verwendeten Eingangsdaten und erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 8.4 näher eingegangen.

Weitere Ansätze zur Ermittlung stochastischer Beschreibungen der maximalen Beanspruchungen aus Verkehr finden sich in der Literatur z. B. in [19, 34 und [7]. Von BRAML [19] wird hierzu eine Extremwertverteilung Typ 1 für die Verteilungsfunktion des Maximalwertes bei einem Bezugszeitraum von 50 Jahren eingesetzt (50-Jahres-Maximalwert). Die Parameter dieser Verteilungsfunktion wurden dabei so gewählt, dass der 98%-Fraktilewert der zugehörigen Verteilungsfunktion den Werten der Beanspruchungen aus der Anwendung verschiedener betrachteter Lastmodelle (z. B. LM1 nach DIN-Fachbericht 101 [3] oder BK60/30 nach DIN 1072 [29]) entsprach. Der Wert aus der Anwendung des Lastmodells, und damit des charakteristischen Wertes der resultierenden Beanspruchung, wird damit als Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren interpretiert. Diese Wiederkehrperiode wird auch in anderen Veröffentlichungen verwendet (z. B. in [42] und [54]) und folgt den Festlegungen der mittleren Wiederkehrperiode für andere veränderliche Einwirkungen, wie z. B. der Temperatur (Definition der maximalen und minimalen Außenlufttemperatur als jährlicher Minimal- bzw. Maximalwert mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren nach [30] und [32]). Im Gegensatz dazu wird in [33] der charakteristische Wert der Beanspruchung aus Verkehr, die durch das Lastmodell LM1 erzeugt wird, als Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1000 Jahren interpretiert. Dieser Ansatz wurde in [52, 28] und auch in [18] verwendet.

Von EICHINGER (vgl. [34]) wurde eine Beschreibung der Beanspruchung auf einem analytischen Weg realisiert. Es wird eine Extremwertverteilung der resultierenden Schnittgrößen infolge Straßenverkehrs angegeben, die sich aus einem Produkt aus einer Verteilungsfunktion der resultierenden Schnittgrößen infolge „normalen“ Schwerverkehrs, einer Verteilungsfunktion der resultierenden Schnittgrößen infolge Sonderfahrzeugen (genehmigungspflichtiger Schwerverkehr) und einer Verteilungsfunktion der resultierenden Schnittgrößen infolge der Begegnung von „normalem“ Schwerver-

kehr und Sonderfahrzeugen ergibt. Auftretenshäufigkeiten beider Verkehrsarten und Begegnungshäufigkeiten werden darin berücksichtigt.

Auf Grundlage von Ergebnissen von Verkehrssimulationsrechnungen wurde in [7] zur stochastischen Beschreibung von Beanspruchungen aus Verkehr eine modifizierte Extremwertverteilung Typ 3 (nach oben begrenzt) entwickelt.

Die Funktionsparameter ergeben sich darin aus Kenngrößen des Verkehrs, des betrachteten Tragwerkes und der definierten Beanspruchung, für die die stochastische Beschreibung gelten soll. Die Kennwerte des Verkehrs sind dabei der Maximalwert der Last einer Achsgruppe, Maximal- und Mittelwert sowie Standardabweichung der Fahrzeuggesamtgewichte, Fahrzeuggeschwindigkeit und Verkehrsstärke sowie Schwerverkehrsanteil. Die Tragwerks- und Beanspruchungskennwerte ergeben sich aus Einflusslinie, Querverteilung und Spuranzahl.

In [18] wurde die oben beschriebene stochastische Beschreibung von Beanspruchungen mit den Ansätzen von BRAML [19] und BAILEY [7] verglichen. In Bild 11 sind aus diesem Vergleich die Verteilungsfunktionen des 100-Jahres-Maximalwertes aus diesen Ansätzen dargestellt. Betrachtet wurden dabei folgende Varianten:

- stochastische Beschreibung entsprechend dem oben beschriebenen und nachfolgend weiterverwendeten Ansatz aus [18] (schwarze Linie),
- Ansatz nach BRAML unter Verwendung des Lastmodells LM1 und Interpretation des Lastmodellwertes als Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren – 98%-Fraktilewert der Jahresmaximalwertverteilung (schwarz gepunktete Linie),
- Ansatz nach BRAML unter Verwendung des Lastmodells LM1 und Interpretation des Lastmodellwertes als Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren – 99,9%-Fraktilewert der Jahresmaximalwertverteilung (schwarz gestrichelte Linie),
- Ansatz nach BAILEY für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 5 km/h (graue durchgezogene Linie),
- Ansatz nach BAILEY für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h (graue gestrichelte Linie).

Es wird ersichtlich, dass aus dem Ansatz nach BAILEY Verteilungsfunktionen resultieren, die im Vergleich zu den übrigen Funktionen in einem deutlich kleineren Wertebereich liegen und geringere Variationskoeffizienten aufweisen. Dies ist zu erwarten, da dieser Ansatz lediglich eine einzelne über die verwendeten Kennwerte beschriebene Verkehrscharakteristik berücksichtigt. Der Ansatz von BRAML liefert mit der Definition des charakteristischen Wertes über die mittlere Wiederkehrperiode von 50 Jahren eine Verteilungsfunktion (schwarz gepunktete Linie), die im Vergleich zum hier weiterverwendeten Ansatz zwar eine ähnliche Streuung aufweist, jedoch in einem deutlich höheren Wertebereich liegt. Bei Definition des charakteristischen Wertes über die mittlere Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren ergibt sich eine Verteilungsfunktion (schwarz gestrichelte Linie), die im Vergleich zum hier weiterverwendeten Ansatz in einem ähnlichen Wertebereich liegt, aber durch einen geringeren Streuung gekennzeichnet ist. Anzumerken ist dabei aber, dass für die im Diagramm exemplarisch dargestellte Funktion aus dem hier weiterverwendeten Ansatz ein sehr breites Spektrum von Verkehrscharakteristika zur Funktionsbildung verwendet wurde, aus dem sich eine relativ große Streuung ergab.

Der in den vorliegenden Untersuchungen weiterverwendete Ansatz aus [18] erlaubt die Ermittlung stochastischer Beschreibungen von maximalen Be-

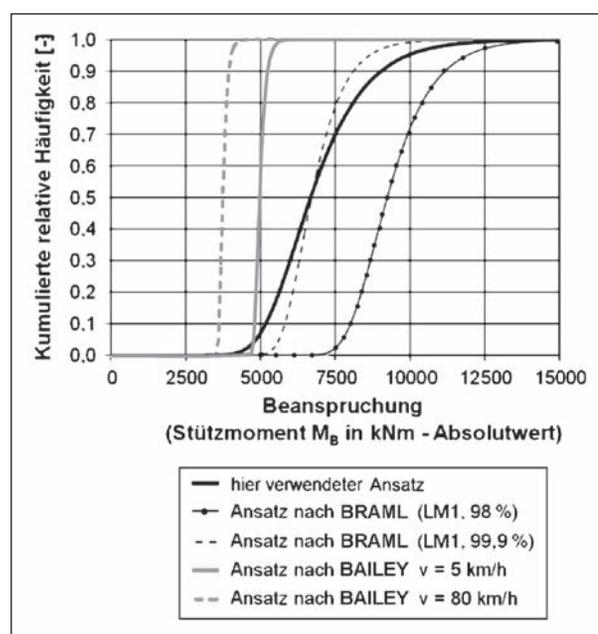


Bild 11: Vergleich der Verteilungsfunktionen verschiedener stochastischer Beschreibungen der Beanspruchungen aus Straßenverkehr (aus [18, Abb. 5.12])

anspruchungen für beliebige Tragwerke und Kennwerte. Voraussetzung für die Anwendung dieses Ansatzes ist aber, dass objektspezifische Verkehrsdaten vorliegen oder sinnvoll abgeschätzt werden können. Zur Bildung einer stochastischen Beschreibung von Beanspruchung unter Verwendung von Lastmodellen, also ohne Vorliegen von konkreten Verkehrsdaten, zeigt sich der Ansatz von BRAML als geeignet.

Für Untersuchungen zur Materialermüdung sind die zyklischen Beanspruchungen aus Verkehr relevant. Diese werden aus den in [18] dokumentierten Simulationsrechnungen einschließlich der abgeleiteten Kennwert-Zeitverläufe gewonnen. Für die Auswertung der Kennwert-Zeitverläufe stehen auch für die zyklischen Beanspruchungen mehrere statistische Methoden bereit. Das sind sowohl einparametrische Auswertungen in Analogie zur statischen Beanspruchung mit anschließender Extrapolation als auch zweiparametrische Auswertungen. In allen Fällen können die Auswertungen zur Aufbereitung von Verteilungsfunktionen als stochastische Beschreibungen genutzt werden.

Zu den zweiparametrischen Auswertungen gehört beispielsweise die Rainflow-Auswertung. Hierbei werden geschlossene Beanspruchungsschleifen gezählt. Es wird davon ausgegangen, dass nur solche geschlossenen Schleifen ermüdungsrelevant sind. Gezählt werden hierbei die geschlossenen Schleifen der betrachteten Kennwerte. Für die Anwendung des in [26] beschriebenen Rainflow-Algorithmus ist zunächst eine Klassierung der berechneten Beanspruchungsverläufe erforderlich. Hierzu werden Klassenbreiten und -grenzen definiert. Das Ergebnis des Auszählverfahrens ist eine Rainflow-Matrix für den ausgewählten Zeitverlauf. Die Matrix-Elemente bezeichnen die Zahl der geschlossenen Hystereseschleifen. Durch Simulation unterschiedlicher Verkehrsdaten können sowohl Vergangenheit als auch Zukunft abgebildet werden und das Beanspruchungskollektiv kann über die Anzahl der Lastübergänge in unterschiedlichen Zeitperioden dargestellt werden.

Bei diesem Vorgehen, welches analog zur maximalen Beanspruchung objektbezogenen aktuelle Verkehrsdaten voraussetzt (monitoringbasiert) werden die Kennwert-Zeitverläufe zufallsbasiert ermittelt. Die Auswertung beruht auf statistischer Basis und es kann eine stochastische Beschreibung abgeleitet werden.

Der Aufwand ist erheblich. Da wie folgend beschrieben die Widerstandseite der Ermüdungsfestigkeit meist noch empirisch erfasst wird, ist eine probabilistische Ermittlung des Ermüdungsversagens fast nur im akademischen Bereich zu finden.

Grundsätzlich sollten für ein stochastisches Modell der Einwirkungen möglichst viele Daten direkt am Tragwerk erhoben werden. Dies umfasst die Geometriewerte (Bauteilabmessungen), welche das Volumen der ständigen Lasten charakterisieren, die Verteilung der Materialkennwerte (Dichte Beton, Bewehrungsgrad) und die Verkehrsbelastung mit Art und Dichte des Verkehrs.

Im Idealfall sind auch die räumlichen Verteilungen der Beanspruchungen bekannt und können mit Zufallsfeldern stochastisch modelliert werden.

7.1.7 Stochastisches Modell der Widerstände

Die Widerstandsseite wird geprägt durch die Basisvariablen der Querschnittabmessungen und Materialeigenschaften. Für den Spann- und Stahlbetonbau (GZT) könnte das zum Beispiel folgende Größen umfassen:

- Querschnittshöhe und -breite,
- Betondeckung,
- Betonstahlfläche (Durchmesser),
- Spannstahlquerschnitt (Durchmesser),
- Betondruckfestigkeit,
- Stahlzugfestigkeit,
- Spannstahlfestigkeit,
- Ermüdungsfestigkeit von Stahl und/oder Beton.

Wie auch bei den Einwirkungen sind statistische Messungen der Verteilung für Geometrie Größen und Materialkennwerte direkt am Tragwerk eine ideale Voraussetzung zur Berechnung der Zuverlässigkeit. Liegen nur Bestandspläne oder nur wenige Messungen vor, so kann Folgendes angenommen werden:

Die Streuung der Querschnittsabmessungen wird gewöhnlich als normalverteilt angenommen. Es erschließt sich, dass je nach eingesetzter Bautechnologie und Material die Streubreiten der Basisvariablen verschieden sind. So kann man davon ausgehen, dass ein Stahlträger eine geringere Streubreite in seinen Querschnittsabmessungen auf-

weist als ein in Ortbeton ausgeführtes Tragwerk. Ausgehend von einem Nennwert ϕ_n der Querschnittsgröße können nach [58, 65] die mittlere Abweichung der Querschnittsabmessung x_m und eine Standardabweichung s_a

$$\phi_n \leq 1.000 \text{ mm} : x_m = 0,003 \phi_n ; s_a = 4 + 0,006 \phi_n,$$

$$\phi_n > 1.000 \text{ mm} : x_m = 3 \text{ mm} ; s_a = 10 \text{ mm}$$

angenommen werden.

Die Streuungen der Materialfestigkeiten hängen stark vom betrachteten Nutzungszeitraum ab, da man davon ausgehen kann, dass durch Ermüdungs- und Degradationsprozesse die Festigkeiten sich über die Zeit verändern. Dabei können sich durch mechanische, chemische, elektrochemische und physikalische Einwirkungen (Prozesse) Mittelwerte der Festigkeiten verschieben oder aber auch Streuungen der Zufallsvariablen durch ungleichmäßige Degradation erhöhen. In [19] und [37] finden sich Ausführungen zu den wichtigsten Festigkeiten, wie Betondruckfestigkeit und Stahlzugfestigkeit, im Stahlbetonbau.

Für eine Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit von Stahl sind Wöhlerlinien und Gaßnerlinien die am weitesten verbreiteten Darstellungsformen. Während die Wöhlerlinien das Verhalten des Werkstoffes unter konstanten Beanspruchungsamplituden beschreiben, geben Gaßnerlinien das Verhalten unter Belastungsfolgen mit variablen Amplituden wieder.

Für probabilistische Berechnungen werden in der Literatur Verteilungsfunktionen der Wöhlerlinien benutzt. Für den Betonstahl gibt es stochastische Beschreibungen, siehe [43].

7.1.8 Modellunsicherheiten

Zwei Modelle stehen zur Diskussion: zum einen das mechanische Modell und auf der anderen Seite das stochastische Modell. Unsicherheiten in mechanischen Modellen treten immer auf, da durch Modellannahmen schon Vereinfachungen gegenüber dem realen Tragwerk getroffen werden. Die Qualität des Modells hängt aber stark vom gewählten Grenzzustand (Versagensszenario) ab. Das mechanische Modell der Biegetragfähigkeit ist eindeutiger als das mechanische Modell der Querkrafttragfähigkeit. Oder es werden für den GZT Biegung im Stahlbeton unterschiedliche Annahmen (Vereinfachungen) für die Ausbildung der Druckzo-

ne (Rechteck, linear, Parabel-Rechteck) getroffen. Ebenso spielt die Tragwerkstechnologie eine Rolle, so gibt der JCSS [47] für Stahlbauwerke einen Variationskoeffizient von 5 % bis 15 % und für Stahlbetontragwerke einen Variationskoeffizient von 10 % bis 25 % abhängig von der Widerstandsgröße an. Die Verteilungsfunktionen sind entweder vom Typ Lognormalverteilung bzw. Normalverteilung. Sind die mechanischen Modelle ausreichend verifiziert, so ergeben sich auch eindeutige stochastische Modelle. Durch Model-Updating können die Modelle dem realen Verhalten angepasst werden, falls ihre Annahmen (Randbedingungen und Freiheitsgrade) dies erlauben. Auf der Widerstandsseite finden wir gewöhnlich konservative Modelle. Zum einen beim mechanischen Verhalten, aber insbesondere bei den Materialkennwerten. Die Materialkennwerte definieren gewöhnlich untere Grenzwerte von Fraktile-Werten (5%-Quantil). Diese sollten aber im Realen grundsätzlich überschritten werden und höhere Festigkeiten vorhanden sein. Aber auch der Unsicherheitsfaktor Mensch spielt eine Rolle, so können durch menschliches Versagen die Querschnitte (Stahlbeton) nicht so ausgebildet sein wie geplant, da z. B. Bewehrungsstähle falsch eingelegt oder vergessen wurden. Dabei hat das menschliche Versagen (Fahrlässigkeit) einen großen Spielraum und ist im theoretischen Wert der „operativen“ Versagenswahrscheinlichkeit P_f [65] nicht enthalten. In der Literatur sind Aussagen zu finden, die von einer 10-fach höheren „tatsächlichen“ Versagenswahrscheinlichkeit (beinhaltet Fahrlässigkeit, menschliche Fehler und Irrtümer) ausgehen.

Die Modellunsicherheiten auf Widerstandsseite U_R und Einwirkungsseite U_E sind als Faktoren der Beanspruchbarkeiten und Beanspruchungen in der Zustandsgleichung wie folgt anzusetzen:

$$g(\mathbf{X}) = (U_R \cdot R(\mathbf{X}) - U_E \cdot E(\mathbf{X})) \quad (7.10)$$

Sind die stochastischen Modelle $R(\mathbf{X})$ und $E(\mathbf{X})$ komplexerer Natur, so sind auch Teilunsicherheiten für die einzelnen Anteile am Widerstand bzw. den Einwirkungen möglich. Entspräche die Zustandsfunktion beispielsweise einer Differenz von Schnittkräften am Querschnitt aus Beanspruchbarkeiten und Beanspruchungen, so bestünde die Möglichkeit von differenzierten Modellunsicherheiten für Moment, Normalkraft oder Querkraft.

Dieses Projekt beschränkt sich auf Modellunsicherheiten für Stahlbetonkonstruktionen. Eine ausführ-

liche Übersicht der aktuellen Literatur und Verteilungsannahmen und der Einfluss der Modellunsicherheiten sind in [19] Kapitel 6.2 dargelegt. Hervorzuheben sei die Aussage, dass die Modellunsicherheiten neben den Verkehrslasten den größten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen.

Für die Quantifizierung der Unsicherheiten sei auf den „Probabilistic Modelcode“ (JCSS) [47], Kapitel 3 „Resistance Models“ verwiesen.

7.1.9 Lösungsverfahren – numerische Integrationsverfahren

Wurden Grenzzustandsfunktion und Zufallsvariablen definiert, gilt es, die Versagenswahrscheinlichkeit P_f zu berechnen. Dazu ist das folgende Integral über die n-dimensionale Verbunddichtefunktion $f_x(\mathbf{x})$ der Zustandsfunktion in den Grenzen des Versagensbereichs $g(\mathbf{x}) \leq 0$ zu lösen.

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (7.11)$$

Die analytische Lösbarkeit des Integrals ist abhängig von der Komplexität der mehrdimensionalen Verteilungsfunktion, dem Aufstellen der Verbunddichte, der direkten Formulierung der Grenzzustandsfunktion und der Integration selbst. In der Praxis ist eine direkte Formulierung der Verbunddichte bzw. der Zustandsfunktion oft nicht möglich, sondern die Funktionen ergeben sich aus einer numerischen Methode (FEM) oder gar einem ganzen numerischen Prozess.

Monte-Carlo-Simulation (MCS)

Die programmtechnisch einfachste Integration, die mit steigendem Rechenaufwand zur exakten Lösung des Integrals konvergiert (Gesetz der großen Zahlen), ist die Monte-Carlo-Simulation. Durch Einführen einer Indikatorfunktion

$$I(g(\mathbf{x})) = \begin{cases} 0 & : g(\mathbf{x}) > 0 \\ 1 & : g(\mathbf{x}) \leq 0 \end{cases} \quad (7.12)$$

wird es möglich, die Versagenswahrscheinlichkeit als n-dimensionales Integral über den gesamten Zufallsraum Ω zu formulieren.

$$P_f = \int_{\Omega} I(g(\mathbf{x})) f_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (7.13)$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit ist somit der Erwartungswert der Indikatorfunktion $P_f = E[I(g(\mathbf{x}))]$ und kann durch das statistische Mittel von N Realisationen der Basisvariablen x_i erwartungstreu abgeschätzt werden:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(g(\mathbf{x}_i)) \quad (7.14)$$

Die Anzahl N der erforderlichen Realisationen (Auswertungen der Zustandsfunktion) ist unabhängig von der Dimension des Zufallsraumes und nur abhängig von der erwarteten Versagenswahrscheinlichkeit. Wird zum Beispiel ein Sicherheitsniveau von $P_f = 10^{-6}$ angestrebt, so ist bei einem Variationskoeffizient des Schätzers von 10 % eine Anzahl von $N \geq 10^8$ Realisationen (Auswertungen der Zustandsfunktion) nötig.

Zuverlässigkeitsverfahren erster und zweiter Ordnung (FORM/SORM – first/second order reliability methods)

Die am häufigsten verwendeten Methoden zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit bedienen sich einer Approximation der Grenzzustandsfunktion im Bemessungspunkt (MPP – most probable point) \mathbf{x}_B . Es ist der Punkt mit der höchsten Wahrscheinlichkeitsdichte auf der Grenzzustandsfunktion. Diese Verfahren funktionieren nur für unkorrelierte normalverteilte Zufallsvariablen im Standardnormalraum. Durch Transformationen ist dies auch mit korrelierten nicht normalverteilten stetigen Zufallsvariablen möglich. Der Bemessungspunkt ist der Punkt, der im Standardnormalraum den kürzesten Abstand β vom Koordinatenursprung (Mittelwert) besitzt. Somit lässt sich aus dem Integrationsproblem ein Optimierungsproblem zur Bestimmung von \mathbf{x}_B formulieren:

$$\mathbf{x}_B : \mathbf{x}^T \mathbf{x} \rightarrow \min \quad (7.15)$$

mit der Nebenbedingung $g(\mathbf{x}) = 0$.

Der Bemessungspunkt lässt sich nun mit nichtlinearen Optimierungsalgorithmen bestimmen. Ist dies gelungen, so kann durch Annahme einer (fast) linearen Grenzzustandsfunktion (FORM) die Versagenswahrscheinlichkeit

$$P_f = \Phi^{-1}(-\beta) \quad (7.16)$$

(siehe Kapitel 7.1.4) bestimmt werden. Die Lösung ist nur exakt, wenn $g(\mathbf{x})$ einer linearen Funktion

entspricht. Ist die Zustandsfunktion am Bemessungspunkt jedoch konkav oder konvex gekrümmt, so kann man mit SORM, d. h. einer Taylor-Reihen-Entwicklung, bis zum zweiten Glied eine Verbesserung der Genauigkeit von P_f erwarten. Unterschiedlichste Verfahren existieren. Nach [22] ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \left[\prod_{i=1}^{n-1} (1 - \beta k_i) \right] \quad (7.17)$$

mit der i -ten Hauptkrümmung k_i der Grenzzustandsfunktion am Bemessungspunkt.

Nachteil dieser Methoden sind zum einen die angenommenen Verläufe der Grenzzustandsfunktion, da man bei komplexen hochdimensionalen Problemen nicht immer den Fehler abschätzen kann, den man gegenüber dem realen GZF-Verlauf macht. Ein weiter signifikanter Nachteil ist die Voraussetzung, dass es einen eindeutigen Bemessungspunkt geben muss, was nicht immer gegeben ist. Auch das Bestimmen des Bemessungspunktes kann ein komplexeres Problem werden als die Integration selbst.

Importance Sampling Procedure Using Design Point (ISPUD)

Will man den hohen Aufwand der MC-Simulation vermeiden, so bieten sich varianzminimierende Simulationsverfahren an. Dabei wird die Anzahl N durch Verringerung der Varianz des Schätzers ermöglicht, indem möglichst viele Realisationen im Versagensbereich liegen. Beim Importance Sampling wird die Verbunddichtefunktion $f_X(\mathbf{x})$ durch eine Simulations-Verbunddichte $h_Y(\mathbf{x})$ (gleicher physikalische Bedeutung/Raum) im Bereich hoher Wahrscheinlichkeitsdichte im Versagensbereich ersetzt. Die Versagenswahrscheinlichkeit (Näherung) lässt sich dann folgend berechnen.

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_I \left(I(g(\mathbf{x}_i)) \frac{f_X(\mathbf{x}_i)}{h_Y(\mathbf{x}_i)} \right) \quad (7.18)$$

Es wird angestrebt, dass möglichst viele Stichproben in den Versagensbereich hoher Wahrscheinlichkeit fallen. Die Varianz des Schätzers geht gegen null, wenn

$$h_Y(\mathbf{x}) = I(g(\mathbf{x})) \frac{f_X(\mathbf{x})}{P_f} \quad (7.19)$$

Dies setzt aber voraus, dass man die Versagenswahrscheinlichkeit schon exakt kennt oder sehr genau abschätzen kann bzw. die Ersatz-Verbunddichte auch korrekt für den Bereich des Bemessungspunktes aufgestellt hat. Geht die Kenntnis eines Bemessungspunktes mit in die Bestimmung der Simulationsdichte ein, so konzentrieren sich die Realisationen im Bereich höchster Versagenswahrscheinlichkeit. Dieses Konzept wird als Importance Sampling Procedure Using Design Point (ISPUD) bezeichnet und setzt die Bestimmung des Bemessungspunktes wie für FORM/SORM nötig voraus. Vorteil gegenüber den Zuverlässigkeitsverfahren erster und zweiter Ordnung ist, dass die Grenzzustandsfunktion im Bereich höchster Wahrscheinlichkeit stark nichtlinear, sogar unstetig sein kann, da man direkt an dieser Stelle numerisch integriert. Zusätzlich kann die Varianz des Schätzers als Indikator für einen falschen Bemessungspunkt herangezogen werden.

Adaptive Sampling

Möchte man die Bestimmung des Bemessungspunktes vermeiden bzw. ist die Bestimmung nicht möglich, sollte auf dieses Konzept ausgewichen werden. Beim Adaptive Sampling wird gefordert, dass die ersten beiden statistischen Momente der Simulationsdichte gleich den ersten beiden Momenten der Stichproben der Basisvariable \mathbf{X} sind, die in den Versagensbereich fallen.

Nach einer ersten Simulation mit erhöhten Varianzen werden die statistischen Momente der Realisationen im Versagensbereich berechnet. Diese sind dann Parameter einer Normalverteilung der Basisvariablen Y . Diese werden dann im folgenden Simulationsschritt (Iterationsschritt) zum Bilden der Stichproben verwendet. In mehreren Iterationsschritten erfolgt nun eine adaptive Ermittlung der Simulationsdichte $h_Y(\mathbf{x})$.

(Adaptive) Directional Sampling (DS)

Ein weiteres Verfahren, welches gleichzeitig als Approximationsverfahren der Grenzzustandsfunktion und als Samplingverfahren angesehen werden kann, ist das Directional Sampling. Es setzt die gleichen Bedingungen an das stochastische Modell (Verbunddichte) wie FORM und SORM voraus: standardnormalverteilte unkorrelierte Randverteilungen. Ausgehend vom Mittelwert der standardnormalen Verbunddichte (Ursprung) werden Richtungsvektoren systematisch bzw. zufällig gewählt

(gleichverteilt). Entlang dieser Richtungsvektoren wird unter Zuhilfenahme eines Bisektionsverfahrens der Schnittpunkt mit der Grenzzustandsfläche gesucht. Für jede ermittelte Richtung lässt sich ein Erwartungswert der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit bestimmen. Die Versagenswahrscheinlichkeit selbst ist wiederum ein erwartungstreuer Schätzer aus den Mitteln der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit.

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_I \left(1 - \chi_N^2(r_i^*(\mathbf{a}_i)) \right) \quad (7.20)$$

wobei χ_N^2 die Chi-Quadrat-Verteilung mit dem Freiheitsgrad n , \mathbf{a} dem Einheitsrichtungsvektor und r^* den Abstand zur Grenzzustandsfunktion $g(r^*(\mathbf{a})) = 0$ darstellen. Vorausgesetzt wird, dass sich der Koordinatenursprung nicht im Versagensbereich befindet und dass in eine Richtung \mathbf{a} nur ein Grenzzustandspunkt existiert. Diese Herangehensweise hat den Vorteil, dass z. B. Grenzzustandsfunktionen, die mehr als einen Bemessungspunkt bzw. Bereich im Zustandsraum mit hoher Wahrscheinlichkeit besitzen, zu einer brauchbaren Lösung für die Versagenswahrscheinlichkeit führen. Durch das Verfahren ist es auch möglich, symmetrische Grenzzustände (rechts und links des Mittelwertes) zu erfassen.

Eine Kombination von Directional Sampling mit dem Importance Sampling ermöglicht es, für die Richtungen \mathbf{a} eine eigene varianzminimierende Simulationsdichte $h_{\mathbf{a}}(\mathbf{a})$ zu bestimmen. Je nach Grenzzustandsfunktion sind optimale Simulationsdichten zu ermitteln. Dabei kann entweder auf die ersten beiden statistischen Momente wie beim Importance Sampling oder auf Wichtungsfaktoren, abhängig vom Abstand der Grenzzustandsfunktion, als Basis für die neue Verbunddichte zurückgegriffen werden. Mindestens zwei dominante Versagensbereiche sollen sich mit dem adaptiv Directional Sampling erfassen lassen. Die Schätzung der Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt mit:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_I \left(1 - \chi_N^2(r_i^*(\mathbf{a}_i)) \right) \frac{f_A(\mathbf{a}_i)}{f_Y(\mathbf{a}_i)} \quad (7.21)$$

Antwortflächenverfahren

Die Zustandsfunktion $g(\mathbf{X})$ für einfache mechanische Modelle kann gewöhnlich explizit aufgestellt werden und erfordert keine großen Ressourcen zur Berechnung einer Realisation (Stichprobe). Daher sind bisher aufgeführte Verfahren zur Bestimmung

der Versagenswahrscheinlichkeit, welche eine hohe Anzahl an Auswertungen des mechanischen Modells benötigen, gut geeignet. Liegt einer Zustandsfunktion eine nichtlineare Strukturanalyse zu Grunde, so ist diese für jede benötigte Realisation durchzuführen. Dies bringt auch heutige hohe Rechenleistung an ihre Grenzen. Es liegt daher nahe, die komplexen Systemantworten durch einfache Modelle zu ersetzen. So entstand eine ganze Klasse von Verfahren zur Approximation und Interpolation, die kombiniert mit vorangegangenen Verfahren neue Lösungsstrategien bieten. Dabei werden entweder die gesamte Zustandsfunktion bzw. nur die Grenzzustandsfunktion mit Regressionsverfahren oder Interpolationsverfahren, abhängig von der Anzahl berechneter Stützstellen und der angesetzten Approximationsfunktionen, durch vereinfachte Modelle (gegenüber den Strukturantworten) ersetzt. Unter den Schlagworten Antwortflächenverfahren (response surface methode), Metamodell (meta model), Approximationsmodell (approximation model), Ersatzmodell (surrogate model) findet sich eine große Fülle an Verfahren, die sich oft nur in der Anzahl der Parameter zur Einstellung ihres Verhaltens unterscheiden. Jedes dieser Verfahren funktioniert für eine bestimmte Klasse an stochastischen Problemstellungen abhängig von der Anzahl der Zufallsvariablen, der Größenordnung der gesuchten Versagenswahrscheinlichkeit und der Komplexität der Zustands- und Grenzzustandsfunktion optimal. Die Optimalität nimmt gewöhnlich Bezug auf den Approximationsfehler der Versagenswahrscheinlichkeit (exakte oder grobe Schätzung von P_f) oder auf die Anzahl der benötigten Strukturantworten (Realisationen, Stichproben). Erweitert werden diese Verfahren oft mit Adaptionsalgorithmen, um ihre Genauigkeit bzw. Konvergenz, zur exakten Lösung, zu erhöhen.

7.2 Ermittlung der Schädigungssumme und Nutzungsdauer infolge Materialermüdung

7.2.1 Allgemeines

Da probabilistische Ermittlungen von Zuverlässigkeitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit bei Materialermüdung infolge der Komplexität des Problems noch nicht praktikabel sind, werden die hier vorgestellten Untersuchungen als Betriebsfestigkeitsnachweis geführt. Beide Methoden führen zu Ergebnissen, die den Verlauf der belastungsbedingten Schädigungen beurteilen und daraus eine

Restlebensdauer errechnen, jedoch wird der Materialbruch, der durch die abnehmende Materialfestigkeit (fortschreitender Ermüdungsmikroriss) entsteht, nicht erfasst. Dafür fehlen noch entsprechende Materialkenntnisse. Es wird deshalb der Fokus auf eine möglichst wirklichkeitsnahe Beanspruchungsermittlung gelegt. Der Betriebsfestigkeitsnachweis basiert auf drei Säulen:

- der Beschreibung ermüdungsrelevanter Beanspruchungen,
- der Beschreibung der Ermüdungsfestigkeitswerte der Werkstoffe,
- einer Schadensakkumulation.

7.2.2 Beanspruchungskollektive

Die Ermittlung der Beanspruchungskollektive wurde unter Kapitel 7.1 beschrieben. Es werden monitoringbasiert aktuelle Verkehrsdaten ermittelt, die mittels Simulationsmodellen zu Fahrzeugfolgen für vergangenen Verkehr, aktuellen Verkehr und zukünftigen Verkehr führen. Es folgen Kennwert-Zeitverläufe, die durch Rainflow-Auswertung zu verschiedenen Darstellungsformen von Beanspruchungskollektiven ausgewertet werden.

Dieser Weg erlaubt die Ermittlung von Beanspruchungskollektiven für beliebige Tragwerke und Kennwerte. Voraussetzung für die Anwendung dieses Ansatzes ist aber, dass objektspezifische Verkehrsdaten vorliegen. Zur Abbildung von Beanspruchungskollektiven der Entwurfsphase des Bauwerks werden die verfügbaren Ermüdungslastmodelle der DIN EN 1991-2 [33] oder der Nachrechnungsrichtlinie [15] empfohlen.

