

Zur analytischen Herleitung von Verkehrslastmodellen für die Tragfähigkeit und Ermüdung von Straßenbrücken

vorgelegt von

M.Sc.

Josef Karl Kraus

geb. in Deggendorf

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. Frank Rackwitz

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ursula Freundt

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krieger

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 15. Juli 2021

Berlin 2021

Kurzfassung

Die Bestimmung realistischer Verkehrslastmodelle für Straßenbrücken hat aus volkswirtschaftlicher Sicht eine enorme Bedeutung, da sich viele Bauwerke im Grenzbereich ihrer rechnerischen Tragfähigkeit befinden. Zur einfachen Herleitung objektspezifischer Lastmodelle werden in dieser Arbeit zwei aufeinander aufbauende analytische Verfahren entwickelt. Diese ermöglichen eine Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung hinsichtlich der Tragfähigkeit von Brücken sowie von Mehrstufenkollektiven bezüglich Ermüdung. Die Grundlage hierfür ist eine probabilistische Analyse extremer und ermüdungsrelevanter Laststellungen. Für beide Verfahren erfolgt jeweils eine Verifizierung anhand von Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit dem ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verkehrslastsimulationsprogramm PATLoB. Die Verfahren werden jeweils abschließend in ein vereinfachtes Handrechenverfahren überführt und an generischen Beispielen veranschaulicht. Die Methodik erlaubt eine Anwendung auf beliebige Verkehre, eine Vielzahl statischer Systeme sowie sämtliche Situationen mehrspurigen Verkehrs. Zusätzlich stellen die im Ergebnis ermittelbaren Lastmodelle einen anschaulichen Bezug zu realem Verkehr beziehungsweise einer realen Anordnung der Lkw her. Dies ermöglicht unter anderem eine Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse bisheriger Verfahren.

Abstract

The identification of realistic traffic load models for road bridges is of enormous importance from an economic perspective, since many structures are at the limit of their calculated load-bearing capacity. In order to easily derive object-specific load models, two analytical methods, which build on each other, are developed in this work. These allow the determination of extreme values of traffic load effects regarding the load-bearing capacity and of the effect spectrum concerning fatigue. The basis for this is the probabilistic analysis of extreme and fatigue-relevant load positions. Both methods are verified using long-term Monte Carlo simulations with the traffic load simulation program PATLoB, which was also developed in the context of this work. The procedures are finally simplified for manual calculations and are illustrated with generic examples. The methodology allows application to any traffic, a variety of structural systems and all situations of multi-lane traffic. In addition, the load models that can be determined in the result provide a clear reference to real traffic, i.e. a real arrangement of trucks. This enables a plausibility check of the results of previous methods.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau der Technischen Universität Berlin.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler für die Gelegenheit zur Mitarbeit an zahlreichen Forschungsaufträgen, seine vielfältigen Anregungen und vor allem das gegenseitige Vertrauen.

Frau Prof. Dr.-Ing. Ursula Freundt bin ich für den positiven Austausch, ihre Anregungen zur kritischen Betrachtung meiner Arbeit sowie für die Übernahme des Korreferates sehr dankbar.

Bei Herrn Direktor und Professor Dr.-Ing. Jürgen Krieger bedanke ich mich für das Interesse an dieser Arbeit sowie ebenfalls für die Übernahme des Korreferates.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau, darunter vor allem Herrn Dr.-Ing. Nico Steffens und Herrn M.Sc. Andreas Jansen, sowie auch Herrn Dr.-Ing. Sebastian Böning vom Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt danke ich für die stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion und die vielen wertvollen Hinweise.

Den Herren M.Sc. Bastian Sweers, M.Sc. Johannes Ziegert und M.Sc. Staffan Langner danke ich für ihren Beitrag zur vorliegenden Arbeit in Form ausgezeichneter Abschlussarbeiten.

Für die Durchsicht des Manuskriptes bedanke ich mich bei meiner Schwester Caroline Kraus und Frau Friederike Fischer.

Weiterhin danke ich meinen Eltern, dass sie mir stets als Vorbild zur Seite stehen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Svenja für den Rückhalt, ihre Unterstützung und Geduld während der gesamten Arbeit.

Berlin, im Februar 2020

Josef Karl Kraus

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielstellung.....	1
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Grundlagen zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken.....	5
2.1	Eingangsparameter	5
2.1.1	Fahrzeugkollektiv	5
2.1.2	Verkehrszustände.....	10
2.1.3	Verkehrsprognosen	37
2.1.4	Brückentragwerk.....	39
2.2	Extremwertanalyse	40
2.2.1	Extremwerttheorie	40
2.2.2	Charakteristischer Wert	41
2.2.3	Methoden zur Extremwertanalyse	42
2.3	Ermüdungsanalyse.....	53
2.3.1	Beanspruchungskollektiv.....	53
2.3.2	Wöhlerlinie	54
2.3.3	Schadensakkumulation	55
2.3.4	Schadensäquivalenz.....	57
2.4	Verkehrslastsimulation.....	61
2.5	Bisherige analytische Verfahren	65

2.5.1	Analytische Verfahren zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung	65
2.5.2	Analytische Verfahren zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung	66
3	Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung	69
3.1	Erläuterung des Rechenmodells	69
3.1.1	Allgemeines	69
3.1.2	Ermittlung der Beanspruchungsverteilung extremer Laststellungen	70
3.1.3	Ermittlung der Häufigkeit extremer Laststellungen	73
3.1.4	Ermittlung der Extremwerte der Verkehrsbeanspruchung	81
3.1.5	Beispiel	81
3.2	Verifizierung des Rechenmodells	84
3.2.1	Definition des Untersuchungsumfangs	84
3.2.2	Referenzergebnisse aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen	85
3.2.3	Ergebnisse der analytischen Lösung	94
3.3	Sensitivitätsanalyse	99
3.3.1	Einfluss unterschiedlicher extremer Laststellungen	99
3.3.2	Einfluss der Häufigkeit extremer Laststellungen	101
3.3.3	Einfluss der Fahrzeuggesamtgewichte	105
3.3.4	Zusammenfassung	108
3.4	Vereinfachung der analytischen Lösung	110
3.4.1	Allgemeines	110
3.4.2	Beispiel	112
3.5	Schlussfolgerungen	113
4	Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung	115
4.1	Erläuterung des Rechenmodells	115
4.1.1	Allgemeines	115

4.1.2	Ermittlung der Schwingbreitenverteilung ermüdungsrelevanter Laststellungen.....	116
4.1.3	Ermittlung der Häufigkeit ermüdungsrelevanter Laststellungen.....	118
4.1.4	Ermittlung der Mehrstufenkollektive der Verkehrsbeanspruchung	119
4.1.5	Approximation der Mehrstufenkollektive für eine Vielzahl an Laststellungen.....	119
4.1.6	Beispiel	122
4.2	Verifizierung des Rechenmodells	127
4.2.1	Definition des Untersuchungsumfangs.....	127
4.2.2	Referenzergebnisse aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen	128
4.2.3	Ergebnisse der analytischen Lösung.....	134
4.3	Sensitivitätsanalyse	140
4.3.1	Einfluss unterschiedlicher ermüdungsrelevanter Laststellungen.....	140
4.3.2	Einfluss der Häufigkeit ermüdungsrelevanter Laststellungen.....	141
4.3.3	Einfluss der Fahrzeuggesamtwichte	145
4.3.4	Zusammenfassung	148
4.4	Vereinfachung der analytischen Lösung.....	149
4.4.1	Allgemeines	150
4.4.2	Beispiel	153
4.5	Schlussfolgerungen	155
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	159
5.1	Zusammenfassung	159
5.1.1	Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten	159
5.1.2	Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven	161
5.2	Ausblick.....	163
Anhang	165
A	Fahrzeugkollektive.....	167
A.1	Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran.....	168

A.2	Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran	169
A.3	Schwerverkehrsvariante 1	170
A.4	Schwerverkehrsvariante 2	171
B	Brückenkatalog	173
C	Einflusslinien	177
C.1	Einflusslinien – Einfeldträger.....	178
C.1.1	Feldmoment [kNm].....	178
C.1.2	Querkraft am Auflager A [kN].....	178
C.2	Einflusslinien – Zweifeldträger	179
C.2.1	Stützmoment [kNm].....	179
C.2.2	Feldmoment an der Stelle m [kNm].....	179
C.2.3	Querkraft am Randauflager A [kN]	180
C.2.4	Querkraft am Mittelaflager B (links) [kN].....	180
C.3	Einflusslinien – Dreifeldträger	181
C.3.1	Stützmoment [kNm].....	181
C.3.2	Feldmoment im Randfeld an der Stelle m [kNm].....	182
C.3.3	Feldmoment im Mittelfeld an der Stelle m [kNm]	183
C.3.4	Querkraft am Randauflager A [kN]	184
C.3.5	Querkraft am Mittelaflager B (links) [kN].....	185
C.3.6	Querkraft am Mittelaflager B (rechts) [kN].....	186
C.4	Einflusslinien – Eingespannter Träger	187
C.4.1	Randmoment [kNm]	187
C.4.2	Feldmoment [kNm].....	187
D	Extremwertverteilungen der Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen	189
D.1	Einfeldträger-Feldmoment	190
D.2	Zweifeldträger-Stützmoment.....	195
E	Häufigkeiten extremer Laststellungen.....	201
E.1	Einfeldträger-Feldmoment bei Langstreckenverkehr.....	202

E.1.1	Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen).....	202
E.1.2	Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)	203
E.1.3	Richtungsverkehr (3 Fahrstreifen)	203
E.1.4	Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen).....	204
E.2	Zweifeldträger-Stützmoment bei Langstreckenverkehr	206
E.2.1	1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr).....	206
E.2.2	Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)	211
E.2.3	Richtungsverkehr (3 Fahrstreifen)	213
E.2.4	Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen).....	215
E.3	Einfeldträger-Feldmoment bei Ortsverkehr	221
E.3.1	Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen).....	221
E.3.2	Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)	222
F	Häufigkeiten ermüdungsrelevanter Laststellungen	223
F.1	Einfeldträger-Feldmoment bei Langstreckenverkehr.....	224
F.1.1	Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen).....	224
F.1.2	Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen).....	225
F.1.3	Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen).....	226
F.2	Zweifeldträger-Stützmoment bei Langstreckenverkehr	227
F.2.1	Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen).....	227
F.2.2	Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen).....	228
F.2.3	Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen).....	229
F.3	Einfeldträger-Feldmoment bei Ortsverkehr	230
F.3.1	Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen).....	230
F.3.2	Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen).....	231

Nomenklatur	233
Abbildungsverzeichnis	239
Tabellenverzeichnis	249
Literaturverzeichnis	253

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Eine zuverlässige und leistungsfähige Straßeninfrastruktur ist aus volkswirtschaftlicher Sicht unverzichtbar. Brücken sind wesentlicher Bestandteil dieser Infrastruktur und bedürfen aufgrund der hohen Investitions- und Folgekosten besonderer Beachtung. Ein alternder Brückenbestand, zunehmendes Verkehrsaufkommen und steigende Gesamtgewichte im Schwerverkehr sowie die allgemeine Forderung, Verkehrseinschränkungen zu vermeiden, führen zur Notwendigkeit einer kontinuierlichen Instandhaltung und im Bedarfsfall Ertüchtigung der Brücken. Die derzeit in großem Umfang stattfindende Nachrechnung von Brücken liefert die Entscheidungsgrundlage, ob und in welchem Ausmaß bauliche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um das angestrebte Sicherheitsniveau zu gewährleisten. Viele Bauwerke befinden sich bereits im Grenzbereich ihrer rechnerischen Tragfähigkeit. Häufig treten dabei jedoch Defizite auf, die unter anderem auf konservative Verkehrslastmodelle zurückzuführen sind. Die möglichst realistische Bestimmung der Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken hat daher eine enorme Bedeutung, da hierdurch objektspezifische Reserven ausgenutzt werden können.

1.2 Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Methoden zur analytischen Herleitung von Verkehrslastmodellen für Straßenbrücken. Die Grundlage hierfür bilden analytische Verfahren zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung hinsichtlich der Tragfähigkeit von Brücken sowie von Mehrstufenkollektiven bezüglich Ermüdung. Folgende Anforderungen werden gestellt:

- Die analytisch begründeten Verkehrslastmodelle sollen einen anschaulichen Bezug zu realem Verkehr beziehungsweise einer realen Anordnung der Lkw herstellen, welcher bei den üblicherweise angewandten Lastmodellen nicht gegeben ist.
- Die Methodik soll eine Anwendbarkeit auf möglichst beliebige Verkehre und statische Systeme ermöglichen, darunter insbesondere sämtliche Situationen mehrspurigen Verkehrs. Diese Allgemeingültigkeit wird von bisherigen analytischen Ansätzen nicht erreicht.
- Es ist eine Genauigkeit zu erreichen, die den Anforderungen einer objektspezifischen Untersuchung genügt.

Im Ergebnis soll eine einfache Möglichkeit vorliegen, die Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken alternativ zu einer bisher im Regelfall angewandten Verkehrslastsimulation oder einem Bauwerksmonitoring zu ermitteln. Dies ermöglicht insbesondere auch eine Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse bisheriger Verfahren.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich nach der Einleitung in die nachstehend kurz erläuterten Kapitel:

Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken. Der Fokus liegt zunächst auf den verkehrsseitigen Eingangsparametern, welche für beide analytische Verfahren, d.h. hinsichtlich Tragfähigkeit und Ermüdung, eine größtenteils einheitliche Basis darstellen. Es folgt eine Beschreibung der Methoden zur Analyse extremer und ermüdungsrelevanter Beanspruchungen sowie der jeweils zugrundeliegenden Theorien. Zusätzlich wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verkehrslastsimulationsprogramm PATLoB erläutert. Abschließend werden bisherige analytische Verfahren vorgestellt und deren Einschränkungen analysiert.

In Kapitel 3 wird das analytische Verfahren zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung vorgestellt. Dazu werden zunächst die nötigen theoretischen Grundlagen entwickelt und deren Zusammenhänge beschrieben. Anschließend erfolgt eine Verifizierung des Rechenmodells anhand von Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen der Verkehrsbeanspruchung mit Hilfe des Programms PATLoB. Als Vergleichsgrundlage dienen charakteristische Werte. Im Folgenden wird in einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss der verschiedenen Eingangsparameter auf das Ergebnis der analytischen Lösung untersucht. Das Verfahren wird abschließend in ein vereinfachtes Handrechenverfahren überführt und an einem generischen Beispiel veranschaulicht.

Kapitel 4 befasst sich mit der Entwicklung des analytischen Verfahrens zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung. Der Aufbau dieses Kapitels ist weitestgehend identisch zum vorherigen. Als Vergleichsgrundlage zur Verifizierung und Sensitivitätsanalyse dienen schädigungsäquivalente Schwingbreiten. Zum Schluss wird auch hier das Verfahren auf ein vereinfachtes Handrechenverfahren reduziert und an einem Beispiel dargestellt.

Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen und liefert einen Ausblick über den weiterführenden Forschungsbedarf.

Kapitel 2

Grundlagen zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken

2.1 Eingangsparmeter

Grundlage dieser Arbeit sind u. a. die Eingangsparmeter zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung, siehe Abbildung 2.1. Ein Großteil der Parameter ist stochastischer Art, wodurch im späteren Verlauf eine stochastische Berechnung unumgänglich ist. Die folgenden Abschnitte liefern eine Beschreibung der einzelnen Parameter.

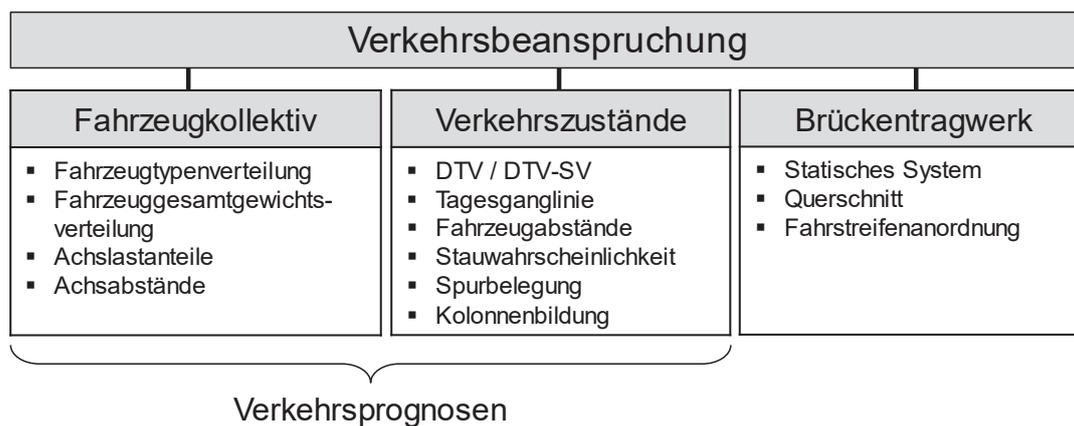


Abbildung 2.1: Eingangsparmeter zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung

2.1.1 Fahrzeugkollektiv

Das Verkehrsaufkommen setzt sich aus einer Vielzahl verschiedener Fahrzeugtypen zusammen, darunter beispielsweise Motorräder, Pkw, Lieferwägen, Lkw mit und ohne Anhänger, Sattelzüge sowie Großraum- und Schwertransporte. Jeder Fahrzeugtyp wird durch einen Anteil

am Gesamtverkehr, Gesamtgewichtsverteilung, Achslastanteile und Achsabstände charakterisiert. Eine Sammlung dieser Informationen für alle Fahrzeugtypen im betrachteten Streckenabschnitt wird hier als Fahrzeugkollektiv bezeichnet. Für jeden Fahrzeugtyp werden in [TLS 2012] Kennziffern vergeben, die auch in dieser Arbeit Verwendung finden. Ein überaus häufig vorkommendes Fahrzeug stellt beispielsweise der Lkw Typ 98 dar, ein Sattelzug mit zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsigem Sattelaufleger.

Die Datengrundlage zur Bestimmung eines Fahrzeugkollektivs liefern vorrangig Weigh-in-Motion- (WiM) und Bridge-Weigh-in-Motion-Anlagen (BWim). Deren Anzahl im Straßennetz ist jedoch gering. Eine Übersicht zu den Standorten der WiM-Anlagen im Straßennetz der Bundesrepublik Deutschland liefert Abbildung 2.2.



Abbildung 2.2: Standort der WiM-Anlagen der Bundesanstalt für Straßenwesen [Fits18]

In der Literatur finden sich inzwischen zahlreiche Arbeiten, die sich mit den technischen Hintergründen derartiger Anlagen sowie der Datenauswertung beschäftigen, siehe u. a. [Mose79],

[COST323], [EnOb11], [TLS 2012], [FVBP14], [LTRM16] und [LoŽn19], worauf hier jedoch nicht explizit eingegangen wird. Aufgrund des teilweise beschränkten Zugangs ist die Zusammenstellung ausgewerteter WiM- und BWiM-Daten unterschiedlicher Anlagen in [FBKGK18] hervorzuheben. Ergänzende Daten, wenn auch weniger detailliert, können aus automatischen Dauerzählstellen und manuellen Zählstellen gewonnen werden, wie u. a. in [GeSK19] beschrieben, da diese im Straßennetz nahezu flächendeckend vorhanden sind. Verfügbare Daten der Straßenbaubehörden werden aktuell zunehmend über Geoinformationssysteme (GIS) zur Verfügung gestellt.

2.1.1.1 Fahrzeugtypenverteilung

Zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung ist es zielführend, die Gesamtheit aller Fahrzeugtypen auf die häufigsten und maßgebendsten Typen zu reduzieren. Abbildung 2.3 zeigt dazu beispielhaft eine Fahrzeugtypenverteilung.

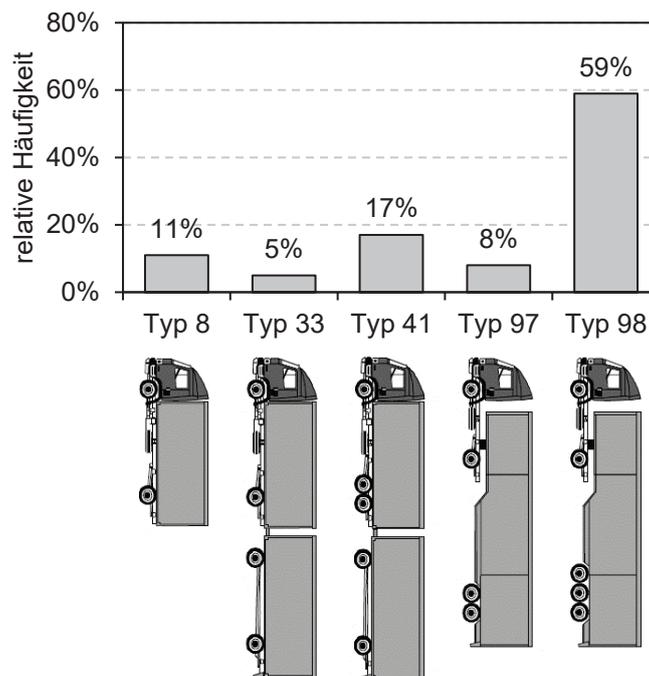


Abbildung 2.3: Beispielhafte Fahrzeugtypenverteilung

Die Fahrzeugtypenverteilung in der obigen Abbildung wurde bereits auf die häufigsten Typen reduziert. Außerdem beschränkt sich diese Auswahl auf Fahrzeuge des Schwerverkehrs, da diese zu den maßgebendsten Typen zählen. Eine grundlegende Annahme ist, dass leichte Fahrzeuge, wie Motorräder und Pkw, aufgrund ihrer verhältnismäßig geringen Gesamtmasse vernachlässigt werden können, ohne dass dadurch eine signifikante Änderung der Ergebnisse entstehen würde.

2.1.1.2 Gesamtgewichtsverteilung

Das Gesamtgewicht eines Fahrzeugtyps ist eine stark streuende Größe und wird üblicherweise in Form einer Verteilungsfunktion angegeben. Häufig handelt es sich hierbei um eine näherungsweise bimodale Größe, wobei angenommen wird, dass die beiden Modalwerte unbeladene und beladene Fahrzeuge charakterisieren. Typische Funktionen zur Beschreibung des Fahrzeuggesamtgewichts sind die Normal- und Doppelnormal-Verteilung sowie abgeschnittene Varianten dieser beiden. Der Lkw Typ 98 wird beispielhaft in Abbildung 2.4 zusammen mit einer Gesamtgewichtsverteilung, Achslastanteilen und Achsabständen dargestellt.

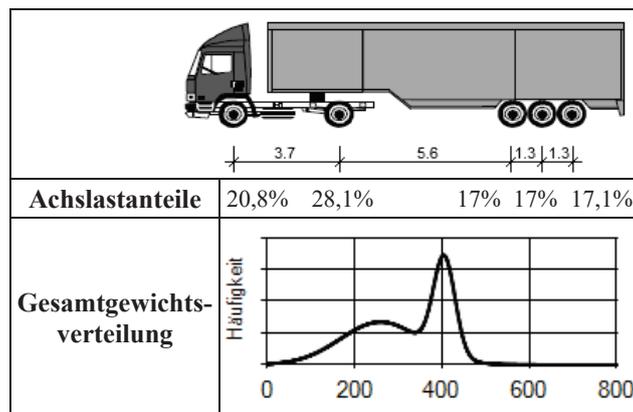


Abbildung 2.4: Achsabstände, Achslastanteile und Gesamtgewichtsverteilung eines Lkw Typ 98

2.1.1.3 Achslastanteile

Die Achslasten eines Fahrzeugtyps resultieren aus dem Fahrzeuggesamtgewicht und den prozentualen Achslastanteilen. Im Allgemeinen zeigt diese Größe eine Abhängigkeit vom Beladungszustand. Vereinfachend werden jedoch in der vorliegenden Arbeit unbeladene und beladene Fahrzeuge desselben Typs hinsichtlich der Achslastanteile identisch behandelt, d.h. sie beziehen sich stets auf beladene Fahrzeuge, da diese von wesentlicherer Bedeutung sind.

2.1.1.4 Achsabstände

Die Achsabstände eines Fahrzeugtyps unterliegen ebenfalls einer gewissen Streuung. Es wäre daher prinzipiell möglich, entsprechende Verteilungsfunktionen anzugeben. Da deren Streuung jedoch sehr moderat ausfällt, wird üblicherweise vereinfachend deterministisch mit den Mittelwerten gerechnet.

2.1.1.5 Genehmigungspflichtiger Schwerverkehr

Der genehmigungspflichtige Schwerverkehr besteht aus unterschiedlichsten Fahrzeugtypen. Dazu zählen alle Fahrzeuge, die die vorgeschriebenen Abmessungen, Achslasten oder Gesamtgewichte gemäß §32 und §34 [StVZO] überschreiten und daher eine Ausnahmegenehmigung

gemäß §70 [StVZO] sowie eine Erlaubnis gemäß §29 und §46 [StVO] benötigen. Näherungsweise kann der genehmigungspflichtige Schwerverkehr auch durch wenige (konservative) Ersatzfahrzeuge abgebildet werden, vgl. Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6. Diese bei der Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung zu berücksichtigen hat bedeutende Auswirkungen auf die Ergebnisse, sowohl hinsichtlich der Extremwerte [Kasc09] als auch der Ermüdungsbeanspruchung [GKFB18] infolge des Straßenverkehrs.

Wesentlich ist die Abgrenzung zwischen Schwertransporten mit flächendeckender und streckengebundener Dauergenehmigung sowie Einzelfahrtgenehmigung. Flächendeckende Dauergenehmigungen können nach [BEM-ING Teil 3.1] nur für Kranfahrzeuge mit bis zu 48 Tonnen und sonstige Fahrzeuge mit bis zu 60 Tonnen erteilt werden. Streckengebundene Dauergenehmigungen werden in einigen Bundesländern für Fahrzeuge mit bis zu 72 Tonnen erteilt, vgl. [Geiß09]. Einzelfahrtgenehmigungen betreffen unter anderem auch Schwertransporte mit weit über 100 Tonnen. Der Genehmigungsprozess bedient sich im Regelfall eines einfachen Schnittgrößenvergleichs nach [BEM-ING Teil 3.2] und entscheidet im Ergebnis auch über eventuell notwendige Fahrauflagen. Voraussetzung einer Dauergenehmigung ist, dass Fahrten im regulären Verkehr ohne Fahrauflagen möglich sind.

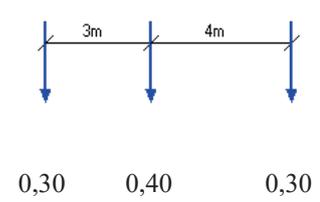
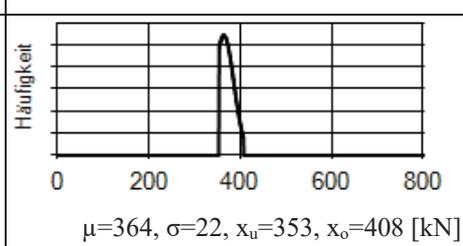
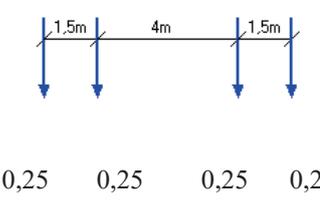
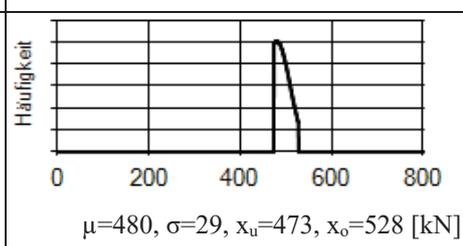
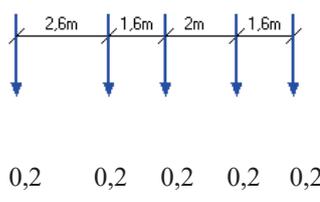
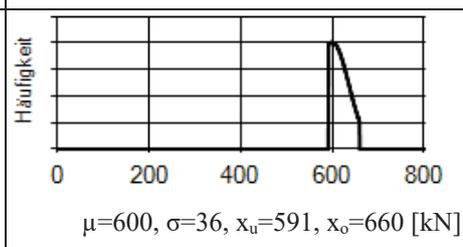
Anteil am DTV-SV	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeuggesamtgewicht (abgeschnittene Normalverteilung)
Ersatzfahrzeug 1 0,47%	 <p>0,30 0,40 0,30</p>	 <p>$\mu=364, \sigma=22, x_u=353, x_o=408$ [kN]</p>
Ersatzfahrzeug 2 0,365%	 <p>0,25 0,25 0,25 0,25</p>	 <p>$\mu=480, \sigma=29, x_u=473, x_o=528$ [kN]</p>
Ersatzfahrzeug 3 0,165%	 <p>0,2 0,2 0,2 0,2 0,2</p>	 <p>$\mu=600, \sigma=36, x_u=591, x_o=660$ [kN]</p>

Abbildung 2.5: Beispielhafte Ersatzfahrzeuge des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs für Lastmodelle zur Nachrechnung von Brücken, vgl. [FrBö13], [FrBö14]

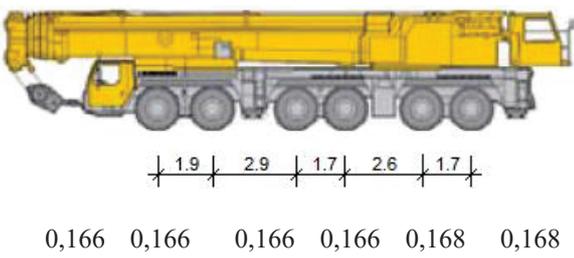
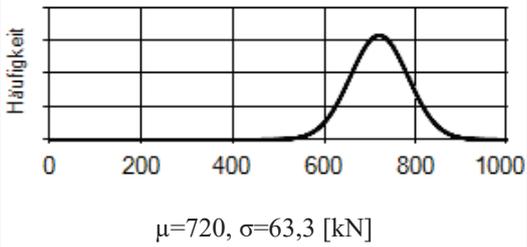
Anteil am DTV-SV	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeugesamtgewicht (Normalverteilung)
72t- Autokran 0,5%	 <p>1,9 2,9 1,7 2,6 1,7</p> <p>0,166 0,166 0,166 0,166 0,168 0,168</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0 200 400 600 800 1000</p> <p>$\mu=720, \sigma=63,3$ [kN]</p>

Abbildung 2.6: Beispielhaftes Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs für Lastmodelle zum Neubau von Brücken, vgl. [FrBöll1a]

Die Abbildung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs bei der Ableitung von Lastmodellen für die Nachrechnung von Brücken ist eng mit der Möglichkeit zur Erteilung von Dauergenehmigungen verknüpft. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Tragfähigkeiten im Brückenbestand ergeben sich einerseits Grenzen einer Dauergenehmigung und andererseits Bedingungen für Ersatzfahrzeuge. Bei der Ableitung von Lastmodellen für den Neubau von Brücken können Ersatzfahrzeuge als gewünschte Leistungsfähigkeit bezüglich Schwertransporten ohne Fahraufgabe aufgefasst werden.

Inwiefern die Ermittlung von Verkehrsbeanspruchungen mit Ersatzfahrzeugen und mit realem genehmigungspflichtigen Schwerverkehr voneinander abweichen, ist aktuell noch nicht abschließend geklärt. Erschwert wird diese Fragestellung vor allem dadurch, den genehmigungspflichtigen Schwerverkehr ganzheitlich zu erfassen. Dies betrifft einerseits die enorme Vielfalt möglicher Fahrzeugkonfigurationen hinsichtlich Geometrie und Gesamtgewicht und andererseits die unterschiedlichen Ausprägungen im Straßennetz.

2.1.2 Verkehrszustände

Zur Abbildung der Verkehrszustände wurden in der Vergangenheit je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Methoden entwickelt. Die verschiedenen Ansätze lassen sich einteilen in:

- mikroskopisches Modell
- makroskopisches Modell

In einem mikroskopischen Modell werden die einzelnen Verkehrsteilnehmer als Individuen betrachtet, die ihrerseits selbstständige Entscheidungen treffen und auf die Entscheidungen anderer Verkehrsteilnehmer reagieren. Zu den wesentlichen Aspekten dieser Methode zählt die Motorisierung der Fahrzeuge sowie Reaktionszeit, Beschleunigungs-, Brems- und Spurwechselverhalten der Fahrer.

Eine makroskopische Simulation fasst die oben genannten Daten der Einzelfahrzeuge zu Zustandsgrößen zusammen. Die wesentlichen Größen sind danach die Verkehrsstärke q [Fzg/h], die Verkehrsdichte k [Fzg/km] und die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} [km/h]. Die Abhängigkeiten zwischen diesen Größen können einem Fundamentaldiagramm wie in Abbildung 2.7 entnommen werden.

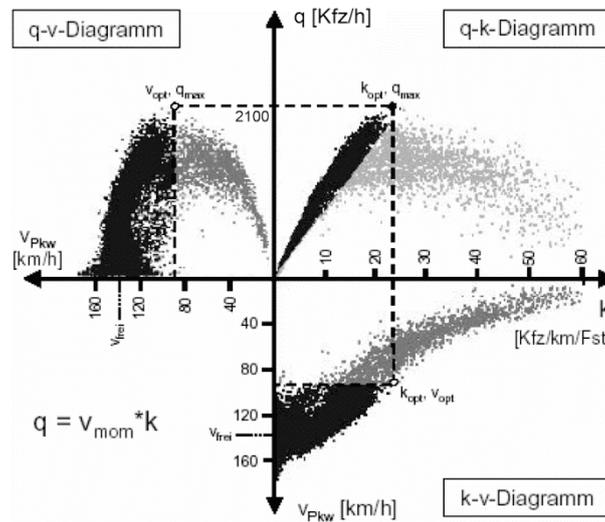


Abbildung 2.7: Fundamentaldiagramm [Kühn04]

Das Fundamentaldiagramm zeigt, dass viele Vorgänge des Verkehrs einen stochastischen Charakter haben. Der Verkehrsstrom ist dabei einer kontinuierlichen Änderung unterworfen. Je mehr Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt fahren, desto geringer werden die mittlere Geschwindigkeit und die Fahrzeugabstände. Die daraus resultierenden Verkehrszustände lassen sich in fließenden Verkehr, stockenden Verkehr und Stau untergliedern.

Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsprogramm verwendet einen Ansatz, der tendenziell eher einer mikroskopischen Simulation zuzuordnen ist, wobei unwesentliche Prozesse stark vereinfacht abgebildet werden. Im Gegensatz zu üblichen Verkehrssimulationen ist hier nur eine Teilstrecke (entsprechend der Brückenlänge) relevant. Da die Dauer einer Überfahrt relativ kurz ist, können sämtliche Vorgänge vernachlässigt werden, die zur Entstehung der unterschiedlichen Verkehrszustände führen. Wesentlich ist nur, welcher Verkehrszustand zum Zeitpunkt der Überfahrt tatsächlich vorhanden ist.

2.1.2.1 DTV und DTV-SV

Der durchschnittliche tägliche Verkehr (*DTV*) und der durchschnittliche tägliche Schwerverkehr (*DTV-SV*) stellen ein Maß für die Priorität des Streckenabschnitts dar. Zudem lässt das tägliche Verkehrsaufkommen in Kombination mit der Linienführung, der Streckenart und der

Anzahl an Fahrstreifen näherungsweise Rückschlüsse auf die Verkehrsqualität des Streckenabschnitts zu. Eine statistische Auswertung zu dem im Straßennetz typischerweise vorhandenen Verkehrsaufkommen liefert Tabelle 2.1.

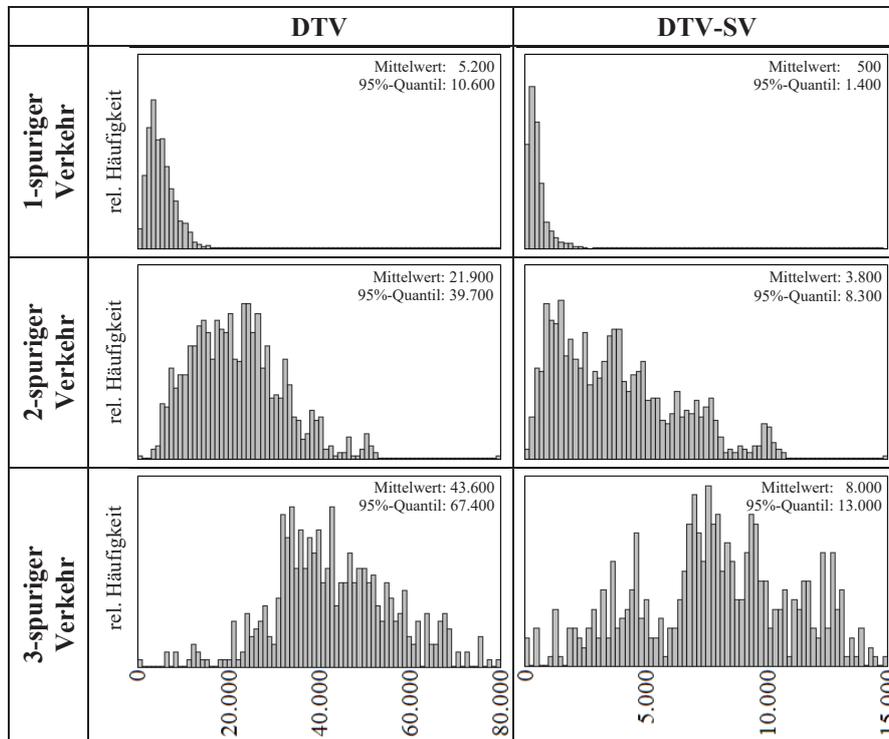


Tabelle 2.1: Verteilung des DTV und DTV-SV pro Richtung auf Autobahnen und Bundesstraßen (jeweils nur für Werktage) (Daten automatischer Dauerzählstellen, vgl. [BASt17])

Der DTV-SV gilt hier als wesentliche Eingangsgröße. Je mehr Lkw pro Tag fahren, desto wahrscheinlicher werden auch extreme Situationen der Verkehrslast, d.h. ungünstige Stellungen gleichzeitig auftretender und besonders schwerer Lkw.

2.1.2.2 Tagesganglinie

Tagesganglinien werden nach [FiNo14] in unterschiedliche Typen unterteilt, wobei jeder Ganglinien-Typ eigene Besonderheiten hinsichtlich Höhe und Uhrzeit der Verkehrsspitzen aufweist. Eine beispielhafte Ganglinie des Gesamtverkehrs (Pkw und Lkw) mit ausgeprägter Doppelspitze wird in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Verkehrsspitzen entsprechen hier den Hauptverkehrszeiten von 6 bis 9 Uhr und von 15 bis 19 Uhr.

In den Tagesganglinien des Schwerverkehrs sind nach [Heid83] keine Verkehrsspitzen zu erwarten. Dementsprechend ausgeglichen ist die Verkehrsverteilung, vgl. beispielhaft Abbildung 2.9. Das Verkehrsgeschehen findet hier hauptsächlich tagsüber statt, wobei nachts mit einer reduzierten Verkehrsmenge zu rechnen ist.

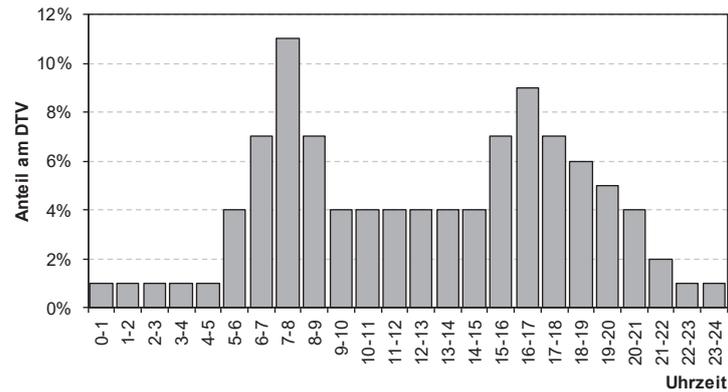


Abbildung 2.8: Beispielhafte Tagesganglinie des Gesamtverkehrs

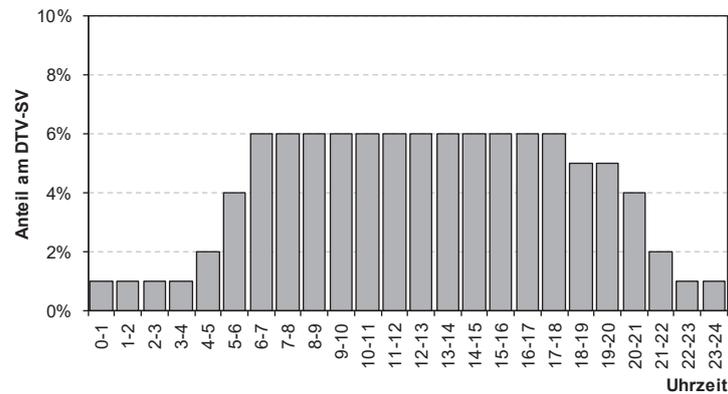


Abbildung 2.9: Beispielhafte Tagesganglinie des Schwerverkehrs

2.1.2.3 Fahrzeugabstände

Die Fahrzeugabstände stehen in direktem Zusammenhang mit den Verkehrszuständen. Im Folgenden wird unterschieden zwischen den Abständen im fließenden Verkehr und im Stau.

2.1.2.3.1 Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr

Zur Modellierung der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr wurden in bisherigen Arbeiten unterschiedlich komplexe Ansätze entwickelt. Verkehrsmessungen zeigen, dass die in der Realität streuenden Abstände näherungsweise einer Log-Normalverteilung folgen. Zusätzlich lässt sich feststellen, dass eine Korrelation zwischen den Fahrzeugabständen und der Verkehrsstärke existiert, vgl. Abbildung 2.7.

In [Merz94] werden die Fahrzeugabstände beispielsweise noch mit 50 m konstant angesetzt. Ansätze mit einer vom durchschnittlichen täglichen Schwerverkehr (*DTV-SV*) abhängigen Log-Normalverteilung werden in [Geiß95], [Günt01], [Kasc09] und [Topu15] verfolgt, vgl. Abbildung 2.10. In [FrBöll1a] wird als Erweiterung ein formelmäßiger Zusammenhang entwickelt, der die Parameter der Log-Normalverteilung in Abhängigkeit der Verkehrsstärke pro Spur in einem Zeitraum von 6 Stunden definiert. Grundlage hierfür ist eine detaillierte Auswertung von WiM-Daten.

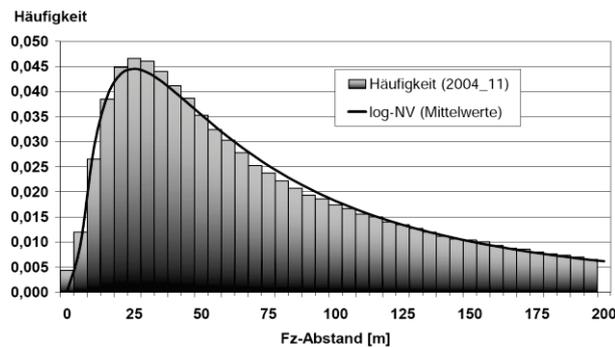


Abbildung 2.10: Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr aus WiM-Daten der Messstelle „A61 Bliesheim, 2004“ (DTV-SV = 10.000) (Log-Normalverteilung mit Erwartungswert $E = 133$ m und Standardabweichung $S = 193$ m) [Kasc09]

Die bisherigen Ansätze werden im Folgenden explizit um den Verkehr mehrspuriger Richtungsfahrbahnen erweitert und auf Stundenintervalle verfeinert. Dazu werden WiM-Daten 2- und 3-spuriger Streckenabschnitte statistisch ausgewertet. Zunächst erfolgt dabei eine Aggregation der Fahrzeugeinzeldaten in Stundenintervalle und je Intervall eine Bestimmung der Verkehrsstärke q [Fzg/h] (aller Spuren einer Richtung einschließlich der Pkw). Für Stundenintervalle ähnlicher Verkehrsstärke werden die Fahrzeugabstände wie in Abbildung 2.11 aufgetragen und durch 3-parametrische Log-Normalverteilungen angepasst (ausschließlich Fahrzeugabstände der Lkw in der Hauptspur).

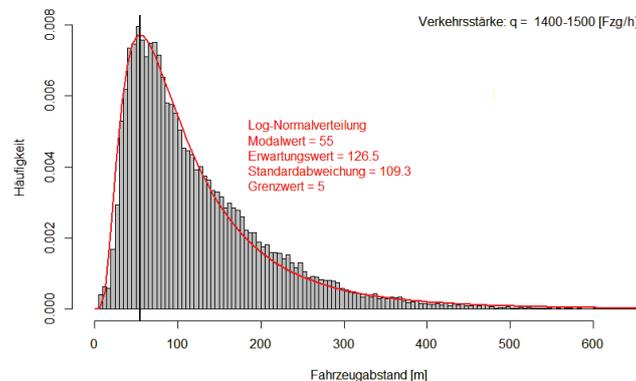


Abbildung 2.11: Beispielhafte Verteilung der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr aus WiM-Daten der Messstelle „A3 Aicha vorm Wald, 2014“ (2-spurige Richtungsfahrbahn)

Besonders kleine Fahrzeugabstände im Bereich weniger Meter können stets mit fehlerhaften Messungen in Verbindung gebracht werden. Derartige Daten werden gefiltert und die Log-Normalverteilungen dementsprechend erst ab einem unteren Grenzwert von $x_0 = 5$ m definiert.

Eine gemeinsame Auswertung der generierten Histogramme zeigt, dass sich der Modalwert der Fahrzeugabstände je Messstelle bei relevanten höheren Verkehrsstärken nur moderat ändert, vgl. Abbildung 2.12. Dieser wird daher im Folgenden mit der unteren Grenze $\hat{x} = 55$ m konstant gehalten, da davon auszugehen ist, dass kleine Fahrzeugabstände ungünstiger wirken.

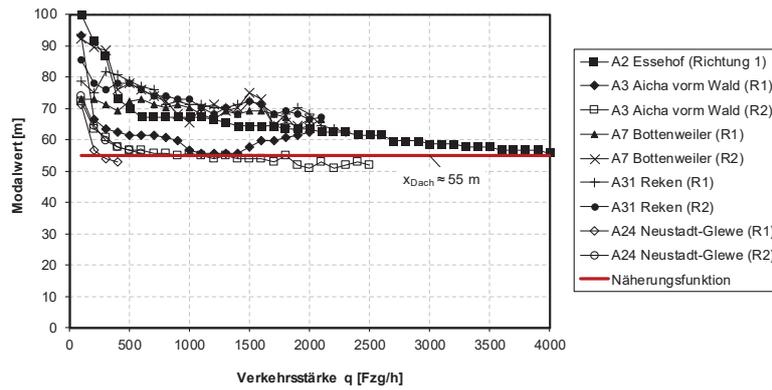


Abbildung 2.12: WiM-Daten und Modell für den Modalwert \hat{x} der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr

Die Erwartungswerte E der Log-Normalverteilungen werden in Abbildung 2.13 dargestellt und durch statistische Modelle angenähert, die analog zum Modalwert jeweils eine untere Grenze bilden.

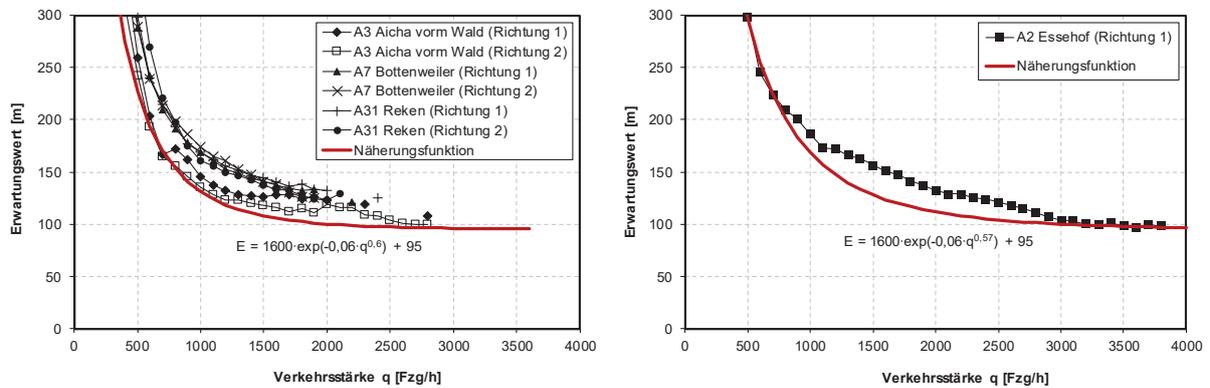


Abbildung 2.13: WiM-Daten und Modell für den Erwartungswert E der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr (links: 2-spurige Richtungsfahrbahn, rechts: 3-spurige Richtungsfahrbahn)

Für 1-spurige Richtungsfahrbahnen konnte aufgrund fehlender Fahrzeugeinzeldaten keine direkte Anpassung durchgeführt werden. Für derartige Fälle wird der auf theoretischen Überlegungen basierende Vorschlag aus [FrBö11a] herangezogen. Danach besteht bei einer separat betrachteten Spur zwischen Erwartungswert der Fahrzeugabstände E , Verkehrsstärke q , mittlerer Geschwindigkeit \bar{v} und mittlerer Fahrzeuggesamtlänge \bar{L}_{FZG} folgender Zusammenhang:

$$\bar{v} = (E + \bar{L}_{FZG}) \cdot q \quad (2.1)$$

Die freien Parameter werden mit $\bar{v} = 80 \text{ km/h}$ und $\bar{L}_{LKW} = 12 \text{ m}$ bzw. $\bar{L}_{PKW} = 3 \text{ m}$ angenommen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeugabstände auch beim 1-spurigen Verkehr stets einen unteren Grenzwert von $x_0 = 5 \text{ m}$ und einen Modalwert von $\hat{x} = 55 \text{ m}$ aufweisen.

Insgesamt können damit die Log-Normalverteilungen der Fahrzeugabstände mit den drei Parametern (E , \hat{x} und x_0) abhängig von der Verkehrsstärke q [Fzg/h] vollständig beschrieben werden:

$$E(q) = \begin{cases} 80.000 \cdot q^{-1} - \bar{L}_{Fzg} & \text{für 1-spurigen Verkehr} \\ 1.600 \cdot \exp(-0,06 \cdot q^{0,60}) + 95 & \text{für 2-spurigen Verkehr} \\ 1.600 \cdot \exp(-0,06 \cdot q^{0,57}) + 95 & \text{für 3-spurigen Verkehr} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\hat{x} = 55m \quad (2.3)$$

$$x_0 = 5m \quad (2.4)$$

$$S = (E - x_0) \cdot \sqrt{\left(\frac{E - x_0}{\hat{x} - x_0}\right)^{2/3} - 1} \quad (2.5)$$

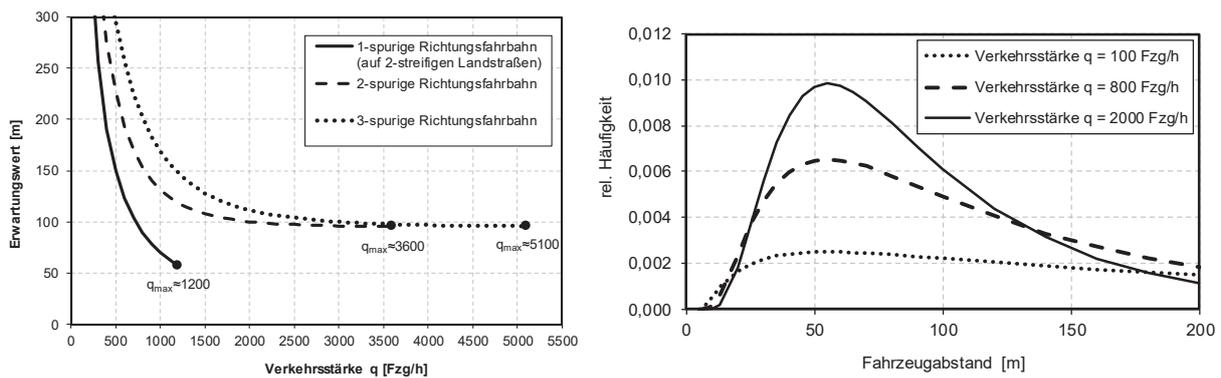


Abbildung 2.14: Zusammenstellung der Modelle für den Erwartungswert E der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr maximalen Verkehrsstärken q_{max} nach [BrZu03] und [HBS05] (links) sowie beispielhaft die Log-Normalverteilung der Fahrzeugabstände einer 2-spurigen Richtungsfahrbahn als Ergebnis der Modelle (rechts)

2.1.2.3.2 Fahrzeugabstände im Stau

Für die Abstände der Fahrzeuge im Stau wurden in bisherigen Untersuchungen verschiedene Ansätze herangezogen. Die Abstände wurden entweder konstant mit 2,5 m, vgl. [Geiß95], oder 5,0 m angenommen, vgl. [Merz94], [NBBP07], [Geiß09], [FrBö11a], [Böni13] und [Topu15], folgen einer Gleichverteilung zwischen den Schranken 5,0 m und 15,0 m bzw. 5,0 m und 25,0 m, vgl. [Böni13] und [FrBö11b], oder wurden entsprechend einer Normal- oder Beta-Verteilung implementiert, vgl. [Kosh85] und [Mens00]. Eine durch Messungen abgesicherte Begründung dieses Parameters lag bisher nicht vor und wurde in [FBKKGK18] erstmalig umgesetzt. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Vorab ist festzuhalten, dass die Geometrie eines Lkws in Verkehrslastsimulationen üblicherweise allein über dessen Achsabstände definiert wird. Da hier keine vorderen und hinteren

Fahrzeugüberstände berücksichtigt werden, müssen diese vom Stauabstand mitberücksichtigt werden. Ein minimaler Stauabstand lässt sich daher anhand praktischer Überlegungen definieren. Dabei wäre der eigentliche Fahrzeugabstand gleich Null und der vordere und hintere Fahrzeugüberstand minimal, d.h. der kleinste Stauabstand ergibt sich aus der reinen Fahrzeuggeometrie. In der Praxis wird ein solch kleiner Abstand enorm selten eintreten, ist jedoch z.B. durch Auffahrunfälle nicht komplett auszuschließen. Anhand einer Auswertung diverser Fahrzeuggeometrien konnte die Summe aus minimalem vorderen und hinteren Überstand und damit der untere Grenzwert der gesuchten Verteilung mit $x_0 = 1,9 \text{ m}$ festgelegt werden.

Die in der Realität auftretenden Stauabstände an freien Strecken wurden über eine Videoauswertung bestimmt, vgl. Abbildung 2.15. Dazu wurden folgende Streckenabschnitte aufgrund ihrer enorm hohen Stauwahrscheinlichkeit ausgewählt:

- Autobahndreieck Potsdam (A10)
- Autobahnkreuz Stuttgart (A8)



Abbildung 2.15: Erfassung der Stauabstände (Fahrzeugüberstände und Fahrzeugabstände), AD Potsdam (A10) [FBKGK18]

Von Interesse waren einerseits nur Abstände zwischen Lkw (d.h. nicht zwischen Pkw oder Lkw und Pkw) und andererseits nur solche Situationen, in denen die betreffenden Lkw auch tatsächlich zum Stillstand kamen. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung werden in Abbildung 2.16 dargestellt. Die Messwerte konnten durch eine 3-parametrische Log-Normalverteilung gut abgebildet werden.

2 Grundlagen zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken

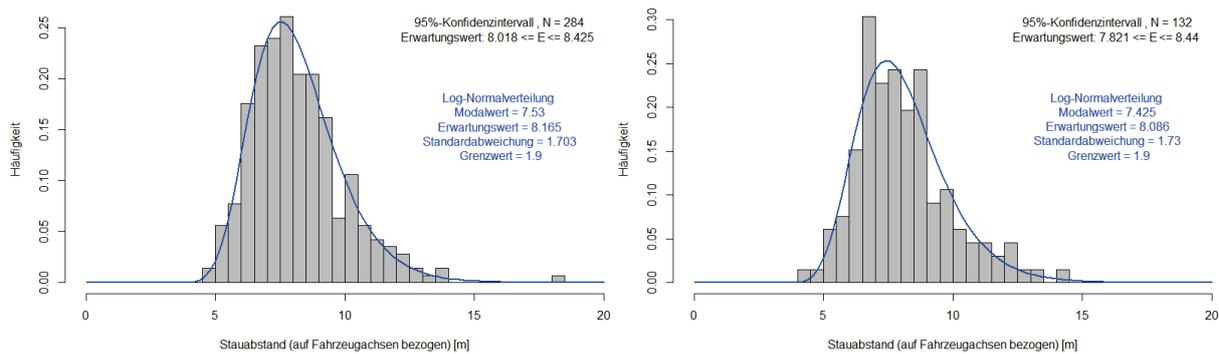


Abbildung 2.16: Auswertung der Staubabstände am Autobahndreieck Potsdam (A10), ca. 280 Messwerte (links) und Autobahnkreuz Stuttgart (A8), ca. 130 Messwerte (rechts) [FBKGGK18]

Ergänzend zur Auswertung an freien Strecken wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit weitere Messungen an Lichtsignalanlagen durchgeführt. Anstatt der Videoauswertung wurden die Einzelwerte mit Hilfe eines Laser-Distanzmessgerätes ermittelt. Dazu wurden folgende Knotenpunkte aufgrund ihres enorm hohen Schwerverkehrsaufkommens ausgewählt:

- Lichtsignalanlage in Berlin (Seestraße zwischen Nordufer und Dohnagestell)
- Lichtsignalanlage in Löwenberg (B96, B167)

Von Interesse waren auch hier nur Abstände zwischen Lkw und nur solche Situationen, in denen die betreffenden Lkw auch tatsächlich zum Stillstand kamen. Da die gewählte Messmethode keine Fahrzeugüberstände erfasst, werden diese nachträglich anhand zufällig ausgewählter Werte der Videoauswertung ergänzt. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung werden in Abbildung 2.17 dargestellt.

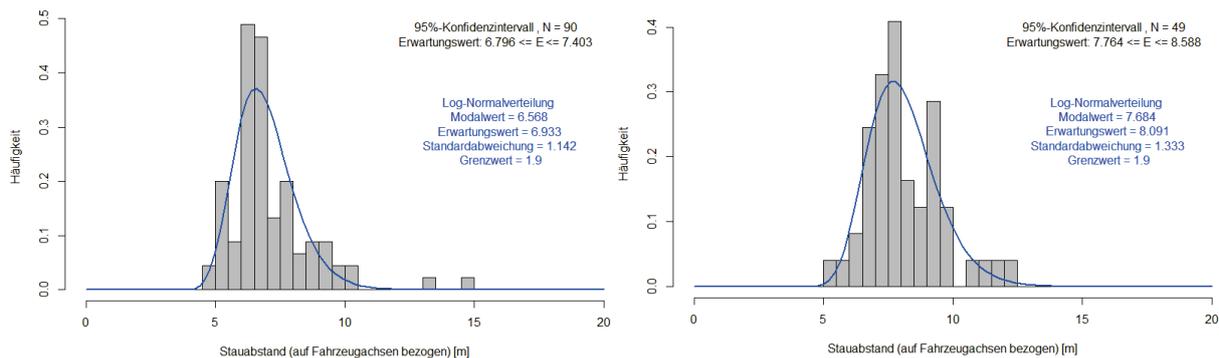


Abbildung 2.17: Auswertung der Staubabstände in Berlin, Seestr. zw. Nordufer und Dohnagestell, ca. 90 Messwerte (links) und Löwenberg (B96, B167), ca. 50 Messwerte (rechts)

Aufgrund der starken Ähnlichkeit der Ergebnisse im ländlichen und den sichtlich kleineren Werten im städtischen Raum werden für das Modell der Staubabstände die Parameter in Tabelle 2.2 vorgeschlagen.

	Verteilungstyp	unterer Grenzwert	Erwartungswert	Standardabweichung
ländlicher Raum	LNV	$x_0 = 1,9 \text{ m}$	$E = 8,1 \text{ m}$	$S = 1,7 \text{ m}$
städtischer Raum	LNV	$x_0 = 1,9 \text{ m}$	$E = 6,9 \text{ m}$	$S = 1,1 \text{ m}$

Tabelle 2.2: Modell der Stauabstände (bezogen auf Fahrzeugachsen)

Vergleichende Verkehrslastsimulationen mit Brückentragwerken, Fahrzeugkollektiven und Verkehrszuständen analog zu Abschnitt 3.2.1 zeigen, dass ein konstanter Stauabstand von $6,5 \text{ m}$ zu den hier ermittelten Log-Normalverteilungen vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der charakteristischen Werte liefert.

2.1.2.4 Lkw-Kolonnen

Im heutigen Verkehr enthaltene Lkw-Kolonnen können entsprechend eines Vorschlags in [Seif90] erfasst werden. Zur Definition von Kolonnen ist dabei eine Angabe erforderlich, bis zu welchem Fahrzeugabstand hintereinanderfahrende Lkw noch als Kolonne gelten (z.B. 100 m) und wie häufig eine bestimmte Anzahl an Lkw hintereinander mit diesem Maximalabstand auftritt (z.B. 2 ... 7). Eine entsprechende Beschreibung von Lkw-Kolonnen liefert Abbildung 2.18 basierend auf einer Auswertung von WiM-Daten unterschiedlicher Messstellen an Bundesautobahnen. Die Zahlenwerte sind Mittelwerte der Messstellen „A2 Essehof, 2014“, „A24 Neustadt-Glewe, 2007“, „A3 Aicha vorm Wald, 2014“, „A31 Reken, 2015“, „A61 Bliesheim, 2006“, „A7 Bottenweiler, 2015“ und „A9 Baarer Weiher, 2013“.

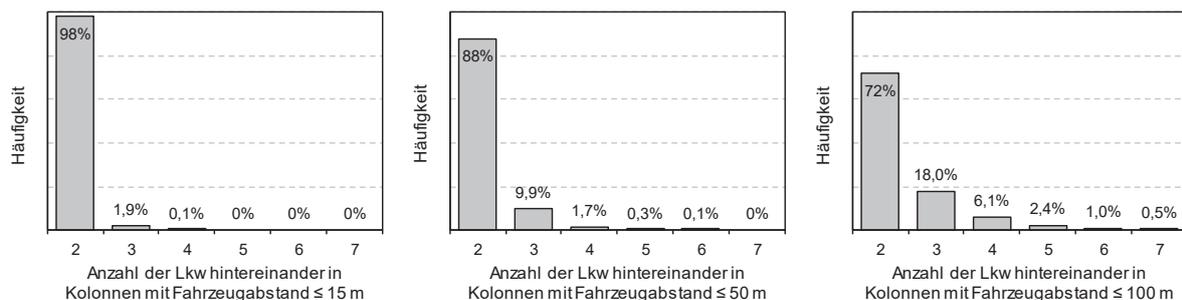


Abbildung 2.18: Verteilung der Kolonnenlängen bei unterschiedlicher Definition des max. Kolonnenabstands (basierend auf WiM-Daten)

Anzumerken ist, dass Lkw-Kolonnen der oben beschriebenen Definition im Rahmen einer Simulation automatisch entstehen, wenn zufällige Fahrzeugabstände entsprechend einer Verteilungsfunktion generiert werden. Wird beispielsweise eine Log-Normalverteilung der Fahrzeugabstände mit Erwartungswert $E = 133 \text{ m}$, Standardabweichung $S = 193 \text{ m}$ und unterem Grenzwert $x_0 = 5 \text{ m}$ in Anlehnung an [Kasc09] betrachtet, vgl. Abbildung 2.10, resultiert die in Abbildung 2.19 dargestellte Verteilung der Kolonnenlängen. Im Vergleich zur

Auswertung von WiM-Daten in Abbildung 2.18 wird damit ein vergleichsweise hoher Anteil längerer Kolonnen abgebildet.

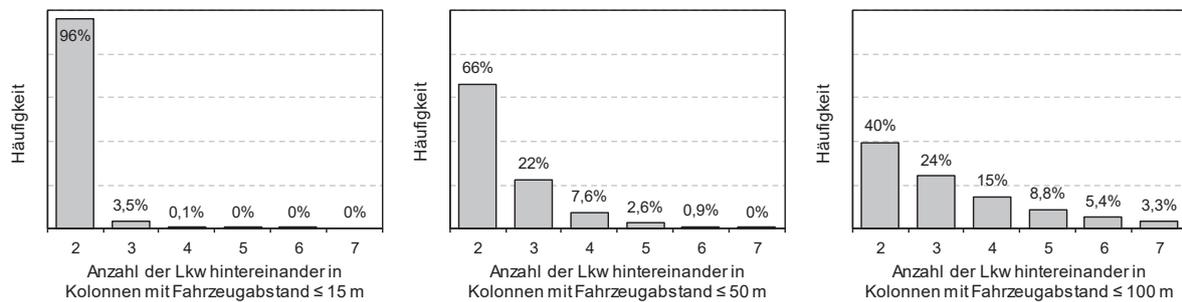


Abbildung 2.19: Verteilung der Kolonnenlängen bei unterschiedlicher Definition des max. Kolonnenabstands (basierend auf einer Log-Normalverteilung der Fahrzeugabstände)

In [Böni13] wird ein Verfahren vorgestellt, welches Lkw-Kolonnen als Pulkbildung mit Hilfe zweier Parameter beschreibt. Der Parameter Pulkbildungsabstand (z.B. 100 m) gibt an, bis zu welchem zufällig generiertem Fahrzeugabstand sich ein Lkw einer Kolonne anschließt. Ist dies der Fall, wird der zufällig generierte Fahrzeugabstand durch den Parameter Pulkabstand (z.B. 20 m) ersetzt. Der Fahrzeugabstand eines nachfolgenden Lkw außerhalb der Kolonne wird um die zuvor abgezogenen Differenzen erhöht.

Zur Abbildung zukünftiger Lkw-Kolonnen infolge eines vernetzten und autonomen Fahrens wird in [GKFB18] ein fiktiver Fahrzeugtyp mehrerer Lkw hintereinander mit konstantem Fahrzeugabstand betrachtet. Diese Methode nutzt als beschreibende Parameter den zukünftigen Gesamtanteil der Lkw-Kolonnen am Schwerverkehr, die Kolonnenlänge als Anzahl an Lkw sowie den Fahrzeugabstand innerhalb einer Kolonne. Es wird von einem Gesamtanteil von 50%, einer Kolonnenlänge von fünf Lkw und einem Fahrzeugabstand von 15,0 m (aufgrund der laut Herstellerangaben enormen Reaktionsgeschwindigkeit autonom fahrender Lkw) ausgegangen. Der Ansatz ließe sich auch auf eine kombinierte Betrachtung unterschiedlicher Kolonnen erweitern.

2.1.2.5 Stauwahrscheinlichkeit

Zur Modellierung von Stauverkehr wird in [Geiß95] ein Verfahren vorgestellt, das zufällig entstehende Abschnitte mit dichtem Verkehr in die Fahrzeugbänder integriert. Dazu werden die beiden Parameter p_{Stau} und $p_{fließ}$ mit Werten zwischen 0 und 1 eingeführt. Der Wert p_{Stau} entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass auf ein Fahrzeug im Stau ein weiteres Fahrzeug im Stau folgt. Analog dazu entspricht $p_{fließ}$ der Wahrscheinlichkeit, dass einem Fahrzeug im fließenden Verkehr auch ein Fahrzeug im fließenden Verkehr folgt. Bei der Generierung eines neuen Fahrzeugs wird zunächst der aktuelle Verkehrszustand überprüft (fließender Verkehr oder Stau) und

anschließend eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 erzeugt. Sobald eine Zufallszahl generiert wird, die höher liegt als der aktuelle Schwellenwert p_{Stau} oder $p_{fließ}$, wird der Verkehrszustand gewechselt. Je höher diese Schwellenwerte gewählt werden, desto länger werden auch die zugehörigen Abschnitte des Staus oder des fließenden Verkehrs.

Zur Umrechnung der beiden fiktiven Größen p_{Stau} und $p_{fließ}$ in die messbaren Größen (Mittelwerte) $N_{Staus\ pro\ Tag}$ und $Stauanteil$ liefern Gleichung (2.6) bis (2.9) die entsprechenden Zusammenhänge. Die Umrechnung erfolgt über die mittlere Anzahl an Fahrzeugen hintereinander im Stau ($N_{Fzg\ im\ Stau,\ HS}$) bzw. im fließenden Verkehr ($N_{Fzg\ im\ fl.V.,\ HS}$) sowie den durchschnittlichen täglichen Verkehr der Hauptspur (DTV_{HS}). Der Bezug auf die Hauptspur (HS) ist erforderlich, da anhand der Größen p_{Stau} und $p_{fließ}$ üblicherweise zunächst der Verkehr der Hauptspur generiert wird und sich an dieser der Verkehr der Nebenspur orientiert.

$$p_{Stau} = 1 - \frac{1}{N_{Fzg\ im\ Stau,\ HS}} \quad (2.6)$$

$$p_{fließ} = 1 - \frac{1}{N_{Fzg\ im\ fl.V.,\ HS}} \quad (2.7)$$

$$N_{Staus\ pro\ Tag} = \frac{DTV_{HS}}{N_{Fzg\ im\ Stau,\ HS} + N_{Fzg\ im\ fl.V.,\ HS}} \quad (2.8)$$

$$Stauanteil = \frac{N_{Fzg\ im\ Stau,\ HS} \cdot N_{Staus\ pro\ Tag}}{DTV_{HS}} \quad (2.9)$$

Zu beachten ist, dass die Stausimulation sehr empfindlich auf kleine Änderungen der Parameter p_{Stau} und $p_{fließ}$ reagiert. Wesentlich ist, dass beide Parameter so gewählt werden, dass sich daraus sinnvolle Werte für die mittlere Anzahl an Staus pro Tag, die mittlere Anzahl an Fahrzeugen hintereinander im Stau und den Stauanteil ergeben. In Tabelle 2.3 werden diese Werte beispielhaft für verschiedene Eingangsparmeter einer Stausimulation dargestellt. Zusätzlich sind darin sinnvolle Kombinationen von p_{Stau} und $p_{fließ}$ markiert, sofern diese die Bedingungen $N_{Staus\ pro\ Tag} < 10$, $N_{Fzg\ im\ Stau,\ HS} > 10$ und $Stauanteil < 50\%$ erfüllen.

2 Grundlagen zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken

Staus pro Tag Fzg pro Stau Stauanteil		$P_{fließ}$							Staus pro Tag Fzg pro Stau Stauanteil		$P_{fließ}$						
		0,8	0,9	0,95	0,99	0,999	0,9995	0,9999			0,8	0,9	0,95	0,99	0,999	0,9995	0,9999
P_{Stau}	0,2	80 1,25 20,0%	44 1,25 11,1%	24 1,25 5,9%	4,9 1,25 1,2%	0,50 1,25 0,12%	0,25 1,25 0,06%	0,05 1,25 0,01%	P_{Stau}	0,2	1.600 1,25 20,0%	889 1,25 11,1%	471 1,25 5,9%	99 1,25 1,2%	10 1,25 0,12%	5,0 1,25 0,06%	1,0 1,25 0,01%
	0,5	71 2 28,6%	42 2 16,7%	23 2 9,1%	4,9 2 2,0%	0,50 2 0,20%	0,25 2 0,10%	0,05 2 0,02%		0,5	1.429 2 28,6%	833 2 16,7%	455 2 9,1%	98 2 2,0%	10 2 0,20%	5,0 2 0,10%	1,0 2 0,02%
	0,8	50 5 50,0%	33 5 33,3%	20 5 20,0%	4,8 5 4,8%	0,50 5 0,50%	0,25 5 0,25%	0,05 5 0,05%		0,8	1.000 5 50,0%	667 5 33,3%	400 5 20,0%	95 5 4,8%	10 5 0,50%	5,0 5 0,25%	1,0 5 0,05%
	0,9	33 10 66,7%	25 10 50,0%	17 10 33,3%	4,5 10 9,1%	0,50 10 0,99%	0,25 10 0,50%	0,05 10 0,10%		0,9	667 10 66,7%	500 10 50,0%	333 10 33,3%	91 10 9,1%	9,9 10 0,99%	5,0 10 0,50%	1,0 10 0,10%
	0,95	20 20 80,0%	17 20 66,7%	13 20 50,0%	4,2 20 16,7%	0,49 20 2,0%	0,25 20 0,99%	0,05 20 0,20%		0,95	400 20 80,0%	333 20 66,7%	250 20 50,0%	83 20 16,7%	9,8 20 2,0%	5,0 20 0,99%	1,0 20 0,20%
	0,98	9,1 50 90,9%	8,3 50 83,3%	7,1 50 71,4%	3,3 50 33,3%	0,48 50 4,8%	0,24 50 2,4%	0,05 50 0,50%		0,98	182 50 90,9%	167 50 83,3%	143 50 71,4%	67 50 33,3%	9,5 50 4,8%	4,9 50 2,44%	1,0 50 0,50%
	0,99	4,8 100 95,2%	4,5 100 90,9%	4,2 100 83,3%	2,5 100 50,0%	0,45 100 9,1%	0,24 100 4,8%	0,05 100 0,99%		0,99	95 100 95,2%	91 100 90,9%	83 100 83,3%	50 100 50,0%	9,1 100 9,1%	4,8 100 4,8%	0,99 100 0,99%
	0,999	0,50 1.000 99,5%	0,50 1.000 99,0%	0,49 1.000 98,0%	0,45 1.000 90,9%	0,25 1.000 50,0%	0,17 1.000 33,3%	0,05 1.000 9,1%		0,999	10,0 1.000 99,5%	9,9 1.000 99,0%	9,8 1.000 98,0%	9,1 1.000 90,9%	5,0 1.000 50,0%	3,3 1.000 33,3%	0,91 1.000 9,1%
	0,9999	0,05 10.000 99,95%	0,05 10.000 99,9%	0,05 10.000 99,8%	0,05 10.000 99,0%	0,05 10.000 90,9%	0,04 10.000 83,3%	0,02 10.000 50,0%		0,9999	1,0 10.000 99,95%	1,0 10.000 99,9%	1,0 10.000 99,8%	0,99 10.000 99,0%	0,91 10.000 90,9%	0,83 10.000 83,3%	0,50 10.000 50,0%

Tabelle 2.3: Mittlere Ergebnisse der Stausimulation für verschiedene Eingangsparameter p_{Stau} und $p_{fließ}$ inkl. Markierung sinnvoller Kombinationen, $DTV_{HS} = 500$ (links), $DTV_{HS} = 10.000$ (rechts)

In [BrZu03] wurde u. a. basierend auf [BrPo95] und [HBS01] das Monte-Carlo-Simulationsprogramm KAPASIM entwickelt, um Zeitverluste infolge von Staus zu ermitteln und über Zeitkostensätze den volkswirtschaftlichen Nutzen von Investitionen in leistungsfähigere Straßenquerschnitte zu bewerten. Den Eingangsgrößen dieses Verfahrens liegt eine Kalibrierung anhand zahlreicher Erhebungen aus der Verkehrstechnik zugrunde. Die Verkehrsnachfrage und Kapazität einer Straße werden dabei als streuende Parameter betrachtet, vgl. Abbildung 2.20. Die bei Überlastung entstehenden Staus werden über ein Warteschlangenmodell abgebildet.

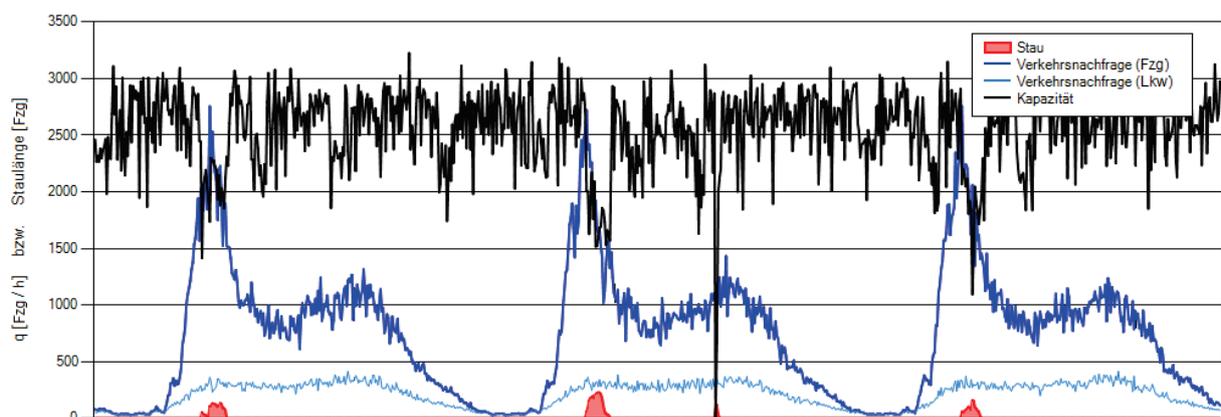


Abbildung 2.20: Beispielhafte Tagesganglinien der streuenden Verkehrsnachfrage und Kapazität (5 Minuten Intervalle)

Das Programm wird hier insofern erweitert, dass zusätzlich die mittlere Anzahl an Staus pro Tag sowie der Stauanteil ermittelt werden. Für vordefinierte Straßentypen und beliebige Verkehrsnachfragen lässt sich damit die Größenordnung der Stauwahrscheinlichkeit näherungsweise einschätzen. Ein Auszug der umfangreichen Auswertungen lässt sich Tabelle 2.4 entnehmen.

Staus pro Tag & Stauanteil		Ballungsraum				Verbindungsstrecke			
		BAB, 2-streifig		BAB, 3-streifig		BAB, 2-streifig		BAB, 3-streifig	
		ohne Standstreifen	mit Standstreifen	ohne Standstreifen	mit Standstreifen	ohne Standstreifen	mit Standstreifen	ohne Standstreifen	mit Standstreifen
DTV	5.000	0,02 0,02%	0,02 0,01%	0,02 0,02%	0,02 0,01%	0,23 0,23%	0,16 0,11%	0,23 0,17%	0,16 0,11%
	10.000	0,05 0,08%	0,03 0,03%	0,05 0,04%	0,03 0,02%	0,46 0,88%	0,31 0,25%	0,46 0,45%	0,31 0,23%
	15.000	0,09 0,24%	0,07 0,10%	0,07 0,10%	0,05 0,04%	0,72 2,1%	0,49 0,63%	0,68 1,00%	0,46 0,38%
	20.000	0,27 1,5%	0,24 1,3%	0,10 0,19%	0,07 0,08%	1,1 5,7%	0,81 2,8%	0,90 1,9%	0,63 0,66%
	25.000	0,56 5,5%	0,52 5,0%	0,20 0,67%	0,16 0,46%	1,4 12,7%	1,2 8,2%	1,2 3,9%	0,86 1,7%
	30.000	0,82 12,7%	0,78 11,9%	0,37 2,3%	0,32 1,9%	1,6 23,8%	1,4 17,6%	1,5 7,4%	1,1 4,1%
	40.000	1,1 35,7%	1,1 34,6%	0,78 9,8%	0,73 9,1%	1,6 52,9%	1,5 43,9%	1,9 20,5%	1,6 14,3%
	50.000	1,1 73,9%	1,1 72,6%	1,0 24,4%	0,99 23,4%	1,1 87,6%	1,1 83,9%	1,9 39,4%	1,7 31,4%
	60.000	1,0 91,0%	1,0 90,8%	1,1 42,2%	1,1 40,9%	0,87 94,3%	1,0 92,8%	1,7 66,2%	1,6 53,0%

Tabelle 2.4: Näherungswerte für die Größenordnung der mittleren Anzahl an Staus pro Tag sowie den Stauanteil (konservative Werte unter Ansatz einer möglichst ungünstigen Tagesganglinie, Schwerverkehrsanteil 20%)

Eine mögliche Erweiterung der bisherigen Stausimulation mit konstanten Parametern p_{Stau} und $p_{fließ}$ ist der Ansatz einer Tagesganglinie der Anzahl an Staus pro Stunde, vgl. Abbildung 2.21, aus dem Tagesganglinien der beiden Parameter p_{Stau} und $p_{fließ}$ resultieren. In Anlehnung an die Tagesganglinie der Verkehrsnachfrage, vgl. Abbildung 2.8, werden hier regelmäßige Staus den Tageszeiten mit hoher Verkehrsnachfrage zugeordnet (Stoßzeiten), sofern eine Überlastung wahrscheinlich ist. Die Anzahl zufälliger Staus infolge von Unfällen und verkehrsbehindernden Pannen wird mit $N_{Staus\ pro\ Tag} \approx 1 \cdot 10^{-6} \cdot DTV$ abgeschätzt, vgl. [BrZu03]. Zusätzlich wird angenommen, dass Staus im Mittel ca. eine komplette Stunde andauern, vgl. [Herz11], d.h. $N_{Fzg\ im\ Stau} \approx q [Fzg/h]$. Die Berücksichtigung eines zeitlichen Verlaufs der Stauwahrscheinlichkeit ist bei Fragestellungen zur Kombination mit anderen veränderlichen Einwirkungen, insbesondere Temperatur, als essenziell wichtig einzustufen.

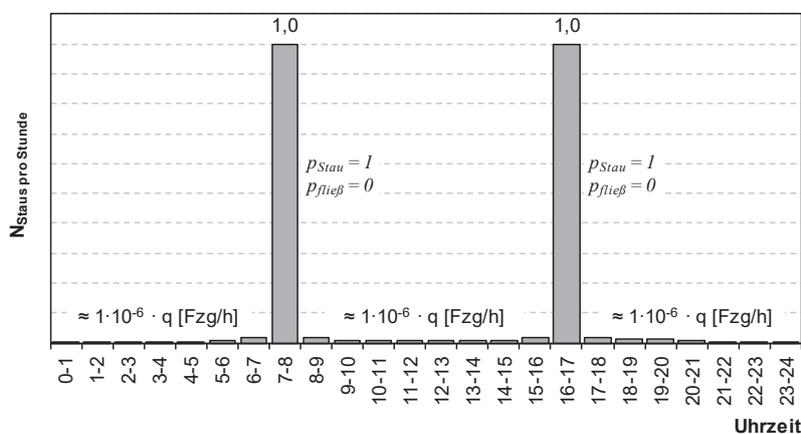


Abbildung 2.21: Vorschlag einer Tagesganglinie der Anzahl an Staus pro Stunde

2.1.2.6 Überholwahrscheinlichkeit

Der Anteil überholender Lkw wurde bisher als konstante Eingangsgröße aufgefasst. Die Größenordnung lag zum Beispiel bei 10% in [Merz94], 15% in [Geiß09] und 20% in [FrBö11a] (ohne Überholverbot). Durch Untersuchungen an WiM-Daten in [FBKGGK18] wird ersichtlich, dass es sich hier um eine streuende Größe handelt, deren Mittelwert deutlich unterhalb den bisherigen Annahmen liegen kann. Zusätzlich ist eine starke Korrelation zwischen dem Anteil überholender Lkw und der Schwerverkehrsstärke erkennbar. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Zur Ableitung eines mathematischen Modells wird zunächst eine Aggregation der Fahrzeug-einzeldaten von WiM-Anlagen an 2- und 3-spurigen Richtungsfahrbahnen in Stundenintervalle vorgenommen. Je Intervall erfolgt eine Bestimmung der Schwerverkehrsstärke q [Lkw/h] sowie des Anteils überholender Lkw [%]. Für Stundenintervalle ähnlicher Schwerverkehrsstärke wird der Anteil überholender Lkw wie in Abbildung 2.22 aufgetragen und durch 2-parametrische Log-Normalverteilungen angepasst.

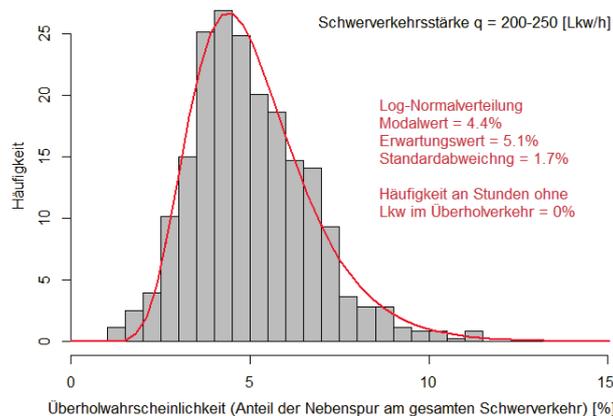


Abbildung 2.22: Beispielhafte Verteilung des Anteils überholender Lkw (2-spuriger Verkehr) [FBKGGK18]

Anzumerken ist, dass sich für geringe Schwerverkehrsstärken auch häufig Stundenintervalle ohne Lkw im Überholverkehr ergeben. Diese werden durch die Log-Normalverteilung nicht abgebildet, sondern separat erfasst.

Die Ergebnisse der Anpassung in Form von Erwartungswert E und Standardabweichung S , sowie die Häufigkeit an Stunden ohne Lkw im Überholverkehr H_0 , werden in Tabelle 2.5 bis Tabelle 2.7 dargestellt. Je Parameter wird ein bilineares Modell für die Verwendung in Verkehrslastsimulationen abgeleitet.

