



INSTITUT FÜR  
BAUINGENIEURWESEN

# ENTWERFEN UND KONSTRUIEREN STAHLBAU

Nico Steffens

## Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring

26

Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Berlin

Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen  
Book Series of the Department of Civil Engineering  
Technische Universität Berlin

Herausgeber:

Editors:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt

Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz

Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Prof. Dr.-Ing. Matthias Sundermeier

Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt

Shaker Verlag

Düren 2019



# Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring

vorgelegt von  
Dipl.-Ing.  
Nico Mario Steffens  
geb. in Berlin

von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 25. September 2019

Berlin 2019



Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen  
Book Series of the Department of Civil Engineering  
Technische Universität Berlin

Band 26

**Nico Steffens**

**Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken  
durch Bauwerksmonitoring**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag  
Düren 2019

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2019

### **Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring**

Dissertationsschrift von Nico Steffens  
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt  
der Technischen Universität Berlin

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler  
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 25.09.2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7051-4

ISSN 1868-8357

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Forschungstätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau der Technischen Universität Berlin in der Zeit von 2012 bis 2019.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler für die Betreuung meiner Arbeit, die fortwährende Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen hinsichtlich der vielschichtigen mir übertragenen Aufgaben. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer möchte ich mich für das Interesse an dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna danke ich für seine Bereitschaft, den Vorsitz des Promotionsausschusses zu übernehmen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet Stahlbau danke ich für die schöne Zeit, für die fachlichen Diskussionen sowie für die angenehme Arbeitsatmosphäre. An dieser Stelle möchte ich Herrn Dr.-Ing. Sebastian Krohn danken, der mich beginnend mit der Diplomarbeit an das Thema der Bauwerksmessungen herangeführt hat. Weiterhin möchte ich Herrn Ing. grad. Hilmar Wenke, Herrn M. Sc. Svetoslav Tonov sowie Frau M. Sc. Marie Breidenbach für deren Unterstützung bei den Installationen der Messanlagen, teilweise unter widrigsten Bedingungen, besonders danken.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Ronald Stein sowie Herrn Dipl.-Ing. Jochen Rodemann von der GMG Ingenieurgesellschaft bedanke ich mich für die Erfahrungen und Kenntnisse, die ich während der vielen Außeneinsätze im Rahmen von Bauwerksmessungen, der Projektarbeit sowie der vielen fachlichen Gespräche mit ihnen erlangen durfte.

Für die vertrauensvolle und angenehme Zusammenarbeit sowie die Unterstützung meiner Arbeit bedanke ich mich insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. Gert Gommola sowie Herrn Dipl.-Ing. Andreas Hüllhorst der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Für die Möglichkeit der praktischen Anwendung der entwickelten Methoden an konkreten Brückenbauwerken und dem damit verbundenen Vertrauen sowie der Unterstützung möchte ich stellvertretend Herrn Dipl.-Ing. Kay Degenhardt und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Forbriger vom Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg sowie Herrn Dipl.-Ing. Jens Barthel und Herrn Dipl.-Ing. Frank Teuber von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umwelt und Klima danken.

Schließlich bin ich meiner Familie für das Fundament meines Lebens dankbar. Dieses ist die Basis dieser Arbeit. Für den täglichen Einsatz und die liebevolle Hingabe meiner Frau Katrin für unsere beiden Kinder gilt mein größter Dank und mein höchster Respekt. Ihr bedingungsloser Rückhalt, ihr Verständnis und ihre Motivation waren außerdem die Voraussetzung für die Entstehung dieser Arbeit. Meinen beiden bezaubernden Kindern Charlotte und Maximilian bin ich jeden Tag für ihr Lachen und ihre Lebensfreude sowie die Erkenntnis über das wirklich Wichtige dankbar.

Nico Steffens  
Berlin, Oktober 2019



## Kurzfassung

Bei der Bewertung bestehender Brücken wird zunehmend ein unterstützendes Bauwerksmonitoring eingesetzt. Hierdurch lassen sich die tatsächlichen Beanspruchungen am Tragwerk infolge der äußeren Einwirkungen sehr gut erfassen. Außerdem ist es möglich, aus den gemessenen Reaktionen des Tragwerks infolge einer überquerenden Verkehrslast das Fahrzeug hinsichtlich Geschwindigkeit, Achskonfiguration und Gewicht zu identifizieren. Bisher ungeklärt ist die Frage, wie die zusätzlich gewonnenen Informationen im Rahmen des Sicherheitskonzeptes verarbeitet werden können.

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur systematischen Integration von Messdaten in das bestehende Sicherheitskonzept vorgestellt. Die Methodik wird dabei allgemein entwickelt, ist jedoch immer im Einzelfall objektspezifisch anzuwenden.

Es wird gezeigt, wie im Sinne einer Datenreduktion aus den gemessenen Dehnungs-Zeit-Verläufen durch eine Extremwertanalyse die statistischen Parameter der Beanspruchung extrahiert werden können. Diese statistischen Parameter werden im Weiteren in allgemeinen probabilistischen Berechnungen verarbeitet. Das Ergebnis ist das vorhandene Zuverlässigkeitsniveau in Form der operativen Versagenswahrscheinlichkeit bzw. des Zuverlässigkeitsindex unter Hinzuziehung gemessener Beanspruchungen.

Des Weiteren wird eine vereinfachende Methodik aufgezeigt, mit der Folgendes begründet werden kann:

- objektspezifische Lastmodelle zur Abbildung des tatsächlichen Verkehrs
- zugehörige objektspezifische Sicherheitselemente zur Wahrung des normativ geforderten Zuverlässigkeitsniveaus

Grundlage der Methodik sind die mittels Bauwerksmonitoring gewonnenen Daten bzgl. Einwirkung bzw. resultierender Beanspruchung. Auf die Berücksichtigung zukünftiger Verkehrsentwicklungen sowie die Einflüsse einer reduzierten Restnutzungsdauer wird dabei eingegangen.

Die praktische Umsetzung kann durch erstellte Diagramme erfolgen. Anhand der mittels Bauwerksmonitoring ermittelten statistischen Parameter der Beanspruchung können messwertgestützte charakteristische Werte und Sicherheitselemente grafisch abgelesen werden.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte sicherheitsäquivalente Bewertung durch Bauwerksmonitoring schafft ein zusätzliches systematisch anwendbares Werkzeug bei der Bewertung der Vielzahl bestehender Brücken. Hierdurch wird ein priorisierender und ökonomisch sinnvoller Umgang mit den bestehenden Brücken ermöglicht.



## **Abstract**

For assessment of existing structures more and more supporting measurements are used. Thus, the actual stresses on the structure can be very well captured due to the external forces. Furthermore it is possible to identify crossing vehicles with regard to speed, axle configuration and weight. So far, the question is still unresolved how the additional information from structural measurements can be handled within the safety concept in the codes.

This thesis introduces a method of systematic integration of measurement data into the existing safety concept. This method is developed in general, but it always has to be applied according to the specific object.

At first it is indicated how, in the sense of data reduction, the statistical parameters of the stress can be extracted from the measured strain time history by means of an extreme value analysis. These statistical parameters are further used to perform general probabilistic calculation. The result is the existing reliability level in form of the operative failure probability respectively in form of the reliability index in consideration of measured stresses.

Furthermore, a simplifying methodology is shown that justifies the following:

- object-specific load models to represent the actual traffic
- associated object-specific safety elements for maintaining the normatively required reliability level

The basis of the methodology is the data, regarding to external loads or resulting stress, obtained by means of structural measurements. The consideration of future traffic developments as well as the effects of a reduced remaining service life will be considered.

The practical implementation can be done by created diagrams. Measurement value based characteristic values and safety elements can be graphically read on the basis of the structural stress parameters determined by structural measurements.

The safety equivalent assessment by structural monitoring developed in this thesis creates an additional systematically applicable tool for the evaluation of the large number of existing bridges. This makes an economically and prioritized use of the existing bridges possible.