7.2.3 Ermüdungsfestigkeit

Für eine Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Stahl sind Wöhlerlinien und Gaßnerlinien die am weitesten verbreiteten Darstellungsformen. Sie gehören zum Ingenieuralltag und werden deshalb hier nicht weiter beschrieben. Mit dem gültigen Normenwerk liegen definierte Wöhlerlinien vor. Für die Parameter der Wöhlerlinien älterer Spannstähle – insbesondere im einbetonierten Zustand – und Betonstähle für Bestandsbauwerke fehlen derartige Angaben. In [50] wurden durch eine umfangreiche Literaturrecherche alle verfügbaren und verwertbaren Wöhlerlinien älterer Stähle zusammengetragen.

Die Ermüdungsfestigkeit des Betons unter Druckbeanspruchung lässt sich ebenfalls über Wöhlerlinien beschreiben. Da diese von Ober- und Unterspannung beeinflusst wird, werden die Wöhlerlinien für den Beton unter Druckbeanspruchung durch eine zweiparametrische Funktion beschrieben, dabei werden auf die Betondruckfestigkeit bezogene Spannungen verwendet. Im Straßenbrückenbau ist die Anwendung dieser Wöhlerlinien nicht verbreitet, jedoch verfügbar.

Druck- und Zugbeanspruchung des Betons basieren gegenwärtig auf den gleichen Wöhlerlinien.

7.2.4 Schadensakkumulation

Die Ermüdungsmodelle auf der Basis von Wöhlerlinien beschreiben die Zusammenhänge zwischen der einzelnen Schwingbreite $\Delta\sigma_i$ und der Anzahl der ertragbaren Lastspiele N_i für diese Schwingbreite.

Zur Bestimmung der Schädigungssumme ist eine Schadensakkumulation erforderlich. Dafür existieren mehrere Verfahren, die sowohl linear als auch nichtlinear sind. Am weitesten verbreitet ist das lineare Verfahren der Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner. Grundlage dieses Verfahrens ist die Annahme, dass jeder Spannungswechsel eine Schädigung des Baustoffs verursacht und sich die Schädigungen so lange addieren, bis eine Grenzschädigung erreicht ist.

Die Schädigung, welche durch das gesamte Beanspruchungskollektiv hervorgerufen wird, lässt sich demnach mittels eines dimensionslosen Schädigungsfaktors wie folgt darstellen:

$$D_{vorh} = \sum \frac{n_i(\Delta\sigma_i)}{N_i(\Delta\sigma_i)} \quad (7.22)$$

mit

D_{vorh}	akkumulierte Schädigung [-]
$n_i(\Delta\sigma_i)$	Anzahl der Lastwechsel einer Schwingbreite $\Delta\sigma_i$ [-]
$N_i(\Delta\sigma_i)$	ertragbare Lastwechsel einer Schwingbreite $\Delta\sigma_i$ [-]

Die Nutzungsdauer kann aufgrund der linearen Schadensakkumulation aus der akkumulierten Schädigung über den betrachteten Bezugszeitraum D (z. B. 100 Jahre) und einer definierten Schädigung D_{grenz} , bei der das Ermüdungsversagen eintritt, als Vielfaches des Bezugszeitraumes darstellen.

8 Ausgewählte Probleme im Rahmen der Konzeptentwicklung

8.1 Schädigungsprognosen für Beton und Stahlbetontragwerke

Das Konzept des Einsatzes von Monitoringsystemen zur Detektion kritischer Tragwerkszustände der Tragfähigkeit basiert auf zwei Komponenten:

- dem Monitoringsystem, mit dem das zu überwachende Tragwerke kontinuierlich oder in zeitlichen Abständen temporär vermessen wird, und
- dem Prognosemodell, mit dem die Vorhersage des zukünftigen Tragwerksverhaltens erfolgt.

Für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis ist der permanente Abgleich, d. h. die Systemidentifikation, zwischen den gemessenen Größen und dem Prognosemodell notwendig. Damit lässt sich die notwendigerweise unscharfe Vorhersage der zukünftigen Tragwerksentwicklung immer wieder auf den gemessenen Zustand des Tragwerks zurückführen.

Um eine möglichst allgemeine Aussage zur Änderung der Versagenswahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Strukturen über die Lebensdauer erhalten zu können, ist es erforderlich, diese auf numerischem Weg zu ermitteln. Erfahrungsbasiertes Wissen kann unter Umständen für bestimmte Tragwerke eine Alternative darstellen, jedoch setzt dies voraus, dass eine hinreichend große Anzahl existierender einander ähnlicher Tragstrukturen lange genug beobachtet werden konnte. Selbst im Maschinenbau beziehungsweise in der Luftfahrtindustrie war dies bisher nur in Ausnahmefällen möglich. Die Bewertung von neuen Konstruktionen, das heißt, die Extrapolation von vorhandenem Wissen auf neue Entwürfe, bleibt selbst in diesen Fällen noch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die numerische Simulation des Tragverhaltens beliebiger Strukturen lässt sich mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente durchführen. Mit dieser inzwischen im Ingenieurwesen gut etablierten Methode lassen sich beliebig komplizierte Tragstrukturen unter statischen und dynamischen Lasten unter Berücksichtigung geometrisch und physikalisch nichtlinearer Einflüsse untersuchen. Während bei der klassischen Anwendung dieser Methode im Entwurfsprozess von Strukturen nur der initiale Zustand des Tragwerks untersucht wird und keine Än-

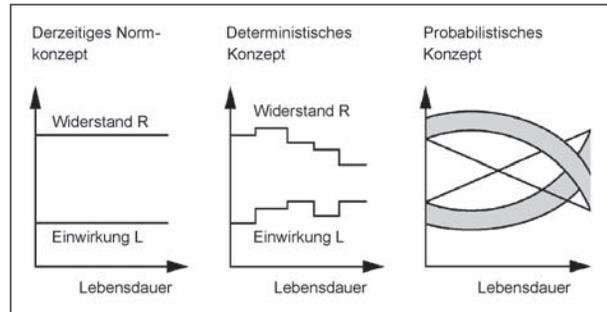


Bild 12: Konzepte der Lebensdauerbewertung eines Tragwerkes

derung dieses Verhaltens über die Lebensdauer der Struktur berücksichtigt wird, ist es für die Beurteilung der zeitlichen Entwicklung der Versagenswahrscheinlichkeiten eines Tragwerks von entscheidender Bedeutung, die Deteriorations- und Schädigungswirkungen sowie die zeitlichen Änderungen der Belastung in der Berechnung zu berücksichtigen. Zusätzlich müssen die stochastisch streuenden Eingangsgrößen des Prozesses – Belastung, Material, Alterungs- und Schädigungswirkungen – berücksichtigt werden. In Bild 12 sind die drei Konzepte einer Lebensdauerabschätzung nochmals grafisch miteinander verglichen. Das linke Bild zeigt das derzeitige Normkonzept, das von konstanten Größen über die gesamte Lebensdauer einer Struktur, sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite, ausgeht. Beide Seiten werden mit wiederum konstanten Teilsicherheitsfaktoren beaufschlagt. Im mittleren Bildteil ist ein Konzept dargestellt, welches die zeitlichen Änderungen berücksichtigt und damit zu realistischeren Aussagen kommt. Zunächst werden dabei keine stochastischen Streuungen berücksichtigt. Die zeitlichen Entwicklungen sind rein deterministischer Natur. Im rechten Bildteil ist dann das Endmodell dargestellt, in dem neben den zeitlichen Veränderungen auf Einwirkungs- und Widerstandsseite auch die stochastischen Streuungen berücksichtigt werden.

Zur Lösung der Simulationsaufgabe steht das folgende formulierte algebraische Gleichungssystem mit Iterationsmöglichkeit über die rechte Seite zur Verfügung. Der physikalisch nichtlineare Anteil der tangentialen Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_{phy} hängt vornehmlich vom Spannungszustand ab, der geometrisch nichtlineare Anteil \mathbf{K}_{geo} hängt vom erreichten Verformungszustand ab.

$$\left(\mathbf{K}_e + \mathbf{K}_{phy} + \mathbf{K}_{geo}\right)\mathbf{V}^+ = \mathbf{K}_T\mathbf{V}^+ = \mathbf{P} - \mathbf{F}_i \quad (8.1)$$

mit

\mathbf{V}^+ Vektor der Inkremente der globalen Knotenweggrößen

\mathbf{P} Vektor der gesamten Knotenlasten

\mathbf{F}_i Vektor der inneren Knotenkraftgrößen

\mathbf{K}_T tangentielle Steifigkeitsmatrix

\mathbf{K}_e elastische Steifigkeitsmatrix

\mathbf{K}_{phy} physikalisch nichtlineare Steifigkeitsmatrix

\mathbf{K}_{geo} geometrisch nichtlineare Steifigkeitsmatrix

Die Integration der das Tragverhalten beeinflussenden Deteriorations- und Schädigungseffekte erfolgt auf der Ebene eines Materialpunktes. Im Folgenden wird deshalb auf die notwendigen Algorithmen – auf der Ebene eines Materialpunktes – eingegangen.

Die wesentlichen in den numerischen Werkstoffmodellen zu berücksichtigenden Deteriorations- und Schädigungseinflüsse sind:

- Korrosion des Bewehrungsstahls und Karbonatisierung der Betonmatrix [8],
- Alkali-Silikat-Reaktion des Zuschlags [70],
- Druckversagen des Betons,
- Entfestigung des Betons infolge zyklischer Belastungen bei geringer Anzahl von Lastzyklen,
- Entfestigung des Betons infolge zyklischer Belastungen bei großer Anzahl von Lastzyklen, Ermüdungsbelastungen,
- Zugversagen des Betons,
- Plastizieren des Bewehrungsstahls.

Für alle genannten Deteriorations- und Schädigungseffekte ist eine Vielzahl theoretisch/-numerischer Modelle vorhanden. Übersichtliche Darstellungen der Modelle sind z. B. in [46] zu finden.

Ziel der Modellierung des Werkstoffs Stahlbeton muss die Berücksichtigung der unterschiedlichen Deteriorations- und Schädigungsphänomene in einer vereinheitlichten und kontinuumsmechanisch begründeten Theorie sein. Die Formulierungen sollten dabei, soweit möglich, für den allgemeinen Fall des dreidimensionalen Kontinuums aufgestellt werden. Als Deteriorations- und Schädigungsphäno-

mene von Stahlbeton sollten die folgenden Phänomene grundsätzlich berücksichtigt werden:

- Plastizität und Mikrorissentwicklung von Beton bei überwiegender Druckbeanspruchung,
- Zugrissentwicklung im Beton,
- Plastizieren des Bewehrungsstahls,
- Verbund- und Grenzflächenschädigungen zwischen Stahl und Beton,
- Nacherhärtung des Betons,
- lastunabhängiges Schwinden,
- lastabhängiges Kriechen,
- Korrosion und Erosion des Betons,
- Korrosion des Bewehrungsstahls.

Sollen Simulationsberechnungen für Lebensdaueranalysen eingesetzt werden, so muss die Berechnung bis zum Versagen der Gesamtstruktur erfolgen. Unabhängig davon, ob die Belastung der Struktur zyklisch oder monoton ist, kann es bei nichtlinearem Verhalten der Struktur oder des Materials auf Grund von Spannungsumlagerungen für einzelne Materialpunkte zu zyklischen Beanspruchungen kommen. Deshalb muss das gesuchte Materialmodell auch zyklische Beanspruchungen angemessen berücksichtigen können. Das Verhalten unter Ermüdungslasten für große Zyklenzahlen ist für Tragwerke, die dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, z. B. aus Wind- oder Verkehrslasten, oftmals entscheidend.

8.2 Systemidentifikation

8.2.1 Allgemeines

Die Systemidentifikation verfolgt das Ziel, ein vorhandenes Modell des Tragsystems hinsichtlich der Ein- und Ausgangsgrößen

- mit entsprechenden gemessenen Werten zu vergleichen und die Abweichungen festzustellen und
- so anzupassen, dass die Abweichungen zwischen rechnerischen und gemessenen Werten minimal sind.

Die Systemidentifikation wird in der Literatur vordergründig zur Feststellung von Änderungen im Strukturverhalten durch Schädigungen beschrie-

ben. Als Messwerte dienen sowohl statische als auch dynamische Kenngrößen wie Dehnungen oder Beschleunigungen.

Die Systemidentifikation ist seit mindestens 20 Jahren Forschungsschwerpunkt von Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen und sie wird auch in praktischen Anwendungen eingesetzt. Das Ziel der Identifikation und Lokalisierung von Schäden im Bauwerk ist jedoch noch nicht reproduzierbar erreicht. Dies ist auch der Grund für die Einschätzung in Kapitel 5.3.2 des vorliegenden Berichtes, dass es ein im praktischen Einsatz befindliches Monitoringsystem für gesicherte Aussagen für Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer nicht gibt, wohl aber Monitoringsysteme für Teilziele dieser anspruchsvollen Aufgabe.

Die Systemidentifikation ist in erster Linie auf das globale Verhalten des Tragsystems orientiert, weshalb integrale Messgrößen wie Systemverformungen oder Schwingungen interessant sind. Die Anpassung im Modell des Tragsystems erfolgt dann über die Tragwerkssteifigkeit beeinflussende Parameter wie z. B. den E-Modul.

Die Anpassung selbst ist ein Optimierungsproblem, wie in [21] gezeigt wird, wobei durch Variation einer beschränkten Anzahl von Parametern auf den Zustand des Gesamttragwerkes geschlossen wird.

In diesem Kapitel soll am Beispiel der Brücke über den Brozeller Kreisel gezeigt werden, wie sich vir-

tuelle Schädigungen auf die Eigenfrequenzen und Eigenmoden auswirken.

8.2.2 Ungeschädigtes Tragwerk

Nach Planungsunterlagen (ideales initiales Tragwerk) wurde die Beispielbrücke (Brücke Bonzell/Fulda) mit einem Beton der Klasse Bn350 (DIN 1045:1972-01) errichtet. Dies entspricht nach der Nachrechnungsrichtlinie [15] (Tabelle 11.2, S. 30) einem Beton der Klasse C25/30 (DIN EN 206-1) mit einem Elastizitätsmodul von 30.500 N/mm². Im Folgenden wird der E-Modul als Parameter für Steifigkeitsveränderungen im Tragsystem verwendet. Deshalb wird als Vergleich ein 2. Modell mit einem Beton C40/50 (aktuelle Normen) mit einem Elastizitätsmodul von 34.000 N/mm² gegenübergestellt. Die 3. Vergleichsrechnung erfolgt mit einem Elastizitätsmodul von 66.838 N/mm² und entspricht einer kalibrierten Steifigkeit. Bild 13 stellt die ersten 20 Eigenfrequenzen für alle 3 Modelle dar. Es zeigt sich gegenüber dem initialen Modell, dass sich geringe Änderungen in den Steifigkeiten nur geringfügig in den Eigenfrequenzen äußern und erst mit einer signifikanten Änderung der Tragwerkssteifigkeit sich die Eigenfrequenzen deutlich unterscheiden. Dabei zeigen die höheren Frequenzen stärkere Abhängigkeiten von der Steifigkeit.

Für die Änderungen in den Eigenformen bietet sich als Vergleichsindikator das Modal Assurance

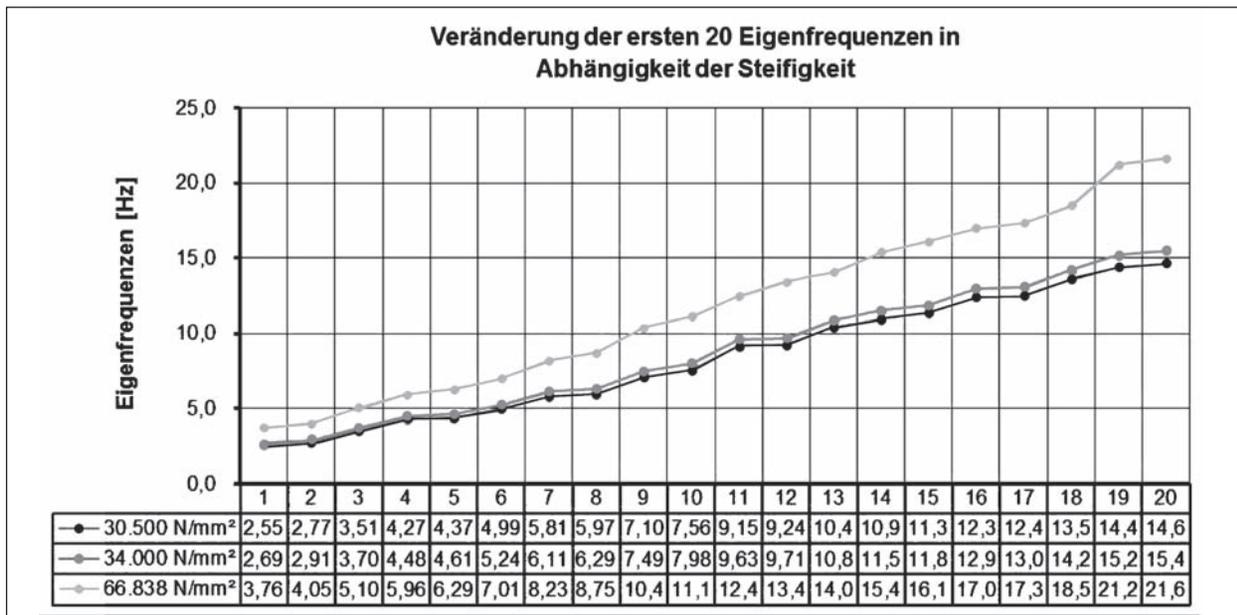


Bild 13: Vergleich der Eigenfrequenzen gegenüber Elastizitätsanpassungen im Tragwerkmodell

Criterion (MAC) [6] an. Der MAC-Wert wird aus zwei Eigenformen Φ_1, Φ_2 , entsprechend Gleichung (8.2) gebildet.

$$MAC = \frac{|\Phi_1^T \cdot \Phi_2|^2}{|\Phi_1^T \cdot \Phi_1| \cdot |\Phi_2^T \cdot \Phi_2|} \quad (8.2)$$

Der MAC-Wert variiert zwischen den Werten 0 und 1. Korrelieren die beiden Eigenformen, so nimmt der MAC-Wert den Wert 1 an, sonst 0. Eine MAC-Matrix beinhaltet den Vergleich zweier Sets an Eigenformen miteinander, wobei jede Eigenform des einen Sets mit jeder Eigenform des anderen Sets verglichen wird. Auf der Hauptdiagonale dieser Matrix sollten sich bei Entsprechung der beiden Eigenformen Werte von 1 und auf den Nebendiagonalen die Werte 0 ergeben.

Vergleicht man die Eigenmoden des Modells 1 und 3 (MAC-Matrix; Tabelle 2), so zeigen sich schon in den ersten 20 Moden signifikante Unterschiede. Die MAC-Werte des Eigenmodenvergleichs sind zum einen als Indikator bei einer Modellanpassung (Kalibrierung) hilfreich. Sie können aber auch als Indikator einer Änderung im Tragwerk, z. B. Schädigung, herangezogen werden.

8.2.3 Geschädigtes Tragwerk (Feld)

Bild 14 zeigt die Änderung der Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von einer Degradation durch Reduzierung der Steifigkeit. Eine Halbierung des Elastizitätsmoduls in der Schädigungszone (hier: Feld 2, Mitte), zeigt sich kaum in Änderungen der niedrigen Eigenfrequenzen des Systems. Erst eine massive Schädigung, welche einem Versagen des Tragwerks in Feldmitte (Feld 2) entspricht, ändert wie erwartet im virtuellen Modell die ermittelten

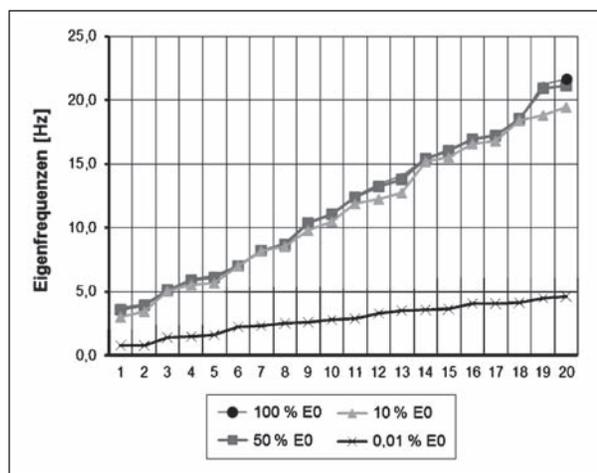


Bild 14: Vergleich der Eigenfrequenzen von (un)geschädigtem Modell in Feld 2 (Mitte)

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0,001	0,001	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0	0
3	0	0	0,996	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0,001	0	0	0	0	0
4	0	0	0,002	0,978	0,012	0	0	0	0,001	0,001	0	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0,008	0,916	0,059	0,002	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0,004	0,074	0,918	0,001	0,002	0	0,001	0	0	0,002	0	0	0	0,001	0	0	0
7	0	0,001	0	0,001	0,006	0,007	0,824	0,26	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0,13	0,774	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0
9	0	0	0	0,001	0	0	0,002	0	0,995	0,006	0,005	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0,002	0,001	0,001	0,994	0,016	0,002	0	0	0,001	0	0	0	0	0,001
11	0	0	0,002	0,002	0	0	0	0	0	0,001	0,257	0,665	0	0,001	0,085	0,019	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0,003	0,007	0,614	0,218	0,115	0	0	0	0,012	0,005	0,001	0,002
13	0	0	0	0	0	0,008	0,003	0,001	0	0,001	0,052	0,015	0,827	0	0	0,001	0,04	0,006	0	0
14	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0,001	0,001	0,026	0,078	0,001	0,042	0,817	0	0,001	0	0	0
15	0	0	0	0	0,001	0	0	0,001	0	0	0	0,002	0	0,938	0,035	0,008	0,002	0,006	0,01	0,001
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,017	0,001	0,003	0,001	0,932	0,002	0	0	0,003
17	0	0	0	0	0,002	0,005	0,002	0,001	0	0	0	0,001	0,054	0,001	0,001	0,001	0,866	0,037	0,002	0,002
18	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0,002	0	0,035	0,002	0	0	0,041	0,905	0	0,01
19	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,003	0	0	0	0	0	0,01	0,001	0	0,001	0	0,964	0,02
20	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0,001	0,001	0,001	0	0,002	0	0	0,002	0,002	0,002	0,971

Tab. 2: MAC (Model Assurance Criterion) – Matrix; Initiales Modell 1 (34.000 N/mm²) vs. Kalibriertes Modell 3 (66.838 N/mm²)

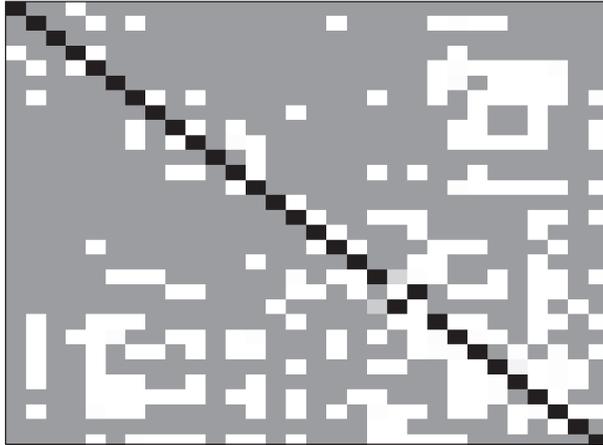


Bild 15: MAC-Matrix, ungeschädigt vs. geschädigte Eigenformen ($E = 50\% E_0$)



Bild 16: MAC-Matrix, ungeschädigt vs. 10 % geschädigte Eigenformen ($E = 10\% E_0$)

Eigenfrequenzen. Die Eigenmoden (Bild 15 und Bild 16) zeigen ein ähnliches Bild. Erst bei massiven Steifigkeitsreduktionen zeigen sich Veränderungen in den niedrigen Eigenformen. Frühzeitige geringe Schädigungen eines Tragwerks detektiert man zuerst in höheren Moden. Dies gilt sowohl für Eigenfrequenzen als auch für die Eigenformen. Somit korreliert der Aufwand zur Detektion von Schädigung invers zur Größe des Schadens und macht die frühzeitige Detektion sehr schwierig.

8.2.4 Geschädigtes Tragwerk (Stütze)

Die Stützenschädigungen zeigen qualitativ ein entsprechendes Bild wie die Schädigung im Feldbereich. Hier sprechen nur andere Eigenmoden auf die Steifigkeitsreduktion an

Fazit

Dieses Kapitel soll den Einfluss der globalen und lokalen Tragwerksteifigkeiten auf Eigenfrequenzen

und Eigenformen aufzeigen. Änderungen in den Steifigkeiten korrelieren zwar mit den modalen Parametern, aber nicht im gleichen Maße wie für eine eindeutige Identifizierung nötig wären. Höhere Moden reagieren zwar stärker als niedrigere Moden, ihre eindeutige Ermittlung ist aber mit größerem messtechnischen Aufwand verbunden. Die Systemidentifikation über dynamische Messungen ist in der Literatur verbreitet. Die genannten Monitoringsysteme mit anschließender Systemidentifikation zitieren diese Methoden. Praktische Ergebnisse sind nicht veröffentlicht. Allerdings sind die dynamischen Kennwerte für eine globale Systemanpassung gut geeignet. Lokale Schädigungen und deren Ausmaß haben jedoch noch Forschungsbedarf.

8.3 Modelle für geschädigte Tragsysteme

In statisch unbestimmten Systemen hängen die Schnittkräfte von der Verteilung der Steifigkeiten ab. Treten durch Rissbildung oder das Fließen des Stahles Änderungen in der Steifigkeitsverteilung auf, so ergeben sich in Abhängigkeit des Beanspruchungszustandes veränderte Schnittgrößen.

An einem Beispiel (vgl. Kapitel 9.6 sowie Bild 17) soll exemplarisch gezeigt werden, wie sich speziell ein Feldmoment (Feld 3) und ein Stützmoment (Achse 20) infolge Steifigkeitsänderungen in der Mitte des Feldes 2 bzw. im Stützbereich Achse 30 auf die Schnittkraftverteilung auswirken. Die Schnittkräfte werden für den äußeren Steg (Modell: Plattenbalken West) ermittelt. Die Steifigkeitsänderungen werden durch Variation des Elastizitätsmoduls modelliert. Diese Variation dient hier lediglich der Modellierung und basiert nicht auf einem realen Hintergrund. Die Ermittlung der Schnittkräfte erfolgt durch eine linear-elastische Berechnung.

In Kapitel 8.3.1 sollen anhand der Zustandfunktionen des Plattenbalkens (West, außen) und anhand der Einflussfelder (infolge 1 kN Einzellast), am Querschnitt des Feldmomentes (Feld 3) und des Stützmomentes (Achse 20) die sich ergebenden Änderungen in den Schnittgrößen infolge Steifigkeitsdegradation verdeutlicht werden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Änderungen sich nicht verallgemeinern lassen und ausschließlich vom mechanischen Modell abhängen.

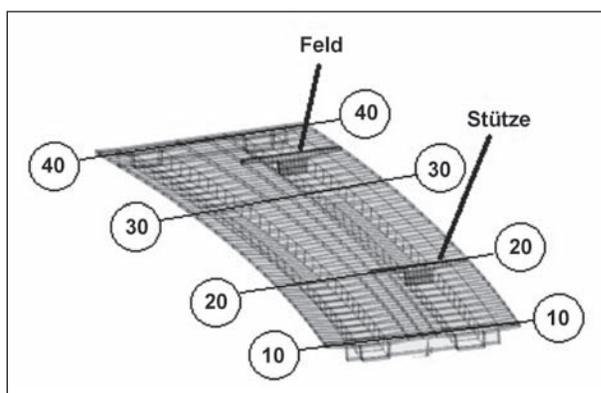


Bild 17: Überbau Brücke mit betrachteten Querschnitten zur Schnittkraftermittlung in Feld 3 und in Achse 20

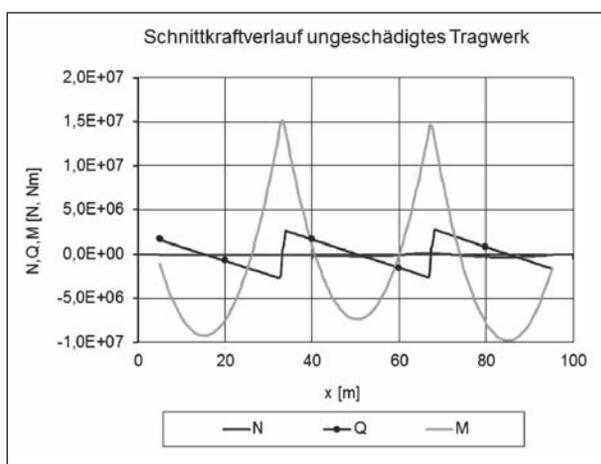


Bild 18: Schnittkraftverlauf, Plattenbalken West; ungeschädigtes Modell

8.3.1 Ungeschädigtes Tragsystem

Im ungeschädigten System wurde allen Tragwerkskomponenten homogen der gleiche Elastizitätsmodul zugewiesen. Dieser Elastizitätskennwert stammt aus einer Kalibrierung des Modells gegenüber dem Modell entsprechend dem realen Tragwerk. Die Größenordnung des einheitlichen Elastizitätsmodul ist aber nicht relevant für die Zustandsfunktion der Schnittkräfte, sondern nur die Belastung.

Zur Verdeutlichung wurden am Beispiel die ständigen Lasten, bestehend aus Eigengewicht des Brückenüberbaus und den Ausbaulasten, angesetzt. Die Belastung entspräche, reduziert auf ein Balkenmodell, einer durchgehenden Linienlast. Bild 18 zeigt die sich ergebenden Zustandsfunktionen für Normalkraft (in x-Richtung), Querkraft (z-Richtung) und Biegemoment (um y-Achse) für den Plattenbalken (West, außen).

Für die Ermittlung der Beanspruchungen aus Verkehr sind Einflussfelder von besonderem Interesse. Die Bilder 19 und 20 zeigen die Einflussfelder des Biegemomentes für den Plattenbalken-West, (äußerer Plattenbalken) jeweils für den Schnitt im Bereich des maximalen Feldmomentes des Feldes 3 sowie für das Stützmoment in der Brückenachse 20. Die Einflussfelder beziehen sich auf eine Einheitsbelastung von 1 kN.

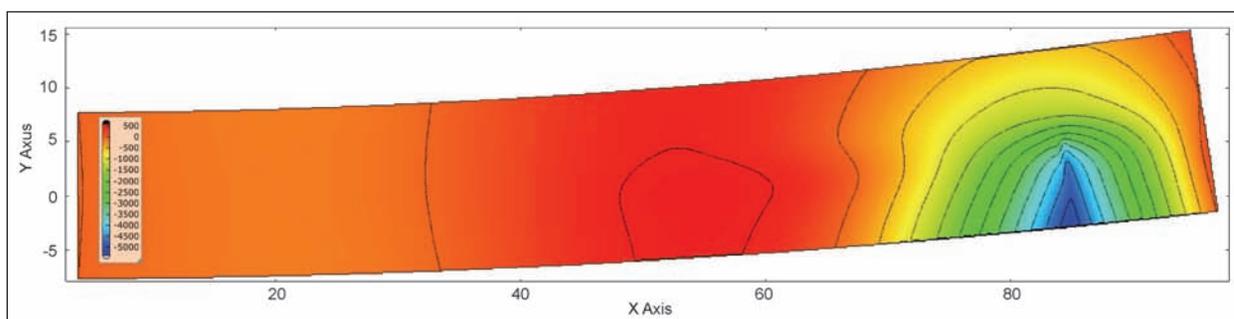


Bild 19: Einflussfeld des Biegemomentes im Querschnitt des maximalen Feldmomentes des Feldes 3 (Referenzbelastung 1 kN)

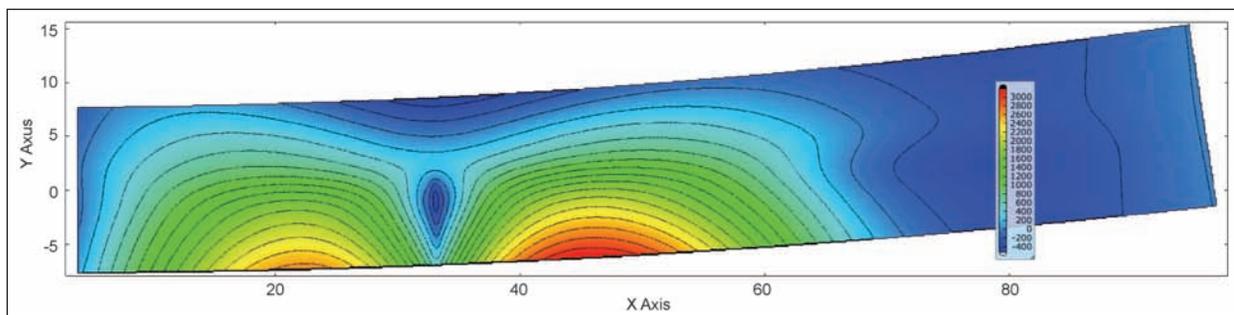


Bild 20: Einflussfeld des Biegemomentes in Lagerachse 20 (Referenzbelastung 1 kN)

8.3.2 Geschädigtes Tragsystem (Feld)

Führt man eine Schädigung in das Tragsystemmodell durch die Reduzierung des Elastizitätsmoduls ein, so sind die Auswirkungen auf die Schnittgrößenverteilungen signifikant abhängig von Ort, Ausdehnung und Größe des geschädigten Bereiches. Eine Reduktion der Steifigkeit auf ein Zehntel des Ausgangselastizitätsmodules im gesamten Feld 2 wird beispielsweise kaum Änderungen im Schnittkraftverlauf zeigen (siehe Bild 21).