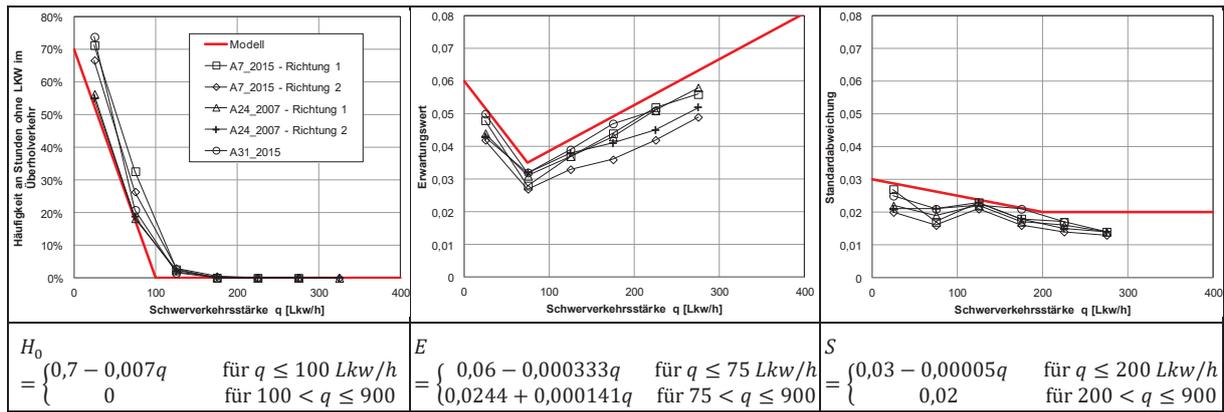


Tabelle 2.5: Modell für den Anteil der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr (2-spuriger Verkehr) [FBKGK18]

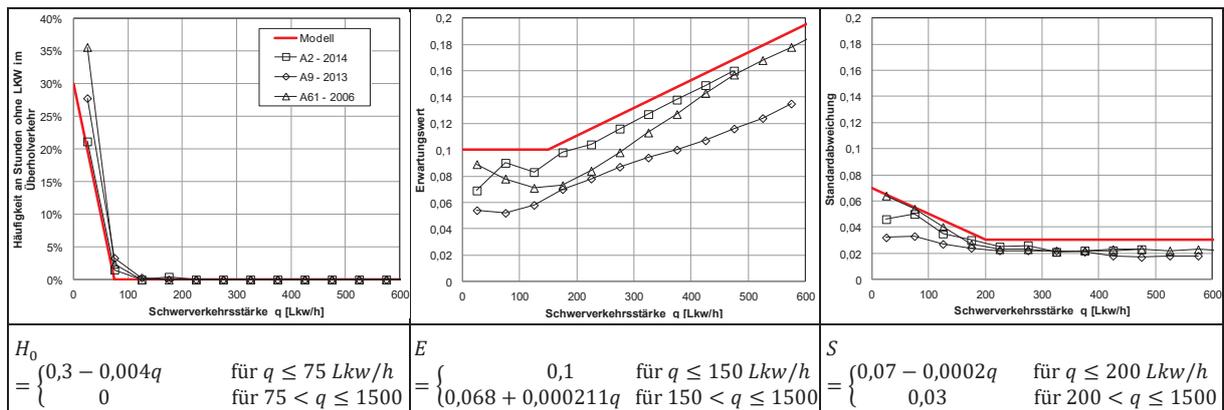


Tabelle 2.6: Modell für den Anteil der Nebenspur 1 am gesamten Schwerverkehr (3-spuriger Verkehr) [FBKGK18]

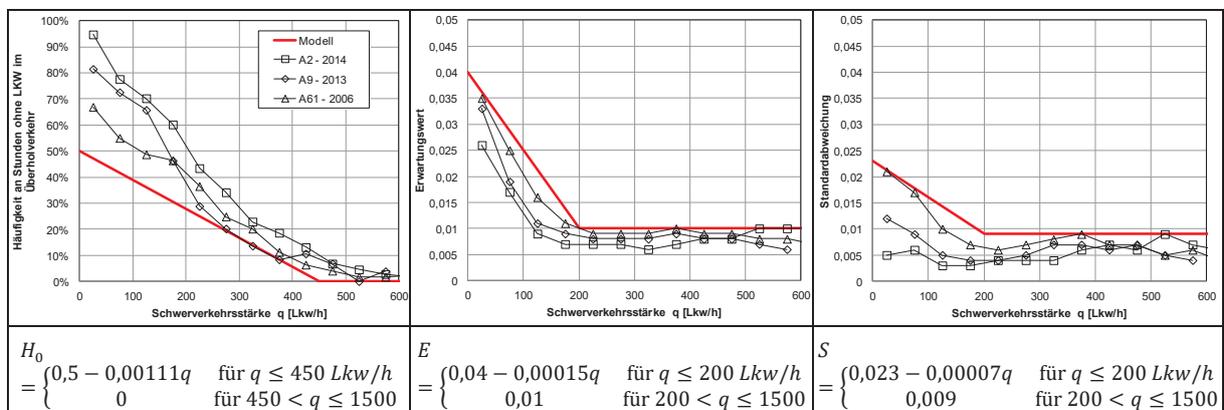


Tabelle 2.7: Modell für den Anteil der Nebenspur 2 am gesamten Schwerverkehr (3-spuriger Verkehr) [FBKGK18]

Um das entwickelte Modell der Überholwahrscheinlichkeit mit bisherigen Annahmen und Ansätzen vergleichen zu können, ist eine gewisse Vereinfachung notwendig. Dazu wird die Standardabweichung der Modelle vernachlässigt und allein der Erwartungswert E und die Häufigkeit an Stunden ohne Lkw im Überholverkehr H_0 betrachtet. Weiterhin wird eine vereinfachte Tagesganglinie des Schwerverkehrs herangezogen und auf unterschiedliche Werte des $DTV-SV$ angewandt. Je Stundenintervall ergibt sich damit eine Schwerverkehrsstärke q und anhand des Modells die durchschnittliche Anzahl überholender Lkw in dieser Stunde. Die

Summe dieser einzeln ermittelten Werte eines Tages, bezogen auf den zugehörigen *DTV-SV*, ergibt eine mittlere Überholwahrscheinlichkeit, vgl. Abbildung 2.23.

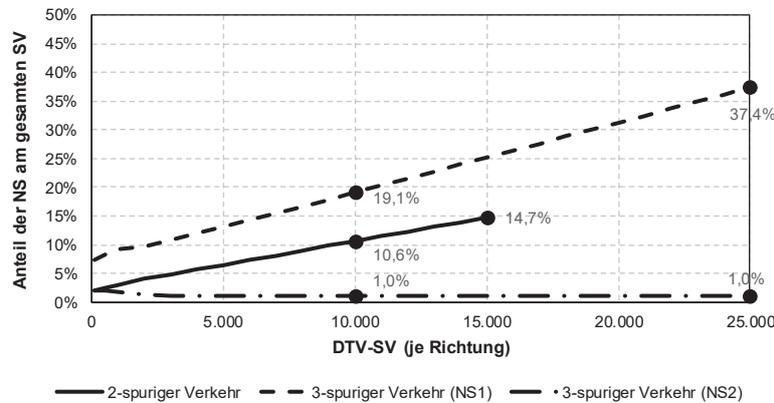


Abbildung 2.23: Mittlerer Erwartungswert des Anteils der Nebenspuren am gesamten Schwerverkehr (Auswertung der Modelle hinsichtlich des Mittelwertes eines Tages) [FBKGGK18]

In einer weiteren Auswertung wird je Stundenintervall der Anteil überholender Lkw bestimmt und der Maximalwert dieser einzeln ermittelten Werte grafisch dargestellt, vgl. Abbildung 2.24

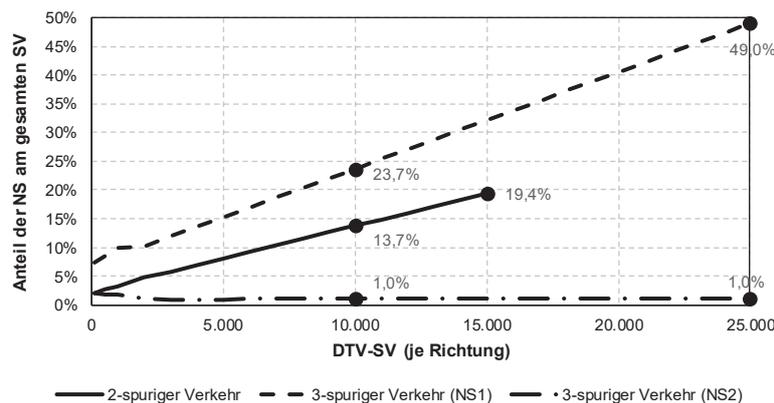


Abbildung 2.24: Maximaler Erwartungswert des Anteils der Nebenspuren am gesamten Schwerverkehr (Auswertung der Modelle hinsichtlich des Maximalwertes eines Tages) [FBKGGK18]

Die Auswertung zeigt, dass der dem Lastmodell LM1 zugrundeliegende Mittelwert von 20% in [FrBö11a] für übliche höhere Werte des *DTV-SV* und 3-spurigen Verkehr eine gute Abbildung der Wirklichkeit darstellt. Weiterhin ist erkennbar, dass sich bei einer separaten Betrachtung von Brücken mit 2-spurigem Verkehr oder mit niedrigem *DTV-SV* ein deutlich geringerer Anteil überholender Lkw ansetzen lässt.

2.1.2.7 Dynamischer Schwingbeiwert

Die Eingangsdaten der Fahrzeugesamtgewichte werden als statische Lasten aufgefasst. Während einer Überfahrt erfahren diese Lasten eine dynamische Anregung, abhängig von Tragwerkseigenschaften (Eigenfrequenzen, Steifigkeit und Massebelegung), Fahrzeugeigenschaften (Federung, Dämpfung und Masse) und maßgeblich auch von der Fahrbahnebenheit

sowie der Geschwindigkeit der Lkw. In den Verkehrslastsimulationen sowie in der analytischen Lösung dieser Arbeit wird die komplexe dynamische Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk im Regelfall nicht modelliert. Stattdessen wird der Einfluss vereinfacht über einen Schwingbeiwert berücksichtigt, der eine Erhöhung der statischen Lasten im fließenden Verkehr bewirkt. Im Stau ist die dynamische Anregung vernachlässigbar klein.

Speziell für Straßenbrücken werden im Folgenden die Entwicklungen zum dynamischen Schwingbeiwert der jüngeren Vergangenheit dargelegt. Es wird stets zwischen einem Schwingbeiwert φ für Nachweise der Tragsicherheit mit

$$\varphi = \frac{\max\{M_{dyn}\}}{\max\{M_{stat}\}} \quad \text{bzw.} \quad \varphi = \frac{\max\{w_{dyn}\}}{\max\{w_{stat}\}} \quad (2.10)$$

und einem schädigungsäquivalenten Schwingbeiwert φ_{fat} für Nachweise der Ermüdungssicherheit mit

$$\varphi_{fat} = \frac{D_{dyn}}{D_{stat}} \quad (2.11)$$

unterschieden.

2.1.2.7.1 Beitrag von Petersen

Petersen [Pete96] liefert einen historischen Überblick von Untersuchungen zum dynamischen Schwingbeiwert beginnend im 19. Jahrhundert sowie der diesbezüglichen normativen Entwicklung. Am Modell einer stoßartig belasteten Feder wird beschrieben, dass der Schwingbeiwert im ungünstigsten Fall $\varphi = 2,0$ werden kann. Bei einer harmonischen Belastung ist jedoch theoretisch auch ein größerer Schwingbeiwert möglich. Es wird darauf hingewiesen, dass φ an realen Brücken üblicherweise niedriger liegt.

2.1.2.7.2 Beitrag von Brückmann

Brückmann [Brüc66] beschreibt Schwingungsmessungen an fünf Massivbrücken, die durch einzelne und mehrere Lkw belastet werden. Im Ergebnis wird die Zunahme des Schwingbeiwertes bei größeren Geschwindigkeiten und niedrigeren Belastungsgraden dokumentiert. Die Arbeit bestätigt den normativen Vorschlag der [DIN 1072] in Gleichung (2.12), vgl. Abbildung 2.25, als Einhüllende der Versuchsdaten. Der Vorschlag liegt auch aktuellen Lastmodellen für Nachweise der Tragsicherheit in [DIN EN 1991-2] und [NaRiLi11] zugrunde. Es wird explizit

darauf hingewiesen, dass sich (2.12) auf hohe Belastungsgrade bezieht (beispielsweise normative Lastmodelle) und daher nicht auf niedrige Belastungsgrade (beispielsweise einzelne leichte Lkw) anwendbar ist.

$$\varphi = 1,4 - 0,008 \cdot l_{\varphi} \geq 1,0 \quad ; \quad l_{\varphi}: \text{maßgebende Länge} \quad (2.12)$$

2.1.2.7.3 Beitrag von Cantieni

Cantieni [Cant83] wertet dynamische Untersuchungen der EMPA an insgesamt 356 Brücken aus, die in den Jahren 1958 bis 1981 durchgeführt wurden. Die Anregung der Brücken erfolgte jeweils durch einen einzelnen Lkw im fließenden Verkehr mit einem Gesamtgewicht von ca. 160 kN bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen 10 und 80 km/h. Zur Bewertung des Einflusses lokaler Unebenheiten enthält der untersuchte Datenbestand auch Überfahrten mit einem Brett auf der Fahrbahn (ca. 50 mm x 300 mm). Im Ergebnis wird ein Schwingbeiwert in Abhängigkeit der Eigenfrequenz des Tragwerks in einem Bereich $\varphi = 1,2 \dots 1,7$ als Einhüllende der Versuchsdaten vorgeschlagen. Zusätzlich wird der enorme Zuwachs der dynamischen Anregung infolge lokaler Unebenheiten dargelegt, mit einem Bereich der Einhüllenden von $\varphi = 2,0 \dots 3,5$.

2.1.2.7.4 Beitrag von Schütz

Schütz [Schü88] [Schü89] simuliert die dynamische Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk mit dem Programm DYNBBF. Fahrzeuge werden als Mehrmassenschwinger modelliert, Brückentragwerke als Biegebalken mit linear-elastischem Verhalten und die Fahrbahnebenheit als zufällig generiertes Profil. Die Bewegungsgleichungen werden mittels Zeitschrittverfahren (Newmark) gelöst. Das Programm wird zunächst anhand der Versuche in [Cant83] überprüft und anschließend für umfangreiche Simulationsrechnungen genutzt. Diese umfassen Systeme unterschiedlicher Spannweite mit einer mittleren Fahrbahnqualität, angeregt durch einzelne Lkw und Kolonnen. Im Ergebnis wird alternativ zu Gleichung (2.12) folgender Schwingbeiwert für Nachweise der Tragsicherheit als Einhüllende der Simulationsdaten vorgeschlagen, vgl. Abbildung 2.25. Der Vorschlag bezieht sich jedoch analog zur [DIN 1072] auf hohe Belastungsgrade und ist daher nicht auf beliebige Belastungsgrade anwendbar.

$$\varphi = \begin{cases} 1,65 & \text{für } l_\varphi \leq 3,0 \text{ m} \\ 1,80 - 0,05 \cdot l_\varphi & \text{für } 3,0 \text{ m} < l_\varphi \leq 10,0 \text{ m} \\ 1,35 - 0,005 \cdot l_\varphi & \text{für } 10,0 \text{ m} < l_\varphi \leq 50,0 \text{ m} \\ 1,225 - 0,0025 \cdot l_\varphi & \text{für } 50,0 \text{ m} < l_\varphi \leq 90,0 \text{ m} \\ 1,0 & \text{für } 90,0 \text{ m} < l_\varphi \end{cases} \quad (2.13)$$

Auf Grundlage weiterer Simulationen an Längsrippen einer orthotropen Fahrbahnplatte mit guter Fahrbahnqualität wird ein Vorschlag für den schädigungsäquivalenten Schwingbeiwert für Nachweise der Ermüdungssicherheit entwickelt:

$$\varphi_{fat} = 1,0 + \frac{0,5}{\sqrt{n}} \quad ; n: \text{ Achszahl} \quad (2.14)$$

2.1.2.7.5 Beitrag von Drosner

Drosner [Dros89] simuliert mit dem Programm DYBES ähnlich zu [Schü88] die dynamische Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk. Auch hier erfolgt eine Verifizierung des Programms anhand von Versuchen. Im Gegensatz zu [Schü88] wird die Fahrbahnunebenheit lediglich auf und nicht zusätzlich vor der Brücke modelliert, wodurch bei kurzen Systemen unrealistische Ergebnisse resultieren können. Anhand von Simulationen an Systemen unterschiedlicher Spannweite mit guter Fahrbahnqualität werden Schwingbeiwerte für Nachweise der Tragsicherheit als Punktwolken der Simulationsdaten angegeben. Für einzelne Lkw liegen diese spannenabhängig in einem Bereich $\varphi = 1,0 \dots 2,0$ und für Kolonnen in einem Bereich $\varphi = 1,0 \dots 1,7$. Auf Grundlage weiterer Simulationen an Längsrippen einer orthotropen Fahrbahnplatte mit guter Fahrbahnqualität wird für Nachweise der Ermüdungssicherheit ein konstanter schädigungsäquivalenter Schwingbeiwert von $\varphi_{fat} = 1,15$ vorgeschlagen.

2.1.2.7.6 Beitrag von Humar und Kashif

Humar und Kashif [HuKa93] analysieren die dynamische Interaktion ebenfalls anhand von Simulationen, jedoch an stark vereinfachten Modellen. Ein zufällig generiertes Profil der Fahrbahnunebenheit wird nicht berücksichtigt, jedoch eine lokale Unebenheit im Bereich der Fahrbahnübergangskonstruktion. Im Ergebnis wird der Einfluss unterschiedlicher Eingangsparameter auf die Einhüllende der Schwingbeiwerte beschrieben. Angesichts der zahlreichen Vereinfachungen liegt der Fokus dieser Arbeit vorrangig auf einer qualitativen Beschreibung der Zusammenhänge.

2.1.2.7.7 Beitrag von Merzenich und Danielewicz

Merzenich nutzt für dynamische Simulationen in [Merz94] und [MeSe95] eine erweiterte Version des in [Dros89] entwickelten Programms DYBES. Fahrbahnunebenheiten werden analog zu [Schü88] vor und auf der Brücke modelliert. Als wesentliche Erweiterung werden stochastische Parameter der Lkw hinsichtlich Häufigkeit, Masse, Achsabstand sowie Feder- und Dämpfungskennwerten von Reifen und Achsaufbau eingeführt. Anhand von Simulationen an Systemen unterschiedlicher Spannweite mit mittlerer Fahrbahnqualität wird ein Schwingbeiwert als Einhüllende der Simulationsdaten bei einspurigem Verkehr mit

$$\varphi = \begin{cases} 1,7 & \text{für } l_\varphi \leq 5,0 \text{ m} \\ 1,85 - 0,03 \cdot l_\varphi & \text{für } 5,0 \text{ m} < l_\varphi \leq 15,0 \text{ m} \\ 1,4 & \text{für } 15,0 \text{ m} < l_\varphi \end{cases} \quad (2.15)$$

und bei mehrspurigem Verkehr mit

$$\varphi = 1,2 - 0,002 \cdot l_\varphi \geq 1,1 \quad (2.16)$$

vorgeschlagen, vgl. Abbildung 2.25. Im Gegensatz zu vorangehenden Untersuchungen wird der Schwingbeiwert φ hier nicht als Verhältnis der dynamischen und statischen Maximalwerte einer einzelnen Überfahrt definiert, sondern als Verhältnis der charakteristischen Werte eines dynamischen und statischen Simulationsdurchlaufs mit jeweils mehreren Überfahrten. Durch dieses Vorgehen geht der direkte Zusammenhang für eine einzelne Überfahrt verloren.

Ein schädigungsäquivalenter Schwingbeiwert wird anhand von Simulationen an Systemen unterschiedlicher Spannweite mit guter Fahrbahnqualität bestimmt. Aus der Einhüllenden der Simulationsdaten lässt sich ein Vorschlag für Stahlbrücken mit einspurigem Verkehr ableiten, vgl. Abbildung 2.25:

$$\varphi_{fat} = \begin{cases} 1,3 & \text{für } l_\varphi \leq 10,0 \text{ m} \\ 1,375 - 0,0075 \cdot l_\varphi & \text{für } 10,0 \text{ m} < l_\varphi \leq 30,0 \text{ m} \\ 1,0 + 0,005 \cdot l_\varphi & \text{für } 30,0 \text{ m} < l_\varphi \leq 60,0 \text{ m} \\ 1,3 & \text{für } 60,0 \text{ m} < l_\varphi \end{cases} \quad (2.17)$$

Vergleichbare Simulationen von Merzenich und Danielewicz [MeDa94] [Dani94] liefern für Stahlbeton- und Spannbetonbrücken mit einspurigem Verkehr folgenden Vorschlag, vgl. Abbildung 2.25:

$$\varphi_{fat} = \begin{cases} 1,3 & \text{für } l_{\varphi} \leq 10,0 \text{ m} \\ 1,35 - 0,005 \cdot l_{\varphi} & \text{für } 10,0 \text{ m} < l_{\varphi} \leq 30,0 \text{ m} \\ 1,0125 + 0,00625 \cdot l_{\varphi} & \text{für } 30,0 \text{ m} < l_{\varphi} \leq 70,0 \text{ m} \\ 1,4 & \text{für } 70,0 \text{ m} < l_{\varphi} \end{cases} \quad (2.18)$$

Die Arbeiten von Merzenich und Danielewicz liefern Grundlagen für die aktuellen Nachweise der Ermüdungssicherheit in [DIN EN 1991-2], [DIN EN 1992-2] und [DIN EN 1993-2]. In [DIN EN 1993-2] wird φ_{fat} nicht explizit angegeben, sondern ist Teil der zugrundeliegenden Simulationen. In [DIN EN 1992-2] wird im Regelfall mit $\varphi_{fat} = 1,2$ vereinfacht. In [DIN EN 1991-2] ist aufgrund lokaler Unebenheiten ein zusätzlicher Vergrößerungsfaktor für Lasten in der Nähe von Fahrbahnübergangskonstruktionen enthalten:

$$\Delta\varphi_{fat} = 1,3 \cdot \left(1 - \frac{D}{6}\right) \geq 1,0 \quad ; \quad D: \text{Abstand des Querschnitts zur ÜKO} \quad (2.19)$$

2.1.2.7.8 Beitrag von Ludescher

Ludescher [Lude03] analysiert die dynamische Interaktion analog zu [HuKa93] anhand von Simulationen an stark vereinfachten Modellen. Es werden sowohl lokale Unebenheiten als auch ein zufälliges Profil der Fahrbahnunebenheit betrachtet. Auf Grundlage zahlreicher Parameterstudien mit mittlerer Fahrbahnqualität wird für Nachweise der Tragsicherheit bezüglich globaler Bauwerksreaktionen folgender Schwingbeiwert in Abhängigkeit der Gesamtlast aller Fahrzeuge auf dem Bauwerk M_{Gesamt} vorgeschlagen, vgl. Abbildung 2.26.

$$\varphi = \begin{cases} 1,4 & \text{für } M_{Gesamt} \leq 300 \text{ kN} \\ 1,5 - \frac{1}{3000} \cdot M_{Gesamt} & \text{für } 300 \text{ kN} < M_{Gesamt} \leq 1500 \text{ kN} \\ 1,0 & \text{für } 1500 \text{ kN} < M_{Gesamt} \end{cases} \quad (2.20)$$

Für Nachweise der Ermüdungssicherheit an globalen Systemen wird ebenfalls Gleichung (2.20) als Schwingbeiwert vorgeschlagen, jedoch ohne explizit eine Schadensäquivalenz zu berücksichtigen. Für Nachweise der Trag- und Ermüdungssicherheit an lokalen Systemen wird jeweils ein separates Achslastmodell vorgeschlagen.

2.1.2.7.9 Zusammenfassung

Schwingbeiwerte für Nachweise der Tragsicherheit bei globalen Bauwerksreaktionen werden üblicherweise für eine mittlere Fahrbahnqualität bestimmt. Schädigungsäquivalente Schwingbeiwerte für Nachweise der Ermüdungssicherheit beziehen sich üblicherweise auf eine gute

Fahrbahnqualität. Die Vorschläge für Schwingbeiwerte werden entweder in Abhängigkeit der Eigenfrequenz des Tragwerks, der maßgebenden Länge oder des Belastungsgrads definiert. In Abbildung 2.25 werden sämtliche Vorschläge für φ und φ_{fat} in Abhängigkeit der maßgebenden Länge einander gegenübergestellt.

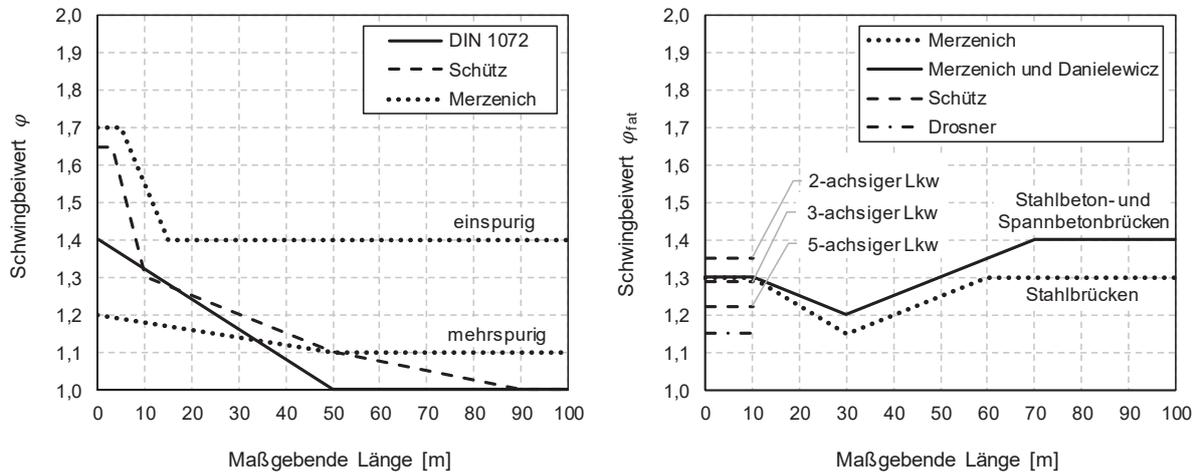


Abbildung 2.25: Gegenüberstellung der Vorschläge für den Schwingbeiwert φ (links) und φ_{fat} (rechts) abhängig von der maßgebenden Länge l_φ

Die dargestellten Vorschläge für den schädigungsäquivalenten Schwingbeiwert φ_{fat} liegen insgesamt auf einem relativ ähnlichen Niveau. Wesentlich ist bei den Vorschlägen für den Schwingbeiwert φ nach [DIN 1072] und Schütz [Schü88], dass sich diese auf hohe Belastungsgrade beziehen und daher für einzelne Lkw unsichere Ergebnisse liefern können, wie der Vorschlag von Merzenich [Merz94] zeigt. Sämtliche Lkw mit einem derart hohen Schwingbeiwert zu beaufschlagen, würde jedoch zu konservativen Ergebnissen führen. Der Vorschlag von Ludescher [Lude03] ist in dieser Hinsicht differenzierter, indem der Schwingbeiwert vom Gesamtgewicht abhängt und dadurch implizit einen niedrigeren Schwingbeiwert bei großen Spannweiten und mehreren Fahrstreifen berücksichtigt. Eine auf Messdaten basierende Absicherung dieses Vorschlags stand bisher allerdings aus.

2.1.2.7.10 Erweiterung

Aufgrund der fehlenden Absicherung des Vorschlags von Ludescher [Lude03] werden in Abbildung 2.26 verfügbare Ergebnisse aus Messung und Simulation dem Vorschlag gegenübergestellt. Die verarbeiteten Daten zeichnen sich dadurch aus, dass jeweils auch die Gesamtgewichte der Lkw bekannt sind. Sofern möglich, werden Daten zu Schwingbeiwerten bezogen auf Beanspruchungen gegenüber solchen bezogen auf Verformungen präferiert.

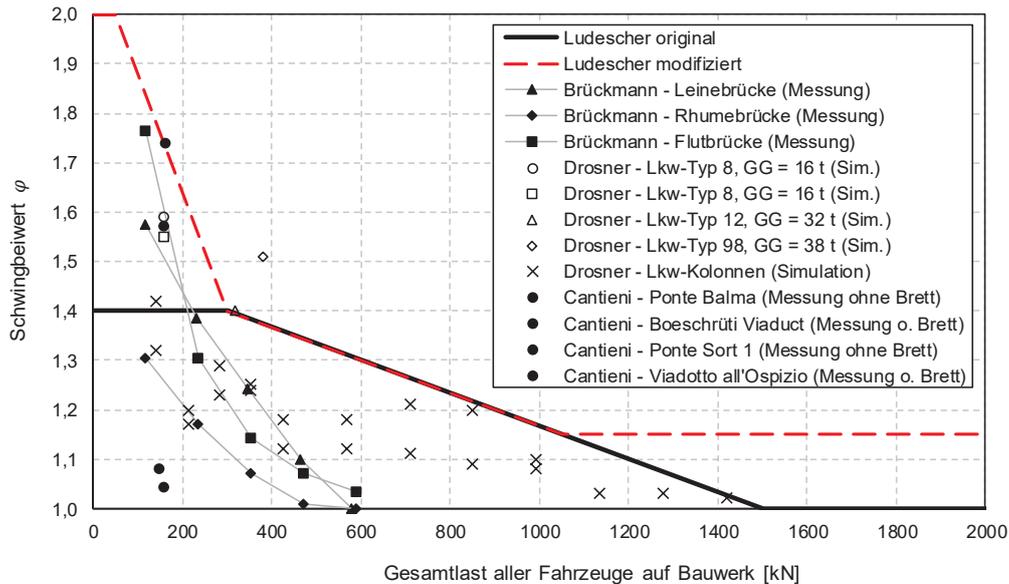


Abbildung 2.26: Vergleich der Ergebnisse zum dynamischen Schwingbeiwert von Brückmann [Brüc66], Cantieni [Cant83] und Drosner [Dros89] mit dem Vorschlag von Ludescher [Lude03]

Es wird ersichtlich, dass der Vorschlag von Ludescher [Lude03] die Realität im Bereich kleiner Lkw Gesamtgewichte teilweise unterschätzt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse von Merzenich [Merz94], dass auch in Situationen mit mehreren schweren Lkw gleichzeitig im fließenden Verkehr der Schwingbeiwert auf einem Niveau von $\varphi = 1,1 \dots 1,2$ bleibt. Unter Berücksichtigung dieser Informationen wird die Einhüllende eines hier als „Ludescher modifiziert“ bezeichneten Vorschlags abgeleitet, vgl. Gleichung (2.21).

Zur weiteren Überprüfung dieses Vorschlags erweitert Langner [Lang19] das hier verwendete Programm PATLoB, vgl. Abschnitt 2.4, um Algorithmen zur Berechnung der dynamischen Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk basierend auf der Arbeit von Drosner [Dros89]. Dabei werden analog zu Merzenich [Merz94] vereinfachend lediglich Biegeeigenformen betrachtet, jedoch keine Torsionseigenformen. Dementsprechend wird keine Querverteilungslinie, sondern die Lasten sämtlicher Spuren an einem ebenen Stabwerk mit der Biegesteifigkeit und Massebelegung des Gesamtquerschnitts angesetzt. Fahrbahnebenheiten werden abweichend zu Drosner [Dros89], jedoch analog zu Merzenich [Merz94] und Schütz [Schü88] bereits vor dem Tragwerk berücksichtigt.

Auf diesem erweiterten Programm aufbauende dynamische Simulationen werden nachfolgend vorgestellt. Die Simulationen werden durchgeführt für das Fahrzeugkollektiv „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ in Anhang A, ergänzt um stochastische Parameter des Achsaufbaus aus [Merz94], sowie für den Brückenkatalog in Anhang B. Betrachtet werden lediglich Lkw im

fließenden Verkehr mit einer Verkehrsstärke von $DTV-SV = 10.000$ pro Richtung. In den Beispielen werden weiterhin ein Anteil der einzelnen Spuren am gesamten Schwerverkehr bei 2-spurigem Richtungsverkehr von $HS/NS = 85\%/15\%$, eine Geschwindigkeit der Lkw von 80 km/h und eine mittlere Fahrbahnqualität mit Welligkeit $w = 2$ und Unebenheitsmaß $\Phi(\Omega_0) = 16 \text{ cm}^3$ angesetzt. Im Zuge der Simulation erfolgt sowohl eine statische als auch dynamische Berechnung. Die generierten Kennwert-Zeit-Verläufe, vgl. Abbildung 2.27, werden zunächst in Abschnitte einzelner Überfahrten (eines oder mehrerer Lkw) unterteilt, wobei unbelastete Zustände des statischen Verlaufs als Abschnittsgrenzen dienen. Je Abschnitt wird anschließend die maximale statische und dynamische Beanspruchung bestimmt und aus deren Verhältnis der Schwingbeiwert φ einer Überfahrt berechnet, vgl. Gleichung (2.10). Die Gesamtheit der daraus resultierenden Schwingbeiwerte wird beispielhaft in Abbildung 2.28 und Abbildung 2.29 dargestellt. Auf eine Darstellung der Simulationsergebnisse aller übrigen beispielhaft betrachteten Systeme wird an dieser Stelle verzichtet, da diese eine große Ähnlichkeit zueinander aufweisen. Insgesamt lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnissen feststellen, vgl. Abbildung 2.26.

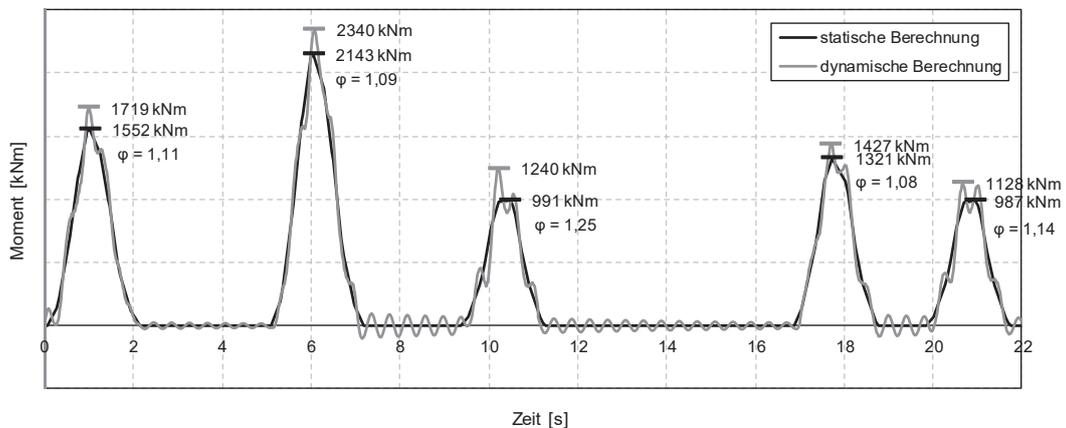


Abbildung 2.27: Beispielhafter Kennwert-Zeit-Verlauf

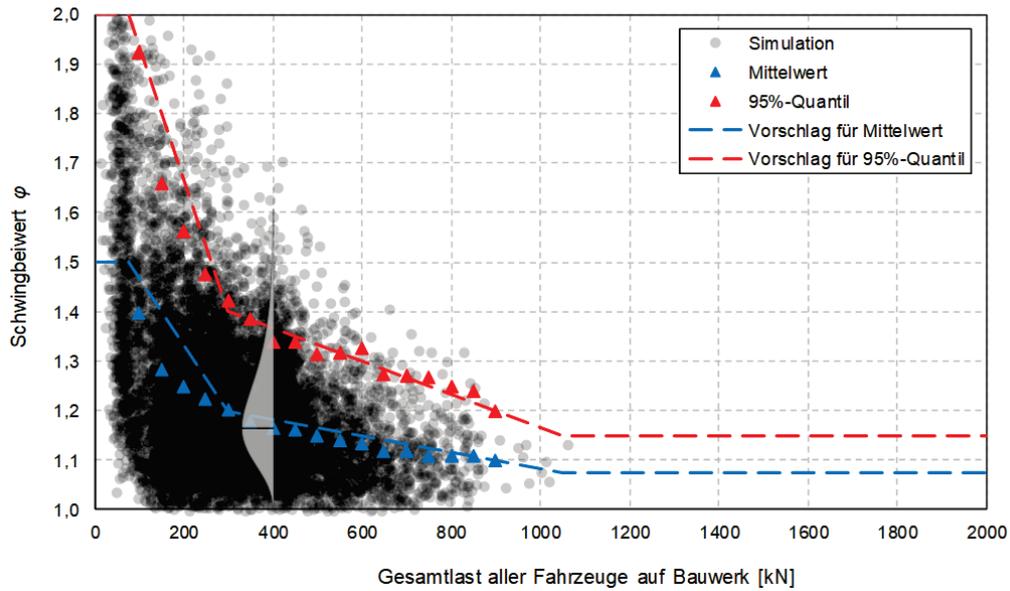


Abbildung 2.28: Simulationsergebnisse des dynamischen Schwingbeiwertes
(Einfeldträger, $L = 20$ m, Feldmoment, 1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran, Eigenfrequenzen $f_1 = 3,37$ Hz und $f_2 = 13,46$ Hz, Dämpfung $\rho_1 = \rho_2 = 1,0$ %)

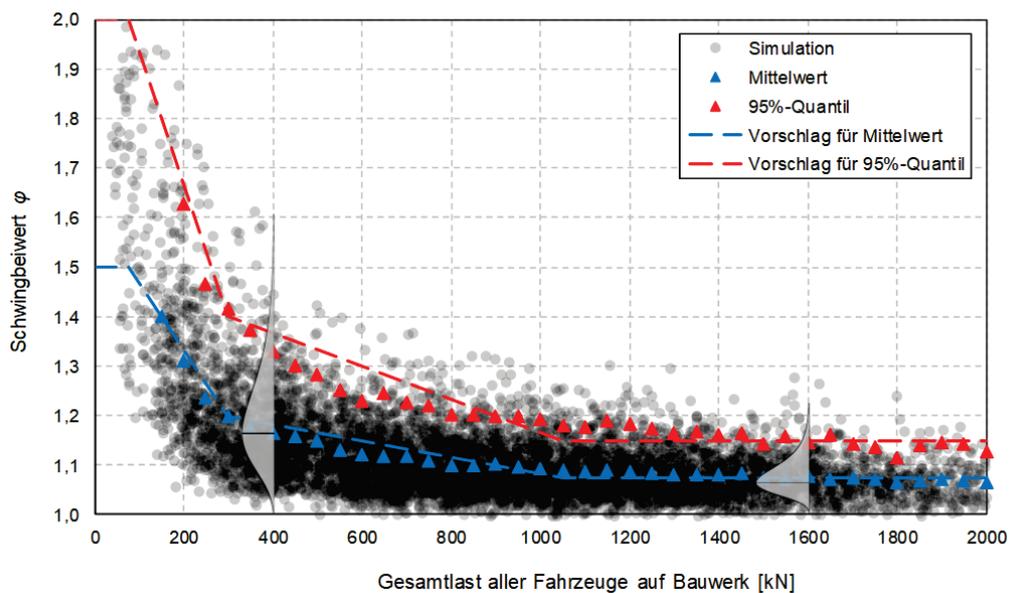


Abbildung 2.29: Simulationsergebnisse des dynamischen Schwingbeiwertes
(Zweifeldträger, $L = 50$ m + 50 m, Stützmoment, 2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran, Eigenfrequenzen $f_1 = 1,57$ Hz und $f_2 = 2,46$ Hz, Dämpfung $\rho_1 = \rho_2 = 0,64$ %)

Eine Auswertung der Simulationsdaten hinsichtlich des 95%-Quantils zeigt, dass dieses näherungsweise der Einhüllenden der Messdaten in Abbildung 2.26 entspricht. Zur Beschreibung in einem vereinfachten Modell wird folgende Gleichung für $\varphi_{95\%}$ vorgeschlagen:

$$\varphi_{95\%} = \begin{cases} 2,0 & \text{für } M_{Gesamt} \leq 75 \text{ kN} \\ 2,2 - \frac{1}{375} \cdot M_{Gesamt} & \text{für } 75 \text{ kN} < M_{Gesamt} \leq 300 \text{ kN} \\ 1,5 - \frac{1}{3000} \cdot M_{Gesamt} & \text{für } 300 \text{ kN} < M_{Gesamt} \leq 1050 \text{ kN} \\ 1,15 & \text{für } 1050 \text{ kN} < M_{Gesamt} \end{cases} \quad (2.21)$$

Der Mittelwert $\bar{\varphi}$ lässt sich vereinfacht durch folgenden Zusammenhang berechnen:

$$\bar{\varphi} = 0,5 \cdot (\varphi_{95\%} + 1) \quad (2.22)$$

Auf Grundlage der Gleichungen für $\varphi_{95\%}$ und $\bar{\varphi}$ kann ein stochastisches Ersatzmodell für den Schwingbeiwert φ zur Anwendung in Verkehrslastsimulationen entwickelt werden. Das Modell basiert auf einer 3-parametrischen Log-Normalverteilung, deren Erwartungswert E , Standardabweichung S und unterer Grenzwert x_0 von der Gesamtlast aller Fahrzeuge auf dem Bauwerk M_{Gesamt} abhängen:

$$E = 0,5 \cdot (\varphi_{95\%} + 1) \quad (2.23)$$

$$x_0 = 1,0 \quad (2.24)$$

$$S = 0,26423 \cdot (\varphi_{95\%} - 1) \quad (2.25)$$

Bei der Implementierung dieses Vorschlags in Verkehrslastsimulationen ist zu Beginn jeder Überfahrt (eines oder mehrerer Lkw) stets eine Zufallszahl zwischen Null und Eins zu generieren. Während der Überfahrt wird in jedem Zeitschritt die Gesamtlast aller Fahrzeuge auf dem Bauwerk ermittelt und mit Gleichung (2.21) bis (2.25) die Parameter der zugehörigen Log-Normalverteilung des Schwingbeiwertes bestimmt. Anhand der Inversen dieser Verteilung und der zuvor generierten Zufallszahl lässt sich je Überfahrt ein zufälliger Schwingbeiwert φ in Abhängigkeit der Gesamtlast bestimmen. Dieser erhöht anschließend die statischen Lasten aller Fahrzeuge im fließenden Verkehr.

In [Lude03] bleibt unbeantwortet, ob sich die Gesamtlast aller Fahrzeuge M_{Gesamt} ausschließlich auf diejenigen im fließenden Verkehr oder zusätzlich auf solche im Stau bezieht. Bei der dynamischen Beanspruchung von Brücken haben Fahrzeuge im Stau keine anregende Wirkung, sondern erhöhen durch ihre Masse die Trägheit des Gesamtsystems und reduzieren damit die dynamische Bauwerksreaktion. Anhand der Auswertungen in [Dros89] und [HuKa93] lässt sich jedoch erkennen, dass dieser Effekt von untergeordneter Bedeutung ist. Bei einer Anwendung

der Vorschläge in Gleichung (2.21) bis (2.25) im Rahmen einer Verkehrslastsimulation sollten daher M_{Gesamt} und φ lediglich auf Fahrzeuge im fließenden Verkehr bezogen werden.

Zur vereinfachten Anwendung im Rahmen einer analytischen Rechnung, vgl. Kapitel 3, wurden vergleichende Verkehrslastsimulationen durchgeführt, die hinsichtlich der betrachteten statischen Systeme sowie dem angesetzten Langstreckenverkehr den Angaben in Abschnitt 3.2.1 entsprechen. Es zeigt sich, dass der Schwingbeiwert nach Schütz [Schü88], vgl. Gleichung (2.13) bzw. Abbildung 2.25, zu dem hier entwickelten Modell sehr ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der charakteristischen Werte liefert.

Abschließend ist zu betonen, dass sich die hier behandelten dynamischen Schwingbeiwerte primär auf globale Bauwerksreaktionen beziehen. Im Bereich lokaler Bauwerksreaktionen sollten gesonderte Betrachtungen erfolgen, die jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

2.1.3 Verkehrsprognosen

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen verkehrsseitigen Eingangsparemeter sind zwingend mit einer Prognose zu überlagern. Zur Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Straßengüterverkehrs in Deutschland können Prognosen im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) bzw. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in [InBv07], [InBv14] und [Prog07] herangezogen werden, vgl. [GKFB18]. Abbildung 2.30 und Abbildung 2.31 zeigen die Ergebnisse dieser Prognosen in Kombination mit der bisherigen Entwicklung hinsichtlich des jährlichen Transportaufkommens [*Mio. t p. a.*] sowie der Transportleistung [*Mrd. tkm p. a.*], wobei bei letzterem auch die Entwicklung der Transportweiten [*km*] miteinfließt. Bezüglich der langfristigen Abschätzung bis zum Jahr 2050 werden in [Prog07] zwei Szenarien betrachtet (Hauptszenario und Sensitivitätsbetrachtung), die sich unter anderem im Anstieg des Bruttoinlandsprodukts mit +1,3% p.a. bzw. +1,6% p.a. unterscheiden. Im Ergebnis der Untersuchung wird ein Anstieg des Straßengüterverkehrs hinsichtlich des Transportaufkommens von +0,8% p.a. bzw. +1,1% p.a. sowie der Transportleistung von +1,7% p.a. bzw. +2,0% p.a. festgehalten.

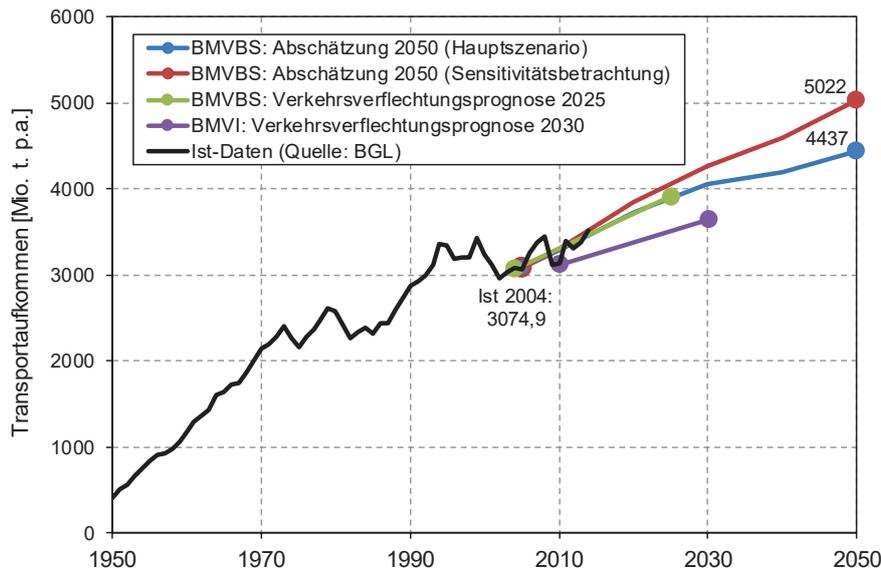


Abbildung 2.30: Entwicklung des Transportaufkommens im Straßengüterverkehr in Deutschland [GKFB18], vgl. [InBv07], [InBv14], [Prog07], [BGL16a]

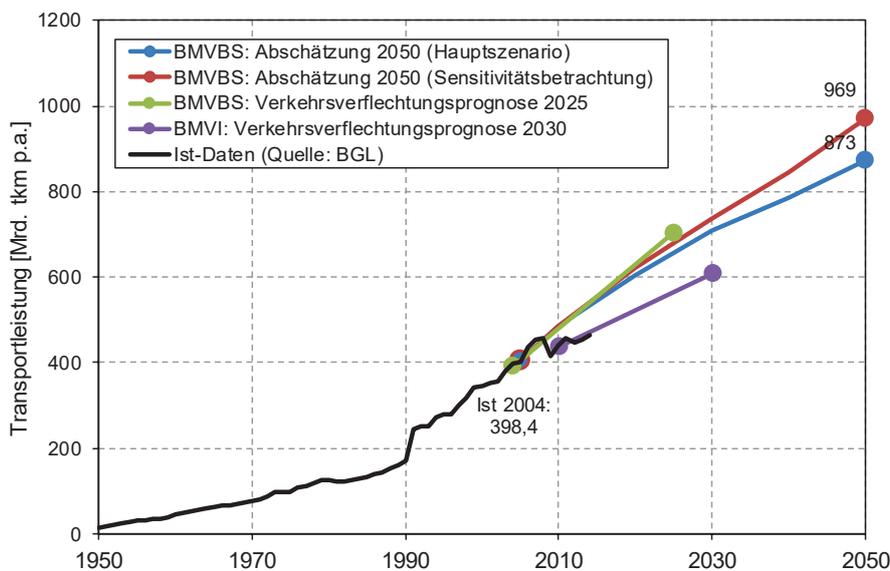


Abbildung 2.31: Entwicklung der Transportleistung im Straßengüterverkehr in Deutschland, vgl. [InBv07], [InBv14], [Prog07], [BGL16b]

Die bisherige Entwicklung zum genehmigungspflichtigen Schwerverkehr spiegelt sich teilweise in der Anzahl der Anträge für Schwertransporte wider, vgl. Abbildung 2.32. Deutlich erkennbar ist der nahezu exponentielle Anstieg. Der jährliche Anstieg der Anträge beträgt im Mittel ca. +11,5% p.a.. Eine Prognose oder Abschätzung auf Grundlage dieser Daten würde jedoch zu überzogenen Ergebnissen führen, da die Daten einerseits Mehrfachanträge enthalten und auch lediglich die Anträge an sich, jedoch nicht die tatsächlich durchgeführten Schwertransporte erfasst werden.

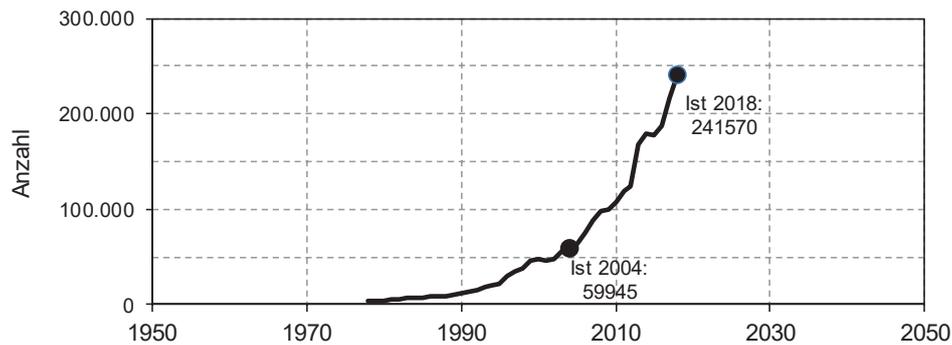


Abbildung 2.32: Entwicklung der Anträge für Großraum- und Schwertransporte bei der Autobahndirektion Nordbayern [Kasc09], [ABDNB19]

Auf Grundlage von Verkehrsaufzeichnungen kann einerseits eine Abschätzung der bisherigen Verkehrsbeanspruchung, insbesondere hinsichtlich Ermüdung, erfolgen. Entsprechende Ansätze finden sich u. a. in [NaRiLi11] und [Topu15]. Anhand von Verkehrsprognosen oder langfristigen Abschätzungen können andererseits auch Prognose-Szenarien des Schwerverkehrs entwickelt werden, die anschließend die Grundlage zur Bestimmung zukunftsfähiger Verkehrslastmodelle darstellen. Beispiele für Prognose-Szenarien können u. a. [FrBö11a] und [GKFB18] entnommen werden.

2.1.4 Brückentragwerk

Das statische System in Längs- und Quertragrichtung sowie die Fahrstreifenanordnung sind wesentliche Eingangsgrößen, da je nach System und betrachteter Beanspruchung die maßgebende Laststellung und der damit verknüpfte Verkehrszustand unterschiedlich sein können. Hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit einer Verkehrslastsimulation sowie zur Vereinfachung der analytischen Lösung bietet es sich an, das Tragverhalten über Einflusslinien darzustellen. Jeder Fahrspur wird eine Einflusslinie zugeordnet. Diese ergibt sich entweder aus einem Ausschnitt der Einflussfläche oder aus der Längseinflussflusslinie des Tragwerks und der Querverteilungslinie des Brückenquerschnitts. Für einfache statische Systeme können die Einfluss- und Querverteilungslinie auch analytisch dargestellt werden, vgl. Anhang B und C. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Beschreibung verwendet, da damit ein großer Bereich möglicher Systeme einfach abgebildet werden kann und gleichzeitig die hier im Fokus stehende Allgemeingültigkeit gewahrt bleibt.

2.2 Extremwertanalyse

Ziel einer Extremwertanalyse ist, Aussagen über die Wahrscheinlichkeit extremer bzw. seltener Ereignisse zu erhalten. Dazu ist eine geeignete Verteilungsfunktion der Extrema im Beobachtungszeitraum zu bestimmen, die Grundlage einer statistischen Extrapolation ist. Ergebnis einer statistischen Extrapolation ist die Verteilungsfunktion der Extrema im Bezugszeitraum sowie ein charakteristischer Wert mit einer definierten mittleren Wiederkehrperiode.

2.2.1 Extremwerttheorie

Die klassische Extremwerttheorie, vgl. [Cole01], behandelt die Verteilung von Extremwerten durch eine Untersuchung der Maxima M_n aus einer Folge von n unabhängigen Zufallsvariablen X_1, \dots, X_n mit der jeweils gleichen Verteilungsfunktion $F(x) = P(X_i \leq x)$:

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\} \quad (2.26)$$

Die Verteilungsfunktion der Maxima $F_{max}(x)$ ist gegeben durch $F(x)^n$, da:

$$\begin{aligned} F_{max}(x) &= P(M_n \leq x) = P(X_1 \leq x, \dots, X_n \leq x) \\ &= P(X_1 \leq x) \cdot \dots \cdot P(X_n \leq x) = F(x)^n \end{aligned} \quad (2.27)$$

Bei unterschiedlichen Verteilungen $F_k(x)$ lässt sich die Verteilung der Maxima analog ableiten:

$$F_{max}(x) = \prod_k F_k(x)^{n_k} \quad (2.28)$$

Der Exponent n bzw. n_k gibt an, aus wie vielen Realisationen der Zufallsvariablen sich die Maxima ergeben. Beispielhaft werden in Abbildung 2.33 die Verteilungsdichtefunktionen der Maxima infolge standardnormalverteilter Zufallsvariablen dargestellt.

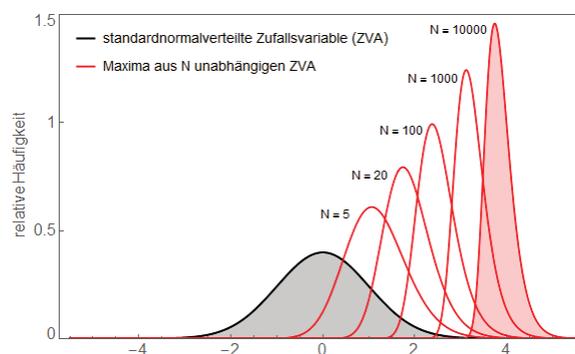


Abbildung 2.33: Verteilungsdichtefunktion der Maxima aus N unabhängigen standardnormalverteilten Zufallsvariablen

Für $n \rightarrow \infty$ konvergiert jede Grundfunktion zu einer der drei Extremwertverteilungen Weibull, Fréchet oder Gumbel. Nach dem Fisher-Tippett-Gnedenko-Theorem entscheidet die Form des Ausläufers einer Verteilung zu welcher Klasse die Maxima konvergieren, vgl. [ChLe13]:

- Maxima aus $n \rightarrow \infty$ Zufallszahlen einer Verteilung, die nach oben begrenzt ist (z.B. Uniform-, Beta- oder Weibull-Verteilung):
→ Weibull
- Maxima aus $n \rightarrow \infty$ Zufallszahlen einer Verteilung, die nicht nach oben begrenzt ist und deren Ausläufer langsam gegen Eins konvergiert (z.B. Pareto-, Student-t- oder Fréchet-Verteilung):
→ Fréchet
- Maxima aus $n \rightarrow \infty$ Zufallszahlen einer Verteilung, die nicht nach oben begrenzt ist und deren Ausläufer schneller gegen Eins konvergiert (z.B. Normal-, Log-Normal-, Exponential-, Gamma- oder Gumbel-Verteilung):
→ Gumbel

Analog dazu nähern sich auch die Extrema der Verkehrsbeanspruchung mit zunehmender Länge der Beobachtungszeiträume immer mehr einer dieser Extremwertverteilungen an, vgl. Tabelle 2.9. Bei unzureichender Länge der Beobachtungszeiträume bzw. nicht genügend große Werte von n liefern die klassischen Extremwertverteilungen keine ausreichend sichere Beschreibung der Verkehrsbeanspruchung. Diesbezüglich zeigt das Beispiel zu Abbildung 2.36, dass die drei Extremwertverteilungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

2.2.2 Charakteristischer Wert

Im mathematischen Sinne lassen sich charakteristische Werte aus Quantil-Werten einer Extremwertverteilung ableiten. Der Zusammenhang zwischen Quantil q und mittlerer Wiederkehrperiode \bar{T}_r wird in [Spae92] erläutert. Ein Ereignis E muss danach, bezogen auf einen Zeitraum von j Jahren, die folgende, einem Quantil entsprechende Wahrscheinlichkeit P aufweisen, um sicherzustellen, dass es im Zeitraum von \bar{T}_r Jahren im Mittel nur einmal überschritten wird:

$$q = P(X \leq E) = 1 - P(X > E) = \left(1 - \frac{1}{\bar{T}_r}\right)^j \quad (2.29)$$

Für Beanspruchungen infolge von Verkehrslasten definiert [DIN EN 1991-2] eine mittlere Wiederkehrperiode von $\bar{T}_r = 1.000$ Jahren. Bezüglich der 100-Jahres-Extrema ergibt sich damit eine Wahrscheinlichkeit von 90,5%, dass E nicht überschritten wird ($j = 100$). Der gesuchte charakteristische Wert ist demnach das 90,5%-Quantil der 100-Jahres-Extrema. Analog dazu lassen sich charakteristische Werte beispielsweise auch auf Grundlage von Jahres-Extrema (99,9%-Quantil, $j = 1$), Monats-Extrema ($\sim 99,99166\%$ -Quantil, $j = 1/12$) oder Tages-Extrema ($\sim 99,9995998\%$ -Quantil, $j = 1/250$ bei 250 Schwerverkehrstagen pro Jahr)

bestimmen. Anzumerken ist, dass die mittlere Wiederkehrperiode bei der Nachrechnung von Brücken entsprechend der geplanten Restnutzungsdauer sinnvoll gewählt werden sollte.

2.2.3 Methoden zur Extremwertanalyse

In bisherigen Arbeiten wurden unterschiedliche Methoden zur Extremwertanalyse der Verkehrsbeanspruchung eingesetzt, vgl. Tabelle 2.8. Diese stellen stets eine Kombination aus einem Zählverfahren und einer Verteilung dar. Zählverfahren sind Methoden zur Datenreduktion, womit ein Kennwert-Zeit-Verlauf auf die relevanten Extrema reduziert wird. Verteilungen sind die Grundlage zur statistischen Extrapolation, d.h. zur Bestimmung der Verteilung der Extrema im Bezugszeitraum sowie des charakteristischen Wertes. Ein detaillierter Vergleich der Methoden findet sich in [Zhou13] und [Swee15].

	Methoden zur Extremwertanalyse		
Zählverfahren	„Block-Maxima“	„Block-Maxima“ in Kombination mit „Peak-over-Threshold“	„Level-Crossing-Counting“
Verteilung zur statistischen Extrapolation	Generalisierte Extremwertverteilung	Generalisierte Pareto-Verteilung	Rice-Funktion
	alternativ direkt anhand des Histogramms		

Tabelle 2.8: Methoden zur Extremwertanalyse

Im Allgemeinen werden bei den im Folgenden vorgestellten Methoden aus den Kennwert-Zeit-Verläufen einer Simulation oder Messung jeweils zunächst Histogramme durch ein Zählverfahren aufgezeichnet, über Verteilungsfunktionen angenähert und damit die Extremwerte bestimmt, vgl. Abbildung 2.34.

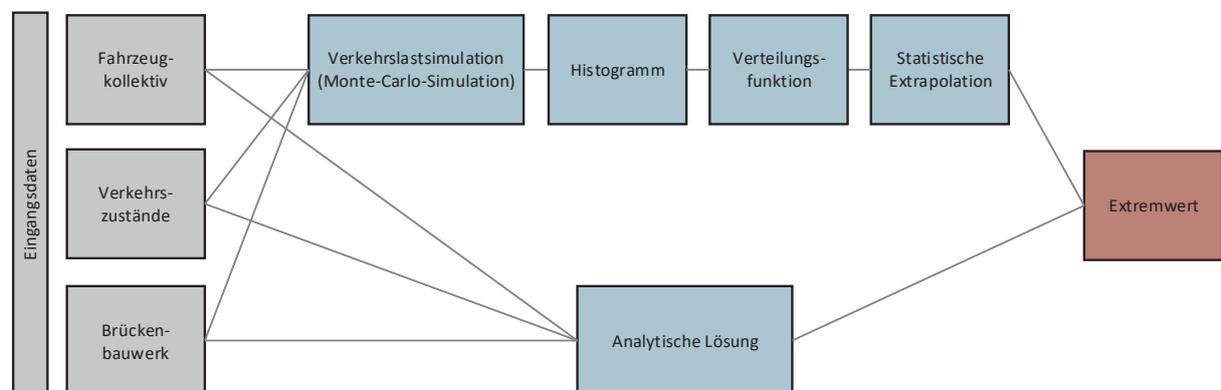


Abbildung 2.34: Ablaufdiagramm zur Extremwertanalyse der Verkehrsbeanspruchung

Bei einer ausreichend großen Datenmenge kann die Extremwertanalyse auch ohne Verteilungsfunktion direkt anhand der Histogramme erfolgen. Wie groß die dafür erforderliche

Datenmenge ist, wird in Abschnitt 3.2.2.2 behandelt. Alternativ können die Extremwerte durch eine analytische Lösung direkt anhand der Eingangsdaten ermittelt werden, ohne den Umweg über Simulation, Histogramm und Annäherung einer Verteilung. Die Entwicklung eines entsprechenden Rechenmodells ist zentraler Bestandteil dieser Arbeit, vgl. Kapitel 3.

Anzumerken ist, dass Extremwertanalysen teilweise mit bemessungsrelevanten Unsicherheiten behaftet sind. Nach [Capr05] und [Zhou13] hängt die Genauigkeit weniger von der verwendeten Methode ab, sondern viel mehr von der Länge der betrachteten Kennwert-Zeit-Verläufe. In [JBFM91] wurden die Unsicherheiten noch mit ca. $\pm 20\%$ beziffert. Aufgrund der steten Weiterentwicklung erreichen diese aktuell Abweichungen von ca. $\pm 10\%$, vgl. [FBKGGK18]. Es ist jedoch stets zu hinterfragen, welche zusätzlichen Unsicherheiten die Bestimmung der Verkehrsbeanspruchung begleiten, worauf im Ausblick in Kapitel 5 weiter eingegangen wird.

2.2.3.1 Methode basierend auf Block-Maxima

Bei der Methode basierend auf „Block Maxima“ wird ein Kennwert-Zeit-Verlauf zunächst in Beobachtungszeiträume der Länge ΔT unterteilt und das Extrema jedes Intervalls gespeichert, vgl. Abbildung 2.35. Die Beobachtungszeiträume stellen den zeitlichen Bezugspunkt dar, wie z.B. Stunden-, Tages- oder Jahres-Extrema. Ihre Länge kann beliebig gewählt werden, unter der Voraussetzung, dass die Extrema aufeinanderfolgender Intervalle statistisch unabhängig voneinander sind. Um diese Bedingung zu erfüllen, lässt sich eine Mindestlänge der Beobachtungszeiträume von näherungsweise der Dauer einer Überfahrt definieren. Anzumerken ist, dass sich dementsprechend Momentanwert-Verteilungen aufgrund ihrer üblicherweise sehr hohen Abtastrate $f = 1/\Delta T$ nicht zur Extremwertanalyse eignen.

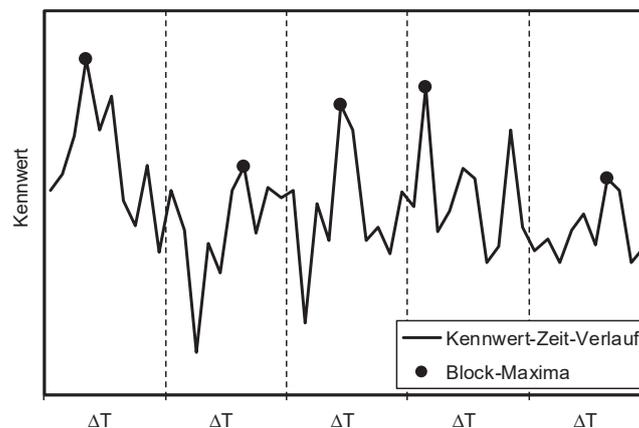


Abbildung 2.35: Zählverfahren der Block-Maxima-Methode

Sofern die Beobachtungszeiträume eine ausreichende Länge besitzen, können die nach der oben beschriebenen Methode generierten Histogramme durch eine Generalisierte Extremwert-Verteilung (GEV) angenähert werden. Die Verteilungsdichte der GEV hat folgende Gestalt:

$$f(x) = \begin{cases} (1 + \xi s)^{-\frac{1}{\xi}-1} \cdot \exp\left[-(1 + \xi s)^{-\frac{1}{\xi}}\right] & \xi \neq 0 \\ \exp(-s) \cdot \exp[-\exp(-s)] & \xi = 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

; μ : Lageparameter
; σ : Skalenwert
; ξ : Formfaktor

mit: $s = \frac{x - \mu}{\sigma}$

Mithilfe des Formfaktors werden in der GEV die drei klassischen Extremwertverteilungen kombiniert:

- $\xi > 0$: Fréchet-Verteilung mit $\sigma > 0$ und $x \geq \mu - \sigma/\xi$
- $\xi = 0$: Gumbel-Verteilung mit $\sigma > 0$
- $\xi < 0$: Weibull-Verteilung mit $\sigma > 0$ und $x \leq \mu - \sigma/\xi$

Anschließend lässt sich die Extremwertverteilung entsprechend Gleichung (2.28) bzw. (2.31) vom Beobachtungszeitraum in den Bezugszeitraum extrapolieren. Der charakteristische Wert lässt sich als Quantil beliebig anhand einer dieser Verteilungen bestimmen.

$$F_{\text{Bezugszeitraum}}(x) = [F_{\text{Beobachtungszeitraum}}(x)]^n \quad (2.31)$$

mit: $n = \frac{\Delta T_{\text{Bezugszeitraum}}}{\Delta T_{\text{Beobachtungszeitraum}}}$

Das Vorgehen wird beispielhaft in Abbildung 2.36 durch Anpassung der drei klassischen Extremwertverteilungen (Weibull, Gumbel und Fréchet) an Tages-Extrema gezeigt. Die Verteilungen werden anschließend auf einen Bezugszeitraum von 100 Jahren extrapoliert und mit dem Ergebnis einer direkten Simulation mehrerer 100 Jahre (Histogramm) verglichen. Wie zu erwarten, zeigt die Fréchet-Verteilung ein sehr konservatives Ergebnis. Interessant ist allerdings, dass das simulierte Ergebnis zwischen Weibull- und Gumbel-Verteilung liegt und keiner der genannten Verteilungen klar zugeordnet werden kann. Trotz der sehr guten Anpassung der Tages-Extrema wird daraus ersichtlich, dass der hier gewählte Beobachtungszeitraum offensichtlich keine ausreichende Länge zur statistischen Extrapolation der klassischen Extremwertverteilungen besitzt.

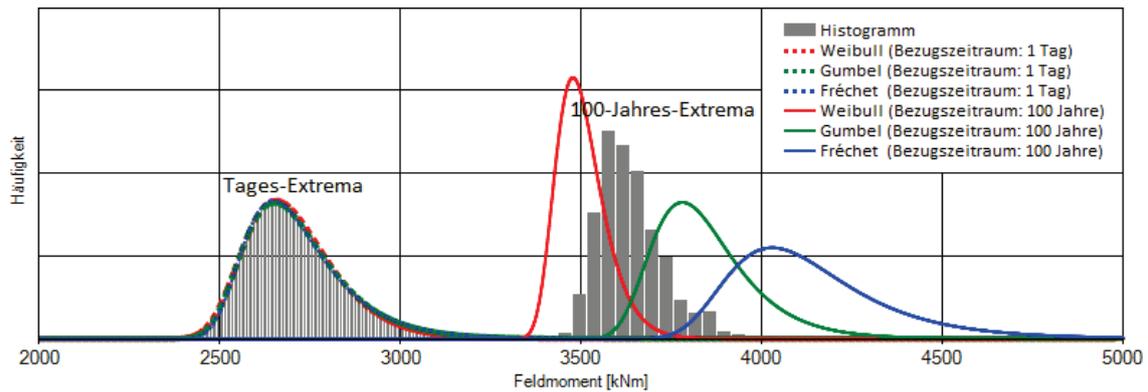


Abbildung 2.36: Anpassung der Tages-Extrema durch Extremwertverteilungen und Hochrechnung auf 100-Jahres-Extrema, Vergleich mit dem Ergebnis aus 1.000 Simulationen von jeweils 100 Jahren (Einfeldträger, $L = 25$ m Fahrzeugkollektiv der A61 (Bliesheim) im Jahr 2004 [Kasc09])

Weitere Effekte bei der Anwendung der Methode basierend auf „Block-Maxima“ lassen sich den drei Beispielen zu Tabelle 2.9 entnehmen:

- Die Streuung der Extrema wird mit zunehmender Länge der Beobachtungszeiträume geringer. Diese nicht konstant bleibende Streuung spiegelt sich u. a. direkt in der Bestimmung der Quantile wider. Daraus resultiert die Gefahr, dass die Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation oder Bauwerksmessung zu früh durch beispielsweise eine Gumbel-Verteilung angenähert werden, bei deren Hochrechnung die Streuung konstant bleibt.
- Die Verteilung der Extrema konvergiert mit zunehmender Länge der Beobachtungszeiträume von mehrmodalen stets zu einmodalen Funktionen. Bei der mehrspurigen Fahrstreifenanordnung tritt dieser Übergang zu einmodalen Funktionen tendenziell erst später ein.

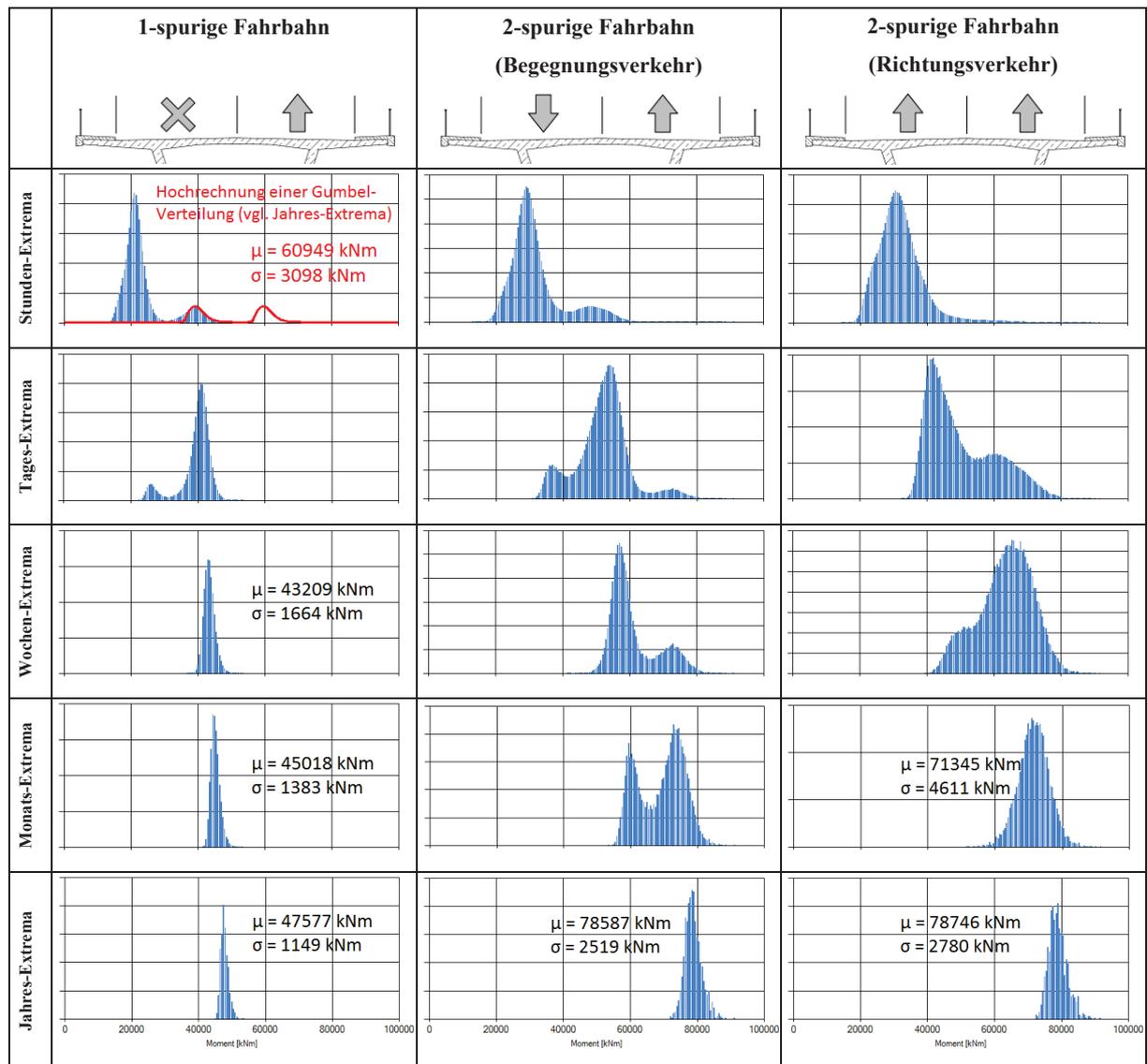


Tabelle 2.9: Extrema des Feldmomentes bei unterschiedlichen Beobachtungszeiträumen und Anordnungen der Fahrspuren (Einfeldträger, $L = 100$ m, Fahrzeugkollektiv der A61 (Bliesheim) im Jahr 2004 [Kasc09])

Bisherige Arbeiten zur Extremwertanalyse der Verkehrsbeanspruchung nutzen die beschriebene Methode teilweise in leicht abgewandelter Form:

Merzenich und Sedlacek [MeSe95] nutzen eine Normalverteilung, welche die extremsten Beanspruchungen aus dem Ereignis Stauverkehr oder fließender Verkehr beschreibt. Die Verteilungen entstehen dabei durch die Maxima aus 100 Simulationen mit jeweils bis zu 25 Fahrzeugen. Im Zuge der statistischen Extrapolation wird die voraussichtliche Anzahl der Ereignisse Stauverkehr bzw. fließender Verkehr im Bezugszeitraum (100 Jahre) als Exponent n verwendet, vgl. Gleichung (2.31). Die „Block-Maxima“ beziehen sich hier entsprechend nicht auf zeitliche Intervalle, sondern auf die Anzahl der Ereignisse. Bei einer ausreichend großen Anzahl der Ereignisse im gewählten Bezugszeitraum konvergiert die ursprüngliche Normalverteilung zu einer Gumbel-Verteilung. Die beiden Verkehrszustände werden dabei getrennt

voneinander betrachtet. Insbesondere bei größeren Spannweiten stellt sich allerdings die Frage, ob bei der Simulation einer verhältnismäßig geringen Anzahl an Fahrzeugen auch die maßgebenden Laststellungen auftreten, welche Auswirkungen sich dadurch in den Endbereichen der simulierten Histogramme ergeben und mit welcher statistischen Sicherheit diese Endbereiche durch eine Normalverteilung angenähert werden können.

Caprani [Capr05] [CaOM06] verwendet zusammengesetzte Verteilungen zur Abbildung der Tages-Extrema einer Verkehrslastsimulation mit einem simulierten Zeitraum von 1.000 Tagen. Die Extrema werden dafür in bis zu vier Klassen unterteilt, die jeweils mit der bei den betrachteten Extrema vorhandenen Anzahl an Lkw verknüpft ist. Die Tages-Extrema jeder Klasse werden anschließend durch eine Generalisierte Extremwert-Verteilung (GEV) angenähert, wodurch insgesamt eine zusammengesetzte Verteilung resultiert. Diese ist die Grundlage zur Bestimmung charakteristischer Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren.

Enright [Enri10] verwendet ein zu [Capr05] sehr ähnliches Verfahren. Es werden hier jedoch die Jahres-Extrema einer Verkehrslastsimulation mit einer Simulationslänge von 1.000 x 1 Jahr klassiert. Die bis zu 22 Klassen unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der aktuell vorhandenen Anzahl an Lkw als auch der Fahrzeugtypen. Je Klasse wird wahlweise eine Gumbel- oder Weibull-Verteilung angenähert. Anhand der daraus zusammengesetzten Verteilung wird ein charakteristischer Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren bestimmt.

Topurova [Topu15] verwendet mehrmodale Verteilungen zur Beschreibung der Extremwerte eines Tages, die aus Verkehrslastsimulationen mit einer simulierten Zeit von einem Tag bzw. 10.000 Lkw resultieren. Dazu wird ein Histogramm der Momentanwerte in Intervalle unterteilt, die anschließend durch jeweils eine Gumbel-Verteilung approximiert werden. Anschließend wird diejenige Gumbel-Verteilung im obersten Intervall als Verteilung der Tages-Extrema betrachtet und in eine Verteilung der Jahres-Extrema extrapoliert. Diese Verteilung dient schließlich als Ausgangspunkt zur Bestimmung charakteristischer Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren. Die Arbeit weist ausdrücklich darauf hin, dass die verwendete Extrapolation möglicherweise als konservativ einzustufen ist. Fraglich ist jedoch, ob die approximierte Verteilung als diejenige der Tages-Extrema betrachtet werden kann, da aus einer simulierten Zeit von einem Tag lediglich ein einzelner Tages-Extremwert vorliegen kann.

Steffens [Stef19] bildet zunächst Wochen-Extrema aus den Daten eines Bauwerkmonitorings und approximiert diese anschließend durch eine Gumbel-Verteilung. Anhand dieser Verteilung

werden je nach geplanter Restnutzungsdauer charakteristische Werte der Verkehrsbeanspruchung mit einer mittleren Wiederkehrperiode von beispielsweise 50 Jahren bestimmt. Für die zugrundeliegende Messdauer wird ein Zeitraum von mindestens einem Jahr vorgeschlagen. Es wird davon ausgegangen, dass das gewählte Verfahren auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert, da mit der Gumbel-Verteilung bei der statistischen Extrapolation zugleich die Annahme einer konstant bleibenden Streuung getroffen wird. Eine Betrachtung gemessener Extrema zeigt jedoch bei zunehmender Länge der Beobachtungszeiträume analog zu Tabelle 2.9 eine Abnahme der Streuung, wodurch tendenziell kleinere charakteristische Werte resultieren würden.

2.2.3.2 Methode basierend auf Peak-over-Threshold

Bei der „Peak-over-Threshold“-Methode werden zunächst analog zur „Block-Maxima“-Methode die Extrema in Zeitintervallen der Länge ΔT gespeichert. Anschließend werden davon nur diejenigen Extrema oberhalb eines definierten Schwellenwertes für die weitere Auswertung herangezogen, vgl. Abbildung 2.37. Das Zeitintervall stellt den zeitlichen Bezugspunkt (Beobachtungszeitraum) der Extrema dar, wie z.B. Stunden-, Tages- oder Jahres-Extrema. Mit diesem Bezugspunkt gelingt später eine Verknüpfung zwischen einer mittleren Wiederkehrperiode und einem Quantil, vgl. Abschnitt 2.2.2.

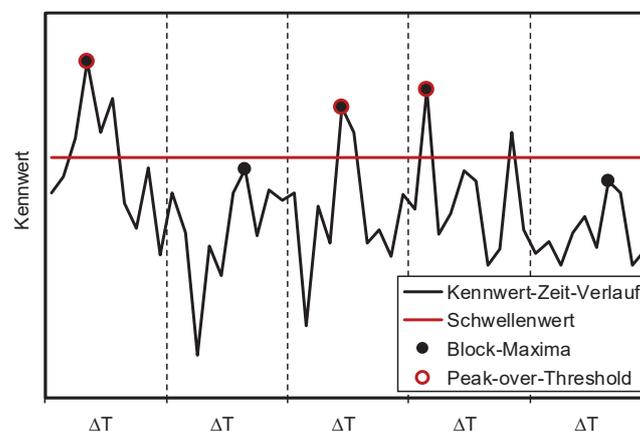


Abbildung 2.37: Zählverfahren der Peak-over-Threshold-Methode

Die Wahl eines geeigneten Schwellenwertes ist von entscheidender Bedeutung, da hiervon die Qualität der späteren Anpassung durch Verteilungsfunktionen abhängt und damit auch die Zuverlässigkeit des charakteristischen Wertes. Wird der Schwellenwert zu hoch gewählt, verbleiben zu wenige Daten für eine geeignete Anpassung. Bei einem zu niedrigen Schwellenwert könnte dieser noch vor dem letzten Wendepunkt der Dichteverteilung liegen. Da Verteilungsfunktionen zur Anpassung der Ausläufer üblicherweise keinen Wendepunkt besitzen, wäre dadurch eine geeignete Anpassung ebenfalls ausgeschlossen.

Zur Approximation der aufgezeichneten Extrema wird die Generalisierten Pareto-Verteilung (GPV) herangezogen, die sich im Gegensatz zu klassischen Verteilungen nicht vorrangig auf das Zentrum einer Dichteverteilung, sondern auf deren Ausläufer konzentriert. Die Verteilungsdichtefunktion der GPV hat folgende Gestalt, vgl. Abbildung 2.38:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \left(1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma} \right)^{(-1/\xi - 1)} & \xi \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right) & \xi = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} ; \mu: \text{Schwellenwert} \\ ; \sigma: \text{Skalenparameter} \\ ; \xi: \text{Formfaktor} \end{array} \quad (2.32)$$

Mithilfe des Formfaktors werden in der GPV drei verschiedene Verteilungen zusammengefasst:

- $\xi > 0$: Pareto-Verteilung mit $\sigma > 0$ und $x \geq \mu$
- $\xi = 0$: Exponential-Verteilung mit $\sigma > 0$ und $x \geq \mu$
- $\xi < 0$: Pareto-Typ-II-Verteilung mit $\sigma > 0$ und $\mu \leq x \leq \mu - \sigma/\xi$

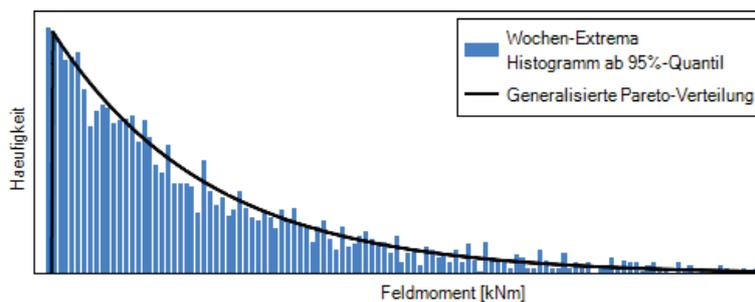


Abbildung 2.38: Beispielhafte Anpassung einer Generalisierten Pareto-Verteilung an die Dichteverteilung der Extrema

Die GPV ist anschließend Ausgangspunkt zur Bestimmung eines charakteristischen Wertes in Form eines Quantils, vgl. Abschnitt 2.2.2. Wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass der Fokus einerseits auf den Ausläufern liegt, also den relevanten Ereignissen oberhalb eines definierten Schwellenwertes, und andererseits bei kurzen Zeitintervallen ΔT ein großer Datenumfang vorliegt. Dadurch gelingt letztendlich eine sehr gute Anpassung der Verteilung an aufgezeichnete Daten.

Die Anwendung der „Peak-over-Threshold“-Methode bei der Analyse extremer Verkehrsbeanspruchungen beginnt mit den Arbeiten von Crespo-Minguillón und César [CrCa97], James [Jame03] sowie Gindy [Gind04].

Zhou [Zhou13] schlägt zur Abbildung der Extrema einer Verkehrslastsimulation eine gemischte GPV vor. Die Extrema werden dafür zunächst analog zu [Capr05] in mehrere Klassen unterteilt, die jeweils mit der bei den betrachteten Extrema vorhandenen Anzahl an Lkw verknüpft ist. Die Extrema jeder Klasse werden anschließend durch eine GPV angenähert, wobei

die Definition geeigneter Schwellenwerte je Klasse automatisiert durch einen Optimierungsalgorithmus erfolgt. Insgesamt resultiert daraus eine gemischte GPV, welche die Grundlage zur Bestimmung charakteristischer Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 100 und 1.000 Jahren ist.

In [KrGe18] dient die GPV zur Approximation von Wochen-Extrema aus Verkehrslastsimulationen mit einer Simulationslänge von 1.000 x 1 Jahr. Der Schwellenwert wird auf Grundlage eines Optimierungsalgorithmus bestimmt, wobei das 95%-Quantil des Histogramms als Startwert dient. Anschließend werden anhand der GPV charakteristische Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren berechnet. Im Gegensatz zur ursprünglichen Form der GPV in Gleichung (2.32) betrachtet der beschriebene Ansatz ausschließlich nicht nach oben begrenzte Verteilungen ($\xi \geq 0$), da es bei der Extremwertanalyse von Verkehrsbeanspruchungen aktuell keine Anhaltspunkte für einen oberen Grenzwert gibt.

2.2.3.3 Methode basierend auf Level-Crossing-Counting

Die Grundlage dieses Verfahrens ist eine Klassengrenzenüberschreitungs-zählung („Level-Crossing-Counting“). Im Vergleich zur üblichen Vorgehensweise, Extremwerte in zeitlichen Intervallen aufzuzeichnen (z.B. Tages-Extrema), wird hier in einem Referenzzeitraum gezählt, wie häufig bestimmte Schwellen der Beanspruchung überschritten werden, vgl. Abbildung 2.39. Anstatt zeitlicher Intervalle werden also Intervalle der Beanspruchung zur Beschreibung der Extrema genutzt.

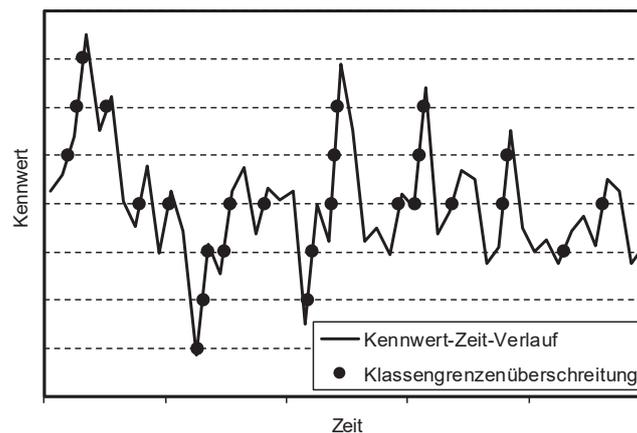


Abbildung 2.39: Zählverfahren der Level-Crossing-Counting-Methode

Die nach dieser Methode generierten Histogramme werden ab einem Schwellenwert x_0 durch eine Rice-Funktion in normalisierter Form mit folgender Gestalt angenähert, vgl. Abbildung 2.40:

$$v(x) = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.33)$$

mit:
$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{\dot{\sigma}}{\sigma}$$

Die Wahl eines geeigneten Schwellenwertes ist für die Qualität der Annäherung und damit auch die Zuverlässigkeit des charakteristischen Wertes von entscheidender Bedeutung. Üblicherweise erfolgt daher die Festlegung des Schwellenwertes anhand einer Optimierung der Variablen (x_0 , v_0 , m und σ), mit dem Ziel, für die Qualität der Annäherung ein vordefiniertes Konfidenzniveau zu erreichen.

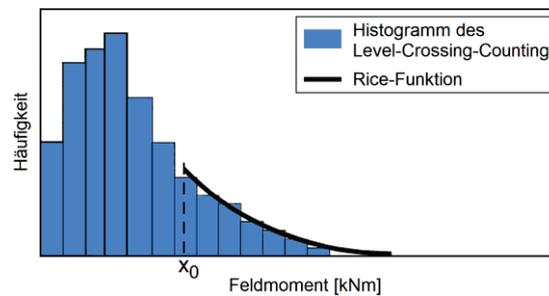


Abbildung 2.40: Beispielhafte Anpassung einer Rice-Funktion an das Histogramm des Level-Crossing-Counting

Der charakteristische Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von \bar{T}_r Jahren lässt sich anschließend anstatt über ein Quantil anhand Gleichung (2.34) ermitteln:

$$x(\bar{T}_r) = m \pm \sigma \sqrt{2 \ln(v_0 \cdot \bar{T}_r)} \quad (2.34)$$

Die Extremwertverteilung der Maxima in einem Bezugszeitraum der Länge $\Delta T_{\text{Bezugszeitraum}}$ ergibt sich aus Gleichung (2.35):

$$F_{\text{Bezugszeitraum}}(x) \approx \exp\left[-\Delta T_{\text{Bezugszeitraum}} \cdot v_0 \cdot \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)\right] \quad (2.35)$$

Anwendung findet die „Level-Crossing-Counting“-Methode bei der Analyse extremer Verkehrsbeanspruchungen u. a. in den Arbeiten von Flint und Jacob [FlJa96], Calgaro [Calg98] sowie Cremona [Crem01].

Freundt und Böning verwenden u. a. in [FrBöll1a], [FrBöll1b], [Böni13] und [FBKGK18] die beschriebene Methode bei Verkehrslastsimulationen mit einer simulierten Zeit von bis zu 100 Tagen bzw. mindestens 10.000 bis 100.000 Lkw. Zur Erhöhung der statistischen Sicherheit bei der Bestimmung charakteristischer Werte erfolgen stets 10 Realisationen einer Simulationsrechnung, wovon jeweils der Kleinst- und Größtwert gestrichen wird und aus den

verbleibenden Werten der Mittelwert als identifiziertes Ergebnis dient. Der charakteristische Wert wird im Regelfall mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren definiert.

Nowak [NoFi16] nutzt ebenfalls die Rice-Funktion zur Beschreibung extremer Beanspruchungen aus Verkehrslastsimulationen, jedoch mit einer simulierten Zeit von 25 Tagen bzw. maximal 10^6 Lkw. Im Ergebnis liegen die charakteristischen Werte aus jeweils 10 Realisationen einer Simulation vor. Der charakteristische Wert wird hier mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 200, 500 bzw. 1.000 Jahren definiert, je nach geplanter Restnutzungsdauer.