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis .....	XII
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	XV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehensweise.....	4
<b>2 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie .....</b>	<b>6</b>
2.1 Grenzzustand und Versagenswahrscheinlichkeit.....	7
2.1.1 Allgemein .....	7
2.1.2 Originalraum und Standardraum .....	7
2.1.3 Operative Versagenswahrscheinlichkeit .....	11
2.2 Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex .....	13
2.3 Ausgewählte Verteilungsfunktionen .....	17
2.3.1 Wichtige statistische Kenngrößen .....	17
2.3.2 Normalverteilung .....	19
2.3.3 Logarithmische Normalverteilung .....	20
2.3.4 Extremwertverteilungen zur Abbildung zeitabhängiger Prozesse .....	21
2.4 Stochastische Beschreibung der Widerstandsseite .....	31
2.4.1 Baustahl .....	32
2.4.2 Spannstahl .....	32
2.4.3 Betonstahl.....	33
2.4.4 Beton .....	34
2.5 Stochastische Beschreibung zeitabhängiger Einwirkungen .....	35
2.6 Grundlagen der Einwirkungskombinationen.....	36
2.7 Grenzzustandsgleichungen aus dem mechanischen Modell.....	38
2.7.1 Modellunsicherheit.....	39
2.7.2 Tragsicherheit.....	42
2.7.3 Ermüdungssicherheit .....	51
<b>3 Grundlagen des normativen Sicherheitskonzeptes .....</b>	<b>58</b>
3.1 Allgemeines .....	58
3.2 Bemessungskonzept im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	60
3.2.1 Ständige Lasten .....	60
3.2.2 Lastmodell 1 zur Abbildung der Verkehrslasten.....	60
3.2.3 Lastmodelle älterer Normengenerationen .....	65
3.2.4 Normative Temperaturlastansätze.....	66

3.2.5	Herleitung des Teilsicherheitsbeiwertes.....	68
3.2.6	Normativer Teilsicherheitsbeiwert .....	71
3.2.7	Herleitung des Kombinationsbeiwertes .....	71
3.2.8	Normative Kombinationsbeiwerte .....	75
3.3	Bemessungskonzept der Ermüdungssicherheit.....	76
3.3.1	Ansatz der Wöhlerlinie in den baustoffspezifischen Normen.....	77
3.3.2	Nachweis über schadensäquivalente Spannungsschwingbreite .....	79
3.3.3	Grundlagen zur Einordnung der Ermüdungslastmodelle .....	80
3.3.4	Ermüdungslastmodell 3 gemäß DIN-FB 101 und DIN EN 1991-2 .....	80
3.3.5	Ermüdungslastmodell 4 gemäß DIN EN 1991-2 .....	83
3.3.6	Normative Temperaturlastansätze bei Massivbrücken .....	85
3.4	Spezifika des Sicherheitskonzeptes für Bestandsbauwerke.....	87
3.5	Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand .....	90
3.5.1	Teilsicherheitsbeiwerte.....	91
3.5.2	Kombinationsbeiwerte .....	93
3.5.3	Ziellastniveau für den Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	93
3.5.4	Ermüdungslastmodell.....	95
3.5.5	Temperaturlast bei Ermüdungsberechnungen von Spannbetonbrücken .....	96
3.6	Weitere Regelwerke für den Bestand .....	97
<b>4</b>	<b>Bauwerksmessungen an Brücken.....</b>	<b>98</b>
4.1	Messtechnische Grundlagen .....	98
4.1.1	Differenzierung nach Einsatzart.....	98
4.1.2	Komponenten und Aufbau des Messsystems.....	99
4.1.3	Regelwerke und Richtlinien .....	110
4.2	Systemmessungen als Kurzzeitmessung.....	111
4.2.1	Kalibrierung des Berechnungsmodells.....	111
4.2.2	Erfassung der mitwirkenden Breite.....	113
4.3	Bauwerksmonitoring als Dauermessung .....	114
4.3.1	Messung der Tragwerksbeanspruchung infolge Verkehrs .....	115
4.3.2	Lasterfassung.....	117
4.3.3	Messung der Temperatur.....	123
4.3.4	Datenauswertung.....	124
4.3.5	Datenmanagement .....	125
4.3.6	Energieverbrauch .....	126
4.4	Erforderliche Messdauer.....	128
4.4.1	Aussagen bezüglich der Tragsicherheit.....	128
4.4.2	Aussagen bezüglich der Ermüdungssicherheit.....	130
4.5	Möglichkeiten zur messwertgestützten Modifikation des Sicherheitskonzeptes ..	130
<b>5</b>	<b>Allgemeine probabilistische Nachweise bei gemessener Beanspruchung .....</b>	<b>133</b>
5.1	Allgemeines .....	133
5.2	Klassierung im Histogramm .....	134

5.3	Stochastische Beschreibung der Verkehrsbeanspruchung.....	135
5.3.1	Extremwertanalyse für die Tragfähigkeit.....	135
5.3.2	Extrapolation hinsichtlich der Tragsicherheit .....	136
5.3.3	Beanspruchungskollektiv hinsichtlich der Ermüdungssicherheit .....	138
5.3.4	Schnittgrößen als Eingangsgröße der Grenzzustandsgleichung.....	139
5.4	Stochastische Beschreibung der Temperaturbeanspruchung.....	140
5.4.1	Extremwertanalyse für die Tragfähigkeit.....	140
5.4.2	Extrapolation hinsichtlich der Tragsicherheit .....	141
5.4.3	Ansatz der Temperatur als Begleiteinwirkung.....	142
5.4.4	Zeitkontinuierliche Betrachtung bei Ermüdung .....	142
5.5	Beispiel 1 – Verbundbrücke im GZT .....	144
5.5.1	Gemessene Beanspruchung.....	145
5.5.2	Statistische Parameter maßgebender Eingangsgrößen für die Zuverlässigkeitsanalyse .....	148
5.5.3	Querschnittstragfähigkeit .....	148
5.5.4	Probabilistische Berechnung .....	148
<b>6</b>	<b>Vereinfachende Methodik zur sicherheitsäquivalenten Bewertung von Brücken ...</b>	<b>150</b>
6.1	Nachweis der Tragsicherheit .....	150
6.1.1	Nachrechnungszeitraum .....	151
6.1.2	Objektspezifisches Lastmodell.....	152
6.1.3	Modifizierter Teilsicherheitsbeiwert für das Lastmodell .....	156
6.1.4	Verkehrsentwicklung .....	158
6.1.5	Modifizierte Sicherheitselemente für Temperatur .....	164
6.1.6	Beispiel 2 – Spannbetonbrücke – Nachrechnungszeitraum .....	167
6.1.7	Beispiel 3 – Verbundbrücke .....	170
6.2	Nachweis der Ermüdungssicherheit .....	172
6.2.1	Objektspezifisches Ermüdungslastmodell 3.....	172
6.2.2	Teilsicherheitsbeiwert für das Ermüdungslastmodell 3 .....	175
6.2.3	Objektspezifisches Ermüdungslastmodell 4.....	175
6.2.4	Verkehrsentwicklung .....	179
6.2.5	Objektspezifische Temperaturlastansätze bei Spannbetonbrücken.....	185
6.2.6	Beispiel 4 – Stahlbrücke – Ermüdungslastmodell 4.....	185
<b>7</b>	<b>Vorschlag zur normativen Umsetzung .....</b>	<b>190</b>
7.1	Tragsicherheit .....	190
7.1.1	Objektspezifisches Lastmodell.....	190
7.1.2	Modifizierter Teilsicherheitsbeiwert für das Lastmodell .....	192
7.1.3	Kombinationsbeiwert .....	194
7.2	Ermüdungssicherheit .....	196
7.2.1	Ermüdungslastmodell 3.....	196
7.2.2	Ermüdungslastmodell 4.....	197

