



# ENTWERFEN UND KONSTRUIEREN STAHLBAU

Josef Karl Kraus

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

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

Herausgeber:

Editors:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt

Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz

Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Prof. Dr.-Ing. Matthias Sundermeier

Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt

Shaker Verlag

Düren 2021



# **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



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

Band 30

**Josef Karl Kraus**

**Zur analytischen Herleitung von Verkehrslast-  
modellen für die Tragfähigkeit und Ermüdung  
von Straßenbrücken**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag  
Düren 2021

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

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

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2021

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

Dissertationsschrift von Josef Karl Kraus  
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt  
der Technischen Universität Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler  
Prof. Dr.-Ing. Ursula Freund  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krieger

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 15.07.2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8211-1

ISSN 1868-8357

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **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

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielstellung.....	1
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Ermittlung der Verkehrsbeanspruchung von Straßenbrücken.....</b>	<b>5</b>
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
<b>3</b>	<b>Analytische Lösung zur Ermittlung von Extremwerten der Verkehrsbeanspruchung .....</b>	<b>69</b>
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 Fahrzeugesamtgewichte .....	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
<b>4</b>	<b>Analytische Lösung zur Ermittlung von Mehrstufenkollektiven der Verkehrsbeanspruchung .....</b>	<b>115</b>
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 Fahrzeuggesamtgewichte .....	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
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>159</b>
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
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>165</b>
<b>A</b>	<b>Fahrzeugkollektive.....</b>	<b>167</b>
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>B</b>	<b>Brückenkatalog .....</b>	<b>173</b>
<b>C</b>	<b>Einflusslinien .....</b>	<b>177</b>
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 Randaufleger A [kN] .....	180
C.2.4	Querkraft am Mittelaufleger 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 Randaufleger A [kN] .....	184
C.3.5	Querkraft am Mittelaufleger B (links) [kN].....	185
C.3.6	Querkraft am Mittelaufleger B (rechts) [kN].....	186
C.4	Einflusslinien – Eingespannter Träger .....	187
C.4.1	Randmoment [kNm] .....	187
C.4.2	Feldmoment [kNm].....	187
<b>D</b>	<b>Extremwertverteilungen der Langzeit-Monte-Carlo-Simulationen .....</b>	<b>189</b>
D.1	Einfeldträger-Feldmoment .....	190
D.2	Zweifeldträger-Stützmoment.....	195
<b>E</b>	<b>Häufigkeiten extremer Laststellungen.....</b>	<b>201</b>
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
<b>F</b>	<b>Häufigkeiten ermüdungsrelevanter Laststellungen .....</b>	<b>223</b>
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

<b>Nomenklatur .....</b>	<b>233</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>239</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>249</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>253</b>