2.3 Ermüdungsanalyse

Ermüdungsversagen folgt einer Anzahl an Beanspruchungswechsel (Spannungsschwingspiele) und unterscheidet sich damit von einem Festigkeitsversagen infolge einer einzelnen extremalen Beanspruchung. Ein umfassender Beitrag zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Ermüdungsnachweise für Brücken findet sich in [NuGü06], [Kroh14] und [Alsh16]. Die wesentlichen Sachverhalte werden im Folgenden erläutert.

2.3.1 Beanspruchungskollektiv

Beanspruchungskollektive werden als Histogramm n_i oder Häufigkeitsverteilung $n(\Delta\sigma)$ der auftretenden Spannungsschwingbreiten im Beobachtungs- oder Nutzungszeitraum dargestellt. Die einzelnen Spannungsschwingbreiten werden durch Auswertung eines Kennwert-Zeit-Verlaufes mithilfe eines Rainflow-Algorithmus (Zyklenzählverfahren) bestimmt. Abbildung 2.41 zeigt exemplarisch das Beanspruchungskollektiv einer Straßenbrücke infolge unterschiedlicher Verkehrsszenarien.

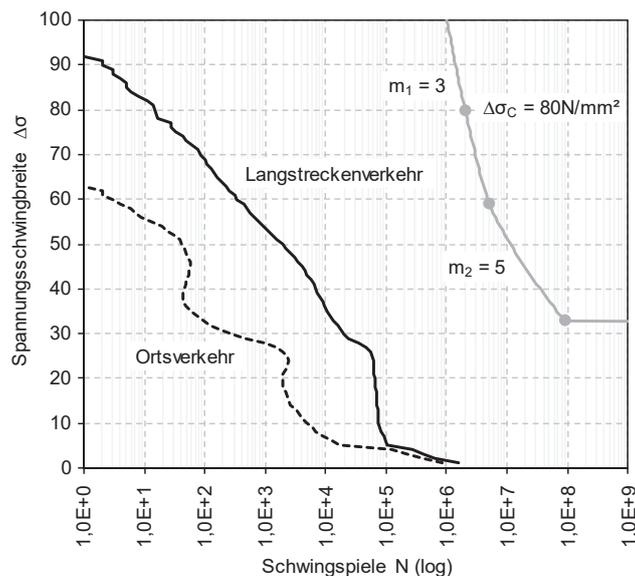


Abbildung 2.41: Beanspruchungskollektive unterschiedlicher Verkehrsszenarien

Zur Klassifizierung unterschiedlicher Kollektivformen wurden in [GaGH64] so genannte Einheitskollektive eingeführt, vgl. Abbildung 2.42. Zu beachten ist, dass diese anstatt über die Schwingspielzahl N üblicherweise in Form der Summenhäufigkeit H dargestellt werden. Deren gemeinsame mathematische Formulierung nach Gleichung (2.36) aus [Hank70] nutzt als beschreibende Parameter den Kollektivumfang H_0 , Kollektivhöchstwert $\Delta\sigma_{max}$ und Formparameter ν . Ein großer Formparameter bedeutet einen hohen Anteil an betragsmäßig großen Spannungsschwingbreiten. Eine qualitative Zuordnung zwischen Anwendungsgebieten und typischen Formparametern lässt sich [KJPZ12] entnehmen.

$$H(\Delta\sigma) = H_0 \left(1 - \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{max}}\right)^v\right) \quad (2.36)$$

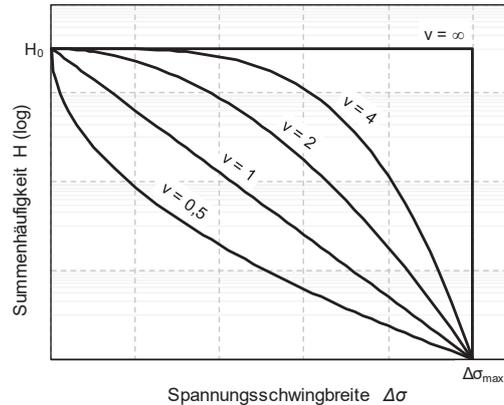


Abbildung 2.42: Einheitskollektive mit unterschiedlichen Formparametern v

2.3.2 Wöhlerlinie

Wöhlerlinien $N(\Delta\sigma)$ beschreiben die Korrelation zwischen der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ und der zugehörigen ertragbaren Schwingspielzahl N , vgl. Abbildung 2.43. Deren experimentelle Ermittlung erfolgt mit stufenweise konstanter Spannungsschwingbreite (Einstufenkollektiv) und einem stets konstanten Spannungsverhältnis $R = \sigma_u/\sigma_o$ aus Unterspannung σ_u und Oberspannung σ_o .

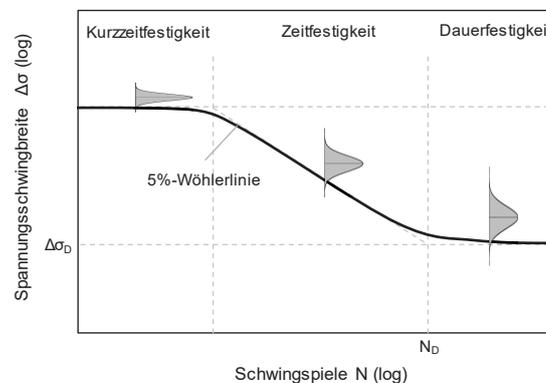


Abbildung 2.43: Bereiche und Streuung der Wöhlerlinie

Je nach Höhe der ertragbaren Schwingspielzahl lässt sich die Wöhlerlinie näherungsweise in folgende Bereiche unterteilen:

- Kurzzeitfestigkeit
- Zeitfestigkeit
- Dauerfestigkeit

Die Bereichsgrenzen werden quellenabhängig unterschiedlich angegeben, liegen jedoch beim Übergang von der Kurzzeit- zur Zeitfestigkeit bei ca. $N = 10^4 \dots 10^5$ sowie von der Zeit- zur

Dauerfestigkeit bei ca. $N = 10^6 \dots 10^7$. Eine mathematische Formulierung des Bereichs der Zeitfestigkeit liefert die so genannte Basquin-Gleichung [Basq10], die bei doppellogarithmischer Skalierung eine Gerade darstellt. Eine davon abgeleitete Schreibweise zeigt Gleichung (2.37) mit der Lage des Bezugspunktes bei $\Delta\sigma_D$ und N_D sowie dem Neigungsexponenten m :

$$N(\Delta\sigma) = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma} \right)^m \quad (2.37)$$

Hinsichtlich der Wöhlerlinie existiert im Allgemeinen auch ein Einfluss der Mittelspannung bzw. des Spannungsverhältnisses R . Dieser wird jedoch in den geltenden Regelwerken des Bauingenieurwesens lediglich im Stahlbau bei nicht geschweißten und spannungsarm geglühten geschweißten Konstruktionen berücksichtigt, da beispielsweise speziell bei geschweißten Konstruktionen oft ein unklarer Eigenspannungszustand herrscht. Die Wöhlerlinien in [DIN EN 1993-1-9] und [DIN EN 1992-1-1] beziehen sich daher stets auf ein ungünstiges Spannungsverhältnis von $R \geq 0$ (reiner Zugschwellbereich). In aktueller Literatur finden sich jedoch durchaus Ansätze zur konsequenten Berücksichtigung dieses Einflusses, vgl. [MDMH10] und [FKM12].

Die maximale Schwingbreite, bis zu welcher eine praktisch beliebige Anzahl an Schwingspielen ohne Ermüdungsversagen aufgenommen werden kann, wird Dauerschwingfestigkeit $\Delta\sigma_D$ genannt. Ob eine echte Dauerfestigkeit existiert ist jedoch werkstoffabhängig. Werden Mehrstufenkollektive anstelle von Einstufenkollektiven betrachtet und liegt ein Teil der Schwingbreiten oberhalb der Dauerschwingfestigkeit, so können infolge eines Wachstums von Mikrorissen auch kleine Schwingbreiten zu einem Ermüdungsschaden führen.

2.3.3 Schadensakkumulation

Die gesamte durch ein Beanspruchungskollektiv hervorgerufene Schädigung wird als Schadenssumme D bezeichnet. Die Berechnungsart, nach der sich diese Summe ermitteln lässt, entspricht einer Schadensakkumulationshypothese. Es existieren sowohl lineare als auch nicht-lineare Schadensakkumulationshypothesen, wobei erstere in der Praxis am häufigsten Verwendung finden. Die Schadenssumme resultiert aus einer Summe von Teilschäden durch Gegenüberstellung von Einwirkung (Beanspruchungskollektiv $n(\Delta\sigma)$) und Widerstand (Zugs-Wöhlerlinie $N(\Delta\sigma)$) nach Gleichung (2.38):

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \int_{\Delta\sigma=0}^{\infty} \frac{n(\Delta\sigma)}{N(\Delta\sigma)} d\Delta\sigma \leq D_{\text{grenz}} \quad (2.38)$$

2.3.3.1 Bezugs-Wöhlerlinie

Eine Bezugs-Wöhlerlinie ist verknüpft mit der Anwendung einer Schadensakkumulationshypothese auf Mehrstufenkollektive und grenzt sich damit von der Wöhlerlinie ab, die sich auf Einstufenkollektive bezieht. Eine zusammenfassende Beschreibung unterschiedlicher Bezugs-Wöhlerlinien und den entsprechenden Schadensakkumulationshypothesen lässt sich [Alsh16] entnehmen. Die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Formen sind „Miner-elementar“ nach [CoDo56], „Miner-original“ nach [Palm24] und [Mine45] sowie „Miner-modifiziert“ nach [Haib70] und [Repp86], vgl. Abbildung 2.44. Die Kurven stimmen im Zeitfestigkeitsbereich überein und unterscheiden sich nur im Dauerfestigkeitsbereich je nachdem, wie der Einfluss großer Schwingbreiten auf kleine Schwingbreiten berücksichtigt wird.

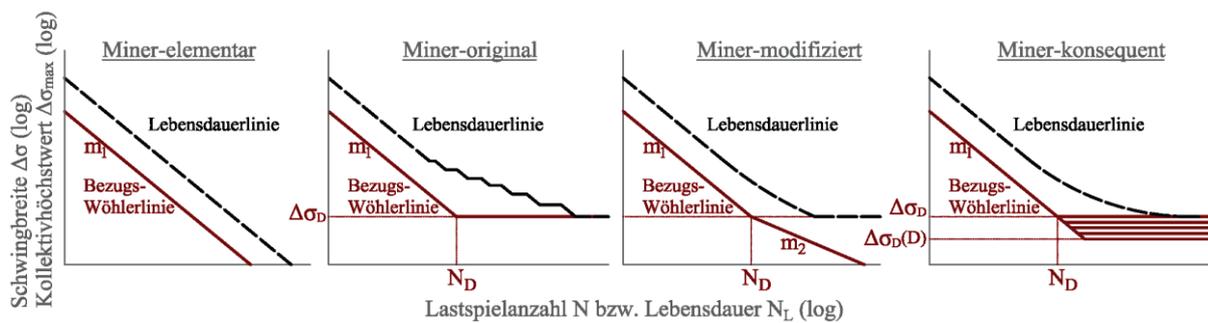


Abbildung 2.44: Bezugs-Wöhlerlinien verschiedener Schadensakkumulationshypothesen und deren zugehörige Lebensdauerlinien [AlGe13]

Bezugs-Wöhlerlinien aus aktuellen Regelwerken des Bauingenieurwesens zeigt Abbildung 2.45, siehe [DIN EN 1993-1-9] und [DIN EN 1992-1-1]. Beide Regelwerke setzen zur Schadensakkumulation die Regel „Miner-modifiziert“ um. Im Unterschied zum Beton- und Spannstahl wurde für Baustahl ein Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ festgelegt, der eine untere Grenze der schädigungsabhängigen Dauerschwingfestigkeit darstellt, vgl. [Oppe88].

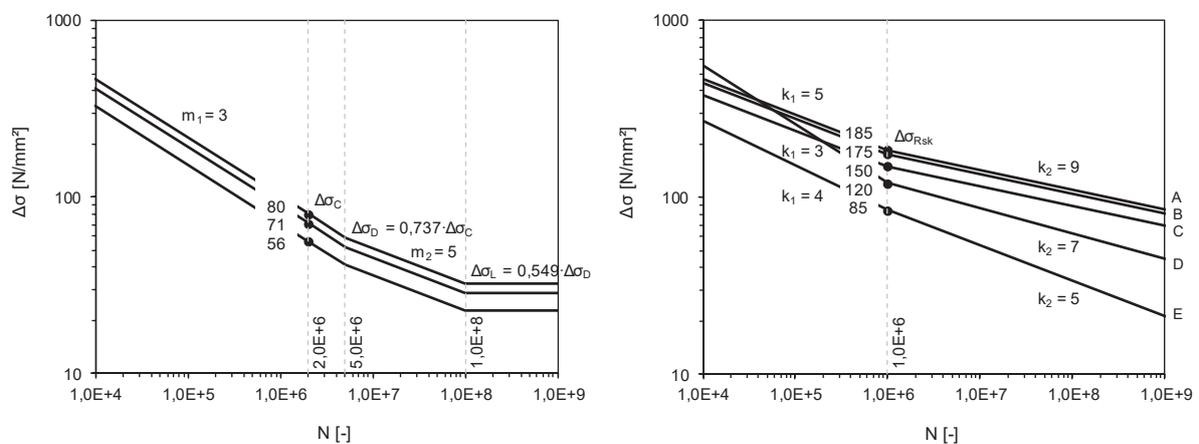


Abbildung 2.45: Bezugs-Wöhlerlinien des Stahlbaus (links) und Beton- und Spannstahls (rechts) (A: Spannstahl im sofortigen Verbund, B: Betonstahl (gerade & gebogen), C: Spannstahl im nachträglichen Verbund (gerade und gekrümmte SpGl. in Kunststoffhüllrohren), D: Spannstahl im nachträglichen Verbund (gekrümmte SpGl. in Stahlhüllrohren), E: Betonstahl (geschweißt))

2.3.3.2 Grenzschadenssumme

Für die Grenzsadenssumme wurde ursprünglich ein theoretischer Wert von $D_{grenz} = 1,0$ vorgeschlagen. Neuere Erkenntnisse zeigen jedoch, dass es sich hierbei um eine streuende Größe handelt, deren Werte je nach Schadensakkumulationshypothese und Definition der Wöhlerlinie durchaus in einem Bereich zwischen 0,1 und 10 liegen können, vgl. [EuHK05], [HiEZ12] und [Alsh16]. In den Regelwerken des Bauingenieurwesens, siehe [DIN EN 1993-1-9] und [DIN EN 1992-1-1], wird eine Grenzsadenssumme von 1,0 festgelegt, die wie oben beschrieben auf der Schadensakkumulationshypothese „Miner-modifiziert“ und normierten Wöhlerlinien beruht und damit im Mittel eine auf der sicheren Seite liegende Lebensdauerabschätzung liefert. Andere Regelwerke, die wiederum auf abweichenden Grundlagen basieren, legen meist einen unter 1,0 liegenden Wert fest, vgl. u. a. [Hobb08] und [FKM12].

2.3.4 Schadensäquivalenz

Die Schadenssumme D eines mehrstufigen Beanspruchungskollektivs lässt sich auch mit Hilfe eines äquivalenten Einstufenkollektivs mit konstanter Spannungsschwingbreite und festgelegter Schwingspielzahl beschreiben. Die zugehörige schädigungsäquivalente Schwingbreite $\Delta\sigma_E$ wird für Stahlkonstruktionen mit einer Schwingspielzahl von $n_E = 2 \cdot 10^6$ definiert, bzw. mit $n_E = 1 \cdot 10^6$ für Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen. Der Nachweis mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten stellt das werkstoffübergreifende Standardnachweisverfahren dar. Der Nachweis wird mit folgender Gleichung geführt (hier ohne Teilsicherheitsbeiwerte):

$$\Delta\sigma_E \leq \begin{cases} \Delta\sigma_C & \text{für Nachweise an Baustählen} \\ \Delta\sigma_{Rsk} & \text{für Nachweise an Beton- und Spannstählen} \end{cases} \quad (2.39)$$

Die schädigungsäquivalente Schwingbreite ergibt sich allgemein aus Gleichung (2.40) mit der Lage des Knicks der Bezugs-Wöhlerlinie bei $\Delta\sigma_D$ und N_D sowie dem Neigungsexponenten m :

$$\Delta\sigma_E = \left(\frac{1}{n_E} \cdot N_D \cdot D \right)^{1/m} \cdot \Delta\sigma_D \quad ; \quad m = \begin{cases} m_1 & \text{für } D > \frac{n_E}{N_D} \\ m_2 & \text{für } D \leq \frac{n_E}{N_D} \end{cases} \quad (2.40)$$

Unter Berücksichtigung einer Bezugs-Wöhlerlinie mit konstanter Neigung nach [CoDo56] („Miner-elementar“ in Abbildung 2.44) lässt sich vereinfacht schreiben:

$$\Delta\sigma_E = \left[\frac{1}{n_E} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m} = \left(\frac{1}{n_E} \cdot \int_{\Delta\sigma=0}^{\infty} n(\Delta\sigma) \cdot \Delta\sigma^m d\Delta\sigma \right)^{1/m} \quad (2.41)$$

2.3.4.1 Schadensäquivalenzfaktor

Für den Nachweis mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten kann diese nach Gleichung (2.42) auf Grundlage eines Ermüdungslastmodells $\Delta\sigma_{ELM3}$ (üblicherweise ELM 3 nach [Bru190a], [Bru190b] bzw. [DIN EN 1991-2], theoretisch wäre jedoch auch ein beliebiges anderes Lastmodell möglich) sowie so genannter Schadensäquivalenzfaktoren λ ermittelt werden. Die Kalibrierung der Schadensäquivalenzfaktoren erfolgt anhand von Verkehrslastsimulationen durch systematische Vergleiche zwischen $\Delta\sigma_{ELM3}$ (Bemessung) und $\Delta\sigma_E$ (Simulation), vgl. Gleichung (2.43). Durch die vereinfachte Bezugs-Wöhlerlinie mit konstanter Neigung entfällt die Abhängigkeit der λ -Werte vom Kerbdetail, womit eine gute ingenieurmäßige Handhabung ermöglicht wird. Andererseits führt dies jedoch auch zu konservativen Ergebnissen.

$$\Delta\sigma_E = \lambda \cdot \Delta\sigma_{ELM3} \quad (2.42)$$

$$\lambda = \frac{1}{\Delta\sigma_{ELM3}} \cdot \left[\frac{1}{n_E} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m} \quad (2.43)$$

Um verschiedene Einflussparameter voneinander zu trennen und damit ein flexibles Nachweisverfahren zu generieren, setzt sich der Schadensäquivalenzfaktor aus einzelnen Faktoren zusammen, vgl. Gleichung (2.44).

$$\lambda = \varphi_{fat} \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq \lambda_{max} \quad (2.44)$$

mit:	φ_{fat} :	schädigungsäquivalenter Schwingbeiwert
	λ_1 :	Einfluss von Stützweite und System
	λ_2 :	Einfluss von Verkehrsaufkommen und Verkehrsart
	λ_3 :	Einfluss der Nutzungsdauer
	λ_4 :	Einfluss weiterer Fahrstreifen
	λ_{max} :	Maximalwert zur Berücksichtigung einer Dauerfestigkeit

Die Anpassung der Schadensäquivalenzfaktoren an realistische Mehrstufenkollektive bei Straßenbrücken wurde für Nachweise an Beton- und Spannstählen, vgl. [DIN EN 1992-2], in [Dani94] und für Baustähle, vgl. [DIN EN 1993-2], in [MeSe95] erarbeitet. Schadensäquivalenzfaktoren für Betonnachweise bei Straßenbrücken wurden zwar in [Dani94] bestimmt, fanden jedoch keine Umsetzung in den aktuellen Regelwerken. Der Ermüdungsnachweis für

Beton wird daher üblicherweise mit dem vereinfachten Nachweisformat geführt. Eine Korrektur der Schadensäquivalenzfaktoren für den Nachweis von Kopfbolzendübeln, vgl. [DIN EN 1994-2], wurde in [Mens00] erarbeitet. Grundlage dafür waren Betriebsfestigkeitsversuche an Kopfbolzendübeln und eine daraufhin angepasste Grenzschadenssumme von 0,1. Die Korrektur fand jedoch ebenso keine Umsetzung in den aktuellen Regelwerken. In [GKFB18] erfolgte eine Überprüfung der Zukunftsfähigkeit der Schadensäquivalenzfaktoren nach [DIN EN 1992-2]. Aufgrund von Defiziten der gegenwärtigen normativen Regelung, hinsichtlich eines aktuellen sowie prognostizierten Verkehrs, wird im Ergebnis ein Vorschlag für eine zukunftssichere Anpassung der λ -Faktoren ausgearbeitet.

2.3.4.2 Maximalwert des Schadensäquivalenzfaktors

Die Lebensdauer ist theoretisch unendlich, wenn der Kollektivhöchstwert $\Delta\sigma_{max}$ kleiner als die Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ ist, d.h. wenn gilt:

$$\Delta\sigma_{max} < \Delta\sigma_D \quad (2.45)$$

In diesem Fall muss der Ermüdungsnachweis stets zu einem positiven Ergebnis kommen, d.h. die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_E$ muss kleiner sein als der Nennwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$:

$$\Delta\sigma_E < \Delta\sigma_C \quad (2.46)$$

Dies lässt sich durch folgende Bedingung umsetzen, da $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\sigma_D$ über $\Delta\sigma_C = 1,357 \cdot \Delta\sigma_D$ miteinander verknüpft sind, vgl. Abbildung 2.45:

$$\Delta\sigma_E < 1,357 \cdot \Delta\sigma_{max} \quad (2.47)$$

Die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_E$ kann damit nur dann größer als der Nennwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ werden, wenn der Kollektivhöchstwert $\Delta\sigma_{max}$ größer als die Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ ist, vgl. Abbildung 2.46.

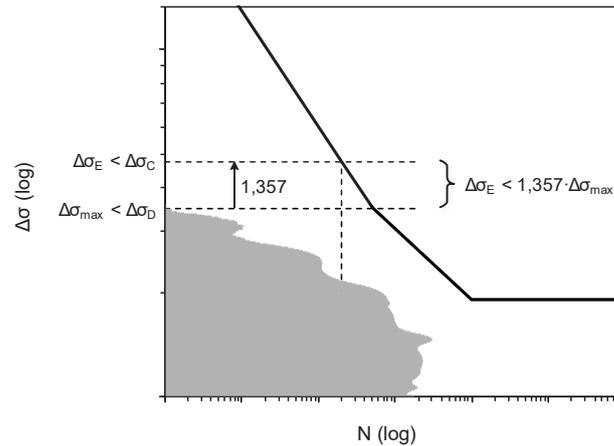


Abbildung 2.46: Definition von λ_{max} zur Berücksichtigung der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$

Über die Beziehung $\Delta\sigma_E = \lambda \cdot \Delta\sigma_{ELM3}$ lässt sich aus Gleichung (2.47) auch der maximale Schadensäquivalenzfaktor λ_{max} ableiten:

$$\lambda_{max} = \frac{1,357 \cdot \Delta\sigma_{max}}{\Delta\sigma_{ELM3}} \quad (2.48)$$

Die Berücksichtigung der Dauerfestigkeit über einen maximalen Schadensäquivalenzfaktor erfolgt ausschließlich im Stahlbau, da bei einbetonierten Beton- und Spannstählen keine echte Dauerfestigkeit existiert, vgl. [Heek16].

Anzumerken ist, dass λ_{max} und λ_1 in [MeSe95] unter identischen Annahmen bestimmt wurden (d.h.: Verkehrsart: Auxerre-Verkehr, Verkehrsaufkommen: $0,5 \cdot 10^6$ Lkw pro Jahr, Nutzungsdauer: 100 Jahre und einspuriger Verkehr). Die Berücksichtigung der Dauerfestigkeitsgrenze über λ_{max} bzw. Gleichung (2.44) ist daher mit der Annahme verbunden, dass Einflüsse infolge der Schadensäquivalenzfaktoren λ_2 bis λ_4 nicht zu einer Erhöhung des Kollektivhöchstwertes $\Delta\sigma_{max}$ führen. Dem widerspricht allerdings die mögliche Berücksichtigung mittlerer Fahrzeugesamtgewichte über λ_2 in [DIN EN 1993-2]. Darüber hinaus trifft diese Annahme auch bei der Berücksichtigung überholender Lkw bzw. mehrspurigen Verkehrs über λ_4 nicht zu.

2.4 Verkehrslastsimulation

Die möglichst detaillierte Abbildung des Verkehrs auf Straßenbrücken und die Berechnung der daraus resultierenden Verkehrsbeanspruchung erfolgt im Regelfall mit Programmen zur Verkehrslastsimulation. In der Literatur finden sich hierfür zahlreiche Beispiele, darunter die Arbeiten von Schütz [Schü88], Drosner [Dros89], Seifert [Seif90], Merzenich [Merz94], Danielewicz [Dani94], Geißler [Geiß95], Bailey [Bail96], Mensinger [Mens00], Günther [Günt01], Caprani [Capr05], Enright [Enri10], Böning [Böni13], Zhou [Zhou13], Topurova [Topu15] und Nowak [NoFi17].

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsprogramm „PATLoB“ (Probabilistic Analysis of Traffic Loads on Bridges) wird im Folgenden beschrieben. Dieses ermöglicht Verkehrslastsimulationen für Brücken durch Auswertung quasi unendlich langer stochastisch erzeugter Verkehrsströme. Die Generierung dieser Verkehrsströme erfolgt über Monte-Carlo-Algorithmen, basierend auf stochastischen Eingangsgrößen, vgl. Abbildung 2.1. Die Überfahrt der Verkehrsströme wird als schrittweise Verschiebung entlang von Einflusslinien betrachtet. Aus jedem Schritt ergibt sich eine Beanspruchung infolge der aktuell vorhandenen Achslasten auf der Einflusslinie, vgl. Abbildung 2.47. Die resultierenden Kennwert-Zeit-Verläufe dienen als Grundlage weiterführender Analysen.

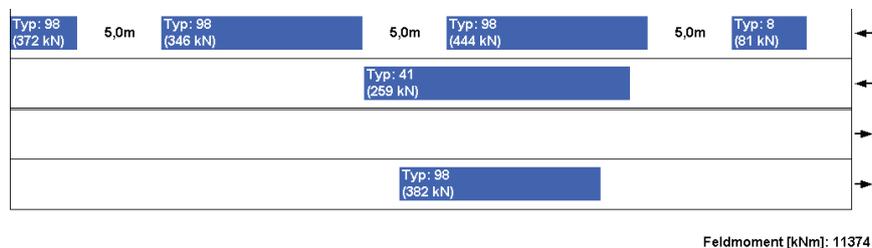


Abbildung 2.47: Momentaufnahme einer Verkehrslastsimulation

Bei der Generierung der Verkehrsströme wird das Fahrzeugband jeder Spur in Zeitabschnitte von jeweils einer Stunde unterteilt. Die Anzahl an Fahrzeugen, die je Stunde das Bauwerk passieren, wird entsprechend einer Tagesganglinie sowie dem durchschnittlichen täglichen Verkehr (*DTV*) bzw. durchschnittlichen täglichen Schwerverkehr (*DTV-SV*) bestimmt. Die Verkehrsstärke q [*Fzg/h*] ist damit stets bekannt. Die verschiedenen Fahrzeuge werden nacheinander entsprechend des Fahrzeugkollektivs sowie hinsichtlich ihres Verkehrszustands zufällig erzeugt. Die stochastischen Eingangsgrößen werden dazu programmintern über einen Zufallszahlengenerator [MaNi98] erzeugt, die dann in ihrer Gesamtheit der jeweiligen Verteilungsfunktion folgen.

Der Algorithmus zur Generierung der Fahrzeuge folgt dem Schema, dass zunächst der Fahrzeugtyp anhand der Fahrzeugtypenverteilung und anschließend das Fahrzeuggesamtgewicht anhand der Fahrzeuggesamtgewichtsverteilung zufällig erzeugt wird. Danach werden die zugehörigen Achsabstände und Achslastverteilungen dieses Fahrzeugtyps geladen. Die Achslasten ergeben sich aus dem Gesamtgewicht und der Achslastverteilung. Im Anschluss wird anhand des Verfahrens in Abschnitt 2.1.2.5 zufällig entschieden, ob sich das aktuelle Fahrzeug im Stau oder fließenden Verkehr befindet. Der zufällige Fahrzeugabstand kann dann über eine entsprechende Verteilungsfunktion in Abschnitt 2.1.2.3 generiert werden. Bezüglich der Abbildung von Lkw-Kolonnen wird analog zu Abschnitt 2.1.2.4 eine Methode angewandt, die es erlaubt, die Anzahl hintereinander fahrender Lkw direkt zu steuern. Bei der Umsetzung wird sichergestellt, dass Kolonnen einer bestimmten Anzahl an Lkw nicht durch größere Fahrzeugabstände unterbrochen werden, als durch den definierten Maximalabstand festgelegt. Zur näherungsweise Berücksichtigung der dynamischen Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk wird diese im Regelfall vereinfacht über einen konstanten oder streuenden Schwingbeiwert erfasst, vgl. Abschnitt 2.1.2.7, der die statischen Achslasten aller Fahrzeuge im fließenden Verkehr erhöht. Die erzeugten Fahrzeuge werden letztendlich an eine Liste von Fahrzeugen angehängt, die insgesamt das Fahrzeugband einer Spur für den Zeitabschnitt einer Stunde darstellt. Für alle übrigen Stunden eines Tages und darüber hinaus wird analog verfahren. Der bisher erläuterte Algorithmus beschränkt sich auf einen einspurigen Verkehr.

Im Begegnungsverkehr ist der Verkehrszustand einer Richtungsfahrbahn unabhängig vom Verkehrsgeschehen der Gegenrichtung. Bei der Generierung der Fahrzeugbänder wird daher jede Richtungsfahrbahn separat behandelt. Zur Simulation der Überfahrten werden die Fahrzeugbänder der beiden Richtungsfahrbahnen gleichzeitig (in entgegengesetzter Richtung) entlang der Einflusslinien verschoben. Alle Fahrzeugbänder werden dadurch synchronisiert, dass sie jeweils eine Stunde des Verkehrsgeschehens darstellen.

Im mehrspurigen Richtungsverkehr wird jede Richtungsfahrbahn in eine Hauptspur und mehrere Nebenspuren aufgeteilt. Die Hauptspur bedient im Regelfall den größten Anteil des Schwerverkehrs. Es wird die Annahme getroffen, dass ein Lkw nur dann auf der Nebenspur fährt, wenn ein Lkw auf der Hauptspur überholt wird. Der Algorithmus zur Generierung der Nebenspur orientiert sich also an der Hauptspur. Die Aufteilung des gesamten Schwerverkehrs einer Richtung in einzelne Spuren erfolgt wahlweise anhand eines konstanten oder streuenden Anteils der jeweiligen Spur am Gesamtverkehr, vgl. Abschnitt 2.1.2.6. Abbildung 2.48 zeigt

beispielhaft einen Ausschnitt der 24×3 Fahrzeugbänder eines Tages für eine Richtungsfahrbahn mit drei Fahrspuren. Ein Fahrzeugband enthält wieder die Lkw einer Spur für eine Stunde.

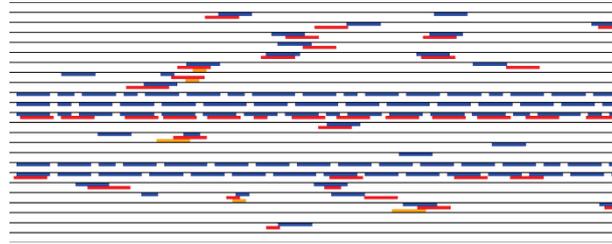


Abbildung 2.48: Ausschnitt der 24 Fahrzeugbänder eines Tages bei einer 3-spurigen Richtungsfahrbahn
(Blau = Hauptspur, Rot = Nebenspur 1, Orange = Nebenspur 2)

Die Erstellung des Fahrzeugbandes einer Nebenspur erfolgt in einem dreistufigen Verfahren. Zunächst wird analog zu einer Hauptspur das Fahrzeugband einer Stunde erstellt. Anschließend wird die Länge des erzeugten Fahrzeugbandes an die Länge der Hauptspur angepasst, wobei ausschließlich Fahrzeugabstände betroffen sind. Abschließend werden die Lkw so verschoben, dass Lkw der Nebenspur und Lkw der Hauptspur annähernd auf gleicher Höhe sind. In Abbildung 2.49 werden die möglichen Zustände dieser Verschiebung dargestellt. Wo der überholende Lkw zwischen vorderster oder hinterster Stellung steht, wird mit Hilfe einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 ermittelt. Bei drei Fahrstreifen sind zusätzlich die Lkw der Nebenspur 2 und Lkw der Nebenspur 1 annähernd auf gleicher Höhe.

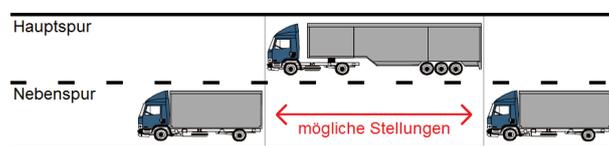


Abbildung 2.49: Mögliche Stellungen eines überholenden Lkw

Insgesamt werden bei der Abbildung des Straßenverkehrs folgende Vereinfachungen getroffen:

- Pkw werden mit einem konstanten Gesamtgewicht von 20 kN und einem Achsabstand von $3,0 \text{ m}$ ausschließlich in den Fahrzeugbändern des einspurigen Richtungsverkehrs berücksichtigt, da hier deren Einfluss auf die Lkw-Abstände nicht zu vernachlässigen ist. Im mehrspurigen Richtungsverkehr wird auf die Modellierung der Pkw verzichtet, da bezüglich der Lkw-Abstände davon ausgegangen wird, dass die Hauptspur lediglich von Lkw befahren wird und in der Nebenspur deren Gesamtgewicht im Vergleich zu üblichen Lkw eine untergeordnete Rolle spielt.
- Lkw eines Typs werden hinsichtlich Achslastverteilung und Achsabständen stets gleich abgebildet. Eine Korrelation beider Parameter zum Fahrzeuggesamtgewicht wird noch nicht berücksichtigt.

- Die Geschwindigkeit der Lkw wird auf allen Fahrspuren einer Richtungsfahrbahn als gleich angenommen, da diese in der Realität ebenfalls mit einer annähernd gleichen Geschwindigkeit fahren. Lkw auf der Nebenspur fahren real mit einer geringfügig höheren Geschwindigkeit als auf der Hauptspur. In den Verkehrslastsimulationen ist allerdings nur eine kurze Teilstrecke des Verkehrs (Brückenlänge) relevant. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass durch die Vereinfachung mit identischen Geschwindigkeiten der Lkw keine relevanten Änderungen der Ergebnisse eintreten.
- Fahrzeugabstände ändern sich während einer Überfahrt nicht. Wie oben erwähnt, werden gleiche Geschwindigkeiten der Lkw angenommen. Zusätzlich werden Beschleunigungs- und Bremsvorgänge ausgeschlossen, wodurch sich die Fahrzeugabstände während einer Überfahrt nicht ändern. Da eine Überfahrt relativ kurz ist, kann auch hier eine Beeinträchtigung der Ergebnisse ausgeschlossen werden.
- Spurwechselforgänge werden nicht abgebildet. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese nicht maßgebend werden, da Lkw dabei nicht nebeneinander fahren können. Lkw werden stattdessen stets entweder der Haupt- oder einer Nebenspur zugeordnet.
- Lkw werden nur dann auf der Nebenspur angesetzt, wenn ein Lkw auf der Hauptspur überholt wird. Diese Annahme stellt den Regelfall des Verkehrsgeschehens dar. Die wenigen Ausnahmefälle werden nicht berücksichtigt, da analog zu den Spurwechselforgängen nebeneinander fahrende Lkw stets eine ungünstigere Laststellung darstellen.
- Ein kontinuierlicher Anstieg von einem heutigen zu einem prognostizierten zukünftigen Verkehr wird noch nicht abgebildet.

Hinsichtlich einer anschließenden Extremwertanalyse werden die Extrema des Kennwert-Zeit-Verlaufs für unterschiedliche Beobachtungszeitintervalle ΔT direkt während der Simulation ermittelt und in Form von Histogrammen gespeichert (Block-Maxima). Die darauf aufbauenden und zur Verfügung stehenden Methoden zur Extremwertanalyse werden in Abschnitt 2.2.3 beschrieben. Zur Analyse der Ermüdungsbeanspruchung wird der vom Simulationsprogramm generierte Kennwert-Zeit-Verlauf mit dem Rainflow-Zählverfahren nach [ClSe86] in ein Beanspruchungskollektiv überführt. Die daran anknüpfenden Auswertungsmethoden werden in den Abschnitten 2.3.3 und 2.3.4 beschrieben.

Abschließend ist anzumerken, dass der Rechenkern des Simulationsprogramms in der Programmiersprache C++ geschrieben wurde, die zugehörige GUI in Visual Basic .NET. Die teilweise sehr umfangreichen Simulationen können sich damit einer parallelen Ausführung auf Hochleistungsrechnern bedienen.

2.5 Bisherige analytische Verfahren

In bisherigen Arbeiten wurden bereits einige wenige vereinfachte analytische Verfahren zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung beschrieben. Diese werden im Folgenden zusammengefasst vorgestellt.

2.5.1 Analytische Verfahren zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung

Novák nutzt in [NBBP07] und [NoBD15] zur Anpassung normativer Verkehrslastmodelle für kommunale Brücken einen analytischen Ansatz zur Beschreibung extremer Verkehrsbeanspruchungen, jeweils jedoch mit unterschiedlichen Methoden zur statistischen Extrapolation. Die erste Methode ermittelt anhand der Verteilung der Fahrzeuggesamtwichte aus einer Messdauer von 170 Stunden charakteristische Gesamtwichte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren. Dazu wird das Fahrzeuggesamtwicht bei $\mu + 3,4 \cdot \sigma$ der Verteilung herangezogen, wodurch sich in der Hauptspur ein Gesamtwicht der Lkw Typ 98 von 732 *kN* und in der Nebenspur von 624 *kN* ergibt. Anschließend wird die zugehörige Schnittgröße infolge der ungünstigsten Laststellung mehrerer solcher Lkw berechnet. Bei der Bestimmung des charakteristischen Gesamtwichtes mit $\mu + 3,4 \cdot \sigma$ (99,9608%-Quantil als Unterschreitungswahrscheinlichkeit) wird fälschlicherweise angenommen, dass die Verteilung der Fahrzeuggesamtwichte einen zeitlichen Bezug analog zu einer Verteilung der Extrema hat. Die Verteilung der Fahrzeuggesamtwichte ist jedoch unabhängig von der Messdauer und wird bei einer längeren oder kürzeren Messdauer lediglich mehr oder weniger fein erfasst. Um die Extrema dieser zeitunabhängigen Verteilung zu bestimmen, müsste geklärt werden, wie oft das betrachtete Ereignis im Bezugszeitraum eintritt. Die zweite Methode nutzt zur Extrapolation die Verteilung einer maximalen Schnittgröße infolge der Überfahrt eines oder mehrerer Lkw. Anhand dieser Verteilung wird das Quantil bei $1 - 1/(5 \cdot 10^8)$ als charakteristischer Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren bestimmt, basierend auf der voraussichtlichen Anzahl der insgesamt überfahrenden Lkw ($5 \cdot 10^8$) in einem Zeitraum von 1.000 Jahren. Unklar bleibt allerdings, inwiefern der Ansatz für Laststellungen mit einer gleichzeitigen Überfahrt mehrerer Lkw angepasst werden kann. Beiden Ansätzen ist gemein, dass keine fortlaufende Simulation der Überfahrten erfolgt, sondern die extreme Laststellung aus der Überfahrt eines oder mehrerer Lkw fest vorgegeben wird. Beide Ansätze beschränken sich darüber hinaus auf Brücken im Spannweitenbereich bis 35 *m*.

Kaschner setzt in [Kasc08] zur Abschätzung eines zukunftsfähigen Verkehrslastmodells nach [DIN EN 1991-2] bzw. [DIN EN 1991-2/NA] ebenfalls mehrere Lkw Typ 98 in ungünstigster

Laststellung mit vordefinierten Gesamtgewichten an. Für den Lkw in ungünstigster Stellung wird ein charakteristisches Gesamtgewicht von 761 kN angenommen. Dieses ergibt sich unter Annahme einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren aus einer gemessenen Verteilung der Fahrzeuggesamtgewichte (Verkehr der Messstelle A61 Bliesheim im Jahr 2004) mit dem Quantil bei $1 - 1/(0,6625 \cdot 10^8)$, basierend auf der voraussichtlichen Anzahl der insgesamt überfahrenden Lkw Typ 98 ($0,6625 \cdot 10^8$) in einem Zeitraum von 50 Jahren. Für alle übrigen Lkw wird das aktuell zulässige Gesamtgewicht von 400 kN angenommen. In einem Prognose-Szenario wird ein möglicher Anstieg der zulässigen Gesamtgewichte auf 520 kN untersucht. Daraus resultiert ein charakteristisches Gesamtgewicht des Lkw Typ 98 in ungünstigster Stellung von 984 kN sowie aller übrigen Lkw von 520 kN . Nachteilig ist bei diesem Ansatz die fehlende Begründung der Gesamtgewichte der übrigen Lkw. Es ist allerdings zu betonen, dass dieser, wie oben erwähnt, lediglich zur Abschätzung dient.

Freundt und Böning nutzen in [FrBö11a] ein analytisches Verfahren zur Berechnung charakteristischer Werte der Verkehrsbeanspruchung für statische Systeme mit kurzen Spannweiten und zwei Fahrspuren, deren maßgebende Laststellung aus zwei Fahrzeugen im Begegnungs- oder Überholverkehr besteht. Es wird zunächst die gemeinsame Gesamtgewichtsverteilung beider Fahrzeuge bestimmt. Diese wird anschließend durch Potenzieren mit der Begegnungs- bzw. Überholhäufigkeit pro Jahr zu einer Verteilung der Jahres-Extrema extrapoliert. Das 99,9%-Quantil der Jahres-Extrema dient dann zur Bestimmung eines charakteristischen Gesamtgewichtes mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren. Damit werden anschließend unter Berücksichtigung eines Schwingbeiwertes die charakteristischen Werte der Schnittgrößen bestimmt. In [FBKGK18] erfolgt eine Erweiterung dieses Verfahrens zur gesonderten Betrachtung einzelner Fahrzeugachsen.

Die in Kapitel 3 entwickelte analytische Lösung ist dem letztgenannten Verfahren strukturell sehr ähnlich, erweitert dieses jedoch auf einen größeren Bereich statischer Systeme sowie beliebige Situationen mehrspurigen Verkehrs.

2.5.2 Analytische Verfahren zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

König und Seifert beschreiben im Zuge der Erarbeitung der Eurocodes in [KöSe91] ein Konzept für den Ermüdungsnachweis von Straßenbrücken aus Beton. Das Konzept basiert auf der Ermittlung einer schädigungsäquivalenten Schwingbreite, sieht dazu jedoch in einem Zwischenschritt die Bestimmung eines vereinfachten Mehrstufenkollektivs der Verkehrsbeanspruchung vor, vgl. Einheitskollektive in Abbildung 2.42. Grundlage hierfür ist ein

Ermüdungslastmodell, welches dem heutigen ELM 3 entspricht, davon abweichend jedoch u. a. ein Gesamtgewicht von 800 kN aufweist. Die Schwingbreite infolge einer Überfahrt dieses Lastmodells entspricht, multipliziert mit einem der Verkehrsart entsprechendem Faktor von 0,63 ... 1,05, dem Kollektivhöchstwert $\Delta\sigma_{max}$. Der Kollektivumfang H_0 wird anhand der voraussichtlichen Anzahl der insgesamt überfahrenden Lkw während der geplanten Nutzungsdauer bestimmt. Als Formparameter wird ein Wert von $\nu = 2,5$ (Nahverkehr) bzw. $\nu = 4,0$ (Fernverkehr) vorgeschlagen. Das dabei verwendete ELM 3 mit einem Gesamtgewicht von 800 kN wurde ursprünglich von Bruls in [Brul90a] vorgeschlagen und in [Brul90b] auf ein Gesamtgewicht von aktuell 480 kN kalibriert, basierend auf dem im Jahr 1986 gemessenen Verkehr bei Auxerre (Frankreich). Die auf diesem ELM 3 aufbauende Entwicklung des aktuellen normativen Nachweiskonzeptes mit Schadensäquivalenzfaktoren, vgl. [Dani94] und [MeSe95], wird in Abschnitt 2.3.4 beschrieben. Die im Rahmen dieser Entwicklung durchgeführte Kalibrierung zeigt, dass der ursprüngliche Vorschlag in [KöSe91] aufgrund der sehr einfachen Bestimmung von Kollektivhöchstwert und Formparameter teilweise zu ungenau ist.

Aus der Anwendung des normativen Ermüdungslastmodells ELM 4 resultiert ebenfalls ein vereinfachtes Mehrstufenkollektiv der Verkehrsbeanspruchung, welches als Grundlage eines Betriebsfestigkeitsnachweises dient. Das ELM 4 stellt ein Fahrzeugkollektiv dar, bestehend aus fünf verschiedenen Lkw-Typen mit vorgegebenen schädigungsäquivalenten Achslasten, dem Anteil der einzelnen Lkw-Typen am Gesamtverkehr und der Fahrzeuganzahl pro Jahr, getrennt nach Verkehren großer und mittlerer Entfernung, sowie Ortsverkehr. Das ELM 4 wurde ursprünglich in [MeSe95] für Stahlbrücken kalibriert, wobei die Grundlage der im Jahr 1986 gemessene Verkehr bei Auxerre war (Verkehrsart „große Entfernung“). Eine Modifizierung der Verkehrszusammensetzung dieses Lastmodells erfolgte in der Fassung der [DIN EN 1991-2] aus dem Jahr 2004. Eine weitere Modifizierung der Verkehrszusammensetzung sowie der Fahrzeuganzahl pro Jahr erfolgte, jeweils getrennt für unterschiedliche Zeiträume, im Rahmen der Einführung der [NaRiLi 1]. Die Anwendung des ELM 4 beschränkt sich derzeit ausschließlich auf die Bewertung von Straßenbrücken. Durch die separate Anordnung der verschiedenen Lkw-Typen auf unterschiedlichen Spuren entsteht insgesamt ein relativ hoher Berechnungsaufwand. Vereinfachend werden jedoch Situationen mit mehreren Fahrzeugen gleichzeitig auf der Brücke nicht berücksichtigt. Darüber hinaus spiegelt sich die Streuung der Fahrzeuggesamtgewichte nicht in den ermittelten Mehrstufenkollektiven wider, wodurch keine Bestimmung des Kollektivhöchstwertes sowie der Kollektivform möglich ist. Die zur Kalibrierung der schädigungsäquivalenten Fahrzeuggesamtgewichte verwendete Bezugs-Wöhlerlinie

ist zudem im Regelfall nicht identisch mit derjenigen, welche dem Betriebsfestigkeitsnachweis zugrunde liegt, wodurch eine gewisse Inkonsistenz resultiert.

Die in Kapitel 4 entwickelte analytische Lösung erlaubt im Gegensatz zu den hier beschriebenen Verfahren eine exakte Bestimmung der Mehrstufenkollektive der Verkehrsbeanspruchung. Vereinfachungen betreffen lediglich Bereiche, die von untergeordneter Bedeutung bei der Ermüdungsbeanspruchung sind.

Kapitel 3

Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung

3.1 Erläuterung des Rechenmodells

3.1.1 Allgemeines

Die hier vorgestellte analytische Lösung basiert auf einer probabilistischen Analyse extremer Laststellungen und leitet aus diesen die Extremwertverteilung der Verkehrsbeanspruchung für einen beliebigen Bezugszeitraum ab. Diese wiederum dient unter anderem als Grundlage zur Ermittlung charakteristischer Werte. In Abbildung 3.1 wird das Rechenmodell schematisch dargestellt. Die Zusammenhänge werden im Folgenden erläutert.

Grundlage der analytischen Lösung ist die Tatsache, dass zur Extremwertanalyse nicht sämtliche, sondern ausschließlich die ungünstigsten Laststellungen k betrachtet werden müssen. Die Beanspruchungsverteilung einer Laststellung $F_k(M)$ resultiert aus der Gesamtgewichtsverteilung der betrachteten Lkw sowie deren Stellung entlang der Einflusslinie. Die mittlere Häufigkeit n_k einer Laststellung resultiert aus dem Verkehrsaufkommen, der Verkehrszusammensetzung und der Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Verkehrszustände. Die Extremwertverteilung leitet sich aus den Maxima der n_k Realisationen der Zufallsvariable $F_k(M)$ ab.

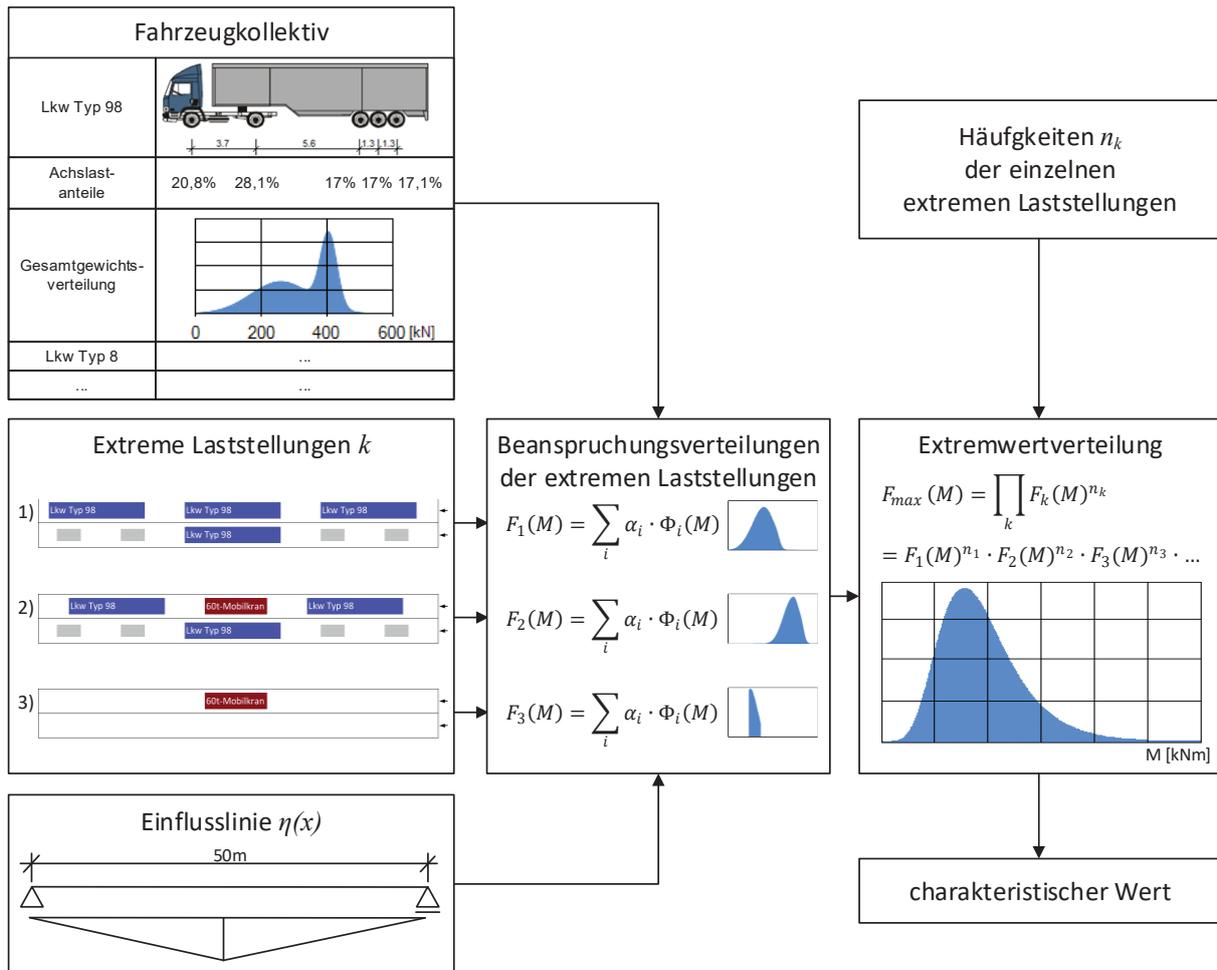


Abbildung 3.1: Schema der analytischen Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung

3.1.2 Ermittlung der Beanspruchungsverteilung extremer Laststellungen

Zunächst muss geklärt werden, wie die Beanspruchung infolge einer extremen Laststellung verteilt ist. Dazu wird beispielhaft ein Ergebnis y betrachtet, das sich aus einem funktionalen Zusammenhang $f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ einzelner Variablen ergibt, vgl. [HeSa12]:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + \dots \quad (3.1)$$

Entspricht die Variable x_i einer normalverteilten Zufallsgröße X_i mit der Verteilungsfunktion $F(x_i) = P(X_i \leq x_i) = \Phi(x_i, \mu_i, \sigma_i)$, ist das Ergebnis y nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung ebenfalls normalverteilt, jedoch mit der Verteilungsfunktion $F(y) = \Phi(y, \mu_y, \sigma_y)$. Mittelwert und Standardabweichung des Ergebnisses y lassen sich über den funktionalen Zusammenhang $f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ direkt ableiten:

$$\mu_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \mu_i = a_1 \cdot \mu_1 + a_2 \cdot \mu_2 + a_3 \cdot \mu_3 + \dots \quad (3.2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma_i^2} = \sqrt{(a_1 \cdot \sigma_1)^2 + (a_2 \cdot \sigma_2)^2 + (a_3 \cdot \sigma_3)^2 + \dots} \quad (3.3)$$

Für den Fall doppelnormalverteilter Zufallsgrößen mit der Verteilungsfunktion $F(x_i) = P(X_i \leq x_i) = \alpha_i \cdot \Phi(x_i, \mu_{i,1}, \sigma_{i,1}) + \beta_i \cdot \Phi(x_i, \mu_{i,2}, \sigma_{i,2})$ lassen sich die Regeln der Fehlerfortpflanzung durch eine Kombination der einzelnen Modalwerte erweitern. Das Ergebnis y folgt dann einer 2^n -normalverteilten Zufallsgröße. Die Mittelwerte $\mu_{y,i}$, Standardabweichungen $\sigma_{y,i}$ und Wichtungen $\alpha_{y,i}$ für $i = 1 \dots 2^n$ ergeben sich wie folgt:

$$\mu_y = \underbrace{\begin{pmatrix} \mu_{1,1} & \mu_{2,1} & \dots & \mu_{n,1} \\ \mu_{1,1} & \mu_{2,1} & \dots & \mu_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{1,2} & \mu_{2,2} & \dots & \mu_{n,2} \end{pmatrix}}_{\text{Kombinationsmatrix}} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_{1,1} & \mu_{2,1} & \mu_{3,1} \\ \mu_{1,1} & \mu_{2,1} & \mu_{3,2} \\ \mu_{1,1} & \mu_{2,2} & \mu_{3,1} \\ \mu_{1,1} & \mu_{2,2} & \mu_{3,2} \\ \mu_{1,2} & \mu_{2,1} & \mu_{3,1} \\ \mu_{1,2} & \mu_{2,1} & \mu_{3,2} \\ \mu_{1,2} & \mu_{2,2} & \mu_{3,1} \\ \mu_{1,2} & \mu_{2,2} & \mu_{3,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\begin{pmatrix} \sigma_{1,1} & \sigma_{2,1} & \dots & \sigma_{n,1} \\ \sigma_{1,1} & \sigma_{2,1} & \dots & \sigma_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1,2} & \sigma_{2,2} & \dots & \sigma_{n,2} \end{pmatrix}^2 \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}^2} = \sqrt{\begin{pmatrix} \sigma_{1,1} & \sigma_{2,1} & \sigma_{3,1} \\ \sigma_{1,1} & \sigma_{2,1} & \sigma_{3,2} \\ \sigma_{1,1} & \sigma_{2,2} & \sigma_{3,1} \\ \sigma_{1,1} & \sigma_{2,2} & \sigma_{3,2} \\ \sigma_{1,2} & \sigma_{2,1} & \sigma_{3,1} \\ \sigma_{1,2} & \sigma_{2,1} & \sigma_{3,2} \\ \sigma_{1,2} & \sigma_{2,2} & \sigma_{3,1} \\ \sigma_{1,2} & \sigma_{2,2} & \sigma_{3,2} \end{pmatrix}^2 \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}^2} \quad (3.5)$$

$$\alpha_y = \begin{pmatrix} \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_n \\ \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \beta_n \\ \vdots \\ \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \\ \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \beta_3 \\ \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot \alpha_3 \\ \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \\ \beta_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \\ \beta_1 \cdot \alpha_2 \cdot \beta_3 \\ \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \alpha_3 \\ \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Die Verteilungsfunktion $F(y)$ ergibt sich dann zu:

$$F(y) = \sum_{i=1}^{2^n} \alpha_{y,i} \cdot \Phi(y, \mu_{y,i}, \sigma_{y,i}) \quad (3.7)$$

Hinsichtlich der hier zu untersuchenden Extrema der Verkehrsbeanspruchung ist der funktionale Zusammenhang zur Berechnung einer Beanspruchung M für jede maßgebende extreme Laststellung zu bestimmen. Dieser ergibt sich durch Auswertung der Einflusslinie und lautet im allgemeinen Fall:

$$\begin{aligned}
 M &= \sum_{\substack{i=1 \\ (Lkw)}}^n \left[P_i \cdot \max_x \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ (Achsen)}}^m \delta_{i,j} \cdot \eta_L(x_{i,j}) \cdot \eta_Q(y_{i,j}) \right\} \cdot \varphi \right] \\
 &= \underbrace{\begin{pmatrix} P_{Lkw\ 1} \\ \vdots \\ P_{Lkw\ n} \end{pmatrix}}_{\text{Zufallsgrößen}}^T \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \max_x \left\{ \sum_j \delta_{1,j} \cdot \eta_L(x_{1,j}) \cdot \eta_Q(y_{1,j}) \right\} \cdot \varphi \\ \vdots \\ \max_x \left\{ \sum_j \delta_{n,j} \cdot \eta_L(x_{n,j}) \cdot \eta_Q(y_{n,j}) \right\} \cdot \varphi \end{pmatrix}}_{\substack{\text{konstante Lastkoeffizienten der Lkw} \\ \text{zur Berechnung der Beanspruchung infolge der} \\ \text{ungünstigsten Laststellung entlang der Einflusslinie}}} \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

mit: P : Zufallsgröße des Fahrzeuggesamtgewichtes

δ : Achslastanteil

$\eta_L(x)$: Längseinflusslinie

$\eta_Q(y)$: Querverteilungslinie

φ : Schwingbeiwert

Die Beanspruchung M ist also eine lineare Kombination der Zufallsgrößen P_i , vgl. Gleichung (3.1). Die Beanspruchungsverteilung $F(M)$ kann damit für den Fall doppelnormalverteilter Fahrzeuggesamtgewichte anhand der oben genannten Zusammenhänge ermittelt werden:

$$F(M) = \sum_{i=1}^{2^n} \alpha_{M,i} \cdot \Phi(M, \mu_{M,i}, \sigma_{M,i}) \quad (3.9)$$

Anzumerken ist, dass die Beanspruchungsverteilung für beliebige Verteilungsfunktionen der Zufallsgrößen P_i vereinfachend auch über Monte-Carlo-Algorithmen ermittelt und im hier vorgestellten Rechenmodell berücksichtigt werden kann.

3.1.3 Ermittlung der Häufigkeit extremer Laststellungen

Weiterhin ist zu klären, wie oft die einzelnen extremen Laststellungen eintreten. Die gesuchte mittlere Häufigkeit ergibt sich aus den Parametern zur Beschreibung der Fahrzeugkollektive und Verkehrszustände. Wesentliche Faktoren sind in diesem Zusammenhang der *DTV*, *DTV-SV*, Fahrzeughäufigkeiten, Anzahl gleichzeitig auftretender Fahrzeuge, Überholwahrscheinlichkeit, Stauanteil, mittlere Geschwindigkeiten sowie der Bezugszeitraum. Eine detaillierte Beschreibung zur Bestimmung der mittleren Häufigkeiten erfolgt im Folgenden anhand von Beispielen.

3.1.3.1 Einspuriger Richtungsverkehr

Als einführendes Beispiel wird die mittlere Häufigkeit einer extremen Laststellung mit drei Lkw vom Typ 98 direkt hintereinander im Stau bestimmt, vgl. Abbildung 3.2 (hier unter Vernachlässigung günstig wirkender Pkw zwischen den Lkw). Der Anteil des Lkw Typ 98 im Fahrzeugkollektiv wird mit 59% angenommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass genau drei dieser Lkw in Folge auftreten, liegt bei $0,59^3 = 0,205$. Aus der mittleren Anzahl an Kfz pro Stau ($N_{Kfz\ pro\ Stau}$) ergibt sich entsprechend Abbildung 3.2 die maximale Anzahl der darin auftretenden Tripel zu: $N_{Kfz\ pro\ Stau} - 2$. Die mittlere Häufigkeit der Laststellung pro Tag lässt sich dann entweder in Kombination mit der mittleren Anzahl an Staus pro Tag ($N_{Staus\ pro\ Tag}$) oder vereinfachend über den prozentualen Stauanteil und *DTV-SV* bestimmen:

$$\begin{aligned} n &= 0,59^3 \cdot (N_{Kfz\ pro\ Stau} - 2) \cdot N_{Staus\ pro\ Tag} \\ &\approx 0,59^3 \cdot Stauanteil \cdot DTV-SV \end{aligned} \quad (3.10)$$

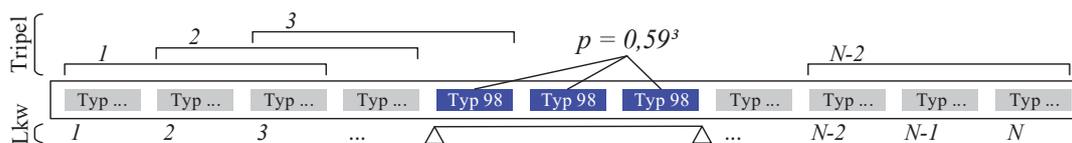


Abbildung 3.2: Maximale Anzahl an Tripel im Stauverkehr und Häufigkeit bestimmter aufeinanderfolgender Fahrzeugtypen

Die hier betrachteten Stauparameter können gemäß Abschnitt 2.1.2.5 auch direkt in die bei Verkehrslastsimulationen verwendeten Parameter p_{Stau} und $p_{fließ}$ überführt werden.

Unter Berücksichtigung günstig wirkender Pkw zwischen den Lkw ergibt sich die mittlere Häufigkeit derselben Laststellung pro Tag nach Gleichung (3.11). Der Einfluss der Pkw wird im Folgenden ausschließlich im einspurigen Verkehr berücksichtigt (Richtungs- und Begegnungsverkehr), da bei Stausituationen im mehrspurigen Verkehr davon ausgegangen wird, dass die Hauptspur ausschließlich von Lkw befahren wird.

$$\begin{aligned}
 n &= \left(\frac{DTV-SV}{DTV} \cdot 0,59\right)^3 \cdot (N_{Kfz \text{ pro Stau}} - 2) \cdot N_{\text{Staus pro Tag}} \\
 &\approx \left(\frac{DTV-SV}{DTV} \cdot 0,59\right)^3 \cdot \text{Stauanteil} \cdot DTV
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$



Abbildung 3.3: Extreme Laststellung des Stauverkehrs

Falls die Reihenfolge der Lkw einer Fahrtrichtung relevant ist, wie z.B. bei der Folge "98-98-41", so ist die oben beschriebene Häufigkeit durch die Anzahl der möglichen Reihenfolgen (3) zu teilen. Wird der Anteil des Lkw Typ 41 mit 17% angenommen, liefert $(0,59)^2 \cdot 0,17$ die Wahrscheinlichkeit aller Reihenfolgen. Jede Reihenfolge tritt jedoch gleich oft auf.

Ausgehend von der oben beschriebenen Häufigkeit lassen sich auch Regeln für extreme Laststellungen des fließenden Verkehrs ableiten, vgl. Abbildung 3.4:

$$n \approx \frac{DTV-SV}{DTV} \cdot 0,59 \cdot (1 - \text{Stauanteil}) \cdot DTV
 \tag{3.12}$$



Abbildung 3.4: Extreme Laststellung des fließenden Verkehrs

Unter Berücksichtigung des Schwingbeiwertes für Fahrzeuge im fließenden Verkehr werden derartige Laststellungen besonders bei kleinen Spannweiten relevant.

3.1.3.2 Mehrspuriger Richtungsverkehr

Im mehrspurigen Richtungsverkehr wird zunächst davon ausgegangen, dass sich Lkw nur dann in der Nebenspur befinden, wenn sie einen Lkw in der Hauptspur überholen. Die Überholwahrscheinlichkeit eines Lkw ergibt sich dadurch allein aus der Spurbelegung der Lkw (wie z.B.: 85% Hauptspur, 15% Nebenspur) zu $0,15 / 0,85 = 0,176$. Zum Zeitpunkt der Brückenüberquerung kann sich ein Lkw irgendwo zwischen Anfang und Ende seines Überholvorganges befinden. Die möglichen Stellungen veranschaulicht Abbildung 3.5.

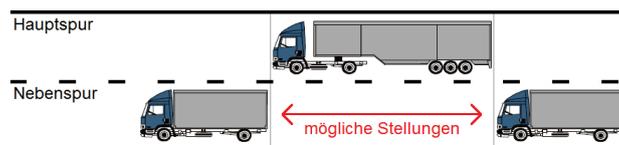


Abbildung 3.5: Mögliche Stellungen eines überholenden Lkw

Bezüglich einer extremen Laststellung ist entscheidend, wie oft sich die Lkw beider Fahrstreifen gleichzeitig in ungünstigster Stellung befinden. Da dies nur sehr selten der Fall ist, muss

eine gewisse Unschärfe mit einbezogen werden, die durch die grünen Bereiche in Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 dargestellt wird. Zur Definition des Unschärfebereichs wird angenommen, dass eine zulässige Stellung des überholenden Lkws vorherrscht, solange sich die Beanspruchung der Laststellung (unter Annahme konstanter Gesamtgewichte) um nicht mehr als 10% reduziert. Je kleiner der Einfluss des überholenden Lkws auf die gesamte Beanspruchung ist, desto größer wird der Unschärfebereich. Von allen überholenden Lkw verbleiben dadurch nur die relevanten Fälle, zu denen beispielsweise nur solche in vorderster oder hinterster Stellung zählen. Entsprechend wird die Überholwahrscheinlichkeit (0,15 / 0,85) über einen Faktor (z.B. 1/4) reduziert, vgl. die roten Kennzeichnungen in Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass ein überholender Lkw nicht nur einem, sondern mehreren Lkw der Hauptspur zugeordnet werden kann. Da für jeden Lkw der Hauptspur dieselbe Wahrscheinlichkeit herrscht, überholt zu werden, erhöht sich dadurch die Häufigkeit einer solchen Laststellung. Basierend auf diesen Grundlagen lassen sich die mittleren Häufigkeiten der folgenden Laststellungen ermitteln:

$$n \approx \underbrace{0,59^3 \cdot \text{Stauanteil} \cdot \text{DTV-SV}}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \overbrace{0,85}^{\text{Spurbelegung}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,59}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \quad (3.13)$$

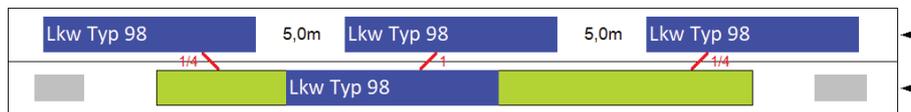


Abbildung 3.6: Mehrspuriger Richtungsverkehr, Stau in der Hauptspur, 1 Lkw in der Nebenspur

$$n \approx \underbrace{0,59^3 \cdot \text{Stauanteil} \cdot \text{DTV-SV}}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \overbrace{0,85}^{\text{Spurbelegung}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,59}_{\text{1. Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,59}_{\text{2. Lkw der Nebenspur}} \quad (3.14)$$

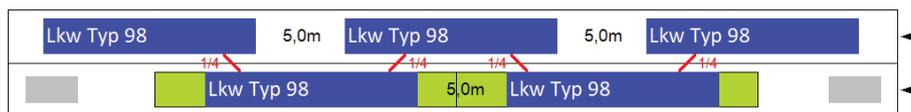


Abbildung 3.7: Mehrspuriger Richtungsverkehr, Stau in der Hauptspur, 2 Lkw in der Nebenspur

Die Lkw der Nebenspur werden in dieser Betrachtung den Lkw der Hauptspur zugeordnet, d.h. die Häufigkeit der gesamten Laststellung ergibt sich aus der Häufigkeit der Laststellung der Hauptspur unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit für überholende Lkw. Da sich in der

Hauptspur je nach Spurbelegung z.B. nur 85% der Lkw befinden, ist die Häufigkeit entsprechend zu korrigieren ($DTV-SV \cdot 0,85$).

Die im Abschnitt 3.1.3.1 eingeführte Regel zur Berücksichtigung unterschiedlicher Reihenfolgen der Lkw ist hier analog anzuwenden.

3.1.3.3 Einspuriger Begegnungsverkehr

Für die mittlere Häufigkeit einer extremen Laststellung des Begegnungsverkehrs ist entscheidend, wie oft sich die Lkw beider Fahrstreifen gleichzeitig in ungünstigster Stellung begegnen. Da dies für beide Spuren jeweils nur für einen sehr kurzen Zeitraum der Fall ist, wäre die Wahrscheinlichkeit einer Überschneidung beider Ereignisse äußerst gering. Wie auch im mehrspurigen Richtungsverkehr muss daher eine gewisse Unschärfe mit einbezogen werden. Diese lässt sich rechnerisch erfassen, wenn die zulässige Lage einer extremen Laststellung um einen Bereich ΔL erweitert wird, vgl. Abbildung 3.8. Die Definition des Unschärfebereichs erfolgt analog zum mehrspurigen Richtungsverkehr (Reduzierung der Beanspruchung um maximal 10%).



Abbildung 3.8: Einspuriger Begegnungsverkehr, zulässige Lage der extremen Laststellung

Zu beachten ist im Folgenden der Unterschied zwischen Häufigkeit n und Wahrscheinlichkeit p einzelner extremer Laststellungen:

- n_1 : Häufigkeit dafür, dass ein Lkw der Spur 1 im zulässigen Bereich steht
- p_2 : Wahrscheinlichkeit, dass ein Lkw der Spur 2 im zulässigen Bereich steht
- $p_1 \cdot p_2$: Wahrscheinlichkeit, dass gleichzeitig die Lkw der Spuren 1 und 2 im zulässigen Bereich stehen

Eine extreme Laststellung liegt vor, wenn ein Lkw der Spur 1 exakt in ungünstigster Stellung steht und sich gleichzeitig ein Lkw der Spur 2 innerhalb des zulässigen Bereichs befindet. Hinzu kommt der umgekehrte Fall mit einem Lkw der Spur 2 in exakt ungünstigster Stellung und einem Lkw der Spur 1 innerhalb des zulässigen Bereichs. Die mittlere Häufigkeit einer extremen Laststellung des Begegnungsverkehrs ergibt sich entsprechend aus:

$$n = n_1 \cdot p_2 + n_2 \cdot p_1 \quad (3.15)$$

Die Häufigkeiten n_1 und n_2 ergeben sich aus den Rechenregeln des ein- und mehrspurigen Richtungsverkehrs in den Abschnitten 3.1.3.1 und 3.1.3.2. Die Wahrscheinlichkeiten p_1 und p_2 lassen sich aus der Dauer pro Tag ableiten, wie lange sich Lkw im zulässigen Bereich befinden. Die mittlere Dauer $\Delta\bar{t}$ einer einzelnen Durchfahrt lässt sich aus der Länge des zulässigen Bereichs ΔL und einer mittleren Geschwindigkeit \bar{v} errechnen. Die Anzahl der Durchfahrten pro Tag entspricht wiederum der Häufigkeit n_1 bzw. n_2 . Damit gilt:

$$p_1 = \frac{n_1 \cdot \Delta\bar{t}_1}{24h} \quad \text{bzw.} \quad p_2 = \frac{n_2 \cdot \Delta\bar{t}_2}{24h} \quad (3.16)$$

$$\Delta\bar{t} = \frac{\Delta L}{\bar{v}} \quad (3.17)$$

Insgesamt ergibt sich damit die mittlere Häufigkeit einer extremen Laststellung des Begegnungsverkehrs pro Tag wie folgt:

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\Delta\bar{t}_1}{24h} + \frac{\Delta\bar{t}_2}{24h} \right) \quad (3.18)$$

Die Lösung lässt sich auf Laststellungen mit Stau analog anwenden, da auch hier die ungünstigste Stellung um einen zulässigen Bereich ΔL erweitert werden kann.

Zur Bestimmung der Häufigkeit extremer Laststellungen des Begegnungsverkehrs werden für die weiteren Ausarbeitungen folgende Annahmen getroffen:

1. Die zulässige Lage einer extremen Laststellung ist allgemein abhängig von der Längseinfluss- und Querverteilungslinie, dem Schwingbeiwert sowie der Anzahl betrachteter Lkw. Ausgehend von der Überfahrt einzelner Lkw wird dies mit $\Delta L \approx L/5$ vereinfacht, vgl. Abbildung 3.9.

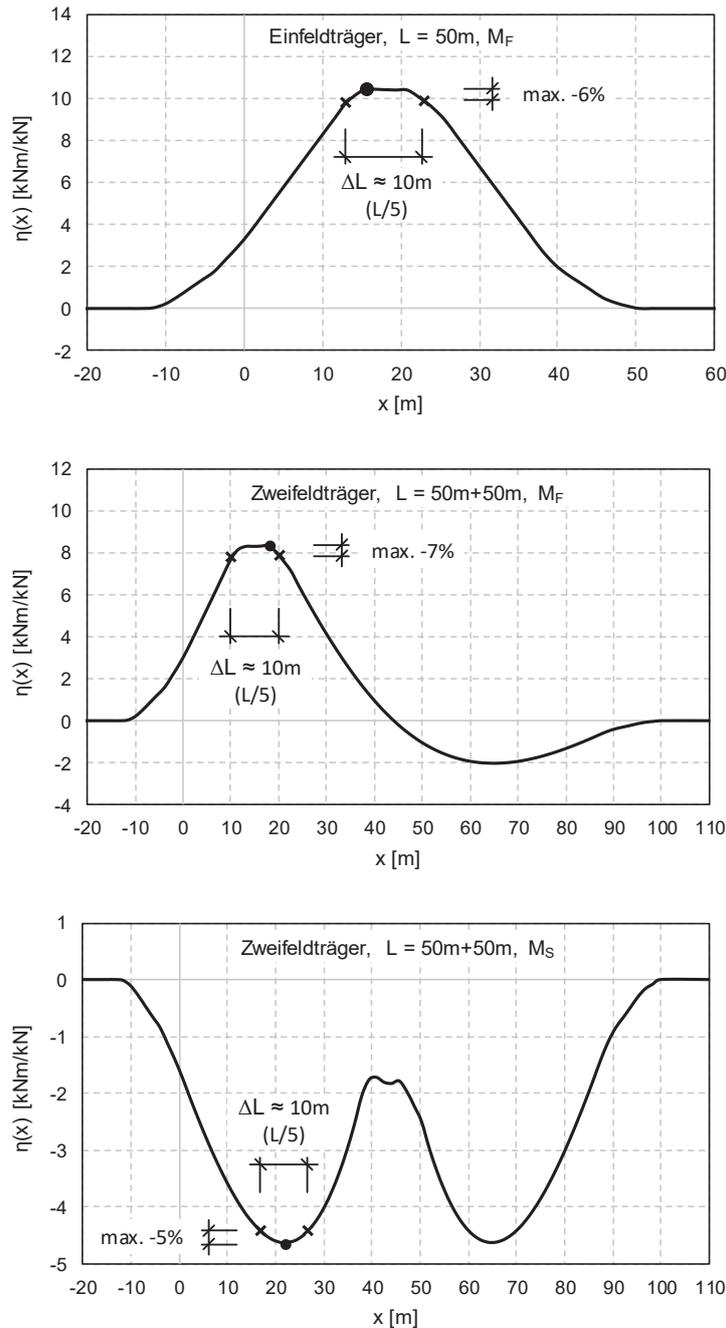


Abbildung 3.9: Einflusslinien $\eta(x)$ infolge der Überfahrt eines Lkw Typ 98 mit dem Bereich kleiner Abweichung von der ungünstigsten Laststellung ΔL

- Die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge wird mit $\bar{v} = 80 \text{ km/h}$ im fließenden Verkehr und $\bar{v} = 1 \text{ km/h}$ im Stau angenommen. Bei einer Spannweite von $L = 50 \text{ m}$ resultiert daraus eine mittlere Verweildauer in der zulässigen Lage von $\Delta \bar{t}_{\text{fließ}} = 0,45 \text{ s}$ bzw. $\Delta \bar{t}_{\text{stau}} = 36 \text{ s}$.

Mit den hier getroffenen Annahmen wird in den Vergleichen zwischen Simulation und analytischer Rechnung (siehe Abschnitt 3.2) eine gute Übereinstimmung erzielt. Die Vereinfachungen erweisen sich damit als geeignet.

Basierend auf den oben genannten Grundlagen lassen sich die mittleren Häufigkeiten der folgenden Laststellungen ermitteln:

$$n \approx \underbrace{\left(\frac{DTV-SV}{DTV} \cdot 0,59 \cdot (1 - \text{Stauanteil}) \cdot DTV \right)^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \cdot 2 \quad (3.19)$$

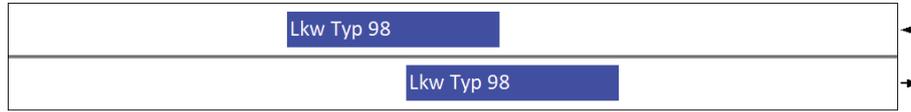


Abbildung 3.10: Einspuriger Begegnungsverkehr, fließender Verkehr in beiden Richtungen

$$n \approx \underbrace{\left(\frac{DTV-SV}{DTV} \cdot 0,59 \right)^3}_{n_1} \cdot \text{Stauanteil} \cdot DTV \cdot \underbrace{\frac{DTV-SV}{DTV} \cdot 0,59 \cdot (1 - \text{Stauanteil}) \cdot DTV}_{n_2} \cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \quad (3.20)$$

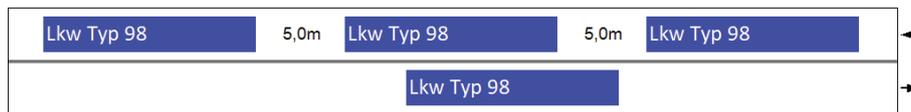


Abbildung 3.11: Einspuriger Begegnungsverkehr, Kombination aus fließendem Verkehr und Stau

$$n \approx \underbrace{\left(\left(\frac{DTV-SV}{DTV} \cdot 0,59 \right)^3 \cdot \text{Stauanteil} \cdot DTV \right)^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} \cdot 2 \quad (3.21)$$

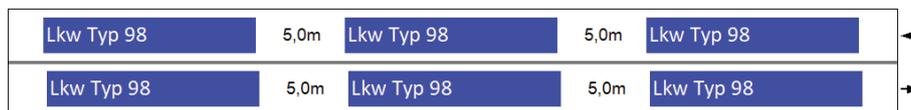


Abbildung 3.12: Einspuriger Begegnungsverkehr, Stau in beiden Richtungen

Durch eine Modifikation des Simulationsprogramms PATLoB konnten die Häufigkeiten dieser Laststellungen auch numerisch bestimmt und damit der hier beschriebene analytische Ansatz bestätigt werden. Ein Vergleich mit dem Lösungsansatz in [FrBö11a] zeigt im Allgemeinen eine sehr große Ähnlichkeit. Als Beispiel wird darin für einen Straßenquerschnitt mit einem Fahrstreifen je Richtung, $DTV-SV = 10.000$ je Richtung (ohne Stauanteil sowie ohne Pkw), 59% Lkw Typ 98, einer mittleren Geschwindigkeit von $\bar{v} = 80 \text{ km/h}$ und einem maximalen Versatz von $\Delta L = 1 \text{ m}$ eine tägliche Begegnungshäufigkeit der Lkw Typ 98 von $n \approx 18$ errechnet. Nach dem hier beschriebenen Ansatz beträgt die Begegnungshäufigkeit $n \approx 36$. Diese Abweichung um den Faktor 2 resultiert aus dem zweiten Term der oben beschriebenen Lösung, vgl. Gleichung (3.15), bzw. aus den unterschiedlichen Definitionen einer Begegnung (Lkw beider Richtungen gleichzeitig im zulässigen Bereich / Lkw einer Richtung in exakt ungünstigster

Lage und gleichzeitig Lkw der anderen Richtung im zulässigen Bereich). Die späteren Auswertungen im Abschnitt 3.3.2 zeigen jedoch, dass daraus nur marginale Abweichungen im Ergebnis resultieren.

3.1.3.4 Mehrspuriger Begegnungsverkehr

Die Bestimmung der mittleren Häufigkeit einer extremen Laststellung im mehrspurigen Begegnungsverkehr stellt im Wesentlichen eine Kombination der vorangegangenen Rechenregeln dar. Zur Veranschaulichung werden ausgewählte Beispiele im Folgenden detaillierter betrachtet.

$$n \approx \left[\underbrace{0,59^3 \cdot \text{Stauanteil} \cdot DTV-SV \cdot \overbrace{0,85}^{\text{Spurbelegung}}}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,59}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \right]^2 \cdot \frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} \cdot 2 \quad (3.22)$$

$n_1 \cdot n_2$

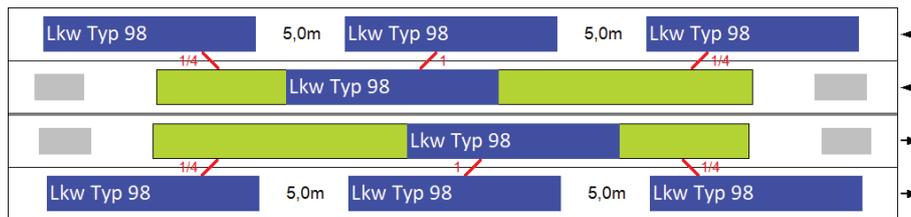


Abbildung 3.13: Mehrspuriger Begegnungsverkehr, Stau in beiden Richtungen

$$n \approx \left[\underbrace{0,59^3 \cdot \text{Stauanteil} \cdot DTV-SV \cdot \overbrace{0,85}^{\text{Spurbelegung}}}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,59}_{\text{1. \& 2. Lkw der Nebenspur}} \right]^2 \cdot \left[\underbrace{0,17 \cdot (1 - \text{Stauanteil}) \cdot DTV-SV \cdot 0,85}_{\substack{\text{Lkw der Hauptspur} \\ \text{(Häufigkeit des Lkw Typ 41 = 17\%)}} \cdot \underbrace{\frac{3}{4} \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,59}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\text{zwei mögliche Reihenfolgen}} \right] \cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \quad (3.23)$$

n_1 n_2

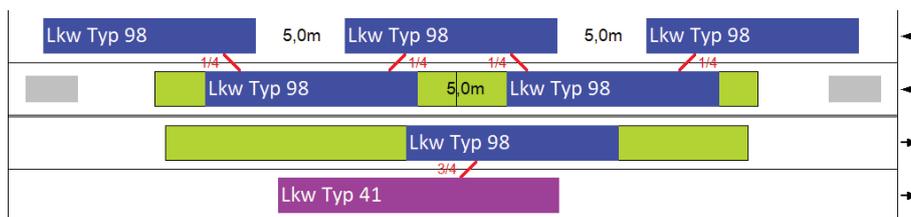


Abbildung 3.14: Mehrspuriger Begegnungsverkehr, Kombination aus fließendem Verkehr und Stau

3.1.4 Ermittlung der Extremwerte der Verkehrsbeanspruchung

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.1.1 bis 3.1.3 genannten Grundlagen lässt sich schließlich die Extremwertverteilung der Verkehrsbeanspruchung $F_{max}(M)$ für beliebige Bezugszeiträume formulieren, indem die maßgebenden extremen Laststellungen k ausgewertet werden, vgl. Gleichung (3.24). Die Häufigkeiten n_k sind auf den gewählten Bezugszeitraum zu beziehen.

$$F_{max}(M) = \prod_k F_k(M)^{n_k} = F_1(M)^{n_1} \cdot F_2(M)^{n_2} \cdot F_3(M)^{n_3} \cdot \dots \quad (3.24)$$

Der gesuchte charakteristische Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren ist als 99,9%-Quantil in einem Bezugszeitraum von einem Jahr (Jahres-Extrema) definiert. Für andere Bezugszeiträume lässt sich das Quantil q nach Gleichung (2.29) umrechnen. Die resultierende Gleichung lässt sich durch Iteration besonders effizient lösen:

$$F_{max}(M) = q \quad \rightarrow \quad M_k \quad (3.25)$$

3.1.5 Beispiel

Die analytische Lösung wird im Folgenden beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit einer Spannweite von $L = 50 \text{ m}$ und einer Richtungsfahrbahn dargestellt. Das betrachtete Fahrzeugkollektiv ist weitgehend identisch zum „Langstreckenverkehr“ in Tabelle A.1 (Anhang A), jedoch unter Vernachlässigung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs. Der Lkw Typ 98 tritt dabei zu 59% auf und besitzt ein doppelnormalverteiltes Gesamtgewicht mit $\mu_1 = 259,6 \text{ kN}$; $\sigma_1 = 92 \text{ kN}$; $\mu_2 = 405,3 \text{ kN}$; $\sigma_2 = 24,8 \text{ kN}$; $\alpha = 0,62$; $\beta = 0,38$. Abbildung 3.15 zeigt schematisch die hier maßgebende extreme Laststellung.