Fügt man jedoch eine lokale Schädigung (Degradation) in Feldmitte ein, so ergeben sich ersicht-

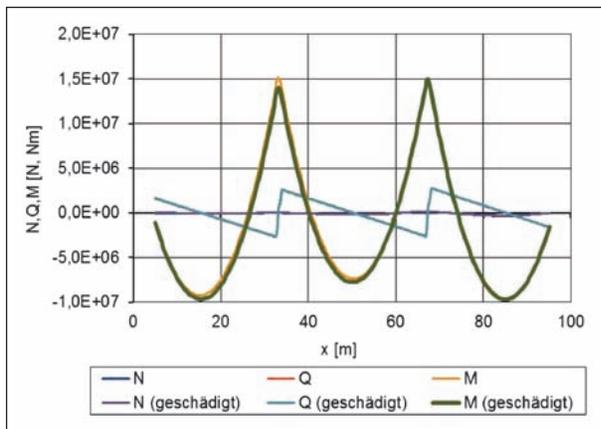


Bild 21: Vergleich (un)geschädigter Schnittkraftverlauf Plattenbalken-West (Schädigung: 10 % des E-Moduls im gesamten Feld 2, über gesamtem Plattenbalkenquerschnitt)

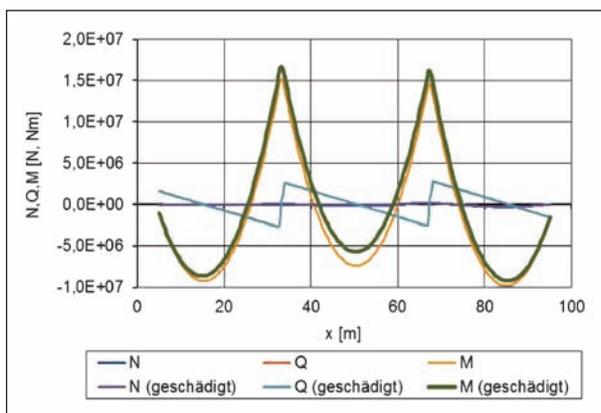
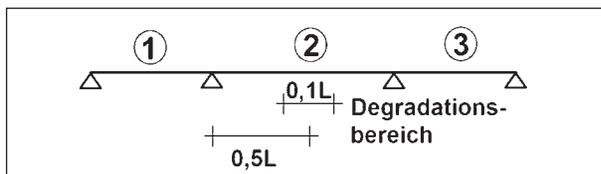


Bild 22: Vergleich un- und geschädigter Schnittkraftverlauf Plattenbalken-West; Schädigung: Reduzierung Steifigkeit auf 10 % des E-Moduls im Feld 2, Mitte, ausschließlich im Balkenquerschnitt

liche Änderungen in den Extrema der Momentenverläufe. In Bild 23 ist erkennbar, dass die aufzunehmenden Feldmomente sich in die Stützmomente umlagern. Die Bilder 22 bis 24 zeigen den Bereich der Schädigung sowie die sich ergebenden Schnittkraftverläufe.

Ein weiterer Einfluss auf die Schnittkraftumlagerung zeigt sich, wenn man den geschädigten Querschnitt selbst betrachtet. Eine Schädigung durch Rissbildung wird sich in der Zugzone des Querschnittes abspielen. Reduziert man nun den Elastizitätsmodul ausschließlich im Balkenquerschnitt (Zugzone) in der Feldmitte, so ergeben sich geringere Änderungen im Momentenverlauf als bei Reduzierung des Elastizitätsmoduls im gesamten Querschnitt.

Dies lässt sich leicht durch eine Umlagerung der Spannungen von einem fast linearen Spannungs-

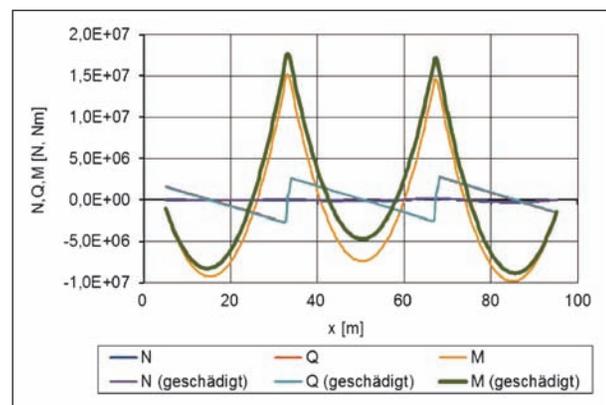


Bild 23: Vergleich un- und geschädigter Schnittkraftverlauf Plattenbalken-West; Schädigung: Reduzierung Steifigkeit auf 10 % des E-Moduls im Feld 2, Mitte, über gesamten Querschnitt

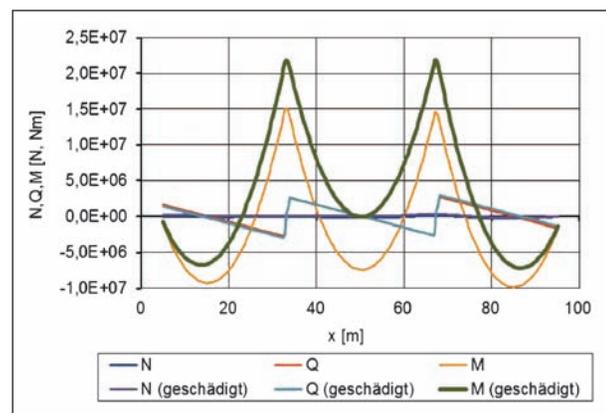


Bild 24: Vergleich un- und geschädigter Schnittkraftverlauf Plattenbalken-West; Schädigung: Reduzierung Steifigkeit auf 0,01 % des E-Moduls im Feld 2, Mitte, über gesamten Querschnitt

verlauf zu einem Spannungsverlauf, welcher in der Risszone einen konstanten geringeren Spannungsverlauf aufweist, erklären. Ausgleichend ergibt sich aber eine Erhöhung der Spannungen im ungeschädigten Bereich des Querschnittes. Bei der Integration der Spannungen zu den Schnittgrößen gehen diese Informationen jedoch verloren, sodass sich quantitativ weniger Änderungen gegenüber den ungeschädigten Zustandsfunktionen ergeben (vgl. Bild 22 und Bild 23).

Betrachtet man die zugehörigen Tragwerksverformungen, so ergeben sich im geschädigten Bereich mit Verringerung der Steifigkeit immer größere Durchbiegungen. Führt man immer extremere Reduzierungen des Elastizitätsmodules in das Modell ein (siehe Bild 24), so tendiert das maximale Feldmoment in Feld 2 gegen null und die Querschnitte im Stützbereich müssen immer größere Stützmomente ertragen. Das heißt, es können an dieser Stelle des Tragwerks (Feldmitte) kaum noch Biegemomente übertragen werden, sodass sich ein virtuelles Biegegelenk ausbildet. Bild 25 zeigt für die in diesem Kapitel eingefügte Steifigkeitsdegradation in der Mitte des 2. Feldes, die Entwicklung der Einflussfelder vom ungeschädigten zum extrem geschädigten Querschnitt.

8.3.3 Geschädigtes Tragsystem (Stütze)

Die Schädigung eines Stützbereiches durch Reduktion der Steifigkeiten wurde am Beispieltragwerk an Stützachse 30 exemplarisch durchgeführt. Die Stützbereichsschädigung zeigt höhere Signifikanz in den Änderungen der Momentenverläufe als bei einer Schädigung in Feldmitte. Bilder 26 bis 29 zeigen im Vergleich zum ungeschädigten Tragwerk die Änderungen in den Schnittkraftverläufen (aus ständigen Lasten, Plattenbalken-West) entsprechend den Schädigungen, welche schon im vorangegangenen Kapitel diskutiert wurden. Es zeigt sich, dass eine Umlagerung des Stützmomentes in die anliegenden Feldmomente erfolgt. Bei extremem Steifigkeitsverlust bildet sich fast ein Biegegelenk über der Stütze Achse 30 aus, sodass sich in Achse 20 das Stützmoment vervielfacht.

Bild 29 zeigt für die in diesem Kapitel eingefügte Steifigkeitsdegradation in der Stützachse 30 die Entwicklung der Einflussfelder von ungeschädigt zum extrem geschädigten Querschnitt.

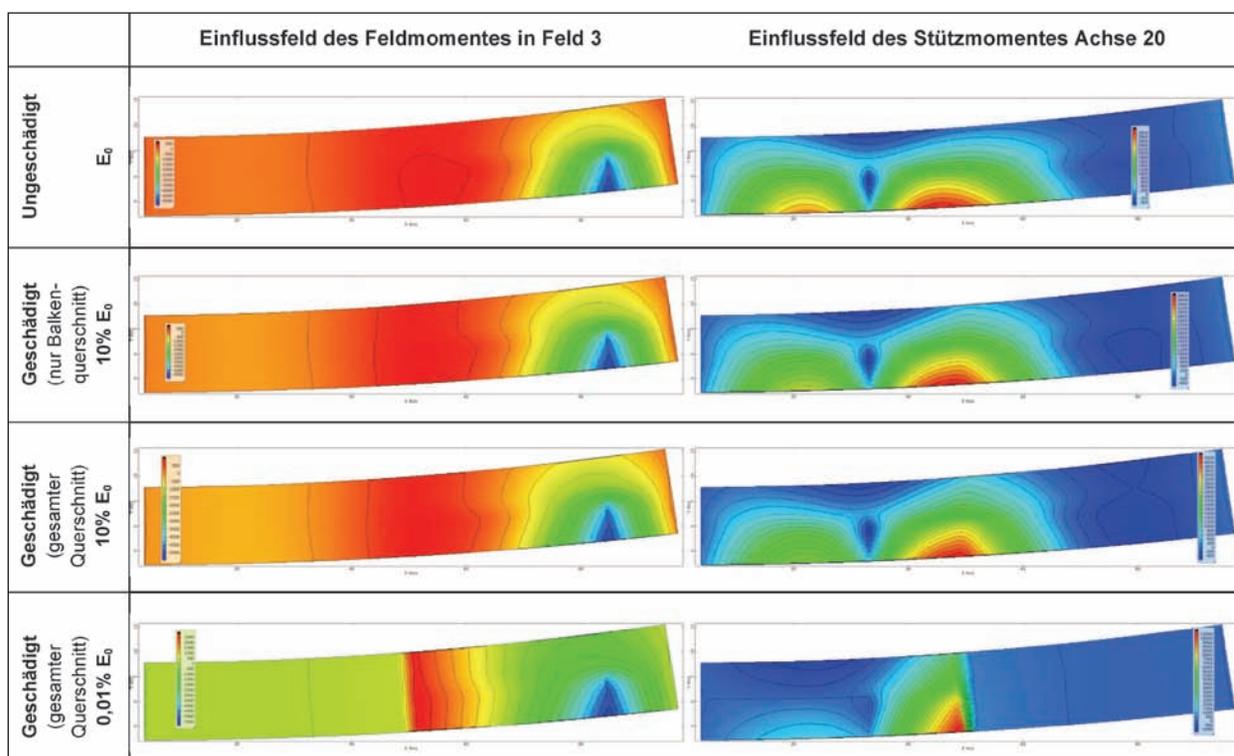


Bild 25: Gegenüberstellung Einflussfelder für Feldmoment Feld 3 und Stützmoment Achse 20 am ungeschädigten und lokal in Feld 3 (Mitte) geschädigten Tragwerk

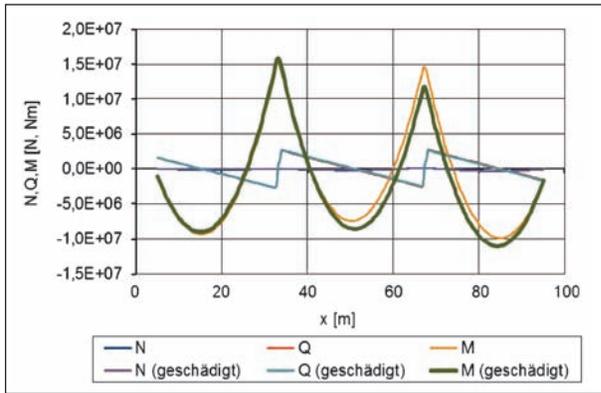


Bild 26: Vergleich un- und geschädigter Schnittkraftverlauf Plattenbalken-West; Schädigung: Reduzierung Steifigkeit auf 10 % des E-Moduls im Bereich Achse 30, ausschließlich im Plattenquerschnitt

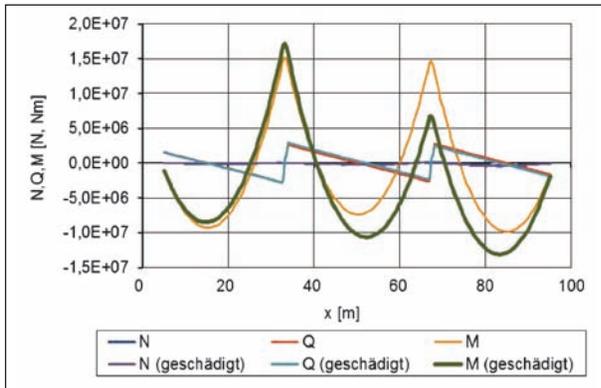


Bild 27: Vergleich un- und geschädigter Schnittkraftverlauf Plattenbalken-West; Schädigung: Reduzierung Steifigkeit auf 10 % des E-Moduls im Bereich Achse 30, über gesamten Querschnitt

Fazit

In diesem Kapitel konnte beispielhaft gezeigt werden, dass sich bei statisch unbestimmten Tragwerken Steifigkeitsdegradationen in lokalen Tragwerksbereichen in den Einflussfeldern für signifikante Schnittgrößen auswirken. Die Größenordnung der Auswirkung ist abhängig vom Tragwerk, dem Ort der Steifigkeitsminderung und der Größenordnung

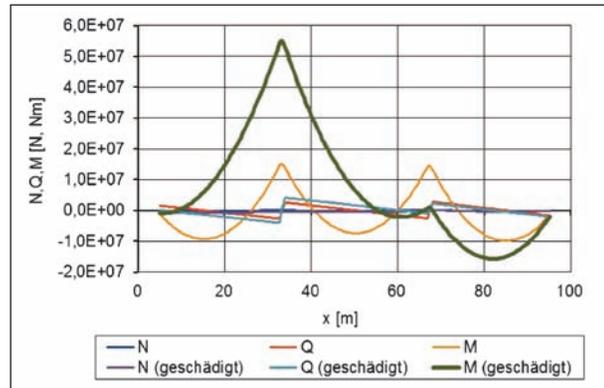
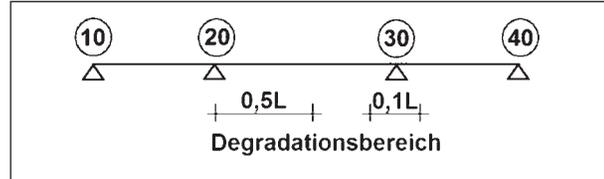


Bild 28: Vergleich un- und geschädigter Schnittkraftverlauf Plattenbalken-West; Schädigung: Reduzierung Steifigkeit auf 0,01 % des E-Moduls im Bereich Achse 30, über gesamten Querschnitt

	Einflussfeld des Feldmomentes in Feld 3	Einflussfeld des Stützmomentes Achse 20
Ungeschädigt E_0		
Geschädigt (nur Balkenquerschnitt) 10% E_0		
Geschädigt (gesamter Querschnitt) 10% E_0		
Geschädigt (gesamter Querschnitt) 0,01% E_0		

Bild 29: Gegenüberstellung Einflussfelder für Feldmoment Feld 3 und Stützmoment Achse 20 am ungeschädigten und lokal in Stützachse 30 geschädigten Tragwerk

der Degradation. Mit der quantitativen Änderung der Einflussfelder infolge Schädigung ergibt sich ein direkter Einfluss auf die zu simulierende Verkehrsbelastung und ihre stochastische Verteilung.

8.4 Interaktion geschädigte Systeme – Beanspruchungen infolge Verkehrs

8.4.1 Grundlagen der stochastischen Beschreibung von Beanspruchungen aus Verkehr

Die in Kapitel 7.1.6 zusammengefasste Vorgehensweise zur Ermittlung von stochastischen Beschreibungen von Beanspruchungen aus Verkehr wird hier am Beispiel der Brücke in Fulda angewendet.

Betrachtet werden dabei sowohl das ungeschädigte Tragsystem als auch zwei Varianten von aufgetragenen Schädigungen in Form einer rechnerischen Reduzierung des E-Moduls auf 10 % des Ausgangswertes im Zugbereich des Querschnittes im Mittelfeld und an Achse 30 (vgl. Kapitel 8.3). In den folgenden Ausführungen werden hierzu Abkürzungen zur Abgrenzung zwischen den betrachteten Systemen verwendet. Für das ungeschädigte System wird die Abkürzung „UnGeS“ verwendet. Das System mit angenommener Schädigung im Mittelfeld wird mit „GeS FM“ bezeichnet und das System mit angenommener Schädigung im Stützbereich der Achse 30 mit „GeS ST“ abgekürzt.

Für die Durchführung der Analysen ist zunächst die Definition von Verkehrsdaten erforderlich. Hierauf wird im Kapitel 8.4.2 eingegangen.

8.4.2 Aktueller und angenommener zukünftiger Verkehr

Für die Analysen werden die in [41] ermittelten Daten des aktuellen Verkehrs (Lkw-Verkehr) auf der Brücke Fulda, von denen im Kapitel 9.6.2 eine Auswahl dargestellt wird, als Ausgangsbasis verwendet. Die Beschreibungen des aktuellen Ver-

kehrs werden nachfolgend mit „AKT“ abgekürzt. Bei den Erfassungen konnten, über den gesamten Erfassungszeitraum gemittelt, folgende Schwerverkehrsstärken (DTV-SV) festgestellt werden:

Fahrtrichtung Würzburg	1.350,
Fahrtrichtung Fulda	1.150.

Ausgehend von diesen Zahlenwerten werden drei verschiedene Modelle zukünftigen Verkehrs entwickelt. Das erste Modell beschreibt dabei einen Prognoseverkehr in 25 Jahren, der im Vergleich zum aktuellen Verkehr durch eine Vergrößerung der Verkehrsstärke gekennzeichnet ist. Angenommen wird dabei ein jährlicher Zuwachs von 1,145 % (vgl. Kapitel 9.5.2, in [40] verwendeter unterer Wert der jährlichen Zuwachsrate) Dieses Modell wird nachfolgend mit „P 25a V“ abgekürzt und ist durch folgende Schwerverkehrsstärken beschrieben:

Fahrtrichtung Würzburg	1.795,
Fahrtrichtung Fulda	1.530.

Des Weiteren wird analog zu „P 25a V“ der Prognoseverkehr in 50 Jahren betrachtet. Aus dem gleichen Jährlichen Zuwachs ergeben sich für dieses mit „P 50a V“ abgekürzte Modell nachfolgende Verkehrsstärken:

Fahrtrichtung Würzburg	2.385,
Fahrtrichtung Fulda	2.030.

In einem weiteren Modell wird angenommen, dass sich die Schwerverkehrszusammensetzung in Zukunft ändert. In diesem mit „P 50a VZS“ abgekürzten Modell werden dazu die Häufigkeiten der Fahrzeugtypen 8 (zweiachsiger Lkw) und 98 (Sattelschlepper mit zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsiger Auflieger) im Vergleich zu den aktuellen Daten getauscht. Die Schwerverkehrsstärke ist analog zum Modell „P 50a V“.

In Tabelle 3 ist die in [41] ermittelte Schwerverkehrszusammensetzung, die für die Modelle AKT;

Fahrstreifen	Modell	Fahrzeugtypenhäufigkeit					
		Typ 8	Typ 33	Typ 41	Typ 97	Typ 98	Pkw
Rechter Richtungsfahrstreifen	AKT/P 25a V/P 50a V	57,2 %	5,5 %	8,2 %	7,0 %	22,1 %	---
	P 50a VSZ	22,1 %	5,5 %	8,2 %	7,0 %	57,2 %	---
Überholfahrstreifen FR Würzburg	AKT/P 25a V/P 50a V	11,44 %	1,1 %	1,64 %	1,4 %	4,42 %	80,0 %
	P 50a VSZ	4,42 %	1,1 %	1,64 %	1,4 %	11,44 %	80,0 %

Tab. 3: Fahrzeugtypenhäufigkeiten

P 25a V und P 50a V angesetzt wird ebenso wie die angenommene veränderte Zusammensetzung für das Modell P 50a VSZ aufgeführt. Hierbei wurden die ermittelten Zahlenwerte der beiden Fahrtrichtungen gemittelt, da hier keine wesentlichen Unterschiede auftraten. Die Fahrzeugfassung in [41] beschränkte sich auf den Schwerverkehr und jeweils eine Richtungsfahrbahn. Daher sind in der Zusammensetzung für den rechten Richtungsfahrestreifen auch keine Angaben zu Pkw enthalten. In den Untersuchungen wird, analog zu vorhergehenden vergleichbaren Analysen (vgl. [39, 38]), für den rechten Richtungsfahrestreifen ausschließlich Lkw-Verkehr betrachtet. In Fahrtrichtung Würzburg werden im Verlauf des Brückenbauwerkes zwei Fahrspuren zusammengeführt. Die hier durchgeführten Analysen werden in zwei Grundvarianten ausgeführt. In der ersten Variante wird von Verkehr auf zwei Fahrstreifen in entgegengesetzter Richtung ausgegangen, in dem jeweils 100 % des durchschnittlichen täglichen Schwerverkehr läuft (Abkürzung nachfolgend „100-100“). In der zweiten Variante wird angenommen, dass über die ge-

	Gesamtgewichtsverteilung [kN]					
	Typ 8	Typ 33	Typ 41	Typ 97	Typ 98	Pkw
FR Fulda						
μ_1	21,0	149,2	265,7	146,6	213,1	10
σ_1	7,7	120,8	40,6	11,4	36,5	0
ξ_1	0,337	0,078	0,721	0,064	0,167	1
μ_2	49,5	186,3	301,9	174,8	309,5	---
σ_2	13,9	35,1	49,0	31,5	66,0	---
ξ_2	0,265	0,710	0,02	0,544	0,416	---
μ_3	97,6	246,2	401,6	242,4	381,7	---
σ_3	25,2	34,4	41,8	53,2	23,9	---
ξ_3	0,398	0,212	0,259	0,392	0,417	---
FR Würzburg						
μ_1	48,7	173,8	220,4	158,3	157,9	10
σ_1	16,5	29,9	58,0	16,3	15,0	0
ξ_1	0,593	0,104	0,074	0,314	0,108	1
μ_2	94,9	204,9	259,0	220,2	232,7	---
σ_2	10,3	41,4	40,4	57,2	56,1	---
ξ_2	0,118	0,820	0,711	0,634	0,555	---
μ_3	129,8	270,8	363,0	226,0	384,3	---
σ_3	32,1	51,1	56,0	85,2	30,3	---
ξ_3	0,289	0,076	0,215	0,052	0,337	---

Tab. 4: Parameter der Fahrzeuggesamtgewichtsverteilungen

samte Brückenlänge in Fahrtrichtung Würzburg zwei Fahrstreifen verlaufen und sich in diesen der Schwerverkehr in Fahrtrichtung Würzburg im Verhältnis 80 zu 20 aufteilt. Diese Variante wird entsprechend mit „80-20-100“ abgekürzt. Für den zweiten Fahrstreifen liegen keine Verkehrsdaten vor. Daher wird vereinfachend angenommen, dass der Gesamtverkehr in diesem Fahrstreifen zu 80 % aus Pkw und zu 20 % aus Lkw besteht. Die Zusammensetzung der Lkw wird dabei aus den Daten des ersten Fahrstreifens abgeleitet. In Tabelle 3 sind die Zahlenwerte für den Überholfahrstreifen in FR Würzburg ebenfalls aufgeführt.

Zur erforderlichen Beschreibung des Verkehrsaufkommens für die durchzuführenden Untersuchungen gehören neben der Verkehrsstärke und der Verkehrszusammensetzungen auch Angaben zur Gesamtgewichtsverteilung der betrachteten Fahrzeugtypen sowie Achsabstände und Achslastverteilungen. In den in [41] ermittelten Daten zeigten sich hier leichte Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Fahrtrichtungen. Diese Unterschiede werden analog in den hier durchgeführten Rechnungen berücksichtigt. In Tabelle 4 sind hierzu die Parameter der verwendeten Gesamtgewichtsverteilungen aufgeführt. Grundlage sind hierbei die in [41] ermittelten Daten des Verkehrs. Für die ausgewählten Fahrzeugtypen wurden Histogramme der Gesamtgewichte erstellt und an diese drei Normalverteilungen angepasst (über Methode der kleins-

Achse	Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen [%]					
	Typ 8	Typ 33	Typ 41	Typ 97	Typ 98	Pkw
FR Fulda						
1	48,5	22,5	20,0	31,6	18,3	50
2	51,5	39,3	27,2	31,1	28,2	50
3		19,8	16,0	19,2	18,8	
4		15,4	19,9	18,1	17,5	
5			16,9		17,2	
FR Würzburg						
1	46,2	24,8	22,0	31,1	22,1	50
2	53,8	42,9	27,7	31,3	29,9	50
3		16,8	15,7	19,4	16,8	
4		15,5	18,5	18,2	15,8	
5			16,1		15,4	

Tab. 5: Verteilungen der Gesamtgewichte auf die einzelnen Achsen

ten Quadrate). Die Parameter μ_1 bis μ_3 stellen die Erwartungswerte und die Parameter σ_1 bis σ_3 die Standardabweichungen der drei Einzelverteilungen dar. Die Parameter ξ_1 bis ξ_3 beschreiben das Verhältnis der drei Verteilungen zueinander in der Überlagerung.

Tabelle 5 enthält die Daten der Achslastverteilungen (Aufteilung des Gesamtgewichtes auf die einzelnen Achsen) und Tabelle 6 die Zahlenwerte der Achsabstände der betrachteten Fahrzeugtypen.

Es werden drei Varianten von fließendem Verkehr und Verkehr mit angenommenen Stauabschnitten betrachtet. Zur Abbildung des Stauverkehrs wird ei-

Achsabstand	Achsabstände [m] auf volle 10 cm gerundet					
	Typ 8	Typ 33	Typ 41	Typ 97	Typ 98	Pkw
FR Fulda						
1-2	4,3	4,8	4,8	3,8	3,8	2,5
2-3		6,4	1,4	7,0	5,6	
3-4		4,8	5,4	1,4	1,4	
4-5			5,0		1,4	
FR Würzburg						
1-2	3,9	4,6	4,6	3,7	3,7	2,5
2-3		6,1	1,4	6,6	5,5	
3-4		4,8	5,1	1,4	1,3	
4-5			4,8		1,3	

Tab. 6: Achsabstände der Fahrzeugtypen

nerseits ein „moderater Stau“ berücksichtigt, der durch zwischen 5 m und 25 m gleichverteilte Fahrzeugabstände (Achse zu Achse) gekennzeichnet ist, und andererseits ein „extremer Stau“ mit 5 m Fahrzeugabständen.

8.4.3 Auswirkungen von Schädigungen auf den Kennwertverlauf eines Einzelfahrzeuges

Zur Verdeutlichung möglicher Auswirkungen von Schädigungen des Tragwerkes auf die stochastische Beschreibung von Beanspruchungen wird nachfolgend zunächst ein Einzelfahrzeug betrachtet. Hierbei handelt es sich um einen Sattelschlepper (Typ 98) mit einem Gesamtgewicht von 40 t. In Bild 30 ist der Zeitverlauf des betrachteten Stützmomentes infolge der Überfahrt dieses Fahrzeuges in Fahrrichtung Würzburg auf den rechten Richtungsfahrbahnen dargestellt.

Hier zeigt sich, dass eine Schädigung im Stützbe- reich der Achse 30 (zweite Stützachse in FR Würzburg) nur einen geringen Einfluss auf diesen Zeitverlauf aufweist. Der Minimalwert des Stützmomentes ist lediglich um ca. 4 % vergrößert. Deutlichere Auswirkungen zeigen sich bei einer Schädigung im Feldbereich (Mittelfeld). Der Minimalwert des Stützmomentes vergrößert sich um ca. 22 %. Die Zeitverläufe des Feldmomentes (vgl. Bild 31) zeigen im Vergleich dazu nur geringe Auswirkungen der angenommenen Schädigungen auf diesen Kennwert.

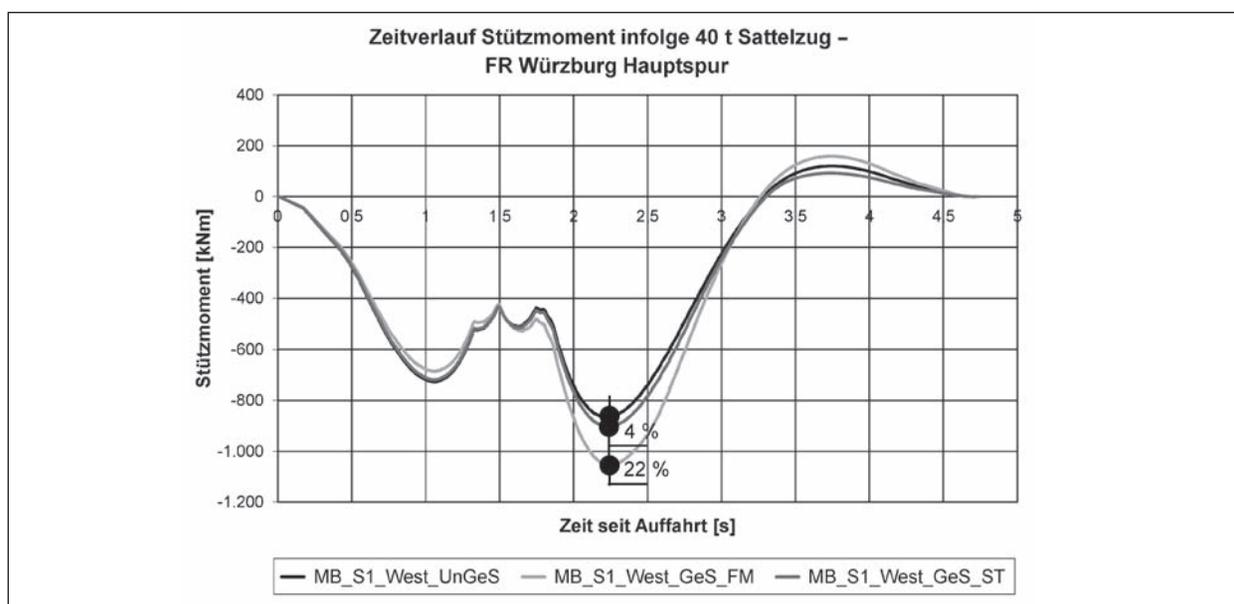


Bild 30: Zeitverlauf des Stützmomentes (Achse 10) mit und ohne Schädigungen

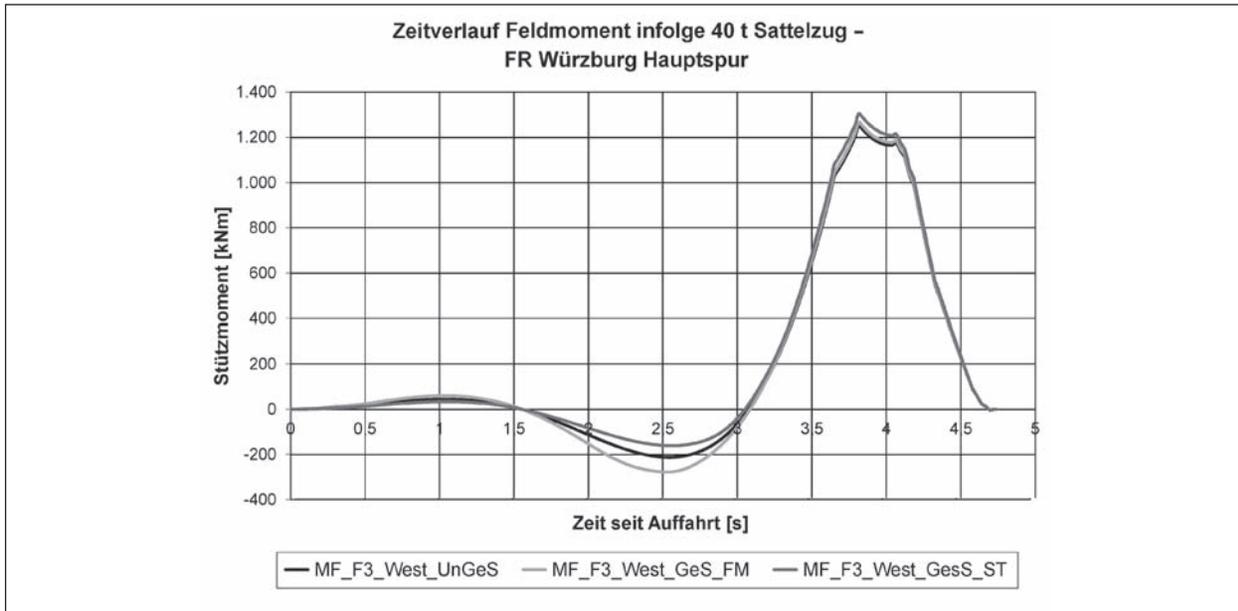


Bild 31: Zeitverlauf des Feldmomentes (Feld 3) mit und ohne Schädigungen

8.4.4 Ermittlung von charakteristischen Werten der Verkehrsbeanspruchungen

Es werden zunächst charakteristische Werte der Verkehrsbeanspruchungen infolge der verschiedenen betrachteten Verkehrsvarianten (Verkehrszusammensetzungen, Verkehrsstärken, fließender Verkehr/Stau) ermittelt. Diese charakteristischen Werte sind dabei definiert über eine mittlere Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren (vgl. Ausführungen hierzu in Kapitel 7.1.6). Vorteil dieser Form der Ergebnisdarstellung ist die einfache Beurteilung von Auswirkungen unterschiedlicher Verkehrsvarianten und im vorliegenden Fall unterschiedlicher Schädigungen auf die betrachteten Beanspruchungen (Kennwerte). In Bild 32 sind zunächst die Ergebnisse des Stützmomentes für fließenden Verkehr in der Spurbelegung 100-100 dargestellt. Zwischen den verschiedenen Schädigungen (UnGeS, GeS FM und GeS ST) zeigen sich nur geringfügige Unterschiede. Auch aus den verschiedenen Varianten aktuellen und zukünftigen Verkehrs folgen hier keine wesentlichen Änderungen. Die analogen Ergebnisse für den „moderaten Stau“ in Bild 33 zeigen keine wesentlichen Veränderungen. Etwas deutlicher erkennbar ist aber hier die Auswirkung von Schädigungen. Für „GeS ST“ ergeben sich hier etwas höhere charakteristische Werte als für das ungeschädigte System (UnGeS) und das System mit Schädigung im Mittelfeld (GeS FM). Eine generelle Vergrößerung der charakteristischen Werte ergibt sich bei der Abbildung des „extremen“ Stauverkehrs (vgl. Bild 34) und

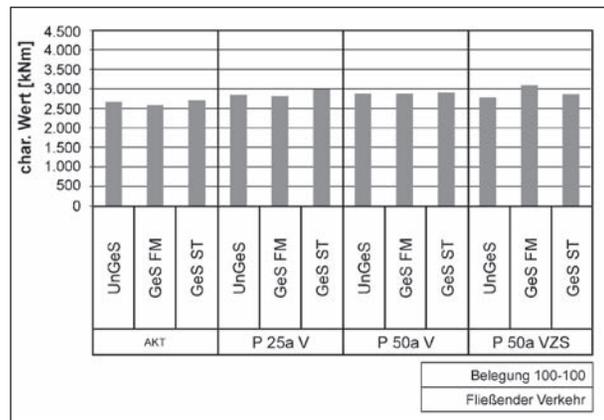


Bild 32: Charakteristische Werte des Stützmomentes (fließender Verkehr – Belegung 100-100)

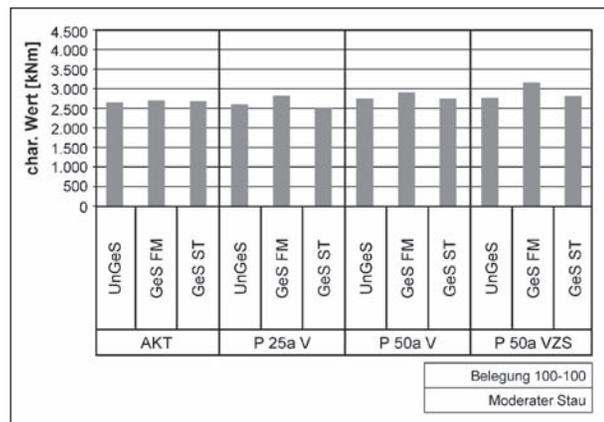


Bild 33: Charakteristische Werte des Stützmomentes („moderater“ Stauverkehr – Belegung 100-100)

auch hier werden die Auswirkungen von Schädigungen deutlich.

