



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 • E-Mail: 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
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehensweise.....	4
2 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie	6
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
3 Grundlagen des normativen Sicherheitskonzeptes	58
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
4	Bauwerksmessungen an Brücken.....	98
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
5	Allgemeine probabilistische Nachweise bei gemessener Beanspruchung	133
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
6	Vereinfachende Methodik zur sicherheitsäquivalenten Bewertung von Brücken ...	150
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
7	Vorschlag zur normativen Umsetzung	190
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

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

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 β und Versagenswahrscheinlichkeit P_f über die inverse standardisierte Normalverteilung Φ^{-1}	13
Abbildung 2-6:	Zuverlässigkeitsindex β 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 α und Teilsicherheitsbeiwert γ	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 Fahrzeugerkennung	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 β und P_f nach DIN EN 1990 [9], Anhang C.....	13
Tabelle 2-4:	Mindestwert des Zuverlässigkeitsindex β je nach Schadensfolgeklasse bzw. Zuverlässigkeitsklasse	14
Tabelle 2-5:	Zielwert für den Zuverlässigkeitsindex β für Bauteile mit RC 2- Anforderungen nach DIN EN 1990 [9], Anhang C	15
Tabelle 2-6:	Zielwert für den Zuverlässigkeitsindex β 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- Fahrstreifen 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 _{a,Druck}	Stahlfläche im Druckbereich
A _{a,Zug}	Stahlfläche im Zugbereich
A _c	Betondruckzone
A _i	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 ΔT
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_{Verg}	vergangene Nutzungszeit in Jahren
T_{Zuk}	zukünftige Nutzungszeit in Jahren
U_a	Ausgangsspannung
U_e	Eingangsspannung
VE	Verkehrsentwicklung im Prognosezeitraum
VE_{pa}	mittlere Verkehrsentwicklung pro Jahr
W_{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_{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_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
f_{ck}	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit
f_{cm}	Mittelwert der Betondruckfestigkeit
$f_{\text{p0,1k}}$	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Spannstahls bei 0,1 % bleibender Dehnung
$f_{\text{p0,2k}}$	charakteristischer Wert der Streckgrenze des Spannstahls bei 0,2 % bleibender Dehnung
f_{pd}	Bemessungswert der Spannstahlfestigkeit
f_{pk}	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Spannstahls
f_{sd}	Bemessungswert der Betonstahlfestigkeit
f_{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 ΔT 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 ΔT
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_{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
- α Anpassungsfaktor für das Lastmodell 1
- α_{cc} Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen und Abweichungen von der Zylinderdruckfestigkeit
- α_E Wichtungsfaktor für eine Einwirkung
- α_{Ei} zusätzlicher Wichtungsfaktor der Begleiteinwirkung
- α_{LM71} Klassifizierungsfaktor des LM 71 bei Eisenbahnbrücken
- $\alpha_{NR,Mess}$ messwertgestützter Anpassungsfaktor für das Lastmodell für die Nachrechnung
- α_{qi} Anpassungsfaktor für die Flächenlast des Lastmodells 1
- α_{Qi} Anpassungsfaktor für das Tandemsystem des Lastmodells 1
- α_r Völligkeitsbeiwert
- α_R Wichtungsfaktor für einen Widerstand
- β Zuverlässigkeitsindex
- β_T Zuverlässigkeitsindex bezogen auf den Zeitraum T
- β_{TBezug} Zuverlässigkeitsindex im Bezugszeitraum T_{Bezug}
- γ Teilsicherheitsbeiwert
- Γ Gammafunktion
- γ_a Teilsicherheitsbeiwert für Baustahl
- γ_c Teilsicherheitsbeiwert für Beton
- $\gamma_{c,fat}$ normativer widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für Beton
- γ_{Ed} partieller Teilsicherheitsbeiwert für die Unsicherheiten in den Modellannahmen, teilweise auch mit γ_{sd} bezeichnet
- $\gamma_{Ed,fat}$ normativer einwirkungsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit
- γ_f partieller Teilsicherheitsbeiwert für die Streuung der Einwirkung
- γ_F normativer Teilsicherheitsbeiwert für eine Einwirkung, teilweise auch mit γ_Q bezeichnet
- $\gamma_{F,fat}$ normativer einwirkungsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für das Ermüdungslastmodell
- γ_{Ff} einwirkungsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für das Ermüdungslastmodell
- γ_G Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten
- γ_{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
γ_{Mf}	normativer widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für Stahl
γ_{Q}	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten, teilweise auch mit γ_{F} bezeichnet
γ_{s}	Teilsicherheitsbeiwert für Betonstahl
$\gamma_{\text{s,fat}}$	normativer widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert für Beton- und Spannstahl
γ_{sd}	partieller Teilsicherheitsbeiwert für die Unsicherheiten in den Modellannahmen, teilweise auch mit γ_{Ed} bezeichnet
ΔR_{M}	Risikoreduktion
ΔT_{E}	nicht-linear veränderlicher Temperaturanteil
ΔT_{My}	linear veränderlicher Temperaturanteil über die Querschnittshöhe
ΔT_{Mz}	linear veränderlicher Temperaturanteil über die Querschnittsbreite
ΔT_{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
ε_{o}	Dehnung oben
ε_{u}	Dehnung unten
θ	Modellunsicherheit
$\theta(y,z)$	Temperaturfunktion über den Querschnitt
θ_{o}	Grundtemperatur
θ_{E}	Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite
$\theta_{\text{i,j}}$	Temperatur der Teilquerschnittsfläche in einem Raster i, j
θ_{m}	mittlere Querschnittstemperatur/Schwerpunkttemperatur
θ_{R}	Modellunsicherheit auf der Widerstandsseite
λ	Parameter der Extremwertverteilung Typ II/III
λ	Schadensäquivalenzfaktor
λ_1	Spannweitenbeiwert
λ_2	Verkehrsstärkenbeiwert
λ_3	Fahrstreifenbeiwert, Nutzungsdauerbeiwert

λ_{\max}	obere Begrenzung des λ -Wertes infolge der Dauerfestigkeit
λ_{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 ΔT
$\lambda_{T,\Delta T,h}$	Auftretenswahrscheinlichkeit des Temperaturgradienten ΔT zur Tagesstunde h
$\lambda_{V,h}$	Anteil des Schwerverkehrs während der Stunde h am gesamten Tagesaufkommen
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit
μ_u	Parameter der logarithmischen Normalverteilung
ρ	Verhältnis der Schadensfolgekosten und Konstruktionskosten
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
σ_{MV}	Standardabweichung der Verteilungsfunktion des streuend einwirkenden Biegemomentes infolge Verkehrs
σ_u	Parameter der logarithmischen Normalverteilung
$\varphi(x)$	Verteilungsdichtefunktion der standardisierten Normalverteilung
$\Phi(x)$	Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung
ψ	Kombinationsbeiwert einer Einwirkung
ψ_0	normativer Kombinationsbeiwert für den Grundwert der Begleiteinwirkung
$\psi_{0,\text{Mess}}$	messwertgestützter Kombinationsbeiwert für den Grundwert der Begleiteinwirkung
ψ_1	normativer Kombinationsbeiwert für den häufigen Wert der Begleiteinwirkung
ψ_1'	normativer Kombinationsbeiwert für den nicht-häufigen Wert der Begleiteinwirkung
ψ_2	normativer Kombinationsbeiwert für den quasi-ständigen Wert der Begleiteinwirkung
ψ_T	Kombinationsbeiwert der Begleiteinwirkung für den Zeitraum T