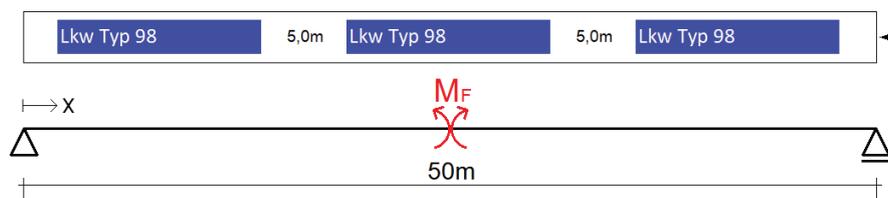


Abbildung 3.15: Maßgebende extreme Laststellung
(Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, einspuriger Verkehr, ohne genehmigungspflichtigen Schwerverkehr)

Der funktionale Zusammenhang für das Feldmoment infolge dieser Laststellung ergibt sich zu:

$$M = (P_{Lkw\ 1} \cdot 2,736 + P_{Lkw\ 2} \cdot 10,408 + P_{Lkw\ 3} \cdot 5,457) \cdot \overset{\varphi}{1,0} \quad (3.26)$$

Da die Laststellung aus drei Lkw mit einem jeweils doppelnormalverteilten Gesamtgewicht besteht, ist das resultierende Moment 8-modal verteilt. Die Mittelwerte $\mu_{M,i}$, Standardabweichungen $\sigma_{M,i}$ und Wichtungen $\alpha_{M,i}$ für $i = 1 \dots 8$ ergeben sich wie folgt:

$$\mu_M = \begin{pmatrix} \mu_{M,1} \\ \mu_{M,2} \\ \mu_{M,3} \\ \mu_{M,4} \\ \mu_{M,5} \\ \mu_{M,6} \\ \mu_{M,7} \\ \mu_{M,8} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_1 & \mu_1 & \mu_1 \\ \mu_1 & \mu_1 & \mu_2 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_1 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_2 \\ \mu_2 & \mu_1 & \mu_1 \\ \mu_2 & \mu_1 & \mu_2 \\ \mu_2 & \mu_2 & \mu_1 \\ \mu_2 & \mu_2 & \mu_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2,736 \\ 10,408 \\ 5,457 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.829 \\ 5.624 \\ 6.345 \\ 7.140 \\ 5.227 \\ 6.023 \\ 6.744 \\ 7.539 \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

Kombinationsmatrix

$$\sigma_M = \sqrt{\begin{pmatrix} \sigma_1 & \sigma_1 & \sigma_1 \\ \sigma_1 & \sigma_1 & \sigma_2 \\ \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_1 \\ \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_2 \\ \sigma_2 & \sigma_1 & \sigma_1 \\ \sigma_2 & \sigma_1 & \sigma_2 \\ \sigma_2 & \sigma_2 & \sigma_1 \\ \sigma_2 & \sigma_2 & \sigma_2 \end{pmatrix}^2 \cdot \begin{pmatrix} 2,736 \\ 10,408 \\ 5,457 \end{pmatrix}^2} = \begin{pmatrix} 1.110 \\ 999 \\ 618 \\ 385 \\ 1.083 \\ 969 \\ 569 \\ 299 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

$$\alpha_M = \begin{pmatrix} \alpha \cdot \alpha \cdot \alpha \\ \alpha \cdot \alpha \cdot \beta \\ \alpha \cdot \beta \cdot \alpha \\ \alpha \cdot \beta \cdot \beta \\ \beta \cdot \alpha \cdot \alpha \\ \beta \cdot \alpha \cdot \beta \\ \beta \cdot \beta \cdot \alpha \\ \beta \cdot \beta \cdot \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,238 \\ 0,146 \\ 0,146 \\ 0,090 \\ 0,146 \\ 0,090 \\ 0,090 \\ 0,055 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Die Verteilungsfunktion $F(M)$ des Momentes M dieser Laststellung ergibt sich zu:

$$F(M) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{M,i} \cdot \Phi(M, \mu_{M,i}, \sigma_{M,i}) \quad (3.30)$$

mit:
$$\Phi(x, \mu, \sigma) = \int_{-\infty}^x \varphi(x, \mu, \sigma) dx = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Die mittlere Häufigkeit n der Laststellung in einem Bezugszeitraum von 100 Jahren berechnet sich analog zu Gleichung (3.11). Der Stauanteil wird mit ca. 10% angenommen, die Verkehrsstärke mit $DTV-SV = 10.000$ und $DTV = 30.000$.

$$n \approx \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,59\right)^3 \cdot \underbrace{0,1}_{\text{stauanteil}} \cdot \frac{30.000}{DTV} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} \quad (3.31)$$

$$= 570.497$$

Die Verteilung der Extrema $F_{max}(M)$ im Bezugszeitraum von 100 Jahren (100-Jahres-Extrema) ergibt sich durch Potenzieren der Verteilungsfunktion $F(M)$ mit der Häufigkeit n , vgl. Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17. Der gesuchte charakteristische Wert mit einer mittleren

Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren entspricht dem 90,5%-Quantil der 100-Jahres-Extrema. Die resultierende Gleichung wird wiederum durch Iteration gelöst:

$$F_{max}(M) = F(M)^n = 0,905 \quad \rightarrow \quad M_k = 10.651 \text{ kNm} \quad (3.32)$$

Die Langzeit-Monte-Carlo-Simulation liefert zum Vergleich einen charakteristischen Wert von 10.773 kNm, d.h. eine Abweichung von ca. 1%.

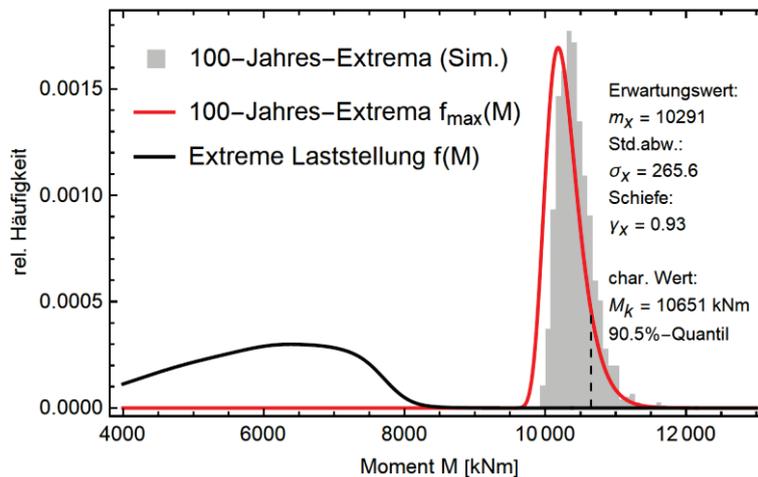


Abbildung 3.16: Grafische Darstellung der Verteilungsdichte der Beanspruchung $f(M)$ und 100-Jahres-Extrema $f_{max}(M)$

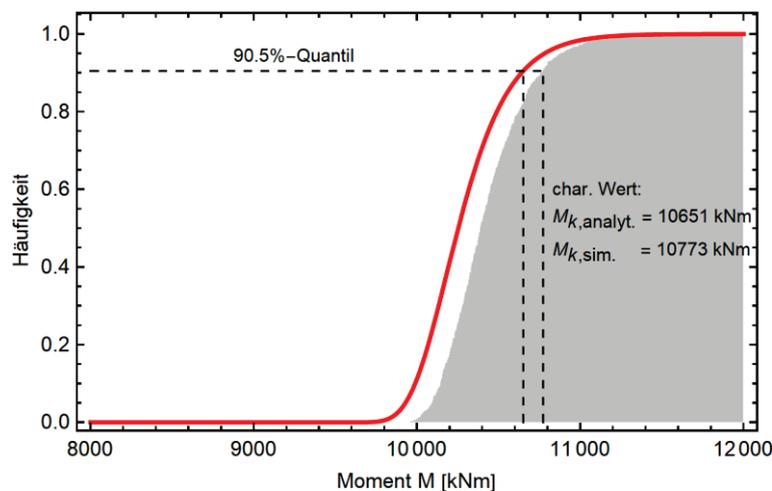


Abbildung 3.17: Grafische Darstellung der Verteilung der 100-Jahres-Extrema $F_{max}(M)$

Der Vergleich zwischen analytischer Lösung und Langzeit-Monte-Carlo-Simulation in Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17 zeigt, dass bereits allein durch Betrachtung der maßgebenden extremen Laststellung eine gute Annäherung im Endbereich der Extremwertverteilung zu erreichen ist. Je mehr extreme Laststellungen mit einbezogen werden, desto exakter wird auch die Annäherung in den restlichen Bereichen. Hinsichtlich der charakteristischen Werte, die stets im Endbereich liegen, bedeutet dies eine enorme Vereinfachung. Die folgenden Abschnitte bestätigen diesbezüglich, dass eine ausreichende Genauigkeit des charakteristischen Wertes erreicht wird, wenn ausschließlich die maßgebende extreme Laststellung betrachtet wird.

3.2 Verifizierung des Rechenmodells

Zur Verifizierung des Rechenmodells werden Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen der Verkehrsbeanspruchung mit Hilfe des Simulationsprogramms PATLoB durchgeführt und deren Ergebnis mit der analytischen Lösung verglichen. Als Vergleichsgrundlage dienen charakteristische Werte M_k mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren.

3.2.1 Definition des Untersuchungsumfangs

Die Verifizierung erfolgt anhand eines Katalogs ausgewählter Brückentypen. Es werden Einfeldträger hinsichtlich ihres Feld- und Zweifeldträger hinsichtlich ihres Stützmomentes bei unterschiedlichen Spannweiten betrachtet, vgl. Tabelle 3.1. Je System wird zusätzlich eine unterschiedliche Anzahl und Anordnung der Fahrstreifen untersucht, vgl. Anhang B. Zur Beschreibung der statischen Systeme werden aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit vereinfachte Längseinfluss- und Querverteilungslinien verwendet.

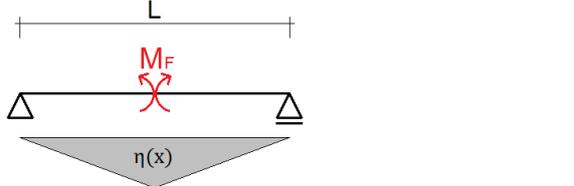
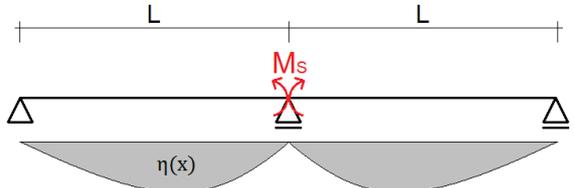
Einfeldträger M_F		$L = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ m}$
Zweifeldträger M_S		$L = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ m}, (70 \text{ m})$

Tabelle 3.1: Untersuchungsumfang der statischen Systeme und betrachteten Schnittgrößen

Die betrachteten Fahrzeugkollektive „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ und „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“ werden in Anhang A detailliert dargestellt. Für Ersteres wird pro Richtung eine Verkehrsstärke von $DTV = 30.000$ und $DTV-SV = 10.000$ angenommen, bei Zweiterem $DTV = 10.000$ und $DTV-SV = 500$. In den Beispielen werden weiterhin, basierend auf den Erkenntnissen in Abschnitt 2.1, ein Stauanteil von 10%, Fahrzeugabstände im Stau von konstant 5,0 m, Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr entsprechend einer 3-parametrischen Log-Normalverteilung nach Abschnitt 2.1.2.3.1 bzw. Gleichung (2.2) bis (2.5) und ein Anteil der einzelnen Spuren am gesamten Schwerverkehr bei 2-spurigem Richtungsverkehr von $HS/NS = 85\%/15\%$ bzw. bei 3-spurigem Richtungsverkehr von $HS/NS_1/NS_2 = 80\%/19\%/1\%$ angesetzt. Der Schwingbeiwert für Lkw im fließenden Verkehr wird vereinfachend konstant mit $\varphi = 1,1$ angenommen, wobei anzumerken ist, dass hierfür auch genauere Modelle

existieren, vgl. Abschnitt 2.1.2.7, die bei Laststellungen mit wenigen Lkw bzw. kurzen Spannweiten zu teilweise deutlich größeren Werten führen.

3.2.2 Referenzergebnisse aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen

Zur Verifizierung des Rechenmodells sind geeignete Referenzergebnisse notwendig, deren Unsicherheiten möglichst gering sind. Diese lassen sich zunächst folgendermaßen kategorisieren:

- Unsicherheiten bzgl. der Eingangsparameter (Verkehrsprognosen)
- Unsicherheiten bzgl. der Abbildung des Verkehrs
- Unsicherheiten bzgl. der Extremwertanalyse

Analytische Lösung und Verkehrslastsimulation basieren hier zur Verifizierung auf identischen Eingangsparametern. Die Abbildung des Verkehrs entspricht einer Interpretation der Eingangsparameter und folgt in beiden Ansätzen dem gleichen Muster. In den Referenzergebnissen sind daher in erster Linie die Unsicherheiten der Extremwertanalyse zu minimieren. Dazu wird in den folgenden Abschnitten 3.2.2.1 und 3.2.2.2 eine erforderliche Simulationslänge definiert.

Einer Berechnung wird üblicherweise ein Zukunftsszenario des Verkehrs zugrunde gelegt, wobei unterschiedliche Verkehrsprognosen in separaten Rechnungen analysiert werden. Ein kontinuierlicher Anstieg vom heutigen zum zukünftigen Verkehr wird nicht berücksichtigt, d.h. es wird je Rechnung davon ausgegangen, dass ein gleichbleibender zukünftiger Verkehr herrscht. Unabhängig von der Simulationslänge wird daher der Verkehr eines Jahres (bzw. eines Tages) stets mit zufälligen Werten neu simuliert. Für die hier angestrebte Verifizierung kann infolgedessen von einem rein mathematischen Problem ausgegangen werden, für das eine exakte Lösung existiert. Anzumerken ist jedoch, dass bei der praktischen Anwendung die oben aufgelisteten Unsicherheiten kumulativ wirken.

3.2.2.1 Konvergenz und Streuung als Kriterium der erforderlichen Simulationslänge

Die erforderliche Simulationslänge ergibt sich einerseits aus der Konvergenz der charakteristischen Werte. Im Folgenden werden dazu ausgewählte Systeme und Schwerverkehrsszenarien betrachtet. Die angesetzten Parameter sind, abgesehen von den Fahrzeugkollektiven, identisch zu Abschnitt 3.2.1. Die betrachteten Fahrzeugkollektive „Schwerverkehrsvariante 1“ und „Schwerverkehrsvariante 2“ können Anhang A entnommen werden. Je Beispiel werden für verschiedene Simulationslängen jeweils 20 voneinander unabhängige Rechenläufe durchgeführt. Die Extremwertanalyse erfolgt mit Hilfe der „Peak-over-Threshold“-Methode, vgl. Abschnitt 2.2.3.2. Die Streuungen der im Ergebnis vorliegenden charakteristischen Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren zeigen die folgenden Abbildungen:

3 Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung

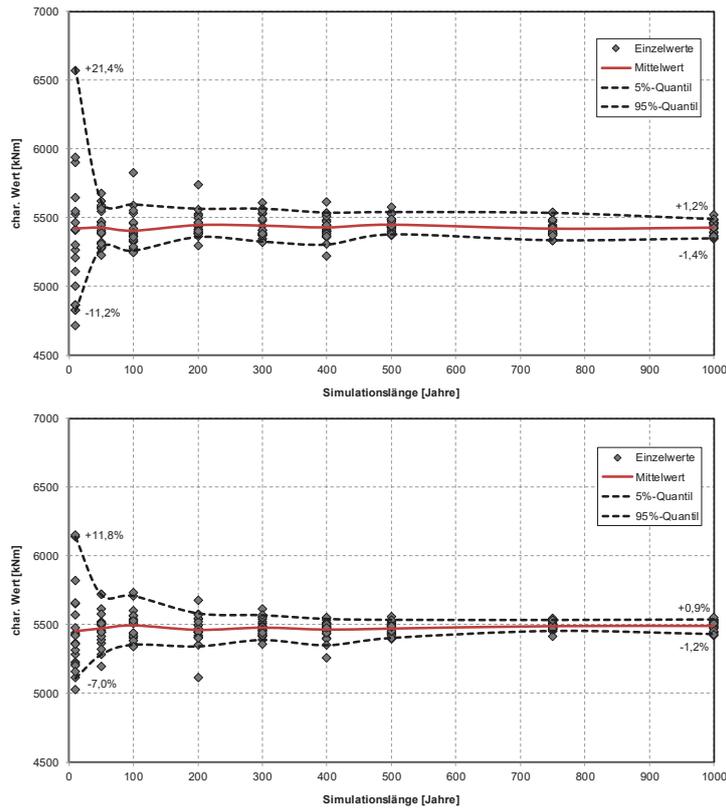


Abbildung 3.18: Konvergenz des charakteristischen Wertes am Beispiel eines Einfeldträgers, $L = 20\text{ m}$, Einflusslinie für Feldmoment, 2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Schwerverkehrsvariante 1 (oben) und 2 (unten)

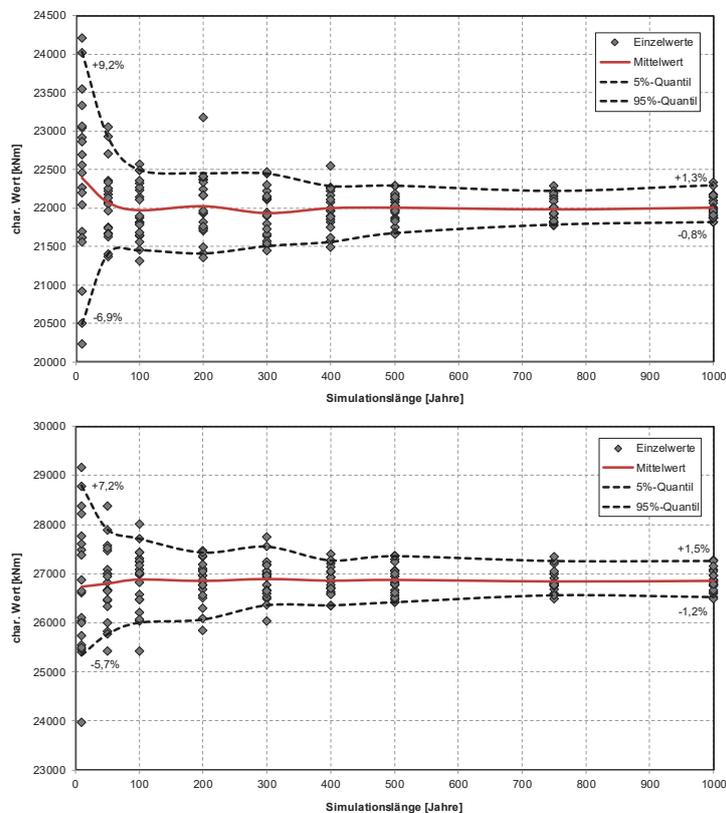


Abbildung 3.19: Konvergenz des charakteristischen Wertes am Beispiel eines Zweifeldträgers, $L = 70\text{ m} + 70\text{ m}$, Einflusslinie für Stützmoment, 2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Schwerverkehrsvariante 1 (oben) und 2 (unten)

Es zeigt sich, dass die Streuung ab einer Simulationslänge von 100 x 1 Jahr deutlich zurück geht. Ab einer Simulationslänge von 500 x 1 Jahr liegt die Streuung in einem vernachlässigbaren Bereich von ca. $\pm 1,5\%$.

3.2.2.2 Konfidenzintervall als Kriterium der erforderlichen Simulationslänge

Neben der Konvergenz ist auch das Konfidenzintervall des charakteristischen Wertes als Kriterium für eine ausreichende Simulationslänge zu betrachten. Aus der Statistik sind beispielsweise 95%-Konfidenzintervalle für extrem liegende Quantile bekannt. Diese lassen sich über die Verteilungsfunktion der Binomialverteilung ermitteln, indem folgende Ungleichungen iterativ gelöst werden, vgl. [HeSa12].

$$Bi(u - 1, n, q) - Bi(l - 1, n, q) \geq 0,95 \quad (3.33)$$

$$0 < l < u \leq n \quad (3.34)$$

- mit:
- q : Quantil ($0 < q < 1$)
 - n : Anzahl der Beobachtungen
 - u : ganzzahliger Index des Stichprobenwertes für die obere Intervallgrenze
 - l : ganzzahliger Index des Stichprobenwertes für die untere Intervallgrenze

Die gesuchten ganzzahligen Indexwerte u und l der Intervallgrenzen werden zunächst ausgehend vom Wert $(n + 1) \cdot q$ ab- ($\lfloor \dots \rfloor$) bzw. aufgerundet ($\lceil \dots \rceil$) und anschließend schrittweise um das gleiche Maß $j = 1, 2, 3, \dots$ erniedrigt bzw. erhöht bis die oben genannten Bedingungen erfüllt sind, d.h.:

$$u = \lceil (n + 1) \cdot q \rceil + j \quad (3.35)$$

$$l = \lfloor (n + 1) \cdot q \rfloor - j \quad (3.36)$$

Bei einer zu geringen Anzahl an Beobachtungen n lässt sich kein Konfidenzintervall ermitteln, da der Index für die obere Intervallgrenze außerhalb des Bereichs der vorhandenen Beobachtungen liegen würde ($u > n$). Daraus lässt sich eine mindestens erforderliche Simulationslänge ableiten, um statistisch abgesicherte Aussagen zur Qualität des charakteristischen Wertes und damit der hier gesuchten Referenzwerte treffen zu können. Für charakteristische Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren ergeben sich die in Tabelle 3.2 ermittelten Grenzen.

	Quantil q	Erforderliche Simulationslänge (Anzahl an Beobachtungen n)	
		90%-Konfidenzintervall	95%-Konfidenzintervall
Jahres-Extrema	0,999	4.000 x 1 Jahr ($l = 3.993, u = 4.000$)	5.000 x 1 Jahr ($l = 4.991, u = 5.000$)
Tages-Extrema	0,999995998007	1.000.000 x 1 Tag ($l = 999.993, u = 1.000.000$)	1.250.000 x 1 Tag ($l = 1.249.991, u = 1.250.000$)

Tabelle 3.2: Erforderliche Simulationslänge zur Ermittlung eines Konfidenzintervalls für charakteristische Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren

3.2.2.3 Referenzergebnisse

Die Referenzergebnisse der Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen werden in den folgenden Tabellen dargestellt. Ergänzende Angaben können Anhang D entnommen werden. Den Ergebnissen liegt jeweils eine Simulationslänge von 100.000 x 1 Jahr zugrunde und damit deutlich mehr als die in den vorangegangenen Abschnitten definierte mindestens erforderliche Simulationslänge. Die charakteristischen Werte können daher direkt anhand der aufgezeichneten Histogramme ermittelt werden.

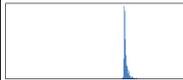
Fahrstreifenanordnung	Einfeldträger, M_{Feld}				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\mu = 1.177 \text{ kNm}$ $\sigma = 7,5 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0064$ $\gamma = -0,148$ $M_k = 1.188 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,08 \%$	 $\mu = 3.253 \text{ kNm}$ $\sigma = 18,6 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0057$ $\gamma = -0,035$ $M_k = 3.280 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,06 \%$	 $\mu = 5.325 \text{ kNm}$ $\sigma = 131,8 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0248$ $\gamma = 1,565$ $M_k = 5.537 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,58 \%$	 $\mu = 7.836 \text{ kNm}$ $\sigma = 264,9 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0338$ $\gamma = 1,304$ $M_k = 8.215 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,54 \%$	 $\mu = 10.581 \text{ kNm}$ $\sigma = 395,5 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0374$ $\gamma = 0,924$ $M_k = 11.130 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,58 \%$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\mu = 1.183 \text{ kNm}$ $\sigma = 9,7 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0082$ $\gamma = 1,37$ $M_k = 1.195 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,08 \%$	 $\mu = 3.269 \text{ kNm}$ $\sigma = 26 \text{ kNm}$ $\nu = 0,008$ $\gamma = 1,609$ $M_k = 3.298 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,17 \%$	 $\mu = 5.266 \text{ kNm}$ $\sigma = 87,3 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0166$ $\gamma = 2,197$ $M_k = 5.380 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,39 \%$	 $\mu = 7.703 \text{ kNm}$ $\sigma = 260,2 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0338$ $\gamma = 1,541$ $M_k = 8.098 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,57 \%$	 $\mu = 10.458 \text{ kNm}$ $\sigma = 376,8 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0360$ $\gamma = 0,902$ $M_k = 11.020 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,55 \%$
3 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\mu = 1.492 \text{ kNm}$ $\sigma = 31,8 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0213$ $\gamma = 1,24$ $M_k = 1.532 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,46 \%$	 $\mu = 4.130 \text{ kNm}$ $\sigma = 92,5 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0224$ $\gamma = 1,214$ $M_k = 4.255 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,55 \%$	 $\mu = 6.741 \text{ kNm}$ $\sigma = 172,9 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0256$ $\gamma = 1,227$ $M_k = 6.999 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,56 \%$	 $\mu = 9.340 \text{ kNm}$ $\sigma = 280,9 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0301$ $\gamma = 0,929$ $M_k = 9.766 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,38 \%$	 $\mu = 12.362 \text{ kNm}$ $\sigma = 416,3 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0337$ $\gamma = 0,936$ $M_k = 12.910 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,49 \%$
2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\mu = 1.595 \text{ kNm}$ $\sigma = 40,8 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0256$ $\gamma = 1,243$ $M_k = 1.643 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,4 \%$	 $\mu = 4.499 \text{ kNm}$ $\sigma = 115,3 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0256$ $\gamma = 1,483$ $M_k = 4.631 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,36 \%$	 $\mu = 7.444 \text{ kNm}$ $\sigma = 195,8 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0263$ $\gamma = 1,25$ $M_k = 7.679 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,42 \%$	 $\mu = 10.532 \text{ kNm}$ $\sigma = 321,7 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0305$ $\gamma = 1,163$ $M_k = 10.968 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,3 \%$	 $\mu = 14.228 \text{ kNm}$ $\sigma = 470,2 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0331$ $\gamma = 0,921$ $M_k = 14.869 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,54 \%$

Tabelle 3.3: Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient ν und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“

3 Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung

Fahrstreifen-anordnung	Zweifeldträger, $M_{Stütz}$				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 40 m	2 x 50 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\mu = 750 \text{ kNm}$ $\sigma = 20,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0271$ $\gamma = 0,353$ $M_k = 778 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,39 \%$	 $\mu = 2.058 \text{ kNm}$ $\sigma = 71,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0346$ $\gamma = 1,002$ $M_k = 2.153 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,63 \%$	 $\mu = 3.733 \text{ kNm}$ $\sigma = 135,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0363$ $\gamma = 0,893$ $M_k = 3.920 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,42 \%$	 $\mu = 5.649 \text{ kNm}$ $\sigma = 196,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0347$ $\gamma = 0,627$ $M_k = 5.928 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,41 \%$	 $\mu = 8.090 \text{ kNm}$ $\sigma = 253,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0314$ $\gamma = 0,975$ $M_k = 8.416 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,41 \%$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\mu = 734 \text{ kNm}$ $\sigma = 18,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0257$ $\gamma = 0,403$ $M_k = 759 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,26 \%$	 $\mu = 2.126 \text{ kNm}$ $\sigma = 79,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0376$ $\gamma = 0,916$ $M_k = 2.238 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,36 \%$	 $\mu = 3.820 \text{ kNm}$ $\sigma = 123,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0324$ $\gamma = 0,904$ $M_k = 3.989 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,36 \%$	 $\mu = 5.792 \text{ kNm}$ $\sigma = 189,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0327$ $\gamma = 0,968$ $M_k = 6.053 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,44 \%$	 $\mu = 8.016 \text{ kNm}$ $\sigma = 246,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0307$ $\gamma = 1,292$ $M_k = 8.343 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,59 \%$
3 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\mu = 881 \text{ kNm}$ $\sigma = 23,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0268$ $\gamma = 1,213$ $M_k = 913 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,33 \%$	 $\mu = 2.529 \text{ kNm}$ $\sigma = 96,2 \text{ kNm}$ $v = 0,038$ $\gamma = 0,992$ $M_k = 2.663 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,43 \%$	 $\mu = 4.488 \text{ kNm}$ $\sigma = 138,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0309$ $\gamma = 0,803$ $M_k = 4.691 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,55 \%$	 $\mu = 6.755 \text{ kNm}$ $\sigma = 217,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0322$ $\gamma = 0,944$ $M_k = 7.053 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,38 \%$	 $\mu = 9.235 \text{ kNm}$ $\sigma = 268,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0291$ $\gamma = 0,873$ $M_k = 9.611 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,48 \%$
2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\mu = 949 \text{ kNm}$ $\sigma = 26 \text{ kNm}$ $v = 0,0274$ $\gamma = 1,368$ $M_k = 985 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,46 \%$	 $\mu = 2.677 \text{ kNm}$ $\sigma = 102,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0382$ $\gamma = 0,843$ $M_k = 2.816 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,5 \%$	 $\mu = 4.916 \text{ kNm}$ $\sigma = 168,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0342$ $\gamma = 0,932$ $M_k = 5.160 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,57 \%$	 $\mu = 7.747 \text{ kNm}$ $\sigma = 259,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0335$ $\gamma = 0,886$ $M_k = 8.108 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,54 \%$	 $\mu = 11.214 \text{ kNm}$ $\sigma = 353,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0316$ $\gamma = 0,807$ $M_k = 11.720 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,42 \%$

Tabelle 3.4: Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente (positiv definiert) für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“

Fahrstreifenanordnung	Einfeldträger, M_{Feld}				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)					
	$\mu = 915 \text{ kNm}$ $\sigma = 44,1 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0482$ $\gamma = 2,072$ $M_k = 957 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,42 \%$	$\mu = 2.542 \text{ kNm}$ $\sigma = 120,0 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0472$ $\gamma = 2,515$ $M_k = 2.632 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,53 \%$	$\mu = 4.178 \text{ kNm}$ $\sigma = 211,0 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0505$ $\gamma = 2,035$ $M_k = 4.379 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 1,59 \%$	$\mu = 5.702 \text{ kNm}$ $\sigma = 280,9 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0493$ $\gamma = 2,02$ $M_k = 6.031 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 2,12 \%$	$\mu = 7.137 \text{ kNm}$ $\sigma = 361,4 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0506$ $\gamma = 1,714$ $M_k = 7.662 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 1,97 \%$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)					
	$\mu = 1.036 \text{ kNm}$ $\sigma = 70,3 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0678$ $\gamma = 0,043$ $M_k = 1.129 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,45 \%$	$\mu = 2.900 \text{ kNm}$ $\sigma = 189,9 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0655$ $\gamma = -0,206$ $M_k = 3.136 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,32 \%$	$\mu = 4.723 \text{ kNm}$ $\sigma = 255,7 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0542$ $\gamma = -0,338$ $M_k = 5.023 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,33 \%$	$\mu = 6.528 \text{ kNm}$ $\sigma = 293,6 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0450$ $\gamma = -0,25$ $M_k = 6.868 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,36 \%$	$\mu = 8.359 \text{ kNm}$ $\sigma = 361,9 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0433$ $\gamma = 0,967$ $M_k = 8.789 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,69 \%$

Tabelle 3.5: Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient ν und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“

Fahrstreifenanordnung	Zweifeldträger, $M_{\text{Stütz}}$				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 40 m	2 x 50 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)					
	$\mu = 561 \text{ kNm}$ $\sigma = 21,2 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0378$ $\gamma = 0,948$ $M_k = 589 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,43 \%$	$\mu = 1.352 \text{ kNm}$ $\sigma = 97,8 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0724$ $\gamma = 1,212$ $M_k = 1.507 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 1,23 \%$	$\mu = 2.226 \text{ kNm}$ $\sigma = 136,2 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0612$ $\gamma = 1,046$ $M_k = 2.436 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,76 \%$	$\mu = 2.992 \text{ kNm}$ $\sigma = 175,1 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0585$ $\gamma = 0,807$ $M_k = 3.231 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,88 \%$	$\mu = 3.982 \text{ kNm}$ $\sigma = 232,4 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0584$ $\gamma = 0,978$ $M_k = 4.291 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,93 \%$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)					
	$\mu = 610 \text{ kNm}$ $\sigma = 21,4 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0350$ $\gamma = 1,502$ $M_k = 640 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,55 \%$	$\mu = 1.680 \text{ kNm}$ $\sigma = 93,1 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0554$ $\gamma = 0,900$ $M_k = 1.790 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,67 \%$	$\mu = 2.849 \text{ kNm}$ $\sigma = 132,7 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0466$ $\gamma = 1,135$ $M_k = 3.019 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,73 \%$	$\mu = 4.192 \text{ kNm}$ $\sigma = 186,5 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0445$ $\gamma = 0,874$ $M_k = 4.462 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,55 \%$	$\mu = 5.635 \text{ kNm}$ $\sigma = 240,0 \text{ kNm}$ $\nu = 0,0426$ $\gamma = 0,943$ $M_k = 5.969 \text{ kNm}$ 95%-KI: $\pm 0,69 \%$

Tabelle 3.6: Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient ν und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente (positiv definiert) für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“

Zur Einordnung der ermittelten charakteristischen Werte im Kontext normativer Lastmodelle zeigen die folgenden Tabellen eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus. Die darin enthaltenen Markierungen kennzeichnen jeweils das im Vergleich zur Simulation nächsthöherliegende Lastmodell.

3 Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung

Einfeldträger $M_{k,Feld}$ [kNm]	Stützweite				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	1.866	4.676	8.149	12.199	16.743
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	1.437	3.522	6.028	8.893	12.049
BK60/30 nach DIN 1072:1985	1.536	3.536	5.625	7.758	9.904
BK60 nach DIN 1072:1967	1.310	3.025	4.819	6.645	8.475
BK30/30 nach DIN 1072:1985	928	2.325	3.972	5.806	7.783
BK30 nach DIN 1072:1967	702	1.815	3.166	4.694	6.353
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	1.180	3.280	5.537	8.215	11.130
Ortsverkehr (Begegnungsverkehr)	957	2.632	4.379	6.031	7.662

Tabelle 3.7: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

Einfeldträger $M_{k,Feld}$ [kNm]	Stützweite				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	1.866	4.676	8.149	12.199	16.743
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	1.437	3.522	6.028	8.893	12.049
BK60/30 nach DIN 1072:1985	1.536	3.536	5.625	7.758	9.904
BK60 nach DIN 1072:1967	1.310	3.025	4.819	6.645	8.475
BK30/30 nach DIN 1072:1985	928	2.325	3.972	5.806	7.783
BK30 nach DIN 1072:1967	702	1.815	3.166	4.694	6.353
Langstreckenverkehr (Richtungsverkehr)	1.195	3.298	5.380	8.098	11.020
Ortsverkehr (Richtungsverkehr)	1.129	3.136	5.023	6.868	8.789

Tabelle 3.8: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Einfeldträger $M_{k,Feld}$ [kNm]	Stützweite				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	2.347	5.835	10.092	15.002	20.446
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	1.714	4.175	7.114	10.450	14.104
BK60/30 nach DIN 1072:1985	1.819	4.191	6.679	9.232	11.817
BK60 nach DIN 1072:1967	1.527	3.558	5.717	7.954	10.238
BK30/30 nach DIN 1072:1985	1.121	2.808	4.799	7.024	9.430
BK30 nach DIN 1072:1967	830	2.175	3.837	5.746	7.851
Langstreckenverkehr (Richtungsverkehr)	1.532	4.255	6.999	9.766	12.910

Tabelle 3.9: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 3 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Einfeldträger $M_{k,Feld}$ [kNm]	Stützweite				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	2.514	6.223	10.727	15.896	21.598
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	1.809	4.409	7.516	11.043	14.908
BK60/30 nach DIN 1072:1985	1.912	4.427	7.090	9.850	12.675
BK60 nach DIN 1072:1967	1.591	3.738	6.056	8.494	11.021
BK30/30 nach DIN 1072:1985	1.196	3.011	5.170	7.601	10.252
BK30 nach DIN 1072:1967	875	2.321	4.135	6.245	8.598
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	1.643	4.511	7.679	10.968	14.869

Tabelle 3.10: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

Zweifeldträger $M_{k,Stütz}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 40 m	2 x 50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	-1.065	-2.962	-5.589	-8.864	-12.704
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	-796	-2.150	-3.980	-6.225	-8.818
BK60/30 nach DIN 1072:1985	-824	-2.028	-3.471	-5.099	-6.867
BK60 nach DIN 1072:1967	-724	-1.815	-3.143	-4.652	-6.298
BK30/30 nach DIN 1072:1985	-551	-1.519	-2.794	-4.312	-6.019
BK30 nach DIN 1072:1967	-451	-1.306	-2.466	-3.865	-5.449
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	-778	-2.153	-3.920	-5.928	-8.416
Ortsverkehr (Begegnungsverkehr)	-589	-1.507	-2.436	-3.231	-4.291

Tabelle 3.11: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

Zweifeldträger $M_{k,Stütz}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 40 m	2 x 50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	-1.065	-2.962	-5.589	-8.864	-12.704
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	-796	-2.150	-3.980	-6.225	-8.818
BK60/30 nach DIN 1072:1985	-824	-2.028	-3.471	-5.099	-6.867
BK60 nach DIN 1072:1967	-724	-1.815	-3.143	-4.652	-6.298
BK30/30 nach DIN 1072:1985	-551	-1.519	-2.794	-4.312	-6.019
BK30 nach DIN 1072:1967	-451	-1.306	-2.466	-3.865	-5.449
Langstreckenverkehr (Richtungsverkehr)	-759	-2.198	-3.989	-6.053	-8.343
Ortsverkehr (Richtungsverkehr)	-640	-1.790	-3.019	-4.462	-5.969

Tabelle 3.12: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Zweifeldträger $M_{k,Stütz}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 40 m	2 x 50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	-1.328	-3.657	-6.844	-10.776	-15.336
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	-953	-2.568	-4.748	-7.416	-10.492
BK60/30 nach DIN 1072:1985	-984	-2.440	-4.202	-6.212	-8.417
BK60 nach DIN 1072:1967	-855	-2.175	-3.811	-5.699	-7.788
BK30/30 nach DIN 1072:1985	-671	-1.858	-3.433	-5.321	-7.463
BK30 nach DIN 1072:1967	-542	-1.594	-3.042	-4.808	-6.834
Langstreckenverkehr (Richtungsverkehr)	-913	-2.613	-4.691	-7.053	-9.611

Tabelle 3.13: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 3 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Zweifeldträger $M_{k,Stütz}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 40 m	2 x 50 m
LM1 mit α nach EC1/NA:2012	-1.424	-3.911	-7.306	-11.482	-16.310
LM1 mit α nach DIN-FB 101:2009	-1.011	-2.731	-5.057	-7.909	-11.201
BK60/30 nach DIN 1072:1985	-1.043	-2.609	-4.529	-6.741	-9.194
BK60 nach DIN 1072:1967	-900	-2.322	-4.108	-6.196	-8.535
BK30/30 nach DIN 1072:1985	-721	-2.014	-3.743	-5.833	-8.225
BK30 nach DIN 1072:1967	-579	-1.726	-3.322	-5.289	-7.566
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	-985	-2.776	-5.160	-8.108	-11.720

Tabelle 3.14: Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

3.2.3 Ergebnisse der analytischen Lösung

Zentrales Element der analytischen Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung sind die maßgebenden extremen Laststellungen. Diese wurden für die hier betrachteten Beispiele iterativ ermittelt, indem einerseits bereits vorab erkennbare extreme Laststellungen untersucht wurden und andererseits auch solche, die während der Simulation für jeden Extremwert zusätzlich gespeichert worden sind. Die im Ergebnis vorliegenden Laststellungen, mittleren Häufigkeiten (siehe auch Anhang E) und charakteristischen Werte im Vergleich zum Referenzergebnis (aus Abschnitt 3.2.2.3) werden in Abbildung 3.20 bis Abbildung 3.22 beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit der Spannweite $L = 50 \text{ m}$ und das Stützmoment eines Zweifeldträgers mit den Spannweiten $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$ dargestellt.

Es zeigt sich, dass die charakteristischen Werte anhand jeweils einer maßgebenden extremen Laststellung ausreichend genau ermittelt werden können (Abweichung maximal $\pm 10\%$). Spannweitenabhängig dominiert dabei eine der folgenden Kategorien:

- a) reiner fließender Verkehr
- b) reiner Stauverkehr
- c) Kombination aus fließendem Verkehr und Stauverkehr

Ergänzend werden daher in Abbildung 3.20 bis Abbildung 3.22 die Ergebnisse der jeweils ungünstigsten Laststellung dieser drei Kategorien abgebildet, so dass eine Übertragbarkeit auf andere statische Systeme möglich wird. Die analytische Lösung ist stets für jede der drei Kategorien aufzustellen und das ungünstigste Ergebnis als maßgebend zu betrachten.

Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass eine extreme Laststellung erst dann maßgebend wird, wenn deren mittlere Häufigkeit mehr als ca. einmal in einem Zeitraum von 1.000 Jahren beträgt (analog zur Definition der mittleren Wiederkehrperiode des charakteristischen Wertes). Seltenere Laststellungen haben nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis der analytischen Lösung. Bei einer stark abweichenden mittleren Wiederkehrperiode werden dementsprechend andere Laststellungen maßgebend als die in Abbildung 3.20 bis Abbildung 3.22 dargestellten.

Deutlich wird außerdem, dass von den insgesamt im Fahrzeugkollektiv enthaltenen Lkw ausschließlich der Lkw Typ 98 sowie das Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen

Schwerverkehrs (hier der 60t-Mobilkran) in den maßgebenden extremen Laststellungen auftreten. Die übrigen häufig auftretenden Fahrzeugtypen können ohne Genauigkeitsverlust vernachlässigt werden.

Aufgrund der steigenden Zahl möglicher Laststellungen bei zunehmender Brückenlänge und Fahrstreifenanzahl liegt die Grenze der hier vorgestellten analytischen Lösung bei einer zusammenhängenden Länge der Einflusslinienbereiche gleichen Vorzeichens von $L \approx 100 \text{ m}$. Für längere Einflusslinien existieren dementsprechend keine handhabbaren Lösungen mit einer maßgebenden extremen Laststellung, wie zum Beispiel für das hier betrachtete Stützmoment eines Zweifeldträgers mit $L = 70 \text{ m} + 70 \text{ m}$.

Im Vergleich zu den Ergebnissen in Abbildung 3.20 bis Abbildung 3.22 existieren teilweise auch geringfügig ungünstigere Laststellungen. Diese wurden jedoch zugunsten einer Vereinheitlichung der extremen Laststellungen vernachlässigt.

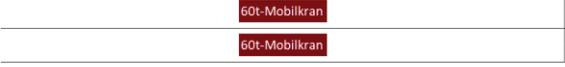
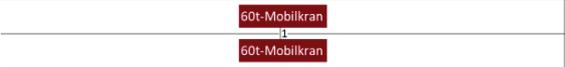
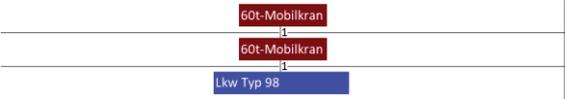
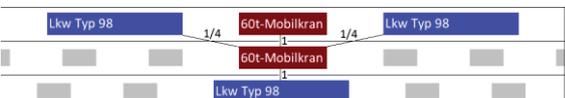
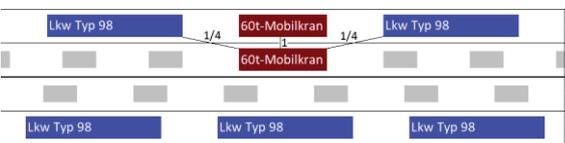
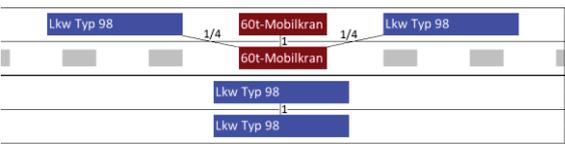
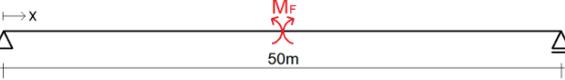
Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran	
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	<p>a) fließender Verkehr / fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 5.380; M_k = 8.811 \text{ kNm (79\%)}$</p>  <p>b) Stau / Stau $n_{1000 \text{ Jahre}} = 55,3; M_k = 10.242 \text{ kNm (92\%)}$</p>  <p>c) Stau / fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 280; M_k = 10.751 \text{ kNm (97\%)}$</p> 
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	<p>a) fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 8.520; M_k = 8.816 \text{ kNm (80\%)}$</p>  <p>b) Stau $n_{1000 \text{ Jahre}} = 74,0; M_k = 10.274 \text{ kNm (93\%)}$</p> 
3 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	<p>a) fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 112; M_k = 11.631 \text{ kNm (90\%)}$</p>  <p>b) Stau $n_{1000 \text{ Jahre}} = 1,7; M_k = 11.999 \text{ kNm (93\%)}$</p> 
2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	<p>a) fließender Verkehr / fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 42,0; M_k = 13.420 \text{ kNm (90\%)}$</p>  <p>b) Stau / Stau $n_{1000 \text{ Jahre}} = 4,9; M_k = 13.344 \text{ kNm (90\%)}$</p>  <p>c) Stau / fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 14,7; M_k = 14.790 \text{ kNm (100\%)}$</p>  <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  <p>$\rightarrow x$ 50m</p> </div>

Abbildung 3.20: Maßgebende extreme Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 1.000 Jahren und charakteristische Werte (M_k) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment)

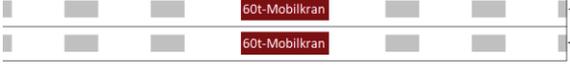
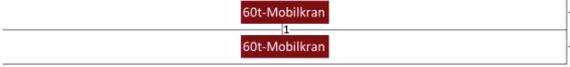
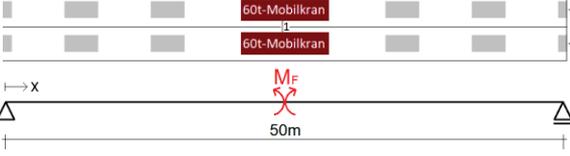
Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran	
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	a) fließender Verkehr / fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 0,5; M_k = 8.172 \text{ kNm (107\%)}$ 
	b) Stau / Stau $n_{1000 \text{ Jahre}} = 0,4; M_k = 7.391 \text{ kNm (97\%)}$ 
	c) Stau / fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 2,2; M_k = 8.074 \text{ kNm (105\%)}$ 
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	a) fließender Verkehr $n_{1000 \text{ Jahre}} = 17,1; M_k = 8.654 \text{ kNm (99\%)}$ 
	b) Stau $n_{1000 \text{ Jahre}} = 1,7; M_k = 7.617 \text{ kNm (87\%)}$ 

Abbildung 3.22: Maßgebende extreme Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 1.000 Jahren und charakteristische Werte (M_k) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment)

3.3 Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden wird der Einfluss der verschiedenen Eingangsparameter auf das Ergebnis der analytischen Lösung untersucht. Analog zu den vorherigen Abschnitten liegt der Fokus auf den charakteristischen Werten. Da je nach System und Laststellung unterschiedliche Auswirkungen entstehen, erfolgen die Untersuchungen beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit einer Spannweite von $L = 50\text{ m}$ und zwei Fahrstreifen (Richtungsverkehr) sowie anhand der Laststellungen in Abbildung 3.23.

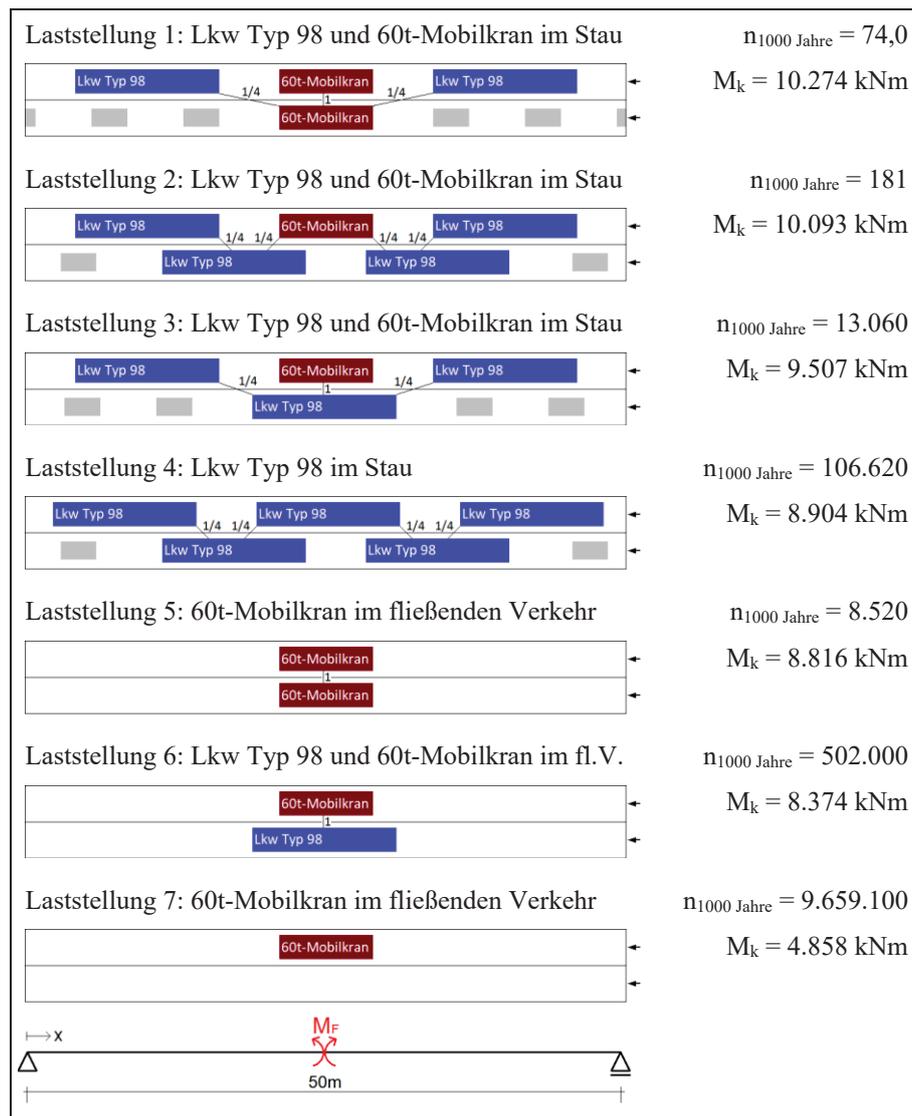


Abbildung 3.23: Beispielhafte Laststellungen als Grundlage der Sensitivitätsanalyse (Einfeldträger, $L = 50\text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr), Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)

3.3.1 Einfluss unterschiedlicher extremer Laststellungen

Die Anzahl der möglichen Laststellungen steigt mit zunehmender Brückenlänge und Fahrstreifenanzahl. Gleichzeitig verlieren jedoch manche Laststellungen an Relevanz, da deutlich ungünstigere Stellungen existieren. Einen ähnlichen Einfluss hat der Beobachtungszeitraum, da z.B. in den Tages-Extrema noch relativ günstige Laststellungen auftreten, die bei der Bildung

der Wochen-Extrema wiederum durch ungünstigere ersetzt werden. In Abbildung 3.24 wird dies anhand ausgewählter Laststellungen aus Abbildung 3.23 veranschaulicht. Zu erkennen sind die je Laststellung resultierenden Verteilungen $F_i(M)$ der Jahres- und 100-Jahres-Extrema sowie deren Kombination mit:

$$F_{max}(M) = F_1(M) \cdot F_4(M) \cdot F_7(M) \quad (3.37)$$

Bezüglich der Jahres-Extrema zeigt sich, dass die kombinierte Verteilung ausschließlich von den Laststellungen 1 und 4 beeinflusst wird, wohingegen Laststellung 7 keinerlei Einfluss hat. Der Endbereich der kombinierten Extremwertverteilung wird allein durch die maßgebende Laststellung 1 bestimmt. Dies zeigt sich auch bei den 100-Jahres-Extrema, wobei hier zusätzlich Laststellung 4 ihren Einfluss auf die Form der kombinierten Verteilung verliert.

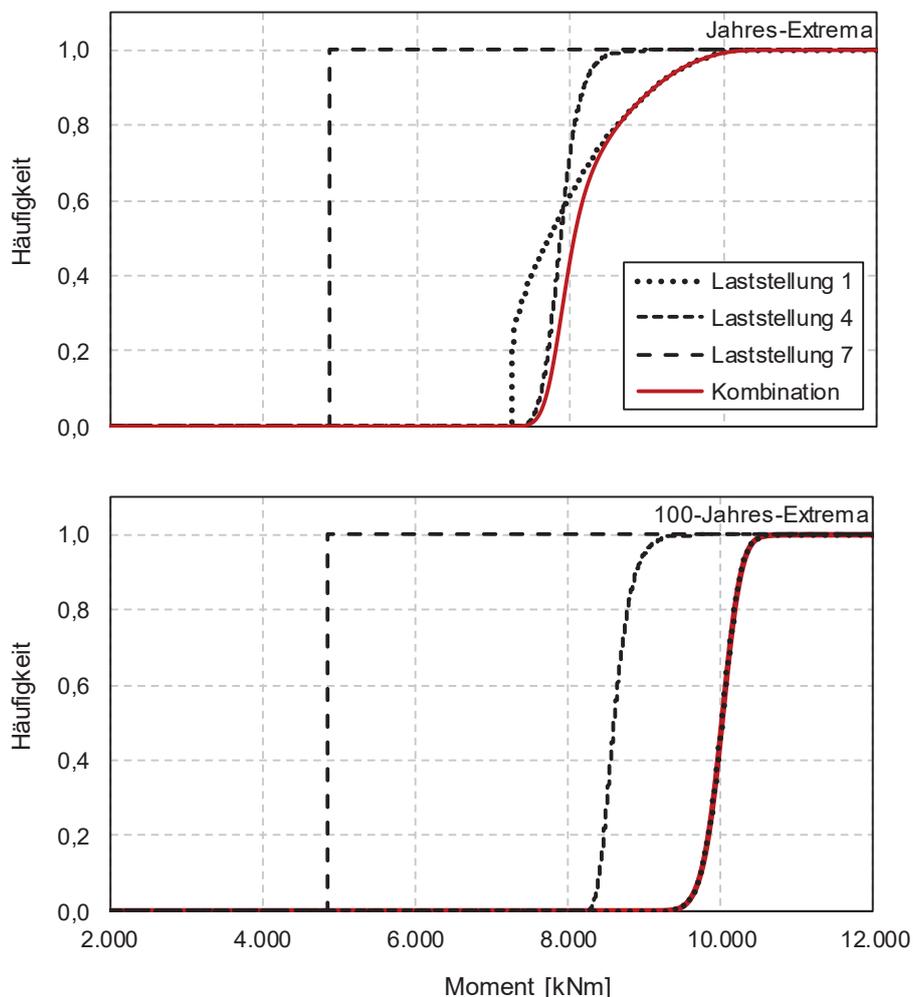


Abbildung 3.24: Verteilung der Jahres-Extrema (oben) und 100-Jahres-Extrema (unten) infolge unterschiedlicher Laststellungen und deren Kombination (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

Anhand der Ergebnisse in Abschnitt 3.2.3 wird verallgemeinernd ersichtlich, dass der Endbereich der Extremwertverteilung und damit auch der charakteristische Wert stets durch eine

maßgebende extreme Laststellung ausreichend genau abgebildet werden kann. Es ist jedoch zu betonen, dass dies nur eingeschränkt für die gesamte Form der 100-Jahres-Extrema zutrifft, vgl. Abbildung 3.16.

3.3.2 Einfluss der Häufigkeit extremer Laststellungen

Neben den extremen Laststellungen entscheidet vor allem deren mittlere Häufigkeit über die Höhe des charakteristischen Wertes. Abbildung 3.25 verdeutlicht dies anhand der Laststellungen in Abbildung 3.23. Sollte beispielsweise durch eine Änderung der Verkehrszusammensetzung die Laststellung 1 deutlich seltener auftreten als die Laststellung 4, würde sich neben dem charakteristischen Wert zwangsläufig auch die maßgebende extreme Laststellung ändern. Relevante Laststellungen weisen eine mittlere Häufigkeit von mindestens ca. einmal in einem Zeitraum von 1.000 Jahren auf, analog zur Definition des charakteristischen Wertes. Ist die Häufigkeit einer Laststellung deutlich niedriger, so hat diese nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis der analytischen Lösung, vgl. Laststellung 4. Speziell bei Laststellungen mit Fahrzeugen deren Gesamtgewichtsverteilung eine untere Grenze aufweist, wie hier der 60t-Mobilkran, ist dieser Mindestwert der Häufigkeit zu beachten, da ansonsten die Gefahr unsinniger Ergebnisse besteht, vgl. das untere Plateau der Laststellungen 1 und 7.

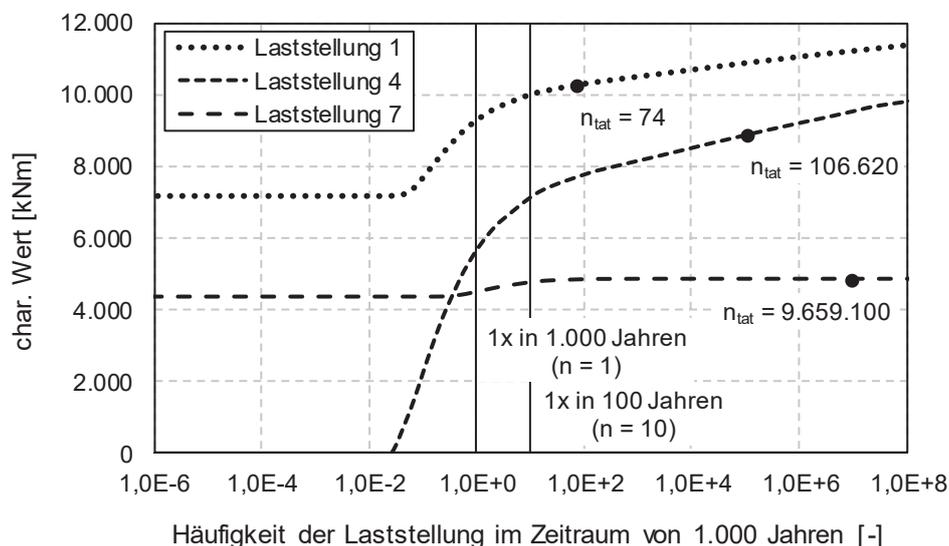


Abbildung 3.25: Einfluss der Häufigkeit einer Laststellung auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

Anhand von Abbildung 3.26 lässt sich erkennen, dass eine Änderung der mittleren Häufigkeit im Bereich von ca. einmal in 1.000 Jahren enorme Auswirkung hat. Ist die Häufigkeit bereits größer als ca. einmal in 10 Jahren, wirken sich Änderungen nur noch moderat auf den charakteristischen Wert aus.

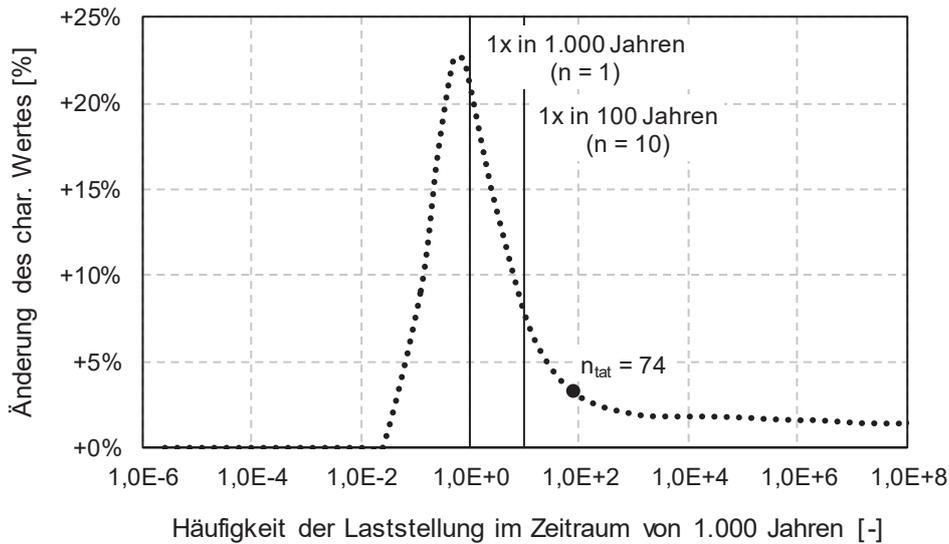


Abbildung 3.26: Einfluss einer Erhöhung der Häufigkeit der Laststellung 1 (um Faktor 10) auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

Im Folgenden wird der Einfluss der Verkehrsparameter auf die mittlere Häufigkeit extremer Laststellungen und damit auf den charakteristischen Wert analysiert. Der Fokus liegt zunächst auf den formelmäßigen Zusammenhängen zur Ermittlung der Häufigkeiten, vgl. Gleichung (3.38) bis (3.44) für die Laststellungen 1 bis 7 in Abbildung 3.23.

$$n_1 \approx \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot 0,589 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{6}}_{\text{sechs mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \quad (3.38)$$

· 1.000 Jahre = 74

$$n_2 \approx \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot 0,589 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589\right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{5}}_{\text{fünf mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \quad (3.39)$$

· 1.000 Jahre = 181

$$n_3 \approx \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot 0,589 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{4}}_{\text{vier mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \quad (3.40)$$

· 1.000 Jahre = 13.060

$$n_4 \approx \underbrace{0,589^3 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 106.620 \quad (3.41)$$

$$n_5 \approx \underbrace{0,005 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}}) \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 8.520 \quad (3.42)$$

$$n_6 \approx \underbrace{0,005 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}}) \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 502.000 \quad (3.43)$$

zwei mögliche Reihenfolgen

$$n_7 \approx \underbrace{0,005 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}}) \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 9.659.100 \quad (3.44)$$

Die relevanten Parameter sind:

- Anteil des Lkw Typ 98 [%]
- Anteil des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs [%]
- durchschnittliche tägliche Schwerverkehrsstärke *DTV-SV* [-]
- Stauanteil [%]
- Anteil der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr [%] (im mehrspurigen Richtungsverkehr)
- Verhältnis *DTV/DTV-SV* [-] (im einspurigen Richtungsverkehr zur Berücksichtigung günstig wirkender Pkw zwischen den Lkw)

Bezüglich dieser Parameter wird in Abbildung 3.27 und Abbildung 3.28 die Änderung des charakteristischen Wertes anhand der oben genannten Laststellungen dargestellt. In den betrachteten Beispielen tritt keine Änderung der je Verkehrsszenario maßgebenden extremen Laststellung auf. Lediglich bei einer starken Zunahme des Anteils des Lkw Typ 98 auf über 30% wird im Szenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“ Laststellung 3 anstatt Laststellung 5 maßgebend, wobei jedoch eine derartige Zunahme im Ortsverkehr unrealistisch ist. Eine Überschreitung der hier betrachteten Streubreite der Parameter oder eine kombinierte Änderung mehrerer Parameter führt teilweise zu neuen maßgebenden Laststellungen, wie der Vergleich zwischen „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ und „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“ zeigt.

3 Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung

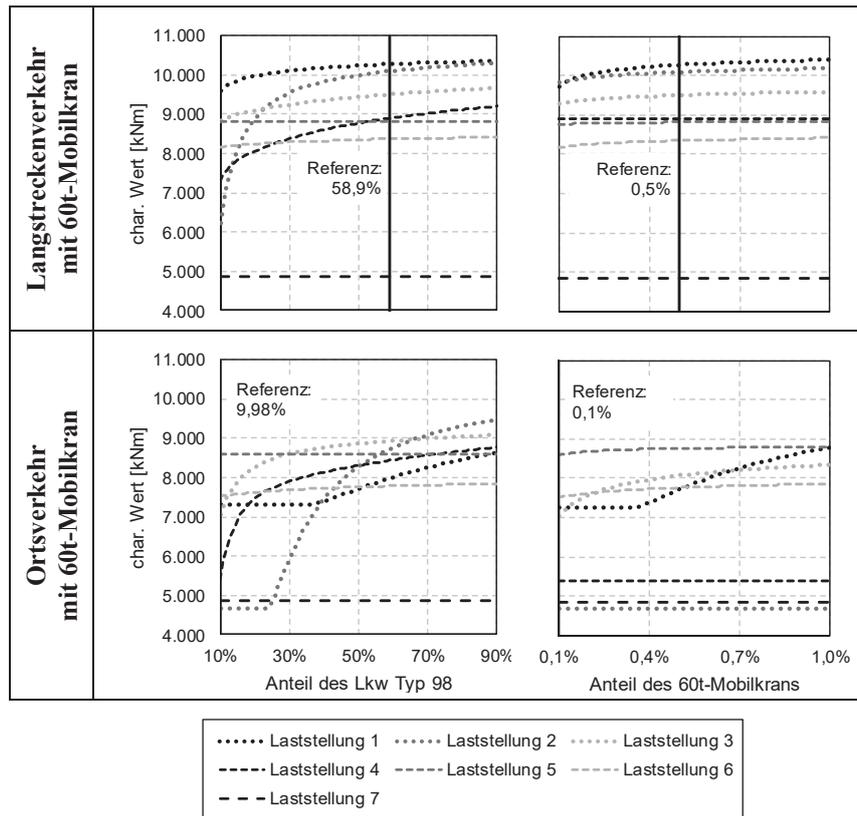


Abbildung 3.27: Einfluss des Anteils des Lkw Typ 98 (10-90%) und 60t-Mobilkrans (0,1-1,0%) auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

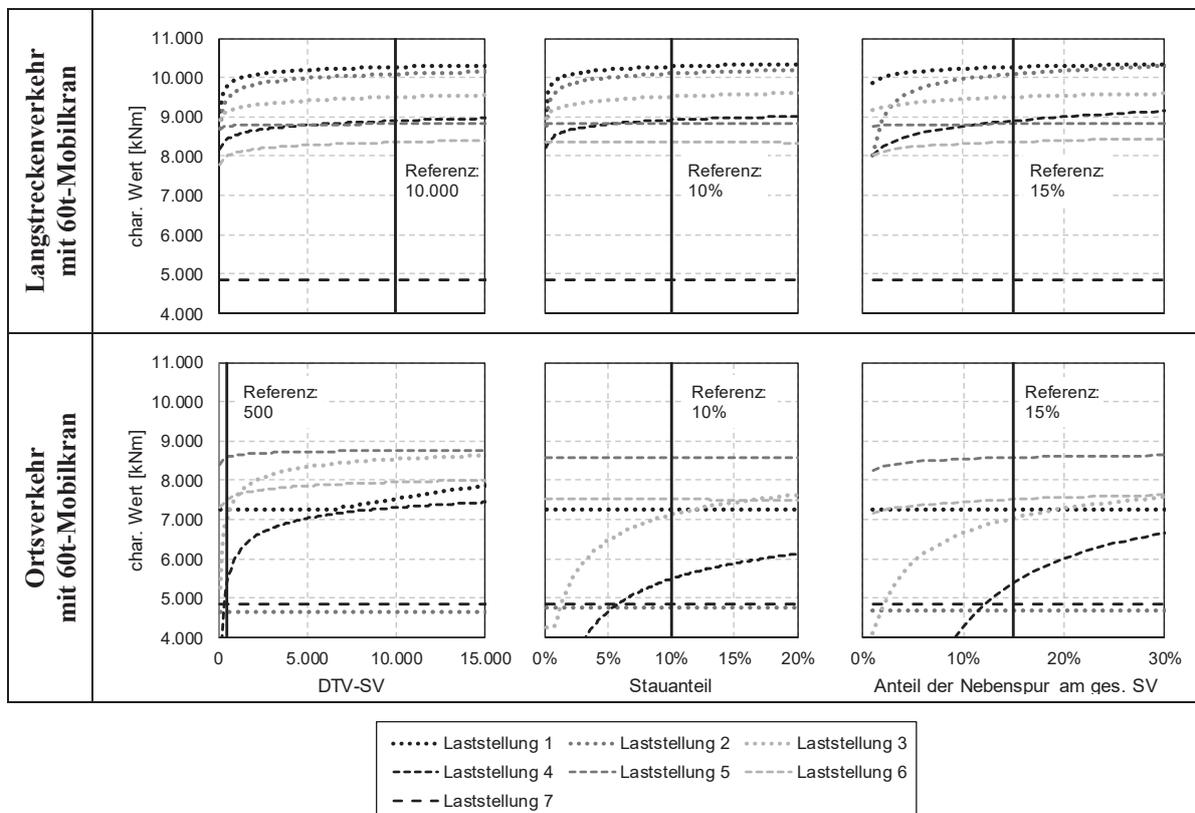


Abbildung 3.28: Einfluss des DTV-SV (100-15.000), Stauanteils (0,1-20%) und Anteils der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr (1-30%) auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

Große Änderungen bezüglich des charakteristischen Wertes treten auch hier stets dann auf, wenn die Häufigkeit einer potenziell maßgebenden Laststellung die Schwelle von ca. einmal in einem Zeitraum von 1.000 Jahren erreicht und damit die bisher maßgebende Laststellung abgelöst wird. Der gleiche Effekt tritt auf, wenn durch verkehrsbeeinflussende Maßnahmen einzelne Laststellungen ausgeschlossen werden können, wie zum Beispiel durch Einengung der Nebenspur, so dass diese nicht mehr für Lkw befahrbar ist.

3.3.3 Einfluss der Fahrzeuggesamtwichte

Die Verteilung der Fahrzeuggesamtwichte hat einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe des charakteristischen Wertes. Den Ergebnissen der analytischen Lösung in Abschnitt 3.2.3 entsprechend, lassen sich die maßgebenden Fahrzeugtypen auf den Lkw Typ 98 sowie den 60t-Mobilkran (als Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerververkehrs) eingrenzen. Eine Beschreibung dieser Fahrzeuge zeigt Abbildung 3.29 zusammen mit den hier als Referenz zu betrachtenden Gesamtgewichtsverteilungen.

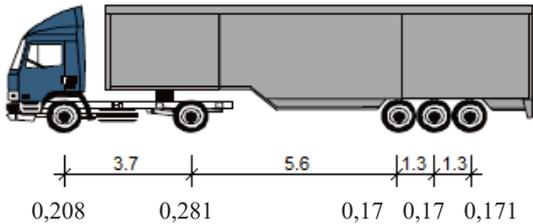
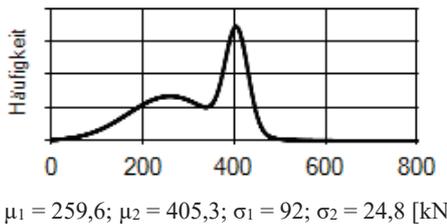
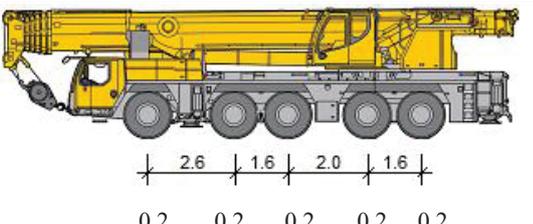
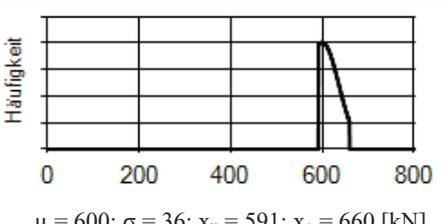
Lkw-Typ	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeuggesamtwicht
Typ 98		 <p>$\mu_1 = 259,6; \mu_2 = 405,3; \sigma_1 = 92; \sigma_2 = 24,8$ [kN] $\alpha = 0,62; \beta = 0,38$</p>
60t-Mobilkran (bzw. Ersatzfahrzeug des gen.pfl. SV)		 <p>$\mu = 600; \sigma = 36; x_u = 591; x_o = 660$ [kN]</p>

Abbildung 3.29: Maßgebende Fahrzeugtypen des Schwerverkehrs

Die bezüglich der Extremwerte relevanten Parameter werden im Folgenden variiert und deren Einfluss auf den charakteristischen Wert dargestellt.

3.3.3.1 Fahrzeuggesamtwicht des Lkw Typ 98

Wie zu erwarten steigt der charakteristische Wert mit zunehmendem mittlerem Gesamtgewicht der beladenen Lkw Typ 98, vgl. Abbildung 3.30. Ab einem Wert von $\mu_2 = 550$ kN entsteht ein Wechsel der maßgebenden extremen Laststellung 1 (60t-Mobilkran und Lkw Typ 98 im Stau) zur Laststellung 4 (ausschließlich Lkw Typ 98 im Stau). Unter Berücksichtigung einer

strikten oberen Kappungsgrenze von $x_o = 440 \text{ kN}$ resultiert hier trotz Zunahme des mittleren Gesamtgewichtes ein vernachlässigbarer Anstieg des charakteristischen Wertes.

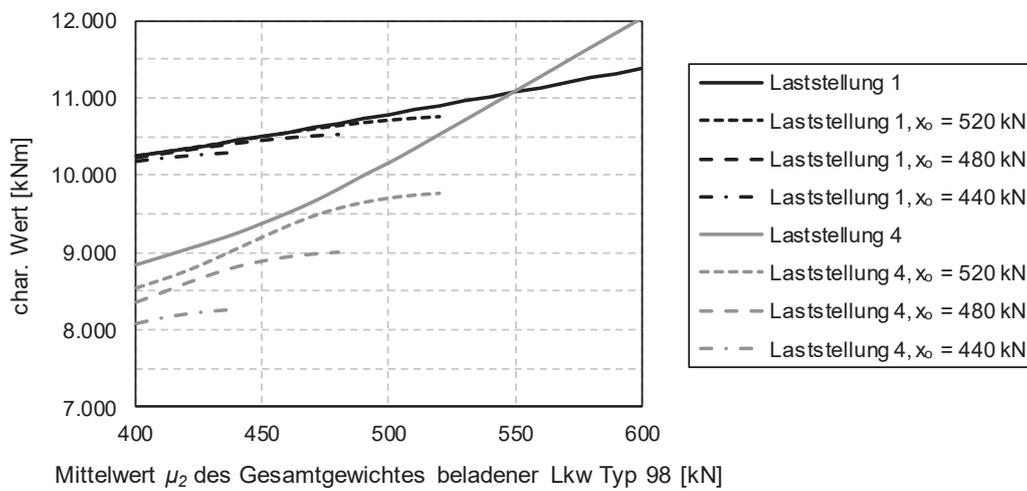


Abbildung 3.30: Einfluss von Mittelwert μ_2 und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes beladener Lkw Typ 98 auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

Mit zunehmender Streuung des Gesamtgewichtes voll beladener Lkw Typ 98 steigt auch der charakteristische Wert, vgl. Abbildung 3.31. Die Auswirkungen sind hier jedoch im Vergleich zum Ausgangsszenario mit $\sigma_2 \approx 25 \text{ kN}$ marginal, da sie vom Einfluss des genehmigungspflichtigen Schwerververkehrs überdeckt werden.

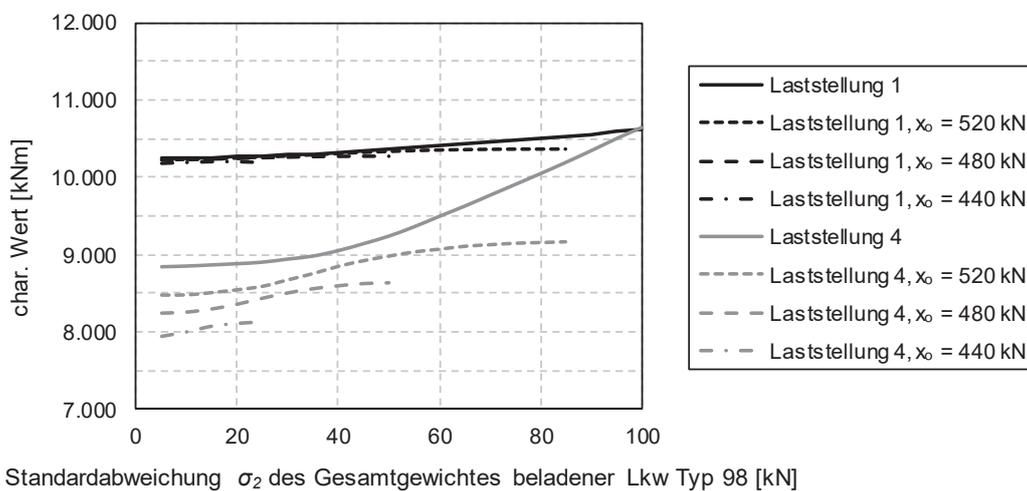


Abbildung 3.31: Einfluss von Standardabweichung σ_2 und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes beladener Lkw Typ 98 auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

Im Allgemeinen ist bei einem zunehmenden Anteil an voll beladenen Lkw Typ 98 mit einem Anstieg des charakteristischen Wertes zu rechnen, vgl. Abbildung 3.32. Im Vergleich zum Ausgangsszenario mit $\alpha/\beta \approx 60\%/40\%$ sind die Auswirkungen hier jedoch gering, da sich der Einfluss wie im vorherigen Beispiel durch die Berücksichtigung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs reduziert.

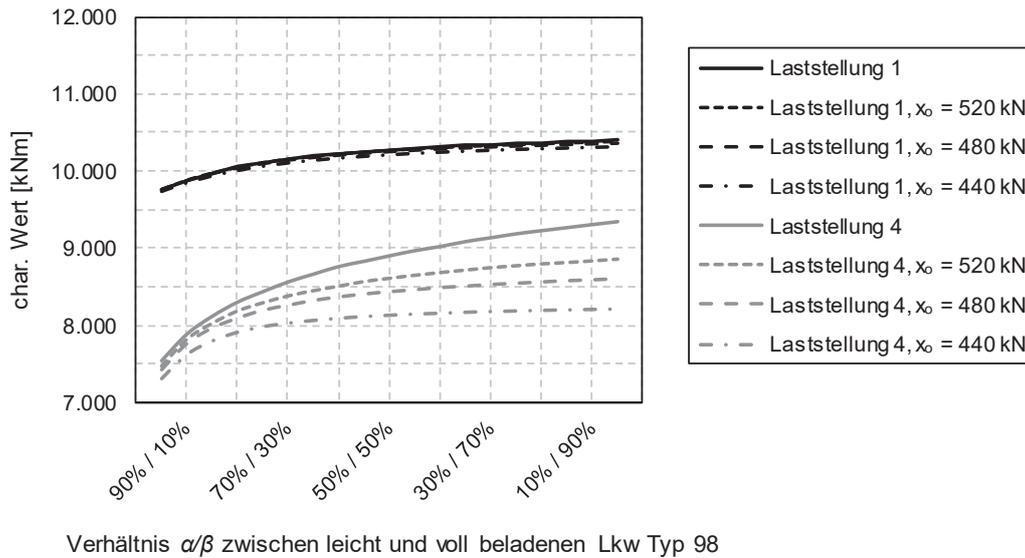


Abbildung 3.32: Einfluss des Verhältnisses α/β zwischen leicht und voll beladenen Lkw Typ 98 sowie der Kappungsgrenze x_0 dessen Gesamtgewicht auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

3.3.3.2 Fahrzeugesamtgewicht des Mobilkrans

Die bisherigen Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit genehmigungspflichtigen Schwerverkehr zu berücksichtigen, zumal dessen Auftreten im Straßenverkehr nicht ausgeschlossen werden kann. Ausgehend vom hier betrachteten Ersatzfahrzeug mit Mittelwert $\mu = 600$ kN, Standardabweichung $\sigma = 36$ kN und oberer Kappungsgrenze $x_0 = 660$ kN führt lediglich eine kombinierte Erhöhung der Parameter μ und x_0 bzw. σ und x_0 zu einem signifikanten Anstieg des charakteristischen Wertes, vgl. Abbildung 3.33 und Abbildung 3.34.

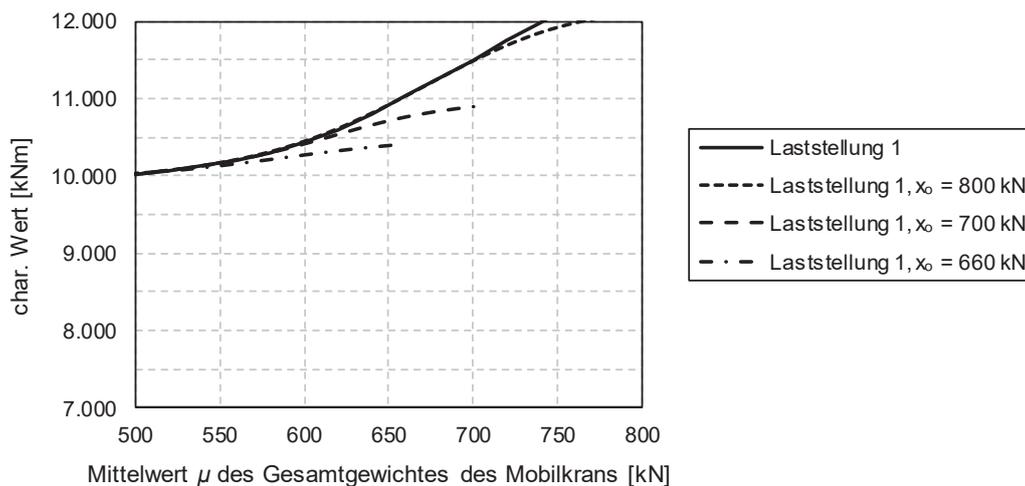


Abbildung 3.33: Einfluss von Mittelwert μ und Kappungsgrenze x_0 des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

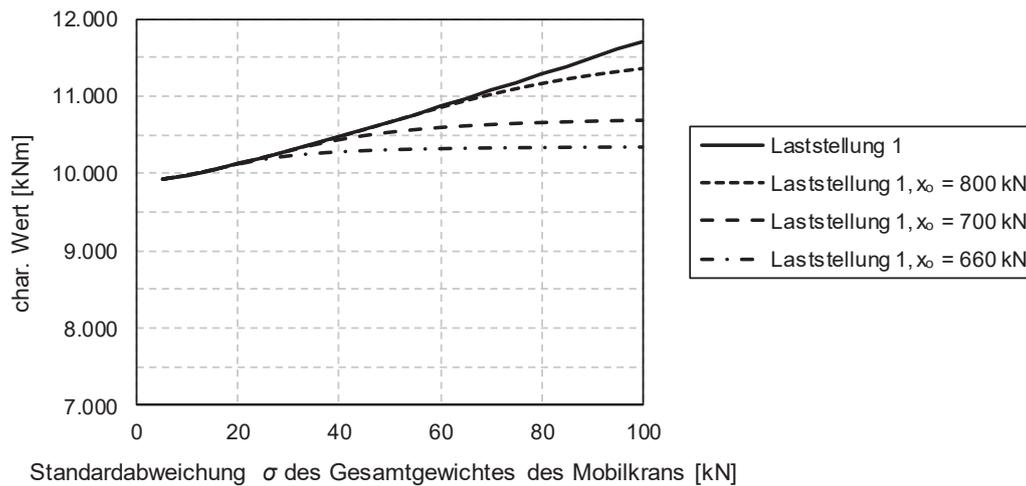


Abbildung 3.34: Einfluss von Standardabweichung σ und Kappungsgrenze x_0 des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))

3.3.4 Zusammenfassung

Es ist zu betonen, dass die hier beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit einer Spannweite von $L = 50$ m und zwei Fahrstreifen (Richtungsverkehr) ermittelten Ergebnisse nicht auf beliebige andere Systeme übertragbar sind. Mit den je nach Einflusslinientyp, -länge und Fahrstreifenanordnung unterschiedlichen möglichen Laststellungen ändert sich auch die Relevanz einzelner Parameter. Allgemein lassen sich jedoch die wesentlichen Parameter folgendermaßen eingrenzen:

- Im Hinblick auf das Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs ist die Definition einer sinnvollen oberen Kappungsgrenze des Gesamtgewichtes entscheidend. Bei Betrachtung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr mit Dauer-genehmigung ist diese Grenze je nach Handhabung einzelner Bundesländer unterschiedlich, jedoch prinzipiell gegeben, vgl. Abschnitt 2.1.1.5. Aufgrund der Vielzahl möglicher Fahrzeugkonfigurationen ist eine Begrenzung auf die hinsichtlich ihrer Flächenlast ungünstigsten Fahrzeuge zielführend.
- Bezüglich des Lkw Typ 98 ist dessen Gesamtgewichtsverteilung ausschließlich im Bereich beladener Fahrzeuge relevant, d.h. näherungsweise im Bereich zwischen dem 50% und 95%-Quantil, vgl. Abschnitt 3.4. Aus Sicht der messtechnischen Erfassung der Eingangsparameter lassen sich daraus zielgerichtete Kriterien zur Kalibrierung von WiM- und BWiM-Anlagen formulieren.
- Hinsichtlich der Häufigkeit extremer Laststellungen sind der Anteil des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs sowie des Lkw Typ 98 am Fahrzeugkollektiv, der DTV-SV,

das Verhältnis $DTV/DTV-SV$ (im einspurigen Richtungsverkehr), der Anteil der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr (im mehrspurigen Richtungsverkehr) sowie der Stauanteil relevant, sofern durch deren Änderung die Häufigkeitsschwelle von ca. einmal in einem Zeitraum von 1.000 Jahren erreicht und damit die bisher maßgebende Laststellung abgelöst wird.

Die übrigen Parameter haben hier nur einen untergeordneten Einfluss.

3.4 Vereinfachung der analytischen Lösung

Auf Basis der analytischen Lösung wird ein vereinfachtes Handrechenverfahren zur Bestimmung extremer Verkehrsbeanspruchungen abgeleitet. Für unterschiedlich ausgeprägte Fahrzeugkollektive (z.B. Orts-, Langstrecken-, evtl. zukünftiger 44t- oder objektspezifisch durch Dauermessung bestimmter Verkehr) und Verkehrsaufkommen sowie für verschiedene Brückentragwerke und Fahrstreifenanordnungen ist es damit möglich, die charakteristischen Werte einfach zu berechnen. Das Schema des Rechenverfahrens veranschaulicht Abbildung 3.35.

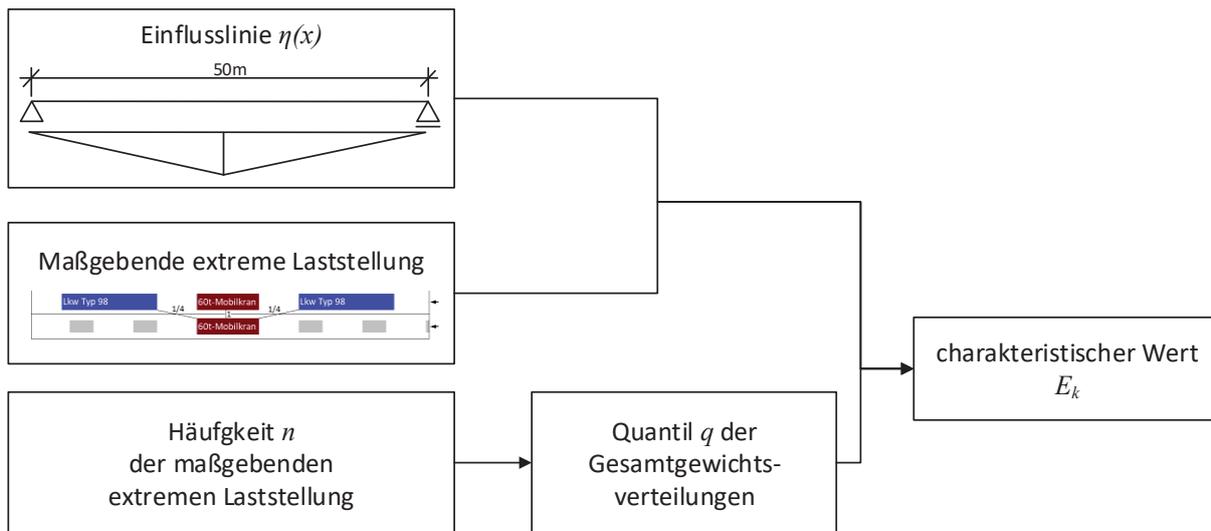


Abbildung 3.35: Schema des vereinfachten (Hand-) Rechenverfahrens zur Ermittlung der charakteristischen Werte

3.4.1 Allgemeines

Grundlage des Rechenverfahrens ist die maßgebende extreme Laststellung, vgl. Abbildung 3.20 bis Abbildung 3.22, sowie deren mittlere Häufigkeit. Im Gegensatz zur analytischen Lösung wird jedoch die vereinfachende Annahme getroffen, dass alle Lkw eines Typs gleich schwer sind bzw. sich das Gesamtgewicht aller Lkw durch ein gemeinsames Quantil der unterschiedlichen Gesamtgewichtsverteilungen bestimmen lässt. Abbildung 3.36 zeigt den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Laststellung und diesem gemeinsamen Quantil anhand der analytischen Lösungen aus Abschnitt 3.2. Wie zu erwarten treten höhere Gesamtgewichte auf, je häufiger die betrachtete Laststellung ist. Anhand dieses Zusammenhangs wird die Näherung in Gleichung (3.45) abgeleitet, mit deren Hilfe sich aus der Häufigkeit das Quantil, damit das Gesamtgewicht aller Lkw und in der Folge der charakteristische Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren bestimmen lässt. Die Näherung ist so gewählt, dass daraus im Regelfall auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse resultieren.

$$q = 1 - e^{-0,49 \cdot \ln(n) - 0,62} \quad (3.45)$$

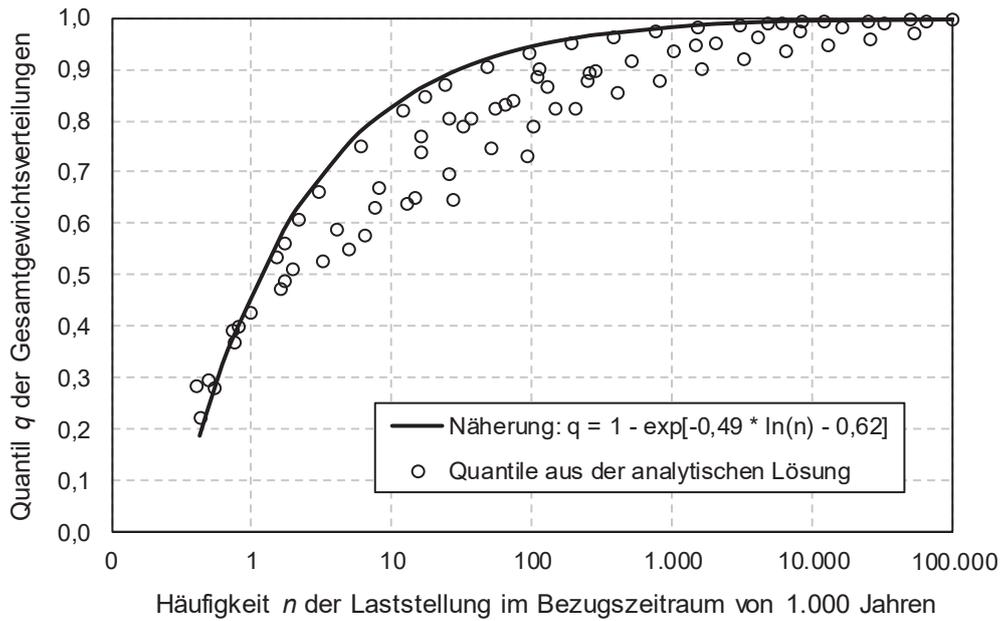


Abbildung 3.36: Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Laststellung und der Höhe der Gesamtgewichte aller Lkw

Zur einfachen Bestimmung der Gesamtgewichte anhand des Quantils q sind in Abbildung 3.37 die Gesamtgewichtsverteilungen unterschiedlich ausgeprägter Lkw dargestellt. Der Lkw Typ 98 mit einem zulässigen Gesamtgewicht von $\mu_2 \approx 400 \text{ kN}$ und Beladungsgrad $\beta \approx 0,4$ entspricht den in Abschnitt 3.2 beispielhaft betrachteten Fahrzeugkollektiven.