Insgesamt sind die Veränderungen der Werte hier aber vergleichsweise klein. Dies deckt sich weitestgehend mit den Erfahrungen der vorhergehenden Untersuchungen hierzu. Aus den Ergebnissen der Betrachtung der Belegung 80-20-100 werden in Bild 35 lediglich die Resultate für den „extremen“ Stauverkehr dargestellt. Hier zeigen sich deutlicher

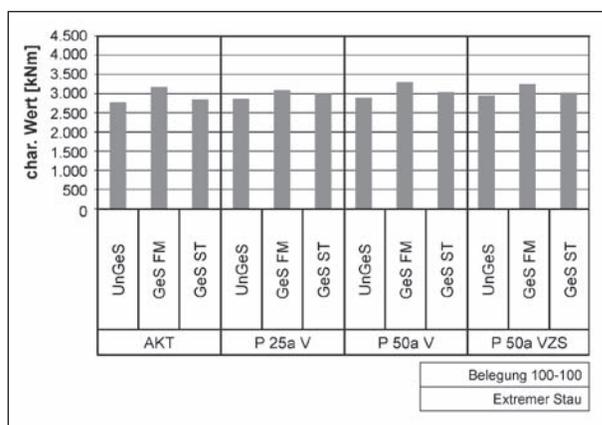


Bild 34: Charakteristische Werte des Stützmomentes („extremer“ Stauverkehr – Belegung 100-100)

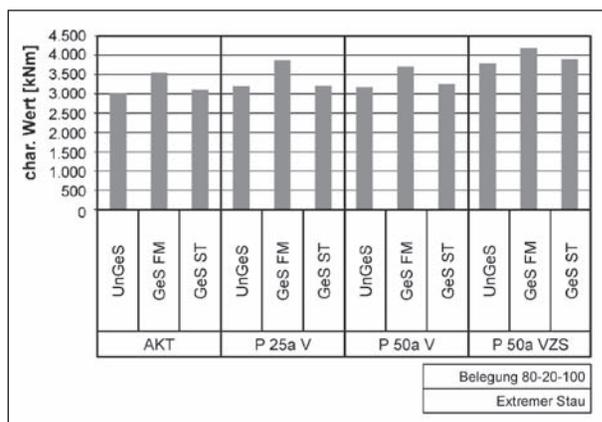


Bild 35: Charakteristische Werte des Stützmomentes („extremer“ Stauverkehr – Belegung 80-20-100)

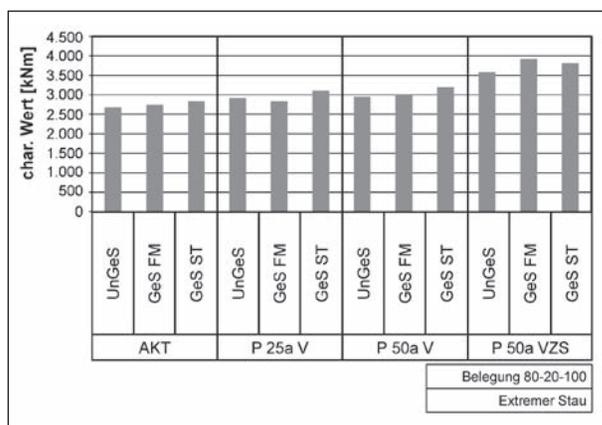


Bild 36: Charakteristische Werte des Feldmomentes („extremer“ Stauverkehr – Belegung 80-20-100)

Auswirkungen der Schädigung (GeS ST liefert höhere charakteristische Werte) und auch ein deutlicher Anstieg im Modell „P 50a VSZ“ der zukünftigen Verkehrs.

Für das Feldmoment wird sich in Bild 36 auf die Darstellung der Ergebnisse für „extremen“ Stauverkehr bei Belegung 80-20-100 beschränkt. Deutlich wird hier die Abhängigkeit der Ergebnisse von der betrachteten Verkehrsvariante. Diese ist hier stärker ausgeprägt als beim Stützmoment. Die Auswirkungen von Schädigungen sind hingegen für das Feldmoment deutlich geringer als für das Stützmoment.

8.4.5 Ableitung von stochastischen Beschreibungen

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten Ergebnisse zeigen zunächst anhand der charakteristischen Werte Auswirkungen von Verkehrscharakteristiken und möglichen Schädigungen am Tragwerk auf die resultierenden Beanspruchungen auf. Das Spektrum der dabei betrachteten Verkehrscharakteristiken ist in Bild 37 zusammengefasst. Für die Aufstellung einer stochastischen Beschreibung von Beanspruchungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die objektspezifische Verkehrscharakteristik aktuell und in Zukunft vollständig bekannt ist. Aus diesem Grund ist eine Kombination von Ergebnissen aus der Betrachtung mehrerer Verkehrscharakteristiken erforderlich.

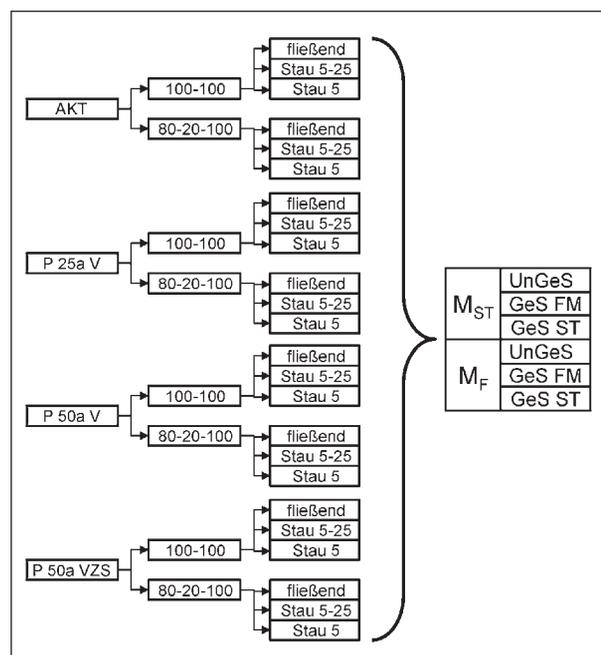


Bild 37: Übersicht der betrachteten Varianten von Verkehr

Zur Verdeutlichung der über die verschiedenen betrachteten Verkehrscharakteristiken erhaltenen Bandbreite von charakteristischen Werten sind diese in Bild 38 in einem Diagramm der kumulierten relativen Häufigkeit aufgetragen. Hierzu werden die vorliegenden Werte aufsteigend sortiert und jedem Wert i der n Werte die kumulierte relative Häufigkeit \hat{P}_i nach Gleichung (8.3) (vgl. Tabelle C2/6 in [61], „Mittelposition“ als „Plotting-Position“) zugewiesen.

$$\hat{P}_i = \frac{i - 0,5}{n} \quad (8.3)$$

Bild 38 zeigt für die verschiedenen betrachteten Varianten von ungeschädigtem/geschädigtem System deutliche Unterschiede der Verläufe der kumulierten relativen Häufigkeit der charakteristischen Werte. Im Vergleich zu „UnGeS“ ergibt sich für „GeS FM“ (Schädigung im Feldbereich) eine tendenzielle Verschiebung der Werte nach oben. Dies wurde auch in den vorhergehenden Ergebnisdarstellungen bereits deutlich. Jeder Punkt im Diagramm stellt das durch statistische Auswertungen ermittelte Ergebnis einer Simulationsrechnung dar. Neben den charakteristischen Werten können mit

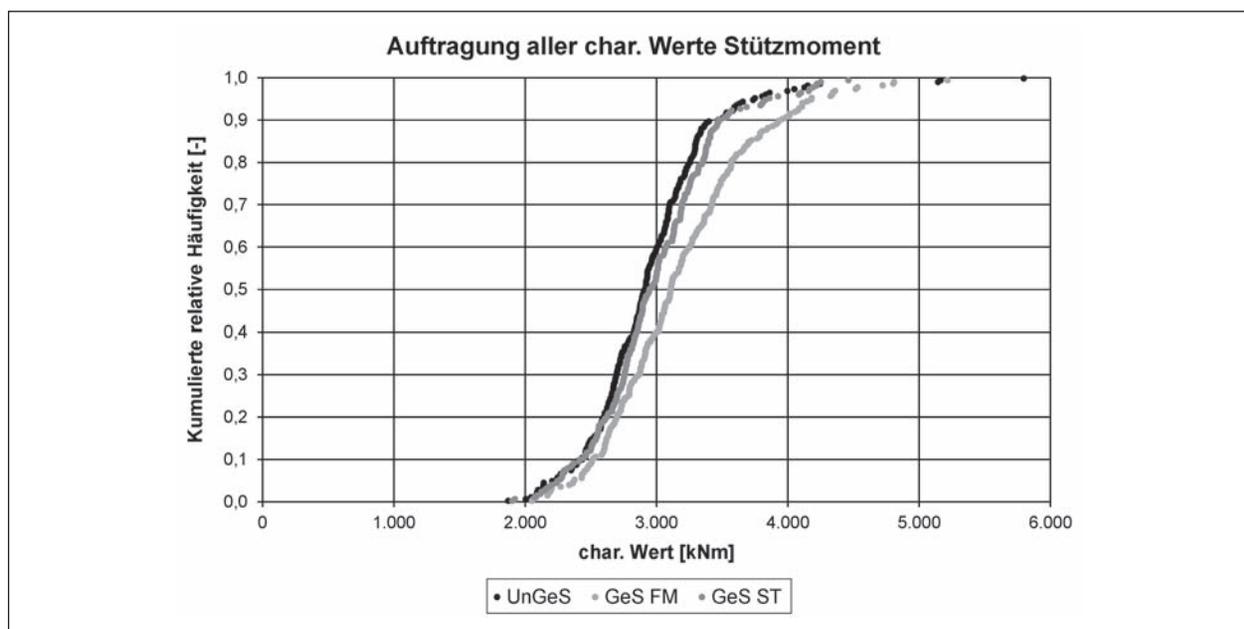


Bild 38: Darstellung aller ermittelten charakteristischen Werte des Stützmomentes im Diagramm der kumulierten relativen Häufigkeit

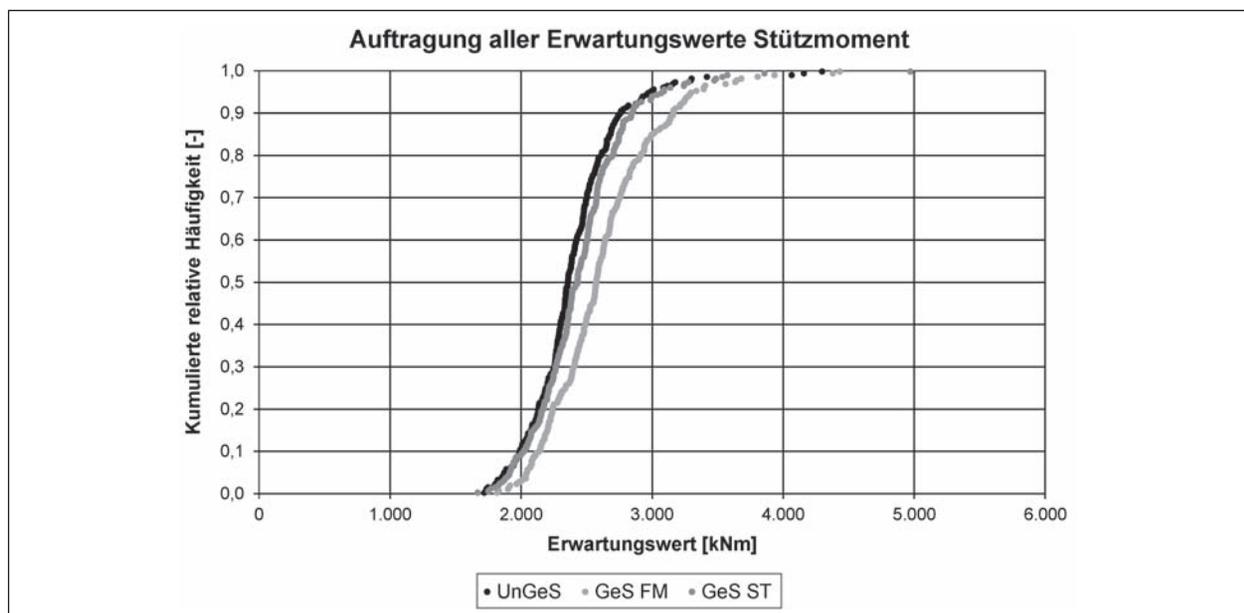


Bild 39: Erwartungswerte der Jahresmaximalwertverteilungen – kumulierte relative Häufigkeit

dieser Auswertung auch Verteilungsfunktionen von Maximalwerten für einen definierten Bezugszeitraum ermittelt werden. In den hier durchgeführten Analysen wird als Bezugszeitraum 1 Jahr verwendet. Aus den Simulationsrechnungen werden somit über die statistische Auswertung Verteilungsfunktionen des Jahresmaximalwertes ermittelt. Diese Verteilungsfunktionen haben jeweils Erwartungswerte, Standardabweichung und Variationskoeffizienten. In Bild 39 sind die so ermittelten Erwartungswerte der Jahresmaximalwertverteilungen in analoger Weise zu Bild 38 aufgetragen, Bild 40

stellt die berechneten Standardabweichungen dar. Erkennbar ist, dass der Verlauf der Erwartungswerte prinzipiell analog zu dem der charakteristischen Werte ist, jedoch in einem kleineren Wertebereich verläuft. Für die Standardabweichungen lässt sich ein solcher Zusammenhang nicht erkennen.

Es werden die Verläufe der ermittelten Erwartungswerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten durch eine Extremwertverteilung Typ 1 angepasst. Hierzu werden die dargestellten Verläufe der kumulierten relativen Häufigkeiten durch

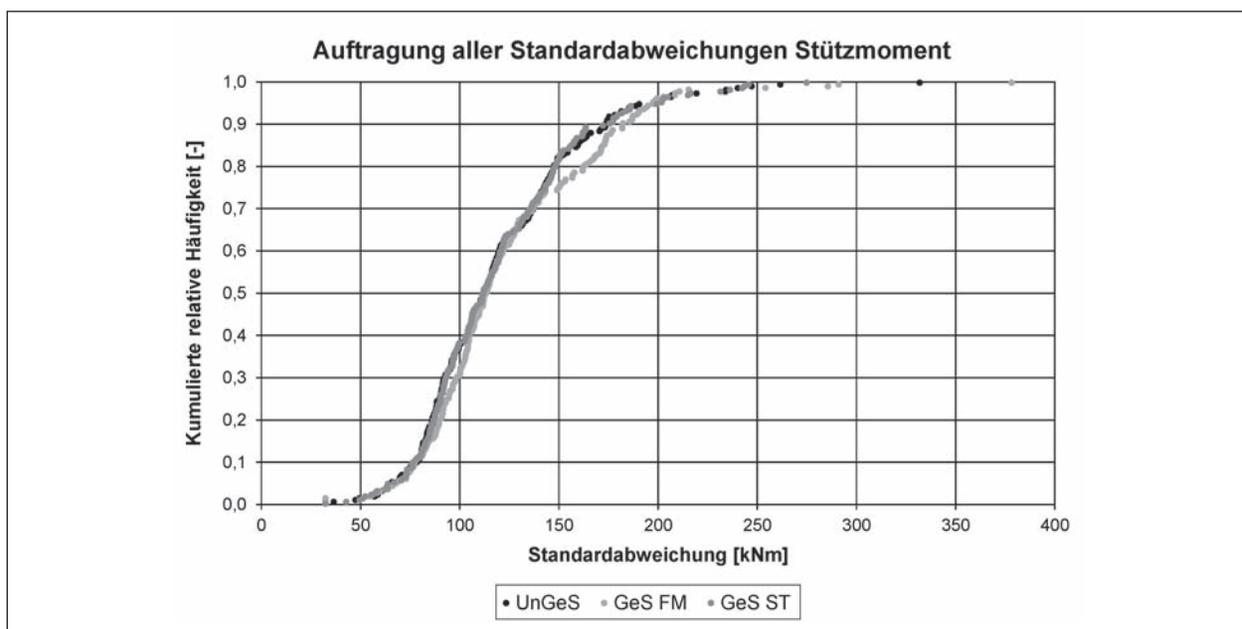


Bild 40: Standardabweichungen der Jahresmaximalwertverteilungen – kumulierte relative Häufigkeit

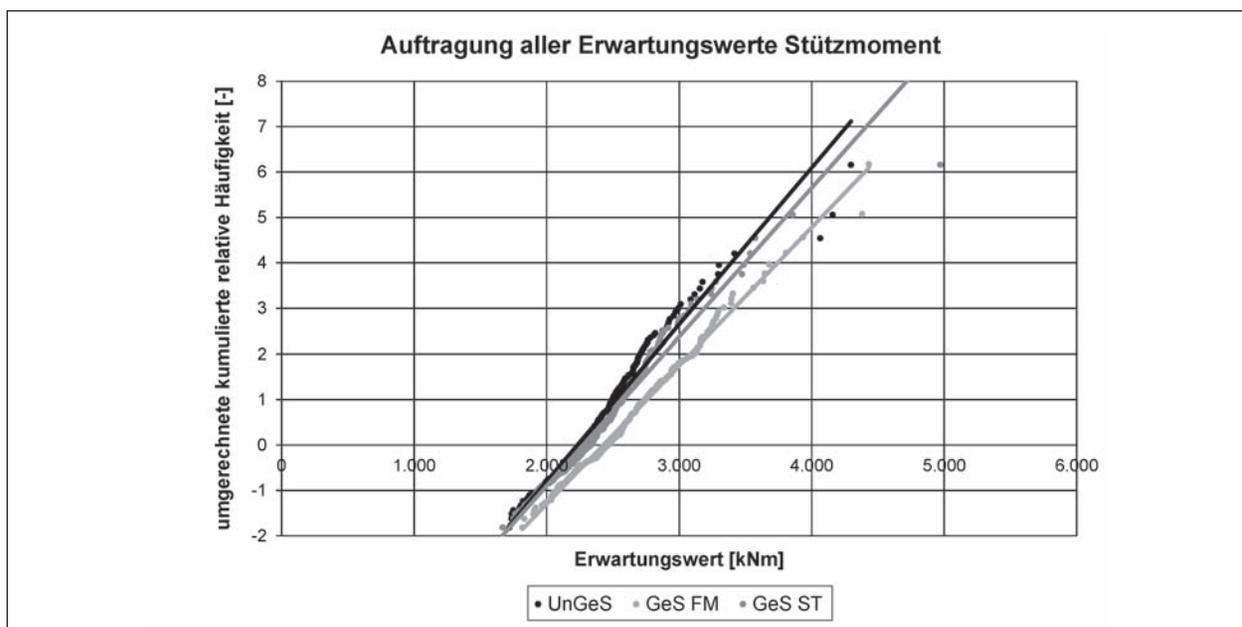


Bild 41: Umgerechnete kumulierte relative Häufigkeit der Erwartungswerte der Jahresmaximalwertverteilungen mit angelegten Trendlinien

	UnGeS			GeS FM			GeS ST		
	EW	StAbw	VarK	EW	StAbw	VarK	EW	StAbw	VarK
EW_{EV1}	2.399,15	119,51	4,95 %	2.616,79	123,48	4,65 %	2.451,10	119,04	4,84 %
$StAbw_{EV1}$	372,33	42,13	1,43 %	421,99	45,90	1,26 %	391,62	40,64	1,40 %
$VarK_{EV1}$	15,519 %	35,257 %	28,934 %	16,126 %	37,169 %	27,081 %	15,977 %	34,135 %	28,858 %

Tab. 7: Ermittelte Funktionsparameter

Umrechnung in einem neuen Diagramm aufgetragen, eine lineare Trendlinie angepasst und aus den Geradenparametern dieser Trendlinie die Parameter der Extremwertverteilung Typ 1 bestimmt. Dieses Vorgehen entspricht prinzipiell dem Auftragen der Werte in einem Wahrscheinlichkeitsnetz der Extremwertverteilung Typ 1, ist aber automatisierbar. In Bild 41 ist dies exemplarisch für die Erwartungswerte der Jahresmaximalwertverteilungen dargestellt.

Für solche Anpassungen sind die in Tabelle 7 ermittelten Funktionsparameter für die Beschreibung der Erwartungswerte (EW), Standardabweichungen ($StAbw$) und Variationskoeffizienten ($VarK$) aufgeführt. Die Werte der Tabelle enthalten dabei Erwartungswert, Standardabweichung und Variationskoeffizienten der angepassten Extremwertverteilungen Typ 1 (EW_{EV1} , $StAbw_{EV1}$ und $VarK_{EV1}$).

Es werden aus diesen Parametern die Beschreibungen der Beanspruchung aus Verkehr abgeleitet. Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 7.1.6 wird hierzu ein Produkt aus zwei Zufallszahlen verwendet. Die erste Zufallszahl wird dabei mit einer Extremwertverteilung Typ 1 mit einem Erwartungswert entsprechend dem Erwartungswert EW_{EV1} der Erwartungswerte EW der Einzelverteilungen und mit einer Standardabweichung entsprechend dem Erwartungswert EW_{EV1} der Standardabweichungen $StAbw$ der Einzelverteilungen abgebildet. Die zweite Zufallszahl wird ebenfalls durch eine Extremwertverteilung Typ 1 abgebildet. Deren Erwartungswert ist $1,0$ und der Variationskoeffizient entspricht dem Variationskoeffizienten $VarK_{EV1}$ der Erwartungswerte EW der Einzelverteilungen. Die daraus resultierende Zufallszahl folgt nicht mehr einer Extremwertverteilung Typ 1.

In den nachfolgenden Untersuchungen wird dieser Ansatz abgeändert und vereinfacht. Die Beanspruchungen aus Verkehr werden hier nicht durch ein Produkt aus zwei Zufallszahl abgebildet, sondern durch eine einzelne Zufallszahl, die einer Extremwertverteilung Typ 1 folgt. Die Parameter dieser

Verteilungsfunktion (Erwartungswert EW_{Mod} und Variationskoeffizient $VarK_{Mod}$) werden wie folgt definiert:

$$EW_{Mod} = EW_{EV1} \text{ aus } EW \text{ der Einzelverteilungen}$$

$$VarK_{Mod} = VarK_{EV1} \text{ aus } EW \text{ der Einzelverteilungen} \\ * (1 + EW_{EV1} \text{ aus } VarK \text{ der Einzelverteilungen})$$

Die beiden Ansätze lassen sich mathematisch nicht ineinander überführen. Nachfolgend wird überprüft, welche Unterschiede sich für die resultierenden Werte ergeben. Hierzu wurden mit beiden Ansätzen mit den für „UnGeS“ ermittelten Parametern in Tabelle 7 jeweils 100.000 Werte generiert. Diese wurden klassiert (Klassenbreite 25) und die relativen Häufigkeiten aufgetragen. In Bild 42 ist das Ergebnis dargestellt. Hier zeigt sich, dass der Verlauf der relativen Häufigkeiten in beiden Ansätzen relativ deckungsgleich ist. Solange im ursprünglichen Ansatz der Variationskoeffizient der zweiten Zufallszahl deutlich größer ist als der der ersten Zufallszahl (in den hier verwendeten Werten rund 15,5 % zu rund 4,9 %), ergibt sich aus dem vereinfachten Ansatz ein vergleichbares Ergebnis. Wird dieser Unterschied aber geringer, so ergeben sich Abweichungen zwischen dem vereinfachten und dem ursprünglichen Ansatz. Nachfolgend wird der vereinfachte Ansatz weiterverwendet. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass die Ergebnisse lediglich aus einem Wertepaar (Erwartungswert und Variationskoeffizient bzw. daraus berechneter Standardabweichung) bestehen. Dies vereinfacht Vergleiche.

Aus den in Tabelle 7 zusammengestellten Werten sind in Bild 43 die aus dem vereinfachten Ansatz abgeleiteten Dichtefunktionen dargestellt. Auch hier zeigt sich erwartungsgemäß der Einfluss der angesetzten Schädigung im Feldbereich auf die resultierende stochastische Beschreibung der Beanspruchung aus Verkehr.

In den vorhergehenden Darstellungen wurden zur Erläuterung der verwendeten Ansätze alle vorliegenden Ergebnisse der durchgeführten Simula-

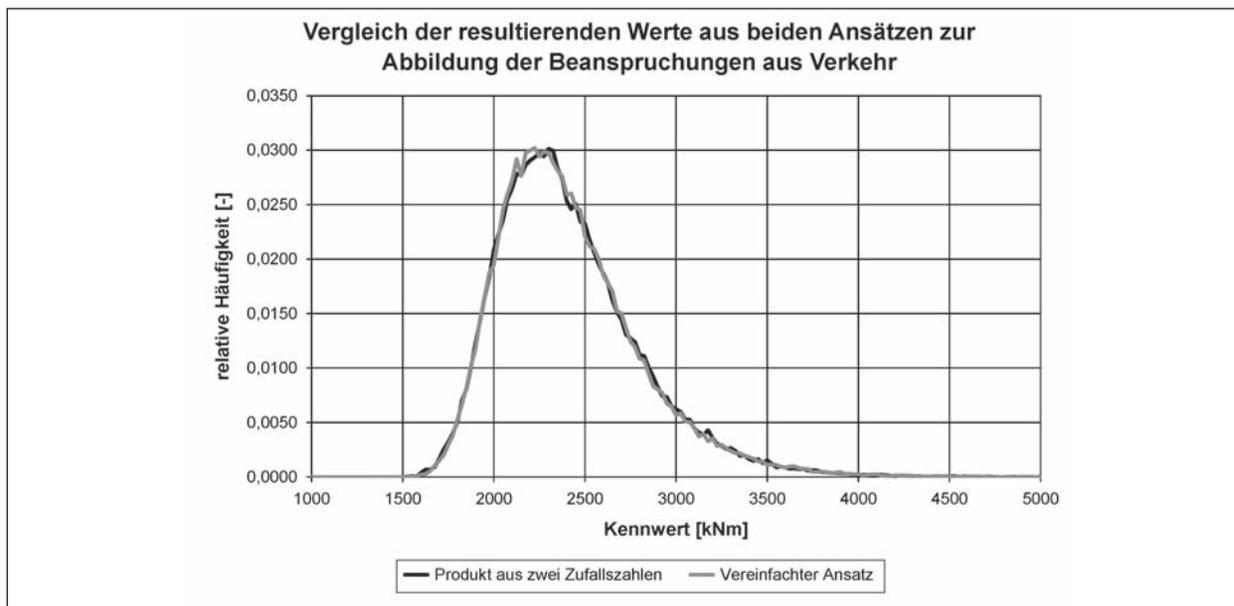


Bild 42: Vergleich der Histogramme der mit beiden Ansätzen generierten Werte

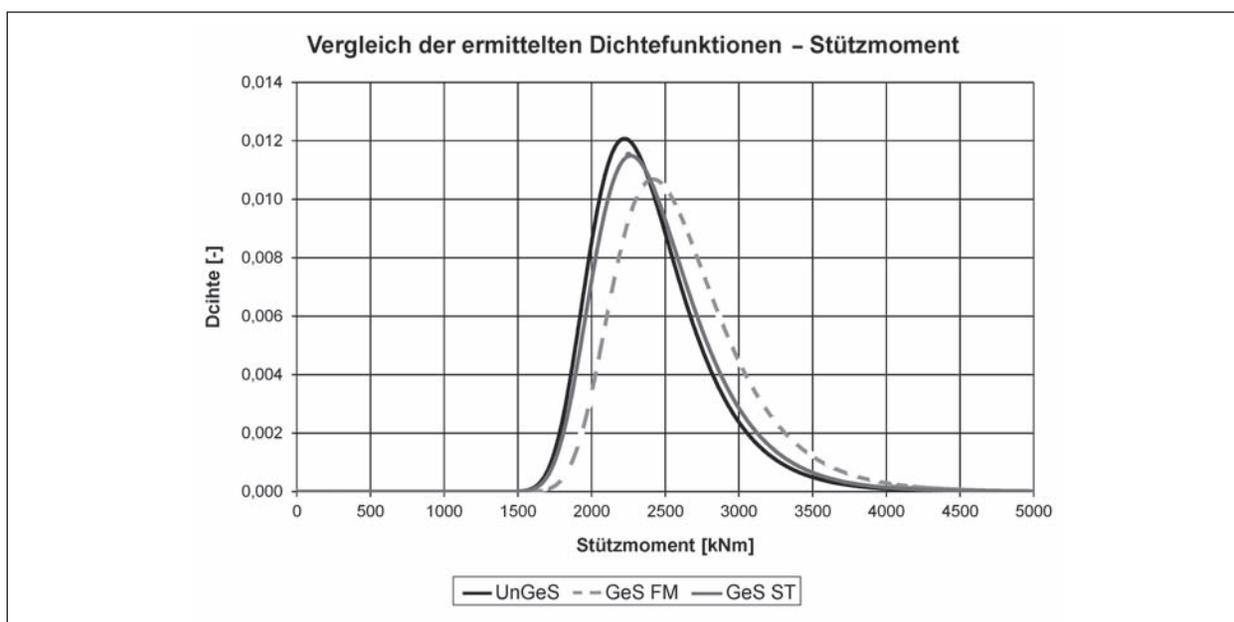


Bild 43: Resultierende Dichtefunktionen

tionsrechnungen verwendet. Die damit ermittelte stochastische Beschreibung bildet somit eine Unsicherheit der Kenntnis der objektspezifischen Verkehrscharakteristik über das gesamte Spektrum der betrachteten Varianten von Verkehr (vgl. Bild 37) ab. Liegen Kenntnisse vor, so kann die dargestellte Vorgehensweise für eine definierte Untermenge der vorliegenden Daten angewendet werden. Für die stochastischen Beschreibungen werden sich damit variierende Ergebnisse einstellen. Um dies zu betrachten, werden nachfolgend drei gewählte Untermengen der vorliegenden Ergebnisse betrachtet. In Form von Auszügen aus Bild 37 sind

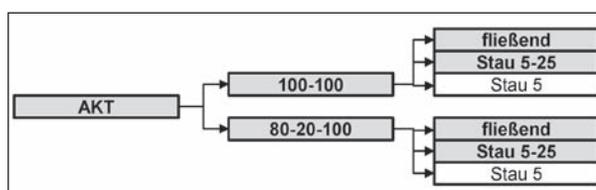


Bild 44: Untermenge Variante K1

diese gewählten Untermengen in Bild 44 bis 46 dargestellt. In der ersten Untermenge (vgl. Bild 44, nachfolgend mit „K1“ abgekürzt) wird nur aktueller Verkehr („AKT“) betrachtet und darin nur fließender Verkehr und „moderater“ Stauverkehr.