<b>8 Fazit.....</b>	<b>198</b>
8.1 Zusammenfassung .....	198
8.2 Schlussfolgerungen.....	200
8.3 Weiterer Forschungsbedarf.....	201
<b>Anhang A    Ergänzungen zu den Grenzzustandsgleichungen .....</b>	<b>203</b>
<b>Anhang B    Referenzbauwerk 1 .....</b>	<b>210</b>
<b>Anhang C    Referenzbauwerk 2 .....</b>	<b>216</b>
<b>Anhang D    Referenzbauwerk 3 .....</b>	<b>218</b>
<b>Anhang E    Dokumentation praktischer Anwendungen .....</b>	<b>232</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>235</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Zielsetzung der Arbeit.....	3
Abbildung 1-2:	Vorgehensweise der Arbeit.....	5
Abbildung 2-1:	Übersicht über das Gebiet der Stochastik nach Plate [7].....	6
Abbildung 2-2:	Verteilungsdichte und Grenzzustandsgleichung im Originalraum .....	8
Abbildung 2-3:	Verteilungsdichte und Grenzzustandsgleichung im standardisierten Raum .....	9
Abbildung 2-4:	Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex für zwei normalverteilte Größen.....	11
Abbildung 2-5:	Funktionale Abhängigkeit von Zuverlässigkeitsindex $\beta$ und Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$ über die inverse standardisierte Normalverteilung $\Phi^{-1}$ .....	13
Abbildung 2-6:	Zuverlässigkeitsindex $\beta$ je nach Nutzungsdauer .....	14
Abbildung 2-7:	Verteilungsdichte (links) und Verteilungsfunktion (rechts) der Standardnormalverteilung .....	20
Abbildung 2-8:	Verteilungsdichte (links) und Verteilungsfunktion (rechts) der logarithmischen Normalverteilung.....	21
Abbildung 2-9:	Verteilungsdichte (links) und Verteilungsfunktion (rechts) der Extremwertverteilung Typ I (Größtwerte).....	23
Abbildung 2-10:	Extremwertverteilung Typ I (Größtwerte) für unterschiedliche Bezugszeiträume .....	25
Abbildung 2-11:	Verteilungsdichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ der Extremwertverteilung Typ II (Größtwerte).....	27
Abbildung 2-12:	Extremwertverteilung Typ II (Größtwerte) für verschiedene Bezugszeiträume mit unterem Grenzwert $x_0$ .....	28
Abbildung 2-13:	Verteilungsdichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ der Extremwertverteilung Typ III (Größtwerte) .....	29
Abbildung 2-14:	Extremwertverteilung Typ III (Größtwerte) für verschiedene Bezugszeiträume mit oberem Grenzwert $x_0$ .....	31
Abbildung 2-15:	Modell von Borges-Castanheta.....	36
Abbildung 2-16:	Beispielhafter offener Querschnitt einer Spannbetonbrücke aus Geißler [50] .....	43
Abbildung 2-17:	Rechteckquerschnitt mit Parabel-Rechteck-Diagramm aus Zilch und Zehetmaier [12].....	44
Abbildung 2-18:	Beispielhafter Hohlkasten-Querschnitt einer Spannbetonbrücke aus Geißler [50] .....	45
Abbildung 2-19:	Rechteckquerschnitt mit Spannungsblock aus Zilch und Zehetmaier [12], hier nur schlaff bewehrt.....	45
Abbildung 2-20:	Sukzessive Erhöhung der Druckzonenhöhe.....	46

Abbildung 2-21:	Oben: inneres Bemessungsmoment; unten: inneres stochastisches Moment .....	47
Abbildung 2-22:	Beispielhafter offener Querschnitt einer Stahlbrücke aus Geißler [50] .....	47
Abbildung 2-23:	Beispielhafter Querschnitt einer Straßenbrücke in Stahlverbund aus Geißler [50] .....	49
Abbildung 2-24:	Offener Verbundquerschnitt und streuende plastische Grenztragfähigkeit $M_R = M_{PI}$ .....	50
Abbildung 2-25:	Beispielhafter Querschnitt einer Straßenbrücke in Stahlverbund mit nebeneinander liegenden Hohlkästen aus Geißler [50] .....	50
Abbildung 2-26:	Beispielhafter Querschnitt einer Straßenbrücke in Stahlverbund mit einteiligem Hohlkasten aus Geißler [50] .....	51
Abbildung 2-27:	Wöhlerline – Miner-Original .....	53
Abbildung 2-28:	Wöhlerline – Miner-Elementar .....	53
Abbildung 2-29:	Wöhlerline – Miner-Modifiziert .....	54
Abbildung 2-30:	Wöhlerline – Miner-Konsequent .....	54
Abbildung 2-31:	Beanspruchung und Widerstand bei Ermüdungsbeanspruchung aus Spaethe [10] .....	55
Abbildung 3-1:	Entwicklung der Bemessungslasten aus Krohn [62] (ohne Berücksichtigung der Flächenlasten) .....	59
Abbildung 3-2:	Maßgebende Lkw-Klassen des Auxerre-Verkehrs aus Merzenich und Sedlacek [72] .....	61
Abbildung 3-3:	Lastmodell 1 (angepasste Grundwerte) nach DIN-Fachbericht 101 [71] .....	63
Abbildung 3-4:	LM1 (Grundwerte) nach DIN EN 1991-2 [70] .....	64
Abbildung 3-5:	BK60/30 und BK30/30 nach DIN 1072:1985 [76] .....	65
Abbildung 3-6:	Anteile des allgemeinen Temperaturprofils aus Lichte [78] .....	66
Abbildung 3-7:	Zusammensetzung des einwirkungsseitigen Teilsicherheitsbeiwertes gemäß DIN EN 1990 [9] .....	70
Abbildung 3-8:	Ermüdungsfestigkeitskurve nach DIN-Fachbericht 102 [51] Betonstahl und Spannstahl .....	77
Abbildung 3-9:	Ermüdungsfestigkeitskurve nach DIN EN 1993-1-9 [66] .....	78
Abbildung 3-10:	Ermüdungsfestigkeitskurve nach DIN-Fachbericht 103 [68] .....	78
Abbildung 3-11:	Ermüdungslastmodell 3 nach DIN EN 1991-2 [70] .....	81
Abbildung 3-12:	Ermüdungslastmodell 4 – Gruppe von Ersatzfahrzeugen nach DIN EN 1991-2 [70] .....	84
Abbildung 3-13:	Bemessung neuer Bauwerke und Bewertung bestehender Bauwerke aus Heumann [91] .....	87
Abbildung 3-14:	Prozentualer Anteil der Brückenklassen in Deutschland (Bundesfernstraße) aus [93] .....	89

Abbildung 3-15:	Summarische Verkehrszusammensetzung des DTV-SV [%] zur Bestimmung der objektbezogenen Verkehrsart (Anhaltswerte) gemäß Nachrechnungsrichtlinie [25].....	94
Abbildung 3-16:	Ziellastniveau für Brücken mit Straßenquerschnitten von zwei oder mehr Fahrstreifen in einer Fahrtrichtung gemäß Nachrechnungsrichtlinie [25].....	94
Abbildung 3-17:	Abwägung bei der Festlegung des Ziellastniveaus .....	95
Abbildung 3-18:	Modifiziertes Ermüdungslastmodell 4 für Verkehrskategorie 1 („Große Entfernung“) gemäß Nachrechnungsrichtlinie [25].....	96
Abbildung 4-1:	Vereinfachter schematischer Aufbau einer Messanlage .....	100
Abbildung 4-2:	Hardware-Komponenten im Messschrank.....	100
Abbildung 4-3:	Wheatstonesche Brückenschaltung.....	101
Abbildung 4-4:	DMS mit 10 mm Messbasis und Temperaturkompensation an einer Stahlbrücke, Referenzbauwerk 3.....	103
Abbildung 4-5:	Vollständig abgedichteter DMS an einer Stahlbrücke, Referenzbauwerk 3.....	103
Abbildung 4-6:	IWA mit 50 cm Messbasis mittels Verlängerungsstab aus Karbon.....	104
Abbildung 4-7:	Mittels Magneten an der Stahlbrücke befestigtes Aluprofil mit aufgeschraubtem Beschleunigungsaufnehmer .....	105
Abbildung 4-8:	Temperaturaufnehmer – Messung der Oberflächentemperatur bei Stahl, Referenzbauwerk 3 .....	106
Abbildung 4-9:	Temperaturaufnehmer – Messung der Innentemperatur bei Beton, Referenzbauwerk 2.....	107
Abbildung 4-10:	A/D-Wandlung aus Kiencke und Eger [106] .....	108
Abbildung 4-11:	Installierte Kamera am Riegel einer Stabbogenbrücke, Referenzbauwerk 1 .....	109
Abbildung 4-12:	LTE-800 MIMO Antenne an einer Spannbeton-Hohlkastenbrücke, Referenzbauwerk 2.....	109
Abbildung 4-13:	FE-Modell für das Referenzbauwerk 3 (links) und beispielhafte Laststellung des Belastungsfahrzeugs (rechts).....	112
Abbildung 4-14:	Spannungs-Zeit-Verlauf infolge Überfahrt 7 des Belastungsfahrzeugs mit 47 km/h .....	112
Abbildung 4-15:	Querschnitt mit zwei Messpunkten und unbekannter mitwirkender Breite .....	113
Abbildung 4-16:	Dehnungs-Zeit-Verlauf aus einer Überfahrt an einem Durchlaufträger .....	115
Abbildung 4-17:	Spannbetonquerschnitt (oben) und Momenten-Spannstahlbeziehung (unten) .....	116
Abbildung 4-18:	Spannungsschwingbreiten in Abhängigkeit des gemessenen Tagesgangs der Temperatur sowie der gemessenen Fahrzeuge, erweitert aus Zilch und Zehetmaier [12].....	117