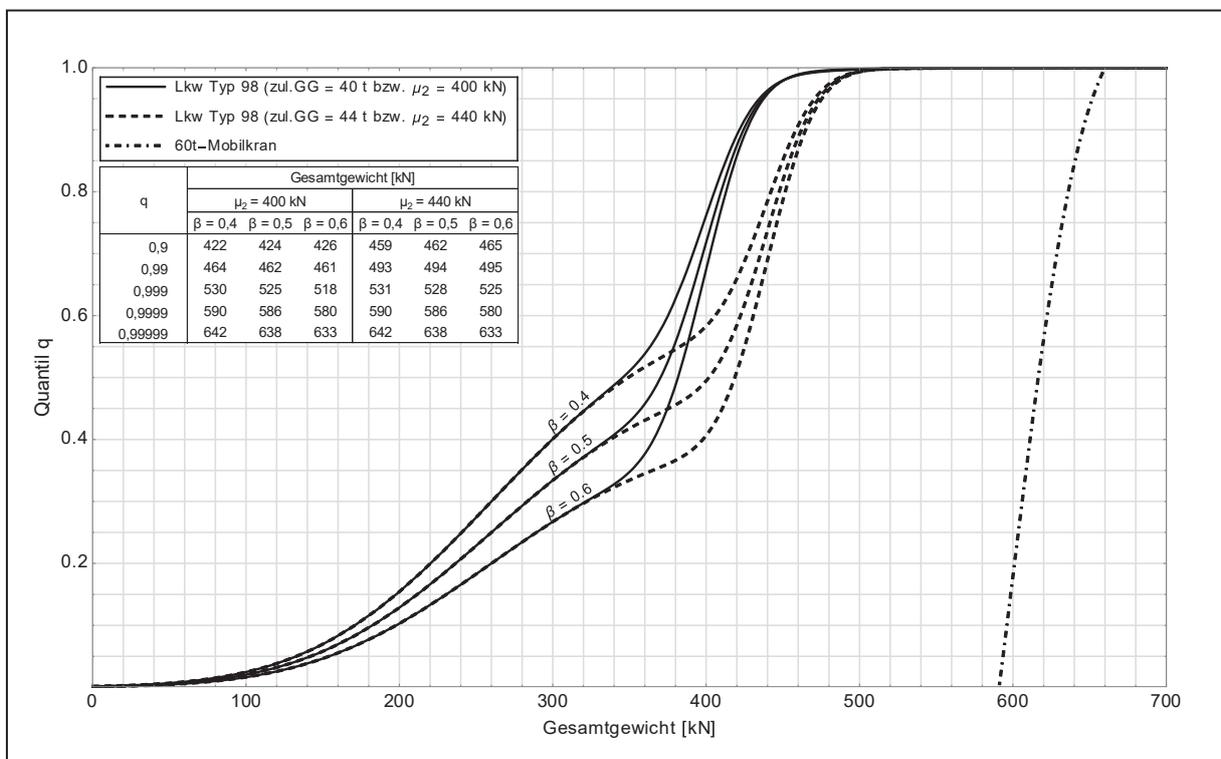


Abbildung 3.37: Verteilungsfunktionen für das Gesamtgewicht eines Lkw Typ 98 mit $\mu_1 = 260 \text{ kN}$, $\mu_2 = 400 \text{ kN}$ bzw. 440 kN , $\sigma_1 = 92,0 \text{ kN}$, $\sigma_2 = 24,8 \text{ kN}$ und variablem Anteil beladener Lkw β sowie eines 60t-Mobilkrans mit $\mu = 600 \text{ kN}$, $\sigma = 36 \text{ kN}$, $x_u = 591 \text{ kN}$ und $x_o = 660 \text{ kN}$

3.4.2 Beispiel

Das vereinfachte Rechenverfahren wird im Folgenden beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit einer Spannweite von $L = 50 \text{ m}$ und zweispurigem Richtungsverkehr dargestellt. Einwirkungsseitig werden der „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ sowie die Parameter der Verkehrszustände analog zu Abschnitt 3.2 angesetzt. Die mittlere Häufigkeit der maßgebenden extremen Laststellung, vgl. Abbildung 3.38, beträgt:

$$\begin{aligned}
 n \approx & \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85 \\
 & \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{6}}_{\text{sechs mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \quad (3.46) \\
 & \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 74
 \end{aligned}$$

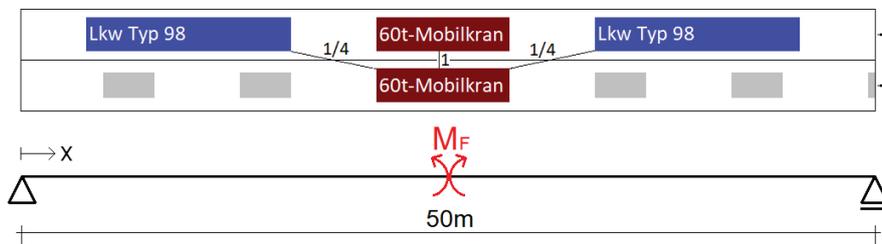


Abbildung 3.38: Maßgebende extreme Laststellung
(Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, zweispuriger Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)

Anhand der Näherung in Abbildung 3.36 bzw. Gleichung (3.45) ergibt sich damit ein gemeinsames Quantil der unterschiedlichen Gesamtgewichtsverteilungen von $q = 0,935$. Daraus resultiert wiederum entsprechend Abbildung 3.37 das Gesamtgewicht der Lkw Typ 98 von 435 kN sowie der 60t-Mobilkräne von 650 kN . Mit Hilfe der Lastkoeffizienten, bestehend aus den Anteilen der Längseinflusslinie $\sum \delta_j \cdot \eta_L$ und Querverteilungslinie η_Q sowie dem Schwingbeiwert φ , berechnet sich der charakteristische Wert für das Feldmoment mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren zu:

$$\begin{aligned}
 M_k = & \underbrace{\begin{pmatrix} 435 \text{ kN} \\ 650 \text{ kN} \\ 435 \text{ kN} \\ 650 \text{ kN} \end{pmatrix}^T}_{\text{Gesamtgewichte}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{\sum \delta_j \cdot \eta_L}{\text{kNm}} \cdot \frac{\eta_Q}{0,589} \cdot \frac{\varphi}{1,0} \\ 5,173 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,589 \cdot 1,0 \\ 11,36 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,589 \cdot 1,0 \\ 4,957 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,589 \cdot 1,0 \\ 11,36 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,482 \cdot 1,0 \end{pmatrix}}_{\text{Lastkoeffizienten}} = 10.504 \text{ kNm} \quad (3.47)
 \end{aligned}$$

Die Langzeit-Monte-Carlo-Simulation liefert zum Vergleich einen charakteristischen Wert von 11.020 kNm , d.h. eine Abweichung von lediglich ca. 5%.

3.5 Schlussfolgerungen

Bei der Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung ist es angesichts der geringen mittleren Häufigkeiten der extremen Laststellungen mit genehmigungspflichtigem Schwerverkehr unwahrscheinlich, davon in einem Zeitraum von wenigen Monaten oder Jahren genügend Stichproben (im Endbereich der Extremwertverteilung) für eine exakte statistische Extrapolation aufzuzeichnen. Speziell bei objektspezifischen Untersuchungen bietet sich jedoch eine Kombination unterschiedlicher Methoden an. WiM- oder BWiM-Anlagen liefern je nach Verkehrsaufkommen bereits nach wenigen Monaten und spätestens nach einer ca. einjährigen Messung sehr gute Informationen zum Fahrzeugkollektiv. Die Vielzahl möglicher Laststellungen mit unterschiedlichen Kombinationen von Fahrzeugtypen kann auf solchen Messungen aufbauend in relativ kurzer Zeit mit einer Verkehrslastsimulation abgedeckt werden. Mit Hilfe der hier erarbeiteten analytischen Lösung steht nun eine Alternative zu vorstehenden Ansätzen zur Verfügung, welche auch ohne Verfügbarkeit komplexer Verkehrslastsimulationsprogramme die Ermittlung realitätsnaher extremer Verkehrsbeanspruchungen bzw. charakteristischer Werte ermöglicht.

Bei einer probabilistischen Nachweisführung lässt sich die Verteilung der Extrema in einem Bezugszeitraum entsprechend der Nutzungsdauer, wie zum Beispiel 100-Jahres-Extrema, über unterschiedliche Herangehensweisen bestimmen:

- Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen wie in Abschnitt 3.2.2, welche jedoch mit enormem Aufwand verbunden sind.
- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Verteilung der Extrema eines kürzeren Beobachtungszeitraums, wie zum Beispiel Tages- oder Wochen-Extrema, in den Bezugszeitraum zu extrapolieren. Dabei treten jedoch umso größere Unsicherheiten auf, je größer das Verhältnis von Bezugs- zu Beobachtungszeitraum ist, vgl. Abbildung 2.36 und Tabelle 2.9. Die Extrema kurzer Beobachtungszeiträume folgen im Regelfall einer mehrmodalen Verteilung. Dies resultiert aus zwei Aspekten der analytischen Lösung. Einerseits sind bei einem Großteil der Laststellungen die Beanspruchungsverteilung $F(x)$ und dadurch bei geringer mittlerer Häufigkeit n auch deren Extrema $F(x)^n$ mehrmodal. Andererseits bedingen geringe mittlere Häufigkeiten auch, dass die betreffenden extremen Laststellungen nicht in jedem Beobachtungszeitraum auftreten und sich dadurch separate Verteilungen im oberen Bereich der Extrema bilden. Aufgrund der Vielzahl möglicher Laststellungen ist es unmöglich, eine allgemeingültige Verteilungsfunktion zur exakten Extrapolation aus kurzen Beobachtungszeiträumen abzuleiten.

- Alternativ kann die Verteilung der Extrema im Bezugszeitraum mit Hilfe der hier erarbeiteten analytischen Lösung auch vereinfacht unter Annahme einer Gumbel-Verteilung bestimmt werden. Dazu ist der charakteristische Wert als Quantil der Verteilung (hier das 90,5%-Quantil der 100-Jahres-Extrema bei einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren) zu bestimmen und der Variationskoeffizient anhand vergleichbarer Simulationsergebnisse abzuschätzen, vgl. Abschnitt 3.2.2.3. Einschränkend ist diese Vereinfachung jedoch lediglich im Langstreckenverkehr anwendbar, wie die folgende Erläuterung zeigt:
 - a) Bezüglich des Verkehrsszenarios „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ ist aus den Simulationsergebnissen in Abschnitt 3.2.2.3 bzw. Anhang D ersichtlich, dass die Verteilung der 100-Jahres-Extrema stets einmodal ist. Der Variationskoeffizient der 100-Jahres-Extrema ist verhältnismäßig klein und streut in einem Bereich $v = 0,005 \dots 0,04$ mit einem Mittelwert $\bar{v} \approx 0,03$. Die extremen und maßgebenden extremen Laststellungen in Abschnitt 3.2.3 bestehen im überwiegenden Teil der Fälle aus einer Kombination aus Lkw Typ 98 und dem Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs (hier der 60t-Mobilkran). Für Erstere wird ein doppelnormalverteiltes und für Zweitere ein normalverteiltes Gesamtgewicht mit unterer und oberer Grenze angenommen. Die Verteilung der Extrema resultiert daher aus einer kombinierten Verteilung, die nicht nach oben begrenzt ist und schnell gegen Eins konvergiert. Nach der Extremwerttheorie in Abschnitt 2.2.1 kann damit für die 100-Jahres-Extrema eine Gumbel-Verteilung angenommen werden.
 - b) Bezüglich des Verkehrsszenarios „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“ zeigen die Simulationsergebnisse in Abschnitt 3.2.2.3 bzw. Anhang D, dass die Verteilung der 100-Jahres-Extrema teilweise noch mehrmodal ist. Dies resultiert daraus, dass analog zu den Extrema kurzer Beobachtungszeiträume die mittleren Häufigkeiten n der extremen Laststellungen hier zu gering sind, um eine Konvergenz zu einer Gumbel-Verteilung wie im Langstreckenverkehr nach der Extremwerttheorie in Abschnitt 2.2.1 zu ermöglichen.

Ergänzend sei erwähnt, dass im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse die Verteilung der Extrema im Bezugszeitraum infolge unterschiedlicher Prognoseszenarien betrachtet und zu einer kombinierten Verteilung zusammengeführt werden sollte, wie der Vorschlag in [Böni13] zeigt. Daraus resultiert im Regelfall eine Erhöhung des Variationskoeffizienten. Zusätzlich sind für die Basisvariable der Verkehrsbeanspruchung auch Modellunsicherheiten zu berücksichtigen.

Kapitel 4

Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

4.1 Erläuterung des Rechenmodells

4.1.1 Allgemeines

Die im Folgenden vorgestellte analytische Lösung basiert auf einer probabilistischen Analyse der Überfahrten ermüdungsrelevanter Laststellungen und leitet aus diesen das Mehrstufenkollektiv der Verkehrsbeanspruchung für eine beliebige Nutzungsdauer ab. Dieses dient unter anderem als Grundlage zur Ermittlung schädigungsäquivalenter Schwingbreiten. In Abbildung 4.1 wird das Rechenmodell schematisch dargestellt. Darauf aufbauend zeigt Abbildung 4.4 eine vereinfachte Approximation der analytischen Lösung für eine Vielzahl an Laststellungen. Die Zusammenhänge werden im Folgenden erläutert.

Grundlage der analytischen Lösung ist die separate Berücksichtigung aller auftretenden und maßgebenden Schwingspiele. Die Verteilungsdichte der Schwingbreiten $f_{k,l}(\Delta M)$ eines Schwingspiels l infolge der Überfahrt einer Laststellung k resultiert aus der Gesamtgewichtsverteilung der betrachteten Lkw sowie deren Stellung an Hoch- und Tiefpunkten entlang der Einflusslinie. Die mittlere Häufigkeit n_k einer Laststellung resultiert aus dem Verkehrsaufkommen, der Verkehrszusammensetzung und der Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Verkehrszustände. Das Mehrstufenkollektiv ergibt sich aus der Summe der n_k Realisationen aller Zufallsvariablen $f_{k,l}(\Delta M)$.

Bei der Approximation der analytischen Lösung werden ausschließlich die Schwingbreitenverteilungen $f(\Delta M)$ bzw. $F(\Delta M)$ infolge der Überfahrt ausgewählter Laststellungen betrachtet,

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

um markante Punkte des Mehrstufenkollektivs zu bestimmen. Alle übrigen Bereiche des Mehrstufenkollektivs werden vereinfacht abgebildet.

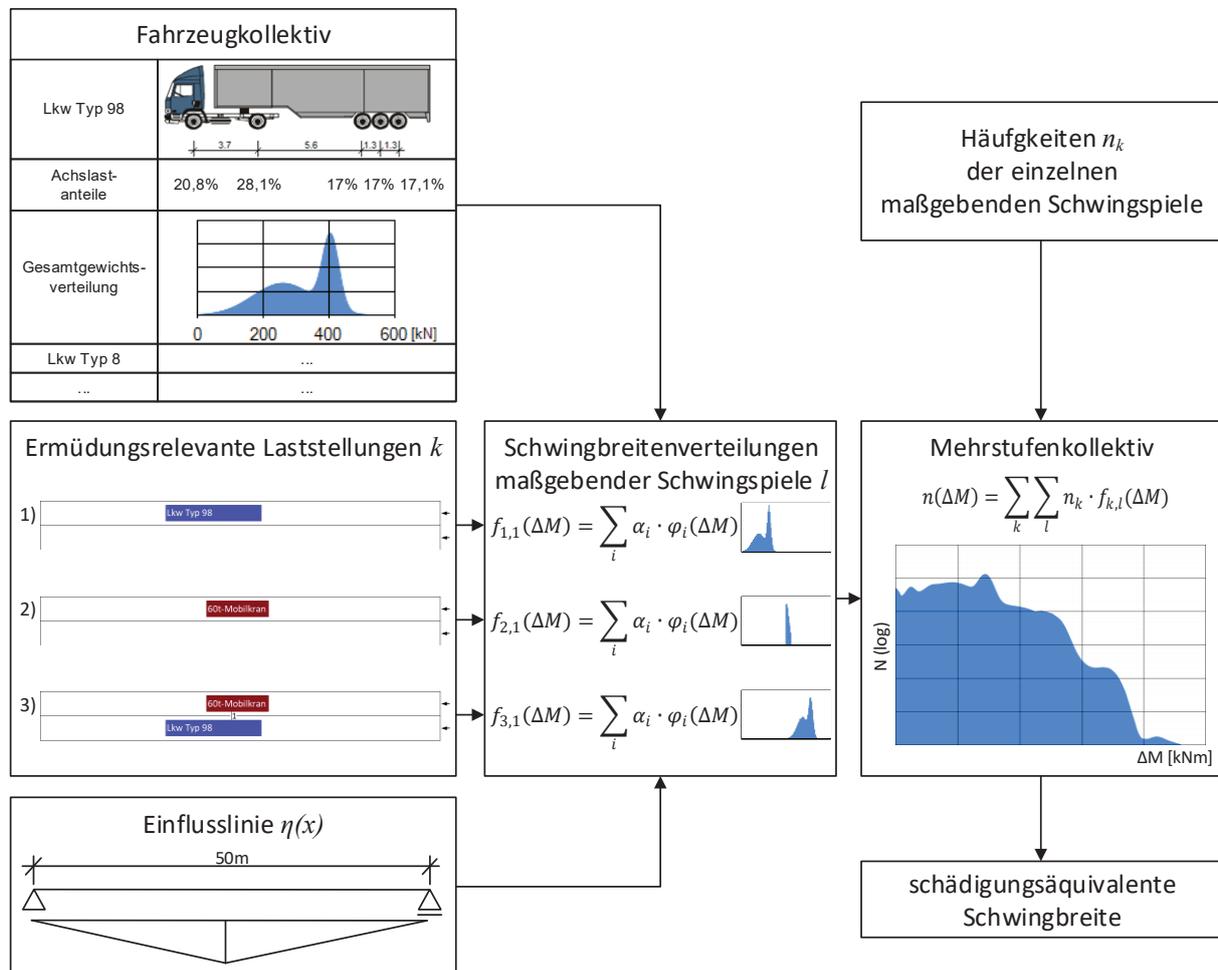


Abbildung 4.1: Schema der analytischen Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

4.1.2 Ermittlung der Schwingbreitenverteilung ermüdungsrelevanter Laststellungen

Hinsichtlich der zu untersuchenden Mehrstufenkollektive der Verkehrsbeanspruchung muss zunächst geklärt werden, wie die einzelnen Schwingspiele infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellungen verteilt sind. Analog zu Abschnitt 3.1.2 ist hier der funktionale Zusammenhang zur Berechnung der Schwingbreite ΔM für jedes maßgebende Schwingspiel zu bestimmen. Dieser ergibt sich durch Auswertung der Einflusslinie und lautet im allgemeinen Fall:

$$\begin{aligned}
 \Delta M &= \sum_{\substack{i=1 \\ (Lkw)}}^n \left[P_i \cdot \left(\max_x \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ (Achsen)}}^m \delta_{i,j} \cdot \eta_L(x_{i,j}) \cdot \eta_Q(y_{i,j}) \right\} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \min_x \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ (Achsen)}}^m \delta_{i,j} \cdot \eta_L(x_{i,j}) \cdot \eta_Q(y_{i,j}) \right\} \right) \cdot \varphi_{fat} \right] \\
 &= \underbrace{\begin{pmatrix} P_{Lkw\ 1} \\ \vdots \\ P_{Lkw\ n} \end{pmatrix}}_{\text{Zufallsgrößen}}^T \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta \left\{ \sum_j \delta_{1,j} \cdot \eta_L(x_{1,j}) \cdot \eta_Q(y_{1,j}) \right\} \cdot \varphi_{fat} \\ \vdots \\ \Delta \left\{ \sum_j \delta_{n,j} \cdot \eta_L(x_{n,j}) \cdot \eta_Q(y_{n,j}) \right\} \cdot \varphi_{fat} \end{pmatrix}}_{\substack{\text{konstante Lastkoeffizienten der Lkw} \\ \text{zur Berechnung der Schwingbreite infolge der} \\ \text{ungünstigsten Laststellungen entlang der Einflusslinie}}}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

- mit:
- P : Zufallsgröße des Fahrzeugesamtgewichtes
 - δ : Achslastanteil
 - $\eta_L(x)$: Längseinflusslinie
 - $\eta_Q(y)$: Querverteilungslinie
 - φ_{fat} : schädigungsäquivalenter Schwingbeiwert

Die Schwingbreite ΔM ist eine lineare Kombination der Zufallsgrößen P_i , analog zur Gleichung (3.1). Die mathematischen Grundlagen zur Bestimmung der Verteilung der Schwingbreiten $F(\Delta M)$ sind dadurch identisch zu den bekannten Zusammenhängen für die Verteilung der Beanspruchung $F(M)$ in Abschnitt 3.1.2. Für den Fall doppelnormalverteilter Fahrzeugesamtgewichte resultiert:

$$F(\Delta M) = \sum_{i=1}^{2^n} \alpha_{\Delta M,i} \cdot \Phi(\Delta M, \mu_{\Delta M,i}, \sigma_{\Delta M,i}) \tag{4.2}$$

Die Verteilungsdichte der Schwingbreiten $f(\Delta M)$ ergibt sich analog:

$$f(\Delta M) = \sum_{i=1}^{2^n} \alpha_{\Delta M,i} \cdot \varphi(\Delta M, \mu_{\Delta M,i}, \sigma_{\Delta M,i}) \tag{4.3}$$

4.1.3 Ermittlung der Häufigkeit ermüdungsrelevanter Laststellungen

Weiterhin ist zu klären, wie oft die einzelnen Schwingspiele infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellungen auftreten. Die gesuchten mittleren Häufigkeiten berechnen sich analog zu Abschnitt 3.1.3. Wesentliche Faktoren sind hier der *DTV-SV*, Fahrzeughäufigkeiten, Anzahl gleichzeitig auftretender Fahrzeuge, Überholwahrscheinlichkeit, Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr, mittlere Geschwindigkeiten sowie die Nutzungsdauer. Regelmäßige Staus werden hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung analog zu bisherigen Untersuchungen in [Merz94], [Dani94] und [GKFB18] nicht betrachtet, da solche im Sinne der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur im Regelfall nicht dauerhaft auftreten. Die Bestimmung der mittleren Häufigkeiten erfolgt im Folgenden beispielhaft für wesentliche ermüdungsrelevante Laststellungen.

4.1.3.1 Ein Lkw im fließenden Verkehr

Die mittlere Häufigkeit der Überfahrt eines einzelnen Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr, vgl. Abbildung 4.2, ergibt sich pro Tag nach Gleichung (4.4). Der Anteil des Lkw Typ 98 im Fahrzeugkollektiv wird mit 59% angenommen.

$$n = 0,59 \cdot DTV-SV \quad (4.4)$$



Abbildung 4.2: Ermüdungsrelevante Laststellung eines einzelnen Lkw im fließenden Verkehr

4.1.3.2 Zwei Lkw hintereinander im fließenden Verkehr

Die mittlere Häufigkeit einer Überfahrt zweier Lkw hintereinander im fließenden Verkehr, vgl. Abbildung 4.3, berechnet sich pro Tag nach Gleichung (4.5). Die Wahrscheinlichkeit, dass genau zwei Lkw Typ 98 hintereinander auftreten, liegt bei $0,59^2 = 0,348$. Zusätzlich zu berücksichtigen ist eine Fahrzeugabstandswahrscheinlichkeit. Diese ist zum einen abhängig von dem Bereich zulässiger Fahrzeugabstände um den tatsächlich ungünstigsten Abstand, vergleichbar mit der zulässigen Lage einer extremen Laststellung in Abschnitt 3.1.3.3. Zum anderen hat auch das zugrundeliegende bzw. gewählte Modell der Verteilung der Fahrzeugabstände einen großen Einfluss, siehe Abschnitt 2.1.2.3.1. Anhand der Quantile der Fahrzeugabstandsverteilung lässt sich die Fahrzeugabstandswahrscheinlichkeit vereinfachend mit einer oberen Grenze von 0,1 bis 0,3 gut abschätzen.

$$n = 0,59^2 \cdot \overbrace{0,2}^{\text{Fahrzeugabstands-}} \cdot \overbrace{w}^{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot DTV-SV \quad (4.5)$$



Abbildung 4.3: Ermüdungsrelevante Laststellung zweier Lkw hintereinander im fließenden Verkehr

4.1.4 Ermittlung der Mehrstufenkollektive der Verkehrsbeanspruchung

Mit Hilfe der Grundlagen der vorherigen Abschnitte lässt sich schließlich das Mehrstufenkollektiv der Verkehrsbeanspruchung $n(\Delta M)$ für eine beliebige Nutzungsdauer formulieren, indem die Anteile aller maßgebenden Schwingspiele l infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellungen k addiert werden, vgl. Gleichung (4.6). Die mittleren Häufigkeiten n_k sind dabei auf die gewählte Nutzungsdauer zu beziehen.

$$\begin{aligned} n(\Delta M) &= \sum_k \sum_l n_k \cdot f_{k,l}(\Delta M) \\ &= n_1 \cdot f_{1,1}(\Delta M) + n_2 \cdot f_{2,1}(\Delta M) + n_3 \cdot f_{3,1}(\Delta M) + \dots \end{aligned} \quad (4.6)$$

Die schädigungsäquivalente Schwingbreite ΔM_E mit der frei definierbaren Schwingspielzahl n_E als Bezugspunkt ergibt sich analog zu $\Delta \sigma_E$ basierend auf Gleichung (2.41) aus:

$$\Delta M_E = \left(\frac{1}{n_E} \cdot \sum n_i \cdot \Delta M_i^m \right)^{1/m} = \left(\frac{1}{n_E} \cdot \int_{\Delta M=0}^{\infty} n(\Delta M) \cdot \Delta M^m d\Delta M \right)^{1/m} \quad (4.7)$$

4.1.5 Approximation der Mehrstufenkollektive für eine Vielzahl an Laststellungen

Der in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.4 beschriebene Lösungsweg ist bei einer begrenzten Anzahl möglicher Laststellungen gut anwendbar. Im mehrspurigen Verkehr steigt jedoch deren Anzahl durch die Kombination unterschiedlicher Fahrzeugtypen enorm an, so dass die separate Berücksichtigung aller Anteile im Mehrstufenkollektiv zu einem unüberschaubaren Aufwand führt. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine vereinfachte Beschreibung der Mehrstufenkollektive entwickelt.

Eine Analyse unterschiedlicher Mehrstufenkollektive der Verkehrsbeanspruchung zeigt, dass diese im Allgemeinen eine sehr ähnliche Form aufweisen, vgl. Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.7 bzw. [GKFB18]. Die einzelnen Komponenten resultieren sowohl aus der Überfahrt einzelner Fahrzeuge als auch von Gruppen an Fahrzeugen im Überhol- oder Kolonnenverkehr. Da große Schwingbreiten einen überproportional großen Einfluss auf die Ermüdungsbeanspruchung haben, sind die zugehörigen Verkehrssituationen vorrangig zu betrachten. Der Grundgedanke der

Vereinfachung ist daher, den Funktionswert des Mehrstufenkollektivs an zwei markanten Punkten direkt zu berechnen und die verbleibenden Bereiche über einfache Funktionen abzubilden, vgl. Abbildung 4.4.

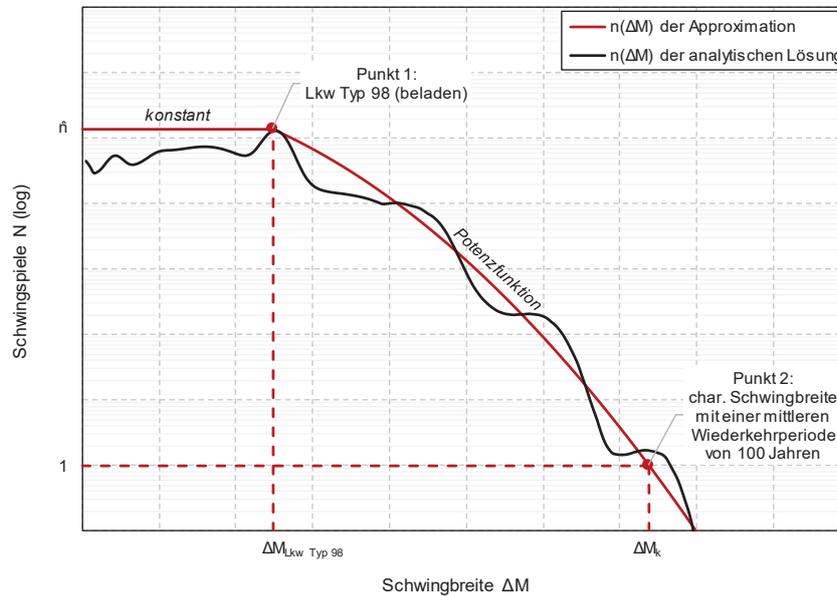


Abbildung 4.4: Approximation der analytischen Lösung des Mehrstufenkollektivs im halblogarithmischen Raum

Punkt 1 repräsentiert den Modalwert der Schwingbreitenverteilung, der durch die Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzeln beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ resultiert. Die zugehörige Schwingbreite $\Delta M_{Lkw\ Typ\ 98}$ und Anzahl an Schwingspielen $n(\Delta M_{Lkw\ Typ\ 98}) = \hat{n}$ können beide am entsprechenden Teilkollektiv dieser Laststellung ermittelt werden, vgl. Abschnitt 4.1.1 bis 4.1.4:

$$n_{Lkw\ Typ\ 98}(\Delta M) = n_{Lkw\ Typ\ 98} \cdot f_{Lkw\ Typ\ 98}(\Delta M) \quad (4.8)$$

Punkt 2 entspricht einer maximal zu erwartenden Schwingbreite, d.h. einer charakteristischen Schwingbreite ΔM_k mit einer mittleren Wiederkehrperiode entsprechend der Nutzungsdauer von hier 100 Jahren und einer Anzahl an Schwingspielen von $n(\Delta M_k) = 1$. Die charakteristische Schwingbreite resultiert aus einer Extremwertanalyse. Die Extremwertverteilung der Schwingbreiten $F_{max}(\Delta M)$ lässt sich analog zu Kapitel 3 für beliebige Bezugszeiträume formulieren, vgl. Gleichung (4.9). Die Häufigkeiten n_k sind dabei auf den beliebig gewählten Bezugszeitraum zu beziehen. Die gesuchte charakteristische Schwingbreite mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 100 Jahren ist als 99%-Quantil in einem Bezugszeitraum von einem Jahr (Jahres-Extrema) definiert und resultiert entsprechend aus Gleichung (4.10). Für andere Bezugszeiträume lässt sich das Quantil q nach Gleichung (2.29) umrechnen.

$$F_{max}(\Delta M) = \prod_k \prod_l F_{k,l}(\Delta M)^{n_k} \quad (4.9)$$

$$= F_{1,1}(\Delta M)^{n_1} \cdot F_{2,1}(\Delta M)^{n_2} \cdot F_{3,1}(\Delta M)^{n_3} \cdot \dots$$

$$F_{max}(\Delta M) = q \quad \rightarrow \quad \Delta M_k \quad (4.10)$$

Der Bereich kleiner Schwingbreiten bis Punkt 1 wird vereinfachend konstant angenommen, da sich eine detailliertere Abbildung dieser Schwingbreiten im Ergebnis nur geringfügig auswirkt.

Der Bereich zwischen den Punkten 1 und 2 wird über eine Funktion $y(x)$ abgebildet, die im halblogarithmischen Raum eine Potenzfunktion $Y(x)$ darstellt:

$$Y(x) = \log a + b \cdot \log e \cdot x^c \quad (4.11)$$

$$y(x) = 10^{Y(x)} = a \cdot e^{b \cdot x^c} \quad (4.12)$$

Die Bedingungen für die beiden Zwangspunkte 1 und 2 lauten:

$$n(\Delta M_{Lkw \ Typ \ 98}) = \hat{n} \quad (4.13)$$

$$n(\Delta M_k) = 1 \quad (4.14)$$

Durch Einsetzen dieser Bedingungen in Gleichung (4.12) resultiert insgesamt Gleichung (4.15) für die Approximation des Mehrstufenkollektivs. An dieser Stelle wird vorweggenommen, dass sich bei der späteren Kalibrierung dieser vereinfachten Funktion ein Exponent von $c = 1,3$ als optimal erwiesen hat.

$$n(\Delta M) = \begin{cases} \hat{n} & \text{für } \Delta M \leq \Delta M_{Lkw \ Typ \ 98} \\ \hat{n} \cdot \left(\frac{1}{\hat{n}}\right)^{\frac{\Delta M^{1,3} - \Delta M_{Lkw \ Typ \ 98}^{1,3}}{\Delta M_k^{1,3} - \Delta M_{Lkw \ Typ \ 98}^{1,3}}} & \text{für } \Delta M > \Delta M_{Lkw \ Typ \ 98} \end{cases} \quad (4.15)$$

4.1.6 Beispiel

Die analytische Lösung wird im Folgenden beispielhaft für das Feldmoment eines Zweifeldträgers mit den Spannweiten $L = 50\text{ m} + 50\text{ m}$ und einer Richtungsfahrbahn dargestellt. Das betrachtete Fahrzeugkollektiv ist identisch zum „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ in Tabelle A.1 (Anhang A).

4.1.6.1 Punkt 1

Abbildung 4.5 zeigt schematisch die Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzeln Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“. Der Lkw Typ 98 tritt im Fahrzeugkollektiv zu 58,9% auf und besitzt ein doppelnormalverteiltes Gesamtgewicht mit $\mu_1 = 259,6\text{ kN}$; $\sigma_1 = 92\text{ kN}$; $\mu_2 = 405,3\text{ kN}$; $\sigma_2 = 24,8\text{ kN}$; $\alpha = 0,62$; $\beta = 0,38$.

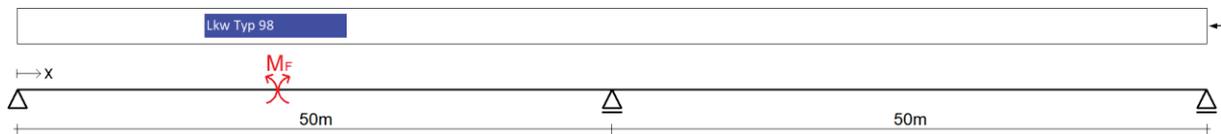


Abbildung 4.5: Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzeln Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ (Zweifeldträger, $L = 50\text{ m} + 50\text{ m}$, Feldmoment, einspuriger Verkehr)

Der funktionale Zusammenhang für das Schwingspiel des Feldmomentes infolge dieser Laststellung ergibt sich durch Auswertung der Einflusslinie in Abbildung 4.6 zu:

$$\Delta M = P_{Lkw\ 1} \cdot (8,347 + 2,028) \cdot \overset{\varphi_{fat}}{\sqrt{1,2}} \quad (4.16)$$

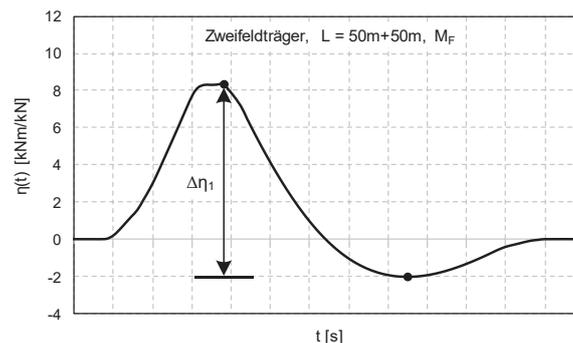


Abbildung 4.6: Schwingspiel $\Delta\eta$ der Einflusslinie des Feldmomentes infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzeln Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“

Da die Laststellung aus lediglich einem Lkw mit doppelnormalverteiltem Gesamtgewicht besteht, ist das resultierende Schwingspiel ebenfalls doppelnormalverteilt. Die Mittelwerte $\mu_{\Delta M,i}$, Standardabweichungen $\sigma_{\Delta M,i}$ und Wichtungen $\alpha_{\Delta M,i}$ für $i = 1 \dots 2$ ergeben sich wie folgt:

$$\mu_{\Delta M} = \begin{pmatrix} \mu_{\Delta M,1} \\ \mu_{\Delta M,2} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix}}_{\text{Kombinationsmatrix}} \cdot (8,347 + 2,028) \cdot 1,2 = \begin{pmatrix} 3.232 \\ 5.046 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

$$\sigma_{\Delta M} = \begin{pmatrix} \sigma_{\Delta M,1} \\ \sigma_{\Delta M,2} \end{pmatrix} = \sqrt{\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}^2 \cdot ((8,347 + 2,028) \cdot 1,2)^2} = \begin{pmatrix} 1.145 \\ 309 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

$$\alpha_{\Delta M} = \begin{pmatrix} \alpha_{\Delta M,1} \\ \beta_{\Delta M,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,62 \\ 0,38 \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Die Verteilungsdichte $f(\Delta M)$ der Schwingbreiten des Feldmomentes ΔM infolge der Überfahrt dieser Laststellung ergibt sich zu:

$$f(\Delta M) = \sum_{i=1}^2 \alpha_{\Delta M,i} \cdot \varphi(\Delta M, \mu_{\Delta M,i}, \sigma_{\Delta M,i}) \quad (4.20)$$

mit:
$$\varphi(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Unter Annahme einer Nutzungsdauer von 100 Jahren berechnet sich die mittlere Häufigkeit n dieser Laststellung analog zu Gleichung (4.4):

$$\begin{aligned} n &\approx 0,589 \cdot \frac{10.000}{DTV-SV} \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} \\ &= 147,25 \cdot 10^6 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Das Teilkollektiv $n(\Delta M)$ dieser Laststellung, vgl. Abbildung 4.7, folgt aus:

$$n(\Delta M) = n \cdot f(\Delta M) \quad (4.22)$$

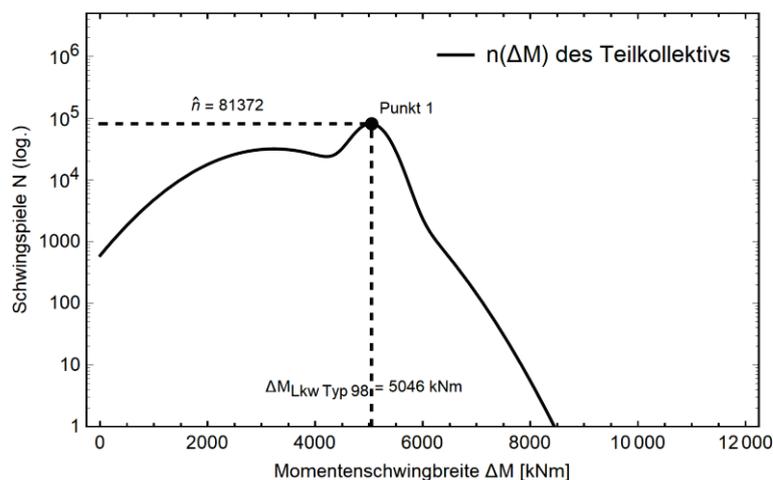


Abbildung 4.7: Grafische Darstellung des Teilkollektivs $n(\Delta M)$ infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“

Für die Approximation des gesamten Mehrstufenkollektivs folgt aus dem Teilkollektiv direkt die Lage des markanten Punkt 1 (beladener Lkw Typ 98), mit:

$$\Delta M_{Lkw\ Typ\ 98} = \mu_{\Delta M,2} = 5.046\ kNm \quad (4.23)$$

$$\hat{n} = n(\Delta M_{Lkw\ Typ\ 98}) = 81.372 \quad (4.24)$$

4.1.6.2 Punkt 2

Zur Ermittlung des markanten Punkt 2 (maximal zu erwartende Schwingbreite) wird die Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner 60t-Mobilkran im fließenden Verkehr“ betrachtet, vgl. Abbildung 4.8. Der 60t-Mobilkran tritt im betrachteten Fahrzeugkollektiv zu 0,5% auf, wobei angenommen wird, dass dessen Gesamtgewicht einer abgeschnittenen Normalverteilung folgt, mit $\mu = 600\ kN$; $\sigma = 36\ kN$; $x_u = 591\ kN$; $x_o = 660\ kN$.

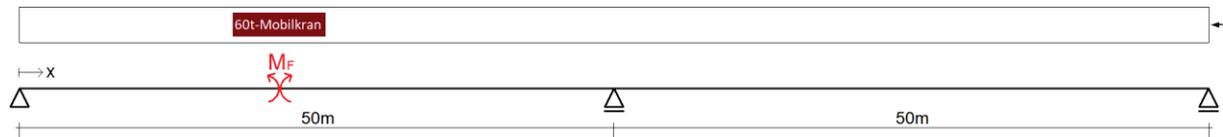


Abbildung 4.8: Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner 60t-Mobilkran im fließenden Verkehr“ (Zweifeldträger, $L = 50\ m + 50\ m$, Feldmoment, einspuriger Verkehr)

Der funktionale Zusammenhang für das Schwingenspiel des Feldmomentes infolge dieser Laststellung ergibt sich durch Auswertung der Einflusslinie zu:

$$\Delta M = P_{Lkw\ 1} \cdot (9,250 + 2,077) \cdot \overset{\varphi_{fat}}{\hat{1,2}} \quad (4.25)$$

Da die Laststellung aus lediglich einem Lkw besteht, folgt das resultierende Schwingenspiel analog zum Gesamtgewicht einer abgeschnittenen Normalverteilung. Die Parameter der entsprechenden Verteilungsfunktion $F(\Delta M)$ der Schwingbreiten des Feldmomentes ΔM infolge der Überfahrt dieser Laststellung ergeben sich wie folgt:

$$\mu_{\Delta M} = \mu \cdot (9,250 + 2,077) \cdot 1,2 = 8.155 \quad (4.26)$$

$$\sigma_{\Delta M} = \sigma \cdot (9,250 + 2,077) \cdot 1,2 = 489 \quad (4.27)$$

$$x_{u,\Delta M} = x_u \cdot (9,250 + 2,077) \cdot 1,2 = 8.033 \quad (4.28)$$

$$x_{o,\Delta M} = x_o \cdot (9,250 + 2,077) \cdot 1,2 = 8.971 \quad (4.29)$$

Die mittlere Häufigkeit n der Laststellung in einem Bezugszeitraum von 100 Jahren berechnet sich analog zu Gleichung (4.4):

$$\begin{aligned}
 n &\approx 0,005 \cdot \frac{10.000}{DTV-SV} \cdot 250 \frac{\text{Werkstage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} \\
 &= 1,25 \cdot 10^6
 \end{aligned}
 \tag{4.30}$$

Die Verteilung der Extrema $F_{max}(\Delta M)$ im Bezugszeitraum von 100 Jahren ergibt sich durch Potenzieren der Verteilungsfunktion $F(\Delta M)$ mit der Häufigkeit n . Die gesuchte charakteristische Schwingbreite mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 100 Jahren entspricht dem 36,6%-Quantil der 100-Jahres-Extrema. Die resultierende Gleichung wird durch Iteration gelöst:

$$F_{max}(\Delta M) = F(\Delta M)^n = 0,366 \quad \rightarrow \quad \Delta M_k = 8.971 \text{ kNm} \tag{4.31}$$

Aufgrund der hohen mittleren Häufigkeit n entspricht die charakteristische Schwingbreite direkt der oberen Grenze der Verteilungsfunktion $F(\Delta M)$.

4.1.6.3 Approximation des Mehrstufenkollektivs

Durch Einsetzen der markanten Punkte 1 und 2 in Gleichung (4.15) resultiert insgesamt die Approximation des Mehrstufenkollektivs für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren, vgl. Abbildung 4.9:

$$n(\Delta M) = \begin{cases} 81.372 & \text{für } \Delta M \leq 5.046 \text{ kNm} \\ 81.372 \cdot \left(\frac{1}{81.372}\right)^{\frac{\Delta M^{1,3} - (5.046 \text{ kNm})^{1,3}}{(8.971 \text{ kNm})^{1,3} - (5.046 \text{ kNm})^{1,3}}} & \text{für } \Delta M > 5.046 \text{ kNm} \end{cases} \tag{4.32}$$

Die schädigungsäquivalente Schwingbreite ΔM_E mit einer Schwingspielzahl von $n_E = 2 \cdot 10^6$ ergibt sich bei einer konstanten Neigung der Wöhlerlinie von $m = 5$ zu:

$$\Delta M_E = \left(\frac{1}{n_E} \cdot \int_{\Delta M=0}^{\infty} n(\Delta M) \cdot \Delta M^m d\Delta M \right)^{1/m} = 11.325 \text{ kNm} \tag{4.33}$$

Die Langzeit-Monte-Carlo-Simulation liefert zum Vergleich eine schädigungsäquivalente Schwingbreite von 11.077 kNm, d.h. eine Abweichung von ca. 2%.

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

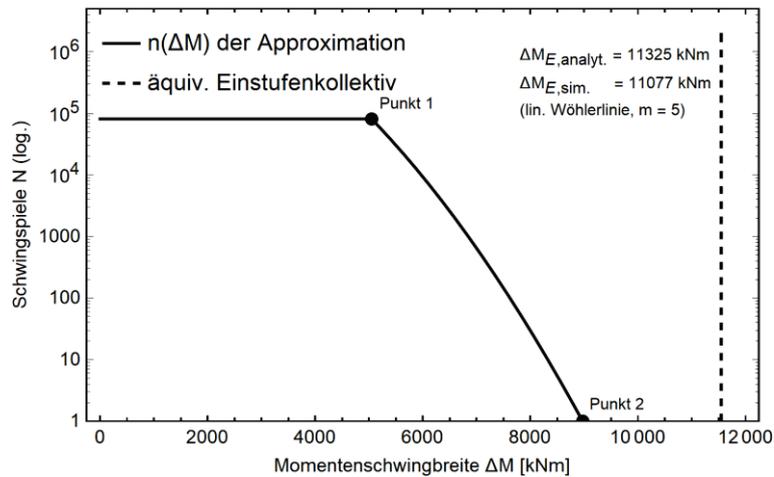


Abbildung 4.9: Grafische Darstellung des gesamten Mehrstufenkollektivs $n(\Delta M)$ für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren

Anzumerken ist, dass bei komplexeren Einflusslinien teilweise auch mehrere Schwingspiele infolge einer Überfahrt auftreten, vgl. Abbildung 4.10 am Beispiel des Stützmomentes eines Zweifeldträgers mit den Spannweiten $L = 50\text{ m} + 50\text{ m}$. Die Ergebnisse der folgenden Abschnitte bestätigen diesbezüglich, dass eine ausreichende Genauigkeit der schädigungsäquivalenten Schwingbreite erreicht wird, wenn für die markanten Punkte 1 und 2 ausschließlich das maßgebende Schwingspiel (hier die Schwingbreite $\Delta\eta_1$) der zugehörigen Laststellungen betrachtet wird.

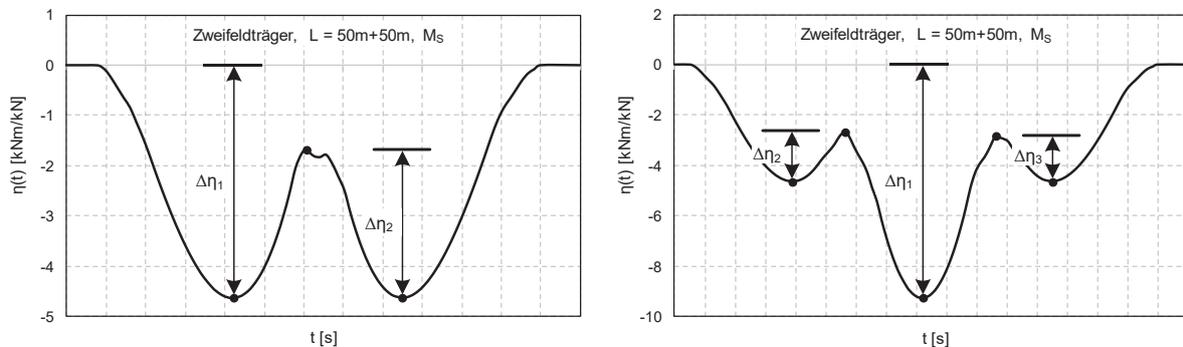


Abbildung 4.10: Schwingbreiten $\Delta\eta$ der Einflusslinie des Stützmomentes eines Zweifeldträgers infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellungen „einzeln Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ (links) und „zwei Lkw Typ 98 hintereinander im fließenden Verkehr“ (rechts)

4.2 Verifizierung des Rechenmodells

Zur Verifizierung des Rechenmodells werden Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen der Verkehrsbeanspruchung mit Hilfe des Simulationsprogramms PATLoB durchgeführt und deren Ergebnis mit der analytischen Lösung verglichen. Als Vergleichsgrundlage dienen schädigungsäquivalente Schwingbreiten ΔM_E mit einer Schwingspielzahl von $n_E = 2 \cdot 10^6$, einer konstanten Neigung der Wöhlerlinie von $m = 5$ und einer Nutzungsdauer von 100 Jahren.

4.2.1 Definition des Untersuchungsumfangs

Die Verifizierung erfolgt anhand eines Katalogs ausgewählter Brückentypen. Es werden Einfeldträger hinsichtlich ihres Feldmomentes und Zweifeldträger hinsichtlich ihres Feld- und Stützmomentes bei unterschiedlichen Spannweiten betrachtet, vgl. Tabelle 4.1. Je System wird zusätzlich eine unterschiedliche Anzahl und Anordnung der Fahrstreifen untersucht, vgl. Anhang B. Zur Beschreibung der statischen Systeme werden aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit vereinfachte Längseinfluss- und Querverteilungslinien verwendet.

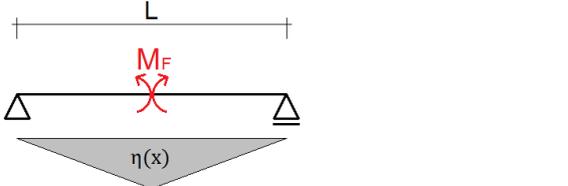
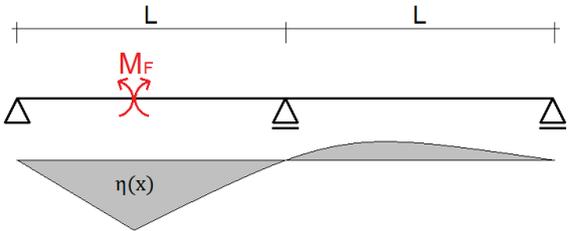
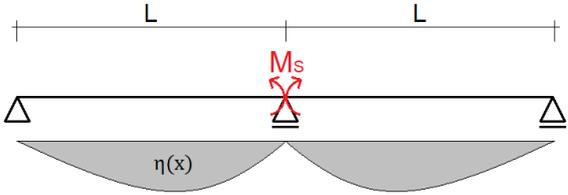
Einfeldträger M_F		$L = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ m}$
Zweifeldträger M_F		$L = 10, 20, 30, 50, 70 \text{ m}$
Zweifeldträger M_S		$L = 10, 20, 30, 50, 70 \text{ m}$

Tabelle 4.1: Untersuchungsumfang der statischen Systeme und betrachteten Schnittgrößen

Die betrachteten Fahrzeugkollektive „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ und „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“ werden in Anhang A detailliert dargestellt. Für Ersteres wird pro Richtung eine Verkehrsstärke von $DTV = 30.000$ und $DTV-SV = 10.000$ angenommen, bei Zweiterem $DTV = 10.000$ und $DTV-SV = 500$. In den Beispielen werden weiterhin, basierend auf den Erkenntnissen in Abschnitt 2.1, Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr entsprechend einer 3-parametrischen Log-Normalverteilung nach Abschnitt 2.1.2.3.1 bzw. Gleichung (2.2) bis

(2.5) und ein Anteil der einzelnen Spuren am gesamten Schwerverkehr bei 2-spurigem Richtungsverkehr von $HS/NS = 85\%/15\%$ angesetzt. Der schädigungsäquivalente Schwingbeiwert für Lkw im fließenden Verkehr wird vereinfachend konstant mit $\varphi_{fat} = 1,2$ angenommen, wobei anzumerken ist, dass hierfür auch komplexere Modelle existieren, vgl. Abschnitt 2.1.2.7, die vor allem in Abhängigkeit der Fahrbahnqualität teilweise zu abweichenden Werten führen. Regelmäßige Staus werden hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung nicht betrachtet, vgl. Abschnitt 4.1.3.

4.2.2 Referenzergebnisse aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen

Die Referenzergebnisse aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen werden in den folgenden Tabellen dargestellt. Den Ergebnissen liegt jeweils eine Simulationslänge von 100 x 1 Jahr zugrunde.

Fahrstreifenanordnung	Einfeldträger, ΔM_{Feld}				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 990 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.727 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 4.794 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 6.763 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 8.621 \text{ kNm}$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\Delta M_E = 955 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.622 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 4.580 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 6.387 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 8.026 \text{ kNm}$
2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 1.171 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 3.238 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 5.700 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 8.052 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 10.315 \text{ kNm}$

Tabelle 4.2: Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“

Fahrstreifenanordnung	Einfeldträger, ΔM_{Feld}				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 376 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.012 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.716 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.370 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.984 \text{ kNm}$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\Delta M_E = 369 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.001 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.711 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.370 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.969 \text{ kNm}$

Tabelle 4.3: Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“

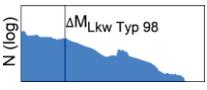
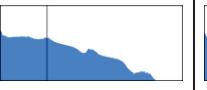
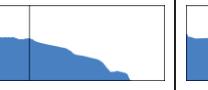
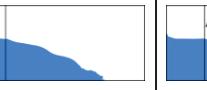
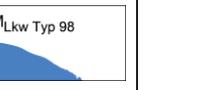
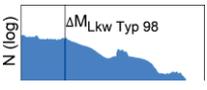
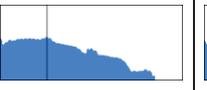
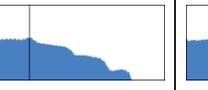
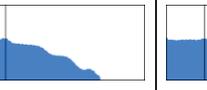
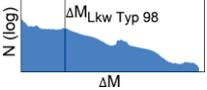
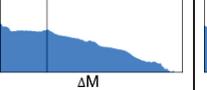
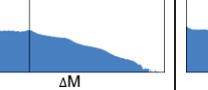
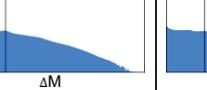
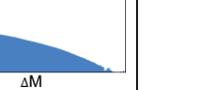
Fahrstreifenanordnung	Zweifeldträger, ΔM_{Feld}				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 895 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.684 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 4.626 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 8.081 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 11.578 \text{ kNm}$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\Delta M_E = 868 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.635 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 4.533 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 7.809 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 11.009 \text{ kNm}$
2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 1.057 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 3.210 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 5.552 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 9.794 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 14.225 \text{ kNm}$

Tabelle 4.4: Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“

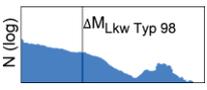
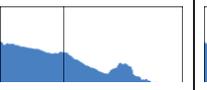
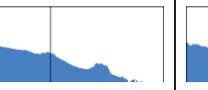
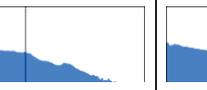
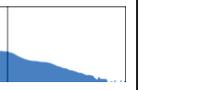
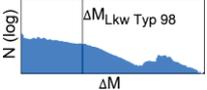
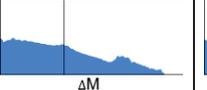
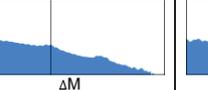
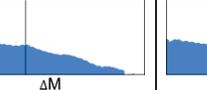
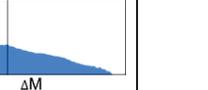
Fahrstreifenanordnung	Zweifeldträger, ΔM_{Feld}				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 348 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 995 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.671 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.877 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 4.125 \text{ kNm}$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\Delta M_E = 345 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 995 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.684 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.907 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 4.130 \text{ kNm}$

Tabelle 4.5: Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“

Fahrstreifenanordnung	Zweifeldträger, $\Delta M_{\text{Stütz}}$				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 770 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.524 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.711 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 5.260 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 7.996 \text{ kNm}$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\Delta M_E = 742 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.380 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.413 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 4.607 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 6.844 \text{ kNm}$
2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 913 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.755 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 3.096 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 6.118 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 9.529 \text{ kNm}$

Tabelle 4.6: Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“

Fahrstreifenanordnung	Zweifeldträger, $\Delta M_{\text{Stütz}}$				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	 $\Delta M_E = 284 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 546 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 909 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.564 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.262 \text{ kNm}$
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	 $\Delta M_E = 279 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 541 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 898 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 1.518 \text{ kNm}$	 $\Delta M_E = 2.145 \text{ kNm}$

Tabelle 4.7: Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“

Zur Einordnung der ermittelten schädigungsäquivalenten Schwingbreiten im Kontext normativer Lastmodelle zeigen die folgenden Tabellen eine Gegenüberstellung mit dem Ermüdungslastmodell ELM 3 inklusive der Schadensäquivalenzfaktoren λ nach [DIN EN 1993-2] bzw. [DIN EN 1993-2/NA]. Die Beiwerte λ_1 bis λ_4 werden entsprechend dem Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ bestimmt, mit einem Quotienten $Q_{m1}/Q_0 = 1$ zur direkten Vergleichbarkeit mit den zugrundeliegenden Simulationsrechnungen in [MeSe95]. Zu beachten ist, dass bei den normativen Werten hier zu Vergleichszwecken nicht der günstige Einfluss aus der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ (λ_{max}) berücksichtigt wird. Die im Vergleich zu den normativen Werten teilweise abweichenden Simulationsergebnisse resultieren aus dem geringeren Gesamtgewicht beladener Lkw Typ 98 (40 t anstatt 44 t in [MeSe95]), der hier deutlich längeren Simulationszeit (100 x 1 Jahr, d.h. $250 \cdot 10^6$ Lkw anstatt der maximal

10.000 Lkw in [MeSe95]), sowie dem Einfluss aus dem Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ (in λ_1 enthalten), der bei den hier durchgeführten Simulationen nicht berücksichtigt wird. Eine Bewertung der auftretenden Unterschiede ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Einfeldträger $\Delta M_{E,Feld}$ [kNm]	Stützweite				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
ELM3	438	1.149	1.858	2.495	3.025
λ_1	2,550	2,450	2,350	2,250	2,150
λ_2			1,380		
λ_3			1,000		
λ_4			1,019		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{max})	3,586	3,445	3,305	3,164	3,024
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	1.570	3.958	6.139	7.896	9.146
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	990	2.727	4.794	6.763	8.621
Ortsverkehr (Begegnungsverkehr)	376	1.012	1.716	2.370	2.984

Tabelle 4.8: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

Einfeldträger $\Delta M_{E,Feld}$ [kNm]	Stützweite				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
ELM3	438	1.149	1.858	2.495	3.025
λ_1	2,550	2,450	2,350	2,250	2,150
λ_2			1,336		
λ_3			1,000		
λ_4			1,019		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{max})	3,471	3,335	3,199	3,063	2,927
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	1.520	3.832	5.943	7.643	8.854
Langstreckenverkehr (Richtungsverkehr)	955	2.622	4.580	6.387	8.026
Ortsverkehr (Richtungsverkehr)	369	1.001	1.711	2.370	2.969

Tabelle 4.9: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Einfeldträger $\Delta M_{E,Feld}$ [kNm]	Stützweite				
	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
ELM3	516	1.343	2.156	2.877	3.457
λ_1	2,550	2,450	2,350	2,250	2,150
λ_2			1,336		
λ_3			1,000		
λ_4			1,054		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{max})	3,589	3,449	3,308	3,167	3,026
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	1.850	4.630	7.131	9.112	10.460
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	1.171	3.238	5.700	8.052	10.315

Tabelle 4.10: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

Zweifeldträger $\Delta M_{E, \text{Feld}}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
ELM3	440	1.151	1.882	3.037	4.114
λ_1	2,550	2,450	2,350	2,150	1,950
λ_2			1,380		
λ_3			1,000		
λ_4			1,019		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{\max})	3,586	3,445	3,305	3,024	2,742
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	1.577	3.965	6.218	9.181	11.281
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	895	2.684	4.626	8.081	11.578
Ortsverkehr (Begegnungsverkehr)	348	995	1.671	2.877	4.125

Tabelle 4.11: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{\max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

Zweifeldträger $\Delta M_{E, \text{Feld}}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
ELM3	440	1.151	1.882	3.037	4.114
λ_1	2,550	2,450	2,350	2,150	1,950
λ_2			1,336		
λ_3			1,000		
λ_4			1,019		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{\max})	3,471	3,335	3,199	2,927	2,655
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	1.526	3.838	6.019	8.887	10.920
Langstreckenverkehr (Richtungsverkehr)	868	2.635	4.533	7.809	11.009
Ortsverkehr (Richtungsverkehr)	345	995	1.684	2.907	4.130

Tabelle 4.12: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{\max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Zweifeldträger $\Delta M_{E, \text{Feld}}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
ELM3	517	1.345	2.184	3.470	4.642
λ_1	2,550	2,450	2,350	2,150	1,950
λ_2			1,336		
λ_3			1,000		
λ_4			1,054		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{\max})	3,589	3,449	3,308	3,026	2,745
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	1.857	4.637	7.223	10.500	12.741
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	1.057	3.210	5.552	9.794	14.225

Tabelle 4.13: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{\max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

Zweifeldträger $\Delta M_{E,Stütz}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
ELM3	344	571	879	1.328	1.741
λ_1	2,000	1,850	1,700	1,900	2,100
λ_2			1,380		
λ_3			1,000		
λ_4			1,019		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{max})	2,813	2,602	2,391	2,672	2,953
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	967	1.486	2.101	3.548	5.140
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	770	1.524	2.711	5.260	7.996
Ortsverkehr (Begegnungsverkehr)	284	546	909	1.564	2.262

Tabelle 4.14: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

Zweifeldträger $\Delta M_{E,Stütz}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
ELM3	344	571	879	1.328	1.741
λ_1	2,000	1,850	1,700	1,900	2,100
λ_2			1,336		
λ_3			1,000		
λ_4			1,019		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{max})	2,723	2,518	2,314	2,586	2,859
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	936	1.438	2.034	3.434	4.976
Langstreckenverkehr (Richtungsverkehr)	742	1.380	2.413	4.607	6.844
Ortsverkehr (Richtungsverkehr)	279	541	898	1.518	2.145

Tabelle 4.15: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Zweifeldträger $\Delta M_{E,Stütz}$ [kNm]	Stützweite				
	2 x 10 m	2 x 20 m	2 x 30 m	2 x 50 m	2 x 70 m
ELM3	404	667	1.020	1.517	1.964
λ_1	2,000	1,850	1,700	1,900	2,100
λ_2			1,336		
λ_3			1,000		
λ_4			1,054		
$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ (ohne λ_{max})	2,815	2,604	2,393	2,674	2,956
ELM3 mit λ nach EC3-2/NA:2014	1.139	1.738	2.441	4.057	5.806
Langstreckenverkehr (Begegnungsverkehr)	913	1.755	3.096	6.118	9.529

Tabelle 4.16: Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)

4.2.3 Ergebnisse der analytischen Lösung

Zentrales Element der analytischen Lösung sind die maßgebenden ermüdungsrelevanten Laststellungen zur Approximation des Mehrstufenkollektivs der Verkehrsbeanspruchung, vgl. Abschnitt 4.1.5. Diese wurden für die hier betrachteten Beispiele iterativ ermittelt. Die im Ergebnis vorliegenden Laststellungen, Häufigkeiten (siehe auch Anhang F) und schädigungsäquivalenten Schwingbreiten im Vergleich zum Referenzergebnis (aus Abschnitt 4.2.2) werden in Abbildung 4.11 bis Abbildung 4.14 beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit der Spannweite $L = 50 \text{ m}$ sowie das Feld- und Stützmoment eines Zweifeldträgers mit den Spannweiten $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$ dargestellt. Da hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung ausschließlich fließender Verkehr betrachtet wird, ist eine Übertragbarkeit auf andere statische Systeme direkt möglich. Es zeigt sich, dass die schädigungsäquivalenten Schwingbreiten durch die Approximation der Mehrstufenkollektive ausreichend genau ermittelt werden können (Abweichung maximal $\pm 10\%$).

Der markante Punkt 1 des Mehrstufenkollektivs repräsentiert dabei stets den Modalwert der Schwingbreitenverteilung, der durch die Überfahrt der Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ resultiert.

Der markante Punkt 2 repräsentiert die maximale Schwingbreite, die auf Grundlage einer Extremwertanalyse ermittelt wird. Analog zur analytischen Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung in Kapitel 3 zeigt sich, dass die zugehörige charakteristische Schwingbreite anhand jeweils einer maßgebenden ermüdungsrelevanten Laststellung ausreichend genau ermittelt werden kann. Abhängig vom Verkehrsaufkommen und dessen Zusammensetzung dominiert dabei eine der folgenden Laststellungen. Die analytische Lösung ist stets für beide Fälle aufzustellen und das ungünstigste Ergebnis als maßgebend zu betrachten.

- a) ungünstigste Laststellung mit ausschließlich Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr
- b) ungünstigste Laststellung mit einem Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs und ansonsten ausschließlich Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr

Wesentlich ist, dass eine Laststellung erst dann maßgebend wird, wenn deren mittlere Häufigkeit größer ist als ca. einmal innerhalb der Nutzungsdauer (hier 100 Jahre). Seltener Laststellungen sind bezüglich der Mehrstufenkollektive irrelevant. Bei einer stark abweichenden Nutzungsdauer werden dementsprechend andere Laststellungen maßgebend, als die in Abbildung 4.11 bis Abbildung 4.14 dargestellten.

Außerdem zeigt sich, dass eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird, wenn für die markanten Punkte 1 und 2 jeweils ausschließlich das maßgebende Schwingenspiel der zugehörigen Laststellung betrachtet wird, sofern infolge deren Überfahrt mehrere Schwingenspiele entstehen.

Die Grenze der analytischen Lösung liegt bei Einzelspannweiten von $L \approx 70 \text{ m}$, da im darüber liegenden Bereich Laststellungen mit Lkw in Kolonnenfahrt (Lkw mit kurzem Abstand direkt hintereinander) zunehmend wichtig werden. Die Ursache dieser Einschränkung liegt darin begründet, dass derzeit noch keine zuverlässigen Modelle zur Abbildung der Wahrscheinlichkeit realer Kolonnenfahrten existieren.

Im Vergleich zu den Ergebnissen in Abbildung 4.11 bis Abbildung 4.14 existieren teilweise auch geringfügig ungünstigere Laststellungen. Diese wurden jedoch zugunsten einer Vereinheitlichung der ermüdungsrelevanten Laststellungen vernachlässigt.

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

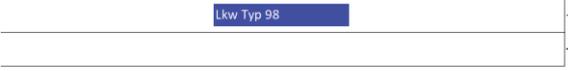
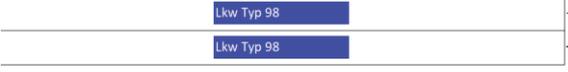
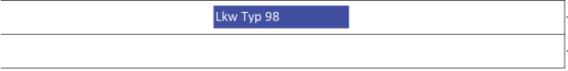
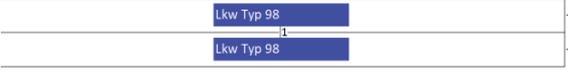
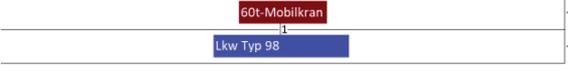
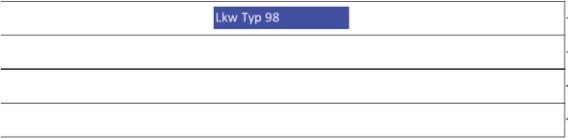
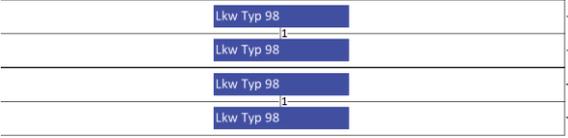
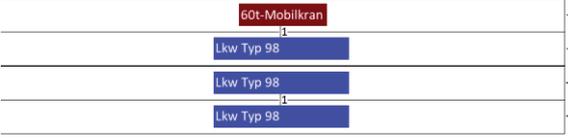
Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran	
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	<p>Punkt 1) einzelner Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 147,25 \cdot 10^6$; $\Delta M_{\text{Lkw Typ 98}} = 2.980 \text{ kNm}$</p>  <p>Punkt 2a) ausschließlich Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 9,03 \cdot 10^6$; $\Delta M_k = 7.856 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 7.687 \text{ kNm}$ (89%)</p>  <p>Punkt 2b) gen.pfl. SV mit Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 76.690$; $\Delta M_k = 8.885 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 8.202 \text{ kNm}$ (95%)</p> 
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	<p>Punkt 1) einzelner Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 125,16 \cdot 10^6$; $\Delta M_{\text{Lkw Typ 98}} = 2.980 \text{ kNm}$</p>  <p>Punkt 2a) ausschließlich Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 13,0 \cdot 10^6$; $\Delta M_k = 8.030 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 7.551 \text{ kNm}$ (94%)</p>  <p>Punkt 2b) gen.pfl. SV mit Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 55.220$; $\Delta M_k = 8.840 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 7.953 \text{ kNm}$ (99%)</p> 
2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	<p>Punkt 1) einzelner Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 125,16 \cdot 10^6$; $\Delta M_{\text{Lkw Typ 98}} = 3.410 \text{ kNm}$</p>  <p>Punkt 2a) ausschließlich Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 70.520$; $\Delta M_k = 11.902 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 10.129 \text{ kNm}$ (98%)</p>  <p>Punkt 2b) gen.pfl. SV mit Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 299$; $\Delta M_k = 13.031 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 10.816 \text{ kNm}$ (105%)</p>  <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  <p>Δ \xrightarrow{x} M_F Δ 50m</p> </div>

Abbildung 4.11: Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte)
(Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment)

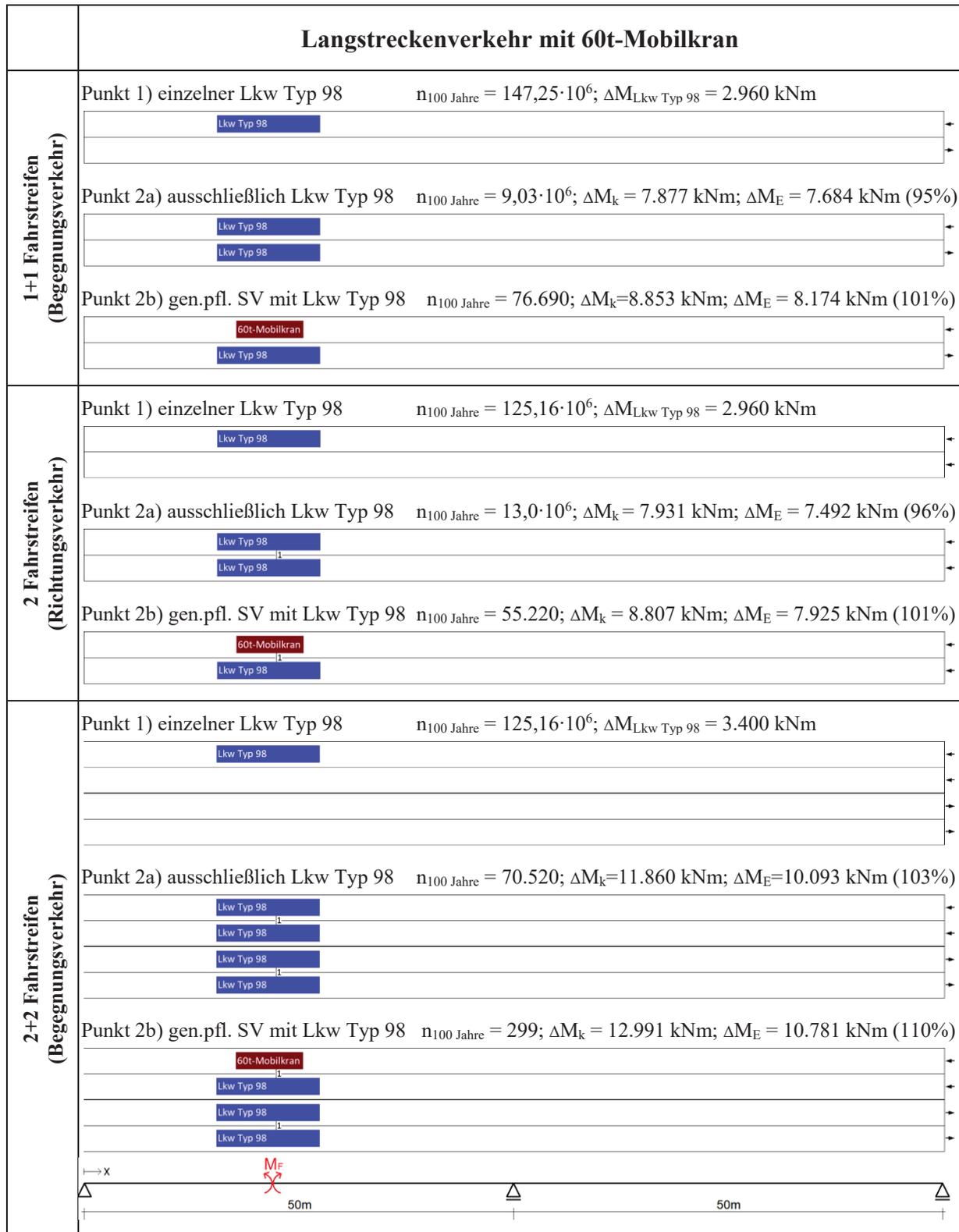


Abbildung 4.12: Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte)
 (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Zweifeldträger, $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$, Feldmoment)

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

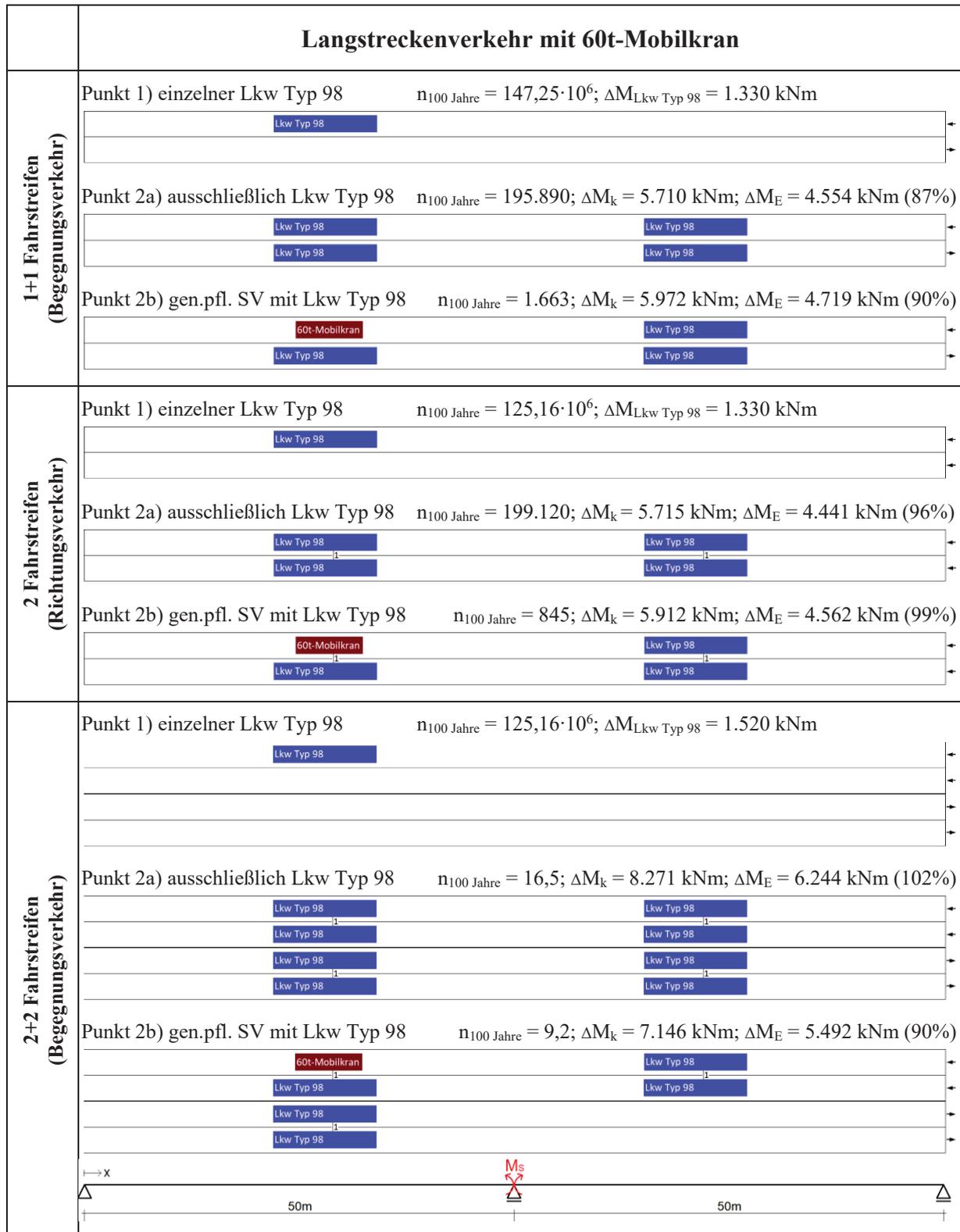


Abbildung 4.13: Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte)
 (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Zweifeldträger, $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$, Stützmoment)

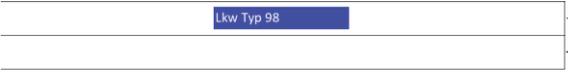
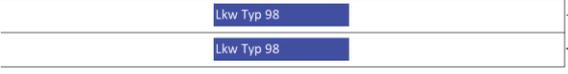
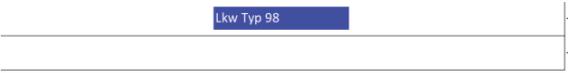
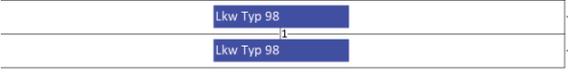
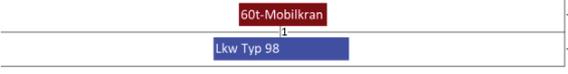
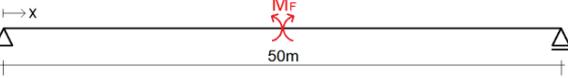
Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran	
1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)	Punkt 1) einzelner Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 1,25 \cdot 10^6$; $\Delta M_{\text{Lkw Typ 98}} = 2.980 \text{ kNm}$ 
	Punkt 2a) ausschließlich Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 648$; $\Delta M_k = 6.236 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 3.049 \text{ kNm (101\%)}$ 
	Punkt 2b) gen.pfl. SV mit Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 6,5$; $\Delta M_k = 7.514 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 3.213 \text{ kNm (108\%)}$ 
2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr)	Punkt 1) einzelner Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 1,06 \cdot 10^6$; $\Delta M_{\text{Lkw Typ 98}} = 2.980 \text{ kNm}$ 
	Punkt 2a) ausschließlich Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 18.680$; $\Delta M_k = 6.889 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 3.138 \text{ kNm (106\%)}$ 
	Punkt 2b) gen.pfl. SV mit Lkw Typ 98 $n_{100 \text{ Jahre}} = 93,6$; $\Delta M_k = 7.880 \text{ kNm}$; $\Delta M_E = 3.291 \text{ kNm (111\%)}$  

Abbildung 4.14: Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte)
 (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment)

4.3 Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden wird der Einfluss der verschiedenen Eingangsparameter auf das Ergebnis der analytischen Lösung untersucht. Analog zu den vorherigen Abschnitten liegt der Fokus auf den schädigungsäquivalenten Schwingbreiten ΔM_E (mit einer Schwingspielzahl von $n_E = 2 \cdot 10^6$, einer konstanten Neigung der Wöhlerlinie von $m = 5$ und einer Nutzungsdauer von 100 Jahren) sowie den charakteristischen Schwingbreiten ΔM_k (mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 100 Jahren). Je nach System und maßgebender ermüdungsrelevanter Laststellung sind unterschiedliche Auswirkungen zu erwarten. Die Untersuchungen erfolgen daher beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit einer Spannweite von $L = 50 \text{ m}$ und zwei Fahrstreifen (Richtungsverkehr) sowie anhand der Laststellungen in Abbildung 4.15.

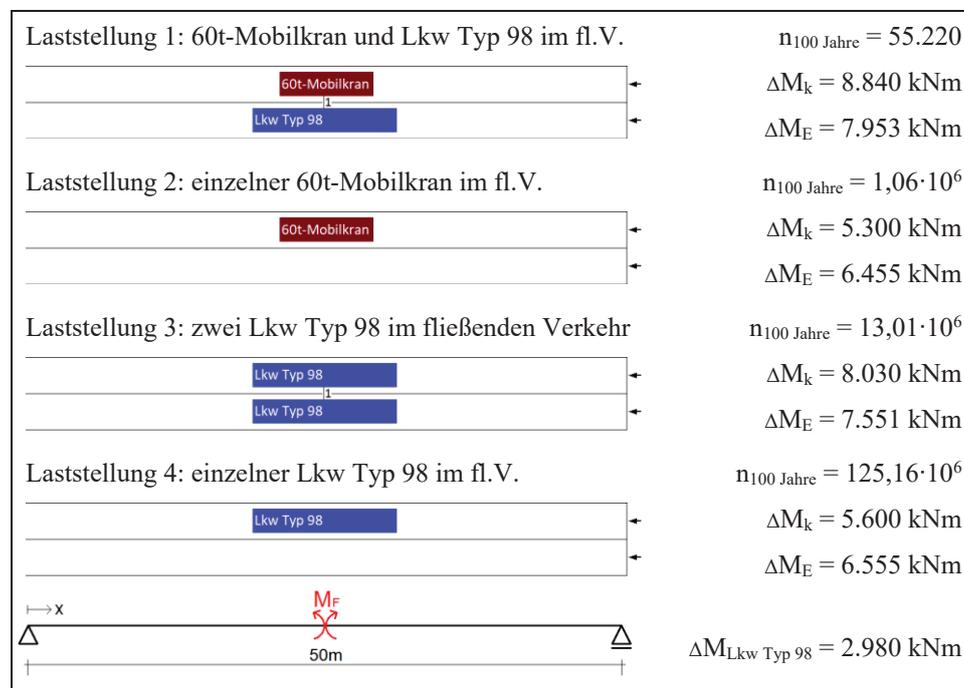


Abbildung 4.15: Beispielhafte Laststellungen als Grundlage der Sensitivitätsanalyse (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)

4.3.1 Einfluss unterschiedlicher ermüdungsrelevanter Laststellungen

Der Einfluss unterschiedlicher ermüdungsrelevanter Laststellungen auf die maximale Schwingbreite (d.h. die charakteristische Schwingbreite im Punkt 2 des approximierten Mehrstufenkollektivs) wird in Abbildung 4.16 veranschaulicht. Beispielhaft erfolgt dies hier anhand der Laststellungen in Abbildung 4.15. Zu erkennen sind die je Laststellung resultierenden Verteilungen $F_i(\Delta M)$ der Jahres- und 100-Jahres-Extrema sowie deren Kombination mit:

$$F_{max}(\Delta M) = F_1(\Delta M) \cdot F_2(\Delta M) \cdot F_3(\Delta M) \cdot F_4(\Delta M) \quad (4.34)$$

Sowohl bezüglich der Jahres- als auch der 100-Jahres-Extrema zeigt sich, dass die kombinierte Verteilung ausschließlich von der Laststellung 1 beeinflusst wird. Die charakteristische Schwingbreite kann daher allein durch diese maßgebende Laststellung bestimmt werden.