In der zweiten Untermenge (vgl. Bild 45, nachfolgend mit „K2“ abgekürzt) werden nur die beiden Varianten zukünftigen Verkehrs mit vergrößerter Verkehrsstärke („P 25a V“ und „P 50a V“) herangezogen und darin auch nur der fließende Verkehr und der „moderate“ Stau.

Hintergrund der Vernachlässigung der Variante mit „extremem“ Stauverkehr ist die Tatsache, dass sich das hier exemplarisch betrachtete Brückenbauwerk im Zuge eine Bundesstraße befindet und zumindest in eine Fahrtrichtung nur ein Fahrstreifen vorhanden ist. Die Simulationsrechnungen bilden für die jeweils rechten Fahrstreifen nur Lkw-Verkehr ab. Es ist davon auszugehen, dass dennoch Pkw in diesen Fahrstreifen vorhanden ist. Für die Simulationsrechnungen des fließenden Verkehrs ist dies unerheblich, weil entsprechend größere Fahrzeugabstände zwischen den Lkw generiert werden. In der Abbildung des Stauverkehrs werden aber sehr geringe Abstände erzeugt, die auf die Fahrzeugachsen bezogen sind. Der so generierte Stauverkehr ist damit eine Aneinanderreihung von Lkw an Lkw. Tatsächlich wird sich auf dem Fahrstreifen aber eine gewisse Anzahl von Pkw zwischen den Lkw befinden, sodass der „extreme“ Stau wahrscheinlich keine realistische Situation darstellt.

Um dennoch Auswirkungen dieses unrealistischen Ansatzes von Stauverkehr zu analysieren, werden in einer dritten Untermenge (vgl. Bild 46, nachfolgend mit „K3“ abgekürzt) die Ergebnisse daraus mit berücksichtigt. Betrachtet werden darin lediglich die beiden Varianten zukünftigen Verkehrs in 50 Jahren („P 50a V“ und „P 50a VZS“).

Die ermittelten Ergebnisse (Erwartungswert und Standardabweichung der Verteilungsfunktion) sind für das betrachtete Stützmoment und Feldmoment in Bild 47 und Bild 48 zusammengestellt. Die qualitative Lage der Ergebnisse ist dabei für Stütz- und Feldmoment unterschiedlich. Zunächst werden in beiden Fällen Unterschiede infolge der Betrachtung von ungeschädigtem bzw. geschädigtem System deutlich. Für das Stützmoment führt die Schädigung im Feldbereich („GeS FM“) tendenziell zu höheren Erwartungswerten (Lage der dunkelgrauen Punkte rechts zu den schwarzen). Bei der Schädigung im Stützbereich („GeS ST“) sind diese Verschiebungen deutlich geringer ausgeprägt. Für die Standardabweichungen lassen sich hier keine einheitlichen Zusammenhänge erkennen.

Beim Feldmoment erzeugt die Schädigung im Stützbereich („GeS ST“) eine größere Verschie-

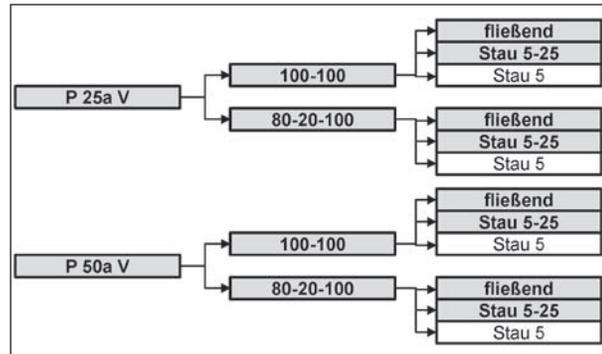


Bild 45: Untermenge Variante K2

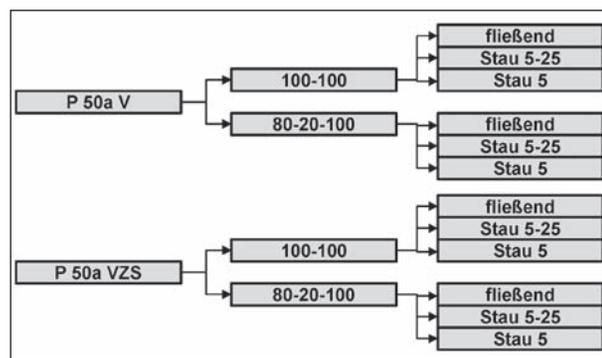


Bild 46: Untermenge Variante K3

bung der Erwartungswerte nach oben als die Schädigung im Feldbereich („GeS FM“). Auch hier zeigen die Standardabweichungen keinen eindeutigen Zusammenhang.

Im Vergleich zu diesen Verschiebungen der Werte sind die unterschiedlichen Untermengen (K1, K2 und K3) deutlich größer. In den Darstellungen sind die zusammengehörigen Ergebnisse umrandet und beschriftet. Für das Stützmoment (Bild 47) liegen sowohl die Erwartungswerte als auch die Standardabweichungen für „K3“ über denen von „K1“ und „K2“. Der Ansatz von nur zukünftigem Verkehr führt also zu stochastischen Beschreibungen mit deutlich größeren Erwartungswerten und deutlich größeren Streuungen als der alleinige Ansatz von aktuellem Verkehr. Für die Untermenge „K2“ ergeben sich gegenüber „K1“ ebenfalls größere Erwartungswerte, jedoch kleinerer Standardabweichungen.

Für das Feldmoment (Bild 48) zeigen sich für die Erwartungswerte beim Übergang von „K1“ zu „K2“ und weiter zu „K3“ ebenfalls Steigerungen. Im Gegensatz zum Stützmoment ergeben sich hier aber auch gleichzeitig durchgehende Steigerungen der Standardabweichungen.

Die Darstellung dieser Zusammenhänge zeigt auf, dass eine Auswirkung von Schädigungen am

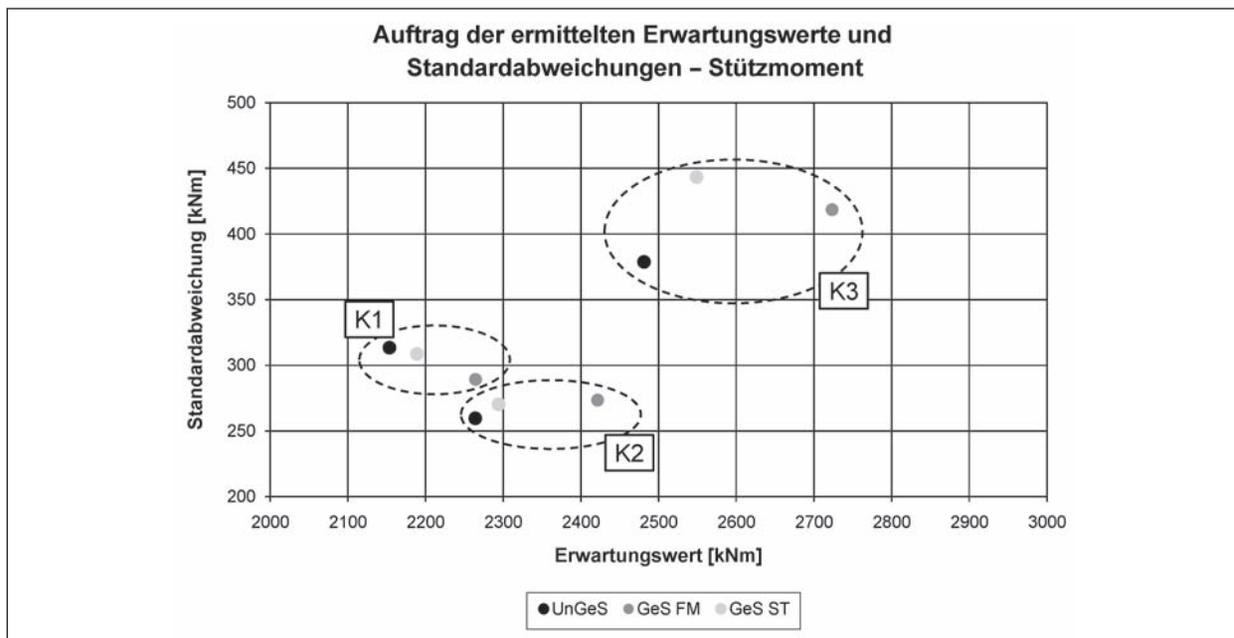


Bild 47: Erwartungswerte und Standardabweichungen für die verschiedenen Untermengen (K1, K2 und K3) bei ungeschädigtem und geschädigtem System – Stützmoment

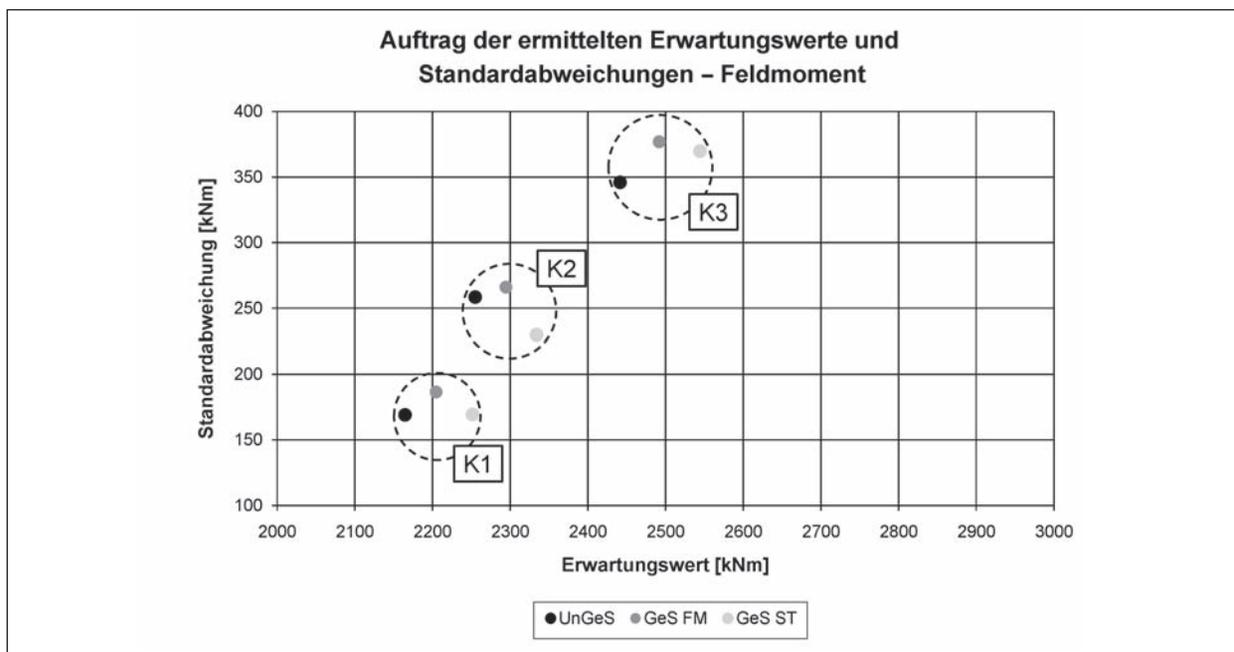


Bild 48: Erwartungswerte und Standardabweichungen für die verschiedenen Untermengen (K1, K2 und K3) bei ungeschädigtem und geschädigtem System – Feldmoment

Tragwerk auf die stochastischen Beschreibungen von Beanspruchungen existiert. Diese sind aber im Vergleich zur Abbildung von Kenntnissen oder Unkenntnissen von objektspezifischen Verkehrscharakteristiken bei den hier betrachteten Kennwerten deutlich geringer ausgeprägt. Ein Bauwerksmonitoring muss daher sowohl Verkehrsentwicklungen als auch Veränderungen am Tragwerk erfassen, um geschlossene und

belegbare Festlegungen von stochastischen Beschreibungen von Beanspruchungen zu erhalten.

Nicht betrachtet ist bis hierher, welche Auswirkungen die unterschiedlichen stochastischen Beschreibungen der Beanspruchungen auf die Endergebnisse von zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen haben.

Da die ermittelten Ergebnisse aber aufgrund der gewählten Untermengen der vorliegenden Daten einen eher exemplarischen Charakter aufweisen, werden in diesen Betrachtungen „Umhüllungen“ der ermittelten Werte verwendet. Hierdurch kann zunächst überprüft werden, welche Auswirkungen sich aus dem Gesamtspektrum möglicher stochastischer Beschreibungen ergeben. Zeigen sich hier deutliche und relevante Zusammenhänge, können die Analysen anschließend verfeinert werden. In den Bildern 49 und 50 sind die verwendeten Werte dargestellt. Es wird ersichtlich, dass mit den ge-

wählten Zahlenpaaren aus Erwartungswert und Standardabweichung die erzielten Ergebnisse umschlossen werden.

8.5 Anforderungen an Tragsystemmodelle

8.5.1 Vorgehensweise

Im Rahmen des Monitorings wird eine Verkehrserkennung durchgeführt, um Angaben zur Verkehrsstärke (Lkw und Pkw), zur Zusammensetzung des

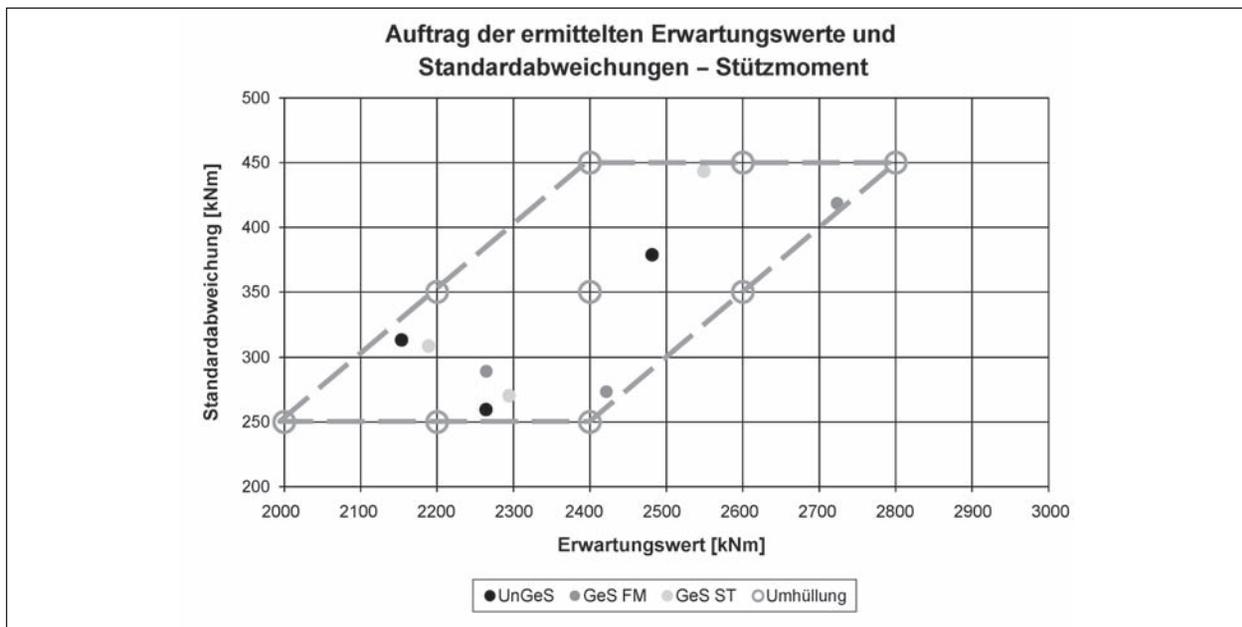


Bild 49: Betrachtete Kombinationen aus Erwartungswert und Standardabweichung – Stützmoment

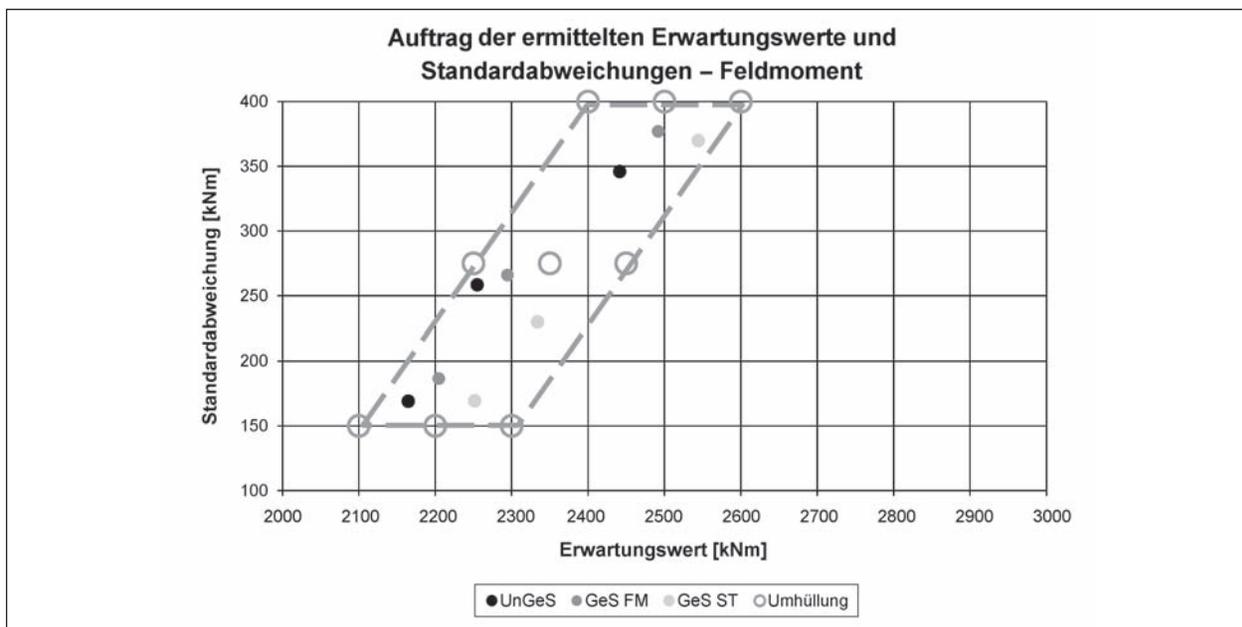


Bild 50: Betrachtete Kombinationen aus Erwartungswert und Standardabweichung – Feldmoment

Lkw-Verkehrs, zu Gesamtgewichtsverteilungen ausgewählter Fahrzeugtypen des Lkw-Verkehrs und zu Mittelwerten von Achslastverteilungen und Achsabständen auf dem jeweiligen Bauwerk zu ermitteln.

Wie bei Weigh-In-Motion-(WIM)-Systemen, bei denen Achs- und Radlasten von Straßenfahrzeugen im fließenden Verkehr dynamisch gewogen werden, kann auch bei der Verkehrserkennung im Rahmen des Monitorings nicht direkt das Gewicht (definiert als Masse mal Erdgravitation) bestimmt werden. Vielmehr wird die momentan wirkende dynamische Kraft aus den Massen und dem aktuellen Schwingungszustand des Fahrzeugs abgeleitet. Fehler, die bei der Ermittlung von Achslasten mit dynamischen Wiegesystemen auftreten, können nicht nur dem Messsystem zugeordnet werden, sondern resultieren auch aus den dynamischen Kraftkomponenten als Folge der Interaktion zwischen Fahrbahn und Fahrzeug [11].

Die Verkehrsermittlung im Rahmen des Monitorings basiert auf der Messung von Bauwerksreaktionen (Verdrehungen/Verschiebungen) während der Überfahrt von Fahrzeugen. Die gemessenen Reaktionen werden auf Ergebnisse kalibrierter Berechnungsmodelle bezogen. Die Genauigkeit bzw. der Realitätsbezug des verwendeten Tragsystemmodells hat damit einen Einfluss auf die Genauigkeit der Achslastermittlung [41].

Deshalb wird untersucht, ob die Bewertungsstrategie nach COST 323 Aussagen zu Anforderungen an die Modellierung des Tragsystems erlaubt.

Als Referenz wird das bisher verwendete FE-Modell verwendet und um ein höherwertiges und ein weniger aufwändiges Modell ergänzt.

8.5.2 Modellbeschreibung

Die Beispielrechnung wird für einen zweistegigen Plattenbalken als Durchlaufträger über drei Felder durchgeführt. Datengrundlage für die Bestimmung der Genauigkeitsklasse sind Messdaten, die bei Kalibrierfahrten ermittelt wurden.

Der Plattenbalken besteht als gegliederter Querschnitt aus dem Balken als Haupttragglied und der Platte als Nebentragglied. Beide wirken bei der Lastabtragung zusammen, was bei der Modellbildung unterschiedlich berücksichtigt werden kann. Mögliche Modelle sind:

- Platte mit unendlich steifem Unterzug,
- Trägerrostsystem,
- Kontinuumsmodell,
- Faltsystem aus ebenen Schalen-Elementen,
- Schalensystem mit exzentrisch angeschlossenen Stäben,
- Plattensystem mit zentrisch angeschlossenen Stäben,
- Plattensystem mit exzentrisch angeschlossenen Stäben,
- Plattensystem mit unterschiedlichen Dicken im Bereich der Balken,
- reines Plattensystem (ohne Berücksichtigung der Balken).

An dieser Stelle werden Kontinuumsmodell (K), Platte mit exzentrisch angeschlossenen Stäben (PeB) und als Referenzsystem das Schalensystem mit exzentrisch angeschlossenen Stäben (SeB) untersucht.

Zur unterschiedlichen Berücksichtigung von Platten- und Scheibentragwirkung in Kombination der verwendeten Elemente wird auf die Literatur verwiesen. Die Bilder 51 bis 53 zeigen zunächst die drei verwendeten Berechnungsmodelle. Dargestellt ist jeweils ein Querschnitt an einer Innenstütze.

Zur Ermittlung der Gesamtgewichte wird die Einflusslinie der Verdrehung über einer Innenstütze verwendet.

Zunächst liefern alle Modelle unterschiedliche Einflusslinien der Verdrehung, sowohl hinsichtlich der



Bild 51: Querschnitt FE-Modell „PeB“

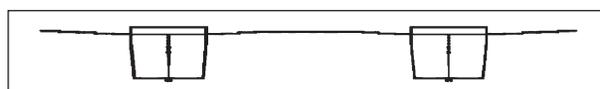


Bild 52: Querschnitt FE-Modell „SeB“

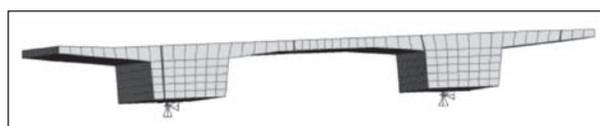


Bild 53: Querschnitt FE-Modell „K“

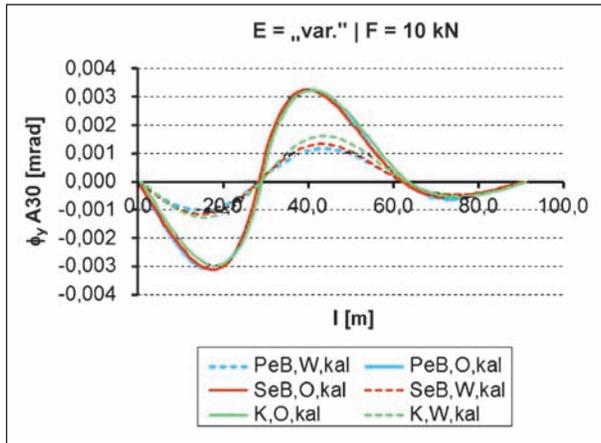


Bild 54: Einflusslinien α_y für verschiedene FE-Modelle

Verläufe als auch der globalen Extremwerte. Die Kalibrierung der Berechnungsmodelle erfolgt hier anhand einer globalen Steifigkeitsanpassung.

Bild 54 zeigt die kalibrierten Einflusslinien der Verdrehung beider Lagerreihen in der Achse der ersten Innenstütze für eine Einheitslast von 10 kN.

8.5.3 Genauigkeitsklassen unterschiedlicher FE-Modelle

COST-Algorithmus

Der Algorithmus ist detailliert in [11] beschrieben. Er wird hier in Grundzügen vorgestellt.

Es erfolgt die Angabe einer Wahrscheinlichkeit P , dass der Fehler einer Messung innerhalb einer definierten Toleranz liegt.

$$P[X_j < \delta] > (1 - \alpha) \quad (8.4)$$

Die Ermittlung der „Wiegegenauigkeit“ des Systems erfolgt anhand eines Genauigkeitsexperiments. Zur Klassifikation der Berechnungsergebnisse sind für unterschiedliche Genauigkeitsklassen A-E Toleranzen festgelegt, innerhalb derer der relative Messfehler unter Voraussetzung einer unteren Vertrauensgrenze liegen darf. Die untere Vertrauensgrenze δ_0 wird in Abhängigkeit der Randbedingungen bei der Durchführung des Genauigkeitsexperiments ermittelt.

Das Vertrauen in die abgeleiteten Resultate ist dabei umso größer, je umfangreicher Testperiode sowie Anzahl und Konfiguration der betrachteten Fahrzeuge sind. Es wird daher zum einen unterschieden, unter welchen Bedingungen der Stichprobenumfang von n Messungen gewonnen wurde. Es werden folgende Bedingungen unterschieden:

- Wiederholbarkeitsbedingungen
 - limitiert: r1,
 - erweitert: r2.
- Vergleichbarkeitsbedingungen
 - limitiert: R1,
 - erweitert: R2.

Zum anderen werden der Zeitraum der Durchführung des Genauigkeitsexperiments und eine damit verbundene Änderung der Umweltbedingungen berücksichtigt:

- (I) umweltbezogene Wiederholbarkeit,
- (II) limitierte umweltbezogene Wiederholbarkeit,
- (III) vollständige umweltbezogene Wiederholbarkeit.

Für die am Beispieltragwerk durchgeführten Kalibrierfahrten wird für die Einflusslinien aus unterschiedlichen Berechnungsmodellen geprüft, ob die einzelne Messgröße mit der Wahrscheinlichkeit $\delta > \delta_0$ innerhalb des Intervalls $[W_s(1 - \delta), W_s(1 + \delta)]$ liegt. Die Wahrscheinlichkeit δ wird auf Grundlage wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen ermittelt. Unter der Annahme einer Normalverteilung der relativen Messfehler und der Akzeptanz einer Irrtumswahrscheinlichkeit wird die Wahrscheinlichkeit δ ermittelt, dass der individuelle Messfehler einer Stichprobe innerhalb eines Intervalls liegt.

$$\pi = \Psi(u_1) - \Psi(u_2) \quad (8.5)$$

$\Psi(u)$ Verteilungsfunktion der Student'schen t-Verteilung

$$u_1 = \frac{(\delta - m)}{s} - \frac{t_{v,1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} \quad (8.6)$$

$$u_2 = \frac{(-\delta - m)}{s} + \frac{t_{v,1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} \quad (8.7)$$

Ermittelte Genauigkeitsklassen

Tabelle 8 enthält die Ergebnisse des Algorithmus zur Ermittlung der Genauigkeitsklasse bei Verwendung der unterschiedlichen FE-Modelle.

Für ein bei der Kalibrierung verwendetes Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von 14.900 kg liefert der Algorithmus zur Gesamtgewichtsbestimmung die in Tabelle 9 aufgeführten Fahrzeuggewichte für die unterschiedlichen Modelle.

Modell	Relative Messfehler				Genauigkeitsberechnung				
	n	m	s	$\hat{\sigma}_0$	δ	$\hat{\sigma}$	$\hat{\sigma} > \hat{\sigma}_0$	G.-klasse	Ergebnis
PeB	10	-5,074 %	2,074 %	0,95	25,0 %	1,00	0,05	D(25)	C(15)
	10	-5,074 %	2,074 %	0,95	20,0 %	1,00	0,05	D+(20)	
	10	-5,074 %	2,074 %	0,95	15,0 %	1,00	0,05	C(15)	
	10	-5,074 %	2,074 %	0,95	10,0 %	0,94	-0,01	B(10)	
	10	-5,074 %	2,074 %	0,95	7,0 %	0,58	-0,37	B+(7)	
	10	-5,074 %	2,074 %	0,95	5,0 %	0,23	-0,72	A(5)	
SeB	10	-3,917 %	2,106 %	0,95	25,0 %	1,00	0,05	D(25)	B(10)
	10	-3,917 %	2,106 %	0,95	20,0 %	1,00	0,05	D+(20)	
	10	-3,917 %	2,106 %	0,95	15,0 %	1,00	0,05	C(15)	
	10	-3,917 %	2,106 %	0,95	10,0 %	0,97	0,02	B(10)	
	10	-3,917 %	2,106 %	0,95	7,0 %	0,76	-0,19	B+(7)	
	10	-3,917 %	2,106 %	0,95	5,0 %	0,42	-0,53	A(5)	
K	10	-1,905 %	1,993 %	0,95	25,0 %	1,00	0,05	D(25)	B+(7)
	10	-1,905 %	1,993 %	0,95	20,0 %	1,00	0,05	D+(20)	
	10	-1,905 %	1,993 %	0,95	15,0 %	1,00	0,05	C(15)	
	10	-1,905 %	1,993 %	0,95	10,0 %	1,00	0,05	B(10)	
	10	-1,905 %	1,993 %	0,95	7,0 %	0,95	0,00	B+(7)	
	10	-1,905 %	1,993 %	0,95	5,0 %	0,78	-0,17	A(5)	

Tab. 8: Ergebnisse der Genauigkeitsberechnung bei Annahme $\alpha = 5 \%$

Überfahrt	Gesamtgewicht [kg] SOLL = 14.900 kg		
	PeB	SeB	K
2	14.344	14.530	14.767
6	13.844	14.024	14.324
10	13.649	13.818	14.087
14	14.542	14.725	14.920
18	14.573	14.751	15.024
22	14.111	14.278	14.563
26	14.144	14.315	14.657
30	14.155	14.325	14.642
34	13.795	13.952	14.324
42	14.283	14.446	14.854

Tab. 9: Ergebnisse der Gewichtsbestimmung

Damit kann exemplarisch für die Verwendung der Einflusslinie der Verdrehung an der Innenstütze als Bauwerkskenngröße gezeigt werden, dass bei Verwendung eines aufwändigeren, aber auch höherwertigen Modells auch genauere Ergebnisse bei der Bestimmung der Fahrzeuggesamtwerte erreicht werden.

Fazit

Für das gewählte Beispiel wurde ein Algorithmus zur Fahrzeuggesamtwertsbestimmung (vgl. Kapitel 9.5.1) auf Basis von Monitoringdaten von Bauwerkskenngrößen mit unterschiedlichen Qualitäten des verwendeten Tragsystemmodells getestet. Für den Plattenbalkenquerschnitt eines Spannbetonüberbaus über drei Felder wurden drei Modelle, Platte mit exzentrisch angeschlossenen Stäben, Schale mit exzentrisch angeschlossenen Stäben und ein Kontinuumsmodell, verwendet. Die unterschiedlichen Eingangsdaten der Berechnungsmodelle (Kennwert-Zeitverläufe) werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis – die ermittelten Fahrzeuggesamtwerte – eingeschätzt. Hierzu wird in Analogie zur Genauigkeitsbewertung von Weigh-In-Motion-Systemen der COST-323-Algorithmus verwendet. Die berechneten Ergebnisse werden damit in Genauigkeitsklassen mit unterschiedlichen Toleranzgrenzen der zulässigen individuellen „Messfehler“ eingestuft.

Anhand des gewählten Beispiels zeigt sich, dass das aufwändigste und zugleich qualitativ hochwertigste Modell auch die qualitativ besten Ergebnisse für die verwendete Fahrzeuggewichtsbestimmung liefert.

9 Das Monitoringsystem zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken

9.1 Ein Überblick

Es ist mit heutigem Kenntnisstand möglich, ein Monitoringsystem zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken auszuschreiben und zu betreiben. Die Bewertung führt zu quantifizierten, aber unscharfen Ergebnissen. Der Bereich nicht gesicherter Tragfähigkeit infolge der Gefahr des Versagens durch Übergang des Tragwerks in einen Bruchzustand resultierend aus Überlast oder Materialermüdung wird durch Einführung eines fiktiven Sicherheitsabstandes scharf definiert. Der Abstand des Tragwerks von dem Übergang in den unsicheren Bereich zu einem beliebigen Zeitpunkt mit unterschiedlicher Schädigung und Einwirkung bleibt unscharf und somit relativ. Bewertungskenngrößen sind für das Versagen infolge Überlast der Zuverlässigkeitsindex β und die Versagenswahrscheinlichkeit P_f . Für die Materialermüdung sind es die Kenngrößen Schädigungssumme und Restlebensdauer. Das nun vorliegende Gesamtsystem-Monitoring ist auf der Basis theoretischer Ableitungen mit punktuell praktischen Erfahrungen entstanden. Die einzelnen Algorithmen sind durch Einzeltests unter Anwendung von vorliegenden Messergebnissen einer bestehenden Brücke „erprobt“. Ein durchgängiger praktischer Einsatz ist im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht vorgesehen, wird aber dringend empfohlen.

In Bild 55 ist der detaillierte Inhalt des Monitoringsystems in vier Schritten dargestellt. Den Erkenntnissen der Literaturanalyse folgend, besteht dieser aus einer Interaktion von Rechnung, Messung und Auswertung.

Ausgangspunkt ist eine durch den Bauherrn ausgewählte Brücke mit Defiziten, die entweder durch Nachrechnung oder durch Überwachung und Prüfung aufgedeckt wurden. In Schritt 1 werden für diese Brücke das Zuverlässigkeitsmaß (β), die Versagenswahrscheinlichkeit (P_f), die Schädigungssumme (D) und die Restlebensdauer (t) auf der Basis der Annahmen der Entwurfszeit ermittelt.

Im Einzelnen bedeuten:

β_{T,t_0} Zuverlässigkeitsmaß des Tragsystems zum Zeitpunkt t_0

Die Bezeichnungsweise wird für alle Kenngrößen und Zeitpunkte beibehalten. Der Zeitpunkt des Versagens wird mit t_n bezeichnet.