Abbildung 4-19:	Verkehrslasterfassung durch Kombination aus lokalen und globalen Messpunkten .....	118
Abbildung 4-20:	Links: zeitlicher Versatz zweier Längsrippensignale, rechts: Geschwindigkeitsprofil .....	119
Abbildung 4-21:	Links: Achserkennung und Fahrzeugtypenzuordnung, rechts: Zusammenführung der erkannten Fahrzeuge aus beiden Schnitten (genaue Geschwindigkeit).....	120
Abbildung 4-22:	Einflusslinien des Messpunktes QT8-4 am Querträger aus dem kalibrierten FE-Modell .....	121
Abbildung 4-23:	Gemessener Dehnungs-Zeit-Verlauf der Achsaufnehmer .....	122
Abbildung 4-24:	Zugehörige Lastbilder zu Abbildung 4-23 .....	122
Abbildung 4-25:	Gemessener Temperaturverlauf am Referenzbauwerk 1 .....	123
Abbildung 4-26:	Gemessener Temperaturverlauf am Referenzbauwerk 1 für die Monate Juni bis August 2017.....	123
Abbildung 4-27:	Verlauf des vertikalen Temperaturgradienten am Referenzbauwerk 1.....	124
Abbildung 4-28:	Auswertesoftware zur sicherheitsäquivalenten Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring .....	125
Abbildung 4-29:	Stromverbrauch über die Messdauer an den zwei Referenzbauwerken 1 und 2.....	128
Abbildung 4-30:	Teilsicherheitsbeiwert je nach Messzeitraum für das Referenzbauwerk 3.....	129
Abbildung 4-31:	Relative Veränderung des Teilsicherheitsbeiwertes je nach Messzeitraum für das Referenzbauwerk 3 .....	129
Abbildung 4-32:	Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring.....	131
Abbildung 5-1:	Beispiel für ein Histogramm .....	135
Abbildung 5-2:	Klassierte Stundenextremwerte infolge Verkehr am Referenzbauwerk 1.....	135
Abbildung 5-3:	Klassierte Tagesextremwerte infolge Verkehr am Referenzbauwerk 1.....	136
Abbildung 5-4:	Histogramm der Wochenextremwerte infolge Verkehr und Approximation durch eine Extremwertverteilung Typ I, Referenzbauwerk 3.....	137
Abbildung 5-5:	Zugehöriges Lastbild zum extremalen Ereignis im Messzeitraum, Referenzbauwerk 3.....	137
Abbildung 5-6:	Klassierte Wochenextremwerte und Extrapolation auf den Nachrechnungszeitraum, Referenzbauwerk 3 .....	138
Abbildung 5-7:	Histogramm der gemessenen 3-Tagesmaxima des linearen Temperaturunterschiedes sowie Approximation durch eine Extremwert-III-Verteilung am Referenzbauwerk 1 .....	141

Abbildung 5-8:	Extrapolation der gemessenen 3-Tagesmaxima auf die 50-Jahresmaxima, Referenzbauwerk 1 .....	142
Abbildung 5-9:	Absolute Häufigkeiten der Temperaturgradienten in einzelnen Tagesstunden aus Buba [61] .....	143
Abbildung 5-10:	Auftretenswahrscheinlichkeit des Temperaturgradienten im Tagesverlauf aus Buba [61] .....	144
Abbildung 5-11:	Ansicht Referenzbauwerk 1 .....	145
Abbildung 5-12:	Gemessene Wochenextremwerte am Längsträger und Extrapolation auf den Bemessungszeitraum .....	146
Abbildung 5-13:	Gemessener Dehnungs-Zeit-Verlauf des im Messzeitraum erfassten extremalen Ereignisses .....	146
Abbildung 5-14:	Lastbild zum extremalen Ereignis mit halbseitiger Belastung durch zwei schwere Lkw .....	147
Abbildung 5-15:	Wichtungsfaktoren der einzelnen Basisvariablen .....	149
Abbildung 6-1:	Abgrenzung von Anpassungsfaktor $\alpha$ und Teilsicherheitsbeiwert $\gamma$ .....	150
Abbildung 6-2:	Wahl des Nachrechnungszeitraumes.....	152
Abbildung 6-3:	Messquerschnitt und reale Spuranordnung .....	153
Abbildung 6-4:	Sicherheitselemente für Einwirkung und Modell zur Erfassung der Beanspruchung .....	157
Abbildung 6-5:	Abhängigkeit des Teilsicherheitsbeiwertes vom Wichtungsfaktor.....	158
Abbildung 6-6:	Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der Fahrzeuganzahl von $VE_{pa} = 1,0\%$ innerhalb der Extrapolation am Referenzbauwerk 2.....	162
Abbildung 6-7:	Faktor zur Erhöhung des charakteristischen Wertes im GZT zur Berücksichtigung einer Verkehrsprognose .....	163
Abbildung 6-8:	Ansicht Referenzbauwerk 2 .....	168
Abbildung 6-9:	Lastbild zum extremalen Ereignis (zeitlich von links nach rechts) .....	168
Abbildung 6-10:	Dehnungs-Zeit-Verlauf am Messpunkt in Feldmitte bei der Begegnung zweier Lkw auf dem Bauwerk .....	169
Abbildung 6-11:	Extrapolation der gemessenen Extremwerte auf unterschiedliche Nachrechnungszeiträume .....	169
Abbildung 6-12:	Messwertgestützte charakteristische Werte und Brückenklassen .....	171
Abbildung 6-13:	Ablauf zur Berechnung des Zielschadens .....	178
Abbildung 6-14:	Schadensäquivalentes Gesamtgewicht aus gemessenem Zielschaden und gemessener Fahrzeuganzahl.....	179
Abbildung 6-15:	Erhöhungsfaktor auf die Schadenssumme, für ein Monitoring nach 20 Jahren .....	183
Abbildung 6-16:	Erhöhungsfaktor auf die Schadenssumme, für ein Monitoring nach 40 Jahren .....	183
Abbildung 6-17:	Allgemeiner Erhöhungsfaktor auf den Schadensäquivalenzfaktor zur Berücksichtigung von Verkehrsprognosen .....	184

Abbildung 6-18:	Ansicht Referenzbauwerk 3 .....	186
Abbildung 6-19:	Lastbild zur automatisierten Fahrzeuerkennung .....	187
Abbildung 6-20:	Verteilung der Fahrzeugtypen im Messzeitraum (oben) und beispielhaftes Fahrzeuggewicht je Fahrzeugtyp .....	188
Abbildung 7-1:	Erweitertes Sicherheitskonzept durch Bauwerksmonitoring .....	190
Abbildung 7-2:	Messwertgestützter charakteristischer Wert $E_{k,Mess}$ für einen Nachrechnungszeitraum von 20 Jahren.....	191
Abbildung 7-3:	Messwertgestützter charakteristischer Wert $E_{k,Mess}$ für einen Nachrechnungszeitraum von 50 Jahren.....	192
Abbildung 7-4:	Messwertgestützter charakteristischer Wert $E_{k,Mess}$ für einen Nachrechnungszeitraum von 100 Jahren.....	192
Abbildung 7-5:	Teilsicherheitsbeiwert abhängig vom auf den Nachrechnungszeitraum extrapolierten Variationskoeffizienten .....	193
Abbildung 7-6:	Teilsicherheitsbeiwert abhängig vom Variationskoeffizienten der gemessenen Wochenextrema .....	194
Abbildung 7-7:	Kombinationsbeiwert abhängig vom Grundzeitintervall und auf den Nachrechnungszeitraum extrapolierten Variationskoeffizienten .....	195
Abbildung 7-8:	Kombinationsbeiwert des Temperaturgradienten abhängig vom auf den Nachrechnungszeitraum extrapolierten Variationskoeffizienten ...	195
Abbildung 7-9:	Kombinationsbeiwert des Temperaturgradienten abhängig vom Variationskoeffizienten der Wochenextrema.....	196
Abbildung A-1:	Verbundträger - Plastische Nulllinie im Betongurt aus Schneider- Bautabellen [89].....	206
Abbildung A-2:	Verbundträger - Plastische Nulllinie im Flansch des Stahlträgers.....	206
Abbildung A-3:	Verbundträger - Plastische Nulllinie im Steg des Stahlträgers .....	207
Abbildung B-1:	Untersicht Referenzbauwerk 1 .....	210
Abbildung B-2:	Lage der Messpunkte am Referenzbauwerk 1 .....	211
Abbildung B-3:	Lage der Messpunkte im Querschnitt des Referenzbauwerks 1 .....	212
Abbildung B-4:	Lage der Temperatur-Messpunkte im Querschnitt des Referenzbauwerks 1 .....	212
Abbildung C-1:	Lage der Messpunkte am Referenzbauwerk 2 .....	216
Abbildung C-2:	Lage der Messpunkte im Querschnitt des Referenzbauwerks 2 .....	217
Abbildung C-3:	Lage der Temperatur-Messpunkte im Querschnitt des Referenzbauwerks 2 .....	217
Abbildung D-1:	Untersicht Referenzbauwerk 3 .....	218
Abbildung D-2:	Lage der Messpunkte am Referenzbauwerk 3 .....	219
Abbildung D-3:	Lage der Messpunkte im Querschnitt des Referenzbauwerks 3 .....	219
Abbildung D-4:	Lage der Temperatur-Messpunkte im Querschnitt des Referenzbauwerks 3 .....	220
Abbildung D-5:	Mobilkran als Belastungsfahrzeugs .....	220