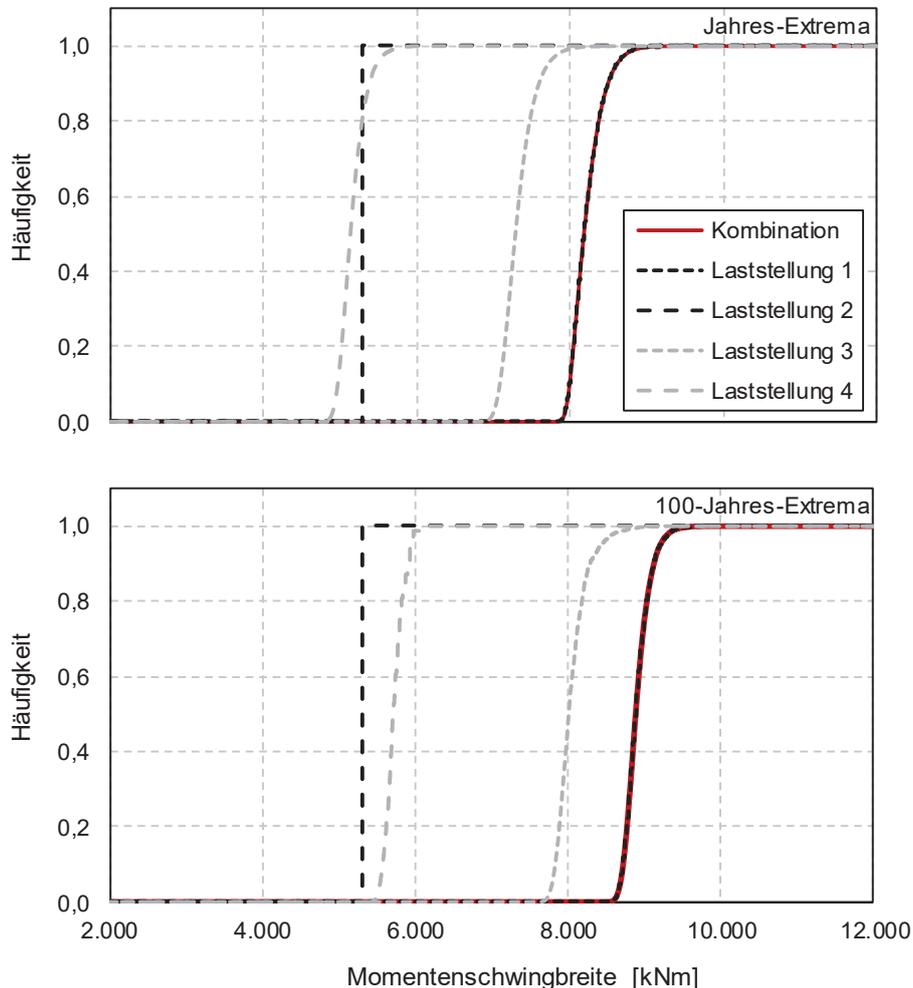


Abbildung 4.16: Verteilung der Jahres-Extrema (oben) und 100-Jahres-Extrema (unten) infolge unterschiedlicher Laststellungen und deren Kombination (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

4.3.2 Einfluss der Häufigkeit ermüdungsrelevanter Laststellungen

Von wesentlicher Bedeutung ist auch die mittlere Häufigkeit der ermüdungsrelevanten Laststellungen. Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 verdeutlichen dies hinsichtlich der charakteristischen Schwingbreite im Punkt 2 des approximierten Mehrstufenkollektivs sowie der davon abhängigen schädigungsäquivalenten Schwingbreite. Dabei wird die Annahme getroffen, dass sich eine Änderung der Häufigkeit lediglich auf Punkt 2 auswirkt, jedoch nicht auf Punkt 1 (infolge Laststellung 4). Sollte beispielsweise durch eine Änderung der Verkehrszusammensetzung die Laststellung 1 deutlich seltener auftreten, würde sich neben der schädigungsäquivalenten Schwingbreite zwangsläufig auch die maßgebende ermüdungsrelevante Laststellung bezüglich Punkt 2 ändern. Vergleichbar mit der analytischen Lösung zur

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung existiert ein Mindestwert der mittleren Häufigkeit, ab welchem eine Laststellung bei der Bestimmung der maximalen Schwingbreite relevant wird. Analog zur hier gewählten Nutzungsdauer liegt dieser Mindestwert bei ca. einmal in einem Zeitraum von 100 Jahren.

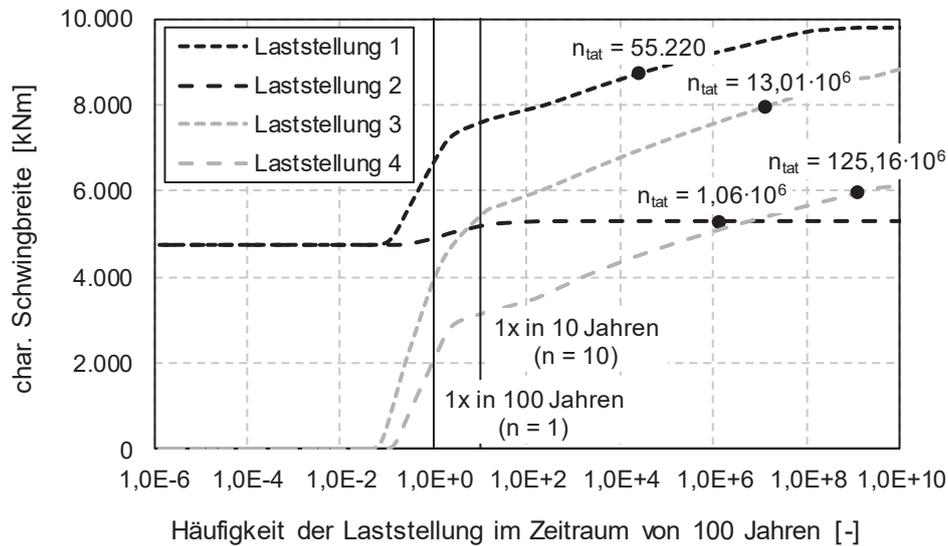


Abbildung 4.17: Einfluss der Häufigkeit einer Laststellung auf die charakteristische Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

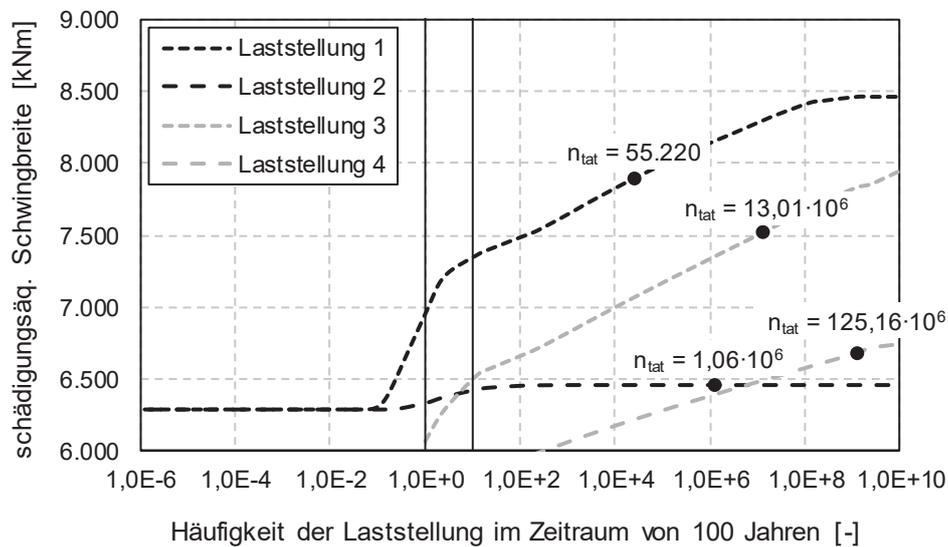


Abbildung 4.18: Einfluss der Häufigkeit einer Laststellung auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Im Folgenden wird der Einfluss der Verkehrsparameter auf die mittlere Häufigkeit und damit auch auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite analysiert. Im Gegensatz zur vorhergehenden Untersuchung wird hier die Annahme getroffen, dass sich eine Änderung der Häufigkeit sowohl auf Punkt 1 als auch Punkt 2 auswirkt, wobei Punkt 1 mit Laststellung 4 und Punkt 2 mit den Laststellungen 1 bis 4 verknüpft ist. Der Fokus liegt zunächst auf den formelmäßigen

Zusammenhängen zur Ermittlung der Häufigkeiten, vgl. Gleichung (4.35) bis (4.38) für die Laststellungen 1 bis 4 in Abbildung 4.15.

$$n_1 \approx \underbrace{0,005 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw\ der\ Hauptspur} \cdot \underbrace{\frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw\ der\ Nebenspur} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\substack{\text{zwei mögliche} \\ \text{Reihenfolgen}}} \cdot 250 \frac{Werk\ tage}{Jahr} \cdot 100\ Jahre \quad (4.35)$$

$$= 55.220$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,005 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw\ der\ Hauptspur} \cdot 250 \frac{Werk\ tage}{Jahr} \cdot 100\ Jahre \quad (4.36)$$

$$= 1,06 \cdot 10^6$$

$$n_3 \approx \underbrace{0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw\ der\ Hauptspur} \cdot \underbrace{\frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw\ der\ Nebenspur} \cdot 250 \frac{Werk\ tage}{Jahr} \cdot 100\ Jahre \quad (4.37)$$

$$= 13,01 \cdot 10^6$$

$$n_4 \approx \underbrace{0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw\ der\ Hauptspur} \cdot 250 \frac{Werk\ tage}{Jahr} \cdot 100\ Jahre \quad (4.38)$$

$$= 125,16 \cdot 10^6$$

Die relevanten Parameter sind:

- Anteil des Lkw Typ 98 [%]
- Anteil des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs [%]
- durchschnittliche tägliche Schwerverkehrsstärke $DTV-SV$ [-]
- Anteil der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr [%]

Bezüglich dieser Parameter wird in Abbildung 4.19 und Abbildung 4.20 die Änderung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite dargestellt. Große Änderungen treten infolge einer Variation des Anteils des Lkw Typ 98 und des $DTV-SV$ auf. Die beiden übrigen Parameter haben nur einen geringen Einfluss. In den betrachteten Beispielen tritt darüber hinaus keine Änderung der maßgebenden ermüdungsrelevanten Laststellung zur Bestimmung der maximalen Schwingbreite des Mehrstufenkollektivs auf.

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

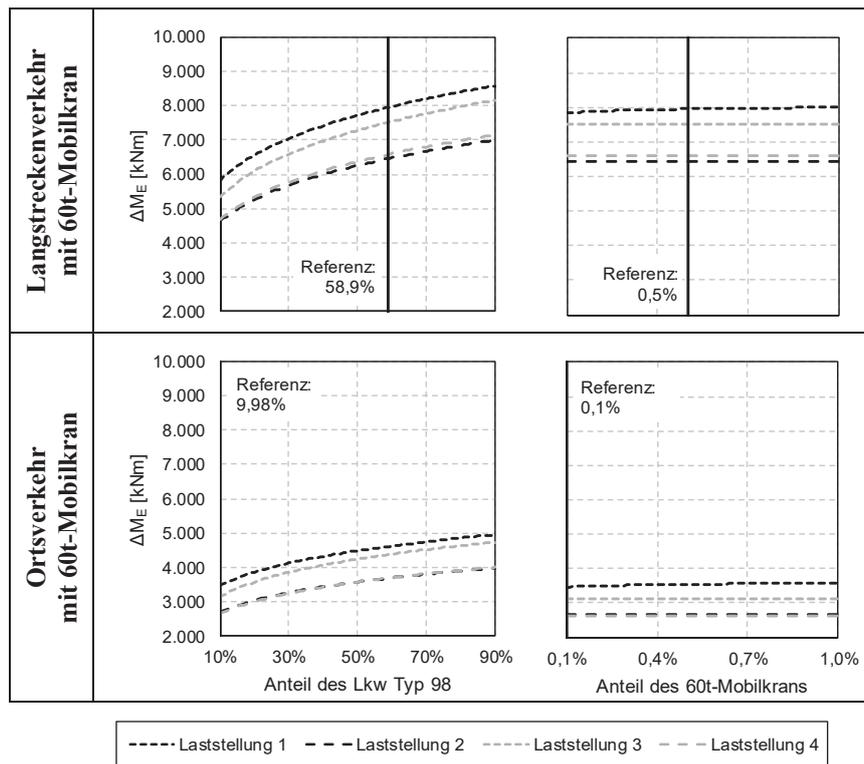


Abbildung 4.19: Einfluss des Anteils des Lkw Typ 98 (10-90%) und 60t-Mobilkrans (0,1-1,0%) auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

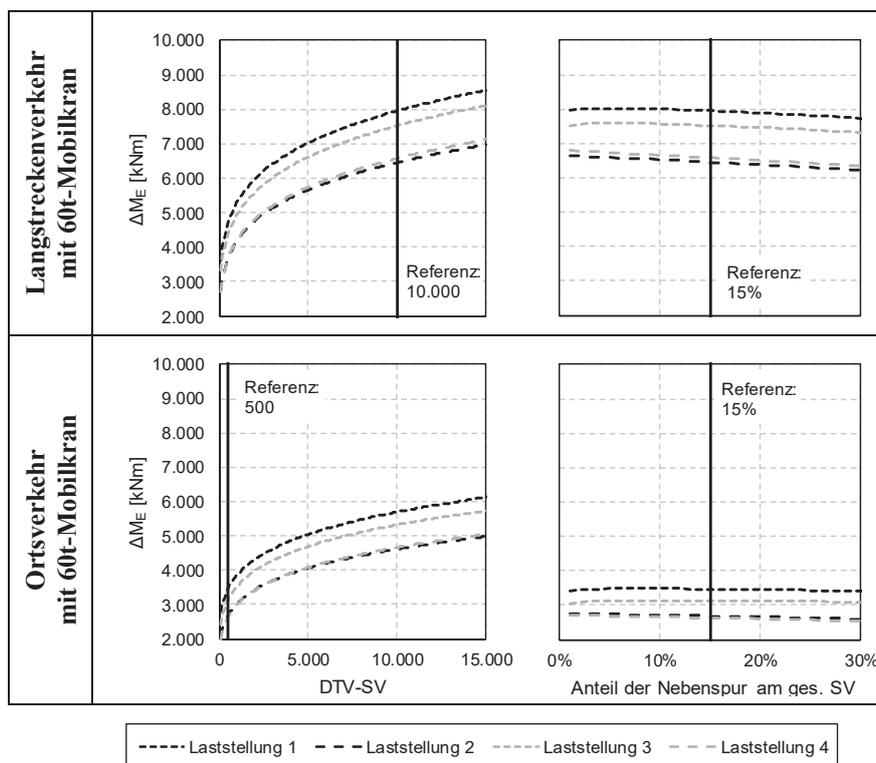


Abbildung 4.20: Einfluss des DTV-SV (100-15.000) und Anteils der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr (1-30%) auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Anzumerken ist, dass hier ausschließlich der Regelfall untersucht wird, bei dem regelmäßige Staus hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung ausgeschlossen werden können, vgl. Abschnitt 4.1.3. In solchen Einzelfällen, bei denen diese Annahme nicht zutrifft, ist mit einem

starken Anstieg der charakteristischen und auch der schädigungsäquivalenten Schwingbreite zu rechnen. Der Einfluss der Parameter zur Bestimmung der mittleren Häufigkeit wäre für diesen Fall neu zu bewerten.

4.3.3 Einfluss der Fahrzeugesamtgewichte

Die Verteilung der Fahrzeugesamtgewichte hat erwartungsgemäß einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der schädigungsäquivalenten Schwingbreite. Den Ergebnissen der analytischen Lösung in Abschnitt 4.2.3 entsprechend, lassen sich die maßgebenden Fahrzeugtypen auf den Lkw Typ 98 sowie den 60t-Mobilkran (als Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs) eingrenzen. Eine Beschreibung dieser Fahrzeuge zeigt Abbildung 4.21 zusammen mit den hier als Referenz zu betrachtenden Gesamtgewichtsverteilungen.

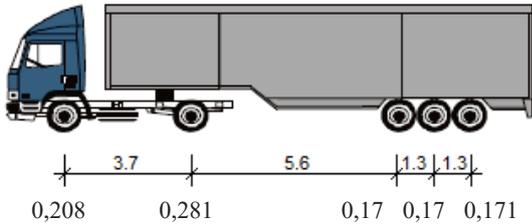
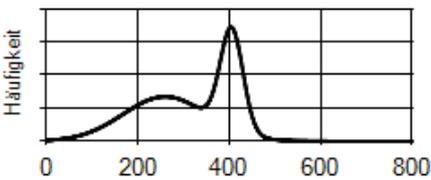
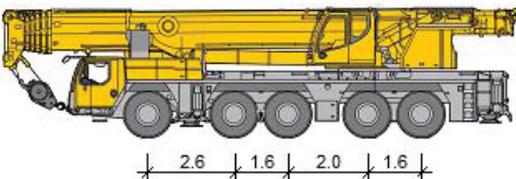
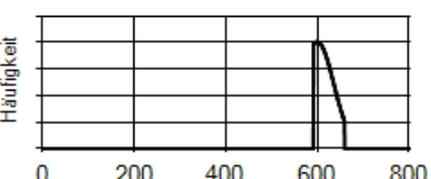
Lkw-Typ	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeugesamtgewicht
Typ 98	 <p>3,7 5,6 1,3 1,3 0,208 0,281 0,17 0,17 0,17</p>	 <p>Häufigkeit 0 200 400 600 800 $\mu_1 = 259,6; \mu_2 = 405,3; \sigma_1 = 92; \sigma_2 = 24,8$ [kN] $\alpha = 0,62; \beta = 0,38$</p>
60t-Mobilkran (bzw. Ersatzfahrzeug des gen.pfl. SV)	 <p>2,6 1,6 2,0 1,6 0,2 0,2 0,2 0,2 0,2</p>	 <p>Häufigkeit 0 200 400 600 800 $\mu = 600; \sigma = 36; x_u = 591; x_o = 660$ [kN]</p>

Abbildung 4.21: Maßgebende Fahrzeugtypen des Schwerverkehrs

Die bezüglich des Mehrstufenkollektivs relevanten Parameter werden im Folgenden variiert und deren Einfluss auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite dargestellt.

4.3.3.1 Fahrzeugesamtgewicht des Lkw Typ 98

Mit zunehmendem mittlerem Gesamtgewicht der beladenen Lkw Typ 98 steigt, wie zu erwarten, auch die schädigungsäquivalente Schwingbreite, vgl. Abbildung 4.22. Die Auswirkung dieses Parameters ist hier deutlich größer als bei der Ermittlung der Extremwerte der Verkehrsbeanspruchung, vgl. Abschnitt 3.3.3. Ein Wechsel der im Punkt 2 maßgebenden ermüdungsrelevanten Laststellung 1 (60t-Mobilkran und Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr) tritt hier und in den folgenden Sensitivitätsanalysen nicht auf. Unter Berücksichtigung einer

strikten oberen Kappungsgrenze von $x_0 = 440 \text{ kN}$ entsteht trotz Zunahme des mittleren Gesamtgewichtes kein Anstieg der schädigungsäquivalenten Schwingbreite im Vergleich zu aktuell üblichen mittleren Gesamtgewichten mit $\mu_2 = 400 \text{ kN}$ und ohne Kappungsgrenze.

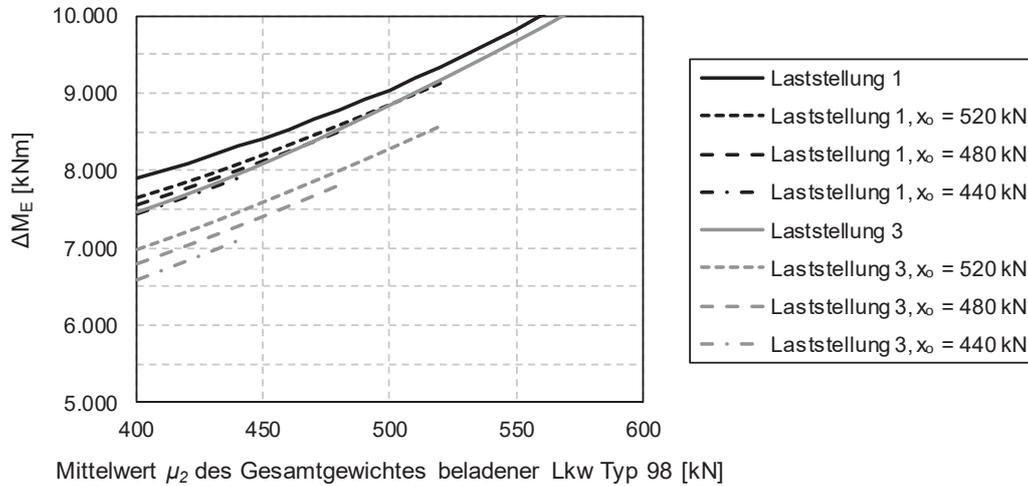


Abbildung 4.22: Einfluss von Mittelwert μ_2 und Kappungsgrenze x_0 des Gesamtgewichtes beladener Lkw Typ 98 auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Mit zunehmendem Anteil an voll beladenen Lkw Typ 98 ist mit einem Anstieg der schädigungsäquivalenten Schwingbreite zu rechnen, vgl. Abbildung 4.23. Die Auswirkung ist auch hier deutlich größer als bei der Ermittlung der Extremwerte der Verkehrsbeanspruchung, vgl. Abschnitt 3.3.3.

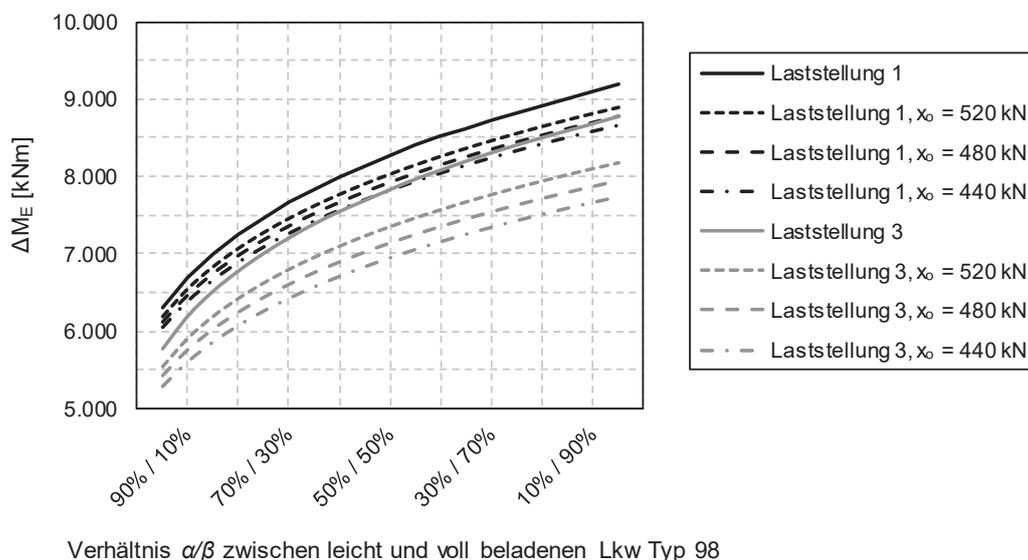


Abbildung 4.23: Einfluss des Verhältnisses α/β zwischen leicht und voll beladenen Lkw Typ 98 sowie der Kappungsgrenze x_0 dessen Gesamtgewicht auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

Anzumerken ist, dass bei den Szenarien mit Lkw Typ 98 mit abgeschnittener Gesamtgewichtsverteilung der Einfluss der untersuchten Parameter nur qualitativ wiedergegeben wird, da noch unklar ist, wie exakt die Approximation des Mehrstufenkollektivs derartige Fälle abbildet.

4.3.3.2 Fahrzeuggesamtgewicht des Mobilkrans

Ausgehend vom hier betrachteten Ersatzfahrzeug mit Mittelwert $\mu = 600 \text{ kN}$, Standardabweichung $\sigma = 36 \text{ kN}$ und oberer Kappungsgrenze $x_o = 660 \text{ kN}$ führt lediglich eine kombinierte Erhöhung der Parameter μ und x_o bzw. σ und x_o zu einem nennenswerten Anstieg der schädigungsäquivalenten Schwingbreite, vgl. Abbildung 4.24 und Abbildung 4.25. Im Vergleich zur Ermittlung der Extremwerte der Verkehrsbeanspruchung ist der Einfluss des genehmigungspflichtigen Schwerververkehrs hier deutlich geringer.

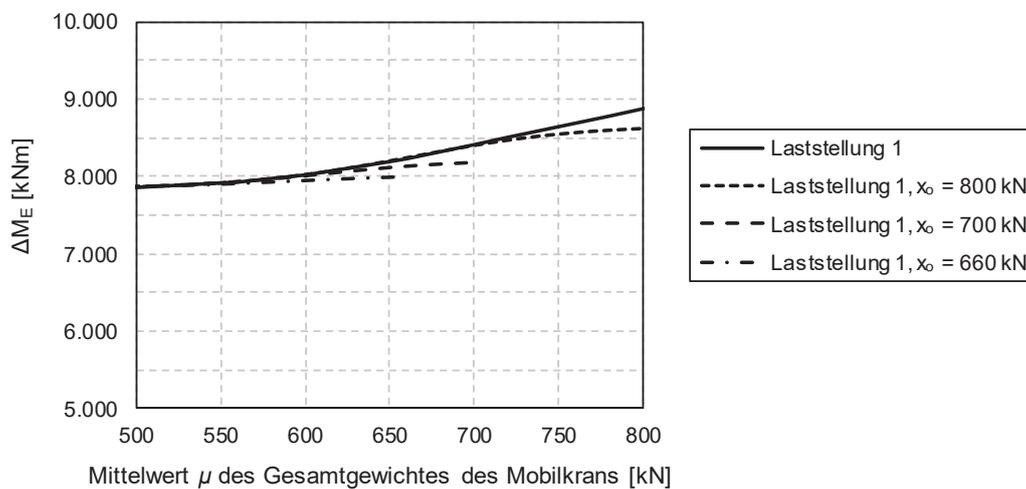


Abbildung 4.24: Einfluss von Mittelwert μ und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

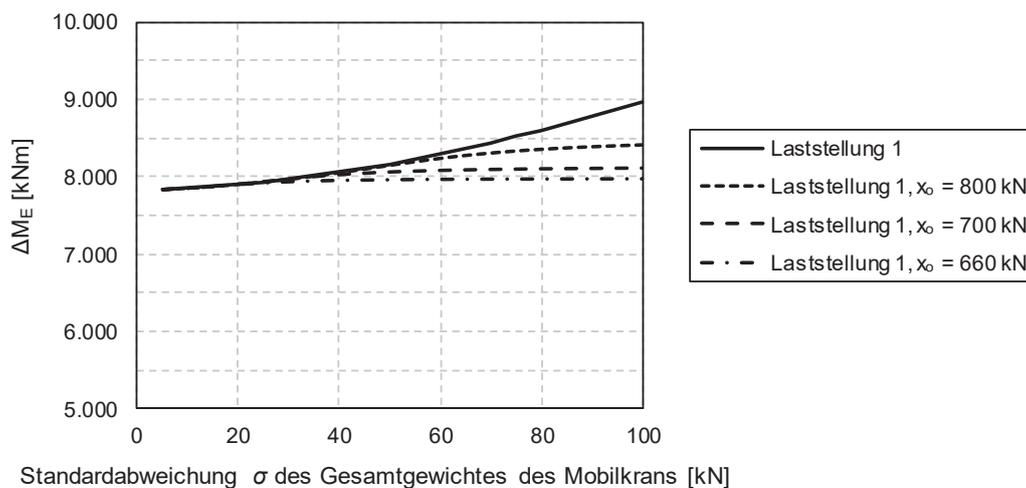


Abbildung 4.25: Einfluss von Standardabweichung σ und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)

4.3.4 Zusammenfassung

Die hier beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit einer Spannweite von $L = 50\text{ m}$ und zwei Fahrstreifen (Richtungsverkehr) ermittelten Ergebnisse sind qualitativ auch auf beliebige andere Systeme übertragbar. Dies ergibt sich zum einen daraus, dass der markante Punkt 1 des Mehrstufenkollektivs stets mit der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ verknüpft werden kann. Zum anderen resultiert Punkt 2 stets aus einer ermüdungsrelevanten Laststellung mit maximal einem Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs und ansonsten ausschließlich Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr. Der Einfluss der hier untersuchten Parameter bleibt dadurch immer gleich. Die wesentlichen Parameter lassen sich folgendermaßen eingrenzen:

- a) Bezüglich des Ersatzfahrzeugs des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs ist die Definition einer sinnvollen oberen Kappungsgrenze des Gesamtgewichtes entscheidend. Demzufolge ist nicht auszuschließen, dass die Berücksichtigung selten auftretender und besonders schwerer Transporte einen nennenswerten Einfluss auf die Ermüdungsbeanspruchung haben kann. In diesem Zusammenhang gewinnt die (aktuell noch ausstehende) systematische Erfassung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs mit Einzelgenehmigung an Bedeutung.
- b) Wesentlich sind darüber hinaus sämtliche Parameter bezüglich der beladenen Lkw Typ 98, darunter deren mittleres Gesamtgewicht und Häufigkeit (*DTV-SV*, Anteil am Fahrzeugkollektiv und Verhältnis zwischen leichter und voller Beladung).

Alle übrigen Parameter haben hier nur einen untergeordneten Einfluss.

4.4 Vereinfachung der analytischen Lösung

Auf Basis der analytischen Lösung wird ein vereinfachtes Rechenverfahren zur Bestimmung des Mehrstufenkollektivs der Verkehrsbeanspruchung abgeleitet, vgl. Abbildung 4.26. Für unterschiedlich ausgeprägte Fahrzeugkollektive und Verkehrsaufkommen sowie für verschiedene Brückentragwerke und Fahrstreifenanordnungen ist es damit möglich, die Approximation des Mehrstufenkollektivs einfach zu berechnen.

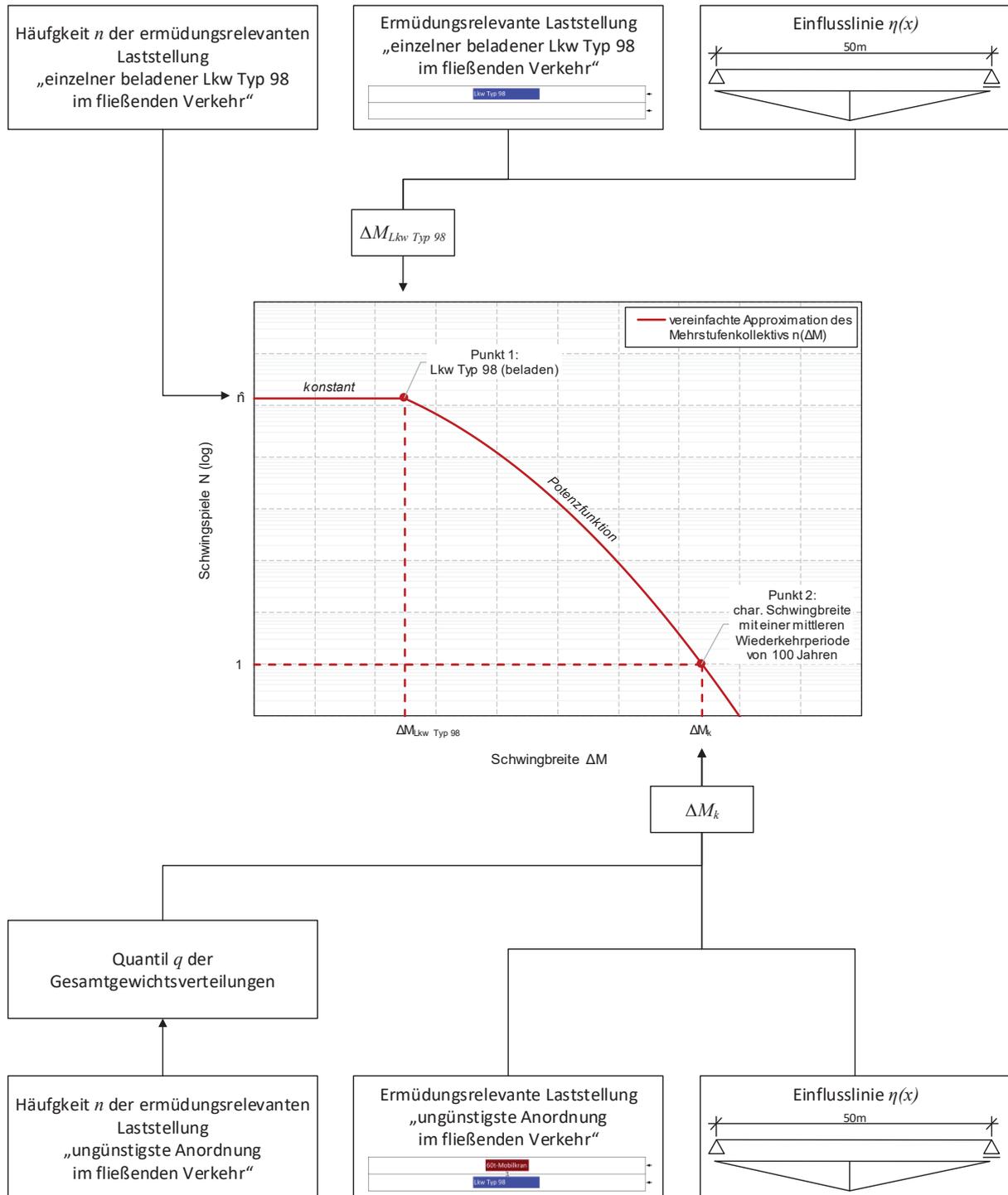


Abbildung 4.26: Schema des vereinfachten (Hand-) Rechenverfahrens zur Ermittlung des Mehrstufenkollektivs der Verkehrsbeanspruchung

4.4.1 Allgemeines

Grundlage des Rechenverfahrens ist zum einen die ermüdungsrelevante Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ für Punkt 1 und zum anderen die ermüdungsrelevante Laststellung „ungünstigste Anordnung im fließenden Verkehr“ für Punkt 2 der Approximation des Mehrstufenkollektivs sowie deren jeweilige Häufigkeit, vgl. Abbildung 4.11 bis Abbildung 4.14.

Die Lage des markanten Punkt 1 kann vereinfacht aus Gleichung (4.39) und (4.40) berechnet werden. Die Schwingbreite $\Delta M_{Lkw Typ 98}$ resultiert aus der Überfahrt der Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ und berechnet sich anhand deren Stellung an Hoch- und Tiefpunkten entlang der Einflusslinie unter Berücksichtigung des schädigungsäquivalenten Schwingbeiwertes φ_{fat} . Die Höhe des zugehörigen Modalwertes \hat{n} berechnet sich aus der mittleren Häufigkeit n dieser Laststellung und der Wahrscheinlichkeitsdichte $h_{beladen}$ der Gesamtgewichtsverteilung des Lkw Typ 98 am Modalwert beladener Lkw, vgl. Abbildung 4.27 bis Abbildung 4.29. Zusätzlich zu berücksichtigen ist die Streckung dieser Verteilung durch den Lastkoeffizienten.

$$\Delta M_{Lkw Typ 98} = \underbrace{\mu_2}_{\substack{\text{mittleres GG} \\ \text{beladener} \\ \text{Lkw Typ 98}}} \cdot \underbrace{\Delta \left\{ \sum_j \delta_j \cdot \eta_L(x_j) \cdot \eta_Q(y_j) \right\}}_{\text{Lastkoeffizient des Schwingspiels}} \cdot \varphi_{fat} \quad (4.39)$$

$$\hat{n} = n \cdot h_{beladen} \cdot \left(\underbrace{\Delta \left\{ \sum_j \delta_j \cdot \eta_L(x_j) \cdot \eta_Q(y_j) \right\}}_{\text{Lastkoeffizient des Schwingspiels}} \cdot \varphi_{fat} \right)^{-1} \quad (4.40)$$

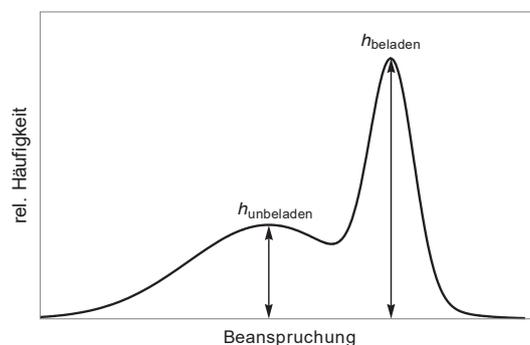


Abbildung 4.27: Beanspruchungsverteilung infolge eines Lkw Typ 98 mit doppelnormalverteiletem Gesamtgewicht (einflusslinienunabhängig)

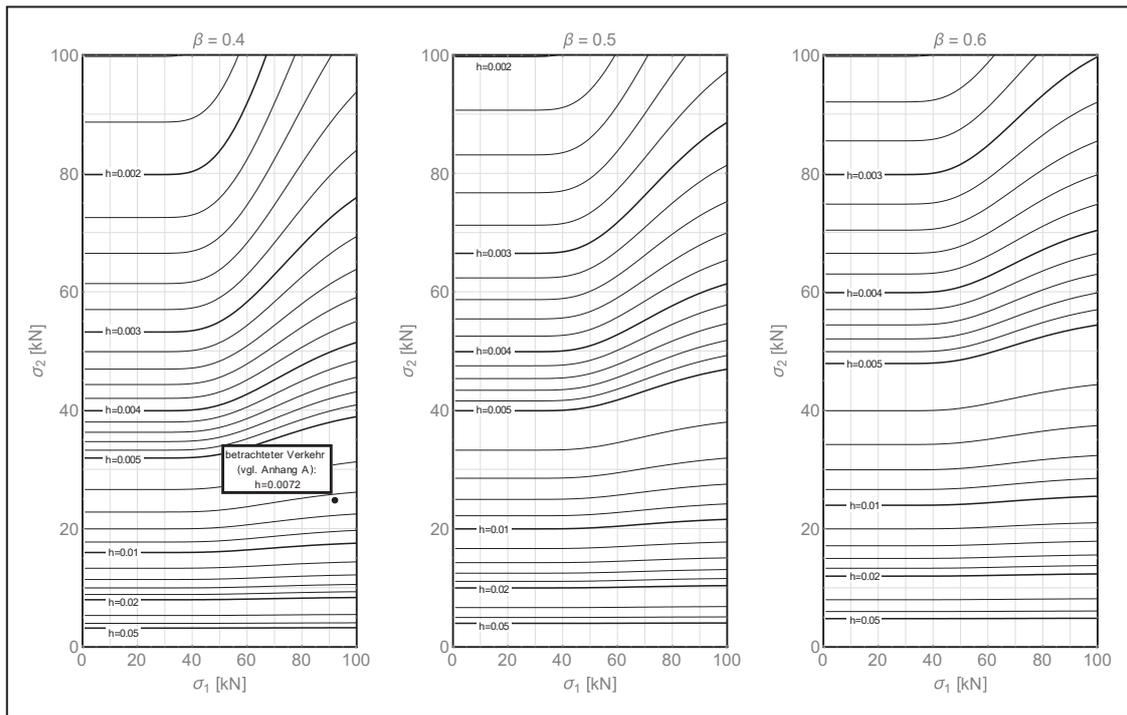


Abbildung 4.28: Nomogramme für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gesamtgewichtsverteilung des Lkw Typ 98 am Modalwert beladener Lkw (h_{beladen}) mit variablem Anteil beladener Lkw (β), variablen Standardabweichungen (σ_1 und σ_2) und konstanten Mittelwerten ($\mu_1 = 260$ kN und $\mu_2 = 400$ kN)

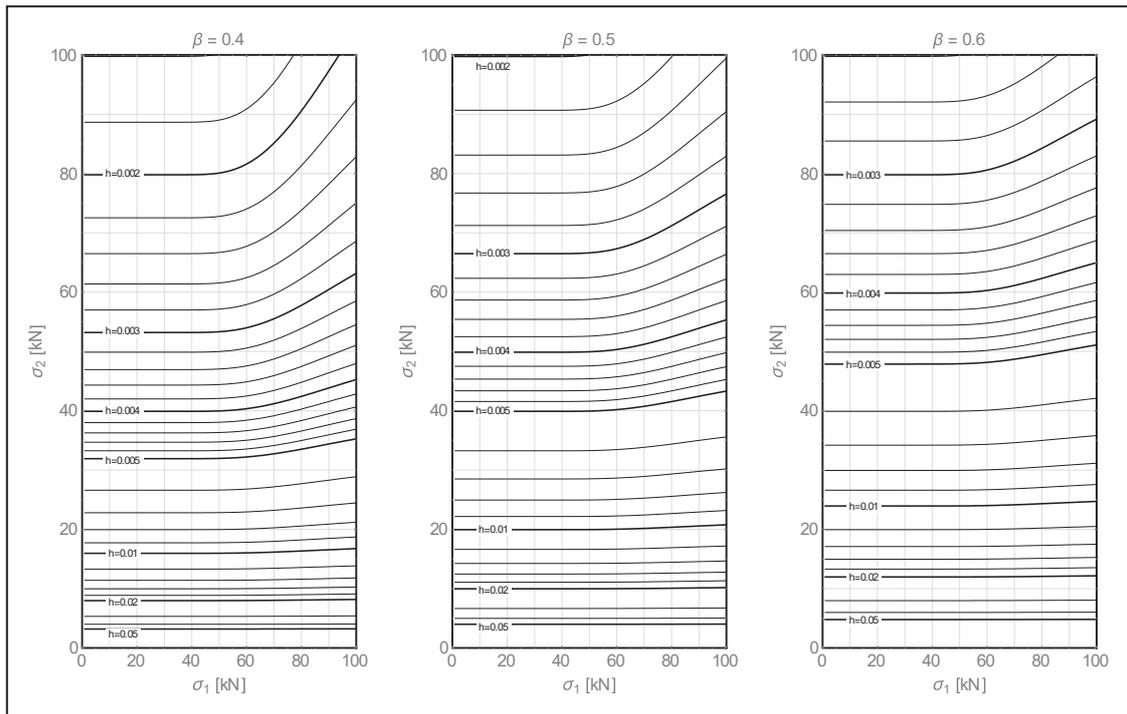


Abbildung 4.29: Nomogramme für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gesamtgewichtsverteilung des Lkw Typ 98 am Modalwert beladener Lkw (h_{beladen}) mit variablem Anteil beladener Lkw (β), variablen Standardabweichungen (σ_1 und σ_2) und konstanten Mittelwerten ($\mu_1 = 260$ kN und $\mu_2 = 440$ kN)

Für die Lage des markanten Punkt 2 wird analog zu Abschnitt 3.4 die vereinfachende Annahme getroffen, dass alle Lkw eines Typs gleich schwer sind bzw. sich das Gesamtgewicht aller Lkw durch ein gemeinsames Quantil der unterschiedlichen Gesamtgewichtsverteilungen bestimmen

lässt. Abbildung 4.30 zeigt den Zusammenhang zwischen der mittleren Häufigkeit einer Laststellung und diesem gemeinsamen Quantil anhand der analytischen Lösungen aus Abschnitt 4.2. Wie zu erwarten treten höhere Gesamtgewichte auf, je häufiger die betrachtete Laststellung ist. Anhand dieses Zusammenhangs wird die Näherung in Gleichung (4.41) abgeleitet, mit deren Hilfe sich aus der Häufigkeit das Quantil, damit das Gesamtgewicht aller Lkw und in der Folge die charakteristische Schwingbreite mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 100 Jahren bestimmen lässt. Die Näherung ist so gewählt, dass daraus im Regelfall auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse resultieren.

$$q = 1 - e^{-0,84 \cdot \ln(n) + 0,21} \quad (4.41)$$

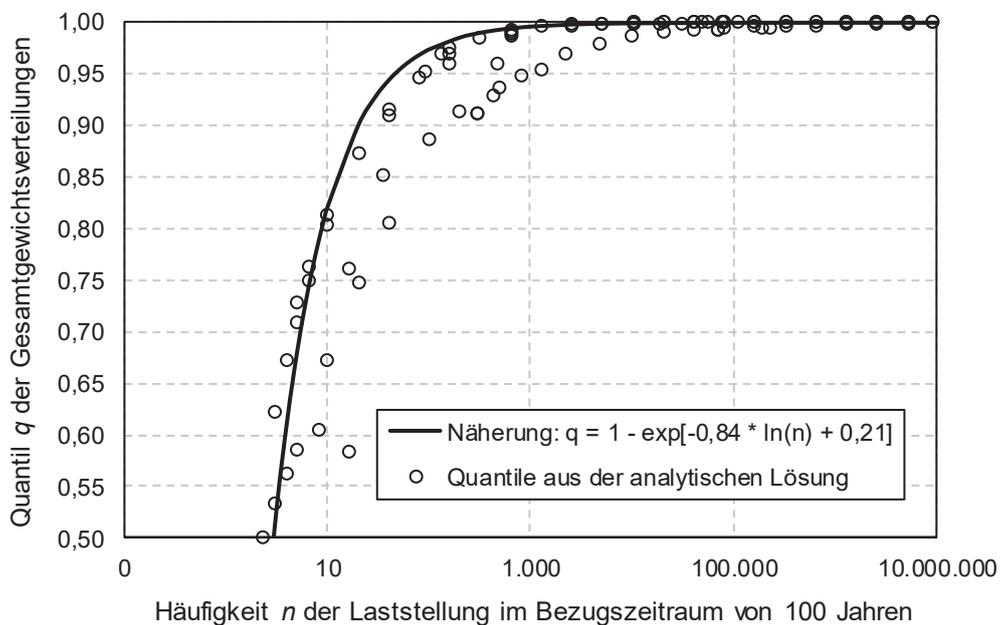


Abbildung 4.30: Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Laststellung und der Höhe der Gesamtgewichte aller Lkw

Zur einfachen Bestimmung der Gesamtgewichte anhand des Quantils q kann wiederum Abbildung 3.37 aus Abschnitt 3.4 herangezogen werden.

4.4.2 Beispiel

Das vereinfachte Rechenverfahren wird im Folgenden beispielhaft für das Feldmoment eines Einfeldträgers mit einer Spannweite von $L = 50 \text{ m}$ und zweispurigem Richtungsverkehr dargestellt. Einwirkungsseitig werden der „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“ sowie die Parameter der Verkehrszustände analog zu Abschnitt 4.2 angesetzt. Die mittlere Häufigkeit der Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“, vgl. Abbildung 4.31, beträgt bei einer Nutzungsdauer von 100 Jahren:

$$\begin{aligned} n &\approx 0,589 \cdot \frac{10.000}{DTV-SV} \cdot 0,85 \cdot 250 \frac{\text{Werkstage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} \\ &= 125,16 \cdot 10^6 \end{aligned} \quad (4.42)$$

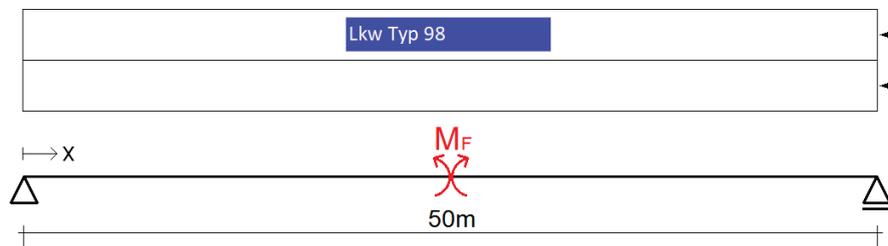


Abbildung 4.31: Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)

Das mittlere Gesamtgewicht beladener Lkw Typ 98 beträgt im hier betrachteten Verkehrsszenario $405,3 \text{ kN}$. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gesamtgewichtsverteilung am zugehörigen Modalwert kann aus Abbildung 4.28 mit $h_{\text{beladen}} = 0,0072$ entnommen werden. Mit Hilfe des Lastkoeffizienten des Schwingspiels, bestehend aus den Anteilen der Längseinfluss- und Querverteilungslinie $\Delta\{\sum \delta_j \cdot \eta_L \cdot \eta_Q\}$ sowie dem schädigungsäquivalenten Schwingbeiwert φ_{fat} , folgt aus Gleichung (4.43) und (4.44) die Lage des markanten Punkt 1:

$$\Delta M_{Lkw \text{ Typ } 98} = \underbrace{405,3 \text{ kN}}_{\substack{\text{mittleres GG} \\ \text{beladener} \\ \text{Lkw Typ 98}}} \cdot \underbrace{10,41 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,589 \cdot \widehat{1,2}}_{\substack{\Delta\{\sum \delta_j \cdot \eta_L \cdot \eta_Q\} \\ \text{Lastkoeffizient des Schwingspiels}}} \cdot \varphi_{fat} = 2.980 \text{ kNm} \quad (4.43)$$

$$\hat{n} = \underbrace{125,16 \cdot 10^6}_n \cdot \underbrace{0,0072}_{h_{\text{beladen}}} \cdot \left(\underbrace{10,41 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,589 \cdot \widehat{1,2}}_{\substack{\Delta\{\sum \delta_j \cdot \eta_L \cdot \eta_Q\} \\ \text{Lastkoeffizient des Schwingspiels}}} \cdot \varphi_{fat} \right)^{-1} = 122.500 \quad (4.44)$$

Die mittlere Häufigkeit der Laststellung „ungünstigste Anordnung im fließenden Verkehr“, vgl. Abbildung 4.32, beträgt bei einem Bezugszeitraum von 100 Jahren:

4 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung

$$n \approx \underbrace{0,005 \cdot 10.000 \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\text{zwei mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werkttage}}{\text{Jahr}} \quad (4.45)$$

$$\cdot 100 \text{ Jahre} = 55.220$$

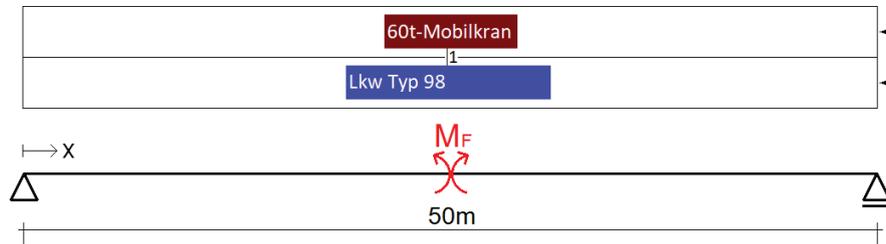


Abbildung 4.32: Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „ungünstigste Anordnung im fließenden Verkehr“ (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)

Anhand der Näherung in Abbildung 4.30 bzw. Gleichung (4.41) ergibt sich damit ein gemeinsames Quantil der unterschiedlichen Gesamtgewichtsverteilungen von $q = 0,99987$. Daraus resultiert wiederum entsprechend Abbildung 3.37 das Gesamtgewicht des Lkw Typ 98 von 588 kN sowie des 60t-Mobilkrans von 660 kN . Die charakteristische Schwingbreite am markanten Punkt 2 berechnet sich damit zu:

$$\Delta M_k = \underbrace{\begin{pmatrix} 660 \text{ kN} \\ 588 \text{ kN} \end{pmatrix}^T}_{\text{Gesamtgewichte}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 11,36 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,589 \cdot \widehat{1,2} \\ 10,41 \frac{\text{kNm}}{\text{kN}} \cdot 0,482 \cdot 1,2 \end{pmatrix}}_{\text{Lastkoeffizienten des Schwingspiels}} \cdot \varphi_{fat} = 8.840 \text{ kNm} \quad (4.46)$$

Durch Einsetzen der markanten Punkte 1 und 2 in Gleichung (4.15) resultiert insgesamt die Approximation des Mehrstufenkollektivs für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren:

$$n(\Delta M) = \begin{cases} 122.500 & \text{für } \Delta M \leq 2.980 \text{ kNm} \\ 122.500 \cdot \left(\frac{1}{122.500}\right)^{\frac{\Delta M^{1,3} - (2.980 \text{ kNm})^{1,3}}{(8.840 \text{ kNm})^{1,3} - (2.980 \text{ kNm})^{1,3}}} & \text{für } \Delta M > 2.980 \text{ kNm} \end{cases} \quad (4.47)$$

Die schädigungsäquivalente Schwingbreite ΔM_E mit einer Schwingspielzahl von $n_E = 2 \cdot 10^6$ ergibt sich bei einer konstanten Neigung der Wöhlerlinie von $m = 5$ zu:

$$\Delta M_E = \left(\frac{1}{n_E} \cdot \int_{\Delta M=0}^{\infty} n(\Delta M) \cdot \Delta M^m d\Delta M \right)^{1/m} = 8.013 \text{ kNm} \quad (4.48)$$

Die Langzeit-Monte-Carlo-Simulation liefert zum Vergleich eine schädigungsäquivalente Schwingbreite von 8.026 kNm , d.h. eine Abweichung von ca. 0,2%.

4.5 Schlussfolgerungen

Die aus der analytischen Lösung resultierenden Mehrstufenkollektive sind zunächst im Kontext bekannter Einheitskollektive einzuordnen. Abbildung 4.33 zeigt dazu die Summenhäufigkeiten bei unterschiedlichen Verhältnissen $\Delta M_{Lkw Typ 98} / \Delta M_k$. Ein Vergleich mit den Einheitskollektiven nach [GaGH64], siehe Abbildung 2.42, bestätigt den für Straßenbrücken bereits bekannten Formparameter $\nu = 2 \dots 4$.

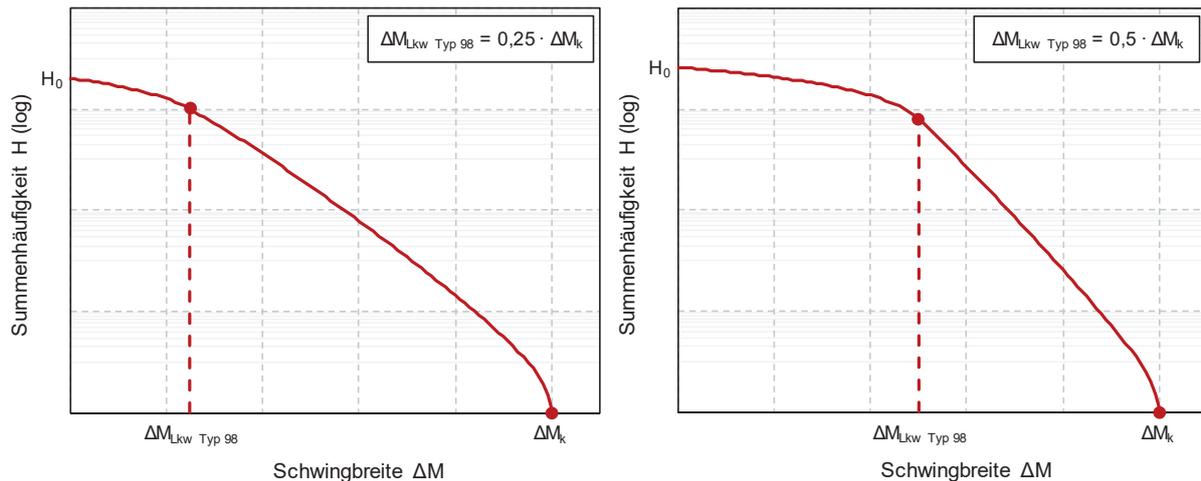


Abbildung 4.33: Summenhäufigkeiten der analytischen Lösung des Mehrstufenkollektivs

Die hier entwickelte Approximation der Mehrstufenkollektive liefert jedoch erstmalig eine Systematik zur Ermittlung von Kollektivhöchstwert $\Delta\sigma_{max}$, -umfang H_0 und -form. Durch die Definition eines zwischenliegenden Punktes wird eine Genauigkeit erreicht, die im Gegensatz zur Allgemeingültigkeit der Formparameter auch den Anforderungen einer objektspezifischen Untersuchung genügt. Damit liegen Grundlagen eines Nachweisformates basierend auf Lebensdauerlinien vor. Wesentlicher Vorteil derartiger Nachweisformate ist die erhöhte Treffsicherheit bei der Einschätzung der Lebensdauer eines Bauteils infolge Ermüdungsbeanspruchung im Gegensatz zu bisherigen Nachweisformaten des Bauingenieurwesens. Die Ursache hierfür ist, dass bestehende Unsicherheiten der linearen Schadensakkumulation sowie die Definition einer Bezugs-Wöhlerlinie entfallen, vgl. [Alsh16]. Dies setzt jedoch voraus, dass versuchstechnisch systematisch Lebensdauerlinien für die infolge des Straßenverkehrs typischen Kollektivformen ermittelt werden, vgl. Abbildung 4.33. Wird dann im Zuge der Nachweisführung der Kollektivhöchstwert $\Delta\sigma_{max}$ bestimmt (anhand der charakteristischen Schwingbreite ΔM_k), kann über den Kollektivumfang H_0 direkt auf die Lebensdauer geschlossen werden.

Bezüglich einer probabilistischen Nachweisführung wird in bisherigen Untersuchungen häufig eine Weibull-Verteilung zur vereinfachten Beschreibung der Mehrstufenkollektive herangezogen, welche die Ableitung der Einheitskollektive darstellt, vgl. [MeSe95] und [Alsh16]. Schwierig gestaltet sich damit jedoch die sinnvolle Festlegung aller einwirkungsseitigen Basisvariablen. Dies betrifft vor allem die Streuung der Schwingbreiten. Für weiterführende probabilistische Analysen liefert die hier vorgestellte analytische Lösung Grundlagen zur sinnvollen Definition der Basisvariablen. Anhand von Abbildung 4.34 werden diese im Folgenden erläutert.

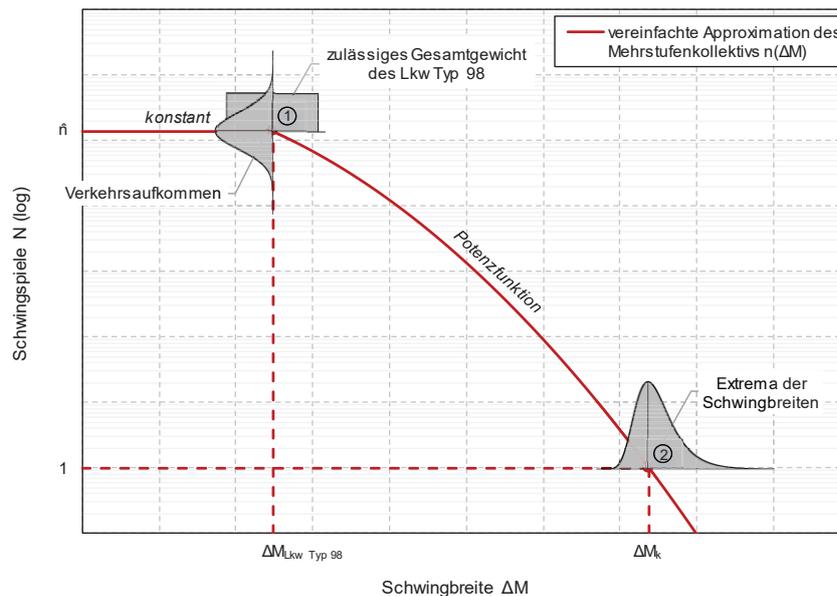


Abbildung 4.34: Mehrstufenkollektiv mit den Basisvariablen einer probabilistischen Analyse

a) Schwingenspielzahl im Punkt 1:

Streuung und Mittelwert der Schwingenspielzahl im Punkt 1 resultieren aus den Unsicherheiten bei der Bestimmung des gesamten Verkehrsaufkommens innerhalb der geplanten Nutzungsdauer. Entsprechende Zahlenwerte lassen sich beispielsweise anhand unterschiedlicher Verkehrsprognosen berechnen, die häufig auch verschiedene Szenarien betrachten, vgl. [Prog07], [InBv07], [InBv14]. Die zugehörige Basisvariable kann als Normalverteilung angenommen werden.

b) Schwingbreite im Punkt 1:

Die Verteilung der Schwingbreite im Punkt 1 ist verknüpft mit der Entwicklung des zulässigen Gesamtgewichtes des Lkw Typ 98 (bzw. des ungünstigsten Lkws im regulären Verkehr, d.h. ohne Genehmigungspflicht). Für die entsprechende Basisvariable wird eine Gleichverteilung vorgeschlagen, deren Grenzen einerseits dem aktuellen und andererseits einem prognostizierten zulässigen Gesamtgewicht entspricht.

c) Schwingbreite im Punkt 2:

Die Verteilung der Schwingbreite im Punkt 2 (Kollektivhöchstwert) entspricht den Extrema der Schwingbreiten in einem Bezugszeitraum entsprechend der Nutzungsdauer, wie zum Beispiel 100-Jahres-Extrema. Entsprechend den Schlussfolgerungen in Abschnitt 3.5 wird dafür eine Gumbel-Verteilung vorgeschlagen.

Ergänzend sei erwähnt, dass speziell bei den beiden Basisvariablen der Schwingbreite zusätzlich (teilweise erhebliche) Modellunsicherheiten zu berücksichtigen sind.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Methoden zur analytischen Herleitung von Verkehrslastmodellen für Straßenbrücken entwickelt. Deren Grundlage sind sowohl extreme als auch ermüdungsrelevante Laststellungen des realen Verkehrs. Auch ohne Verfügbarkeit komplexer Verkehrslastsimulationsprogramme können damit über eine anschauliche Anordnung der Lkw realitätsnahe Extremwerte der Verkehrsbeanspruchung hinsichtlich Tragfähigkeit sowie Mehrstufenkollektive bezüglich Ermüdung ermittelt werden.

5.1.1 Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten

Die analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung in Kapitel 3 basiert auf einer probabilistischen Analyse extremer Laststellungen. Dazu wird in dieser Arbeit zunächst geklärt, wie die Beanspruchung infolge einer extremen Laststellung verteilt ist und wie sich deren mittlere Häufigkeit berechnen lässt. Aus den Beanspruchungsverteilungen und mittleren Häufigkeiten lässt sich die Extremwertverteilung für einen beliebigen Bezugszeitraum ermitteln. Diese dient wiederum als Grundlage zur Bestimmung charakteristischer Werte M_k . Zur Verifizierung des Rechenmodells werden Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Hilfe des Simulationsprogramms PATLoB durchgeführt und deren Ergebnis mit der analytischen Lösung verglichen. Als Vergleichsgrundlage dienen charakteristische Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine ausreichende Genauigkeit ($\pm 10\%$) des charakteristischen Wertes erreicht wird, wenn ausschließlich die maßgebende extreme Laststellung betrachtet

wird, welche mit einem Verkehrslastmodell gleichzusetzen ist. Spannweitenabhängig dominiert dabei eine der folgenden Kategorien:

- a) reiner fließender Verkehr
- b) reiner Stauverkehr
- c) Kombination aus fließendem Verkehr und Stauverkehr

Die je Kategorie ungünstigste Laststellung wird in Abbildung 3.20 bis Abbildung 3.22 ab Seite 96 beispielhaft dargestellt. Diese beziehen sich auf das Feldmoment eines Einfeldträgers mit der Spannweite $L = 50 \text{ m}$ und das Stützmoment eines Zweifeldträgers mit den Spannweiten $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$, mit jeweils unterschiedlichen Fahrstreifenanordnungen sowie einen Langstrecken- und Ortsverkehr. Die analytische Lösung ist stets für jede der drei Kategorien aufzustellen und das ungünstigste Ergebnis als maßgebend zu betrachten. Eine Übertragbarkeit auf andere statische Systeme wird damit möglich.

Es wird deutlich, dass von den insgesamt im Fahrzeugkollektiv enthaltenen Lkw ausschließlich der Lkw Typ 98 sowie das Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs (hier der 60t-Mobilkran) in den maßgebenden extremen Laststellungen auftreten. Die übrigen häufig auftretenden Fahrzeugtypen können ohne Genauigkeitsverlust vernachlässigt werden. Dies zeigt sich sowohl im untersuchten Langstrecken-, als auch Ortsverkehr. Eine weitere wesentliche Erkenntnis ist, dass eine extreme Laststellung erst dann maßgebend wird, wenn deren mittlere Häufigkeit mehr als ca. einmal in einem Zeitraum von 1.000 Jahren beträgt (analog zur Definition der mittleren Wiederkehrperiode). Seltener Laststellungen haben nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis der analytischen Lösung. Bei einer stark abweichenden mittleren Wiederkehrperiode können dementsprechend andere Laststellungen maßgebend werden.

Die hier vorgestellte analytische Lösung erlaubt eine Anwendung auf beliebige Verkehre und Fahrstreifenanordnungen sowie eine Vielzahl statischer Systeme. Aufgrund der steigenden Zahl möglicher Laststellungen bei zunehmender Brückenlänge und Fahrstreifenanzahl liegt die Anwendungsgrenze bei einer zusammenhängenden Länge der Einflusslinienbereiche gleichen Vorzeichens von $L \approx 100 \text{ m}$.

Das vereinfachte Handrechenverfahren wird in Abschnitt 3.4 ab Seite 110 vorgestellt.

5.1.2 Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven

Die analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung in Kapitel 4 basiert auf einer probabilistischen Analyse der Überfahrten ermüdungsrelevanter Laststellungen. Die Grundlagen sind weitestgehend identisch zur vorherigen analytischen Lösung, jedoch wird hier die Verteilungsdichte der Schwingbreiten eines Schwingspiels infolge der Überfahrt einer Laststellung betrachtet. Aus den Schwingbreitenverteilungen und mittleren Häufigkeiten der Überfahrten lässt sich das Mehrstufenkollektiv der Verkehrsbeanspruchung für eine beliebige Nutzungsdauer ableiten. Dieses dient unter anderem als Grundlage zur Ermittlung schädigungsäquivalenter Schwingbreiten ΔM_E . Zur Vereinfachung der Berechnung wird eine Approximation der analytischen Lösung entwickelt, bei der ausschließlich die Überfahrt ausgewählter Laststellungen betrachtet wird, um zwei markante Punkte des Mehrstufenkollektivs zu bestimmen. Alle übrigen Bereiche des Mehrstufenkollektivs werden vereinfacht abgebildet.

- Punkt 1 repräsentiert dabei den Modalwert der Schwingbreitenverteilung, der durch die Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ resultiert.
- Punkt 2 entspricht einer maximal zu erwartenden Schwingbreite, d.h. einer charakteristischen Schwingbreite ΔM_k mit einer mittleren Wiederkehrperiode entsprechend der Nutzungsdauer, infolge einer Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „ungünstigste Anordnung im fließenden Verkehr“.

Zur Verifizierung des Rechenmodells werden auch hier Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Hilfe des Simulationsprogramms PATLoB durchgeführt und deren Ergebnis mit der analytischen Lösung verglichen. Als Vergleichsgrundlage dienen schädigungsäquivalente Schwingbreiten mit einer Schwingspielzahl von $n_E = 2 \cdot 10^6$, einer konstanten Neigung der Wöhlerlinie von $m = 5$ und einer Nutzungsdauer von 100 Jahren.

Es zeigt sich, dass die schädigungsäquivalenten Schwingbreiten durch die Approximation der Mehrstufenkollektive ausreichend genau ($\pm 10\%$) ermittelt werden können. Analog zur analytischen Lösung zur Ermittlung von Extremwerten zeigen die Ergebnisse, dass hierfür die charakteristische Schwingbreite im Punkt 2 anhand lediglich einer maßgebenden ermüdungsrelevanten Laststellung ermittelt werden kann. Abhängig vom Verkehrsaufkommen und dessen Zusammensetzung dominiert dabei eine der folgenden Laststellungen:

- a) ungünstigste Laststellung mit ausschließlich Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr
- b) ungünstigste Laststellung mit einem Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs und ansonsten ausschließlich Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr

Die je Fall ungünstigste Laststellung wird in Abbildung 4.11 bis Abbildung 4.14 ab Seite 136 beispielhaft dargestellt. Die Laststellungen beziehen sich auf das Feldmoment eines Einfeldträgers mit der Spannweite $L = 50 \text{ m}$ sowie das Feld- und Stützmoment eines Zweifeldträgers mit den Spannweiten $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$, mit jeweils unterschiedlichen Fahrstreifenanordnungen sowie einen Langstrecken- und Ortsverkehr. Da hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung ausschließlich fließender Verkehr betrachtet wird, ist eine Übertragbarkeit auf andere statische Systeme direkt möglich. Die analytische Lösung ist stets für beide Fälle aufzustellen und das ungünstigste Ergebnis als maßgebend zu betrachten.

Wesentlich ist, dass eine Laststellung bzgl. Punkt 2 erst dann maßgebend wird, wenn deren mittlere Häufigkeit größer ist als ca. einmal in einem Zeitraum von 100 Jahren (analog zur festgelegten Nutzungsdauer). Seltener Laststellungen sind bezüglich der Mehrstufenkollektive irrelevant. Bei einer stark abweichenden Nutzungsdauer werden dementsprechend andere Laststellungen maßgebend. Außerdem zeigt sich, dass eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird, wenn für die markanten Punkte 1 und 2 jeweils ausschließlich das maßgebende Schwingenspiel der zugehörigen Laststellung betrachtet wird, sofern infolge deren Überfahrt mehrere Schwingenspiele entstehen.

Die hier vorgestellte analytische Lösung erlaubt eine Anwendung auf beliebige Verkehre und Fahrstreifenanordnungen sowie eine Vielzahl statischer Systeme. Die Anwendungsgrenze liegt bei Einzelspannweiten von $L \approx 70 \text{ m}$.

Das vereinfachte Handrechenverfahren wird in Abschnitt 4.4 ab Seite 149 vorgestellt.

Die hier entwickelte Approximation der Mehrstufenkollektive liefert erstmalig, basierend auf einer anschaulichen Anordnung der Lkw, eine Systematik zur realistischen Ermittlung von Kollektivhöchstwert, -umfang und -form. Damit liegen für weiterführende Arbeiten unter anderem Grundlagen eines Nachweisformates basierend auf Lebensdauerlinien vor.

5.2 Ausblick

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wird folgender Forschungsbedarf identifiziert:

- Zur Erhöhung der Treffsicherheit bei der Einschätzung der Lebensdauer eines Bauteils infolge Ermüdungsbeanspruchung bietet es sich an, die hier approximierte Form des Mehrstufenkollektivs in einem Nachweisverfahren auf der Basis von Lebensdauerlinien zu nutzen. Dies setzt jedoch voraus, dass versuchstechnisch abgesicherte Lebensdauerlinien für unterschiedliche Kerbdetails vorliegen. Der Umfang an Betriebsfestigkeitsversuchen an stählernen Schweißverbindungen ist nach aktuellem Stand noch relativ klein, vgl. [Alsh16]. Für deren Ergänzung sind daher noch weitere Anstrengungen erforderlich. In der Konsequenz könnte das im Maschinenbau bekannte Konzept der Lebensdauerlinien auch im Bauingenieurwesen zur wirtschaftlichen Dimensionierung und vor allem zur Bewertung bestehender Konstruktionen dienen.
- Im Rahmen des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes werden Unsicherheiten bisher nur unzureichend erfasst. Zur fundierten Begründung der inzwischen etablierten Sicherheitselemente ist daher eine systematische Erfassung und Berücksichtigung sämtlicher Unsicherheiten erforderlich. Einwirkungsseitig lassen sich diese untergliedern in die Unsicherheiten der messtechnischen Erfassung der hier verwendeten Eingangsdaten, den Unsicherheiten von Verkehrsprognosen sowie den Unsicherheiten der Extremwertanalyse. Letztere können bei separater Betrachtung, wie in dieser Arbeit behandelt, bereits deutlich eingegrenzt werden. Besondere Bedeutung haben zusätzlich die Modellunsicherheiten bei der Ermittlung von Beanspruchungen, vgl. [Zieg18], welche teilweise auch von der Erfahrung des Ingenieurs abhängig sind. Da vor allem bei der Bewertung älterer Bauwerke die bestehenden Sicherheitselemente häufig zu konservativ sind, sind derartige Forschungsaktivitäten als notwendig und unterstützenswert anzusehen.
- Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht im Bereich des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs mit und ohne Dauergenehmigung. Sowohl hinsichtlich deren Gesamtgewichte als auch der Anzahl der tatsächlich durchgeführten Fahrten liegen bisher nur stichpunktartige Erkenntnisse vor. Erforderlich ist daher eine möglichst systematische Erfassung und Auswertung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs, da dieser einen enormen Einfluss auf die hier ermittelten Ergebnisse hat und nicht zuletzt auch auf die aktuell angewandten normativen Verkehrslastmodelle.

Anhang

Anhang A

Fahrzeugkollektive

A.1 Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran

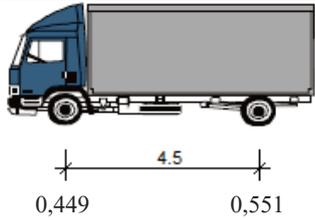
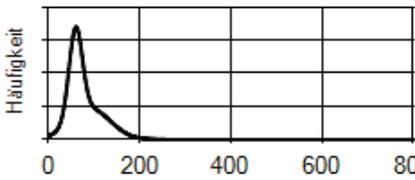
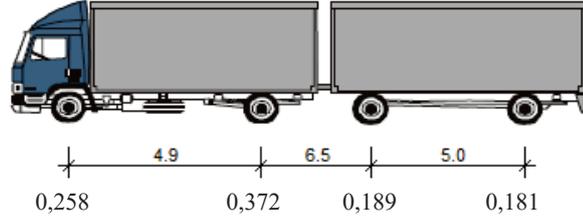
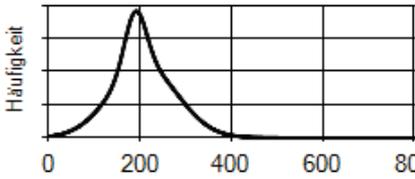
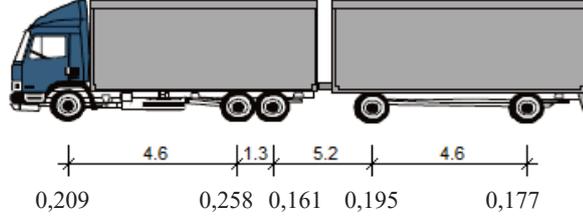
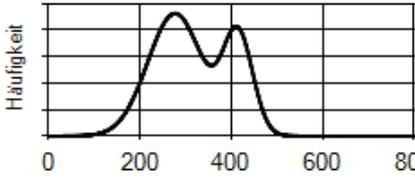
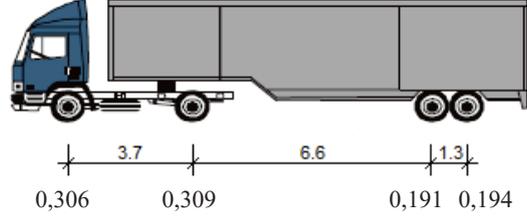
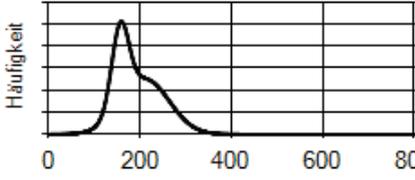
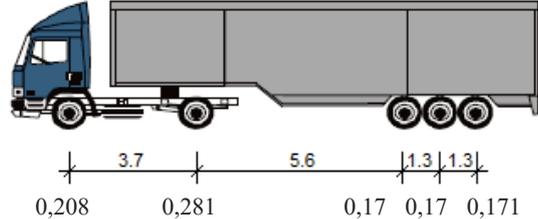
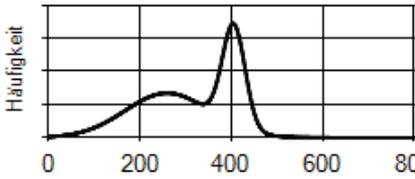
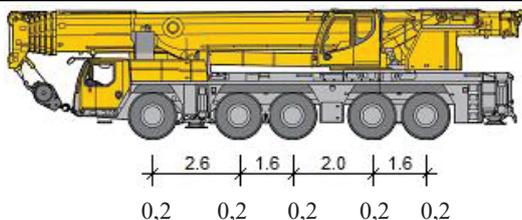
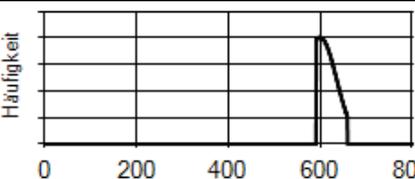
Lkw-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
Typ 8 10,9%		 <p>$\mu_1 = 59,6; \mu_2 = 91,7; \sigma_1 = 14,6; \sigma_2 = 44$ [kN] $\alpha = 0,49; \beta = 0,51$</p>
Typ 33 4,9%		 <p>$\mu_1 = 190,3; \mu_2 = 208,4; \sigma_1 = 23,2; \sigma_2 = 73,9$ [kN] $\alpha = 0,20; \beta = 0,80$</p>
Typ 41 16,9%		 <p>$\mu_1=276,8; \mu_2=414,5; \sigma_1=59,5; \sigma_2=32,5$ [kN] $\alpha = 0,69; \beta = 0,31$</p>
Typ 97 7,9%		 <p>$\mu_1 = 156,7; \mu_2 = 211,4; \sigma_1 = 18,8; \sigma_2 = 52,8$ [kN] $\alpha = 0,34; \beta = 0,66$</p>
Typ 98 58,9%		 <p>$\mu_1 = 259,6; \mu_2 = 405,3; \sigma_1 = 92; \sigma_2 = 24,8$ [kN] $\alpha = 0,62; \beta = 0,38$</p>
60t-Mobilkran 0,5%		 <p>$\mu = 600; \sigma = 36; x_u = 591; x_o = 660$ [kN]</p>

Tabelle A.1: Fahrzeugkollektiv „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“. Angaben in Anlehnung an WiM-Daten der Messstelle „A61 Bliesheim (2004)“ [Kasc09] und Untersuchungen zum gen.pfl. SV mit Dauergenehmigung [FrBö13], [FrBö14]. DTV = 30.000, DTV-SV = 10.000 pro Richtung

A.2 Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran

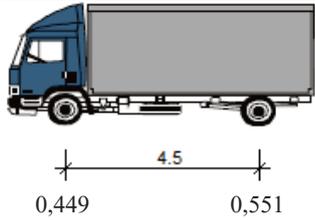
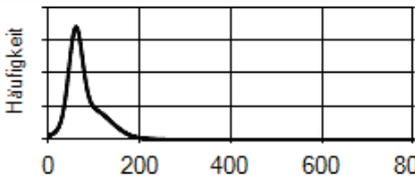
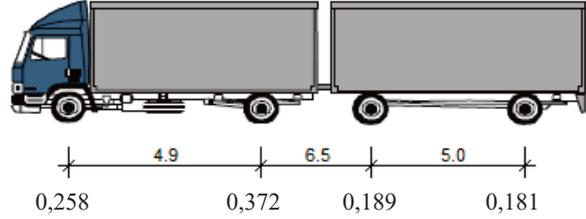
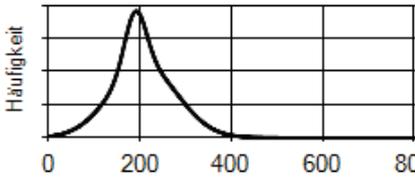
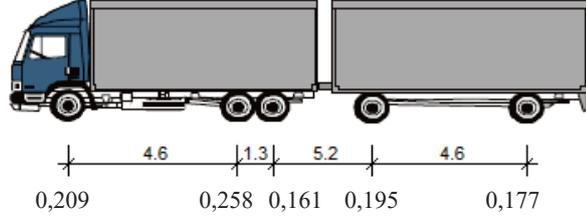
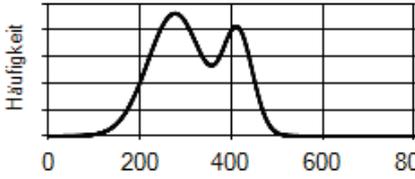
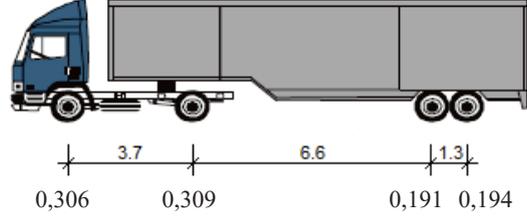
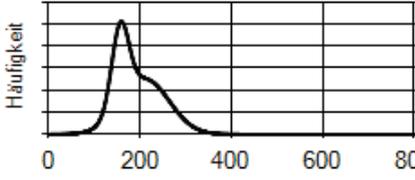
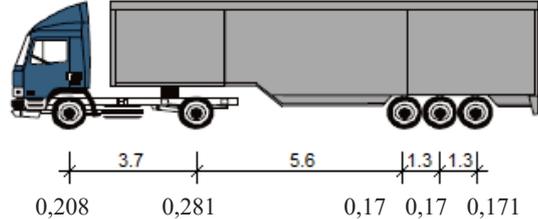
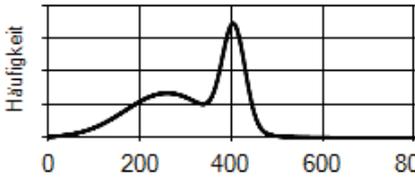
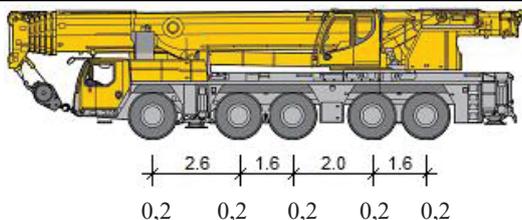
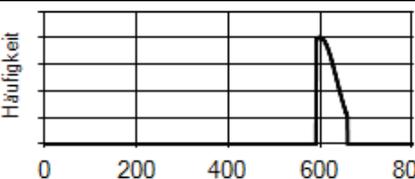
Lkw-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
Typ 8 74,98%		 <p>$\mu_1 = 59,6; \mu_2 = 91,7; \sigma_1 = 14,6; \sigma_2 = 44$ [kN] $\alpha = 0,49; \beta = 0,51$</p>
Typ 33 4,98%		 <p>$\mu_1 = 190,3; \mu_2 = 208,4; \sigma_1 = 23,2; \sigma_2 = 73,9$ [kN] $\alpha = 0,20; \beta = 0,80$</p>
Typ 41 4,98%		 <p>$\mu_1=276,8, \mu_2=414,5, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5$ [kN] $\alpha = 0,69; \beta = 0,31$</p>
Typ 97 4,98%		 <p>$\mu_1 = 156,7; \mu_2 = 211,4; \sigma_1 = 18,8; \sigma_2 = 52,8$ [kN] $\alpha = 0,34; \beta = 0,66$</p>
Typ 98 9,98%		 <p>$\mu_1 = 259,6; \mu_2 = 405,3; \sigma_1 = 92; \sigma_2 = 24,8$ [kN] $\alpha = 0,62; \beta = 0,38$</p>
60t-Mobilkran 0,1%		 <p>$\mu = 600; \sigma = 36; x_u = 591; x_o = 660$ [kN]</p>

Tabelle A.2: Fahrzeugkollektiv „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“. Angaben in Anlehnung an WiM-Daten der Messstelle „A61 Bliesheim (2004)“ [Kasc09], Untersuchungen zum gen.pfl. SV mit Dauergenehmigung [FrBö13], [FrBö14] und eigenen Erhebungen an Strecken im untergeordneten Straßennetz. DTV = 10.000, DTV-SV = 500 pro Richtung

A.3 Schwerverkehrsvariante 1

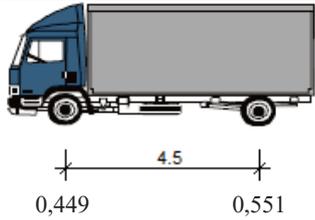
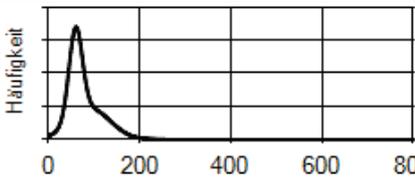
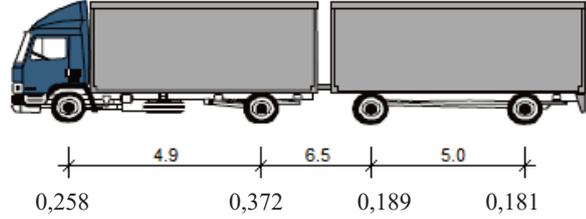
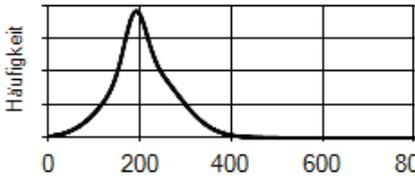
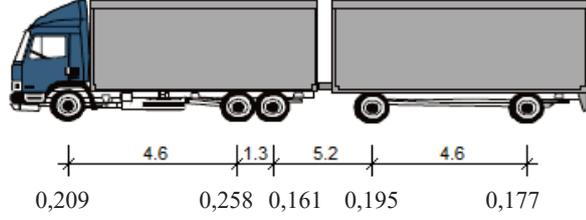
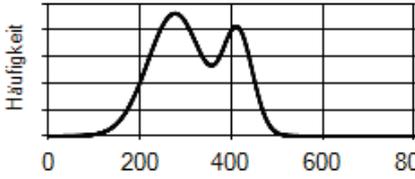
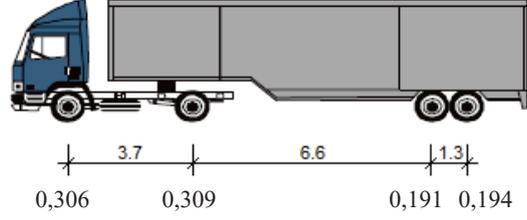
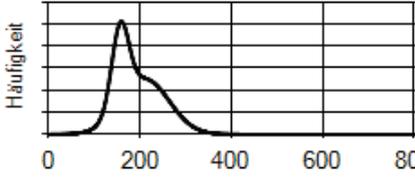
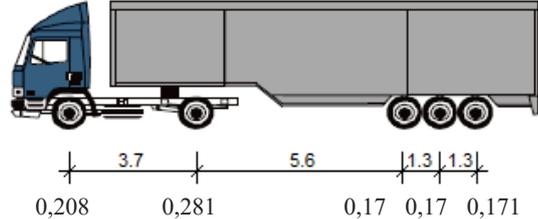
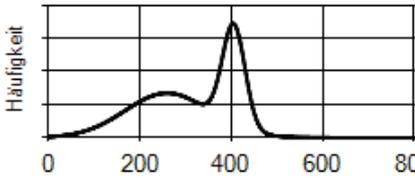
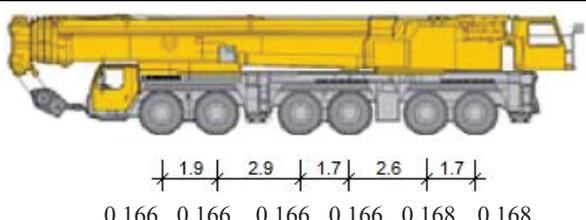
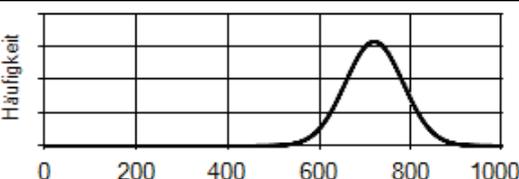
Lkw-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
Typ 8 10,9%		 <p>$\mu_1 = 59,6; \mu_2 = 91,7; \sigma_1 = 14,6; \sigma_2 = 44$ [kN] $\alpha = 0,49; \beta = 0,51$</p>
Typ 33 4,9%		 <p>$\mu_1 = 190,3; \mu_2 = 208,4; \sigma_1 = 23,2; \sigma_2 = 73,9$ [kN] $\alpha = 0,20; \beta = 0,80$</p>
Typ 41 16,9%		 <p>$\mu_1=276,8, \mu_2=414,5, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5$ [kN] $\alpha = 0,69; \beta = 0,31$</p>
Typ 97 7,9%		 <p>$\mu_1 = 156,7; \mu_2 = 211,4; \sigma_1 = 18,8; \sigma_2 = 52,8$ [kN] $\alpha = 0,34; \beta = 0,66$</p>
Typ 98 58,9%		 <p>$\mu_1 = 259,6; \mu_2 = 405,3; \sigma_1 = 92; \sigma_2 = 24,8$ [kN] $\alpha = 0,62; \beta = 0,38$</p>
72t-Mobilkran 0,5%		 <p>$\mu = 720; \sigma = 63,3$ [kN]</p>

Tabelle A.3: Fahrzeugkollektiv „Schwerverkehrsvariante 1“. Angaben analog zu „Schwerverkehrsvariante B“ in [FrBö11a], hier mit: DTV = 30.000, DTV-SV = 10.000 pro Richtung