Die Ermittlung im Schritt 1 wird auch mit den Einwirkungen und Widerständen der Entwurfszeit geführt. Angaben für stochastische Beschreibungen von Einwirkungen und Widerständen sowie für Ermüdungsbeanspruchungsermittlungen sind im Text gegeben. Die Ergebnisse von Schritt 1 dienen als Referenzwerte. Für die Werte β_{T,t_0} und P_{f,T,t_0} zeigen die Ergebnisse des Schrittes 1 den Abstand zu β_{T,t_n} und P_{f,T,t_n} . Für die Schädigungssumme wird D_{T,t_0} als Grenzwert definiert, da die Anzahl der Lastwechsel auf die Lebensdauer von 100 Jahren gerichtet ist.

Dem Schritt 1 folgt die Auswahl des erforderlichen Messequipments, die Installation und Inbetriebnahme. Die Auswahl des Equipments ist an die gesuchten Daten gebunden, die tragwerksabhängig sind. Immer erforderlich sind die Daten des aktuellen Verkehrs, Daten zur Tragsystemkalibrierung und zur Systemidentifikation. Objektbezogen kommen weitere Einwirkungsdaten und Informationen zu Tragwiderständen hinzu.

Nach Inbetriebnahme des Messsystems folgt die Kalibrierung, also die Aufnahme der gesuchten Kennwerte unter definierten Einwirkungen (definierten Fahrzeugen). In Schritt 2 wird dann der Schritt 1 mit dem kalibrierten Tragsystem und den aktuellen Einwirkungen (Verkehr) (t_1) wiederholt, in den Schritten 4 bis n-1 erfolgt dies mit durch Vorhersagemodelle prognostizierten Tragwerksschädigungen und den zeitzugeordneten Verkehren. Diese Ergebnisse sollten zwischen den Zielwerten des Schrittes 1, den Ergebnissen des Schrittes 2 und den abstandsbehafteten Werten des Schrittes 3 liegen.

Der Schritt 3 dient lediglich der Ermittlung von Grenzwerten.

Das Tragsystem wird versagensähnlich geschädigt, der Verkehr hat seine Prognose erreicht und die Widerstände liegen im Grenzbereich. Die Grenzschädigungssumme entspricht der Schädigungssumme des initialen Tragsystems.

Die beschriebenen Schritte sind die als Minimum auszuführenden Schritte des Monitorings. Laufende Messungen oder häufiger wiederholte Messperioden erhöhen die Aussagequalität.

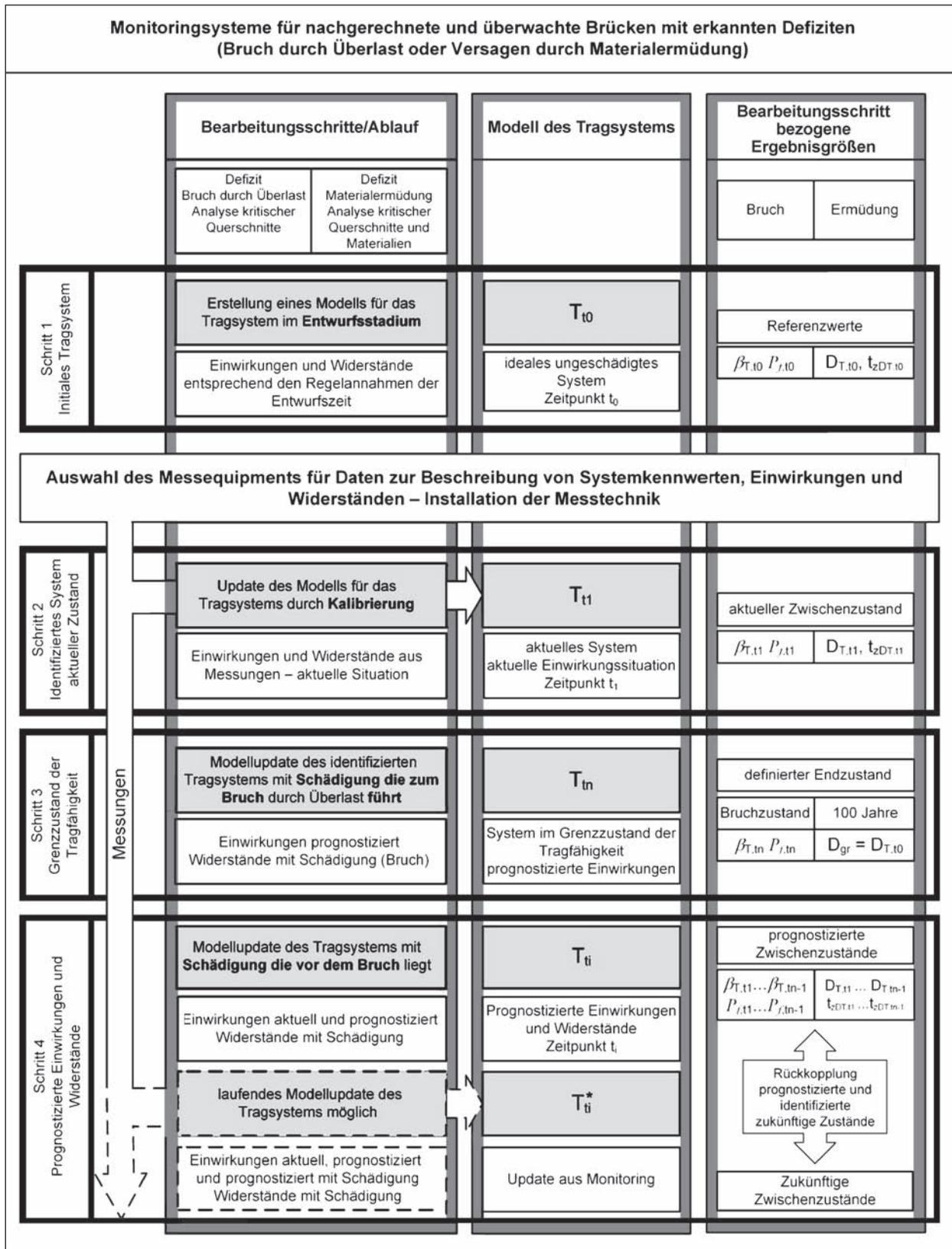


Bild 55: Monitoringsystem

9.2 Anwendungsbereich

Das vorgestellte Konzept ist von der Anlage her nicht auf bestimmte Anwendungsfälle begrenzt. Die vorliegenden Untersuchungen wurden jedoch nur für die beiden Grenzzustände der Tragfähigkeit

- Übergang des Tragwerkes oder seiner Teile in einen Bruchzustand (statische Festigkeit),
- Versagen des Tragwerks oder eines seiner Teile durch Materialermüdung im Tragwerk und für
- balkenartige Spannbetontragwerke

rechnerisch erprobt.

9.3 Auswahl des Messequipments

Das zu installierende Messsystem hat innerhalb des Monitoringsystems ausreichende Daten zu liefern für

- die Verkehrserkennung,
- die Erfassung von Brückenreaktionen zur Ermittlung von Einwirkungen und Widerständen,
- eine Systemidentifikation.

Entsprechend den Teilaufgaben erfolgen die

- Festlegung der Messgrößen,
- Festlegung der Messstellen,
- Festlegung der Messtechnik

tragwerksbezogen und ebenso die erforderliche Ausstattung und Anzahl.

Die Ermittlung der Daten des aktuellen Verkehrs wie z. B. Fahrzeugklassen oder Fahrzeuggewichte wird über BWIM-Systeme realisiert.

Bauwerksreaktionen und damit Bauwerkskenngrößen sind:

- Verformungen (Durchbiegungen, Verdrehungen, Neigungen),
- Verschiebungen an ausgewählten Stellen,
- Dehnungen am Beton,
- Dehnungen am Bewehrungs- und Spannstahl.

Zusätzlich sind die klimatischen Einflüsse (Außenlufttemperatur, Wind, Feuchtigkeit) und die Bauwerksreaktionen, wie Bauwerkstemperatur und

-feuchte an ausgewählten Bauwerksstellen messtechnisch zu erfassen.

Für die Erfassung der genannten Kenngrößen steht verschiedene Messtechnik bereit.

Es besteht keinerlei Einschränkung. Der Einsatz „modernerer“, robuster Messtechnik z. B. auf faseroptischer Basis oder intelligenter Sensoren mit eigener Stromversorgung ist auch abhängig von der Erfahrung des Auftragnehmers und der Verfügbarkeit der Messtechnik. Es ist jedoch zu beachten, dass Messsensorik, Messsoftware und Auswertesoftware in sich schlüssig sind.

9.4 Tragsysteme – Schädigungsprognosemodelle

9.4.1 Initiales Tragsystem (T_{t0})

Das Tragsystem der Entwurfszeit wird erstellt auf der Basis von Bestandsunterlagen vor Installation des Messsystems. Es dient neben der Berechnung der Zielwerte auch zur Abschätzung zu erwartender Quantitäten der Messwerte und der Festlegung relevanter Messstellen (T_{t0}). Es ist ein iterativer Prozess, da die Messstellen auch wieder im Modell gut abgebildet sein müssen. Dies wird in der Regel räumliche Modelle voraussetzen.

9.4.2 Update des Tragsystemmodells (T_{t1} bis T_{tn-1})

Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Monitoring-systems hat die Brücke ein bestimmtes Alter, welches einen beträchtlichen Abstand zum Entwurfszeitpunkt aufweisen kann. Die Abweichungen des Tragwerkes durch die Errichtung der Brücke und die Veränderungen des vergangenen Zeitraumes sind unbekannt und können nur durch das Bekanntsein von Einwirkung und Reaktion näherungsweise ermittelt werden. Dieser Vorgang wird Kalibrierung genannt.

Das kalibrierte Tragsystem dient auch zur Erstellung von rechnerischen Einflussfunktionen für ausgewählte Brückenkennwerte. Die rechnerischen Einflussfunktionen der Brückenkennwerte stellen bei allen BWIM-Systemen die fundamentale Grundlage für die Ermittlung der Achslasten bzw. des Fahrzeuggesamtgewichtes dar. Die Realitätsnähe dieser, bezogen auf die gemessenen Kennwerte, beeinflusst die Genauigkeit der Wägung erheblich.

Um die Einflussfunktion zu ermitteln, wird ein möglichst wirklichkeitsnahes Tragsystemmodell der Brücke erforderlich und durch gezielte Überfahrten mit definierten Fahrzeugen (Kalibrierfahrten) evaluiert. Dieser ingenieurtechnische Vorgang muss für jede Brücke durchgeführt werden. Die ermittelten aktuellen Verkehrsdaten werden stochastisch aufbereitet und für die probabilistische Berechnung genutzt. Auch für die Schädigungssummenermittlung werden die aktuellen Verkehrsdaten genutzt. Für zuverlässige Daten des aktuellen Verkehrs ist ein Messzeitraum erforderlich. Dieser ist auch abhängig von der Spezifik der Trasse, in der sich die Brücke befindet. Saisongewerbe, Ferienzeiten und Wirtschaftskrisen können beispielsweise Veränderungen des Verkehrs bewirken. Gibt es die beschriebenen Einflussfaktoren nicht, dann sollte ein Mindestmesszeitraum 3 Monate betragen.

Um die Veränderungen der Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Brücke abbilden zu können, sind mehrere Updates des Tragsystems mit zunehmender Schädigung und zunehmendem Verkehr erforderlich. Die Schädigungsänderungen sind auf der Basis von Vorhersagemodellen entsprechend Kapitel 8.1 zu bestimmen. Die Verkehrsveränderungen werden durch Simulation unter Einführung von Prognosen erstellt. Ist der Messzeitraum entsprechend lang, dann erlauben auch die Messdaten die Abbildung der Veränderung. Dies trifft auch zu, wenn die Messungen in bestimmten Abständen wiederholt werden, allerdings ist dann jeweils eine neue Kalibrierung erforderlich.

9.4.3 Tragsystem mit Schädigungen, die zum Bruch durch Überlast führen (T_{tn})

Da es einen rechnerisch nachvollziehbaren normativen Grenzwert von β und P_f nicht gibt, muss ein Grenzwert durch Tragsystemserschädigung mit Sicherheitsrisiko fiktiv rechnerisch erstellt werden. Dieser Grenzwert ist dann nur in Relation (nach DIN EN 1990 zur Kalibrierung) zum Referenzwert aus T_{t0} zu sehen. Er ist allerdings Basis der quantifizierten Bewertung.

9.5 Auswertemodule

9.5.1 Daten des objektbezogenen Verkehrs

Eine stochastische Beschreibung des objektbezogenen Verkehrs setzt eine Ermittlung der objektbezogenen Daten des aktuellen Verkehrs aus den

Messdaten voraus. Benötigt werden die Verkehrsstärke, die Verkehrszusammensetzung und die Gesamtgewichtsverteilungen der Fahrzeuge.

Die Ermittlung basiert auf

- Informationen zu Fahrzeugüberfahrt durch Pkw oder Lkw,
- Zeitpunkt, Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeuglänge pro Überfahrt,
- eindeutigen Kennwertmaxima (zum Beispiel Dehnungsspitzen) von Brücken Kennwerten.

Informationen zum Zeitpunkt einer Fahrzeugüberfahrt und den Fahrzeugdaten können durch Traffic-Sensoren oder mittels Messung eines Kennwertes eines direkt befahrenen Bauteiles wie zum Beispiel der Dehnung der Traverse eines Fahrbahnüberganges oder der Dehnung einer direkt befahrenen Fahrbahnplatte gewonnen werden.

Derartige Traffic-Sensoren werden von der FISEC GmbH hergestellt und vertrieben. Die Störung des Erdmagnetfeldes wird als Messgrundlage genutzt. Brücken Kennwerte sind Verformungen oder Dehnungen. Aus den Kennwertmaxima direkt befahrener Bauteile wird auf die Anzahl der Achsen und deren Abstände geschlossen. Mit der Anzahl der Achsen und den Achsabständen eines Fahrzeugs wird jedes Fahrzeug einem Fahrzeugtyp des TLS-Codes [12] zugeordnet.

Die Ermittlung der Achslasten wird über ein Optimierungsverfahren (Gradientenverfahren) unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate realisiert. Die Ausgleichsrechnung erfolgt zwischen einem gemessenen Kennwert-Zeitverlauf und einem gerechneten Kennwert-Zeitverlauf. Der gerechnete Kennwert-Zeitverlauf basiert auf einer modellierten und durch Kalibrierung evaluierten Kennwert-Einflussfunktion des Tragwerks und auf den erkannten Fahrzeugtypen und Fahrzeuggeschwindigkeiten während der Messung.

Die Achslasten werden über die Minimierung der Fehlerquadratsumme E zwischen den aus den berechneten Einflussfunktionen gewonnenen Kenngrößen ε^T und den gemessenen Kenngrößen ε^M für jeden betrachteten Zeitpunkt k bezogen auf die betrachtete Stelle bestimmt.

$$E = \sum_{k=1}^K [\varepsilon_k^M - \varepsilon_k^T]^2 \quad (9.1)$$

In der Fehlerfunktion ist ε_k^M die gemessene Kenngröße. Bei Annahme von Punktlasten als Achslasten und balkenartigen Tragwerken ist die rechnerische Kenngröße ε_k^T die Summe der einzelnen erkannten Achslasten P_i multipliziert mit der zugehörigen Einflussordinate l_k .

$$E = \sum_{k=1}^K \left[\varepsilon_k^M - (P_1 l_k^1 + P_2 l_k^2 + \dots + P_N l_k^N) \right]^2 \quad (9.2)$$

Bei Flächenlasten (Radaufstandsfläche) und/oder mehrdimensionalen Tragstrukturen wird die Einflussordinate zum Volumen.

Bei der Ermittlung des rechnerischen Kenngrößen-Zeitverlaufes ist die Berücksichtigung aller sich im betrachteten Zeitraum auf der Brücke befindenden Fahrzeuge notwendig.

Neben den einzelnen Achslasten als zu optimierende Variablen ist die Berücksichtigung weiterer Parameter wie Position des Fahrzeugs in Querrich-

tung auf der Brücke und die Fahrzeuggeschwindigkeit erforderlich.

Ergebnisse der Ausgleichsfunktion sind die Lasten der einzelnen berücksichtigten Achsen. Als Ausgleichsfunktion sind die so gewonnenen Lasten physikalisch nicht durchweg sinnvoll, aber die Summe und somit das Gesamtgewicht ist korrekt.

Die so ermittelten „Rohdaten“, also die Daten der erfassten Einzelfahrzeuge (Typ, Gesamtgewicht, Achskonfiguration usw.), bedürfen einer weiteren Auswertung zur Ermittlung der o. g. Daten des objektspezifischen Verkehrs (Verkehrszusammensetzung, Verkehrsstärke, Gesamtgewichtsverteilungen usw.). Hierbei handelt es sich zunächst um einfache Auszählungen zur Bildung von Histogrammen (Häufigkeit von Fahrzeugtypen, Anzahl von Fahrzeugen pro Tag über Erfassungszeitraum, Häufigkeit von Gesamtgewichtsklassen pro Fahrzeugtyp, Häufigkeit von Fahrzeugabstandsklassen) und um Bildung von Mittelwerten (z. B. mittlere

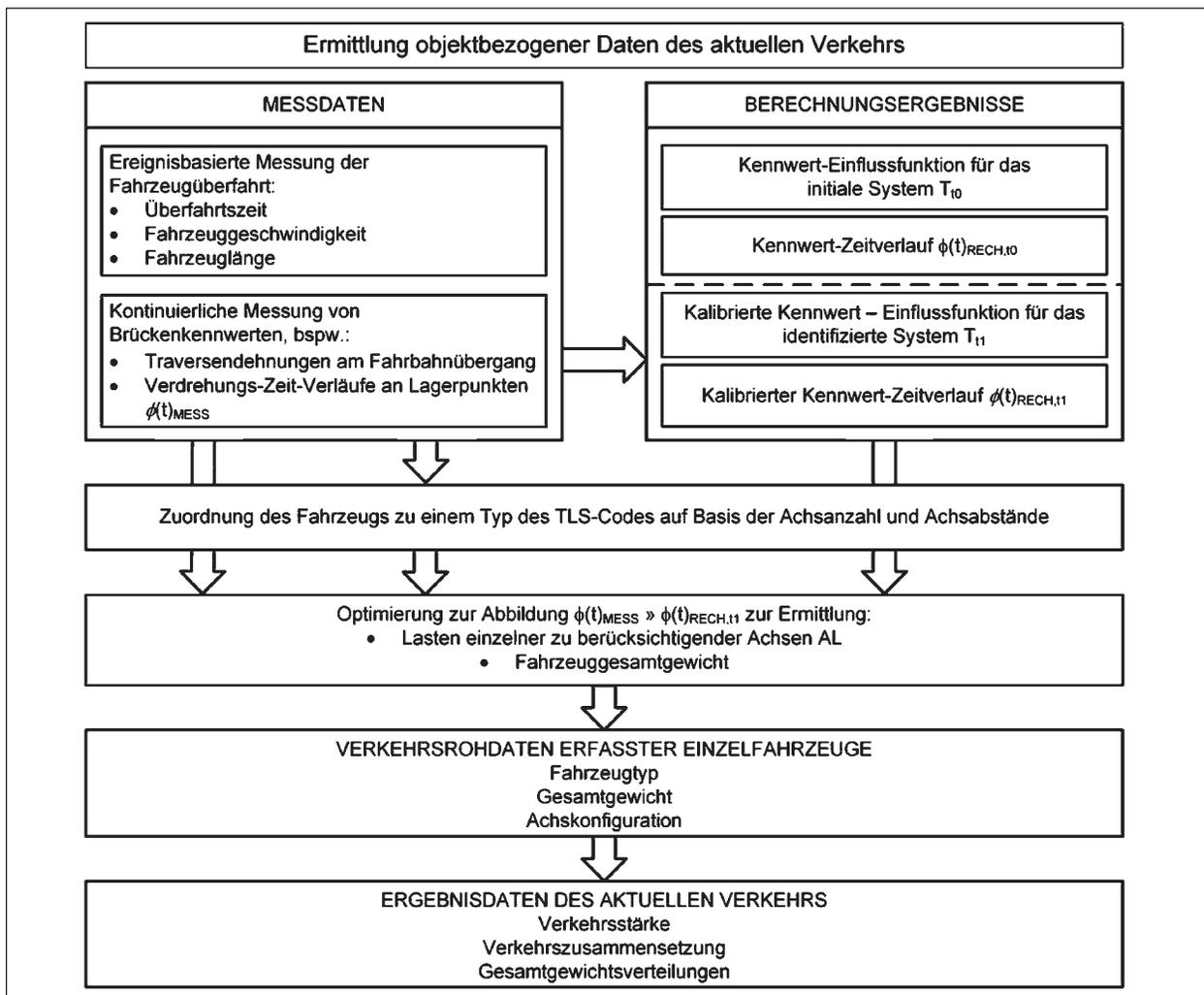


Bild 56: Ablauf zur Ermittlung objektbezogener Daten des aktuellen Verkehrs aus Messdaten

Achsabstände und mittlere Achslasten pro Fahrzeugtyp). Für die Weiterverwendung im nachfolgend erläuterten Modul zur Ermittlung von stochastischen Beschreibungen von Beanspruchungen ist des Weiteren die Ermittlung von Funktionen erforderlich, die z. B. die ermittelten Histogramme von Gesamtgewichten mathematisch beschreiben. In zahlreichen vorhergehenden Arbeiten wurden hierfür Summen aus zwei oder drei Dichtefunktionen von Normalverteilungen verwendet (vgl. [52, 16, 48, 17, 18]). Die Ermittlung der Parameter dieser Funktionen erfolgte dabei in [48] und [17] über die Methode der kleinsten Quadrate, indem die Funktionsparameter iterativ verändert wurden, bis sich ein Minimum der Fehlerquadrate (zwischen Funktionsverlauf und Histogramm) einstellte.

9.5.2 Stochastische Beschreibung von Beanspruchungen infolge objektbezogenen Verkehrs

Die Ermittlung von stochastischen Beschreibungen von Beanspruchungen aus Verkehr erfolgt über die in Kapitel 7.1.6 beschriebene Vorgehensweise. Grundlage dafür sind Daten von aktuellem Verkehr, die mit den im vorhergehenden Kapitel erläuterten Ansätzen ermittelt werden können. Des Weiteren ist es erforderlich, für die stochastischen Beschreibungen zukünftige Verkehrsentwicklungen, also Änderungen der aktuell erfassten Verkehrsdaten, zu berücksichtigen. Hierfür existieren nur wenige Grundlagen. Verkehrsprognosen (vgl. z. B. [2] und [1]) liefern nur relative globale Aussagen über die zukünftige Entwicklung von z. B. Güterverkehrsleistungen und Güterverkehrsaufkommen. Überträgt man diese vorliegenden Zahlenwerte direkt auf die Verkehrsstärke, so kann eine zukünftige Verkehrsentwicklung über die Änderung der Verkehrsstärke abgebildet werden. In [40] wurden hierzu aus den Prognosedaten jährliche Zuwachsraten des Schwerververkehrsaufkommens zwischen 1,145 % und 2,946 % ermittelt. Weitere Entwicklungen des Verkehrsaufkommens können aber auch durch Änderungen der Verkehrszusammensetzung oder durch Einführung neuer Fahrzeugtypen mit anderen zulässigen Abmessungen und/oder Gesamtgewichten gekennzeichnet sein. Da hierzu keine belegbare Datengrundlage vorhanden ist, können solche Entwicklungen nur durch das Aufstellen von Prognose-szenarien berücksichtigt werden, die dann ein möglichst breites Spektrum von aus heutiger Sicht zumindest denkbaren zukünftigen Verkehrscharakteristiken abbilden.

Zusätzlich ist es für die Ermittlung von stochastischen Beschreibungen gegebenenfalls relevant, wie sich Änderungen des Tragwerkes in Form von Schädigungen auf die Beanspruchungsbeschreibungen auswirken. Da in der Vorgehensweise, analog zur Mehrzahl aller vorhergehenden Untersuchungen auf diesem Gebiet, Beanspruchungen und nicht Einwirkungen betrachtet werden, liegt zwischen den Einwirkungen (Radlasten der Fahrzeuge) und den daraus resultierenden Beanspruchungen (z. B. ein Moment innerhalb des Tragwerkes) das Tragsystem. Infolge Schädigungen kann es z. B. zu Umlagerungen von Momenten kommen. Welche Auswirkungen sich daraus auf die stochastische Beschreibung von Beanspruchungen ergeben, wird in Kapitel 8.4 exemplarisch analysiert. Existieren solche Zusammenhänge in nicht vernachlässigbarem Umfang, so ist im Zuge des Monitorings neben einer fortlaufenden Kontrolle und ggf. Aktualisierung der Verkehrsdaten auch die Änderung des Tragwerkes infolge Schädigung bereits bei der Ermittlung der stochastischen Beschreibungen der Beanspruchungen aus Verkehr zu berücksichtigen.

9.5.3 Ermittlung von Beanspruchungskollektiven aus Verkehr

Es werden die gleichen Grundlagen wie zur stochastischen Beschreibung von Beanspruchungen infolge objektbezogenen Verkehrs benutzt.

Mit der statistischen Auswertung der Kennwert-Zeitbeziehungen beginnt die Spezifik der Auswertung. Während beim objektbezogenen Verkehr für statische Berechnungen die Auszählung der Kennwert-Zeitverläufe mittels Klassendurchgangszählungen realisiert wird, erfolgt für die Ermüdung eine Auswertung mit einem Rainflow-Algorithmus, wie zum Beispiel in [26] beschrieben und in Kapitel 7.1.6 dargelegt.

Aus der Rainflow-Matrix werden die ermüdungswirksamen Beanspruchungen für die Ermittlung der Schädigungen infolge des simulierten Verkehrs berechnet, wobei entsprechend der Formulierung der Wöhler-Linien eine unterschiedliche Auswertung für Stahl und Beton erforderlich ist. Die Schwingbreite ΔS ergibt sich aus

$$\Delta S = |S_{\text{Zielklasse}} - S_{\text{Startklasse}}| \quad (9.3)$$

und die Mittelspannung

$$S_m = (S_{\text{Zielklasse}} + S_{\text{Startklasse}})/2 \quad (9.4)$$

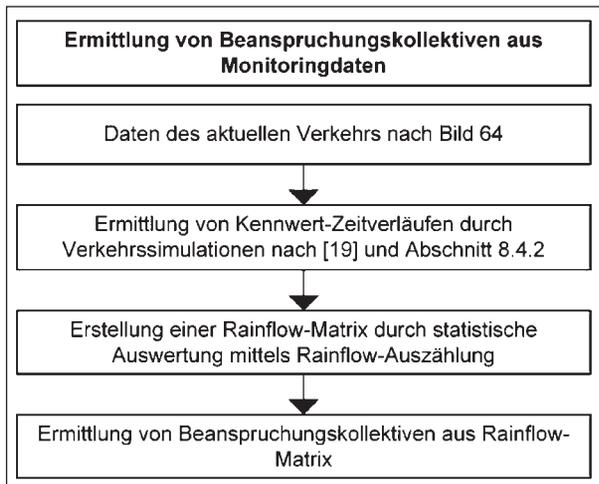


Bild 57: Ablauf zur monitoringbasierten Ermittlung von Beanspruchungskollektiven

Die jeweiligen Paare der Oberlast (Klassenwert der Zielklasse) bzw. der Unterlast (Klassenwert der Starkklasse) ergeben addiert mit dem Wert für den Kennwert infolge ständiger Einwirkungen die Werte V_{max} und V_{min} zur Bestimmung der Einzelschädigung des jeweiligen Anteils. Für die Ermüdungsfestigkeit des Betonstahls bleibt der Einfluss der Mittelspannung unberücksichtigt. Die Summen der Elemente jeder Nebendiagonale der Rainflow-Matrix ergeben den Vektor der zu jeder Schwingbreite des Kennwertes zugehörigen Schwinganzahl.

Für die Ermittlung der Schädigungssumme des Tragwerks zur Entwurfsphase ist dieser Weg mangels der Angaben zu den Daten des aktuellen Verkehrs nicht möglich. Hier wird der Rückgriff auf das Ermüdungslastmodell 4 der DIN EN 1991-2 [33] empfohlen, wobei die modifizierten Angaben der Nachrechnungsrichtlinie [15] beachtet werden sollten. Dies führt zu einer Schädigungssumme, die als Grenzwert betrachtet wird.

9.5.4 Stochastische Beschreibung der Widerstände

Die Auswahl der stochastisch zu beschreibenden Widerstände steht im direkten Zusammenhang mit der gewählten Grenzzustandsgleichung. Da das vorliegende Beispiel sich auf den Grenzzustand der Biegetragfähigkeit bezieht, sind die erforderlichen Widerstände am Querschnitt abhängig von

- Geometrien,
- Materialfestigkeiten.

Die geometrischen Schwankungen der Bauteilabmessungen, abhängig von Ausführungsqualität, be-

einflussen nicht nur die Widerstandsseite, sondern auch die Einwirkungsseite infolge Eigengewichts des Bauteils. Aufgrund einer Reduktion der Dimensionalität des multivariaten stochastischen Raumes werden im folgenden Beispiel die Querschnittschwankungen nur durch eine erhöhte Variation in den Schnittgrößen aus ständigen Lasten Betrachtung finden (Einwirkungsseite) und nicht in den Bauteilquerschnittflächen. Ein zeitlicher Effekt auf Basis von Alterungserscheinung wird nicht betrachtet.

Für den Betonstahl wird die Spannungs-Dehnungsline nach DIN 1045-1 als bilineare Funktion angenommen. Für die Bemessung selbst wird ein elastisch-ideal plastisches Materialverhalten unterstellt. Somit charakterisiert die Streckgrenze f_y das Widerstandsverhalten des Stahles im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Die Streckgrenze selbst ist von vielen Qualitätsfaktoren abhängig und wird in der Literatur normalverteilt mit einem Variationskoeffizienten von 4 % bis 10 % angegeben. Da die Streckgrenzen immer in Kombination mit den Querschnittflächen in die Bemessung eingehen, sind mit erhöhten Variationskoeffizienten für die Streckgrenze Schwankungen in der Querschnittfläche abdeckbar. Entsprechend [47] wird die Standardabweichung der Streckgrenze für folgendes Beispiel auf $\sigma_y = 30 \text{ N/mm}^2$ unabhängig von Festigkeitsklasse festgesetzt. Ausgehend vom charakteristischen Wert der Festigkeit f_{yk} von 2σ ergibt sich der Mittelwert der Streckgrenze wie folgt:

$$f_{ym} = f_{yk} + 2\sigma_y \quad (9.5)$$

Für den Spannstahl wird ebenso eine Normalverteilung mit den gleichen Annahmen wie für den Baustahl angenommen. Eine Erhöhung der Variation um Schwankungen in den Querschnittswerten zu beachten, soll hier nicht erfolgen. Ein solches Vorgehen ist in [36] beschrieben

Die Druckfestigkeit des Betons ist von den Streuungen der Betonkomponenten und der Herstellungstechnologie sowie Qualität abhängig. Nach den aktuellen Normen, siehe auch [4], ist der Mittelwert der Betondruckfestigkeit f_{cm} nach folgender Formel zu ermitteln:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2 \quad (9.6)$$

Wobei f_{ck} dem 5%-Quantil der Grundgesamtheit der gewählten Festigkeitsklasse entspricht und anhand der 28-Tage-Zylinderdruckfestigkeit ermittelt wird. Die Druckfestigkeit wird normalverteilt ange-

nommen. Dies ergibt eine Standardabweichung von 5 N/mm² für alle Festigkeitsklassen. In [20] wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Diese hat den Vorteil, dass sie einen unteren Grenzwert aufweist und somit nicht negativ werden kann. In Abhängigkeit des 5%-Quantilwertes f_{ck} und der obigen Gleichung für f_{cm} ergeben sich für die einzelnen Festigkeitsklassen die Mittelwerte und Standardabweichungen (siehe [37], Tabelle 8).

Die Zugfestigkeit des Betons wird im folgenden Beispiel nicht mit angesetzt. Ausführungen hierzu sind in [36] zu entnehmen.

Schwankungen der Elastizitätsmodule und Querdehnzahlen von Stahl und Beton haben nur indirekten Einfluss auf den hier betrachteten Fall (Biegeversagen), indem sie die ermittelten Schnittkräf-

te des statisch unbestimmten Tragwerkes beeinflussen.

9.5.5 Zuverlässigkeitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit für ein Biegeversagen aus identifiziertem Tragwerksmodell

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden diese Berechnungen generell am Querschnitt geführt. Berechnungen auf der Systemebene sind akademisch möglich. Für eine praktische Anwendung fehlen noch Erfahrungen.

Im Kapitel 7.1 sind die Grundlagen zur Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex und der Versagenswahrscheinlichkeit dargelegt. Deshalb wird hier in Bild 58 lediglich ein zusammenfassender Überblick gegeben.