---

Abbildung D-6:	Belastungsfahrt am 21.06.2017, 11:56 Uhr mit 57 km/h.....	221
Abbildung D-7:	Belastungsfahrt am 21.06.2017, 12:17 Uhr mit 58 km/h.....	222
Abbildung D-8:	Zufällige Überfahrt eines 5-achsigen Mobilkrans am 28.07.2016 um 05:11 mit 64 km/h.....	222
Abbildung D-9:	Foto zum ersten farblich markierten Bereich in Tabelle D-3.....	225
Abbildung D-10:	Foto zum zweiten farblich markierten Bereich in Tabelle D-3.....	225
Abbildung D-11:	Foto zum dritten farblich markierten Bereich in Tabelle D-3.....	226
Abbildung D-12:	Spannungsverläufe infolge Überfahrten der fünf Lkw-Typen am Beispiel des Messpunktes HTC-FM-UG für Spur 1 .....	227
Abbildung D-13:	Spannungsverläufe infolge Überfahrten der fünf Lkw-Typen am Beispiel des Messpunktes HTC-FM-UG für Spur 2 .....	227

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Bezeichnung – Zuverlässigkeits- und Sicherheitsindex.....	9
Tabelle 2-2:	Abkürzung – Versagenswahrscheinlichkeit.....	11
Tabelle 2-3:	Beziehung zwischen $\beta$ und $P_f$ nach DIN EN 1990 [9], Anhang C.....	13
Tabelle 2-4:	Mindestwert des Zuverlässigkeitsindex $\beta$ je nach Schadensfolgeklasse bzw. Zuverlässigkeitsklasse .....	14
Tabelle 2-5:	Zielwert für den Zuverlässigkeitsindex $\beta$ für Bauteile mit RC 2-Anforderungen nach DIN EN 1990 [9], Anhang C .....	15
Tabelle 2-6:	Zielwert für den Zuverlässigkeitsindex $\beta$ mit Referenzperiode für ein Jahr gemäß SIA 269 [23] .....	16
Tabelle 2-7:	Statistische Kenngrößen für Baustahl .....	32
Tabelle 2-8:	Statistische Kenngrößen für Spannstahl.....	33
Tabelle 2-9:	Statistische Kenngrößen für Betonstahl .....	34
Tabelle 2-10:	Statistische Kenngrößen für Beton.....	35
Tabelle 2-11:	Grundzeitintervalle $T_i$ für unabhängige Einwirkungen.....	38
Tabelle 2-12:	Empfehlungen des JCSS [20] für einwirkungsseitige Modellunsicherheiten.....	40
Tabelle 2-13:	Einwirkungsseitige Ansätze der Modellunsicherheit nach Braml [38] .....	40
Tabelle 2-14:	Empfehlungen des JCSS [20] für widerstandsseitige Modellunsicherheiten.....	41
Tabelle 2-15:	Widerstandsseitige Modellunsicherheiten bei Normalkräften [36] .....	41
Tabelle 2-16:	Streuende Grenzschädigung nach Merzenich [60].....	55
Tabelle 3-1:	Normative einwirkungsseitige Sicherheitselemente .....	58
Tabelle 3-2:	Grundwerte und angepasste Grundwerte nach DIN-Fachbericht 101 [71].....	63
Tabelle 3-3:	Grundwerte und angepasste Grundwerte des LM1 nach DIN EN 1991-2/NA [75] .....	64
Tabelle 3-4:	Teilsicherheitsbeiwerte in Abhängigkeit von den Variationskoeffizienten .....	70
Tabelle 3-5:	Kombinationsbeiwerte für Temperatur je nach Norm .....	76
Tabelle 3-6:	Anzahl erwarteter Lastkraftwagen pro Jahr für einen Lkw-Fahrestreifen aus [70], [71].....	82
Tabelle 3-7:	Normative Temperaturlastansätze im Ermüdungsnachweis bei Massivbrücken .....	86
Tabelle 3-8:	Nachweisstufen beider Nachrechnungsregelwerke (Straße/Bahn) .....	91
Tabelle 4-1:	Differenzierung von Bauwerksmessungen .....	99

Tabelle 4-2:	Automatisierte Fahrzeugerkennung an einer Spannbetonbrücke, Referenzbauwerk 2.....	122
Tabelle 4-3:	Angefallene Datenmengen an drei Referenzbauwerken .....	126
Tabelle 4-4:	Erforderliche rechnerische Energiemenge .....	127
Tabelle 5-1:	Statistische Werte für die berücksichtigten Basisvariablen .....	148
Tabelle 6-1:	Anpassungsfaktor und Teilsicherheitsbeiwert je nach Verkehrscharakteristik (beispielhaft) .....	151
Tabelle 6-2:	Anpassungsfaktor und Berücksichtigung der aktuellen Spuranordnung .....	154
Tabelle 6-3:	Beispielhafte Größenordnung der Nachrechnungsfaktoren je nach Bezugs-Brückenklasse für eine Brücke.....	155
Tabelle 6-4:	Auswirkungen der Verkehrsentwicklung hinsichtlich der Tragsicherheit.....	158
Tabelle 6-5:	Bemessungswert je nach Nachrechnungszeitraum .....	170
Tabelle 6-6:	Nachrechnungsfaktoren je nach Brückenklasse für einen Nachrechnungszeitraum von 50 Jahren.....	171
Tabelle 6-7:	Auswirkungen der Verkehrsentwicklung hinsichtlich Ermüdung .....	180
Tabelle 6-8:	Beispielhafte Ergebnisdarstellung der identifizierten Fahrzeuge.....	187
Tabelle 6-9:	ELM 4 gemäß Nachrechnungsrichtlinie [25] und objektspezifisches ELM 4-A/G .....	189
Tabelle 6-10:	Vergleich der Lkw-Anzahl pro Jahr über beide Spuren.....	189
Tabelle A-1:	Vorhandene Grenzzustandsgleichungen aus verschiedenen Quellen ...	203
Tabelle B-1:	Autonomiebetrieb der Messanlage mittels Batterien .....	213
Tabelle B-2:	Betrieb der Messanlage mittels Solarenergie .....	214
Tabelle B-3:	Erforderliche Anzahl an Solarmodulen im Winter/Sommer bei 300 Wp-Leistung.....	215
Tabelle B-4:	Erforderliche Anzahl an Solarmodulen im Winter/Sommer bei 250 Wp-Leistung.....	215
Tabelle D-1:	Ergebnis der Belastungsfahrten und Vergleich mit tatsächlichem Lastbild.....	221
Tabelle D-2:	Zufällig aufgezeichnete Überfahrt eines 5-achsigen Mobilkrans .....	223
Tabelle D-3:	Auszug der automatisierten Fahrzeugerkennung .....	224
Tabelle D-4:	Gemessene Lkw-Anzahl der einzelnen Lkw-Typen je Spur.....	226
Tabelle D-5:	Teilschäden an den maßgebenden Messpunkten je nach Lkw-Typ und Spur .....	228
Tabelle D-6:	Prozentuale Anteile am Gesamtschaden des jeweiligen Messpunktes je nach Lkw-Typ und Spur.....	228
Tabelle D-7:	Beanspruchungskollektive der maßgebenden Messpunkte und Schadenssumme innerhalb der drei Monate .....	229
Tabelle D-8:	Zu erreichende Zielschäden durch die Lkw des ELM 4-A/G .....	229

Tabelle D-9:	Rechnerische Aufteilung der gesamten Lkw-Anzahl auf die fünf Lkw-Typen.....	230
Tabelle D-10:	Schadensäquivalentes Gewicht der Lkw des ELM 4 an den drei Messpunkten [t].....	230
Tabelle E-1:	Batch-Files .....	232
Tabelle E-2:	Manuelle Einstellungen für Internetverbindung und MMS .....	234