A.4 Schwerverkehrsvariante 2

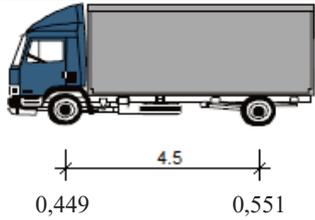
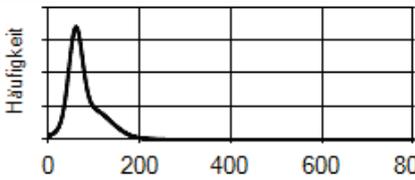
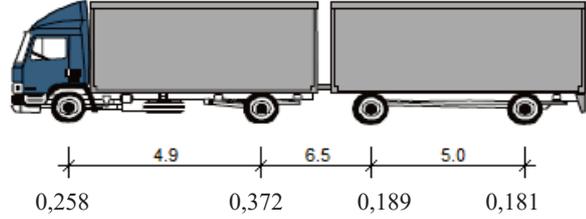
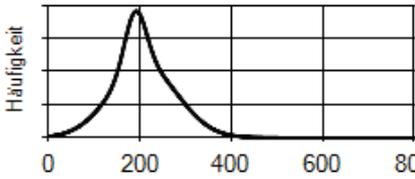
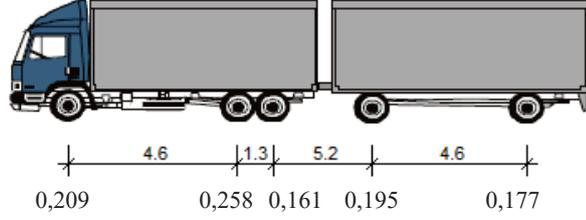
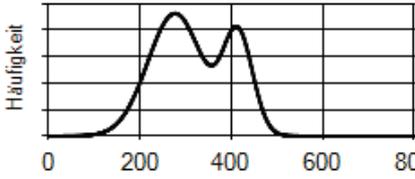
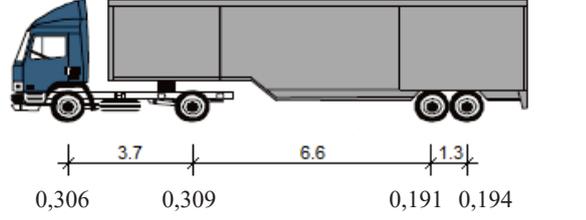
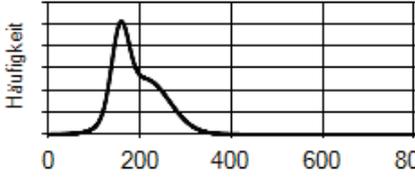
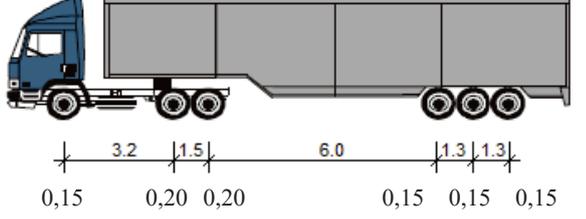
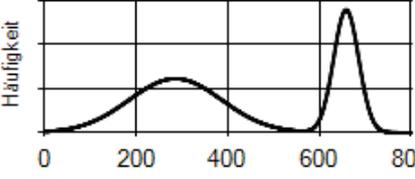
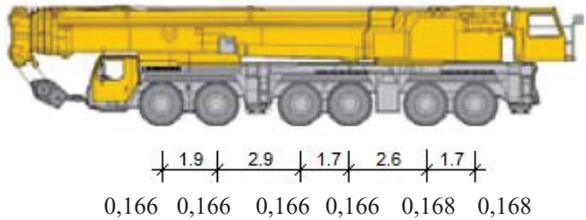
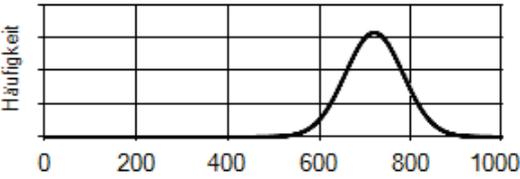
Lkw-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastanteile	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
Typ 8 14,09%		 <p>$\mu_1 = 59,6; \mu_2 = 91,7; \sigma_1 = 14,6; \sigma_2 = 44$ [kN] $\alpha = 0,49; \beta = 0,51$</p>
Typ 33 6,34%		 <p>$\mu_1 = 190,3; \mu_2 = 208,4; \sigma_1 = 23,2; \sigma_2 = 73,9$ [kN] $\alpha = 0,20; \beta = 0,80$</p>
Typ 41 21,85%		 <p>$\mu_1=276,8, \mu_2=414,5, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5$ [kN] $\alpha = 0,69; \beta = 0,31$</p>
Typ 97 10,21%		 <p>$\mu_1 = 156,7; \mu_2 = 211,4; \sigma_1 = 18,8; \sigma_2 = 52,8$ [kN] $\alpha = 0,34; \beta = 0,66$</p>
Typ 100 46,86%		 <p>$\mu_1 = 285,6; \mu_2 = 658,6; \sigma_1 = 101,2; \sigma_2 = 27,3$ [kN] $\alpha = 0,62; \beta = 0,38$</p>
72t-Mobilkran 0,65%		 <p>$\mu = 720; \sigma = 63,3$ [kN]</p>

Tabelle A.4: Fahrzeugkollektiv „Schwerverkehrsvariante 2“. Angaben analog zu „Schwerverkehrsvariante F“ in [FrBö11a], hier mit: DTV = 30.000, DTV-SV = 10.000 pro Richtung

Anhang B

Brückenkatalog

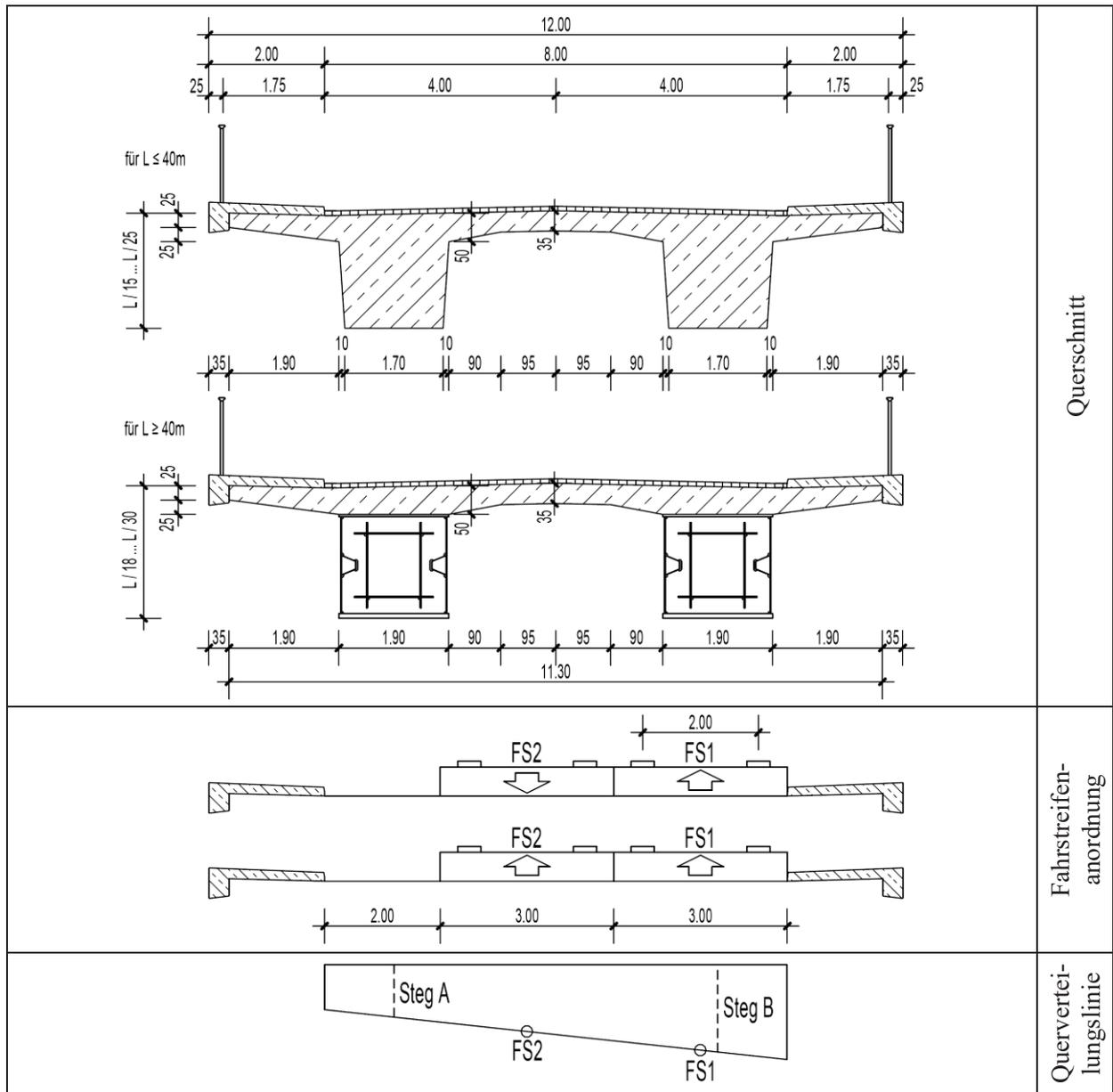


Abbildung B.1: Brückenquerschnitt, Fahrstreifenanordnung und idealisierte Querverteilungslinie für Querschnitte mit 2 Fahrstreifen (z.B. RQ11B)

L	Querverteilungslinie			
	Steg A	Steg B	FS2	FS1
10 m	0,20	0,80	0,446	0,768
20 m	0,25	0,75	0,455	0,724
30 m	0,30	0,70	0,464	0,679
40 m	0,35	0,65	0,473	0,634
50 m	0,40	0,60	0,482	0,589
70 m	0,45	0,55	0,491	0,545

Tabelle B.1: Idealisierte Querverteilungslinie der Momente für Brückenquerschnitte mit 2 Fahrstreifen

L	Querverteilungslinie			
	Steg A	Steg B	FS2	FS1
-	0,00	1,00	0,411	0,946

Tabelle B.2: Idealisierte Querverteilungslinie der Querkräfte für Brückenquerschnitte mit 2 Fahrstreifen

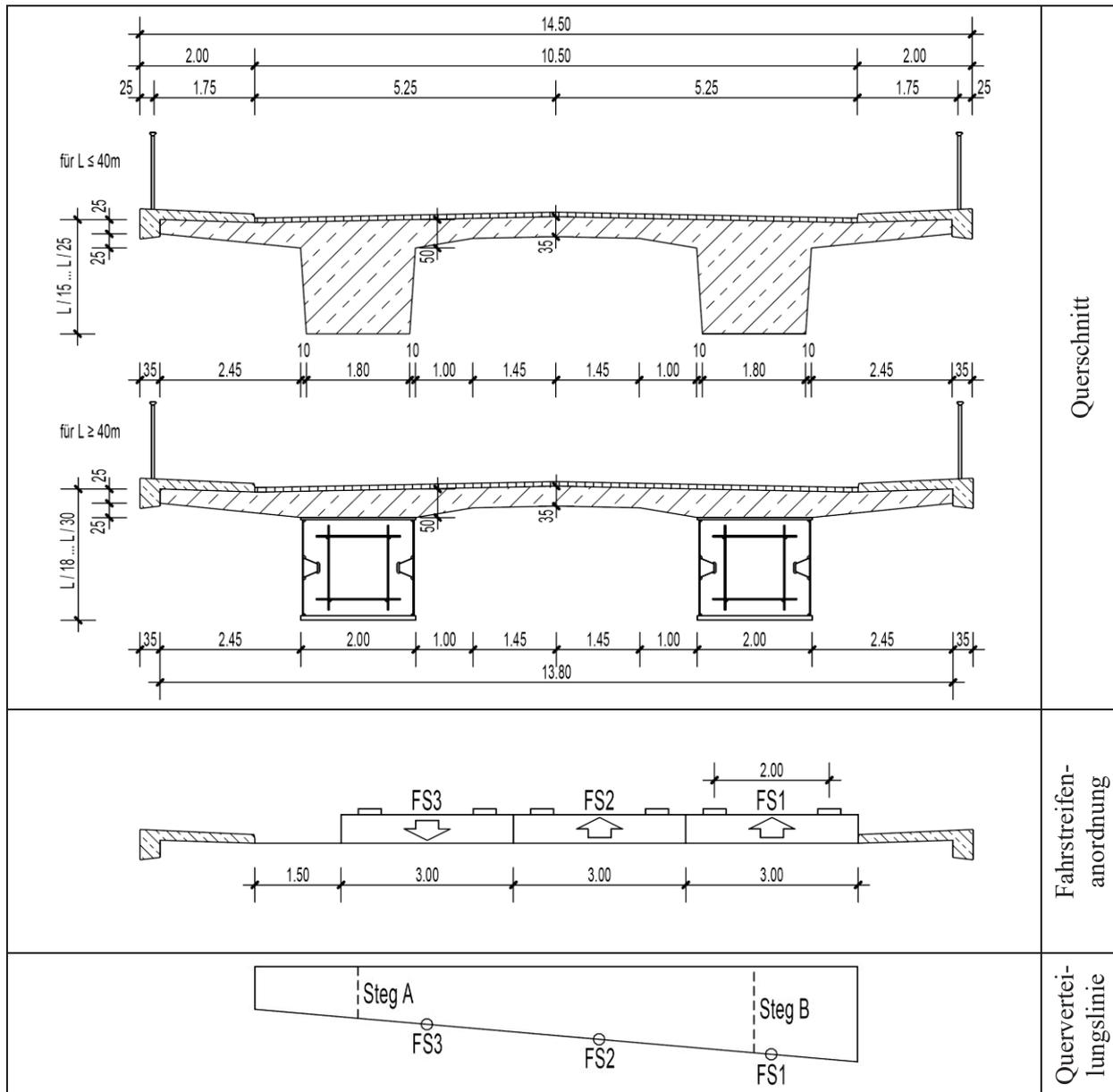


Abbildung B.2: Brückenquerschnitt, Fahrstreifenanordnung und idealisierte Querverteilungslinie für Querschnitte mit 3 Fahrstreifen (z.B. RQ28B)

L	Querverteilungslinie				
	Steg A	Steg B	FS3	FS2	FS1
10 m	0,15	0,85	0,272	0,576	0,880
20 m	0,20	0,80	0,305	0,565	0,826
30 m	0,25	0,75	0,337	0,554	0,772
40 m	0,30	0,70	0,370	0,544	0,718
50 m	0,35	0,65	0,402	0,533	0,663
70 m	0,40	0,60	0,435	0,522	0,609

Tabelle B.3: Idealisierte Querverteilungslinie der Momente für Brückenquerschnitte mit 3 Fahrstreifen

L	Querverteilungslinie				
	Steg A	Steg B	FS3	FS2	FS1
-	0,00	1,00	0,174	0,609	1,043

Tabelle B.4: Idealisierte Querverteilungslinie der Querkräfte für Brückenquerschnitte mit 3 Fahrstreifen

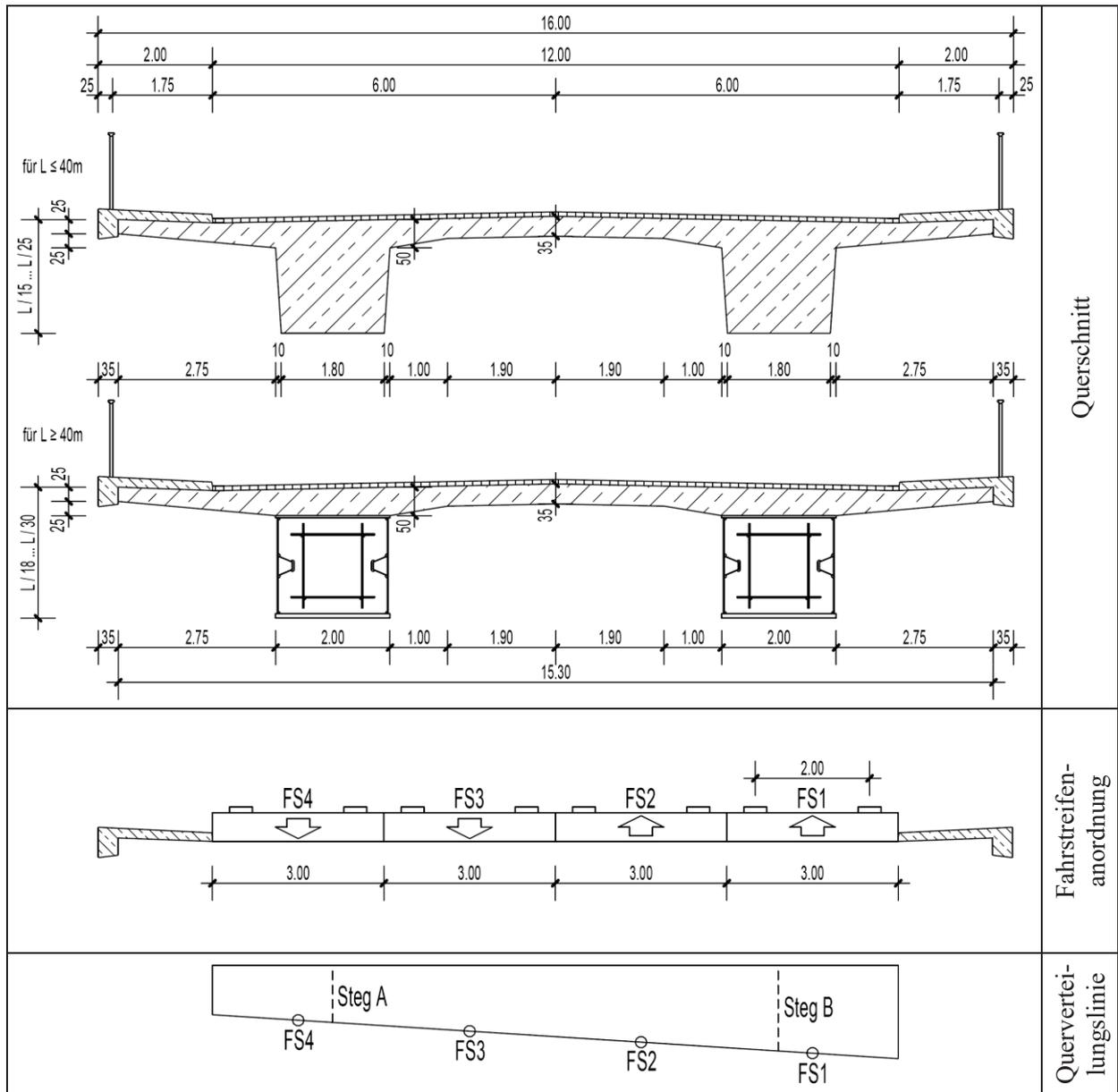


Abbildung B.3: Brückenquerschnitt, Fahrstreifenanordnung und idealisierte Querverteilungslinie für Querschnitte mit 4 Fahrstreifen (z.B. RQ31B)

L	Querverteilungslinie					
	Steg A	Steg B	FS4	FS3	FS2	FS1
10 m	0,15	0,85	0,096	0,365	0,635	0,904
20 m	0,20	0,80	0,154	0,385	0,616	0,846
30 m	0,25	0,75	0,212	0,404	0,596	0,788
40 m	0,30	0,70	0,270	0,423	0,577	0,731
50 m	0,35	0,65	0,327	0,442	0,558	0,673
70 m	0,40	0,60	0,385	0,462	0,538	0,615

Tabelle B.5: Idealisierte Querverteilungslinie der Momente für Brückenquerschnitte mit 4 Fahrstreifen

L	Querverteilungslinie					
	Steg A	Steg B	FS4	FS3	FS2	FS1
-	0,00	1,00	-0,077	0,308	0,692	1,077

Tabelle B.6: Idealisierte Querverteilungslinie der Querkräfte für Brückenquerschnitte mit 4 Fahrstreifen

Anhang C

Einflusslinien

C.1 Einflusslinien – Einfeldträger

C.1.1 Feldmoment [kNm]

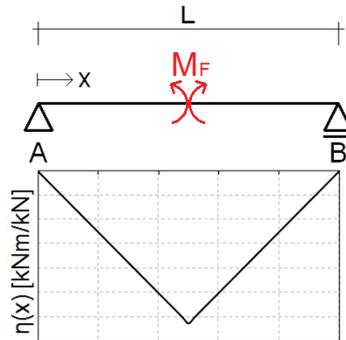


Abbildung C.1: Einflusslinie für das Feldmoment eines Einfeldträgers

$$\eta(x) =$$

$$\begin{cases} \frac{x}{2} & \text{für } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \\ \frac{L-x}{2} & \text{für } \frac{L}{2} < x \leq L \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

C.1.2 Querkraft am Auflager A [kN]

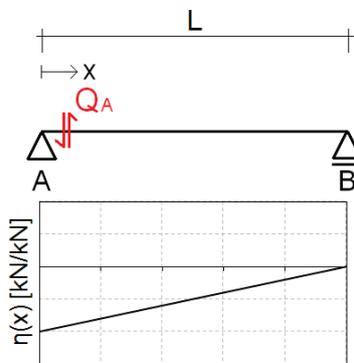


Abbildung C.2: Einflusslinie für die Querkraft am Auflager A eines Einfeldträgers

$$\eta(x) = \frac{L-x}{L} \quad (\text{C.2})$$

C.2 Einflusslinien – Zweifeldträger

C.2.1 Stützmoment [kNm]

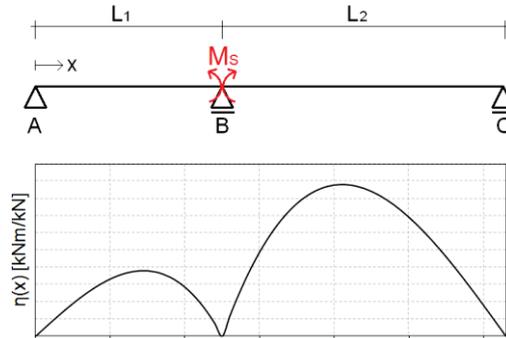


Abbildung C.3: Einflusslinie für das Stützmoment eines Zweifeldträgers

$\eta(x) =$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2L_1^2 + 2L_1L_2} x^3 - \frac{L_1}{2(L_1 + L_2)} x & \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\ \frac{-1}{2L_2(L_1 + L_2)} x^3 + \frac{3}{2L_2} x^2 - \frac{3L_1^2 + 6L_1L_2 + 2L_2^2}{2L_2(L_1 + L_2)} x + L_1 + \frac{L_1^2}{2L_2} & \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \end{array} \right. \quad (\text{C.3})$$

C.2.2 Feldmoment an der Stelle m [kNm]

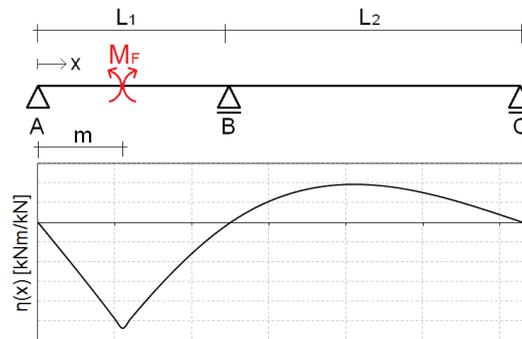


Abbildung C.4: Einflusslinie für das Feldmoment an der Stelle m eines Zweifeldträgers

$\eta(x) =$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{m}{2L_1^2(L_1 + L_2)} x^3 + \left(1 - \frac{m}{L_1} - \frac{m}{2(L_1 + L_2)}\right) x & \text{für } 0 \leq x \leq m \\ \frac{m}{2L_1^2(L_1 + L_2)} x^3 + \left(-\frac{m}{L_1} - \frac{m}{2(L_1 + L_2)}\right) x + m & \text{für } m < x \leq L_1 \\ \frac{-m}{2L_1L_2^2 + 2L_1^2L_2} x^3 + \frac{3m}{2L_1L_2} x^2 - \frac{(3L_1^2 + 6L_1L_2 + 2L_2^2)m}{2L_1L_2(L_1 + L_2)} x + m + \frac{mL_1}{2L_2} & \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \end{array} \right. \quad (\text{C.4})$$

C.2.3 Querkraft am Randaufleger A [kN]

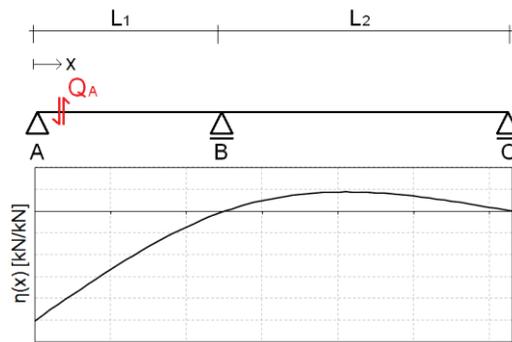


Abbildung C.5: Einflusslinie für die Querkraft am Randaufleger A eines Zweifeldträgers

$\eta(x) =$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2L_1^2(L_1 + L_2)} x^3 - \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{2(L_1 + L_2)} \right) x + 1 & \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\ \frac{-1}{2L_1L_2(L_1 + L_2)} x^3 + \frac{3}{2L_1L_2} x^2 - \frac{3L_1^2 + 6L_1L_2 + 2L_2^2}{2L_1L_2(L_1 + L_2)} x + 1 + \frac{L_1}{2L_2} & \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \end{array} \right. \quad (\text{C.5})$$

C.2.4 Querkraft am Mittelaufleger B (links) [kN]

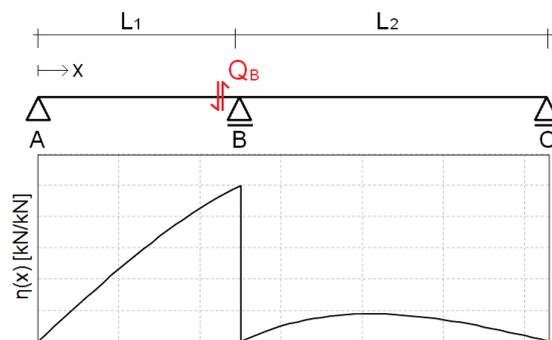


Abbildung C.6: Einflusslinie für die Querkraft am Mittelaufleger B (links) eines Zweifeldträgers

$\eta(x) =$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{-1}{2L_1^2(L_1 + L_2)} x^3 + \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{2(L_1 + L_2)} \right) x & \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\ \frac{1}{2L_1L_2(L_1 + L_2)} x^3 - \frac{3}{2L_1L_2} x^2 + \frac{3L_1^2 + 6L_1L_2 + 2L_2^2}{2L_1L_2(L_1 + L_2)} x - 1 - \frac{L_1}{2L_2} & \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \end{array} \right. \quad (\text{C.6})$$

C.3 Einflusslinien – Dreifeldträger

C.3.1 Stützmoment [kNm]

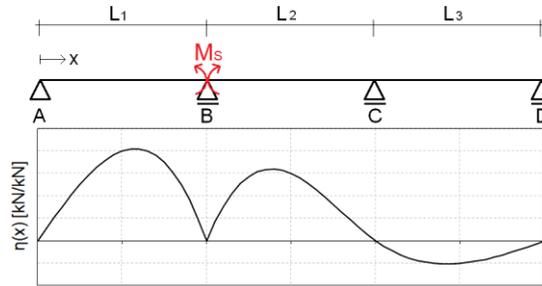


Abbildung C.7: Einflusslinie für das Stützmoment eines Dreifeldträgers

$\eta(x) =$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{2(L_2 + L_3)}{L_1(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 - \frac{2L_1(L_2 + L_3)}{4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3)} x \\
 \qquad \qquad \qquad \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\
 \\
 \frac{-3L_2 - 2L_3}{L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 + \frac{6L_2(L_2 + L_3) + L_1(9L_2 + 6L_3)}{L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^2 \\
 - \frac{12L_1L_2(L_2 + L_3) + L_2^2(3L_2 + 4L_3) + L_1^2(9L_2 + 6L_3)}{L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 + \frac{L_1(L_1 + L_2)(3L_1L_2 + 3L_2^2 + 2L_1L_3 + 4L_2L_3)}{L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} \\
 \qquad \qquad \qquad \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \\
 \\
 \frac{L_2}{L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 - \frac{3L_2(L_1 + L_2 + L_3)}{L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^2 \\
 + \frac{L_2(3L_1^2 + 3L_2^2 + 6L_2L_3 + 2L_3^2 + 6L_1(L_2 + L_3))}{L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 - \frac{L_2(L_1 + L_1)(L_1^2 + 2L_1L_2 + L_2^2 + 3L_1L_3 + 3L_2L_3 + 2L_3^2)}{L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} \\
 \qquad \qquad \qquad \text{für } L_1 + L_2 < x \leq L_1 + L_2 + L_3
 \end{array} \right. \quad (C.7)$$

C.3.2 Feldmoment im Randfeld an der Stelle m [kNm]

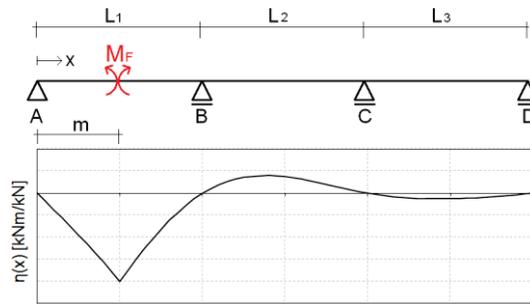


Abbildung C.8: Einflusslinie für das Feldmoment im Randfeld an der Stelle m eines Dreifeldträgers

η(x) =

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{2(L_2 + L_3)m}{L_1^2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 & + \frac{4L_1^2(L_2 + L_3) - L_2(3L_2 + 4L_3)m}{L_1(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 & + \frac{L_1(3L_2^2 + 4L_2L_3 - 6L_2m - 6L_3m)}{L_1(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 & \frac{2(L_2 + L_3)m}{L_1^2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 & - \frac{(6L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))m}{L_1(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 & \quad + m \\
 & \frac{-(3L_2 + 2L_3)m}{L_1L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 & + \frac{3m(2L_2(L_2 + L_3) + L_1(3L_2 + 2L_3))}{L_1L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^2 \\
 & - \frac{(12L_1L_2(L_2 + L_3) + L_2^2(3L_2 + 4L_3) + L_1^2(9L_2 + 6L_3))m}{L_1L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 & + \frac{(L_1 + L_2)(3L_1L_2 + 3L_2^2 + 2L_1L_3 + 4L_2L_3)m}{L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} \\
 & \frac{mL_2}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 & - \frac{3mL_2(L_1 + L_2 + L_3)}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^2 \\
 & + \frac{mL_2(3L_1^2 + 3L_2^2 + 6L_2L_3 + 2L_3^2 + 6L_1(L_2 + L_3))}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 & - \frac{mL_2(L_1 + L_2)(L_1^2 + 2L_1L_2 + L_2^2 + 3L_1L_3 + 3L_2L_3 + 2L_3^2)}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))}
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{für } 0 \leq x \leq m \\ \\ \\ \text{für } m < x \leq L_1 \\ \\ \\ \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \\ \\ \\ \text{für } L_1 + L_2 < x \leq L_1 + L_2 + L_3 \end{array} \tag{C.8}$$

C.3.3 Feldmoment im Mittelfeld an der Stelle m [kNm]

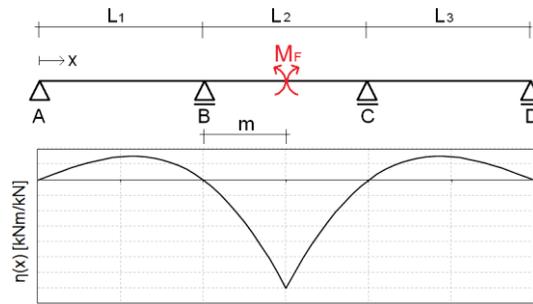


Abbildung C.9: Einflusslinie für das Feldmoment im Mittelfeld an der Stelle m eines Dreifeldträgers

$$\eta(x) =$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{2L_2^2 + 2L_2L_3 - 3mL_2 - 2mL_3}{L_1L_2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x^3 && \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\
 & - \frac{L_1(2L_2^2 + 2L_2L_3 - 3mL_2 - 2mL_3)}{L_2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x && \\
 & \frac{-3L_2^2 - 2L_2(L_3 - 3m) + 2m(L_1 + L_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x^3 && \\
 & + \frac{-6mL_1^2 + 3L_1(3L_2^2 + 2L_2(L_3 - 3m) - 2mL_3) + 3L_2(2L_2^2 + 2L_2L_3 - 3mL_2 - 2mL_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x^2 && \text{für } L_1 \leq x \leq m \\
 & + \frac{L_1(6mL_1^2 + 4L_2(-2L_2^2 - 2L_2L_3 + 3mL_2 + 2mL_3) + (L_1(-9L_2^2 - 6L_2(L_3 - 3m) + 6mL_3)))}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x && \\
 & + \frac{L_1^2(-2mL_1^2 + L_1(3L_2^2 + 2L_2(L_3 - 3m) - 2mL_3) + L_2(2L_2^2 + 2L_2L_3 - 3mL_2 - 2mL_3))}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} && \\
 & \frac{-3L_2^2 - 2L_2(L_3 - 3m) + 2m(L_1 + L_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x^3 && \\
 & + \frac{-6mL_1^2 + 3L_1(3L_2^2 + 2L_2(L_3 - 3m) - 2mL_3) + 3L_2(2L_2^2 + 2L_2L_3 - 3mL_2 - 2mL_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x^2 && \text{(C.9)} \\
 & + \frac{-L_2^3(3L_2+4L_3) + 6mL_1^3 - 4L_1L_2(3L_2^2 + 3L_2(L_3 - m) - 2mL_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x && \\
 & + \frac{L_1^2(-9L_2^2 - 6L_2(L_3 - 3m) + 6mL_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x && \text{für } m < x \leq L_1 + L_2 \\
 & + \frac{(L_1 + L_2)(-2mL_1^3 + L_2^2(3L_2+4L_3)m + L_1L_2^2(3L_2+4L_3+m))}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} && \\
 & + \frac{(L_1 + L_2)(L_1^2(3L_2^2 + 2L_2(L_3 - 2m) - 2L_3m))}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} && \\
 & \frac{L_2^2 - 2mL_1 - 3mL_2}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x^3 && \\
 & + \frac{3(L_1 + L_2 + L_3)(-L_2^2 + 2mL_1 + 3mL_2)}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x^2 && \\
 & + \frac{(3L_1^2 + 3L_2^2 + 6L_2L_3 + 2L_3^2 + 6L_1(L_2 + L_3))(L_2^2 - 2mL_1 - 3mL_2)}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} x && \text{für } L_1 + L_2 < x \leq L_1 + L_2 + L_3 \\
 & + \frac{(L_1 + L_2)(L_1^2 + 2L_1L_2 + L_2^2 + 3L_1L_3 + 3L_2L_3 + 2L_3^2)(-L_2^2 + 2mL_1 + 3mL_2)}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3) + L_2(3L_2+4L_3))} &&
 \end{aligned} \right.$$

C.3.4 Querkraft am Randaufleger A [kN]

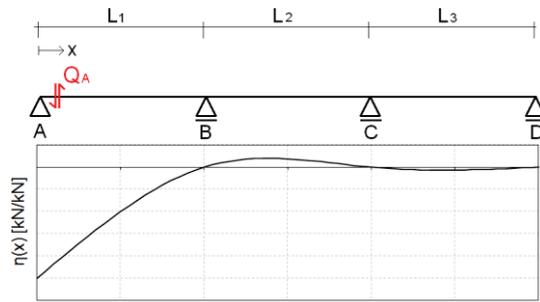


Abbildung C.10: Einflusslinie für die Querkraft am Randaufleger A eines Dreifeldträgers

$\eta(x) =$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{2(L_2+L_3)}{L_1^2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^3 \\
 - \frac{6L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3)}{L_1(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x \\
 + 1 \\
 \\
 \frac{-3L_2-2L_3}{L_1L_2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^3 \\
 + \frac{6L_2(L_2+L_3)+L_1(9L_2+6L_3)}{L_1L_2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^2 \\
 - \frac{12L_1L_2(L_2+L_3)+L_2^2(3L_2+4L_3)+L_1^2(9L_2+6L_3)}{L_1L_2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x \\
 + \frac{(L_1+L_2)(3L_1L_2+3L_2^2+2L_1L_3+4L_2L_3)}{L_2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} \\
 \\
 \frac{L_2}{L_1L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^3 \\
 - \frac{3L_2(L_1+L_2+L_3)}{L_1L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^2 \\
 + \frac{L_2(3L_1^2+3L_2^2+6L_2L_3+2L_3^2+6L_1(L_2+L_3))}{L_1L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x \\
 - \frac{L_2(L_1+L_2)(L_1^2+2L_1L_2+L_2^2+3L_1L_3+3L_2L_3+2L_3^2)}{L_1L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))}
 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l}
 \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\
 \\
 \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \\
 \\
 \\
 \\
 \text{für } L_1 + L_2 < x \leq L_1 + L_2 + L_3
 \end{array} \quad (C.10)$$

C.3.5 Querkraft am Mittelaufleger B (links) [kN]

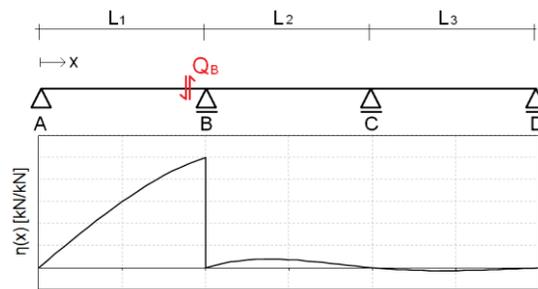


Abbildung C.11: Einflusslinie der Querkraft am Mittelaufleger B (links) eines Dreifeldträgers

$$\eta(x) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{2(L_2 + L_3)}{L_1^2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 - \frac{6L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3)}{L_1(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 \\
 \frac{-3L_2 - 2L_3}{L_1L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 + \frac{6L_2(L_2 + L_3) + L_1(9L_2 + 6L_3)}{L_1L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^2 \\
 - \frac{12L_1L_2(L_2 + L_3) + L_2^2(3L_2 + 4L_3) + L_1^2(9L_2 + 6L_3)}{L_1L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 + \frac{(L_1 + L_2)(3L_1L_2 + 3L_2^2 + 2L_1L_3 + 4L_2L_3)}{L_2(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} \\
 \\
 \frac{L_2}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^3 \\
 - \frac{3L_2(L_1 + L_2 + L_3)}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x^2 \\
 + \frac{L_2(3L_1^2 + 3L_2^2 + 6L_2L_3 + 2L_3^2 + 6L_1(L_2 + L_3))}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))} x \\
 - \frac{L_2(L_1 + L_2)(L_1^2 + 2L_1L_2 + L_2^2 + 3L_1L_3 + 3L_2L_3 + 2L_3^2)}{L_1L_3(4L_1(L_2 + L_3) + L_2(3L_2 + 4L_3))}
 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l}
 \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\
 \\
 \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \\
 \\
 \text{für } L_1 + L_2 < x \leq L_1 + L_2 + L_3
 \end{array} \quad (C.11)$$

C.3.6 Querkraft am Mittelaufleger B (rechts) [kN]

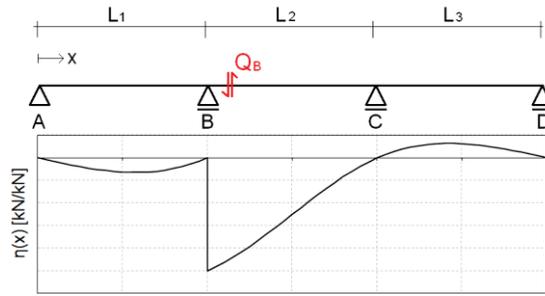


Abbildung C.12: Einflusslinie der Querkraft am Mittelaufleger B (rechts) eines Dreifeldträgers

$\eta(x) =$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{-3L_2-2L_3}{L_1L_2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^3 \\
 + \frac{L_1(3L_2+2L_3)}{L_2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x \\
 \qquad \qquad \qquad \text{für } 0 \leq x \leq L_1 \\
 \\
 \frac{2(L_1+3L_2+L_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^3 \\
 - \frac{3(2L_1^2+2L_1(3L_2+L_3)+L_2(3L_2+2L_3))}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^2 \\
 + \frac{2L_1(3L_1^2+9L_1L_2+6L_2^2+3L_1L_3+4L_2L_3)}{L_2^2(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x \\
 \qquad \qquad \qquad \text{für } L_1 < x \leq L_1 + L_2 \\
 \\
 \frac{-2L_1-3L_2}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^3 \\
 + \frac{3(2L_1+3L_2)(L_1+L_2+L_3)}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x^2 \\
 - \frac{(2L_1+3L_2)(3L_1^2+3L_2^2+6L_2L_3+2L_3^2+6L_1(L_2+L_3))}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} x \\
 + \frac{(L_1+L_2)(2L_1+3L_2)(L_1^2+2L_1L_2+L_2^2+3L_1L_3+3L_2L_3+2L_3^2)}{L_2L_3(4L_1(L_2+L_3)+L_2(3L_2+4L_3))} \\
 \qquad \qquad \qquad \text{für } L_1 + L_2 < x \leq L_1 + L_2 + L_3
 \end{array} \right. \tag{C.12}$$

C.4 Einflusslinien – Eingespannter Träger

C.4.1 Randmoment [kNm]

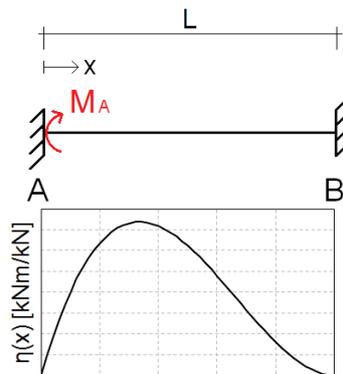


Abbildung C.13: Einflusslinie des Randmomentes eines eingespannten Trägers

$$\eta(x) = \frac{-1}{L_1^2} x^3 + \frac{2}{L_1} x \quad (\text{C.13})$$

C.4.2 Feldmoment [kNm]

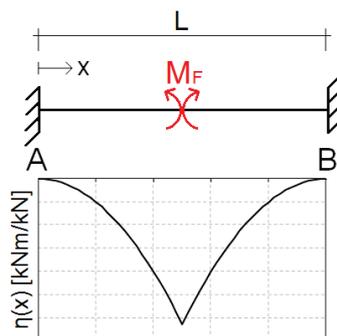


Abbildung C.14: Einflusslinie des Feldmomentes eines eingespannten Trägers

$$\eta(x) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2L_1} x^2 & \text{für } 0 < x \leq \frac{L_1}{2} \\ \frac{1}{2L_1} x^2 - x + \frac{L_1}{2} & \text{für } \frac{L_1}{2} < x \leq L_1 \end{cases} \quad (\text{C.14})$$

Anhang D

Extremwertverteilungen der Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen

D.1 Einfeldträger-Feldmoment

	Einfeldträger, L = 10 m, M _{Feld}			
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 876 \text{ kNm}$ $\sigma = 49,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0565$ $\gamma = 0,774$	$\mu = 888 \text{ kNm}$ $\sigma = 49,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0559$ $\gamma = 1,177$	$\mu = 1.092 \text{ kNm}$ $\sigma = 64,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0588$ $\gamma = 2,037$	$\mu = 1.103 \text{ kNm}$ $\sigma = 70,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0642$ $\gamma = 1,376$
Wochen- Extrema	$\mu = 933 \text{ kNm}$ $\sigma = 47,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0512$ $\gamma = 2,188$	$\mu = 945 \text{ kNm}$ $\sigma = 54,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0573$ $\gamma = 1,975$	$\mu = 1.170 \text{ kNm}$ $\sigma = 84,3 \text{ kNm}$ $v = 0,072$ $\gamma = 1,112$	$\mu = 1.187 \text{ kNm}$ $\sigma = 80,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0675$ $\gamma = 1,68$
Jahres- Extrema	$\mu = 1.108 \text{ kNm}$ $\sigma = 38,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0345$ $\gamma = -1,12$	$\mu = 1.125 \text{ kNm}$ $\sigma = 27,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0244$ $\gamma = -0,896$	$\mu = 1.381 \text{ kNm}$ $\sigma = 30,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0222$ $\gamma = 1,039$	$\mu = 1.438 \text{ kNm}$ $\sigma = 45,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0314$ $\gamma = 0,607$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 1.177 \text{ kNm}$ $\sigma = 7,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0064$ $\gamma = -0,148$	$\mu = 1.183 \text{ kNm}$ $\sigma = 9,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0082$ $\gamma = 1,37$	$\mu = 1.492 \text{ kNm}$ $\sigma = 31,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0213$ $\gamma = 1,24$	$\mu = 1.595 \text{ kNm}$ $\sigma = 40,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0256$ $\gamma = 1,243$

Tabelle D.1: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 10 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

	Einfeldträger, L = 10 m, M _{Feld}	
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 537 \text{ kNm}$ $\sigma = 141,6 \text{ kNm}$ $v = 0,2637$ $\gamma = 0,413$	$\mu = 544 \text{ kNm}$ $\sigma = 130,6 \text{ kNm}$ $v = 0,24$ $\gamma = 0,538$
Wochen- Extrema	$\mu = 701 \text{ kNm}$ $\sigma = 76 \text{ kNm}$ $v = 0,1083$ $\gamma = -2,626$	$\mu = 704 \text{ kNm}$ $\sigma = 81,4 \text{ kNm}$ $v = 0,1157$ $\gamma = -1,457$
Jahres- Extrema	$\mu = 773 \text{ kNm}$ $\sigma = 30,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0392$ $\gamma = 2,967$	$\mu = 852 \text{ kNm}$ $\sigma = 46,8 \text{ kNm}$ $v = 0,055$ $\gamma = 1,301$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 915 \text{ kNm}$ $\sigma = 44,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0482$ $\gamma = 2,072$	$\mu = 1036 \text{ kNm}$ $\sigma = 70,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0678$ $\gamma = 0,043$

Tabelle D.2: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 10 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

		Einfeldträger, L = 20 m, M _{Feld}						
		1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)			
Tages- Extrema		$\mu = 2.443 \text{ kNm}$ $\sigma = 135,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0556$ $\gamma = 0,866$		$\mu = 2.474 \text{ kNm}$ $\sigma = 138,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0559$ $\gamma = 1,31$		$\mu = 2.935 \text{ kNm}$ $\sigma = 174,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0594$ $\gamma = 1,667$		$\mu = 3.068 \text{ kNm}$ $\sigma = 203,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0663$ $\gamma = 1,378$
Wochen- Extrema		$\mu = 2.593 \text{ kNm}$ $\sigma = 139,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0539$ $\gamma = 2,278$		$\mu = 2.629 \text{ kNm}$ $\sigma = 161 \text{ kNm}$ $v = 0,0612$ $\gamma = 1,896$		$\mu = 3.142 \text{ kNm}$ $\sigma = 215,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0685$ $\gamma = 1,381$		$\mu = 3.317 \text{ kNm}$ $\sigma = 231,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0697$ $\gamma = 1,18$
Jahres- Extrema		$\mu = 3.090 \text{ kNm}$ $\sigma = 85,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0278$ $\gamma = -1,174$		$\mu = 3.129 \text{ kNm}$ $\sigma = 62,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0199$ $\gamma = -0,607$		$\mu = 3.746 \text{ kNm}$ $\sigma = 107 \text{ kNm}$ $v = 0,0286$ $\gamma = 1,164$		$\mu = 3.967 \text{ kNm}$ $\sigma = 149,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0378$ $\gamma = 1,284$
100-Jahres- Extrema		$\mu = 3.253 \text{ kNm}$ $\sigma = 18,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0057$ $\gamma = -0,035$		$\mu = 3.269 \text{ kNm}$ $\sigma = 26 \text{ kNm}$ $v = 0,008$ $\gamma = 1,609$		$\mu = 4.130 \text{ kNm}$ $\sigma = 92,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0224$ $\gamma = 1,214$		$\mu = 4.499 \text{ kNm}$ $\sigma = 115,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0256$ $\gamma = 1,483$

Tabelle D.3: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 20 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

		Einfeldträger, L = 20 m, M _{Feld}		
		1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	
Tages- Extrema		$\mu = 1453 \text{ kNm}$ $\sigma = 370,5 \text{ kNm}$ $v = 0,2549$ $\gamma = 0,385$		$\mu = 1495 \text{ kNm}$ $\sigma = 331,1 \text{ kNm}$ $v = 0,2215$ $\gamma = 0,504$
Wochen- Extrema		$\mu = 1883 \text{ kNm}$ $\sigma = 195,2 \text{ kNm}$ $v = 0,1037$ $\gamma = -2,529$		$\mu = 1902 \text{ kNm}$ $\sigma = 210 \text{ kNm}$ $v = 0,1104$ $\gamma = -0,901$
Jahres- Extrema		$\mu = 2095 \text{ kNm}$ $\sigma = 106,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0509$ $\gamma = 2,421$		$\mu = 2365 \text{ kNm}$ $\sigma = 143,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0606$ $\gamma = 0,995$
100-Jahres- Extrema		$\mu = 2542 \text{ kNm}$ $\sigma = 120 \text{ kNm}$ $v = 0,0472$ $\gamma = 2,515$		$\mu = 2900 \text{ kNm}$ $\sigma = 189,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0655$ $\gamma = -0,206$

Tabelle D.4: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 20 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Einfeldträger, L = 30 m, M _{Feld}				
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 4.023 \text{ kNm}$ $\sigma = 212,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0529$ $\gamma = 0,881$	$\mu = 4.058 \text{ kNm}$ $\sigma = 214,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0528$ $\gamma = 1,27$	$\mu = 4.797 \text{ kNm}$ $\sigma = 282,8 \text{ kNm}$ $v = 0,059$ $\gamma = 1,4$	$\mu = 5.105 \text{ kNm}$ $\sigma = 354,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0694$ $\gamma = 1,162$
Wochen- Extrema	$\mu = 4.265 \text{ kNm}$ $\sigma = 220,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0516$ $\gamma = 1,897$	$\mu = 4.303 \text{ kNm}$ $\sigma = 247,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0576$ $\gamma = 1,629$	$\mu = 5.150 \text{ kNm}$ $\sigma = 320,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0623$ $\gamma = 0,877$	$\mu = 5.559 \text{ kNm}$ $\sigma = 355,9 \text{ kNm}$ $v = 0,064$ $\gamma = 0,611$
Jahres- Extrema	$\mu = 4.989 \text{ kNm}$ $\sigma = 118,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0237$ $\gamma = -0,248$	$\mu = 5.024 \text{ kNm}$ $\sigma = 89,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0179$ $\gamma = -0,128$	$\mu = 5.985 \text{ kNm}$ $\sigma = 225,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0377$ $\gamma = 1,267$	$\mu = 6.492 \text{ kNm}$ $\sigma = 290,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0447$ $\gamma = 1,084$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 5.325 \text{ kNm}$ $\sigma = 131,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0248$ $\gamma = 1,565$	$\mu = 5.266 \text{ kNm}$ $\sigma = 87,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0166$ $\gamma = 2,197$	$\mu = 6.741 \text{ kNm}$ $\sigma = 172,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0256$ $\gamma = 1,227$	$\mu = 7.444 \text{ kNm}$ $\sigma = 195,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0263$ $\gamma = 1,25$

Tabelle D.5: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 30 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Einfeldträger, L = 30 m, M _{Feld}		
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 2383 \text{ kNm}$ $\sigma = 478,2 \text{ kNm}$ $v = 0,2007$ $\gamma = 0,334$	$\mu = 2541 \text{ kNm}$ $\sigma = 419,8 \text{ kNm}$ $v = 0,1652$ $\gamma = 0,321$
Wochen- Extrema	$\mu = 2940 \text{ kNm}$ $\sigma = 245,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0835$ $\gamma = -2,173$	$\mu = 3038 \text{ kNm}$ $\sigma = 273,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0901$ $\gamma = 0,684$
Jahres- Extrema	$\mu = 3318 \text{ kNm}$ $\sigma = 232,2 \text{ kNm}$ $v = 0,07$ $\gamma = 1,818$	$\mu = 3878 \text{ kNm}$ $\sigma = 243,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0628$ $\gamma = 0,549$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 4178 \text{ kNm}$ $\sigma = 211 \text{ kNm}$ $v = 0,0505$ $\gamma = 2,035$	$\mu = 4723 \text{ kNm}$ $\sigma = 255,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0542$ $\gamma = -0,338$

Tabelle D.6: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 30 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Einfeldträger, L = 40 m, M _{Feld}				
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 5.571 \text{ kNm}$ $\sigma = 314,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0565$ $\gamma = 1,144$	$\mu = 5.568 \text{ kNm}$ $\sigma = 303 \text{ kNm}$ $v = 0,0544$ $\gamma = 1,426$	$\mu = 6.565 \text{ kNm}$ $\sigma = 421,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0641$ $\gamma = 1,165$	$\mu = 7.264 \text{ kNm}$ $\sigma = 508,4 \text{ kNm}$ $v = 0,07$ $\gamma = 0,931$
Wochen- Extrema	$\mu = 5.956 \text{ kNm}$ $\sigma = 334,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0562$ $\gamma = 1,164$	$\mu = 5.935 \text{ kNm}$ $\sigma = 353,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0596$ $\gamma = 1,156$	$\mu = 7.107 \text{ kNm}$ $\sigma = 420,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0592$ $\gamma = 0,557$	$\mu = 7.906 \text{ kNm}$ $\sigma = 470,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0595$ $\gamma = 0,748$
Jahres- Extrema	$\mu = 6.927 \text{ kNm}$ $\sigma = 258,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0373$ $\gamma = 1,157$	$\mu = 6.886 \text{ kNm}$ $\sigma = 206,3 \text{ kNm}$ $v = 0,03$ $\gamma = 1,665$	$\mu = 8.219 \text{ kNm}$ $\sigma = 363,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0442$ $\gamma = 0,794$	$\mu = 9.222 \text{ kNm}$ $\sigma = 399,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0433$ $\gamma = 0,94$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 7.836 \text{ kNm}$ $\sigma = 264,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0338$ $\gamma = 1,304$	$\mu = 7.703 \text{ kNm}$ $\sigma = 260,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0338$ $\gamma = 1,541$	$\mu = 9.340 \text{ kNm}$ $\sigma = 280,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0301$ $\gamma = 0,929$	$\mu = 10.532 \text{ kNm}$ $\sigma = 321,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0305$ $\gamma = 1,163$

Tabelle D.7: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 40 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Einfeldträger, L = 40 m, M _{Feld}		
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 3229 \text{ kNm}$ $\sigma = 549,5 \text{ kNm}$ $v = 0,1702$ $\gamma = 0,243$	$\mu = 3542 \text{ kNm}$ $\sigma = 506,8 \text{ kNm}$ $v = 0,1431$ $\gamma = 0,309$
Wochen- Extrema	$\mu = 3864 \text{ kNm}$ $\sigma = 276,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0716$ $\gamma = -1,33$	$\mu = 4128 \text{ kNm}$ $\sigma = 377 \text{ kNm}$ $v = 0,0913$ $\gamma = 1,367$
Jahres- Extrema	$\mu = 4475 \text{ kNm}$ $\sigma = 372,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0832$ $\gamma = 1,346$	$\mu = 5353 \text{ kNm}$ $\sigma = 330,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0618$ $\gamma = 0,634$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 5702 \text{ kNm}$ $\sigma = 280,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0493$ $\gamma = 2,02$	$\mu = 6528 \text{ kNm}$ $\sigma = 293,6 \text{ kNm}$ $v = 0,045$ $\gamma = -0,25$

Tabelle D.8: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 40 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

		Einfeldträger, L = 50 m, M _{Feld}						
		1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)			
Tages- Extrema		$\mu = 7.024 \text{ kNm}$ $\sigma = 498,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0709$ $\gamma = 1,139$		$\mu = 7.095 \text{ kNm}$ $\sigma = 463,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0653$ $\gamma = 1,427$		$\mu = 8.356 \text{ kNm}$ $\sigma = 613,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0735$ $\gamma = 0,888$		$\mu = 9.752 \text{ kNm}$ $\sigma = 668,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0685$ $\gamma = 0,869$
Wochen- Extrema		$\mu = 7.654 \text{ kNm}$ $\sigma = 502,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0657$ $\gamma = 0,869$		$\mu = 7.692 \text{ kNm}$ $\sigma = 505 \text{ kNm}$ $v = 0,0657$ $\gamma = 0,653$		$\mu = 9.132 \text{ kNm}$ $\sigma = 539,1 \text{ kNm}$ $v = 0,059$ $\gamma = 0,771$		$\mu = 10.586 \text{ kNm}$ $\sigma = 612,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0579$ $\gamma = 0,884$
Jahres- Extrema		$\mu = 9.093 \text{ kNm}$ $\sigma = 441,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0485$ $\gamma = 0,927$		$\mu = 9.022 \text{ kNm}$ $\sigma = 422 \text{ kNm}$ $v = 0,0468$ $\gamma = 1,089$		$\mu = 10.715 \text{ kNm}$ $\sigma = 490,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0458$ $\gamma = 0,781$		$\mu = 12.368 \text{ kNm}$ $\sigma = 540,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0437$ $\gamma = 0,959$
100-Jahres- Extrema		$\mu = 10.581 \text{ kNm}$ $\sigma = 395,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0374$ $\gamma = 0,924$		$\mu = 10.458 \text{ kNm}$ $\sigma = 376,8 \text{ kNm}$ $v = 0,036$ $\gamma = 0,902$		$\mu = 12.362 \text{ kNm}$ $\sigma = 416,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0337$ $\gamma = 0,936$		$\mu = 14.228 \text{ kNm}$ $\sigma = 470,2 \text{ kNm}$ $v = 0,033$ $\gamma = 0,921$

Tabelle D.9: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 50 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

		Einfeldträger, L = 50 m, M _{Feld}		
		1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	
Tages- Extrema		$\mu = 3983 \text{ kNm}$ $\sigma = 598,1 \text{ kNm}$ $v = 0,1502$ $\gamma = 0,117$		$\mu = 4484 \text{ kNm}$ $\sigma = 628,4 \text{ kNm}$ $v = 0,1401$ $\gamma = 0,448$
Wochen- Extrema		$\mu = 4666 \text{ kNm}$ $\sigma = 316,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0679$ $\gamma = 0,276$		$\mu = 5224 \text{ kNm}$ $\sigma = 520,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0996$ $\gamma = 1,191$
Jahres- Extrema		$\mu = 5623 \text{ kNm}$ $\sigma = 489,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0871$ $\gamma = 1,072$		$\mu = 6819 \text{ kNm}$ $\sigma = 431 \text{ kNm}$ $v = 0,0632$ $\gamma = 1,009$
100-Jahres- Extrema		$\mu = 7137 \text{ kNm}$ $\sigma = 361,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0506$ $\gamma = 1,714$		$\mu = 8359 \text{ kNm}$ $\sigma = 361,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0433$ $\gamma = 0,967$

Tabelle D.10: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Einfeldträger, L = 50 m, Feldmoment, Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

D.2 Zweifeldträger-Stützmoment

	Zweifeldträger, L = 10 m + 10 m, M _{Stütz}			
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 545 \text{ kNm}$ $\sigma = 25,1 \text{ kNm}$ $v = 0,046$ $\gamma = 0,826$ 	$\mu = 548 \text{ kNm}$ $\sigma = 23,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0434$ $\gamma = 0,691$ 	$\mu = 713 \text{ kNm}$ $\sigma = 35,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0499$ $\gamma = 0,9$ 	$\mu = 3068 \text{ kNm}$ $\sigma = 203,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0663$ $\gamma = 1,378$
Wochen- Extrema	$\mu = 576 \text{ kNm}$ $\sigma = 23 \text{ kNm}$ $v = 0,0399$ $\gamma = 1,177$ 	$\mu = 578 \text{ kNm}$ $\sigma = 20,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0361$ $\gamma = 1,102$ 	$\mu = 704 \text{ kNm}$ $\sigma = 27,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0385$ $\gamma = 1,01$ 	$\mu = 758 \text{ kNm}$ $\sigma = 33,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0439$ $\gamma = 0,9$
Jahres- Extrema	$\mu = 646 \text{ kNm}$ $\sigma = 26,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0412$ $\gamma = 1,639$ 	$\mu = 641 \text{ kNm}$ $\sigma = 24,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0384$ $\gamma = 1,574$ 	$\mu = 785 \text{ kNm}$ $\sigma = 27,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0346$ $\gamma = 1,172$ 	$\mu = 854 \text{ kNm}$ $\sigma = 28,2 \text{ kNm}$ $v = 0,033$ $\gamma = 0,908$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 750 \text{ kNm}$ $\sigma = 20,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0271$ $\gamma = 0,353$ 	$\mu = 734 \text{ kNm}$ $\sigma = 18,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0257$ $\gamma = 0,403$ 	$\mu = 881 \text{ kNm}$ $\sigma = 23,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0268$ $\gamma = 1,213$ 	$\mu = 949 \text{ kNm}$ $\sigma = 26 \text{ kNm}$ $v = 0,0274$ $\gamma = 1,368$

Tabelle D.11: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 10 m + 10 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

	Zweifeldträger, L = 10 m + 10 m, M _{Stütz}	
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 361 \text{ kNm}$ $\sigma = 28,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0796$ $\gamma = 0,51$ 	$\mu = 378 \text{ kNm}$ $\sigma = 37,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0981$ $\gamma = 0,927$
Wochen- Extrema	$\mu = 396 \text{ kNm}$ $\sigma = 21,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0541$ $\gamma = 1,364$ 	$\mu = 424 \text{ kNm}$ $\sigma = 35,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0832$ $\gamma = 0,971$
Jahres- Extrema	$\mu = 469 \text{ kNm}$ $\sigma = 27,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0586$ $\gamma = 0,937$ 	$\mu = 525 \text{ kNm}$ $\sigma = 27,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0518$ $\gamma = 0,671$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 561 \text{ kNm}$ $\sigma = 21,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0378$ $\gamma = 0,948$ 	$\mu = 610 \text{ kNm}$ $\sigma = 21,4 \text{ kNm}$ $v = 0,035$ $\gamma = 1,502$

Tabelle D.12: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 10 m + 10 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 20 m + 20 m, M _{Stütz}				
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 1.352 \text{ kNm}$ $\sigma = 108,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0801$ $\gamma = 0,826$	$\mu = 1.350 \text{ kNm}$ $\sigma = 112,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0835$ $\gamma = 1,117$	$\mu = 1.602 \text{ kNm}$ $\sigma = 140,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0877$ $\gamma = 0,93$	$\mu = 1.698 \text{ kNm}$ $\sigma = 143,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0846$ $\gamma = 0,906$
Wochen- Extrema	$\mu = 1.488 \text{ kNm}$ $\sigma = 95,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0639$ $\gamma = 0,878$	$\mu = 1.493 \text{ kNm}$ $\sigma = 111,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0747$ $\gamma = 0,718$	$\mu = 1.779 \text{ kNm}$ $\sigma = 128,1 \text{ kNm}$ $v = 0,072$ $\gamma = 0,749$	$\mu = 1.878 \text{ kNm}$ $\sigma = 133 \text{ kNm}$ $v = 0,0708$ $\gamma = 0,91$
Jahres- Extrema	$\mu = 1.770 \text{ kNm}$ $\sigma = 88 \text{ kNm}$ $v = 0,0497$ $\gamma = 0,757$	$\mu = 1.799 \text{ kNm}$ $\sigma = 96 \text{ kNm}$ $v = 0,0533$ $\gamma = 1,051$	$\mu = 2.143 \text{ kNm}$ $\sigma = 114,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0534$ $\gamma = 0,95$	$\mu = 2.265 \text{ kNm}$ $\sigma = 119,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0526$ $\gamma = 1,005$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 2.058 \text{ kNm}$ $\sigma = 71,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0346$ $\gamma = 1,002$	$\mu = 2.126 \text{ kNm}$ $\sigma = 79,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0376$ $\gamma = 0,916$	$\mu = 2.529 \text{ kNm}$ $\sigma = 96,2 \text{ kNm}$ $v = 0,038$ $\gamma = 0,992$	$\mu = 2.677 \text{ kNm}$ $\sigma = 102,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0382$ $\gamma = 0,843$

Tabelle D.13: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 20 m + 20 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 20 m + 20 m, M _{Stütz}		
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 725 \text{ kNm}$ $\sigma = 140,3 \text{ kNm}$ $v = 0,1934$ $\gamma = 0,241$	$\mu = 840 \text{ kNm}$ $\sigma = 130,9 \text{ kNm}$ $v = 0,1559$ $\gamma = 0,609$
Wochen- Extrema	$\mu = 887 \text{ kNm}$ $\sigma = 70,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0796$ $\gamma = -0,981$	$\mu = 996 \text{ kNm}$ $\sigma = 114 \text{ kNm}$ $v = 0,1144$ $\gamma = 1,094$
Jahres- Extrema	$\mu = 1.071 \text{ kNm}$ $\sigma = 90,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0843$ $\gamma = 0,741$	$\mu = 1.336 \text{ kNm}$ $\sigma = 93,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0699$ $\gamma = 1,072$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 1.352 \text{ kNm}$ $\sigma = 97,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0724$ $\gamma = 1,212$	$\mu = 1.680 \text{ kNm}$ $\sigma = 93,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0554$ $\gamma = 0,9$

Tabelle D.14: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 20 m + 20 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 30 m + 30 m, M _{Stütz}				
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	 $\mu = 2.492 \text{ kNm}$ $\sigma = 188,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0755$ $\gamma = 0,842$	 $\mu = 2.562 \text{ kNm}$ $\sigma = 197,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0772$ $\gamma = 0,811$	 $\mu = 3.042 \text{ kNm}$ $\sigma = 235,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0773$ $\gamma = 0,722$	 $\mu = 3.262 \text{ kNm}$ $\sigma = 265,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0815$ $\gamma = 0,725$
Wochen- Extrema	 $\mu = 2.726 \text{ kNm}$ $\sigma = 172,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0632$ $\gamma = 0,895$	 $\mu = 2.808 \text{ kNm}$ $\sigma = 179,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0639$ $\gamma = 0,783$	 $\mu = 3.333 \text{ kNm}$ $\sigma = 206,6 \text{ kNm}$ $v = 0,062$ $\gamma = 0,781$	 $\mu = 3.590 \text{ kNm}$ $\sigma = 234,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0652$ $\gamma = 0,812$
Jahres- Extrema	 $\mu = 3.226 \text{ kNm}$ $\sigma = 148,3 \text{ kNm}$ $v = 0,046$ $\gamma = 0,953$	 $\mu = 3.313 \text{ kNm}$ $\sigma = 146,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0443$ $\gamma = 0,984$	 $\mu = 3.914 \text{ kNm}$ $\sigma = 169 \text{ kNm}$ $v = 0,0432$ $\gamma = 0,961$	 $\mu = 4.255 \text{ kNm}$ $\sigma = 194 \text{ kNm}$ $v = 0,0456$ $\gamma = 0,957$
100-Jahres- Extrema	 $\mu = 3.733 \text{ kNm}$ $\sigma = 135,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0363$ $\gamma = 0,893$	 $\mu = 3.820 \text{ kNm}$ $\sigma = 123,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0324$ $\gamma = 0,904$	 $\mu = 4.488 \text{ kNm}$ $\sigma = 138,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0309$ $\gamma = 0,803$	 $\mu = 4.916 \text{ kNm}$ $\sigma = 168,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0342$ $\gamma = 0,932$

Tabelle D.15: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 30 m + 30 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 30 m + 30 m, M _{Stütz}		
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	 $\mu = 1.171 \text{ kNm}$ $\sigma = 176 \text{ kNm}$ $v = 0,1502$ $\gamma = 0,212$	 $\mu = 1.460 \text{ kNm}$ $\sigma = 236,3 \text{ kNm}$ $v = 0,1618$ $\gamma = 0,705$
Wochen- Extrema	 $\mu = 1.372 \text{ kNm}$ $\sigma = 112,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0819$ $\gamma = 1,421$	 $\mu = 1.750 \text{ kNm}$ $\sigma = 207 \text{ kNm}$ $v = 0,1183$ $\gamma = 0,687$
Jahres- Extrema	 $\mu = 1.758 \text{ kNm}$ $\sigma = 144,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0824$ $\gamma = 0,771$	 $\mu = 2.314 \text{ kNm}$ $\sigma = 157,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0679$ $\gamma = 0,963$
100-Jahres- Extrema	 $\mu = 2.226 \text{ kNm}$ $\sigma = 136,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0612$ $\gamma = 1,046$	 $\mu = 2.849 \text{ kNm}$ $\sigma = 132,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0466$ $\gamma = 1,135$

Tabelle D.16: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 30 m + 30 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 40 m + 40 m, M _{Stütz}				
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 3.528 \text{ kNm}$ $\sigma = 344 \text{ kNm}$ $v = 0,0975$ $\gamma = 0,914$	$\mu = 3.905 \text{ kNm}$ $\sigma = 321,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0824$ $\gamma = 0,65$	$\mu = 4.596 \text{ kNm}$ $\sigma = 381,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0829$ $\gamma = 0,544$	$\mu = 4.854 \text{ kNm}$ $\sigma = 549,4 \text{ kNm}$ $v = 0,1132$ $\gamma = 0,542$
Wochen- Extrema	$\mu = 3.960 \text{ kNm}$ $\sigma = 322,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0815$ $\gamma = 0,757$	$\mu = 4.302 \text{ kNm}$ $\sigma = 273 \text{ kNm}$ $v = 0,0635$ $\gamma = 0,709$	$\mu = 5.061 \text{ kNm}$ $\sigma = 311,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0616$ $\gamma = 0,683$	$\mu = 5.527 \text{ kNm}$ $\sigma = 442,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0801$ $\gamma = 0,544$
Jahres- Extrema	$\mu = 4.848 \text{ kNm}$ $\sigma = 238,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0491$ $\gamma = 0,888$	$\mu = 5.059 \text{ kNm}$ $\sigma = 213,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0422$ $\gamma = 0,96$	$\mu = 5.921 \text{ kNm}$ $\sigma = 245,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0414$ $\gamma = 0,948$	$\mu = 6.706 \text{ kNm}$ $\sigma = 312,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0465$ $\gamma = 0,843$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 5.649 \text{ kNm}$ $\sigma = 196,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0347$ $\gamma = 0,627$	$\mu = 5.792 \text{ kNm}$ $\sigma = 189,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0327$ $\gamma = 0,968$	$\mu = 6.755 \text{ kNm}$ $\sigma = 217,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0322$ $\gamma = 0,944$	$\mu = 7.747 \text{ kNm}$ $\sigma = 259,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0335$ $\gamma = 0,886$

Tabelle D.17: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 40 m + 40 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 40 m + 40 m, M _{Stütz}		
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 1.458 \text{ kNm}$ $\sigma = 231,1 \text{ kNm}$ $v = 0,1585$ $\gamma = 0,784$	$\mu = 2.092 \text{ kNm}$ $\sigma = 397,3 \text{ kNm}$ $v = 0,1899$ $\gamma = 0,772$
Wochen- Extrema	$\mu = 1.746 \text{ kNm}$ $\sigma = 193,3 \text{ kNm}$ $v = 0,1107$ $\gamma = 0,946$	$\mu = 2.585 \text{ kNm}$ $\sigma = 345,7 \text{ kNm}$ $v = 0,1337$ $\gamma = 0,353$
Jahres- Extrema	$\mu = 2.334 \text{ kNm}$ $\sigma = 196,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0842$ $\gamma = 0,881$	$\mu = 3.448 \text{ kNm}$ $\sigma = 221,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0642$ $\gamma = 0,9$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 2.992 \text{ kNm}$ $\sigma = 175,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0585$ $\gamma = 0,807$	$\mu = 4.192 \text{ kNm}$ $\sigma = 186,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0445$ $\gamma = 0,874$

Tabelle D.18: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 40 m + 40 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 50 m + 50 m, M _{Stütz}				
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 5.342 \text{ kNm}$ $\sigma = 455 \text{ kNm}$ $v = 0,0852$ $\gamma = 0,916$	$\mu = 5.407 \text{ kNm}$ $\sigma = 516,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0956$ $\gamma = 0,386$	$\mu = 6.299 \text{ kNm}$ $\sigma = 600,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0953$ $\gamma = 0,239$	$\mu = 7.152 \text{ kNm}$ $\sigma = 711,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0995$ $\gamma = 0,661$
Wochen- Extrema	$\mu = 5.915 \text{ kNm}$ $\sigma = 424,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0718$ $\gamma = 0,705$	$\mu = 6.032 \text{ kNm}$ $\sigma = 390,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0647$ $\gamma = 0,479$	$\mu = 7.012 \text{ kNm}$ $\sigma = 431,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0615$ $\gamma = 0,501$	$\mu = 8.027 \text{ kNm}$ $\sigma = 613,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0764$ $\gamma = 0,742$
Jahres- Extrema	$\mu = 7.068 \text{ kNm}$ $\sigma = 305,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0432$ $\gamma = 0,87$	$\mu = 7.062 \text{ kNm}$ $\sigma = 281,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0399$ $\gamma = 0,931$	$\mu = 8.159 \text{ kNm}$ $\sigma = 317,8 \text{ kNm}$ $v = 0,039$ $\gamma = 0,921$	$\mu = 9.732 \text{ kNm}$ $\sigma = 458,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0472$ $\gamma = 0,753$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 8.090 \text{ kNm}$ $\sigma = 253,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0314$ $\gamma = 0,975$	$\mu = 8.016 \text{ kNm}$ $\sigma = 246,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0307$ $\gamma = 1,292$	$\mu = 9.235 \text{ kNm}$ $\sigma = 268,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0291$ $\gamma = 0,873$	$\mu = 11.214 \text{ kNm}$ $\sigma = 353,9 \text{ kNm}$ $v = 0,0316$ $\gamma = 0,807$

Tabelle D.19: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 50 m + 50 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 50 m + 50 m, M _{Stütz}		
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 2.031 \text{ kNm}$ $\sigma = 271,7 \text{ kNm}$ $v = 0,1338$ $\gamma = 0,844$	$\mu = 2.705 \text{ kNm}$ $\sigma = 610,9 \text{ kNm}$ $v = 0,2258$ $\gamma = 0,829$
Wochen- Extrema	$\mu = 2.366 \text{ kNm}$ $\sigma = 254,4 \text{ kNm}$ $v = 0,1075$ $\gamma = 1,057$	$\mu = 3.469 \text{ kNm}$ $\sigma = 530,4 \text{ kNm}$ $v = 0,1529$ $\gamma = 0,073$
Jahres- Extrema	$\mu = 3.132 \text{ kNm}$ $\sigma = 236,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0756$ $\gamma = 1,077$	$\mu = 4.678 \text{ kNm}$ $\sigma = 287,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0614$ $\gamma = 0,869$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 3.982 \text{ kNm}$ $\sigma = 232,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0584$ $\gamma = 0,978$	$\mu = 5.635 \text{ kNm}$ $\sigma = 240 \text{ kNm}$ $v = 0,0426$ $\gamma = 0,943$

Tabelle D.20: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 50 m + 50 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 70 m + 70 m, M _{Stütz}				
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	3 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)	2+2 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 9.039 \text{ kNm}$ $\sigma = 893,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0988$ $\gamma = 1,064$	$\mu = 9.249 \text{ kNm}$ $\sigma = 998,3 \text{ kNm}$ $v = 0,1079$ $\gamma = 0,241$	$\mu = 10.651 \text{ kNm}$ $\sigma = 1.137,5 \text{ kNm}$ $v = 0,1068$ $\gamma = -0,009$	$\mu = 12.418 \text{ kNm}$ $\sigma = 1.411,1 \text{ kNm}$ $v = 0,1136$ $\gamma = 0,68$
Wochen- Extrema	$\mu = 10.186 \text{ kNm}$ $\sigma = 865,5 \text{ kNm}$ $v = 0,085$ $\gamma = 0,494$	$\mu = 10.443 \text{ kNm}$ $\sigma = 690,5 \text{ kNm}$ $v = 0,0661$ $\gamma = 0,228$	$\mu = 11.962 \text{ kNm}$ $\sigma = 719,2 \text{ kNm}$ $v = 0,0601$ $\gamma = 0,299$	$\mu = 14.145 \text{ kNm}$ $\sigma = 1.238,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0875$ $\gamma = 0,839$
Jahres- Extrema	$\mu = 12.352 \text{ kNm}$ $\sigma = 504,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0408$ $\gamma = 0,779$	$\mu = 12.151 \text{ kNm}$ $\sigma = 437,4 \text{ kNm}$ $v = 0,036$ $\gamma = 0,868$	$\mu = 13.795 \text{ kNm}$ $\sigma = 493,8 \text{ kNm}$ $v = 0,0358$ $\gamma = 0,947$	$\mu = 17.644 \text{ kNm}$ $\sigma = 875 \text{ kNm}$ $v = 0,0496$ $\gamma = 0,544$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 13.991 \text{ kNm}$ $\sigma = 401,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0287$ $\gamma = 0,98$	$\mu = 13.604 \text{ kNm}$ $\sigma = 357,6 \text{ kNm}$ $v = 0,0263$ $\gamma = 1,167$	$\mu = 15.486 \text{ kNm}$ $\sigma = 456,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0295$ $\gamma = 1,103$	$\mu = 20.294 \text{ kNm}$ $\sigma = 557,4 \text{ kNm}$ $v = 0,0275$ $\gamma = 0,861$

Tabelle D.21: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 70 m + 70 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Zweifeldträger, L = 70 m + 70 m, M _{Stütz}		
	1+1 Fahrstreifen (Begegnungs- verkehr)	2 Fahrstreifen (Richtungs- verkehr)
Tages- Extrema	$\mu = 3.056 \text{ kNm}$ $\sigma = 432,5 \text{ kNm}$ $v = 0,1415$ $\gamma = 0,965$	$\mu = 4.086 \text{ kNm}$ $\sigma = 1.195,6 \text{ kNm}$ $v = 0,2926$ $\gamma = 0,871$
Wochen- Extrema	$\mu = 3.596 \text{ kNm}$ $\sigma = 410,6 \text{ kNm}$ $v = 0,1142$ $\gamma = 1,033$	$\mu = 5.588 \text{ kNm}$ $\sigma = 1.026,8 \text{ kNm}$ $v = 0,1837$ $\gamma = -0,311$
Jahres- Extrema	$\mu = 4.821 \text{ kNm}$ $\sigma = 382,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0793$ $\gamma = 1,034$	$\mu = 7.628 \text{ kNm}$ $\sigma = 432,7 \text{ kNm}$ $v = 0,0567$ $\gamma = 0,853$
100-Jahres- Extrema	$\mu = 6.147 \text{ kNm}$ $\sigma = 360,3 \text{ kNm}$ $v = 0,0586$ $\gamma = 1,311$	$\mu = 9.064 \text{ kNm}$ $\sigma = 355,1 \text{ kNm}$ $v = 0,0392$ $\gamma = 1,246$

Tabelle D.22: Verteilungen der Tages-, Wochen-, Jahres- und 100-Jahres-Extrema aus Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ (Zweifeldträger, L = 70 m + 70 m, Stützmoment (positiv def.), Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“)

Anhang E

Häufigkeiten extremer Laststellungen

E.1 Einfeldträger-Feldmoment bei Langstreckenverkehr

E.1.1 Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen)

- fließender Verkehr / fließender Verkehr

$$n \approx \underbrace{\left[\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \cdot (1 - \overline{0,09}) \cdot \overline{30.000} \right]^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\frac{\overline{0,45s}}{24h} + \frac{\overline{0,45s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \quad (\text{E.1})$$

· 1.000 Jahre = 5.380



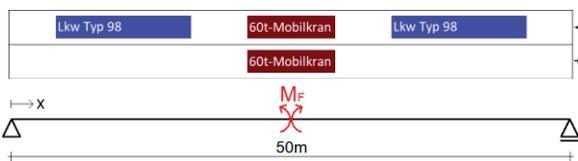
- Stau / Stau

$$n \approx \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^2 \cdot \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot \overline{0,09} \cdot \overline{30.000} \cdot \frac{1}{\underbrace{3}_{\text{drei mögliche Reihenfolgen}}} \right]}_{n_1} \cdot \underbrace{\left[\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \cdot \overline{0,09} \cdot \overline{30.000} \right]}_{n_2} \cdot \left(\frac{\overline{36s}}{24h} + \frac{\overline{36s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 55,3 \quad (\text{E.2})$$



- Stau / fließender Verkehr

$$n \approx \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^2 \cdot \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot \overline{0,09} \cdot \overline{30.000} \cdot \frac{1}{\underbrace{3}_{\text{drei mögliche Reihenfolgen}}} \right]}_{n_1} \cdot \underbrace{\left[\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \cdot (1 - \overline{0,09}) \cdot \overline{30.000} \right]}_{n_2} \cdot \left(\frac{\overline{36s}}{24h} + \frac{\overline{0,45s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 280 \quad (\text{E.3})$$



E.1.2 Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)

• fließender Verkehr

$$n \approx \underbrace{0,005 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}})}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 1 \cdot \underbrace{\frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} \quad (\text{E.4})$$

$$= 8.520$$



• Stau

$$n \approx \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{6}}_{\text{sechs mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} \quad (\text{E.5})$$

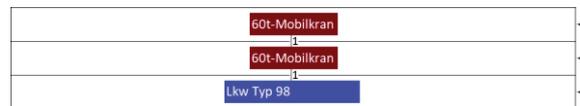
$$= 74,0$$



E.1.3 Richtungsverkehr (3 Fahrstreifen)

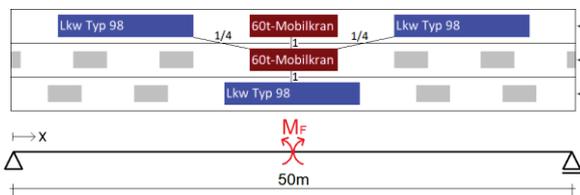
• fließender Verkehr

$$n \approx \underbrace{0,005 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}})}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,80}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \cdot 1 \cdot \underbrace{\frac{0,19}{0,80} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \cdot 1 \cdot \underbrace{\frac{0,01}{0,19} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der 2. Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{3}}_{\text{drei mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 112 \quad (\text{E.6})$$



• Stau

$$n \approx \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,80}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,01}{0,19} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der 2. Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{10}}_{\text{zehn mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 1,7 \quad (\text{E.7})$$



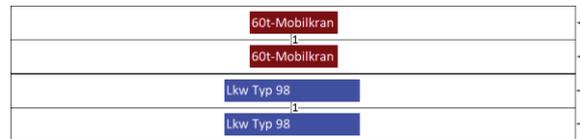
E.1.4 Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen)

- **fließender Verkehr / fließender Verkehr**

$$n \approx \left[\underbrace{0,005 \cdot (1 - \overbrace{0,09}) \cdot \overbrace{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \right]_{n_1}$$

$$\cdot \left[\underbrace{0,589 \cdot (1 - \overbrace{0,09}) \cdot \overbrace{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \right]_{n_2} \quad (E.8)$$

$$\cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 42,0$$

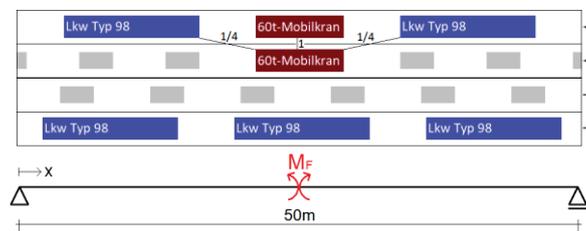


- **Stau / Stau**

$$n \approx \left[\underbrace{0,589^2 \cdot 0,005 \cdot \overbrace{0,09} \cdot \overbrace{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot \frac{1}{\underbrace{6}_{\text{sechsmögliche Reihenfolgen}}} \right]_{n_1}$$

$$\cdot \left[\underbrace{0,589^3 \cdot \overbrace{0,09} \cdot \overbrace{10.000} \cdot 0,85}_{n_2} \right] \cdot \left(\frac{\overbrace{36s}}{24h} + \frac{\overbrace{36s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}}$$

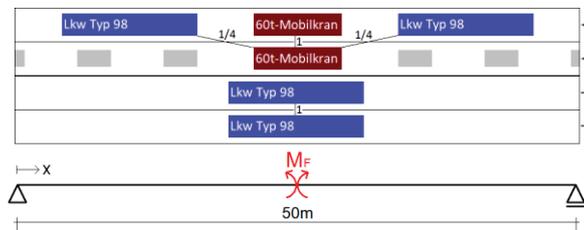
$$\cdot 1.000 \text{ Jahre} = 4,9$$



• **Stau / fließender Verkehr**

$$n \approx \underbrace{\left[\underbrace{0,589^2 \cdot 0,005 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot \frac{1}{6}}_{n_1} \right]}_{\text{sechsmögliche Reihenfolgen}} \cdot \underbrace{\left[\underbrace{0,589 \cdot (1 - 0,09) \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \right]}_{n_2} \quad (E.10)$$

$$\cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{stau}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 14,7$$



E.2 Zweifeldträger-Stützmoment bei Langstreckenverkehr

E.2.1 1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr)

- fließender Verkehr / fließender Verkehr

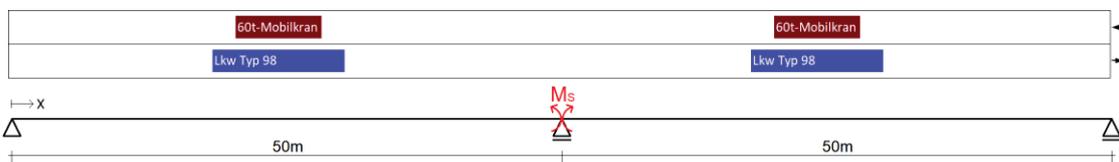
$$n \approx \left[\underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right) \cdot \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot 0,25 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}}) \cdot \overbrace{30.000}^{\text{DTV}} \cdot \frac{1}{2}}_{n_1 \cdot n_2} \right]^2 \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot \underbrace{4}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstigerer} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} \quad (\text{E.11})$$

= 12,9



Häufigkeit der ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n \approx \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right)^2 \cdot \overbrace{0,25}^{\text{Fahrzeugabstands-}} \cdot \overbrace{(1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}})}^{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \overbrace{30.000}^{\text{DTV}} \right]}_{n_1} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^2 \cdot 0,25 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}}) \cdot \overbrace{30.000}^{\text{DTV}} \right]}_{n_2} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 13,0 \quad (\text{E.12})$$



Gesamthäufigkeit:

$$\sum n = 25,9 \quad (\text{E.13})$$

• **Stau / Stau**

$$n \approx \left[\underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^5 \cdot \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{DTV}{30.000} \cdot \frac{1}{6}}_{n_1} \cdot \underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right) \cdot \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{DTV}{30.000} \cdot \frac{1}{12}}_{n_2} \right] \quad (\text{E.14})$$

sechs mögliche Reihenfolgen

zwölf mögliche Reihenfolgen

$$\cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{36s} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{36s} \right) \cdot \underbrace{16}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstiger Anordnungen der Lkw}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre}$$

$= 0,055$



Häufigkeit der ersten ungünstigen extremen Laststellung:

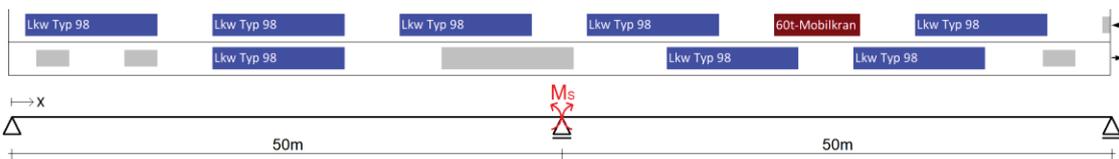
$$n \approx \left[\underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^5 \cdot \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{DTV}{30.000} \cdot \frac{1}{6}}_{n_1} \cdot \underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^3 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{DTV}{30.000} \cdot \frac{1}{4}}_{n_2} \right] \quad (\text{E.15})$$

sechs mögliche Reihenfolgen

vier mögliche Reihenfolgen

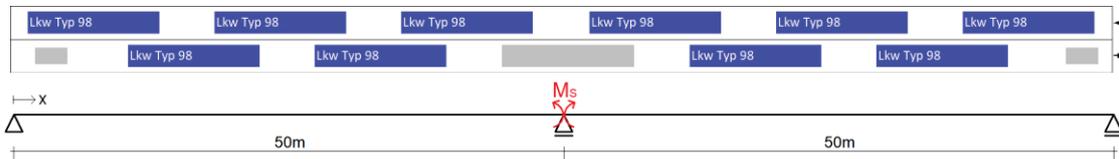
$$\cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{36s} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{36s} \right) \cdot \underbrace{4}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstiger Anordnungen der Lkw}} \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre}$$