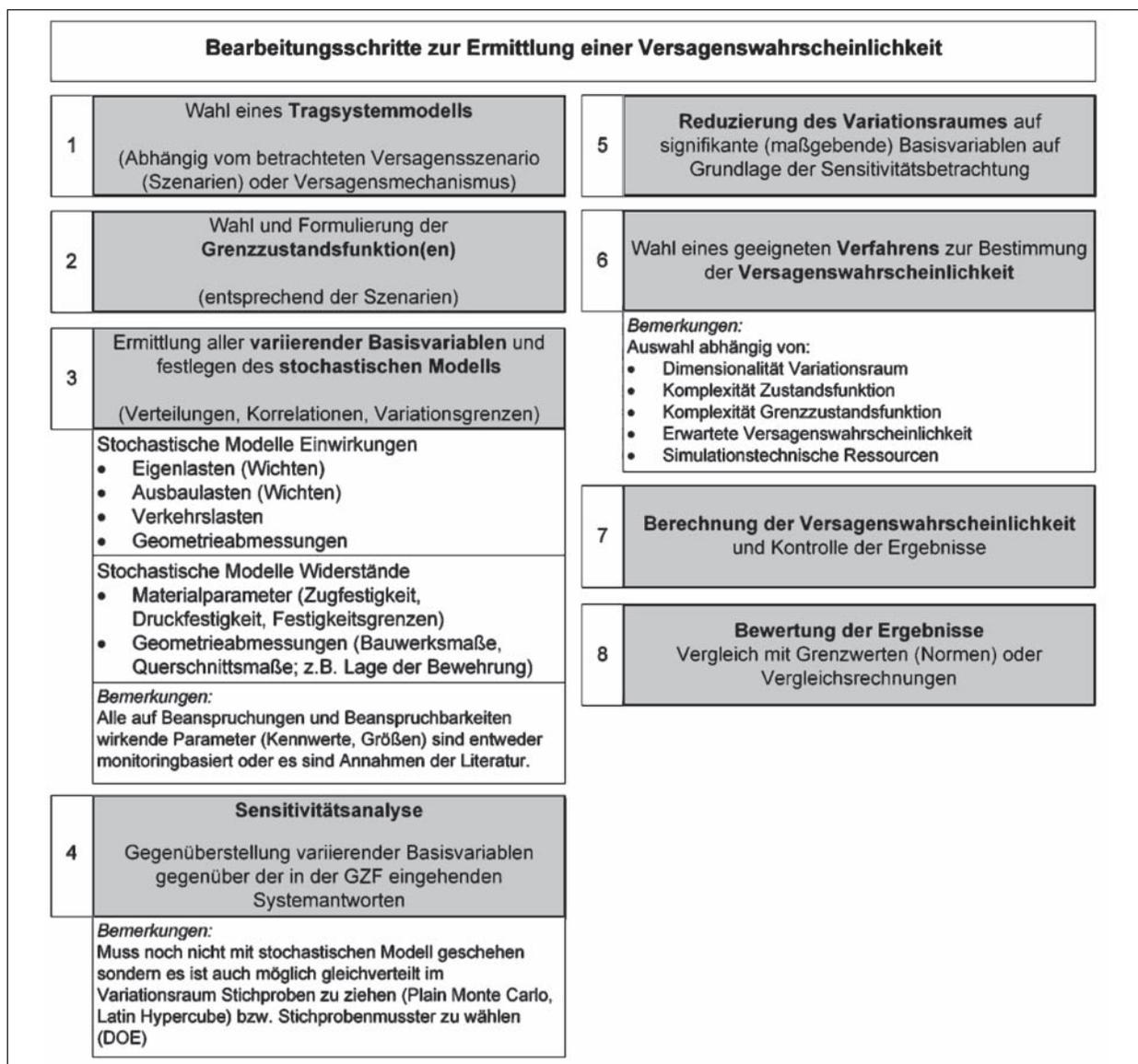


Bild 58: Überblick zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit

9.5.6 Schädigungssumme und Restnutzungsdauer

Auch die Ermittlung der Schädigungssumme und der Restnutzungsdauer wird gegenwärtig am Querschnitt geführt. In Kapitel 7.2 sind die Grundlagen dargestellt. Mit Bild 59 erfolgt ein zusammenfassender Überblick.

Die Nutzungsdauer infolge Materialermüdung wird aus der Schädigungssumme bestimmt zu:

$$t_{z|DT,ti} = \frac{D_{Grenz}}{D_{T,ti}} \quad (9.7)$$

Die Restnutzungsdauer ergibt sich aus der Differenz der Nutzungsdauer $t_{z|DT,ti}$ und der bisherigen Nutzungsdauer des Tragwerks.

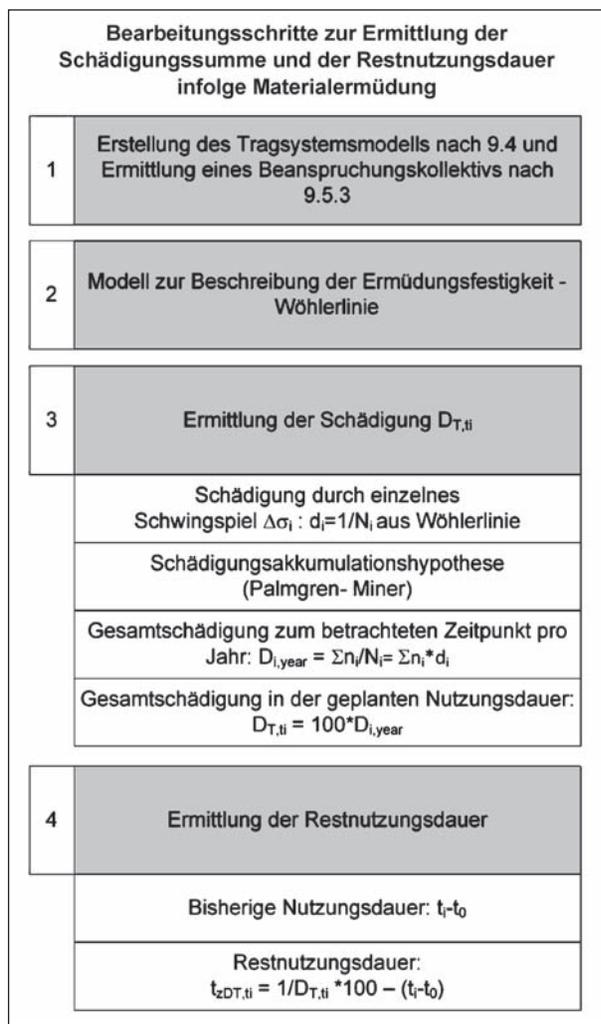


Bild 59: Überblick zur Ermittlung von Schädigungssummen und Restnutzungsdauer

9.6 Exemplarische Teilergebnisse für die gewählte Beispielbrücke

9.6.1 Tragsystemmodell

Zur Ermittlung der einwirkenden Schnittkräfte wurde ein den Planungsunterlagen entsprechendes Volumenmodell des zweistegigen Plattenbalkenüberbaus detailgetreu erstellt. Der Überbau besteht aus drei Feldern und ist im Raum geneigt und mit einem Radius von 700 m gekrümmt. Die Erstellung und Berechnung des Modells erfolgten mit dem FE-Programm ANSYS. Die Platten wurden mit Volumenschalen-Elementen und die Balken sowie Endquerbalken mit Volumenelementen (quadratischer Ansatz) diskretisiert. Als zugrunde liegendes Konstitutivgesetz wurde ein linear elastisches Materialgesetz gewählt. Die Materialparameter Wichte, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl sind global sowie lokal parametrisiert und wurden je nach Fragestellung eingestellt. Voreingestellt wurde für Stahlbeton eine Wichte von 25 kN/m³. Der verwendete Beton wurde als Bn350 nach DIN 1045: 1972-1 in den Planungsunterlagen aufgeführt. Entsprechend der Nachrechnungsrichtlinie [15], Tabelle 11.2 ist dieser aus aktueller Sicht einer Festigkeitsklasse C25/30 nach DIN EN 206-1, mit einem Elastizitätsmodul von 30.500 N/mm² zuzuordnen. Für die Querdehnzahl wurde der Faktor $\mu = 0,2$ gewählt. Entsprechend den Planungsunterlagen wurden Elastomerlager und Topfgleitlager mit Steifigkeiten (Vertikal, Horizontal sowie Rotationsteifigkeiten) und Verschiebungsrandbedingungen abgebildet. Als Lastrandbedingung wurden die ständigen Lasten modelliert. Diese sind separat parametrisierbar und gliedern sich in Eigengewicht, Ausbaulasten Fahrbahn, Ausbaulasten Kappen sowie Lasten aus Ausbauten (Gesims). Die Verkehrslasten wurden auf Basis von Einflussflächen wie folgend beschrieben ermittelt. Windlasten und außergewöhnliche Belastungen wurden nicht betrachtet. Zu bemerken sei, dass der Spannstahl nicht separat abgebildet wurde.

Das erstellte numerische Modell dient hier ausschließlich der Schnittkraftermittlung. Die Auswertung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit erfolgt direkt auf Querschnittsebene. Hierfür wurde ein Plattenbalkenquerschnitt im Feld 3 gewählt. Betrachtet wird der westliche (äußere) Plattenbalken im Schnitt des größten Biegemomentes aus ständigen Lasten (Bemessungsquerschnitt). Die zugehörigen Querschnittskennwerte wie Beton, Stahl- und Spannstahlquerschnitt sind den Planungsunterlagen entnommen.

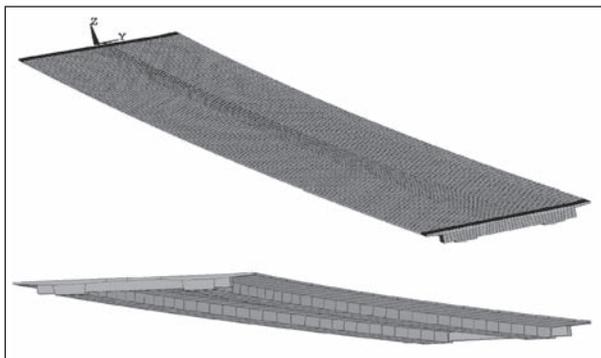


Bild 60: FE-Volumenmodell

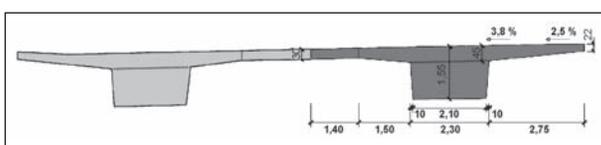


Bild 61: Regelquerschnitt Plattenbalken

9.6.2 Daten des aktuellen Verkehrs

Die Ergebnisse der Fahrzeugerkennung und Achslastermittlung wurden in einer definierten Struktur für jede Fahrtrichtung getrennt gespeichert. Die erfassten Verkehrsdaten wurden nachfolgend hinsichtlich folgender Punkte ausgewertet:

- Fahrzeuganzahl pro Tag,
- durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr (DTV-SV, bezogen aus Montag bis Freitag, Montag bis Sonntag sowie Samstage, Sonntage und Feiertage) (s. Bild 62),
- Verkehrszusammensetzung (Anteil definierter Fahrzeugtypen am Gesamtverkehr),
- Verteilungen der Gesamtgewichte für jeden Fahrzeugtyp (s. Bild 63).

9.6.3 Stochastische Beschreibung von Beanspruchungen aus Verkehr

Beanspruchungen für initiales Tragsystem

Für das initiale Tragsystem werden die stochastischen Beschreibungen der Beanspruchungen aus Verkehr aus den zum Erstellungszeitpunkt verwendeten Lastannahmen abgeleitet. Im vorliegenden Beispiel ist dies das Lastmodell BK60 der DIN 1072 [29]. Zur Bildung der stochastischen Beschreibung wird der Ansatz von BRAML verwendet (vgl. Erläuterungen in Kapitel 7.1.6 und [19]). Die Verteilungsfunktion ist dabei eine Extremwertverteilung Typ 1:

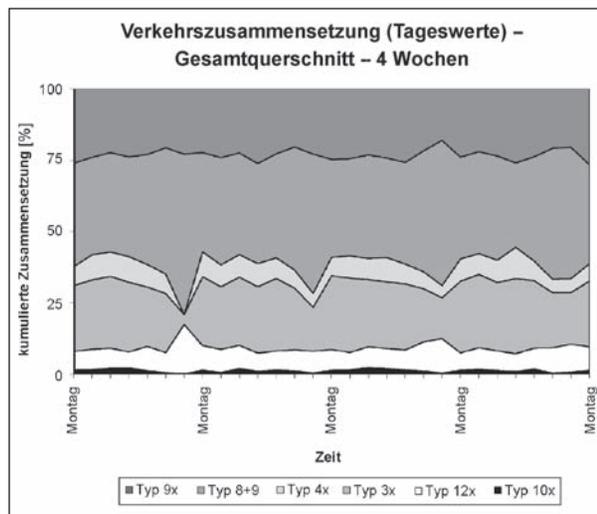


Bild 62: Verkehrszusammensetzung (Mo-Fr)

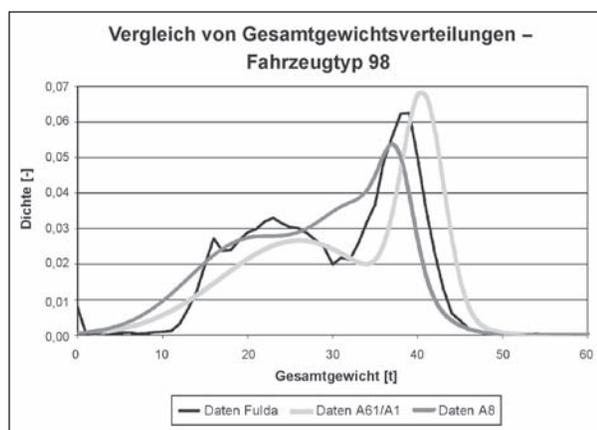


Bild 63: Gesamtgewichtsverteilungen

Für das betrachtete Stützmoment (MST) ergibt sich aus dem Ansatz des Lastmodells BK60 ein Wert von

$$CW_{MST, BK60} = 4.341 \text{ kNm.}$$

Dieser charakteristische Wert wird als Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren interpretiert. Des Weiteren wird ein Variationskoeffizient von 15 % bezogen auf Verteilungsfunktion der 50-Jahres-Maximalwertverteilung angenommen (vgl. [19]). Ein Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren wird mit einer Wahrscheinlichkeit von $\approx 0,95121$ innerhalb von 50 Jahren nicht überschritten. Es gilt somit folgende inverse Verteilungsfunktion der Extremwertverteilung Typ 1:

$$F^{-1}(0,95121) = u - \frac{1}{a} (\ln(-\ln(0,95121))) = 4.341 \quad (9.8)$$

Die Parameter u und a ergeben sich dabei aus Erwartungswert m_x und Standardabweichung s_x wie folgt:

$$u = m_x - \frac{0,57721566}{a} \quad a = \frac{\pi}{s_x \sqrt{6}}$$

Aus der Annahme des Variationskoeffizienten ergibt sich s_x zu $0,15 \cdot m_x$. Durch Einsetzen und Umstellen ergibt sich daraus als Lösung:

$$m_x = 3.384,009,$$

$$s_x = 507,602.$$

Die Parameter der Extremwertverteilung für die Verteilungsfunktion der Jahresmaximalwerte kann damit direkt bestimmt werden. Es gilt:

$$a_{1a} = a_{50a},$$

$$u_{1a} = u_{50a} - \ln(50)/a_{1a}.$$

Daraus ergeben sich für die Funktion der Jahresmaximalwerte folgende Parameter:

$$\text{Erwartungswert} = 1.835,73 \text{ kNm},$$

$$\text{Standardabweichung} = 507,602 \text{ kNm}.$$

Analog dazu ergibt sich für das Feldmoment (MF) aus dem Ansatz des Lastmodells BK60 ein Wert von:

$$CW_{MF,BK60} = 4.897 \text{ kNm}$$

Die Parameter der Jahresmaximalwertverteilung ergeben sich dann zu:

$$\text{Erwartungswert} = 2.070,85 \text{ kNm},$$

$$\text{Standardabweichung} = 572,616 \text{ kNm}.$$

Beanspruchungen für aktuelles Tragsystem aus aktuellem Verkehr

Für die stochastischen Beschreibungen der Beanspruchungen aus reinem aktuellem Verkehr können die Parameter der Verteilungsfunktion (Extremwertverteilung Typ 1) aus den in Kapitel 8.4 ermittelten Ergebnissen entnommen werden. Die dabei betrachtete Kombination „K1“ beinhaltet aktuelle Verkehrscharakteristiken. Für die stochastische Beschreibung der Beanspruchungen im hier behandelten Beispielfall können diese Zahlenwerte daher verwendet werden.

Beanspruchungen für geschädigtes Tragsystem und zukünftigen Verkehr

Analog zum vorhergehenden Kapitel können die stochastischen Beschreibungen der Beanspruchungen aus zukünftigem Verkehr den in Kapitel

8.4 ermittelten Ergebnissen entnommen werden. Die Kombination „K3“ beinhaltet dabei zukünftige angenommene Verkehrscharakteristiken.

9.6.4 Ermittlung von Beanspruchungskollektiven aus Verkehr – Materialermüdung

Allgemeines

Die in den bisherigen Darstellungen genutzte Beispielbrücke ist eine auf Lehrgerüst hergestellte Spannbetonbalkenbrücke. Defizite infolge Materialermüdung sind weder infolge Biegung noch infolge Querkraft vorhanden. Deshalb ist diese Brücke als Beispiel ungeeignet.

Ermüdungsuntersuchungen für Brücken mit Ermüdungsdefiziten infolge Querkraft wurden von uns im Auftrag von Hessen Mobil durchgeführt [5]. Am Beispiel einer dieser Brücken, der Talbrücke Lützelbach, wird der Bewertungsvorschlag erprobt. Die Brücke hat 5 Felder mit Stützweiten von 44-58-58-58-44 m. Der Querschnitt ist ein Hohlkasten. Das Defizit beruht auf der Normenlage zur Entwurfszeit, die einen Nachweis der schiefen Hauptzugspannung forderte.

Beanspruchungskollektiv für das initiale Tragsystem

Entsprechend Kapitel 7.2 wird für das Beanspruchungskollektiv der Entwurfsphase das modifizierte Ermüdungslastmodell 4 der Nachrechnungsrichtlinie [15] angewendet. Für das Baujahr 1970 werden aus der Tabelle 10.5 der Richtlinie die Werte für die Verkehrsart „Große Entfernung“ entnommen.

Unter Berücksichtigung einer zweiten Lkw-Spur wird das jährliche Verkehrsaufkommen bei einer Erhöhung um 10 % mit $1,1 \cdot 10^6$ FZ/Jahr angesetzt. Als Kennwert wird die Querkraft am Endauflager ermittelt.

N _{obs} je Jahr für FS1		1,10 · 10 ⁶
Verkehrszusammensetzung [%]		
FZ ELM 4-1	(Typ 8)	20
FZ ELM 4-2	(Typ 9)	10
FZ ELM 4-3	(Typ 98)	20
FZ ELM 4-4	(Typ 97)	30
FZ ELM 4-5	(Typ 35)	20

Tab. 10: Verkehrszusammensetzung nach [15]

	ΔV	$\Delta \sigma$
	[kN]	[N/mm ²]
FZ ELM 4-1	184,10	24,04
FZ ELM 4-2	283,76	37,06
FZ ELM 4-3	406,08	53,03
FZ ELM 4-4	316,93	41,39
FZ ELM 4-5	352,45	46,02

Tab. 11: Schwingbreiten der Querkräfte für T_{10}

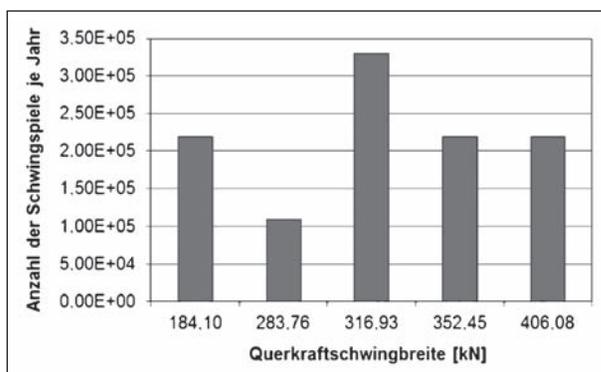


Bild 64: Beanspruchungskollektiv der Querkräfteschwingbreiten je Jahr für das initiale Tragsystem

Die Ermittlung des Beanspruchungskollektives des initialen Tragsystems T_{10} für die Überfahrten der einzelnen Fahrzeuge des Ermüdungslastmodells folgende Schwingbreiten der Querkräfte und der Stahlspannungen in der Querkraftbewehrung bei einem Querkraftbewehrungsgrad von 0,15 % (vgl. Tabelle 11). Das Beanspruchungskollektiv ergibt die in Bild 64 dargestellte Form.

Beanspruchungskollektiv für das aktuelle Tragsystem und den aktuellen Verkehr

Mit Eingangsparametern des aktuellen Verkehrs der A 45 wurden Verkehrssimulationen durchgeführt und Kennwert-Zeitverläufe berechnet. Es wurden 5 Realisationen des Verkehrs simuliert und aus den Kennwert-Zeitverläufen der Querkraft am Endauflager die Querkraftschwingbreiten ΔV mittels Rainflow-Auswertung bestimmt. Die Simulationsdauer betrug jeweils 5 Tage.

Aus der Rainflow-Auswertung wurde für jede Realisation das Beanspruchungskollektiv ermittelt. Beispielhaft ist das Kollektiv für die erste Realisation in Bild 65 dargestellt.

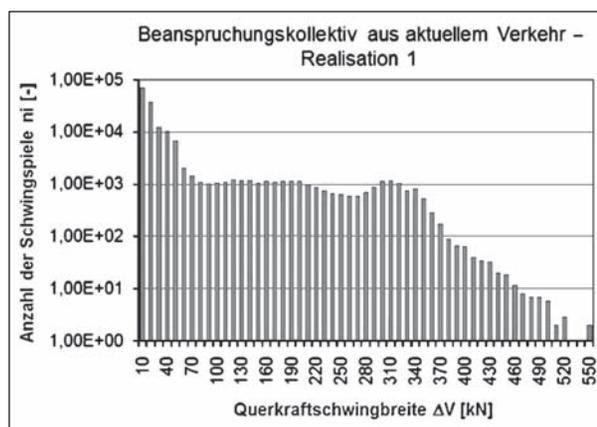


Bild 65: Beanspruchungskollektiv der Querkraftschwingbreiten für den aktuellen Verkehr aus der Verkehrssimulation

9.6.5 Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten, Sicherheitsindices

Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt entsprechend dem Schema im Kapitel 9.5.5. Als Grenzzustand wurde Versagen auf Biegung im Bemessungsquerschnitt (siehe oben) gewählt. Dazu werden vier verschiedene Tragsystemmodelle aufgestellt und verwendet.

Wahl der Tragsystemmodelle

Entsprechend Kapitel 6.4 sind vier unterschiedliche aufeinander aufbauende mechanische Systeme das ideale initiale Tragsystem und entspricht somit dem in Kapitel 9.6.1 beschriebenen Modell ($E_0 = 30.500 \text{ N/mm}^2$).

Durch Systemidentifikation erfolgt eine Anpassung dieses Systems an das reale Tragsystem, sodass beide die gleichen Systemantworten liefern. Im Beispiel wurde für das 2. Modell ein Elastizitätsmodul von $E_1 = 66.838 \text{ N/mm}^2$ verwendet.

Modell 4 ergibt sich aus Modell 2 durch Initiierung einer virtuellen prognostizierten Schädigung im Stützenbereich der Achse 30. Es erfolgt, entsprechend Kapitel 8.3, eine Reduzierung des Elastizitätsmodules auf 10 % von E_1 .

In Modell 3 wird die Schädigung so weit erhöht, bis sich fast ein plastisches Gelenk (siehe Kapitel 8.3.3) bildet.

Die sich aus den Modellen ergebenden Schnittgrößen aus ständigen Lasten sind die charakteristischen Werte für die Ermittlung der stochastischen Einwirkungsmodelle in den folgenden Kapiteln.

Grenzzustandsfunktion

Für die Beschreibung des Versagens eines Spannbetonquerschnittes durch eine Grenzzustandsfunktion ist eine Zustandsfunktion nötig, welche das aufnehmbare Biegemoment $M_R(\mathbf{X})$ und einwirkende Biegemoment $M_E(\mathbf{X})$ in Relation stellt:

$$g(\mathbf{X}) = M_R - M_E \quad (9.9)$$

Der Grenzzustand ist erreicht, wenn die Differenz aus beiden null wird. Versagen tritt ein, wenn dieser überschritten und der Term negativ wird. In Bild 66 sind die Querschnitte, Dehnungen und sich ergebende Kräfte dargestellt für einen Spannbeton-Plattenbalkenquerschnitt unter Biegebelastung und Normalkraft.

Generell ist die Ermittlung der aufnehmbaren Kräfte eines Massivbauquerschnittes ein iterativer Prozess, in dem der Dehnungszustand so lange verändert wird, bis die Summe der inneren Kräfte (Momente und Normalkräfte) null ergibt. Unter folgenden Bedingungen lässt sich dennoch eine geschlossene Formel definieren:

- Die Höhe der Betondruckzone ist kleiner als die Höhe der Platten in einem T-Querschnitt bzw. es handelt sich um einen Rechteckquerschnitt,
- für den Spannungsverlauf in der Betondruckzone wird das Parabel-Rechteck-Diagramm angesetzt,
- die Betondehnung an der Oberkante des Querschnittes nimmt den Grenzwert von -3,5 ‰ ein, die Parabel-Rechteck-Form der Druckzone ist also vollständig ausgebildet,
- als Spannungs-Dehnungs-Verlauf für den Betonstahl und den Spannstahl wird eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie ohne Verfestigung im Fließbereich angesetzt,

- Betonstahl und Spannstahl befinden sich im Fließen.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich folgende Zustandsgleichung:

$$g(\mathbf{X}) = M_R - M_E$$

mit

$$M_R = U_{RM} \left(A_{su} \cdot f_{yu} \cdot (h - d_{su} - x_s) + A_{so} \cdot f_{yo} \cdot (x_{sp} - d_{so}) + A_p \cdot f_p \cdot (d_p - x_s) + F_c \cdot (x_s - a) \right) \quad (9.10)$$

$$M_E = U_{SM} \cdot M_e - U_{SN} \cdot F_p \cdot (h - d_{su} - x_s) \quad (9.11)$$

wobei

$$a = k_a \cdot x \quad \text{und}$$

$$x = \frac{A_{su} \cdot f_{yu} + A_p \cdot f_p - A_{so} \cdot f_{yo} - U_{RN} \cdot N_R}{\alpha_r \cdot \alpha \cdot f_c \cdot b} \quad (9.12)$$

$$N_R = N_e \quad (9.13)$$

$$F_c = \alpha_r \cdot \alpha \cdot f_c \cdot b \cdot x \quad (9.14)$$

mit den Einwirkungen

$$M_e = M_G + U_{SQ} \cdot M_Q + M_P \quad (9.15)$$

$$N_e = N_G + N_Q + N_P - F_p \quad (9.16)$$

wobei M_G , N_G die Schnittkräfte aus ständigen Lasten M_Q , N_Q aus Verkehr und M_P , N_P die indirekten Schnittkräfte aus der Vorspannung eines statisch unbestimmten Systems sind, d. h., die statisch unbestimmten Anteile F_p ist die Vorspannkraft selbst. A_{su} , A_{so} , A_p sind die Querschnittsflächen der Zug-, Druck- und Spannstahlbewehrung sowie f_{yu} , f_{yo} , f_p die entsprechenden Streckgrenzen des Stahles. Die Beiwerte nehmen für den Zustand, dass der Beton die Grenzdehnung von 3,5 ‰ erreicht hat, folgende Werte an: Abstandsbeiwert

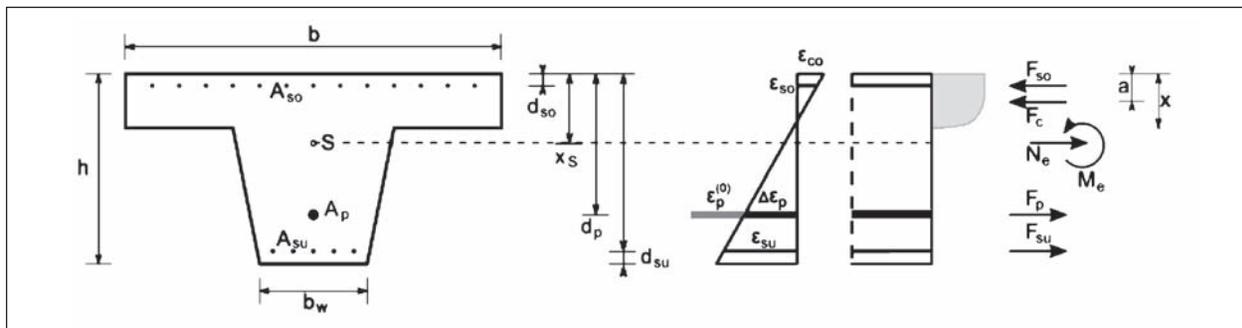


Bild 66: Plattenbalkenquerschnitt mit Dehnungszustand und resultierenden Kräften

$k_a = a/x = 0,416$, der Völligkeitsbeiwert der Druckzone $a_r = 0,8095$ und der Abminderungsfaktor der Langzeitwirkung der Betondruckfestigkeit $\alpha = 0,85$. Die Breite der Druckzone ist je nach Lage der Druckzone (Feld-, Stützmoment) gleich der mitwirkenden Breite des Plattenbalkenquerschnittes bzw. der Stegbreite zu setzen.

Alle aufgeführten Variablen können in der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchung unter Anwendung eines stochastischen Modells als streuend angenommen werden. Eine Annahme als deterministischer Wert ist ebenfalls möglich. In den nachfolgenden Untersuchungen ist der Umfang der untersuchten Basisvariablen, die als streuend angenommen werden, eingeschränkt.

Stochastisches Modell der Basisvariablen

- Stochastische Modelle der Einwirkungen

Auf Einwirkungsseite wurde das Modell auf zwei Basisvariablen reduziert; die Schnittmomente aus den ständigen Lasten M_G sowie dem Schnittmoment M_Q aus dem Verkehrsmodell. Die ständigen Lasten setzen sich zusammen aus Eigengewicht, Ausbaulasten Fahrbahnplatte und Ausbaulasten

Kappe. Für jede dieser Variablen ist eine eigenständige Zufallsvariable denkbar und auch Ansätze in der Literatur zu finden. Zur Reduzierung des stochastischen Raumes wurde diese jedoch zusammengefasst. Die ständige Lasten prägende Wichte von Stahlbeton wird gewöhnlich mit einer Normalverteilung und einem Variationskoeffizienten von $\nu = 0,04$ streuend berücksichtigt. Ausbaulasten wie Gesims und Kappenausbauten werden im Leben einer Brücke öfter erneuert oder ergänzt. Aus diesem Grunde werden für diese Lasten höhere Varianzen (bis $\nu = 0,1$) angenommen. Nimmt man zusätzlich noch eine Streuung der Geometrieabmessungen an, so erhöht sich der Variationskoeffizient für die Basisvariable Schnittkräfte aus ständigen Lasten M_G auf $\nu = 0,06$. Die Mittelwerte für die vier Modelle entsprechen den charakteristischen Schnittkraftmomenten (siehe Tabelle 12).

Die Ansätze für das stochastische Modell des Verkehrs und die sich ergebenden Verteilungen wurden ausführlich in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben. Erwähnenswert ist, dass für Modell 1 (initiales Tragsystem) die Ansätze aus Kapitel 9.6.3 („Beanspruchung für initiales Tragsystem“) verwendet wurden. Model 2 bis 4 verwenden die stochastischen Modelle K1, K2, K3 aus Kapitel 8.4.5. Dabei

Basisvariablen	Bezeichnungen	Festigkeiten [N/mm ²]			Biegemomente [kNm]	
		Druckfestigkeit Beton	Streckgrenze Baustahl	Streckgrenze Spannstahl	ständigen Lasten	Verkehr
	Symbol	f_c	f_y	f_p	M_G	M_Q
	Verteilungsfunktion Parameter ¹	LOGNORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	GUMBEL ²
Modell 1	m	33	480	1.530	9.692,97	2.070,85
	s	5,34	30	30	581,58	572,62
	v	0,1618	0,0625	0,0196	0,06	0,2765
Modell 2	m	Entsprechend Modell 1			9.819,10	2.100
	s				589,15	150
	v				0,06	0,0714
Modell 4	m				12.852,72	2.350
	s				771,16	275
	v				0,06	0,1170
Modell 3	m				15.025,43	2.600
	s				901,53	400
	v				0,06	0,1538

¹ m: Mittelwert; s: Standardabweichung; v: Variationskoeffizient;
² GUMBEL: Extremwertverteilung-Typ I (hier Gumbel Maximum bzw. Typ 1)

Tab. 12: Stochastische Parameter der Basisvariablen für alle 4 Tragsystemmodelle (vgl. Bild 7)

wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen verwendet, welche durch die Umhüllende in Bild 50 aufgespannt werden (siehe Tabelle 12).

- Stochastische Modelle der Widerstände

Der Widerstand, gegenüber Einwirkungen auf Querschnittsebene wird einmal durch die vorhandenen Querschnittsflächen, Abstände der Stahleinlagen und die Festigkeitskennwerte charakterisiert. Im aktuellen Beispiel wurden die Geometrieparameter als deterministisch angenommen. Ausschließlich die Streckgrenze von Stahl und des Spannstahles sowie die Druckfestigkeit von Beton

wurden mit stochastischen Modellen beschrieben, zur ausführlicheren Beschreibung siehe unter Kapitel 9.5.4 „Beanspruchung für initiales Tragsystem“. Die verwendeten Basisvariablen und Verteilungsparameter sind in Tabelle 12 gelistet.

- Ergebnisse

Die Tabelle 13 listet die Ergebnisse für die oben dargelegten 4 Tragsystemmodelle auf. Die Designpunkte, Sicherheitsindizes und Wichtungsfaktoren beruhen auf einer FORM-Analyse. Ermittelt wurden diese mit dem Computerprogramm optiSLang.