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

A .....	Auftretenshäufigkeit
A .....	Autobahn
BAB.....	Bundesautobahn
BK .....	Brückenklasse
BK30/30 .....	Brückenklasse 30/30
BK60 .....	Brückenklasse 60
BK60/30 .....	Brückenklasse 60/30
CC.....	Consequence Class
d.....	diem (Tag)
DMS .....	Dehnungsmessstreifen
DTV-SV .....	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs
E .....	Beanspruchung/Auswirkung (engl.: effect)
ELM .....	Ermüdungslastmodell
ELM 3 .....	Ermüdungslastmodell 3
ELM 4 .....	Ermüdungslastmodell 4
EVI .....	Extremwertverteilung Typ I
EVII.....	Extremwertverteilung Typ II
EVIII.....	Extremwertverteilung Typ III
FE-Modell .....	Finite-Elemente-Modell
FM .....	Feldmitte
FORM.....	First Order Reliability Method
FS .....	Fahrspur
FTP .....	File Transfer Protocol
GG .....	Gesamtgewicht
Gl.....	Gleichung
GUI.....	General User Interface
GZG.....	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT .....	Grenzzustand der Tragfähigkeit
h.....	hora (Stunde)
HS.....	Hauptspur
HTB .....	Hauptträger B
HTC .....	Hauptträger C

HT-N .....	Hauptträger-Nord
IWA.....	induktiver Wegaufnehmer
JCSS .....	Joint Committee on Structural Safety
Lkw.....	Lastkraftwagen
LM.....	Lastmodell
LM 71 .....	Lastmodell 71 für Eisenbahnbrücken
LM1 .....	Lastmodell 1
LMM .....	Bezeichnung des Lastmodells 1 nach DIN EN 1991-2 in der Nachrechnungsrichtlinie
LNV.....	logarithmische Normalverteilung
LTD .....	Längsträger D
LTD-2.....	Längsträger D in Querträgerachse 2
LTE.....	Long Term Evolution
MIMO.....	Multiple Input Multiple Output
NRR.....	Nachrechnungsrichtlinie
NV .....	Normalverteilung
OG .....	Obergurt
PC.....	Personal Computer
PoE .....	Power over Ethernet
QK.....	Querschnittsklasse
R .....	Beanspruchbarkeit/Widerstand (engl.: resistance)
RC.....	Reliability Class
SORM.....	Second Order Reliability Method
ST .....	Stütze
TLS.....	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
TSB.....	Teilsicherheitsbeiwert
UG .....	Untergurt
UMTS.....	Universal Mobile Telecommunications System
USB .....	Universal Serial Bus

### **Symbole mit großen lateinischen Buchstaben**

A .....	Querschnittsfläche
A <sub>a,Druck</sub> .....	Stahlfläche im Druckbereich
A <sub>a,Zug</sub> .....	Stahlfläche im Zugbereich
A <sub>c</sub> .....	Betondruckzone
A <sub>i</sub> .....	Querschnittsteilfläche i zur Gesamt-Schwerpunktsberechnung

---

$A_{i,j}$ .....	Teilquerschnittsfläche in einem Raster $i, j$
$AL_n$ .....	Achslast der Achse $n$
$A_p$ .....	Spannstahlfläche
$A_s$ .....	Betonstahlfläche
$D$ .....	Schadenssumme
$D_{Grenz}$ .....	Grenzschädigung
$D_{Mess}$ .....	Schadenssumme im Messzeitraum
$D_{T,Mess}$ .....	Schadenssumme in der Nutzungszeit (extrapoliert aus Bauwerksmonitoring)
$D_{T,Mess,0}$ .....	Gesamtschadenssumme in der Nutzungszeit $T$ ohne der Berücksichtigung einer Verkehrsprognose
$D_{T,Mess,VE}$ .....	Gesamtschadenssumme in der Nutzungszeit $T$ inklusive der Berücksichtigung einer Verkehrsprognose
$D_{Typ,Spur}$ .....	Zielschaden des betrachteten Lkw-Typs auf der betrachteten Spur
$D_{\Delta T,i}$ .....	Teilschaden des Lkw-Typs $i$ bei dem Temperaturgradienten $\Delta T$
$E$ .....	Elastizitätsmodul bzw. E-Modul
$E(S)$ .....	Erwartungswert eines Schadens
$E_d$ .....	Bemessungswert einer Einwirkung
$E_{d,Mess}$ .....	messwertgestützter Bemessungswert
$E_{d,T}$ .....	Bemessungswert einer Einwirkung für den Zeitraum $T$
$EF_M$ .....	Maßnahmeneffizienz
$E_k$ .....	charakteristischer Wert einer Einwirkung
$E_{k,Mess}$ .....	messwertgestützter charakteristischer Wert
$E_{k,Norm}$ .....	normativer charakteristischer Wert (aus kalibriertem FE-Modell)
$E_{k,T}$ .....	charakteristischer Wert einer Einwirkung für den Zeitraum $T$
$E_{k,T,0}$ .....	charakteristischer Wert für den Zeitraum von 50 Jahren ohne Berücksichtigung einer Verkehrsentwicklung ( $VE = 0$ )
$E_{k,T,VE}$ .....	charakteristischer Wert für den Zeitraum $T$ unter Berücksichtigung der Verkehrsentwicklung $VE$
$EW_{nm}$ .....	Einflusswert der Achse $n$ zum Zeitpunkt $t_m$
$F(x)$ .....	Verteilungsfunktion einer Basisvariablen
$F^{-1}$ .....	Quantilwert einer Verteilungsfunktion
$F_{cd}$ .....	Bemessungswert der Betondruckkraft
$F_{pd}$ .....	Bemessungswert der Spannstahlzugkraft
$F_{sd}$ .....	Bemessungswert der Betonstahlzugkraft
$G$ .....	ständige Last
$GG_e$ .....	schadensäquivalentes Gesamtgewicht

$GG_{i,Typ,Spur,Mess}$ ...	gemessenes Gesamtgewicht des i-ten Lkw des betrachteten Lkw-Typs auf der betrachteten Spur
$G_k$ .....	charakteristischer Wert der ständigen Last
$G_{k,inf}$ .....	unterer charakteristischer Wert der ständigen Last
$G_{k,sup}$ .....	oberer charakteristischer Wert der ständigen Last
$I_i$ .....	ideelles Flächenträgheitsmoment
$I_y$ .....	Flächenträgheitsmoment um die y-Achse
$LM_{DIN-FB 101}$ .....	Lastmodell 1 nach DIN-FB 101 beispielhaft als einheitliches Bezugslastmodell für die Nachrechnung
$LM_{NR}$ .....	für die Nachrechnung anzusetzendes Lastmodell mit einheitlichem Bezugslastmodell
$M_E$ .....	einwirkendes Biegemoment
$M_R$ .....	aufnehmbares Biegemoment
$MW_m$ .....	Messwert zum Zeitpunkt $t_m$
$N_C$ .....	Bezugswert der Wöhlerlinie
$N_D$ .....	Bezugspunkt der Dauerfestigkeit
$N_L$ .....	Bezugspunkt des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit
$N_{obs}$ .....	Anzahl der zu berücksichtigenden Lkw pro Jahr für den Fahrstreifen 1 (Lkw-Hauptspur)
$N_{Ri}(\Delta\sigma_i)$ .....	aufnehmbare Anzahl an Schwingspielen bei gegebener Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i$ , teilweise auch nur $N_{Ri}$
$N_T$ .....	Gesamtlastspielzahl in der Nutzungszeit
$P_f$ .....	Versagenswahrscheinlichkeit
$Q_{d,Begleit,T}$ .....	Bemessungswert einer Einwirkung als Begleiteinwirkung im Zeitraum T
$Q_{d,T}$ .....	Bemessungswert einer Einwirkung im Zeitraum T
$Q_i$ .....	Wert einer veränderlichen Einwirkung i
$Q_{ik}$ .....	charakteristischer Wert der Achslast auf Fahrstreifen i des Lastmodells 1
$R_1 \dots R_4$ .....	Widerstände der Wheatstoneschen Brückenschaltung
$R_d$ .....	Bemessungswert eines Widerstandes
$R_k$ .....	charakteristischer Wert eines Widerstandes
$SC_M$ .....	Sicherheitskosten
$T$ .....	Bemessungs- oder Nachrechnungszeitraum
$T_{Begleit}$ .....	Grundzeitintervall der Begleiteinwirkung
$T_{Bezug}$ .....	Bezugszeitraum der Begleiteinwirkung
$T_{GZ}$ .....	Grundzeitintervall einer veränderlichen Einwirkung
$T_{Leit}$ .....	Grundzeitintervall der Leiteinwirkung
$T_{Mess}$ .....	Messzeitraum in Jahren