$= 0,95$



Häufigkeit der zweiten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$\begin{aligned}
 n \approx & \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{30.000}^{\text{DTV}} \right]}_{n_1} \\
 & \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^4 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{30.000}^{\text{DTV}} \cdot \underbrace{\frac{1}{5}}_{\substack{\text{fünf mögliche} \\ \text{Reihenfolgen}}} \right]}_{n_2} \\
 & \cdot \left(\frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{stau}}}}{36\text{s}} + \frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{stau}}}}{36\text{s}} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 26,4
 \end{aligned} \tag{E.16}$$



Gesamthäufigkeit:

$$\sum n = 27,4 \tag{E.17}$$

• Stau / fließender Verkehr

$$n \approx \left[\underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^5 \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{DTV}{30.000} \cdot \frac{1}{6}}_{n_1} \right] \cdot \left[\underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right) \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right) \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,09) \cdot \frac{DTV}{30.000} \cdot \frac{1}{2}}_{n_2} \right] \quad (\text{E.18})$$

sechs mögliche Reihenfolgen *zwei mögliche Reihenfolgen*

$$\cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \cdot \underbrace{8}_{\text{Anzahl gleichw. oder ungünstigerer Anord. der Lkw}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre}$$

$= 0,21$

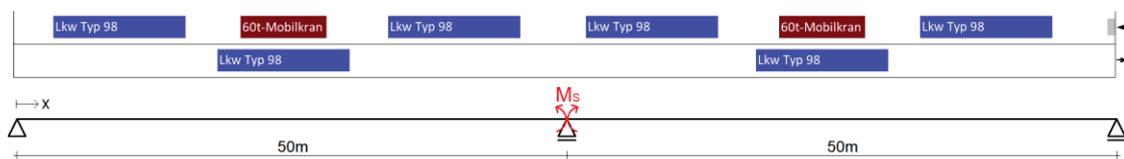


Häufigkeit der ersten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n \approx \left[\underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^4 \left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right)^2 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{DTV}{30.000} \cdot \frac{1}{15}}_{n_1} \right] \cdot \left[\underbrace{\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^2 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-wahrscheinlichkeit}}{0,25} \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{(1 - 0,09)} \cdot \frac{DTV}{30.000}}_{n_2} \right] \quad (\text{E.19})$$

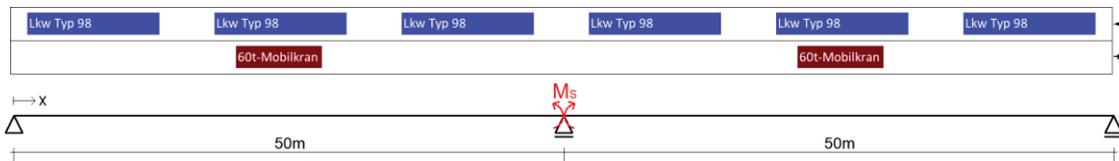
$$\cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \cdot \underbrace{10}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre}$$

$= 0,21$



Häufigkeit der zweiten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$\begin{aligned}
 n \approx & \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,589 \right)^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{30.000}^{\text{DTV}} \right]}_{n_1} \\
 & \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{10.000}{30.000} \cdot 0,005 \right)^2 \cdot \overbrace{0,25}^{\text{Fahrzeugabstands-}} \cdot \overbrace{(1 - 0,09)}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{30.000}^{\text{DTV}} \right]}_{n_2} \\
 & \cdot \left(\frac{\overbrace{36s}^{\Delta \bar{t}_{\text{stau}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 0,31
 \end{aligned} \tag{E.20}$$



Gesamthäufigkeit:

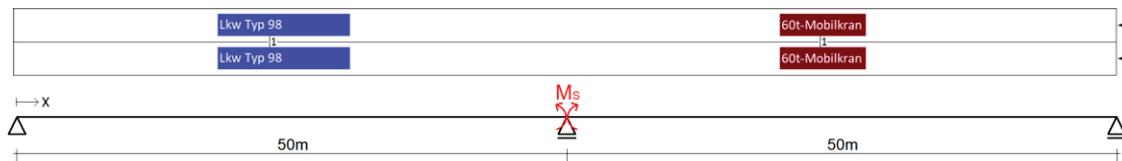
$$\sum n = 0,7 \tag{E.21}$$

E.2.2 Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)

- fließender Verkehr

$$n \approx \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-}}{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \underbrace{0,25}_{\text{Stauanteil}} \cdot (1 - \underbrace{0,09}_{\text{DTV-SV}})}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot 0,85 \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{6}}_{\text{sechs mögliche Reihenfolgen}} \cdot \underbrace{5}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}} \cdot \underbrace{250}_{\text{Werktage}} \frac{\text{Jahr}}{\text{Jahr}} \quad (\text{E.22})$$

• 1.000 Jahre = 109



• **Stau**

$$n \approx \underbrace{0,589^5 \cdot 0,005 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}}$$

$$\cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{28}}_{\substack{\text{mögliche} \\ \text{Reihenfolgen}}} \cdot \underbrace{15}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstiger} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}}$$

$$\cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 7,6$$

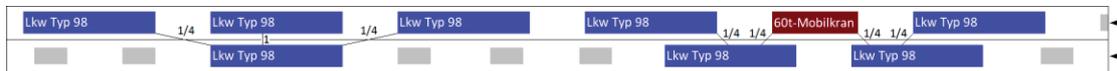


Häufigkeit der ersten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n \approx \underbrace{0,589^5 \cdot 0,005 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}}$$

$$\cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589\right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{9}}_{\substack{\text{neun mögliche} \\ \text{Reihenfolgen}}} \cdot \underbrace{8}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstiger} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}}$$

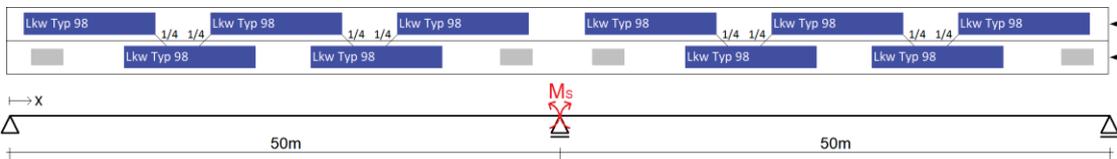
$$\cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 25,6$$



Häufigkeit der zweiten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589\right]^4}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}}$$

$$\cdot 1.000 \text{ Jahre} = 58,8$$



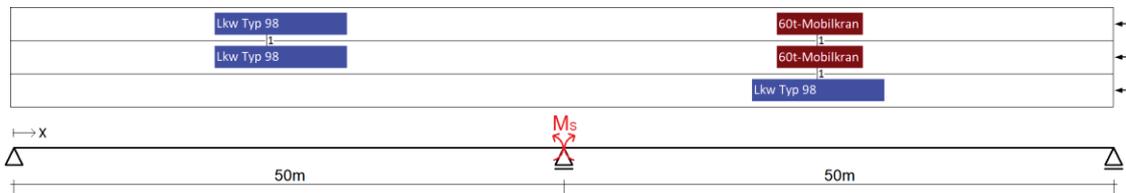
Gesamthäufigkeit:

$$\sum n = 92,0$$

E.2.3 Richtungsverkehr (3 Fahrstreifen)

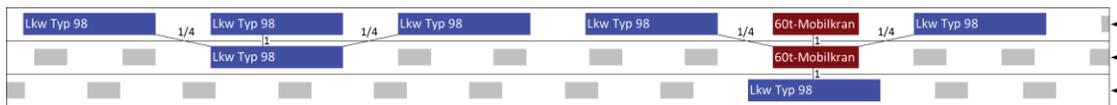
- fließender Verkehr

$$\begin{aligned}
 n \approx & \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-}}{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \underbrace{0,25}_{\text{Stauanteil}} \cdot (1 - \underbrace{0,09}_{\text{DTV-SV}})}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot 0,80 \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \\
 & \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,01}{0,19} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der 2. Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{9}}_{\text{mögliche Reihenfolgen}} \cdot \underbrace{10}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}} \quad (\text{E.27}) \\
 & \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 7,7
 \end{aligned}$$



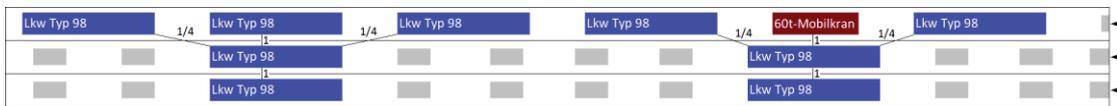
• **Stau**

$$\begin{aligned}
 n \approx & \underbrace{0,589^5 \cdot 0,005 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,80}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \\
 & \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,005}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,01}{0,19} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der 2. Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{36}}_{\substack{\text{mögliche} \\ \text{Reihenf.}}} \cdot \underbrace{16}_{\substack{\text{Anzahl gleichw.} \\ \text{oder ungünstigerer} \\ \text{Anord. der Lkw}}} \\
 & \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 0,33
 \end{aligned} \tag{E.28}$$



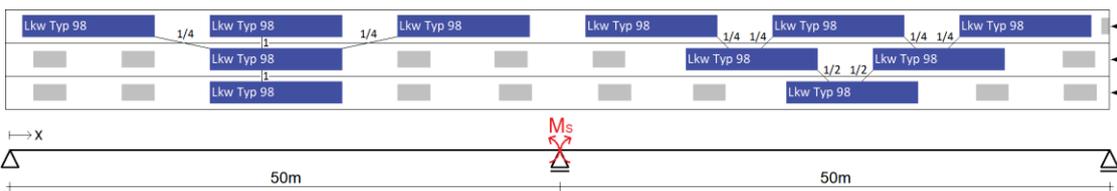
Häufigkeit der ersten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$\begin{aligned}
 n \approx & \underbrace{0,589^5 \cdot 0,005 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,80}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,589\right]^2}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \\
 & \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,01}{0,19} \cdot 0,589\right]^2}_{\text{Lkw der 2. Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{10}}_{\substack{\text{mögliche} \\ \text{Reihenfolgen}}} \cdot \underbrace{4}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstigerer} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \\
 & \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 1,1
 \end{aligned} \tag{E.29}$$



Häufigkeit der zweiten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$\begin{aligned}
 n \approx & \underbrace{0,589^6 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,80}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \\
 & \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{0,19}{0,80} \cdot 0,589\right]^2}_{\text{Lkw der 1. Nebenspur}} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,01}{0,19} \cdot 0,589\right]^2}_{\text{Lkw der 2. Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstigerer} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}} \\
 & \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 15,0
 \end{aligned} \tag{E.30}$$



Gesamthäufigkeit:

$$\sum n = 16,4 \tag{E.31}$$

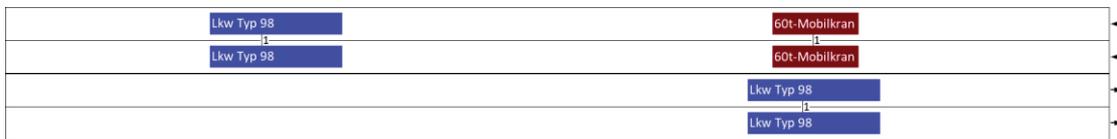
E.2.4 Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen)

- **fließender Verkehr / fließender Verkehr**

$$n_1 \approx 434,8 \cdot 10^{-6}, \text{ vgl. Gleichung (E.22)}$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,589 \cdot (1 - \overbrace{0,09}) \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}} \quad (E.32)$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{fließ}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{fließ}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 1,1$$

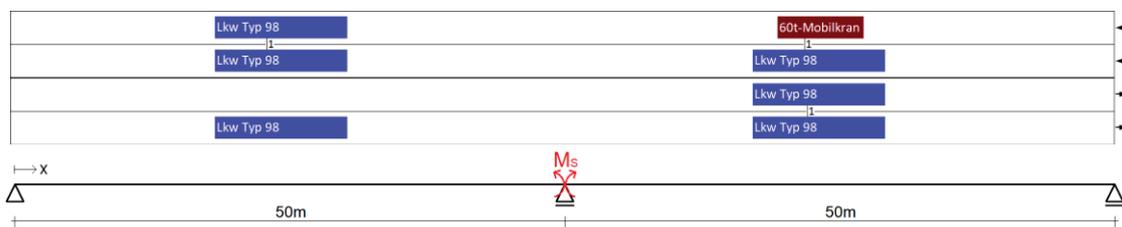


Häufigkeit der ersten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n_1 \approx \underbrace{0,589 \cdot 0,005 \cdot \overbrace{0,25}^{\text{Fahrzeugabstands- wahrscheinlichkeit}} \cdot (1 - \overbrace{0,09}) \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{4}}_{\text{vier mögliche Reihenfolgen}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}} \quad (E.33)$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,589^2 \cdot \overbrace{0,25}^{\text{Fahrzeugabstands- wahrscheinlichkeit}} \cdot (1 - \overbrace{0,09}) \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichw. o. ungünstigerer Anord. der Lkw}}$$

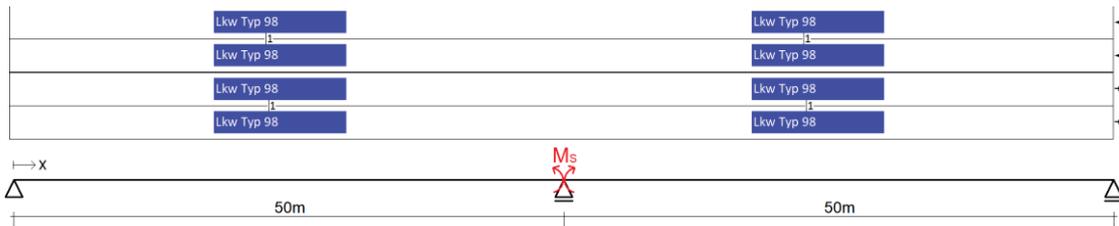
$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{fließ}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{fließ}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 11,2$$



Häufigkeit der zweiten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n \approx \left[\underbrace{0,589^2 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-}}{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{(1 - \text{Stauanteil})} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,85}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \right]^2 \quad (\text{E.34})$$

$$\cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktag}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 136$$



Gesamthäufigkeit:

$$\sum n = 148$$

(E.35)

• **Stau / Stau**

$n_1 \approx 368,2 \cdot 10^{-6}$, vgl. Gleichung (E.23) bis (E.26)

$$n_2 \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \quad (E.36)$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{\overbrace{36s}} + \frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{\overbrace{36s}} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 2,5$$



Häufigkeit der ersten ungünstigeren extremen Laststellung:

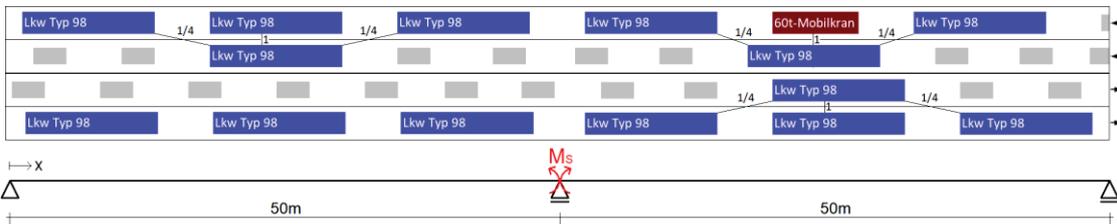
$$n_1 \approx \underbrace{0,589^5 \cdot 0,005 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \left[\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2 \cdot \frac{1}{8} \cdot 4 \quad (E.37)$$

acht mögliche Reihenfolgen Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw

$$n_2 \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 2$$

Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw

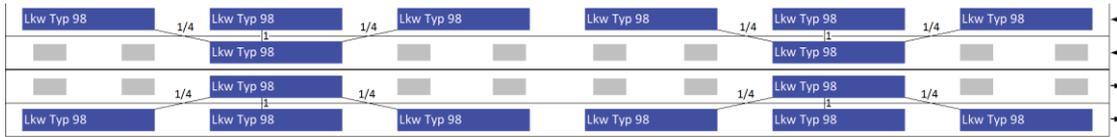
$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{\overbrace{36s}} + \frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{\overbrace{36s}} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 7,0$$



Häufigkeit der zweiten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n_1 = n_2 \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}}^2 \quad (\text{E.38})$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{36s}^{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{24h} + \frac{\overbrace{36s}^{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 128$$

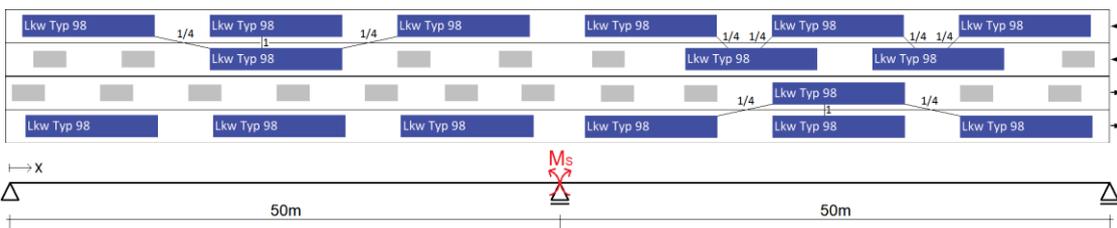


Häufigkeit der dritten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n_1 \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstigerer} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}} \quad (\text{E.39})$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstigerer} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}}$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{36s}^{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{24h} + \frac{\overbrace{36s}^{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 57$$



Gesamthäufigkeit:

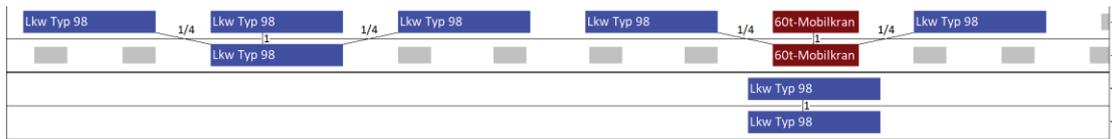
$$\sum n = 195 \quad (\text{E.40})$$

• **Stau / fließender Verkehr**

$n_1 \approx 368,2 \cdot 10^{-6}$, vgl. Gleichung (E.23) bis (E.26)

$$n_2 \approx \underbrace{0,589 \cdot (1 - 0,09)}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{10.000 \cdot 0,85}_{DTV-SV} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstiger Anordnungen der Lkw}} \quad (E.41)$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{36s} + \frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{0,45s} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 37$$

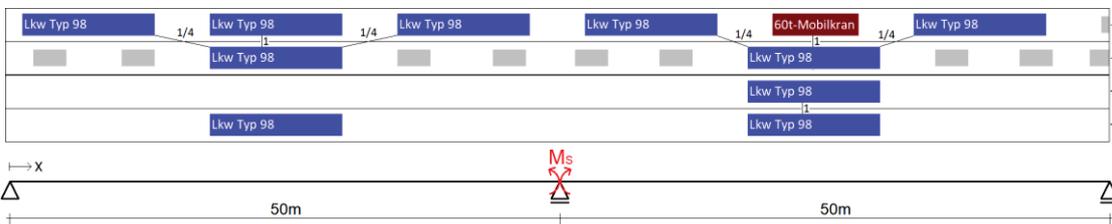


Häufigkeit der ersten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n_1 \approx \underbrace{0,589^5 \cdot 0,005}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{0,09}_{\text{Stauanteil}} \cdot \underbrace{10.000 \cdot 0,85}_{DTV-SV} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{8}}_{\text{acht mögliche Reihenfolgen}} \cdot \underbrace{4}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstiger Anordnungen der Lkw}} \quad (E.42)$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,589^2}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{0,25}_{\text{Fahrzeugabstands-wahrscheinlichkeit}} \cdot \underbrace{(1 - 0,09)}_{\text{Stauanteil}} \cdot \underbrace{10.000 \cdot 0,85}_{DTV-SV} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichw. o. ungünstigerer Anord. der Lkw}}$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}}{36s} + \frac{\overbrace{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{0,45s} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 49$$

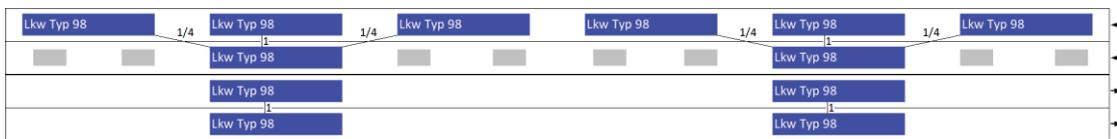


Häufigkeit der zweiten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n_1 \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}}$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,589^2 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-}}{\text{wahrscheinlichkeit}}}{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{(1 - 0,09) \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \quad (\text{E.43})$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 599$$



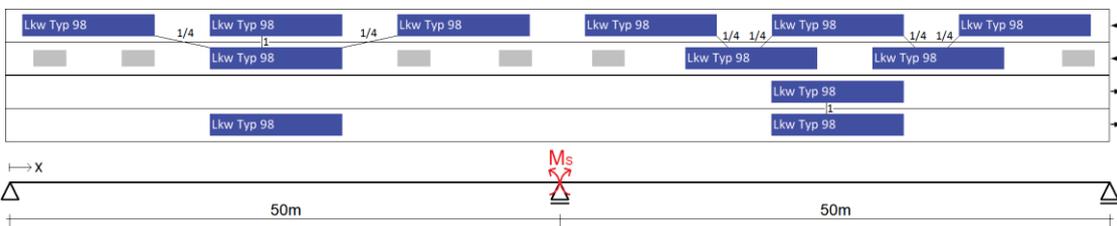
Häufigkeit der dritten ungünstigeren extremen Laststellung:

$$n_1 \approx \underbrace{0,589^6 \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{0,09} \cdot \frac{\text{DTV-SV}}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85}}_{\text{Lkw der Nebenspur}}$$

$$\cdot \underbrace{\left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}}$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,589^2 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-}}{\text{wahrscheinlichkeit}}}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{(1 - 0,09) \cdot \frac{\text{Stauanteil}}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichw. o. ungünstigerer Anord. der Lkw}}$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{\text{Stau}}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werkzeuge}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 399$$



Gesamthäufigkeit:

$$\sum n = 1.084 \quad (\text{E.45})$$

E.3 Einfeldträger-Feldmoment bei Ortsverkehr

E.3.1 Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen)

- **fließender Verkehr / fließender Verkehr**

$$n \approx \underbrace{\left[\frac{500}{10.000} \cdot 0,001 \cdot (1 - \overline{0,09}) \cdot \overline{10.000} \right]^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\frac{\overline{0,45s}}{24h} + \frac{\overline{0,45s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \quad (\text{E.46})$$

· 1.000 Jahre = 0,54



- **Stau / Stau**

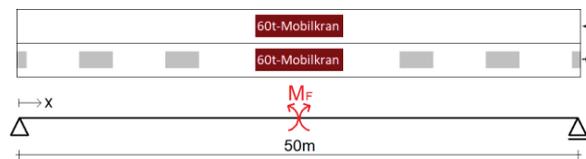
$$n \approx \underbrace{\left[\frac{500}{10.000} \cdot 0,001 \cdot \overline{0,09} \cdot \overline{10.000} \right]^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\frac{\overline{36s}}{24h} + \frac{\overline{36s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \quad (\text{E.47})$$

· 1.000 Jahre = 0,43



- **Stau / fließender Verkehr**

$$n \approx \underbrace{\left[\frac{500}{10.000} \cdot 0,001 \cdot (1 - \overline{0,09}) \cdot \overline{10.000} \right]}_{n_1} \cdot \underbrace{\left[\frac{500}{10.000} \cdot 0,001 \cdot \overline{0,09} \cdot \overline{10.000} \right]}_{n_2} \cdot \left(\frac{\overline{36s}}{24h} + \frac{\overline{0,45s}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} = 2,2 \quad (\text{E.48})$$

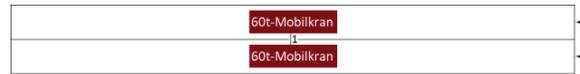


E.3.2 Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)

- fließender Verkehr

$$n \approx \underbrace{0,001 \cdot (1 - \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}}) \cdot \overbrace{500}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,001}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} \quad (\text{E.49})$$

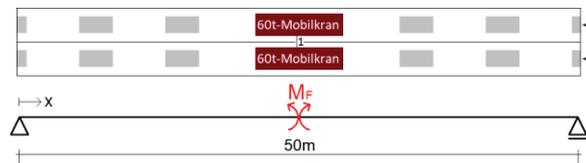
$$= 17,1$$



- Stau

$$n \approx \underbrace{0,001 \cdot \overbrace{0,09}^{\text{Stauanteil}} \cdot \overbrace{500}^{\text{DTV-SV}} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,001}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 1.000 \text{ Jahre} \quad (\text{E.50})$$

$$= 1,7$$



Anhang F

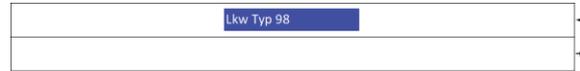
Häufigkeiten ermüdungsrelevanter Laststellungen

F.1 Einfeldträger-Feldmoment bei Langstreckenverkehr

F.1.1 Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen)

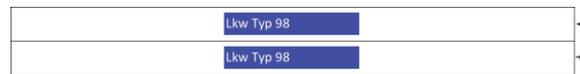
- Punkt 1

$$n \approx 0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 147,25 \cdot 10^6 \quad (\text{F.1})$$



- Punkt 2a

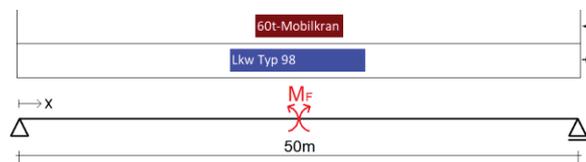
$$n \approx \underbrace{\left[0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \right]^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 9,03 \cdot 10^6 \quad (\text{F.2})$$



- Punkt 2b

$$n \approx \underbrace{\left[0,005 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \right]}_{n_1} \cdot \underbrace{\left[0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \right]}_{n_2} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} \quad (\text{F.3})$$

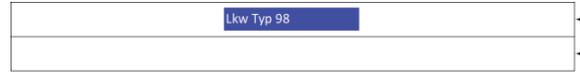
$$= 76.690$$



F.1.2 Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)

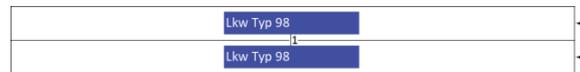
• **Punkt 1**

$$n \approx 0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85 \cdot 250 \frac{Werktage}{Jahr} \cdot 100 Jahre = 125,16 \cdot 10^6 \quad (F.4)$$



• **Punkt 2a**

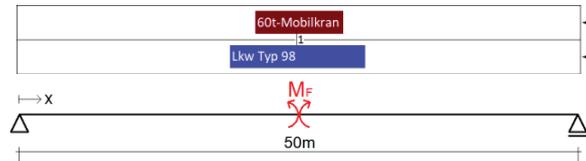
$$n \approx \underbrace{0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw\ der\ Hauptspur} \cdot 1 \cdot \underbrace{\frac{0,15}{0,85}}_{Lkw\ der\ Nebenspur} \cdot 0,589 \cdot 250 \frac{Werktage}{Jahr} \cdot 100 Jahre = 13,0 \cdot 10^6 \quad (F.5)$$



• **Punkt 2b**

$$n \approx \underbrace{0,005 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw\ der\ Hauptspur} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw\ der\ Nebenspur} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\substack{zwei\ mögliche \\ Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{Werktage}{Jahr} \cdot 100 Jahre \quad (F.6)$$

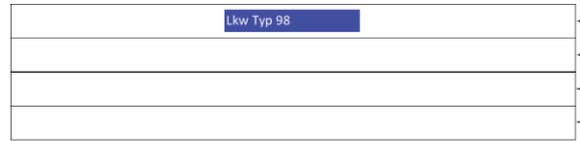
= 55.220



F.1.3 Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen)

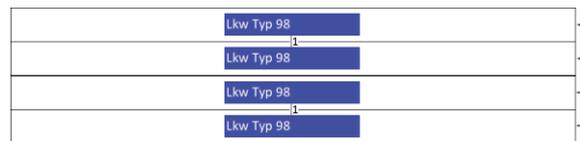
• **Punkt 1**

$$n \approx 0,589 \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85 \cdot 250 \frac{Werktag}{Jahr} \cdot 100 \text{ Jahre} = 125,16 \cdot 10^6 \quad (F.7)$$



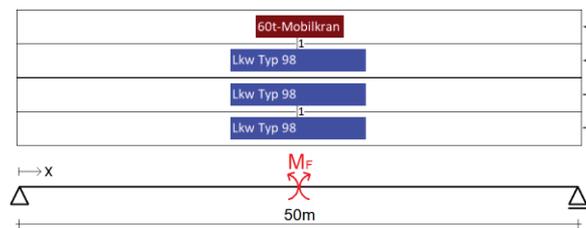
• **Punkt 2a**

$$n \approx \left[\underbrace{0,589 \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \right]^2 \cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{fließ}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{fließ}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{Werktag}{Jahr} \cdot 100 \text{ Jahre} = 70.520 \quad (F.8)$$



• **Punkt 2b**

$$n \approx \left[\underbrace{0,005 \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\text{zwei mögliche Reihenfolgen}} \right]_{n_1} \cdot \left[\underbrace{0,589 \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \right]_{n_2} \cdot \left(\frac{\Delta \bar{t}_{fließ}}{24h} + \frac{\Delta \bar{t}_{fließ}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{Werktag}{Jahr} \cdot 100 \text{ Jahre} = 299 \quad (F.9)$$



Die ermüdungsrelevanten Laststellungen der Einflusslinien Einfeldträger-Feldmoment und Zweifeldträger-Feldmoment sind zueinander identisch.

F.2 Zweifeldträger-Stützmoment bei Langstreckenverkehr

F.2.1 Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen)

- **Punkt 1**

$$n \approx 0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 147,25 \cdot 10^6 \quad (\text{F.10})$$



- **Punkt 2a**

$$n \approx \underbrace{\left[0,589^2 \cdot \overbrace{0,25}^{\text{Fahrzeugabstands-}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \right]^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \quad (\text{F.11})$$

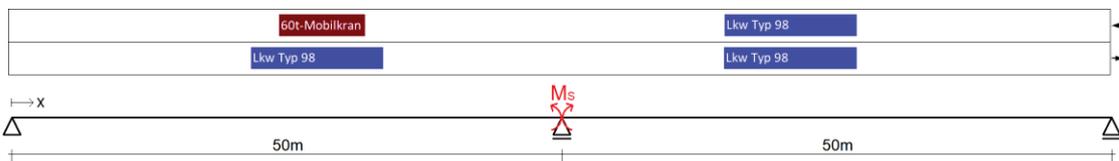
$\cdot 100 \text{ Jahre} = 195.890$



- **Punkt 2b**

$$n \approx \underbrace{\left[0,005 \cdot 0,589 \cdot \overbrace{0,25}^{\text{Fahrzeugabstands-}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\substack{\text{zwei mögliche} \\ \text{Reihenfolgen}}} \cdot \underbrace{2}_{\substack{\text{Anzahl gleichwertiger} \\ \text{oder ungünstigerer} \\ \text{Anordnungen der Lkw}}} \right]}_{n_1} \cdot \underbrace{\left[0,589^2 \cdot \overbrace{0,25}^{\text{Fahrzeugabstands-}} \cdot \overbrace{10.000}^{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \right]}_{n_2} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \quad (\text{F.12})$$

$\cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 1.663$



F.2.2 Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)

• **Punkt 1**

$$n \approx 0,589 \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85 \cdot 250 \frac{Werktage}{Jahr} \cdot 100 Jahre = 125,16 \cdot 10^6 \quad (F.13)$$



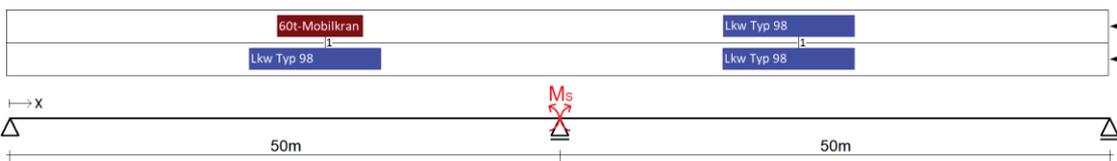
• **Punkt 2a**

$$n \approx \underbrace{0,589^2 \cdot \overbrace{0,25}^{Fahrzeugabstands- \\ \text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot 250 \frac{Werktage}{Jahr} \cdot 100 Jahre = 199.120 \quad (F.14)$$



• **Punkt 2b**

$$n \approx \underbrace{0,005 \cdot 0,589 \cdot \overbrace{0,25}^{Fahrzeugabstands- \\ \text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \overbrace{10.000}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{Lkw \text{ der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{Lkw \text{ der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{4}}_{\text{vier mögliche Reihenfolgen}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}} \cdot 250 \frac{Werktage}{Jahr} \cdot 100 Jahre = 845 \quad (F.15)$$



F.2.3 Begegnungsverkehr (2+2 Fahrstreifen)

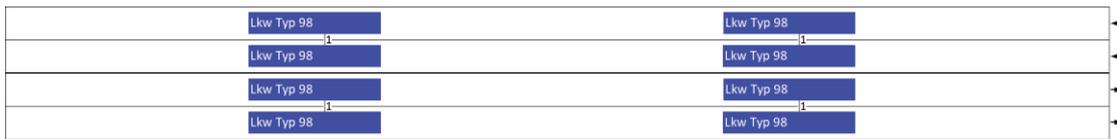
- **Punkt 1**

$$n \approx 0,589 \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85 \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 125,16 \cdot 10^6 \quad (\text{F.16})$$



- **Punkt 2a**

$$n \approx \underbrace{0,589^2 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-}}{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 16,5 \quad (\text{F.17})$$

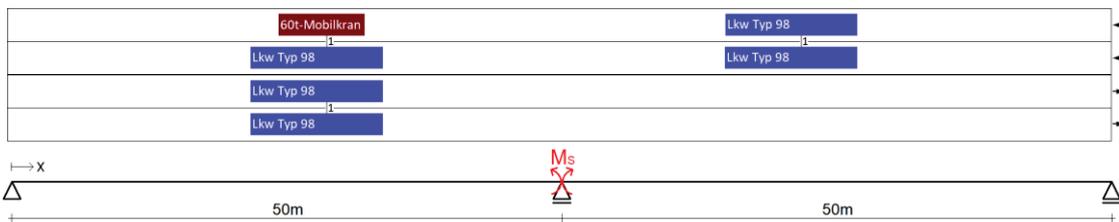


- **Punkt 2b**

$$n_1 \approx \underbrace{0,005 \cdot 0,589 \cdot \frac{\text{Fahrzeugabstands-}}{\text{wahrscheinlichkeit}} \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{\left[1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589 \right]^2}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{4}}_{\text{vier mögliche Reihenfolgen}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}} \quad (\text{F.18})$$

$$n_2 \approx \underbrace{0,589 \cdot \frac{DTV-SV}{10.000} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot \underbrace{1 \cdot \frac{0,15}{0,85} \cdot 0,589}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot \underbrace{2}_{\text{Anzahl gleichwertiger oder ungünstigerer Anordnungen der Lkw}}$$

$$n \approx n_1 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 9,2$$

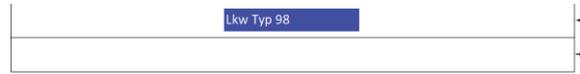


F.3 Einfeldträger-Feldmoment bei Ortsverkehr

F.3.1 Begegnungsverkehr (1+1 Fahrstreifen)

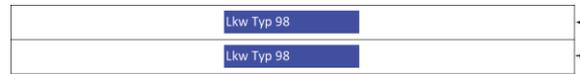
- Punkt 1

$$n \approx 0,0998 \cdot \overbrace{500}^{DTV-SV} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 1,25 \cdot 10^6 \quad (\text{F.19})$$



- Punkt 2a

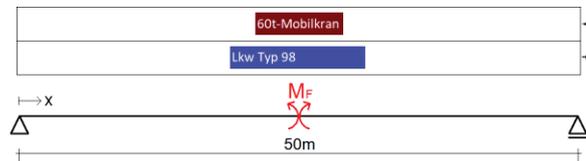
$$n \approx \underbrace{\left[0,0998 \cdot \overbrace{500}^{DTV-SV} \right]^2}_{n_1 \cdot n_2} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 648 \quad (\text{F.20})$$



- Punkt 2b

$$n \approx \underbrace{\left[0,001 \cdot \overbrace{500}^{DTV-SV} \right]}_{n_1} \cdot \underbrace{\left[0,0998 \cdot \overbrace{500}^{DTV-SV} \right]}_{n_2} \cdot \left(\frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} + \frac{\overbrace{0,45s}^{\Delta \bar{t}_{\text{fließ}}}}{24h} \right) \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} \quad (\text{F.21})$$

$$= 6,5$$



F.3.2 Richtungsverkehr (2 Fahrstreifen)

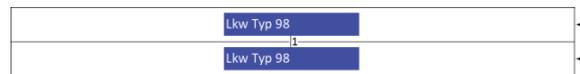
- **Punkt 1**

$$n \approx 0,0998 \cdot \overbrace{500}^{DTV-SV} \cdot 0,85 \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 1,06 \cdot 10^6 \quad (\text{F.22})$$



- **Punkt 2a**

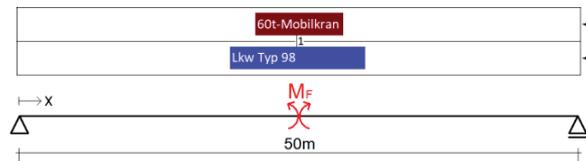
$$n \approx \underbrace{0,0998 \cdot \overbrace{500}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot 1 \cdot \underbrace{\frac{0,15}{0,85}}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 0,0998 \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} = 18.680 \quad (\text{F.23})$$



- **Punkt 2b**

$$n \approx \underbrace{0,001 \cdot \overbrace{500}^{DTV-SV} \cdot 0,85}_{\text{Lkw der Hauptspur}} \cdot 1 \cdot \underbrace{\frac{0,15}{0,85}}_{\text{Lkw der Nebenspur}} \cdot 0,0998 \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\text{zwei mögliche Reihenfolgen}} \cdot 250 \frac{\text{Werktage}}{\text{Jahr}} \cdot 100 \text{ Jahre} \quad (\text{F.24})$$

$$= 93,6$$



Nomenklatur

Abkürzungen

a	Jahr (annus)
analyt.	analytisch
A	Autobahn
AD	Autobahndreieck
AK	Autobahnkreuz
B	Bundesstraße
BGL	Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung e.V.
BK	Brückenklasse
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BWiM	Bridge-Weigh-in-Motion
char.	charakteristisch
def.	definiert
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr
DTV-SV	durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr
dyn	dynamisch
ELM	Ermüdungslastmodell
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
fl.V.	fließender Verkehr
Fzg	Fahrzeug
gen.pfl.	genehmigungspflichtig
GEV	Generalisierte Extremwert-Verteilung
GG	Gesamtgewicht
GIS	Geoinformationssystem

GPV	Generalisierte Pareto-Verteilung
h	Stunde (hora)
HS	Hauptspur
KI	Konfidenzintervall
lin.	linear
log	logarithmisch
Lkw	Lastkraftwagen
LM	Lastmodell
LNV	Log-Normalverteilung
max	maximal
min	minimal
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
NS	Nebenspur
NV	Normalverteilung
p.a.	pro Jahr (per annum)
Pkw	Personenkraftwagen
PATLoB	Probabilistic Analysis of Traffic Loads on Bridges
rel.	relativ
RC	Zuverlässigkeitsklasse (reliability class)
sim.	Simulation
stat	statisch
SV	Schwerverkehr
tat	tatsächlich
WiM	Weigh-in-Motion
zul.	zulässig

Symbole des lateinischen Alphabets

D	Schadenssumme
D_{grenz}	Grenzsadenssumme
E	Erwartungswert einer Log-Normalverteilung
E_d	Bemessungswert der Einwirkung
E_k	charakteristischer Wert der Einwirkung

f	Eigenfrequenz
$f(x)$	Verteilungsdichtefunktion
$F(x)$	Verteilungsfunktion
$f_{max}(x)$	Verteilungsdichtefunktion der Maxima
$F_{max}(x)$	Verteilungsfunktion der Maxima
$h_{beladen}$	Modalwert der Gesamtgewichtsverteilung am Punkt beladener Lkw
$h_{unbeladen}$	Modalwert der Gesamtgewichtsverteilung am Punkt unbeladener Lkw
H_0	Kollektivumfang
$H(\Delta\sigma), H(\Delta M)$	Summenhäufigkeit des Mehrstufenkollektiv
k	Verkehrsdichte
l_φ	maßgebende Länge
L	Spannweite
\bar{L}_{Fzg}	mittlere Fahrzeuggesamtlänge
ΔL	Bereich der zulässigen Lage einer Laststellung
m	Neigungsexponent
M	Moment
M_k	charakteristischer Wert des Momentes
M_F, M_{Feld}	Feldmoment
M_{Gesamt}	Gesamtlast aller Fahrzeuge auf dem Bauwerk
$M_S, M_{Stütz}$	Stützmoment
ΔM	Momentenschwingbreite
ΔM_k	charakteristischer Wert der Momentenschwingbreite (max. Schwingbreite)
ΔM_E	schädigungsäquivalente Momentenschwingbreite
$\Delta M_F, \Delta M_{Feld}$	Schwingbreite des Feldmomentes
$\Delta M_{Lkw Typ 98}$	Momentenschwingbreite infolge eines einzelnen beladenen Lkw Typ 98
$\Delta M_S, \Delta M_{Stütz}$	Schwingbreite des Stützmomentes
n, N	Anzahl bzw. Häufigkeit
$n_{100 Jahre}$	mittlere Häufigkeit in einem Zeitraum von 100 Jahren
$n_{1000 Jahre}$	mittlere Häufigkeit in einem Zeitraum von 1.000 Jahren
n_{tat}	tatsächliche mittlere Häufigkeit
n_E	Schwingspielzahl der schädigungsäquivalenten Schwingbreite
\hat{n}	Modalwert einer Schwingbreitenverteilung
$n(\Delta\sigma), n(\Delta M)$	Mehrstufenkollektiv

$N(\Delta\sigma)$	Bezugs-Wöhlerlinie
p, P	Wahrscheinlichkeit
$p_{fließ}$	Wahrscheinlichkeit, dass auf ein Fzg im Stau ein weiteres im Stau folgt
p_{Stau}	Wahrscheinlichkeit, dass auf ein Fzg im fl.V. ein weiteres im fl.V. folgt
P_{Lkw}	Zufallsgröße des Fahrzeuggesamtgewichtes
q	Quantil bzw. Verkehrsstärke
q_{max}	maximale Verkehrsstärke
R	Spannungsverhältnis
S	Standardabweichung einer Log-Normalverteilung
\bar{T}_r	mittlere Wiederkehrperiode
$\Delta\bar{t}$	mittlere Dauer einer Durchfahrt durch den zulässigen Bereich
$\Delta\bar{t}_{fließ}$	mittlere Dauer einer Durchfahrt durch den zulässigen Bereich im fl.V.
$\Delta\bar{t}_{Stau}$	mittlere Dauer einer Durchfahrt durch den zulässigen Bereich im Stau
ΔT	Länge eines Zeitintervalls
\bar{v}	mittlere Geschwindigkeit
x_0	unterer Grenzwert einer Log-Normalverteilung
x_o	oberer Grenzwert einer abgeschnittenen Normalverteilung
x_u	unterer Grenzwert einer abgeschnittenen Normalverteilung
\hat{x}	Modalwert
X	Zufallsvariable
w	Durchbiegung

Symbole des griechischen Alphabets

α	Wichtungsfaktor
β	Wichtungsfaktor bzw. Zuverlässigkeitsindex
γ	Schiefe
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert der ständigen Einwirkung
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert der veränderlichen Einwirkung
δ	Achslastanteil
$\eta(x)$	Einflusslinie
$\eta_L(x)$	Längseinflusslinie
$\eta_Q(x)$	Querverteilungslinie

$\Delta\eta$	Schwingbreite der Einflusslinie
λ	Schadensäquivalenzfaktor
λ_{max}	Maximalwert des Schadensäquivalenzfaktors
μ	Mittelwert
ν	Formparameter
ρ	Dämpfung
σ	Standardabweichung bzw. Spannung
σ_o	obere Grenze der Spannungsschwingbreite (Oberspannung)
σ_u	untere Grenze der Spannungsschwingbreite (Unterspannung)
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_{max}$	Kollektivhöchstwert (maximale Spannungsschwingbreite)
$\Delta\sigma_C, \Delta\sigma_{Rsk}$	Nennwert der Ermüdungsfestigkeit
$\Delta\sigma_D$	Dauerschwingfestigkeit
$\Delta\sigma_E$	schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_{ELM3}$	Spannungsschwingbreite infolge des Ermüdungslastmodells ELM 3
$\Delta\sigma_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit
ν	Variationskoeffizient
φ	Schwingbeiwert
$\bar{\varphi}$	Mittelwert des Schwingbeiwertes
$\varphi_{95\%}$	95%-Quantil des Schwingbeiwertes
φ_{fat}	schädigungsäquivalenter Schwingbeiwert
$\varphi(x)$	Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung
$\Phi(x)$	Verteilungsfunktion der Normalverteilung

Abbildungsverzeichnis

2.1	Eingangsparameter zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung	5
2.2	Standort der WiM-Anlagen der Bundesanstalt für Straßenwesen [Fits18]	6
2.3	Beispielhafte Fahrzeugtypenverteilung	7
2.4	Achsabstände, Achslastanteile und Gesamtgewichtsverteilung eines Lkw Typ 98	8
2.5	Beispielhafte Ersatzfahrzeuge des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs für Lastmodelle zur Nachrechnung von Brücken, vgl. [FrBö13], [FrBö14].....	9
2.6	Beispielhaftes Ersatzfahrzeug des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs für Lastmodelle zum Neubau von Brücken, vgl. [FrBö11a]	10
2.7	Fundamentaldiagramm [Kühn04].....	11
2.8	Beispielhafte Tagesganglinie des Gesamtverkehrs.....	13
2.9	Beispielhafte Tagesganglinie des Schwerverkehrs.....	13
2.10	Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr aus WiM-Daten der Messstelle „A61 Bliesheim, 2004“ (DTV-SV = 10.000) (Log-Normalverteilung mit Erwartungswert $E = 133$ m und Standardabweichung $S = 193$ m) [Kasc09]	14
2.11	Beispielhafte Verteilung der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr aus WiM-Daten der Messstelle „A3 Aicha vorm Wald, 2014“ (2-spurige Richtungsfahrbahn)	14
2.12	WiM-Daten und Modell für den Modalwert x der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr	15
2.13	WiM-Daten und Modell für den Erwartungswert E der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr (links: 2-spurige Richtungsfahrbahn, rechts: 3-spurige Richtungsfahrbahn) ...	15
2.14	Zusammenstellung der Modelle für den Erwartungswert E der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr mit maximalen Verkehrsstärken q_{\max} nach [BrZu03] und [HBS05] (links) sowie beispielhaft die Log-Normalverteilung der Fahrzeugabstände einer 2-spurigen Richtungsfahrbahn als Ergebnis der Modelle (rechts).....	16

2.15	Erfassung der Stauabstände (Fahrzeugüberstände und Fahrzeugabstände), AD Potsdam (A10) [FBKGGK18].....	17
2.16	Auswertung der Stauabstände am Autobahndreieck Potsdam (A10), ca. 280 Messwerte (links) und Autobahnkreuz Stuttgart (A8), ca. 130 Messwerte (rechts) [FBKGGK18]....	18
2.17	Auswertung der Stauabstände in Berlin, Seestr. zw. Nordufer und Dohnagestell, ca. 90 Messwerte (links) und Löwenberg (B96, B167), ca. 50 Messwerte (rechts)	18
2.18	Verteilung der Kolonnenlängen bei unterschiedlicher Definition des max. Kolonnenabstands (basierend auf WiM-Daten)	19
2.19	Verteilung der Kolonnenlängen bei unterschiedlicher Definition des max. Kolonnenabstands (basierend auf einer Log-Normalverteilung der Fahrzeugabstände)	20
2.20	Beispielhafte Tagesganglinien der streuenden Verkehrsnachfrage und Kapazität (5 Minuten Intervalle).....	22
2.21	Vorschlag einer Tagesganglinie der Anzahl an Staus pro Stunde	23
2.22	Beispielhafte Verteilung des Anteils überholender Lkw (2-spuriger Verkehr) [FBKGGK18]	24
2.23	Mittlerer Erwartungswert des Anteils der Nebenspuren am gesamten Schwerverkehr (Auswertung der Modelle hinsichtlich des Mittelwertes eines Tages) [FBKGGK18].....	26
2.24	Maximaler Erwartungswert des Anteils der Nebenspuren am gesamten Schwerverkehr (Auswertung der Modelle hinsichtlich des Maximalwertes eines Tages) [FBKGGK18].	26
2.25	Gegenüberstellung der Vorschläge für den Schwingbeiwert φ (links) und φ_{fat} (rechts) abhängig von der maßgebenden Länge l_{φ}	32
2.26	Vergleich der Ergebnisse zum dynamischen Schwingbeiwert von Brückmann [Brüc66], Cantieni [Cant83] und Drosner [Dros89] mit dem Vorschlag von Ludescher [Lude03]	33
2.27	Beispielhafter Kennwert-Zeit-Verlauf.....	34
2.28	Simulationsergebnisse des dynamischen Schwingbeiwertes (Einfeldträger, $L = 20$ m, Feldmoment, 1+1 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran, Eigenfrequenzen $f_1 = 3,37$ Hz und $f_2 = 13,46$ Hz, Dämpfung $\rho_1 = \rho_2 = 1,0$ %)	35
2.29	Simulationsergebnisse des dynamischen Schwingbeiwertes (Zweifeldträger, $L = 50$ m + 50 m, Stützmoment, 2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran, Eigenfrequenzen $f_1 = 1,57$ Hz und $f_2 = 2,46$ Hz, Dämpfung $\rho_1 = \rho_2 = 0,64$ %).....	35

2.30	Entwicklung des Transportaufkommens im Straßengüterverkehr in Deutschland [GKFB18], vgl. [InBv07], [InBv14], [Prog07], [BGL16a].....	38
2.31	Entwicklung der Transportleistung im Straßengüterverkehr in Deutschland, vgl. [InBv07], [InBv14], [Prog07], [BGL16b]	38
2.32	Entwicklung der Anträge für Großraum- und Schwertransporte bei der Autobahndirektion Nordbayern [Kasc09], [ABDNB19].....	39
2.33	Verteilungsdichtefunktion der Maxima aus N unabhängigen standardnormalverteilten Zufallsvariablen	40
2.34	Ablaufdiagramm zur Extremwertanalyse der Verkehrsbeanspruchung	42
2.35	Zählverfahren der Block-Maxima-Methode.....	43
2.36	Anpassung der Tages-Extrema durch Extremwertverteilungen und Hochrechnung auf 100-Jahres-Extrema, Vergleich mit dem Ergebnis aus 1.000 Simulationen von jeweils 100 Jahren (Einfeldträger, L = 25 m Fahrzeugkollektiv der A61 (Bliesheim) im Jahr 2004 [Kasc09])	45
2.37	Zählverfahren der Peak-over-Threshold-Methode	48
2.38	Beispielhafte Anpassung einer Generalisierten Pareto-Verteilung an die Dichteverteilung der Extrema.....	49
2.39	Zählverfahren der Level-Crossing-Counting-Methode	50
2.40	Beispielhafte Anpassung einer Rice-Funktion an das Histogramm des Level-Crossing-Counting.....	51
2.41	Beanspruchungskollektive unterschiedlicher Verkehrsszenarien.....	53
2.42	Einheitskollektive mit unterschiedlichen Formparametern v	54
2.43	Bereiche und Streuung der Wöhlerlinie.....	54
2.44	Bezugs-Wöhlerlinien verschiedener Schadensakkumulationshypothesen und deren zugehörige Lebensdauerlinien [AlGe13].....	56
2.45	Bezugs-Wöhlerlinien des Stahlbaus (links) und Beton- und Spannstahls (rechts) (A: Spannstahl im sofortigen Verbund, B: Betonstahl (gerade & gebogen), C: Spannstahl im nachträglichen Verbund (gerade und gekrümmte SpGl. in Kunststoffhüllrohren), D: Spannstahl im nachträglichen Verbund (gekrümmte SpGl. in Stahlhüllrohren), E: Betonstahl (geschweißt))	56
2.46	Definition von λ_{\max} zur Berücksichtigung der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$	60
2.47	Momentaufnahme einer Verkehrslastsimulation	61

2.48	Ausschnitt der 24 Fahrzeugbänder eines Tages bei einer 3-spurigen Richtungsfahrbahn (Blau = Hauptspur, Rot = Nebenspur 1, Orange = Nebenspur 2).....	63
2.49	Mögliche Stellungen eines überholenden Lkw.....	63
3.1	Schema der analytischen Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung.....	70
3.2	Maximale Anzahl an Tripel im Stauverkehr und Häufigkeit bestimmter aufeinanderfolgender Fahrzeugtypen	73
3.3	Extreme Laststellung des Stauverkehrs	74
3.4	Extreme Laststellung des fließenden Verkehrs	74
3.5	Mögliche Stellungen eines überholenden Lkw.....	74
3.6	Mehrspuriger Richtungsverkehr, Stau in der Hauptspur, 1 Lkw in der Nebenspur	75
3.7	Mehrspuriger Richtungsverkehr, Stau in der Hauptspur, 2 Lkw in der Nebenspur	75
3.8	Einspuriger Begegnungsverkehr, zulässige Lage der extremen Laststellung.....	76
3.9	Einflusslinien $\eta(x)$ infolge der Überfahrt eines Lkw Typ 98 mit dem Bereich kleiner Abweichung von der ungünstigsten Laststellung ΔL	78
3.10	Einspuriger Begegnungsverkehr, fließender Verkehr in beiden Richtungen	79
3.11	Einspuriger Begegnungsverkehr, Kombination aus fließendem Verkehr und Stau	79
3.12	Einspuriger Begegnungsverkehr, Stau in beiden Richtungen	79
3.13	Mehrspuriger Begegnungsverkehr, Stau in beiden Richtungen	80
3.14	Mehrspuriger Begegnungsverkehr, Kombination aus fließendem Verkehr und Stau	80
3.15	Maßgebende extreme Laststellung (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, einspuriger Verkehr, ohne genehmigungspflichtigen Schwerverkehr)	81
3.16	Grafische Darstellung der Verteilungsdichte der Beanspruchung $f(M)$ und 100-Jahres-Extrema $f_{\max}(M)$	83
3.17	Grafische Darstellung der Verteilung der 100-Jahres-Extrema $F_{\max}(M)$	83
3.18	Konvergenz des charakteristischen Wertes am Beispiel eines Einfeldträgers, $L = 20$ m, Einflusslinie für Feldmoment, 2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Schwerverkehrsvariante 1 (oben) und 2 (unten).....	86
3.19	Konvergenz des charakteristischen Wertes am Beispiel eines Zweifeldträgers, $L = 70$ m + 70 m, Einflusslinie für Stützmoment, 2+2 Fahrstreifen (Begegnungsverkehr), Schwerverkehrsvariante 1 (oben) und 2 (unten).....	86

3.20	Maßgebende extreme Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 1.000 Jahren und charakteristische Werte (M_k) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment)	96
3.21	Maßgebende extreme Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 1.000 Jahren und charakteristische Werte (M_k) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Zweifeldträger, $L = 50$ m + 50 m, Stützmoment)	97
3.22	Maßgebende extreme Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 1.000 Jahren und charakteristische Werte (M_k) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment)	98
3.23	Beispielhafte Laststellungen als Grundlage der Sensitivitätsanalyse (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr), Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)	99
3.24	Verteilung der Jahres-Extrema (oben) und 100-Jahres-Extrema (unten) infolge unterschiedlicher Laststellungen und deren Kombination (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	100
3.25	Einfluss der Häufigkeit einer Laststellung auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	101
3.26	Einfluss einer Erhöhung der Häufigkeit der Laststellung 1 (um Faktor 10) auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	102
3.27	Einfluss des Anteils des Lkw Typ 98 (10-90%) und 60t-Mobilkrans (0,1-1,0%) auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	104
3.28	Einfluss des DTV-SV (100-15.000), Stauanteils (0,1-20%) und Anteils der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr (1-30%) auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	104
3.29	Maßgebende Fahrzeugtypen des Schwerverkehrs	105
3.30	Einfluss von Mittelwert μ_2 und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes beladener Lkw Typ 98 auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	106

3.31	Einfluss von Standardabweichung σ_2 und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes beladener Lkw Typ 98 auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	106
3.32	Einfluss des Verhältnisses α/β zwischen leicht und voll beladenen Lkw Typ 98 sowie der Kappungsgrenze x_o dessen Gesamtgewicht auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	107
3.33	Einfluss von Mittelwert μ und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	107
3.34	Einfluss von Standardabweichung σ und Kappungsgrenze x_o des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf den charakteristischen Wert (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen (Richtungsverkehr))	108
3.35	Schema des vereinfachten (Hand-) Rechenverfahrens zur Ermittlung der charakteristischen Werte	110
3.36	Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Laststellung und der Höhe der Gesamtgewichte aller Lkw	111
3.37	Verteilungsfunktionen für das Gesamtgewicht eines Lkw Typ 98 mit $\mu_1 = 260$ kN, $\mu_2 = 400$ kN bzw. 440 kN, $\sigma_1 = 92,0$ kN, $\sigma_2 = 24,8$ kN und variablem Anteil beladener Lkw β sowie eines 60t-Mobilkrans mit $\mu = 600$ kN, $\sigma = 36$ kN, $x_u = 591$ kN und $x_o = 660$ kN	111
3.38	Maßgebende extreme Laststellung (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, zweispuriger Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)	112
4.1	Schema der analytischen Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung	116
4.2	Ermüdungsrelevante Laststellung eines einzelnen Lkw im fließenden Verkehr	118
4.3	Ermüdungsrelevante Laststellung zweier Lkw hintereinander im fließenden Verkehr	119
4.4	Approximation der analytischen Lösung des Mehrstufenkollektivs im halblogarithmischen Raum	120
4.5	Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ (Zweifeldträger, $L = 50$ m + 50 m, Feldmoment, einspuriger Verkehr)	122
4.6	Schwingspiel $\Delta\eta$ der Einflusslinie des Feldmomentes infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ ..	122

4.7	Grafische Darstellung des Teilkollektivs $n(\Delta M)$ infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ ..	123
4.8	Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner 60t-Mobilkran im fließenden Verkehr“ (Zweifeldträger, $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$, Feldmoment, einspuriger Verkehr).....	124
4.9	Grafische Darstellung des gesamten Mehrstufenkollektivs $n(\Delta M)$ für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren.....	126
4.10	Schwingbreiten $\Delta \eta$ der Einflusslinie des Stützmomentes eines Zweifeldträgers infolge der Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellungen „einzelner Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ (links) und „zwei Lkw Typ 98 hintereinander im fließenden Verkehr“ (rechts)	126
4.11	Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment)	136
4.12	Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Zweifeldträger, $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$, Feldmoment).....	137
4.13	Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Zweifeldträger, $L = 50 \text{ m} + 50 \text{ m}$, Stützmoment).....	138
4.14	Maßgebende ermüdungsrelevante Laststellungen, zugehörige Häufigkeiten in einem Zeitraum von 100 Jahren, charakteristische Schwingbreiten (ΔM_k) und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) aus analytischer Lösung im Vergleich zur Langzeit-Monte-Carlo-Simulation (Klammerwerte) (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einflusslinie: Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment)	139
4.15	Beispielhafte Laststellungen als Grundlage der Sensitivitätsanalyse (Einfeldträger, $L = 50 \text{ m}$, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)	140

4.16	Verteilung der Jahres-Extrema (oben) und 100-Jahres-Extrema (unten) infolge unterschiedlicher Laststellungen und deren Kombination (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr).....	141
4.17	Einfluss der Häufigkeit einer Laststellung auf die charakteristische Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr).....	142
4.18	Einfluss der Häufigkeit einer Laststellung auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr).....	142
4.19	Einfluss des Anteils des Lkw Typ 98 (10-90%) und 60t-Mobilkrans (0,1-1,0%) auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	144
4.20	Einfluss des DTV-SV (100-15.000) und Anteils der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr (1-30%) auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr).....	144
4.21	Maßgebende Fahrzeugtypen des Schwerverkehrs	145
4.22	Einfluss von Mittelwert μ_2 und Kappungsgrenze x_0 des Gesamtgewichtes beladener Lkw Typ 98 auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr).....	146
4.23	Einfluss des Verhältnisses α/β zwischen leicht und voll beladenen Lkw Typ 98 sowie der Kappungsgrenze x_0 dessen Gesamtgewicht auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr).....	146
4.24	Einfluss von Mittelwert μ und Kappungsgrenze x_0 des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	147
4.25	Einfluss von Standardabweichung σ und Kappungsgrenze x_0 des Gesamtgewichtes des Mobilkrans auf die schädigungsäquivalente Schwingbreite (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr).....	147
4.26	Schema des vereinfachten (Hand-) Rechenverfahrens zur Ermittlung des Mehrstufenkollektivs der Verkehrsbeanspruchung	149
4.27	Beanspruchungsverteilung infolge eines Lkw Typ 98 mit doppelnormalverteilterm Gesamtgewicht (einflusslinienunabhängig).....	150
4.28	Nomogramme für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gesamtgewichtsverteilung des Lkw Typ 98 am Modalwert beladener Lkw (h_{beladen}) mit variablem Anteil beladener Lkw (β),	

variablen Standardabweichungen (σ_1 und σ_2) und konstanten Mittelwerten ($\mu_1 = 260$ kN und $\mu_2 = 400$ kN)	151
4.29 Nomogramme für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gesamtgewichtsverteilung des Lkw Typ 98 am Modalwert beladener Lkw (h_{beladen}) mit variablem Anteil beladener Lkw (β), variablen Standardabweichungen (σ_1 und σ_2) und konstanten Mittelwerten ($\mu_1 = 260$ kN und $\mu_2 = 440$ kN)	151
4.30 Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Laststellung und der Höhe der Gesamtgewichte aller Lkw	152
4.31 Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „einzelner beladener Lkw Typ 98 im fließenden Verkehr“ (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran)	153
4.32 Überfahrt der ermüdungsrelevanten Laststellung „ungünstigste Anordnung im fließenden Verkehr“ (Einfeldträger, $L = 50$ m, Feldmoment, 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr, Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran).....	154
4.33 Summenhäufigkeiten der analytischen Lösung des Mehrstufenkollektivs.....	155
4.34 Mehrstufenkollektiv mit den Basisvariablen einer probabilistischen Analyse.....	156

Tabellenverzeichnis

2.1	Verteilung des DTV und DTV-SV pro Richtung auf Autobahnen und Bundesstraßen (jeweils nur für Werktage) (Daten automatischer Dauerzählstellen, vgl. [BASt17]).....	12
2.2	Modell der Stauabstände (bezogen auf Fahrzeugachsen).....	19
2.3	Mittlere Ergebnisse der Stausimulation für verschiedene Eingangparameter p_{Stau} und $p_{\text{fließ}}$ inkl. Markierung sinnvoller Kombinationen, $\text{DTV}_{\text{HS}} = 500$ (links), $\text{DTV}_{\text{HS}} = 10.000$ (rechts)	22
2.4	Näherungswerte für die Größenordnung der mittleren Anzahl an Staus pro Tag sowie den Stauanteil (konservative Werte unter Ansatz einer möglichst ungünstigen Tagesganglinie, Schwerverkehrsanteil 20%)	23
2.5	Modell für den Anteil der Nebenspur am gesamten Schwerverkehr (2-spuriger Verkehr) [FBKGK18]	25
2.6	Modell für den Anteil der Nebenspur 1 am gesamten Schwerverkehr (3-spuriger Verkehr) [FBKGK18]	25
2.7	Modell für den Anteil der Nebenspur 2 am gesamten Schwerverkehr (3-spuriger Verkehr) [FBKGK18]	25
2.8	Methoden zur Extremwertanalyse	42
2.9	Extrema des Feldmomentes bei unterschiedlichen Beobachtungszeiträumen und Anordnungen der Fahrspuren (Einfeldträger, $L = 100$ m, Fahrzeugkollektiv der A61 (Bliesheim) im Jahr 2004 [Kasc09]).....	46
3.1	Untersuchungsumfang der statischen Systeme und betrachteten Schnittgrößen.....	84
3.2	Erforderliche Simulationslänge zur Ermittlung eines Konfidenzintervalls für charakteristische Werte mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren.....	88

3.3	Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“	89
3.4	Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente (positiv definiert) für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“	90
3.5	Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“	91
3.6	Verteilungen der 100-Jahres-Extrema (mit Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Variationskoeffizient v und Schiefe γ) sowie die charakteristischen Werte (M_k) und deren 95%-Konfidenzintervall der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente (positiv definiert) für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“	91
3.7	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr).....	92
3.8	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	92
3.9	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 3 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	92
3.10	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr).....	92
3.11	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr).....	93

3.12	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	93
3.13	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 3 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	93
3.14	Vergleich der Referenzergebnisse (M_k) mit normativen Lastmodellen ohne Belastung der Kappen (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr).....	93
4.1	Untersuchungsumfang der statischen Systeme und betrachteten Schnittgrößen.....	127
4.2	Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“	128
4.3	Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“	128
4.4	Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“	129
4.5	Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“	129
4.6	Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente für das Verkehrsszenario „Langstreckenverkehr mit 60t-Mobilkran“	130
4.7	Mehrstufenkollektive und schädigungsäquivalente Schwingbreiten (ΔM_E) der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente für das Verkehrsszenario „Ortsverkehr mit 60t-Mobilkran“	130
4.8	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)	131

4.9	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	131
4.10	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Einfeldträger-Feldmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)	131
4.11	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)	132
4.12	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	132
4.13	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Feldmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)	132
4.14	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 1+1 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)	133
4.15	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2 Fahrstreifen im Richtungsverkehr)	133
4.16	Vergleich der Referenzergebnisse (ΔM_E) mit dem normativen Lastmodell ELM 3 inkl. λ , jedoch ohne λ_{max} (Ergebnisse der beispielhaft betrachteten Zweifeldträger-Stützmomente bei 2+2 Fahrstreifen im Begegnungsverkehr)	133

Literaturverzeichnis

- [ABDNB19] Autobahndirektion Nordbayern: *Großraum- und Schwerverkehr - Berechnungen mit SAB 90 zu Anträgen auf Großraum- und Schwertransporte*. www.abdnb.bayern.de. Nürnberg. 2019.
- [AlGe13] Al Shamaa, D.; Geißler, K.: *Verallgemeinerte Berücksichtigung der Dauerfestigkeit im Ermüdungsfestigkeitsnachweis mittels Lebensdauerlinien*. Stahlbau. Band Heft 2. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2013.
- [Alsh16] Al Shamaa, D.: *Probabilistische Betrachtung der Schadensakkumulation für stählerne Schweißverbindungen*. Dissertation. Institut für Bauingenieurwesen. Technische Universität Berlin. Shaker Verlag. Aachen. 2016.
- [Bail96] Bailey, S. F.: *Basic principles and load models for the structural safety evaluation of existing road bridges*. Dissertation. EPFL. Lausanne. Schweiz. 1996.
- [Basq10] Basquin, O. H.: *The Exponential Law of Endurance Tests*. American Society for Testing and Materials Proceedings. Band Vol. 10, S. 625-630. Philadelphia. USA. 1910.
- [BASSt17] Bundesanstalt für Straßenwesen: *Daten der automatischen Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen im Kalenderjahr 2017*. www.bast.de. Bergisch Gladbach. 2017.
- [BEM-ING Teil 3.1] BEM-ING - Teil 3.1: *Regelungen und Richtlinien für die Berechnung und Bemessung von Ingenieurbauten - Berechnung von Straßenbrücken im Bestand für Schwertransporte - Abschnitt 1: Richtlinie für die Bearbeitung von Schwertransporten im Bereich des konstruktiven Ingenieurbauwes (RIBS-ING)*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2016.

- [BEM-ING Teil 3.2] BEM-ING - Teil 3.2: *Regelungen und Richtlinien für die Berechnung und Bemessung von Ingenieurbauten - Berechnung von Straßenbrücken im Bestand für Schwertransporte - Abschnitt 2: Berechnungsverfahren*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2016.
- [BGL16a] Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.: *Güteraufkommen der Verkehrsträger im Bundesgebiet 1950-2014*. www.bgl-ev.de. Frankfurt am Main. 2016.
- [BGL16b] Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.: *Transportleistung der Verkehrsträger im Bundesgebiet 1950-2014*. www.bgl-ev.de. Frankfurt am Main. 2016.
- [Böni13] Böning, S.: *Entwicklung einer geschlossenen Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr*. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar. Shaker Verlag. Aachen. 2013.
- [BrPo95] Brilon, W.; Ponzlet, M.: *Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 718. BMV. Bonn. 1995.
- [Brüc66] Brückmann, B.: *Schwingungsmessungen an Massivbrücken*. Deutsche Bundesbahn. Frankfurt am Main. 1966.
- [Brul90a] Bruls, A.: *Example for a Unified European Load Model. Contribution to the Preliminary Background Report for Eurocode 9 on Actions - Part 12*. 1990.
- [Brul90b] Bruls, A.: *Calibration of the load model for fatigue calculation*. IABSE Workshop - remaining fatigue life of steel structures. Lausanne. Schweiz. 1990.
- [BrZu03] Brilon, W.; Zurlinden, H.: *Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen*. Schlussbericht FE 03.327/1999/KGB. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 870. BMV. Bonn. 2003.
- [Calg98] Calgaro, J.-A.: *Loads on bridges*. Progress in Structural Engineering and Materials. Band Vol I (4). Construction Research Communications. Frankreich. 1998.

- [Cant83] Cantieni, R.: *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA). Dübendorf. Schweiz. 1983.
- [CaOM06] Caprani, C.; O'Brien, E. J.; McLachlan, G. J.: *Characteristic traffic load effects from a mixture of loading events on short to medium span bridges*. Structural Safety. Band 30. Elsevier Science. Dublin. Irland. 2006.
- [Capr05] Caprani, C.: *Probabilistic analysis of highway bridge traffic loading*. Dissertation. National University of Ireland. Dublin. Irland. 2005.
- [ChLe13] Charras-Garrido, M.; Lezard, P.: *Extreme Value Analysis: an Introduction*. Journal de la Société Française de Statistique. Société Française de Statistique et Société Mathématique de France. Paris. Frankreich. 2013.
- [ClSe86] Clormann, U. H.; Seeger, T.: *Rainflow - HCM: Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage*. Stahlbau. Band Heft 3. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 1986.
- [CoDo56] Corten, H. T.; Dolan, T. L.: *Cumulative fatigue damage*. In Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals. New York. USA. 1956.
- [Cole01] Coles, S.: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag. London. Vereinigtes Königreich. 2001.
- [COST323] COST 323: *European Specification on Weigh-in-Motion of Road Vehicles*. EUCO-COST/323/8/99. LCPC. Paris. Frankreich. 1999.
- [CrCa97] Crespo-Minguillón, C.; Casas, J. R.: *A comprehensive traffic load model for bridge safety checking*. Structural Safety. Issue 4. Band 19. Elsevier Science. Barcelona. Spanien. 1997.
- [Crem01] Cremona, C.: *Optimal extrapolation of traffic load effects*. Structural Safety. Band 23. Elsevier Science. Paris. Frankreich. 2001.
- [Dani94] Danielewicz, I.: *Zur Ermüdungsbemessung von Beton-Straßenbrücken*. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt. 1994.
- [DIN 1072] DIN 1072: *Straßen- und Wegbrücken: Lastannahmen*. Beuth Verlag. 1985.

- [DIN EN 1991-2] DIN EN 1991-2: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1992-2] DIN EN 1992-2: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken*. Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1993-2] DIN EN 1993-2: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken*. Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1993-1-9] DIN EN 1993-1-9: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung*. Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1994-2] DIN EN 1994-2: *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 2: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für Brücken*. Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1992-1-1] DIN EN 1992-1-1: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag. 2011.
- [DIN EN 1991-2/NA] DIN EN 1991-2/NA: *Nationaler Anhang zu Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Beuth Verlag. 2012.
- [DIN EN 1993-2/NA] DIN EN 1993-2/NA: *Nationaler Anhang zu Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken*. Beuth Verlag. 2014.
- [Dros89] Drosner, S.: *Beitrag zur Berechnung der dynamischen Beanspruchung von Brücken unter Verkehrslasten*. Dissertation. Schriftenreihe Stahlbau. RWTH Aachen. Aachen. 1989.
- [EnOb11] Enright, B.; O'Brien, E. J.: *Cleaning Weigh-in-Motion Data: Techniques and Recommendations*. University College Dublin. Dublin. Irland. 2011.
- [Enri10] Enright, B.: *Simulation of Traffic Loading on Highway Bridges*. Dissertation. University College Dublin. Dublin. Irland. 2010.
- [EuHK05] Eulitz, K.-G.; Heuler, P.; Kotte, K. L.: *Lebensdauerabschätzung von Schweißverbindungen unter variablen Amplituden - Berechnung und Experiment*. DVS-Berichte. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren. DVS-Verlag. Düsseldorf. 2005.

- [FBKGGK18] Freundt, U.; Böning, S.; Kaschner, R.; Geißler, K.; Kraus, J. K.: *Methodik zur Entwicklung neuer Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung des Brückenbestandes*. Schlussbericht FE 15.0629/2016/FRB. unveröffentlicht. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. 2018.
- [FiNo14] Fitschen, A.; Nordmann, H.: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012*. Schlussbericht F1100.6290000. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft V236. Fachverlag NW. Bergisch Gladbach. 2014.
- [Fits18] Fitschen, A.: *Tägliche Lastmenge je Richtung und Lage der Achslastmessstellen*. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. 2018.
- [FKM12] Forschungskuratorium Maschinenbau: *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen (FKM-Richtlinie)*. 6. Auflage. VDMA Verlag. Frankfurt am Main. 2012.
- [FlJa96] Flint, A. R.; Jacob, B.: *Extreme traffic loads on road bridges and target values of their effects for code calibration*. Proceedings of IABSE Colloquium. Delft. Niederlande. 1996.
- [FrBö11a] Freundt, U.; Böning, S.: *Anpassung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an Eurocodes - Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten*. Schlussbericht FE 15.451/2007/ERB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B77. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2011.
- [FrBö11b] Freundt, U.; Böning, S.: *Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand*. Schlussbericht FE 84.107/2009. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B82. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2011.
- [FrBö13] Freundt, U.; Böning, S.: *Analyse von Beanspruchungen von lastbeschränkten Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr mit besonderer Berücksichtigung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr mit Dauergenehmigung*. Schlussbericht. unveröffentlicht. Landesbetrieb Straßenbau NRW. Gelsenkirchen. 2013.
- [FrBö14] Freundt, U.; Böning, S.: *Der aktuelle Verkehr einschließlich des dauergenehmigten Schwerverkehrs der Autobahnen in NRW und die*

- resultierenden Beanspruchungen der betreffenden Bestandsbrücken.* Schlussbericht. unveröffentlicht. Landesbetrieb Straßenbau NRW. Gelsenkirchen. 2014.
- [FVBP14] Freundt, U. et al.: *Roadtraffic Management System (RTMS)*. Schlussbericht FE 88.0106/2010. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B100. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2014.
- [GaGH64] Gaßner, E.; Griese, F. W.; Haibach, E.: *Ertragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweißverbindung aus Stahl St 37 bei verschiedenen Formen des Beanspruchungskollektivs*. Archiv für das Eisenhüttenwesen. Band Heft 3. Verlag Stahleisen GmbH. 1964.
- [GeiB09] Geißler, K.: *Auswirkung der Zulassung von 60t-Lkw auf Brückenbauwerke im Zuge der Bundesfernstraßen*. Schlussbericht FE 15.409/2004/SRB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B68. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2009.
- [GeiB95] Geißler, K.: *Beitrag zur probabilistischen Berechnung der Restnutzungsdauer stählerner Brücken*. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe. Heft 2. Technische Universität Dresden. Dresden. 1995.
- [GeSK19] Geißler, K.; Steffens, N.; Kraus, J. K.: *Methodik zur Bestimmung des Ziellastniveaus für Brückenbauwerke im Landesstraßennetz in Ortsdurchfahrten und auf freier Strecke auf der Basis gemessener Lastkollektive*. Abschlussbericht. noch nicht veröffentlicht. Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg. Berlin. 2019.
- [Gind04] Gindy, M.: *Development of a Reliability-Based Deflection Limit State for Steel Girder Bridges*. Dissertation. Department of Civil Engineering. The State University of New Jersey. New Brunswick. USA. 2004.
- [GKFB18] Geißler, K.; Kraus, J. K.; Freundt, U.; Böning, S.: *Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2*. Schlussbericht FE 15.0629/2016/FRB. unveröffentlicht. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. 2018.
- [Günt01] Günther, H.-P.: *Ermüdungsverhalten von Stahlträgern mit schlanken Stegblechen im Brückenbau*. Dissertation. Mitteilungen des Instituts für

- Konstruktion und Entwurf. Nr. 2002-1. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2001.
- [Haib70] Haibach, E.: *Modifizierte lineare Schadensakkumulations-Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung*. Technische Mitteilung 50/70. Laboratorium für Betriebsfestigkeit. Darmstadt. 1970.
- [Hank70] Hanke, M.: *Eine Methode zur Beschreibung der Betriebslastkollektive als Grundlage für Betriebsfestigkeitsversuche*. Automobiltechnische Z. 72(3). 1970.
- [HBS01] FGSV: *HBS - Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. Band Ausgabe 2001. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV Verlag. Köln. 2002.
- [HBS05] FGSV: *HBS - Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. Band Ausgabe 2001. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV Verlag. Köln. 2005.
- [Heek16] Heeke, G.: *Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Betonstahl und Spannstahl im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich mit sehr hohen Lastwechselzahlen*. Dissertation. Schriftenreihe Betonbau. Technische Universität Dortmund. Dortmund. 2016.
- [Heid83] Heidemann, D.: *Typisierung von Verkehrsstärkeganglinien des Schwerverkehrs durch clusteranalytische Verfahren*. Straßenverkehrszählungen. Heft 29. BMV. BAST. Bergisch Gladbach. 1983.
- [Herz11] Herzog, T.: *Strategien und Potenziale zur Verbrauchsreduzierung bei Verkehrsstaus*. Schriftenreihe Verkehr. Institut für Verkehrswesen. Universität Kassel. Kassel. 2011.
- [HeSa12] Hedderich, J.; Sachs, L.: *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R*. 14. Auflage. Springer-Verlag. Heidelberg. 2012.
- [HiEZ12] Hinkelmann, K.; Esderts, A.; Zenner, H.: *Verbesserung der Lebensdauerabschätzung durch Berücksichtigung des Lebensdauervielfachen*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Band Heft 10. Wiley-VCH Verlag. Weinheim. 2012.

- [Hobb08] Hobbacher, A.: *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Band IIW document IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. International Institute of Welding. Paris. Frankreich. 2008.
- [HuKa93] Humar, J. L.; Kashif, A. M.: *Dynamic response of bridges under traveling loads*. Canadian Journal of Civil Engineering. Ottawa. Kanada. 1993.
- [InBv07] Intraplan Consult GmbH; BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH: *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025*. Schlussbericht FE 96.0857/2005. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. München. Freiburg. 2007.
- [InBv14] Intraplan Consult GmbH; BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH: *Verkehrsverflechtungsprognose 2030*. Schlussbericht FE 96.0981/2011. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. München. Freiburg. 2014.
- [Jame03] James, G.: *Analysis of Traffic Load Effects on Railway Bridges*. Dissertation. Structural Engineering Division. Royal Institute of Technology. Stockholm. Schweden. 2003.
- [JBFM91] Jacob, B. A. et al.: *Methods for the prediction of extreme vehicular loads and load effects on bridges. Report of Subgroup 8, EC1: Traffic loads on bridges*. Paris. Frankreich. 1991.
- [Kasc08] Kaschner, R.: *Schätzung der Anpassungsfaktoren für ein künftiges Lastmodell LMI gemäß DIN-Fachbericht 101 - Modellrechnung*. unveröffentlichtes Arbeitspapier. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. 2008.
- [Kasc09] Kaschner, R.: *Auswirkungen des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen*. Schlussbericht FE 04243 des Arbeitsprogrammes der BAST. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B68. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2009.
- [KöSe91] König, G.; Seifert, P.: *Ermüdungsnachweis-Konzept für Straßenbrücken aus Beton auf Grundlage von Verkehrsmessungen in Europa*. Beton- und Stahlbetonbau. Band Heft 10. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 1991.

- [Kosh85] Koshini, I.: *Traffic load measurements and probabilistic modelling for structural design of urban expressways*. Proceedings of ICOSSAR'85: 4th International Conference on Structural Safety and Reliability. Kobe. Japan. 1985.
- [KrGe18] Kraus, J. K.; Geißler, K.: *Verkehrslastsimulationen zur Bewertung der Trag- und Ermüdungssicherheit stählerner Straßenbrücken*. 21. DAST-Kolloquium. Kaiserslautern. 2018.
- [Kroh14] Krohn, S.: *Messwertgestützte Ermüdungsnachweise an bestehenden Straßenbrücken*. Dissertation. Institut für Bauingenieurwesen. Technische Universität Berlin. Shaker Verlag. Aachen. 2014.
- [Kühn04] Kühne, R.: *FGSV Merkblatt (Entwurf): Das Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin. 2004.
- [Lang19] Langner, S.: *Berechnung der dynamischen Beanspruchung von Brücken unter Verkehrslasten zur Bewertung vereinfachter Modelle des Schwingbeiwertes*. Masterarbeit. unveröffentlicht. Technische Universität Berlin. Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau. Berlin. 2019.
- [LoŽn19] van Loo, H.; Žnidarič, A.: *Guide for Users of Weigh-In-Motion - An Introduction to Weigh-In-Motion*. International Society for Weigh-in-Motion (ISWIM). Dübendorf. Schweiz. 2019.
- [LTRM16] Lydon, M. et al.: *Recent developments in bridge weigh in motion (B-WIM)*. Journal of Civil Structural Health Monitoring. Springer-Verlag. 2016.
- [Lude03] Ludescher, H.: *Berücksichtigung von dynamischen Verkehrslasten beim Tragsicherheitsnachweis von Straßenbrücken*. Dissertation. EPFL. Lausanne. Schweiz. 2003.
- [MaNi98] Matsumoto, M.; Nishimura, T.: *Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator*. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. Band Vol. 8. No. 1. Keio University. Yokohama. Japan. 1998.
- [MDMH10] Maurer, R.; Dreier, F.; Machoczek, D.; Heeke, G.: *Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von einbetoniertem Betonstahl mit dem Interaktiven*

- Verfahren*. Bauforschung T 3227. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart. 2010.
- [MeDa94] Merzenich, G.; Danielewicz, I.: *Dynamische Simulation des Auxerre-Verkehrs für Stahlbetonbrücken zur Bestimmung des schädigungsäquivalenten Schwingbeiwertes*. RWTH Aachen. TH Darmstadt. unveröffentlicht. 1994.
- [Mens00] Mensinger, M.: *Zum Ermüdungsverhalten von Kopfbolzendübeln im Verbundbau*. Dissertation. Universität Kaiserslautern. Wirtschaftsverlag Aachen. Aachen. 2000.
- [Merz94] Merzenich, G.: *Entwicklung eines europäischen Verkehrslastmodells für die Bemessung von Straßenbrücken*. Dissertation. RWTH Aachen. Aachen. 1994.
- [MeSe95] Merzenich, G.; Sedlacek, G.: *Hintergrundbericht zum Eurocode 1 - Teil 3.2: „Verkehrslasten auf Straßenbrücken“*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 711. BMV. Bonn. 1995.
- [Mine45] Miner, M. A.: *Cumulative damage in fatigue*. Journal of applied mechanics. 1945.
- [Mose79] Moses, F.: *Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges*. Transportation Engineering Journal of ASCE. American Society of Civil Engineers. Cleveland. USA. 1979.
- [NaRiLi11] *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2011.
- [NBBP07] Novák, B.; Brosge, S.; Barthel, K.; Pfisterer, W.: *Anpassung des Verkehrslastmodells des DIN FB 101 für kommunale Brücken*. Beton- und Stahlbetonbau. Band Heft 5. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2007.
- [NoBD15] Novák, B.; Boros, V.; Decker, U.: *Modifiziertes Verkehrslastmodell für kommunale Brückenbauwerke*. Beton- und Stahlbetonbau. Band Heft 9. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2015.
- [NoFi16] Nowak, M.; Fischer, O.: *Traffic parameter sensitivity in the development of site-specific load models*. 9th International Conference „Bridges in Danube Basin 2016“. München. 2016.

- [NoFi17] Nowak, M.; Fischer, O.: *Objektspezifische Verkehrslastansätze für Straßenbrücken*. Beton- und Stahlbetonbau. Band Heft 12. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2017.
- [NuGü06] Nussbaumer, A.; Günther, H.-P.: *Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode 3*. Stahlbau-Kalender 2006. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2006.
- [Oppe88] Oppermann, H.: *Zulässige Verkürzung zufallsartiger Lastfolgen für Betriebsfestigkeitsversuche*. Vorträge des vierten LBF-Kolloquiums. Band Bericht Nr. TB-180. Laboratorium für Betriebsfestigkeit. Darmstadt. 1988.
- [Palm24] Palmgren, A. G.: *Die Lebensdauer von Kugellagern (Life Length of Roller Bearings or Durability of Ball Bearings)*. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (ZVDI). 1924.
- [Pete96] Petersen, C.: *Dynamik der Baukonstruktionen*. 1. Auflage. Vieweg. Braunschweig. 1996.
- [Prog07] ProgTrans AG: *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050*. Schlussbericht FE 26.0185/2006. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Basel. Schweiz. 2007.
- [Repp86] Reppermund, K.: *Probabilistischer Betriebsfestigkeitsnachweis unter Berücksichtigung eines progressiven Dauerfestigkeitsabfalls mit zunehmender Schädigung*. Stahlbau. Band Heft 4. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 1986.
- [Schü88] Schütz, K. G.: *Untersuchung des gekoppelten Schwingungssystems Brücke - Fahrzeug - Tilger unter besonderer Berücksichtigung von Fahrbahnunebenheiten*. Dissertation. Lehrstuhl für Stahlbau. Technische Universität München. München. 1988.
- [Schü89] Schütz, K. G.: *Schwingbeiwerte für Straßenbrücken*. Stahlbau. Band Heft 3. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 1989.
- [Seif90] Seifert, P.: *Fatigue Loading and Design for Road Bridges*. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt. 1990.

- [Spae92] Spaethe, G.: *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. 2. Auflage.* Springer-Verlag. Wien. Österreich. 1992.
- [Stef19] Steffens, N.: *Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring.* Dissertation. Institut für Bauingenieurwesen. Technische Universität Berlin. Shaker Verlag. Aachen. 2019.
- [StVO] *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO).* 2013.
- [StVZO] *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO).* 2012.
- [Swee15] Sweers, B.: *Vergleich probabilistischer Methoden zur Extremwertanalyse von Verkehrslastsimulationen.* Masterarbeit. unveröffentlicht. Technische Universität Berlin. Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau. Berlin. 2015.
- [TLS 2012] *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS). Ausgabe 2012.* Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2012.
- [Topu15] Topurova-Todorova, I.: *Tragfähigkeits- und Restnutzungsdaueranalyse stählerner Straßenbrücken unter detaillierter Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung.* Dissertation. Institut für Bauingenieurwesen. Technische Universität Berlin. Shaker Verlag. Aachen. 2015.
- [Zhou13] Zhou, X.: *Statistical analysis of traffic loads and their effects on bridges.* Dissertation. Université Paris-Est. Paris. Frankreich. 2013.
- [Zieg18] Ziegert, J.: *Bewertung des Teilsicherheitsbeiwerts γ_Q des Lastmodells LMI anhand einer Gegenüberstellung bisheriger und aktueller Methoden zur Verkehrslastsimulationen.* Masterarbeit. unveröffentlicht. Technische Universität Berlin. Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau. Berlin. 2018.