Symbol	Einheit	Modell 1	Modell 2	Modell 4	Modell 3
Charakteristische Werte					
f_c	[N/mm ²]	25,00	25,00	25,00	25,00
f_y	[N/mm ²]	420,00	420,00	420,00	420,00
f_p	[N/mm ²]	1.470,00	1.470,00	1.470,00	1.470,00
M_G	kNm	9.692,97	9.819,10	12.852,72	15.025,43
M_Q	kNm	4.897,00	2.840,33	3.707,27	4.574,20
Mittelwerte					
f_c	[N/mm ²]	33,00	33,00	33,00	33,00
f_y	[N/mm ²]	480,00	480,00	480,00	480,00
f_p	[N/mm ²]	1.530,00	1.530,00	1.530,00	1.530,00
M_G	kNm	9.692,97	9.819,10	12.852,72	15.025,43
M_Q	kNm	2.070,85	2.100,00	2.350,00	2.600,00
Designpunkt					
f_c	[N/mm ²]	24,05	12,98	16,97	23,36
f_y	[N/mm ²]	472,30	466,04	467,46	487,80
f_p	[N/mm ²]	1.535,94	1.551,13	1.548,54	1.528,36
M_G	kNm	10.324,64	11.822,23	14.421,89	17.000,95
M_Q	kNm	9.523,12	2.161,86	2.571,80	2.850,06
Wichtungsfaktoren α					
f_c		-0,323	-0,850	-0,865	-0,663
f_y		-0,044	-0,069	-0,089	0,083
f_p		0,034	0,105	0,132	-0,018
M_G		0,186	0,505	0,434	0,703
M_Q		0,926	0,086	0,195	0,245
Sicherheitsindex β, Versagenswahrscheinlichkeit					
β		5,840	6,736	4,688	3,119
P_f		2,607E-09	8,165E-12	1,381E-06	9,067E-04

Tab. 13: Ergebnisübersicht

- Interpretation der Ergebnisse

Es konnte beispielhaft gezeigt werden, dass beginnend mit dem initialen Modell des Tragsystems bis hin zum extrem geschädigten Modell Versagenswahrscheinlichkeiten auf Basis eines Versagenszenarios berechnet werden können. Das Modell 1 spiegelt den Planungszustand bzw. Bemessungszustand des Tragsystems wieder. Es wurde mit den damals gültigen Lastmodellen und Sicherheitskonzepten erstellt. Es ergibt sich, wie zu erwarten war, eine relativ niedrige Versagenswahrscheinlichkeit (hoher Sicherheitsindex). Die Weiterentwicklung und Anpassung des Modells an das reale System durch Monitoring und Systemidentifikation sowie Identifikation eines realen Verkehrsmodells auf Basis gemessener Daten verringern die Versagenswahrscheinlichkeit. Durch die Einführung von virtuellen Schädigungen, welchen prognostizierten oder identifizierten Schädigungen am Tragwerk entsprechen könnten, erhöhen sich die einwirkenden Schnittkräfte auf den betrachteten Bemessungsquerschnitt. Gleichzeitig werden aus Verkehrsprognosen erhöhte Einwirkungen aus Verkehr in Modell 4 angesetzt. Dies führt, wie zu erwarten war, zu größeren Versagenswahrscheinlichkeiten. Der angenommene Extremfall für den Grenzzustand aus Versagen mit lokalen Schädigungen, welcher im statisch unbestimmten Tragwerk zum fast vollständigen lokalen Biegesteifigkeitsverlust führt, ist in Modell 3 abgebildet. Kombiniert mit einer Prognose zu erhöhten Verkehrsaufkommen und Anpassung des stochastischen Verkehrsmodells, führt dies zwangsläufig zu der im Vergleich größten Versagenswahrscheinlichkeit und einem Sicherheitsindex, der unter allen anderen liegt.

In den Wichtungsfaktoren für die Festigkeiten zeigt sich ein großer Einfluss der Betondruckfestigkeit, bedingt aus dem größeren angesetzten Variationskoeffizienten, gegenüber den Stahlfestigkeiten und der Formulierung der Grenzzustandsfunktion. Die gleichen Tendenzen zeigen sich beim Vergleich der Wichtungsfaktoren der einwirkenden Biegemomente. Hier zeigen sich große Unterschiede in den Sen-

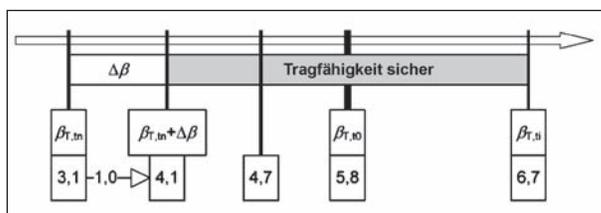


Bild 67: Bewertung der Tragfähigkeit

sitivitäten, obwohl beide Biegemomente kumulativ in die GZF eingehen. Im initialen Modell 1 hat die Einwirkung aus Verkehr, durch ihren großen Variationskoeffizienten, die größere Sensitivität gegenüber dem Grenzzustand. In den Modellen 2-4 wirkt der bis zu 6-mal größere Mittelwert der Biegemomente, aus ständigen Lasten gegenüber dem Verkehr, sich auf die Verteilung der Wichtungsfaktoren aus. Mit steigenden Variationskoeffizienten in den Verkehrsbelastungsmodellen erhöht sich aber auch dessen Einfluss. Grundsätzlich zeigen die Druckfestigkeiten und die einwirkenden Biegemomente die größte Sensitivität in Bezug auf das Erreichen des Grenzzustandes.

Das exemplarisch gezeigte Vorgehen an einem realen Tragwerk entsprechenden Tragsystemmodell mit gemessenen stochastischen Verkehrsmodellen und virtuell eingeführten Veränderungen bzw. Zuständen im Tragwerk zeigt, dass das Konzept der probabilistischen Bewertung des Tragwerks bzw. der Versagenszenarien Bewertungen der Tragfähigkeit erlaubt. Aber es bleiben viele Aspekte, wie zum Beispiel die Schädigungsentwicklung und deren Geschwindigkeit, die weiteren Untersuchungen bedürfen.

Dennoch zeigt das Ergebnis im vorliegenden Fall eine Brücke mit nachgewiesener Tragfähigkeit.

9.6.6 Ermittlung der Schädigungssummen und Restnutzungsdauern

Initiales Tragsystem

Mit der Wöhlerlinie nach DIN-Fachbericht 102 und der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner wird am initialen Tragwerk die jährliche akkumulierte Schädigung entsprechend Tabelle 14 ermittelt.

	Zeitpunkt t_0 – Entwurfsstadium			
	Gesamtzahl n_i [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N_{1J}	$D_{LM4,i}$
ELM 4-1	$2,20 \cdot 10^5$	24,04	$1,63 \cdot 10^{13}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$
ELM 4-2	$1,10 \cdot 10^5$	37,06	$3,32 \cdot 10^{11}$	$3,31 \cdot 10^{-7}$
ELM 4-3	$2,20 \cdot 10^5$	53,03	$1,32 \cdot 10^{10}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$
ELM 4-4	$3,30 \cdot 10^5$	41,39	$1,23 \cdot 10^{11}$	$2,69 \cdot 10^{-6}$
ELM 4-5	$2,20 \cdot 10^5$	46,02	$4,72 \cdot 10^{10}$	$4,66 \cdot 10^{-6}$
Summe	$1,10 \cdot 10^6$		Summe	$2,44 \cdot 10^{-5}$

Tab. 14: Schädigungen für das ELM-4-Endauflager je Jahr

Das bedeutet, bezogen auf einen Nutzungszeitraum von 100 Jahren beträgt die Ermüdungsschädigung $D_{T,t0}$ für die Querkraftbewehrung am Endauflager

$$D_{T,t0} = 100 \cdot 2,44 \cdot 10^{-5} = 0,00244.$$

Die dazugehörige Nutzungs- und auch Restnutzungsdauer beträgt normativ 100 Jahre.

Aktueller Verkehr

Die Schädigungen für den betrachteten Zeitraum werden aus den 5 Einzelrealisationen berechnet und in der Weiterverarbeitung der Mittelwert dieser verwendet. Die jährliche Schädigung wird aus der gemittelten Schädigung aus dem simulierten Zeitraum von 5 Tagen auf den Zeitraum von einem Jahr hochgerechnet (Tabelle 15 und Tabelle 16).

Die akkumulierte Schädigung für einen Nutzungszeitraum von 100 Jahren für die Querkraftbewehrung am Endauflager $D_{T,t1}$ für den aktuellen Verkehr beträgt damit

$$D_{T,t1,fließend} = 100 \cdot 6,19 \cdot 10^{-6} = 6,19 \cdot 10^{-4}$$

für fließenden Verkehr und

$$D_{T,t1,mit\ Stau} = 100 \cdot 7,628 \cdot 10^{-6} = 7,63 \cdot 10^{-4}$$

für den Verkehr mit Beimischung von Stauabschnitten. Die dazu gehörige Nutzungsdauer beträgt $(0,00244/0,000763) \cdot 100 = 320$ Jahre.

Es wird als Sicherheitselement ein Abstand ΔD von 0,001 eingeführt. Damit ergibt sich eine Grenzschädigungssumme von $0,00244 - 0,001 = 0,00144$ bei einer rechnerischen Nutzungsdauer von 100 Jahren.

Die dazugehörige Nutzungsdauer beträgt $(0,00144/0,000763) \cdot 100 = 188$ Jahre. Die Brücke hat bereits eine Nutzungsdauer von 40 Jahren und somit eine Restnutzungsdauer von 148 Jahren.

Eine Ermüdungsgefahr besteht nur, wenn die rechnerische Schädigungssumme zu einem bestimmten Nutzungszeitpunkt kleiner als die Grenzschädigungssumme abzüglich des Sicherheitsabstands ist.

Es kann somit gezeigt werden, dass die Bewertungsstrategie logische Werte ergibt. Notwendige Sicherheitsabstände sind jedoch mit dem Bauherrn abzustimmen.

10 Leitfaden zur Ausschreibung eines Monitoringsystems zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken

10.1 Bestandteile des Monitoringsystems

Im Folgenden wird ein Monitoringsystem beschrieben, welches für das Festigkeitsversagen und die Ermüdung einer bestehenden Brücke quantifizierte, aber unscharfe Aussagen erlaubt. Das Monitoring muss Daten liefern für eine Systemidentifikation und für die aktuellen Einwirkungen aus Verkehr und falls erforderlich Temperatur. Es sind zusätzliche Daten der Materialfestigkeiten und der Geometrien durch Vor-Ort-Untersuchungen zu ergänzen. Das Monitoringsystem setzt sich aus drei Komponenten zusammen, diese sind:

Realisation	1	2	3	4	5
Schädigung D_5	$1,235 \cdot 10^{-7}$	$1,262 \cdot 10^{-7}$	$1,251 \cdot 10^{-7}$	$1,210 \cdot 10^{-7}$	$1,237 \cdot 10^{-7}$
Gemittelte Schädigungssumme aus den 5 Realisationen $1,239 \cdot 10^{-7}$ Schädigungssumme je Jahr $6,195 \cdot 10^{-6}$					

Tab. 15: Schädigungen der Einzelrealisationen je 5 Tage fließender Verkehr – Querkraft Endauflager

Realisation	1	2	3	4	5
Schädigung D_5	$1,467 \cdot 10^{-7}$	$1,591 \cdot 10^{-7}$	$1,516 \cdot 10^{-7}$	$1,487 \cdot 10^{-7}$	$1,568 \cdot 10^{-7}$
Gemittelte Schädigungssumme aus den 5 Realisationen $1,526 \cdot 10^{-7}$ Schädigungssumme je Jahr $7,628 \cdot 10^{-6}$					

Tab. 16: Schädigungen der Einzelrealisationen je 5 Tage Stauverkehr – Querkraft Endauflager

- das Messsystem,
- das Auswertesystem,
- die Bewertung.

Dabei sind folgende Leistungen zu erbringen:

10.2 Leistungsbeschreibung

Pos. 1 – Tragwerksmodellierung

Modellierung der Brücke, wobei die Modellierung im Detail tragwerksabhängig ist. Die Modellierung erfolgt anhand von Bestandsplänen und unter Berücksichtigung von Tragwerksveränderungen und evtl. Schäden. Ermittlung von Kenngrößen des Tragwerks (Schnittgrößen, Dehnungen, Verdrehungen) an relevanten Stellen infolge verschiedener Verkehrsszenarien, Vorberechnung von Schnittgrößen und Tragwerksverformungen und/oder Eigenfrequenzen aus den Überfahrten der vorgesehenen Kalibrierfahrzeuge. Ermittlung von Zuverlässigkeitsindex und/oder Versagenswahrscheinlichkeit unter Ansatz des Tragwerksmodells und der stochastischen Beschreibungen von Einwirkungen und Widerständen entsprechend den Intentionen der Entwurfszeit. Ermittlung der Schädigungssumme bei entwurfszeitrelevantem Ansatz des Verkehrs. Bei fehlenden Informationen ist das Ermüdungslastmodell IV der Nachrechnungsrichtlinie [15] zu verwenden.

Pos. 2 – Messkonzept

Aufstellen eines geeigneten zeit- und ereignisbasierten Messkonzeptes für eine mindestens 3-monatige Dauermessung, die zu messenden Kennwerte müssen eine Systemidentifikation erlauben. Dazu sind globale Größen geeignet. Üblich sind Dehnungen des Haupt und Nebensystems oder entsprechende Beschleunigungen. Zur Ermittlung der Daten des aktuellen Verkehrs dienen ebenfalls globale und lokale Messgrößen wie Verformungen. Es wird empfohlen, aus den globalen Verformungen die Gesamtgewichte abzuleiten und aus den lokalen Verformungen die Fahrzeugidentifikation. Es sind zusätzliche Messungen zur Fahrzeugexistenz und zur Fahrzeuggeschwindigkeit erforderlich und es sind zusätzlich Temperaturkennwerte aufzunehmen. Darstellung der erwarteten Messgrößen, Festlegen der Messstellen und der Sensorik, Festlegen der Messfrequenz und Abstimmung mit dem Auftraggeber. Da es auch um die Ermittlung von

Verkehrsdaten geht, wird als Mindestmessfrequenz aller Verformungen 50 Hz empfohlen. Überprüfen der Randbedingungen vor Ort.

Pos. 3 – Kalibrierung des Systems

Erstellen eines Ablaufkonzeptes für die Kalibrierfahrten mit zwei unterschiedlichen Lkw, Koordination der Beteiligten, Vermessen der beiden zur Verfügung gestellten Lkw, Wiegen der Rad- und Achslasten, Durchführung der Kalibrierfahrten, Datenanalyse und Bewertung.

Pos. 4 – Modellanpassung

Analyse und Bewertung der Messergebnisse aus den Kalibrierfahrten zur Systemidentifikation, Anpassung des Tragwerkmodells nach Pos. 1 zur Übereinstimmung von Rechnung und Messung. Aufbereitung des Modells für die Verwendung im Erkennungsalgorithmus und Erstellung der Einflussflächen für eine Simulationsauswertung.

Pos. 5 – Laufende Messauswertungen

Fernüberwachung der Messeinrichtung, Sicherung der Messdaten, Qualitätskontrolle und Plausibilisierung, Sichtung und Aufbereitung der Messdaten, Auswertung mit Verkehrserkennung und statistische Aufbereitung der Verkehrsdaten. Auswertung im Sinne der Position 7 bis 9. Zugehöriger Messzeitraum: mindestens 3 Monate.

Pos. 7 – Temperaturmessungen

Aufbereitung der Temperaturmessungen, Auswertung und Interpretation, Darstellung charakteristischer Zeitverläufe, Berechnungen zur Temperaturkompensation bei der Ermittlung der Lastkollektive aus ermüdungswirksamen Verkehrslasten.

Pos. 8 – Aktuelles Lastmodell Verkehr und stochastische Beschreibung der Verkehrsbeanspruchung

Simulation von aktuellem Verkehr mit Begegnungsverkehr mittels der gewonnenen Verkehrsdaten und mittels gemessener Fahrzeugfolgen. Simulation weiterer Verkehrsvarianten. Berechnung von Zeitverläufen (dieser Teil wird deckungsgleich in Position 9 benutzt). Ermittlung der charakteristischen Werte für ausgewählte Kennwerte aus den Zeitverläufen aus den Messdaten und aus den Simulationen mit Prognoseannahmen. Ermittlung der

charakteristischen Werte aus den Lastmodellen von DIN 1072 und EC 1-2. Ableitung des aktuellen Lastbildes und der stochastischen Beschreibung von Verkehrsbeanspruchungen für die probabilistische Berechnung. Hinweise zur Ermittlung der stochastischen Beschreibung sind im Forschungsbericht FE 15.532/2011/HRB und in der dort aufgelisteten Literatur gegeben.

Pos. 9 – Versagenswahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeitsindex und Schädigungssummen aus aktuellen Messungen

Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit, des Zuverlässigkeitsindex und der Schädigungssumme unter Ansatz der aus den Messungen und Vor-Ort-Untersuchungen abgeleiteten stochastischen Beschreibungen von Einwirkungen und Widerständen. Nicht messtechnisch belegbare Einwirkungen und Widerstände sollten mit Angaben aus der Literatur formuliert werden.

Pos. 10 – Beanspruchungskollektiv Ermüdung

Rainflowauswertung der Zeitverläufe aus Pos. 8 zur Bereitstellung von Beanspruchungskollektiven. Berechnung der Schädigungssumme aus aktuellem und simuliertem Verkehr.

Pos. 11 – Ermittlung von objektspezifischem Zuverlässigkeitsindex, Versagenswahrscheinlichkeit und Schädigungssummen als Grenzwert

Die Positionen bis 10 sind unter Ansatz von versagensrelevanten Schädigungsszenarien zu wiederholen, um Grenzwerte bereitzustellen. Ansätze sind dem Forschungsbericht FE 15.532/2011/HRB entnehmbar.

11 Korrelation zu Nachrechnungs- und Erhaltungssystemen

11.1 Monitoringbasierte Nachrechnung

Die Nachrechnungsrichtlinie [15] dient der Nachweisführung für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bestehender Brücken. Es wird ein gestuftes Verfahren in 4 Stufen beschrieben, wobei die Stufen 3 und 4 sowohl Bauwerksmessungen als auch probabilistische Nachweisverfahren beinhalten. Der Weg zur monitoringbasierten Nachrechnung ist ge-

öffnet, wenn auch noch nicht in der hier konzipierten geschlossenen Form.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind aber sowohl die Methoden der Stufen 3 und 4 als auch das hier vorgestellte Konzept zum Monitoring zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer noch nicht an praktischen Beispielen erprobt.

Aktuell laufen Forschungsarbeiten zu Teilproblemen und es sind laufend neue Erkenntnisse zu erwarten.

Das hier vorgestellte Monitoringkonzept kann auf folgende Schnittstellen zur Nachrechnungsrichtlinie verweisen:

- Vorhandene Defizite wurden vorab durch eine Nachrechnung auf der Basis von [15] erkannt.
- Das tatsächliche Tragverhalten wird durch Bauwerksmessungen identifiziert (Stufe 3), globale Tragwerksschäden werden erkannt.
- Das Ziellastniveau aus [15] wird durch ein objektspezifisches Lastmodell ersetzt.
- Das Ermüdungslastmodell 4 wird durch ein objektspezifisches Beanspruchungskollektiv ersetzt.
- Durch eine stufenweise Ermittlung von Sicherheitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt eine quantifizierte, aber unscharfe Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer, wobei die mechanischen Modelle der Grenzzustandsfunktionen den mechanischen Modellen der Nachrechnungsrichtlinie entsprechen und teilweise linearisiert sind.
- Die Ermittlung von Sicherheitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit spannt einen Bereich des sicheren Tragwerkes auf und dieser wird scharf begrenzt.

Die Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeit und Sicherheitsindex führt automatisch auch zu Teilsicherheitsfaktoren. Die Anwendung dieser Teilsicherheitsfaktoren für die Nachweise im Rahmen der Nachrechnungsrichtlinie (NRR) ist möglich, setzt aber gegenwärtig den gesamten beschriebenen Prozess des Monitoringkonzeptes voraus. Die Ergebnisse sind objektspezifisch. Das hier beschriebene Monitoringkonzept beinhaltet die Stufen 3 und 4 der Nachrechnungsrichtlinie, ist aber weiter gefasst. Die vorhandene Tragfähigkeit und Ermü-

dungsfestigkeit werden einem eindeutigen Bereich zugeordnet und können demzufolge auch noch nachgewiesen werden, wenn die Ergebnisse der NRR nicht mehr eingehalten sind. Allerdings werden erforderliche einschränkende Annahmen erforderlich sein.

11.2 Das Monitoringkonzept und das BMS der BAST

Der Internetpräsenz der BAST (www.bast.de) ist zu entnehmen: „Um den Bestand von Brücken und Tunneln zu gewährleisten, sind Erhaltungsmaßnahmen erforderlich. Die Alterung der Bauwerke und die zunehmende Verkehrsbelastung erfordern einen erhöhten Bedarf für die Substanzerhaltung. Da nur begrenzte Geldmittel zur Verfügung stehen, ist eine bundesweit optimierte Erhaltungsplanung notwendig. Hierfür entwickelt die BAST ein Bauwerks-Management-System, kurz BMS.“

Grundlage jedes Bauwerks-Management-Systems sind Daten der Bauwerke. In Deutschland werden die Daten im Rahmen von Bauwerksprüfungen durch die Straßenbauverwaltungen der Länder erhoben. Die Daten sind zum Zweck der objektiven Vergleichbarkeit strukturiert.

Über das beschriebene Monitoring werden Daten zum aktuellen Verkehr, zur gleichzeitig wirkenden Temperatur, Systemkennwerte des Tragwerks, zu den Kennwerten Sicherheitsindex, Versagenswahrscheinlichkeit, Schädigungssumme und Restlebensdauer bereitgestellt. Daten des aktuellen Verkehrs sind:

- Verkehrszusammensetzung
 - Verkehrsstärke,
 - Gesamtgewichtsverteilungen,
 - Achslastverteilung,
 - Achsabstände,
 - Fahrzeugabstände,
 - Spurbelegung.

Daten der gleichzeitig wirkenden Temperatur sind

- zum Verkehr zugehörige Temperaturverteilungen,
- linearer Temperaturgradient,
- Ausdehnungskoeffizient.

Systemkennwerte können sein:

- globale Steifigkeiten,
- Federkennlinien für die Lagerung.

Ein mögliches Einpflegen dieser Daten in das BMS und deren Weiterverwendung können nur in Zusammenarbeit mit der BAST erfolgen.

Dies setzt jedoch auch Erweiterungen der gegenwärtig verfügbaren Algorithmen im BMS voraus, damit die Daten eine Umsetzung erfahren können.

12 Zielstellung und Ergebnis – ein Quervergleich

12.1 Zielstellung nach Kapitel 2

Projektziel ist die Entwicklung eines Konzeptes für ein Monitoringsystem, welches für konkrete Versagensszenarien – das Festigkeitsversagen und die Ermüdung – quantifizierte, aber unscharfe Aussagen zur Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer für eine Brücke erlaubt

12.2 Ergebnis am Projektende

Die quantifizierten, aber unscharfen Aussagen zur Tragfähigkeit eingeschränkter Versagensarten sind:

- die scharfe Einordnung des untersuchten Querschnittes der Brücke in den Bereich sicher oder unsicher,
- eine unscharfe Angabe zum noch vorhandenen Abstand zum Übergang in die Unsicherheit.

Die quantifizierten, aber unscharfen Aussagen zur Restnutzungsdauer sind

- die scharfe Einordnung der untersuchten Kenngröße hinsichtlich Versagens infolge wirklichkeitsnaher Verkehrsbeanspruchung,
- die unscharfe Einordnung der Restlebensdauer.

Es ist nicht möglich, einen Ermüdungsbruch infolge schleichend zunehmender Materialfestigkeit vorherzusagen.

13 Literatur

- [1] Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 (Schlussbericht FE 96.0857/2005) (Forschungsbericht). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007
- [2] Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050 (Schlussbericht FE 26.0185/2006) (Forschungsbericht). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007
- [3] DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken. Beuth Verlag GmbH; 2009
- [4] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. Beuth Verlag GmbH; 2009
- [5] Ermittlung ermüdungsrelevanter Straßenverkehrslasten für Bestandsbrücken. Untersuchung im Auftrag von Hessen, Mobi-, Straßen- und Verkehrsmanagement. Dezernat Planung Ingenieurbauwerke. Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt, Weimar, 2013
- [6] ALLEMANG, R.: The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse. In: *Sound and Vibration* (2003) S. 14-21
- [7] BAILEY, S. F.: Basic principles and load models for the structural safety evaluation of existing road bridges. École polytechnique fédérale de Lausanne, Dissertation, 1996
- [8] BENNISON, P.: Repair and Protection of Reinforced Concrete Bridges – Concrete Bridge Engineering – Performance and Advances: Science, London-New York, 1987
- [9] BERGER, R., FRITZ, M.: Entwicklung der Fernüberwachungssysteme. In: *Messtechnik im Bauwesen*, Ernst & Sohn (2010)
- [10] BERGMEISTER, K., WENDNER, R.: Monitoring und Strukturidentifikation von Betonbrücken. In: *Betonkalender 2010-1*, 2010
- [11] BLAB, R., LITZKA, J., KALINA, T., NEUMAYR, T.: Europäischer Test von Achslastwiegesystemen. In: *Straßenforschung*, Heft 540. Wien: Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2004
- [12] Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (Ausgabe 2002), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- [13] Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)
- [14] Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ)
- [15] Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)
- [16] BOGATH, J., BERGMEISTER, K.: Neues Lastmodell für Straßenbrücken. In: *Bauingenieur* 74 (1999), Heft 6, S. 270-277
- [17] BÖNING, S.: Analyse zur Simulation des Straßenverkehrs und der Auswirkungen des Verkehrs auf Brücken. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit, 2006
- [18] BÖNING, S.: Entwicklung einer geschlossenen Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehrs. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2013
- [19] BRAML, T.: Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2010
- [20] BRAML, T., WURZER, O.: Probabilistische Berechnungsverfahren als zusätzlicher Baustein der ganzheitlichen Bewertung von Brücken im Bestand. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012), Heft 10, S. 654-668
- [21] BREHM, M.: Vibration-based model updating: Reduction and quantification of uncertainties. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2010
- [22] BREITUNG, K.: Asymptotic Approximations for Multinormal Integrals. In: *Journal of Engineering Mechanics* 110 (1984), Heft 3, S. 357-366
- [23] BUCHER, C.: Computational Analysis of Randomness in Structural Mechanics: Structures and Infrastructures Book Series, Vol. 3: CRC Press, 2009
- [24] BÜCHNER, U.: Ein kennwertbezogenes Monitoringsystem für Brücken – Grundlagen und

- praktische Empfehlungen. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit, 2007
- [25] BUSCHLINGER, M.: Schwingungsanalyse BRIMOS – ein neues Verfahren zur Bauwerksüberwachung. In: Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), Heft 12, S. A4-A8
- [26] CLORMANN, U. H., SEEGER, T.: Rainflow-HCM. Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage. In: Stahlbau 55 (1986), Heft 3, S. 65-71
- [27] CORNELL, C. A.: A Probability-Based Structural Code. In: Journal Proceedings 66 (1969), Heft 12, S. 974-985
- [28] CURBACH, M., LOOS, S., PROSKE, D.: Anpassungsfaktoren für das Lastmodell 1 des DIN-Fachberichtes 101 für gewichtsbeschränkt beschilderte Straßenbrücken. In: Beton- und Spannbetonbau 100 (2005), Heft 7, S. 590-598
- [29] Norm DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen. Beuth Verlag, Fassung 12/1985
- [30] Norm DIN 1055-7: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 7: Temperatureinwirkungen. Beuth Verlag, Fassung 11/2002
- [31] Norm DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag: Fassung 12/2010
- [32] Norm DIN EN 1991-1-5: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen. Beuth Verlag, Fassung 12/2010
- [33] Norm DIN EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Beuth Verlag, Fassung 12/2010
- [34] EICHINGER, E.-M.: Beurteilung der Zuverlässigkeit bestehender Massivbrücken mit Hilfe probabilistischer Methoden. Wien: Technischen Universität Wien, 2003
- [35] FABER, M. H.: Risk and Safety in Civil Engineering. In: Institut of Technology Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009
- [36] FISCHER, A. M.: Bestimmung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte zur Semiprobabilistischen Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen im Bestand. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2011
- [37] FREUNDT, U., BÖNING, S.: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen, Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung (Zwischenbericht FE 15.0499/2010/FRB) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011
- [38] FREUNDT, U., BÖNING, S.: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 82. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2011
- [39] FREUNDT, U., BÖNING, S.: Anpassung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an Eurocodes – Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 77. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2011
- [40] FREUNDT, U., BÖNING, S., KASCHNER, R.: Einwirkungen aus Straßenverkehr für Bestandsbrücken. In: Bauingenieur 87 (2012), Heft 1, S. 10-14
- [41] FREUNDT, U., VOGT, R., PIERSON, C., BÖNING, S., EHRLE, P.: Roadtraffic Management System RTMS (Schlussbericht FE 88.0106/2010) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012
- [42] GEIßLER, K.: Auswirkungen der Zulassung von 60t-Lkw auf Brückenbauwerke im Zuge der Bundesfernstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 68. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2009
- [43] HAARDT, P.: Erhaltungsmanagement für Ingenieurbauwerke. Proceedings of the 2003 Kongress „Flüsse, Kanäle, Häfen: Kernelemente der Wirtschaftsinfrastruktur“, 2003

- [44] HANSEN, M.: Zur Auswirkung von Überwachungsmaßnahmen auf die Zuverlässigkeit von Betonbauteilen. Universität Hannover, 2004
- [45] HOFFMANN, S.: System identification by directly measured influence lines. A user orientated approach for global damage identification at reinforced concrete bridges. University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, Dissertation, 2008
- [46] JIRASEK, M., BAZANT, Z.: Inelastic Analysis of Structures: Jon Wiley & Sons, 2001
- [47] Joint committee on structural safety: Probabilistic Model Code, 12th draft. 2011
- [48] KASCHNER, R.: Auswirkungen des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 68. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2009
- [49] KRAJCINOVIC, D.: Damage mechanics. 1996
- [50] MAURER, R., HEEKE, G., KIZILTAN, H., KOLODZIEJCZYK, A., ZILCH, K., DUNKELBERG, D.: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 89. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2012
- [51] MELCHERS, R. E.: Structural reliability analysis and prediction. Chichester, New York: John Wiley, 1999
- [52] MERZENICH, G.: Entwicklung eines europäischen Verkehrsmodells für die Bemessung von Straßenbrücken. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 1994
- [53] NIKOLAIDIS, E., GHIOCEL, D. M., SINGHAL, S.: Engineering Design Reliability Handbook. CRC Press, 2004
- [54] NOVÁK, B., BROSIGE, S., BARTHEL, K., PFISTERER, W.: Anpassung des Verkehrslastmodells des DIN-FB 101 für kommunale Brücken. In: Beton- und Spannbetonbau 102 (2007), Heft 5, S. 271-279
- [55] RVS 13.03.01: Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken
- [56] PEIL, U.: Bauwerks-Überwachung. Online im Internet: <http://www.ipu-bs.de/index.php?id=88> (aufgerufen am 17.04.2013)
- [57] PEIL, U., FRENZ, M.: Lebensdauervorhersage von ermüdungsbeanspruchten Bauwerken durch Monitoring und begleitende Versuche. In: SFB 477, Berichtskolloquium 2006 (2006)
- [58] RACKWITZ, R.: Einwirkungen auf Bauwerke. In: Der Ingenieurbau: Tragwerkszuverlässigkeit, Einwirkungen: Ernst & Sohn Verlag, 1996
- [59] RACKWITZ, R.: Reliability analysis – a review and some perspectives. In: Structural Safety 23 (2001), Heft 4, S. 365-395
- [60] RACKWITZ, R.: Zuverlässigkeit und Lasten im konstruktiven Ingenieurbau. Technische Universität München, 2006
- [61] RINNE, H.: Taschenbuch der Statistik. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2003
- [62] ROOS, D.: Approximation und Interpolation von Grenzzustandsfunktionen zur Sicherheitsbewertung nichtlinearer Finite-Elemente-Strukturen. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2001
- [63] SANTA, U., BERGMEISTER, K., STRAUSS, A.: Bauwerksüberwachung der Autobahnbrücke Gossensaß. In: Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), Heft 12, S. 975-984
- [64] SOHN, H. F., C., HENZ, F. et al.: A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2003
- [65] SPAETHE, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Springer, Wien, New York, 1992
- [66] SPULER, T., MOOR, G., BERGER, R.: Structural health monitoring – saving disruptive works on urban bridges. Proceedings of the 2010 IABSE Symposium 2010
- [67] STRAUSS, A.: Stochastische Modellierung und Zuverlässigkeit von Betonkonstruktionen. Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation, 2003

-
- [68] STRAUSS, A., KALA, Z., BERGMEISTER, K., HOFFMANN, S., NOVÁK, D.: Technologische Eigenschaften von Stählen im europäischen Vergleich. In: Stahlbau 75 (2006), Heft 1, S. 55-60
- [69] von SCHOLTEN, C. et al.: Reliability-Based Classification of the Load Carrying Capacity of Existing Bridges. Road Directorate, Ministry of Transport, Denmark, 2004
- [70] WOOD, J. G. M., JOHNSON, R. A., ELLINAS, C.: Reliability Analysis Applied to Deteriorating Bridge Structures – Bridge Management. Elsevier Science, London, New York, 1990
- [71] ZABEL, V.: Applications of Wavelets Analysis in system identification. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2003

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

Krause, Rath, Sawade, Dumat

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2

Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

Steinauer, Mayer, Kündig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 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, Staeck

€ 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff

Eilers

€ 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau

Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4

Bramshuber, Spörel, Warkus

€ 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 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

Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 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

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 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“

Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller,

Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,

Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien

Kuhlmann, Günther, Krauss

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung

Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 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 € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive „Tube-in-Tube“-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

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.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

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.