$T_{\text{Verg}}$ .....	vergangene Nutzungszeit in Jahren
$T_{\text{Zuk}}$ .....	zukünftige Nutzungszeit in Jahren
$U_a$ .....	Ausgangsspannung
$U_e$ .....	Eingangsspannung
$VE$ .....	Verkehrsentwicklung im Prognosezeitraum
$VE_{\text{pa}}$ .....	mittlere Verkehrsentwicklung pro Jahr
$W_{\text{el}}$ .....	elastisches Widerstandsmoment
$X_i(x_i)$ .....	Basisvariable $i$ von $x_i$
$Y$ .....	rechnerische Strukturantwort
$Y'$ .....	reale Strukturantwort

### Symbole mit kleinen lateinischen Buchstaben

$a$ .....	Parameter der Extremwertverteilung Typ I
$a$ .....	Wiederkehrperiode des charakteristischen Wertes
$b$ .....	Druckzonenbreite
$b_{\text{eff}}$ .....	effektive mitwirkende Breite
$d$ .....	statische Nutzhöhe
$d_i$ .....	Teilschaden
$d_{\text{Typ,Spur}}$ .....	Schadenssumme eines betrachteten Lkw-Typs auf einer betrachteten Spur
$f(x)$ .....	Verteilungsdichtefunktion einer Basisvariablen
$f(X_i)$ .....	Modell- oder Übertragungsfunktion
$f_{\text{cd}}$ .....	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
$f_{\text{ck}}$ .....	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit
$f_{\text{cm}}$ .....	Mittelwert der Betondruckfestigkeit
$f_{p0,1k}$ .....	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Spannstahls bei 0,1 % bleibender Dehnung
$f_{p0,2k}$ .....	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Spannstahls bei 0,2 % bleibender Dehnung
$f_{\text{pd}}$ .....	Bemessungswert der Spannstahlfestigkeit
$f_{\text{pk}}$ .....	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Spannstahls
$f_{\text{sd}}$ .....	Bemessungswert der Betonstahlfestigkeit
$f_{\text{sk}}$ .....	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Betonstahls
$f_{\text{u,k}}$ .....	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Baustahls
$f_{\text{VE,GZE}}$ .....	Faktor zur Erhöhung des Schadensäquivalenzfaktors zur Berücksichtigung der Verkehrsentwicklung im GZE
$f_{\text{VE,GZE,D}}$ .....	Faktor zur Erhöhung der Schadenssumme zur Berücksichtigung der Verkehrsentwicklung im GZE

$f_{VE,GZT}$ .....	Faktor zur Erhöhung des charakteristischen Wertes zur Berücksichtigung der Verkehrsentwicklung im GZT
$f_x(x_i)$ .....	dreidimensionale Verteilungsdichte aus der Faltung der Basisvariablen
$f_{y,k}$ .....	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Baustahls
$g(u_i)$ .....	Grenzzustandsfunktion im Standardraum
$g(x_i)$ .....	Grenzzustandsfunktion im Originalraum
$h$ .....	Querschnittshöhe
$i_{Typ,Spur}$ .....	Lkw $i$ des betrachteten Lkw-Typs auf der betrachteten Spur
$k$ .....	Parameter der Extremwertverteilung Typ II/III
$k$ .....	Anzahl an Intervallen im Histogramm
$k_a$ .....	Höhenbeiwert
$m$ .....	Mittelwert einer Stichprobe
$m$ .....	Neigungsexponent der Wöhlerlinie
$m_{50}$ .....	Mittelwert der 50-Jahrextremwerte
$m_E$ .....	Mittelwert einer Beanspruchung
$m_{MV}$ .....	Mittelwert der Verteilungsfunktion des streuend einwirkenden Biegemomentes infolge Verkehrs
$m_R$ .....	Mittelwert einer Beanspruchbarkeit
$m_T$ .....	Mittelwert einer Verteilung bezogen auf den Zeitraum $T$
$m_{T,Mess}$ .....	Mittelwert der Extremwertverteilung je nach Nachrechnungszeitraum (extrapoliert aus Bauwerksmonitoring)
$m_{T2,VE}$ .....	extrapolierter Mittelwert unter Berücksichtigung einer jährlichen Verkehrsentwicklung $VE_{pa}$ über die zu extrapolierenden Jahre
$m_{e,Mess}$ .....	Verteilungsfunktion der gemessenen Dehnungen
$n$ .....	Prognosezeitraum in Jahren, Anzahl im Histogramm darzustellender Werte, Stichprobenumfang
$n_a$ .....	Werte pro Bezugsseinheit je nach Bezugszeitraum der Verteilungsfunktion
$n_{h,\Delta T}$ .....	Anzahl der Stunden $h$ mit Temperaturbelastung $\Delta T$ in der betrachteten Tagesstunde
$n_{Typ,Spur}$ .....	Anzahl gemessener Lkw des betrachteten Lkw-Typs auf der betrachteten Spur, Summe der Lkw des betrachteten Lkw-Typs auf der betrachteten Spur
$n_{VE}$ .....	erhöhter Stichprobenumfang im Zeitraum $T_2$ aufgrund der Verkehrsentwicklung
$p_1$ .....	obere Spannstahllage unten
$p_2$ .....	untere Spannstahllage unten
$p_{h,\Delta T}$ .....	Auftretenswahrscheinlichkeit des gemessenen Temperaturgradienten in der Tagesstunde $h$ der Klasse $\Delta T$
$p_i$ .....	Anteil des Standardlastkraftwagens Typ $i$ gemäß ELM 4 ( $i = 1$ bis $5$ ) am Schwerverkehr $N_{obs}$ im Jahr

$p_{\text{Typ,Spur}}$ .....	prozentualer Anteil am durch die gewählten repräsentativen Lkw-Typen verursachten Gesamtschaden eines Lkw-Typs je Spur
$q$ .....	Unterschreitungswahrscheinlichkeit
$q_1$ .....	Unterschreitungswahrscheinlichkeit bezogen auf ein Jahr
$q_d$ .....	Unterschreitungswahrscheinlichkeit für einen Bemessungswert mit gefordertem Zuverlässigkeitsindex
$q_{ik}$ .....	charakteristischer Wert der Flächenlast auf Fahrstreifen $i$ des Lastmodells $l$
$q_k$ .....	Unterschreitungswahrscheinlichkeit des charakteristischen Wertes
$q_{rk}$ .....	charakteristischer Wert der Restflächenlast des Lastmodells $l$
$q_T$ .....	Unterschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungswertes im Zeitraum $T$
$q_{T\text{Bezug}}$ .....	Unterschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungswertes im Bezugszeitraum $T_{\text{Bezug}}$
$s$ .....	Standardabweichung einer Stichprobe
$s_E$ .....	Standardabweichung einer Beanspruchung
$s_R$ .....	Standardabweichung einer Beanspruchbarkeit
$u$ .....	Modalwert einer Verteilungsdichte
$u_i$ .....	Koordinaten im standardisierten Raum
$v$ .....	Variationskoeffizient
$v_{50}$ .....	Variationskoeffizient der 50-Jahrextremwerte
$v_f$ .....	Variationskoeffizient der Festigkeit
$v_G$ .....	Variationskoeffizient der ständigen Last
$v_T$ .....	Variationskoeffizient einer Verteilung bezogen auf den Zeitraum $T$
$v_{T,\text{Mess}}$ .....	Variationskoeffizient der Extremwertverteilung je nach Nachrechnungszeitraum (extrapoliert aus Bauwerksmonitoring)
$x$ .....	Druckzonenhöhe
$x_0$ .....	Grenzwert der Extremwertverteilung Typ II/III in Richtung der interessierenden Größe
$x_i$ .....	Koordinaten im Originalraum
$z_i$ .....	Abstand zwischen einem Bezugspunkt und dem jeweiligen Schwerpunkt der Querschnittsteilfläche $i$ zur Gesamt-Schwerpunktsberechnung des Querschnittes
$z_{i,j}$ .....	Z-Koordinate der Teilfläche $i, j$
$z_{i,u}$ .....	Abstand vom Schwerpunkt zur gemessenen Randfaser am ideellen Querschnitt
$z_p$ .....	innerer Hebelarm des Spannstahls
$z_{pl}$ .....	Lage der plastischen Nulllinie beim Verbundquerschnitt
$z_s$ .....	geometrischer Schwerpunkt
$z_s$ .....	innerer Hebelarm des Betonstahls

$Z_{s,c}$  ..... Schwerpunkt der Betondruckzone

### **Symbole mit griechischen Buchstaben**

- $\Delta\sigma_{e,Mess}$  ..... schadensäquivalente Spannungsschwingbreite aus Bauwerksmonitoring
- $\alpha$  ..... Anpassungsfaktor für das Lastmodell 1
- $\alpha_{cc}$  ..... Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen und Abweichungen von der Zylinderdruckfestigkeit
- $\alpha_E$  ..... Wichtungsfaktor für eine Einwirkung
- $\alpha_{Ei}$  ..... zusätzlicher Wichtungsfaktor der Begleiteinwirkung
- $\alpha_{LM71}$  ..... Klassifizierungsfaktor des LM 71 bei Eisenbahnbrücken
- $\alpha_{NR,Mess}$  ..... messwertgestützter Anpassungsfaktor für das Lastmodell für die Nachrechnung
- $\alpha_{qi}$  ..... Anpassungsfaktor für die Flächenlast des Lastmodells 1
- $\alpha_{Qi}$  ..... Anpassungsfaktor für das Tandemsystem des Lastmodells 1
- $\alpha_r$  ..... Völligkeitsbeiwert
- $\alpha_R$  ..... Wichtungsfaktor für einen Widerstand
- $\beta$  ..... Zuverlässigkeitsindex
- $\beta_T$  ..... Zuverlässigkeitsindex bezogen auf den Zeitraum T
- $\beta_{TBezug}$  ..... Zuverlässigkeitsindex im Bezugszeitraum  $T_{Bezug}$
- $\gamma$  ..... Teilsicherheitsbeiwert
- $\Gamma$  ..... Gammafunktion
- $\gamma_a$  ..... Teilsicherheitsbeiwert für Baustahl
- $\gamma_c$  ..... Teilsicherheitsbeiwert für Beton
- $\gamma_{c,fat}$  ..... normativer widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für Beton
- $\gamma_{Ed}$  ..... partieller Teilsicherheitsbeiwert für die Unsicherheiten in den Modellannahmen, teilweise auch mit  $\gamma_{sd}$  bezeichnet
- $\gamma_{Ed,fat}$  ..... normativer einwirkungsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit
- $\gamma_f$  ..... partieller Teilsicherheitsbeiwert für die Streuung der Einwirkung
- $\gamma_F$  ..... normativer Teilsicherheitsbeiwert für eine Einwirkung, teilweise auch mit  $\gamma_Q$  bezeichnet
- $\gamma_{F,fat}$  ..... normativer einwirkungsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für das Ermüdungslastmodell
- $\gamma_{Ff}$  ..... einwirkungsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für das Ermüdungslastmodell
- $\gamma_G$  ..... Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten
- $\gamma_{Mess}$  ..... messwertgestützter Teilsicherheitsbeiwert für das Lastmodell im Grenzzustand der Tragfähigkeit

$\gamma_{\text{Mess,Temp}}$ .....	messwertgestützter Teilsicherheitsbeiwert für die Temperaturbeanspruchung (linearer Temperaturgradient) im Grenzzustand der Tragfähigkeit
$\gamma_{\text{Mf}}$ .....	normativer widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für Stahl
$\gamma_{\text{Q}}$ .....	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten, teilweise auch mit $\gamma_{\text{F}}$ bezeichnet
$\gamma_{\text{s}}$ .....	Teilsicherheitsbeiwert für Betonstahl
$\gamma_{\text{s,fat}}$ .....	normativer widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für Beton- und Spannstahl
$\gamma_{\text{sd}}$ .....	partieller Teilsicherheitsbeiwert für die Unsicherheiten in den Modellannahmen, teilweise auch mit $\gamma_{\text{Ed}}$ bezeichnet
$\Delta R_{\text{M}}$ .....	Risikoreduktion
$\Delta T_{\text{E}}$ .....	nicht-linear veränderlicher Temperaturanteil
$\Delta T_{\text{My}}$ .....	linear veränderlicher Temperaturanteil über die Querschnittshöhe
$\Delta T_{\text{Mz}}$ .....	linear veränderlicher Temperaturanteil über die Querschnittsbreite
$\Delta T_{\text{N}}$ .....	konstanter Temperaturanteil
$\Delta \sigma_{\text{C}}$ .....	charakteristische Spannungsdifferenz als Bezugswert der Wöhlerlinie (Kerbfall)
$\Delta \sigma_{\text{e}}$ .....	schadensäquivalente Spannungsschwingbreite
$\Delta \sigma_{\text{ELM}}$ .....	charakteristische Spannungsschwingbreite des normativen Ermüdungslastmodells
$\Delta \sigma_{\text{i}}$ .....	Spannungsschwingbreite
$\Delta \sigma_{\text{Typ,Spur,FE}}$ .....	Spannungsschwingbreite am Messpunkt infolge der Überfahrt des betrachteten Lkw-Typs auf der betrachteten Spur mit Einheitslast von einer Tonne
$\varepsilon_{\text{o}}$ .....	Dehnung oben
$\varepsilon_{\text{u}}$ .....	Dehnung unten
$\theta$ .....	Modellunsicherheit
$\theta(y,z)$ .....	Temperaturfunktion über den Querschnitt
$\theta_{\text{0}}$ .....	Grundtemperatur
$\theta_{\text{E}}$ .....	Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite
$\theta_{\text{i,j}}$ .....	Temperatur der Teilquerschnittsfläche in einem Raster i, j
$\theta_{\text{m}}$ .....	mittlere Querschnittstemperatur/Schwerpunkttemperatur
$\theta_{\text{R}}$ .....	Modellunsicherheit auf der Widerstandsseite
$\lambda$ .....	Parameter der Extremwertverteilung Typ II/III
$\lambda$ .....	Schadensäquivalenzfaktor
$\lambda_1$ .....	Spannweitenbeiwert
$\lambda_2$ .....	Verkehrsstärkenbeiwert
$\lambda_3$ .....	Fahrstreifenbeiwert, Nutzungsdauerbeiwert

$\lambda_{\max}$ .....	obere Begrenzung des $\lambda$ -Wertes infolge der Dauerfestigkeit
$\lambda_{\text{Mess}}$ .....	messwertgestützter Schadensäquivalenzfaktor
$\lambda_{\text{Mess,VE}}$ .....	messwertgestützter Schadensäquivalenzfaktor inklusive der Berücksichtigung einer Verkehrsprognose
$\lambda_{\text{Mess,VE=0}}$ .....	messwertgestützter Schadensäquivalenzfaktor ohne Berücksichtigung einer Verkehrsprognose
$\lambda_{T,\Delta T}$ .....	jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit des Temperaturunterschieds $\Delta T$
$\lambda_{T,\Delta T,h}$ .....	Auftretenswahrscheinlichkeit des Temperaturgradienten $\Delta T$ zur Tagesstunde $h$
$\lambda_{V,h}$ .....	Anteil des Schwerverkehrs während der Stunde $h$ am gesamten Tagesaufkommen
$\mu$ .....	Mittelwert der Grundgesamtheit
$\mu_u$ .....	Parameter der logarithmischen Normalverteilung
$\rho$ .....	Verhältnis der Schadensfolgekosten und Konstruktionskosten
$\sigma$ .....	Standardabweichung der Grundgesamtheit
$\sigma_{MV}$ .....	Standardabweichung der Verteilungsfunktion des streuend einwirkenden Biegemomentes infolge Verkehrs
$\sigma_u$ .....	Parameter der logarithmischen Normalverteilung
$\varphi(x)$ .....	Verteilungsdichtefunktion der standardisierten Normalverteilung
$\Phi(x)$ .....	Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung
$\psi$ .....	Kombinationsbeiwert einer Einwirkung
$\psi_0$ .....	normativer Kombinationsbeiwert für den Grundwert der Begleiteinwirkung
$\psi_{0,\text{Mess}}$ .....	messwertgestützter Kombinationsbeiwert für den Grundwert der Begleiteinwirkung
$\psi_1$ .....	normativer Kombinationsbeiwert für den häufigen Wert der Begleiteinwirkung
$\psi_1'$ .....	normativer Kombinationsbeiwert für den nicht-häufigen Wert der Begleiteinwirkung
$\psi_2$ .....	normativer Kombinationsbeiwert für den quasi-ständigen Wert der Begleiteinwirkung
$\psi_T$ .....	Kombinationsbeiwert der Begleiteinwirkung für den Zeitraum $T$