

Messwertgestützte Ermüdungsnachweise an bestehenden Straßenbrücken

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Sebastian Krohn
aus Rostock

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

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Ursula Freundt

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 16. Oktober 2013

Berlin 2013

D 83

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

Band 16

Sebastian Krohn

**Messwertgestützte Ermüdungsnachweise
an bestehenden Straßenbrücken**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2013

Messwertgestützte Ermüdungsnachweise an bestehenden Straßenbrücken

Dissertationsschrift von Sebastian Krohn
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt
der Technischen Universität Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna
Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler
Prof. Dr.-Ing. Ursula Freund

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 16.10.2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2588-0

ISSN 1868-8357

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund stetig steigender Verkehrsbelastungen und einer gleichzeitig alternden Infrastruktur gewinnt die Bewertung des Brückenbestandes im Straßennetz immer mehr an Bedeutung. Im Zuge dieser Bewertung ist es sinnvoll auf bauwerks-spezifische Informationen aus Messungen zurückzugreifen, da die realen Einwirkungen durch vor Ort gemessene Beanspruchungen besser abgebildet werden können als durch die relativ allgemeinen Ansätze in den Bemessungsnormen. Somit kann die Nachweisgenauigkeit durch den Einsatz von Messtechnik effektiv erhöht und ein Beitrag zur Verbesserung der Erhaltungsplanung der Infrastruktur geleistet werden.

Ziel dieser Arbeit ist eine konzeptionelle Verbesserung von messwertgestützten Ermüdungsnachweisen an bestehenden Straßenbrücken. Im Zuge der Bearbeitung wurden Daten aus Dehnungs- und Temperaturmessungen an vier bestehenden Straßenbrücken über einen Zeitraum von etwa drei Jahren gesammelt. Die Messungen erfolgten unter laufendem Verkehr. Bei den Bauwerken handelt es sich um eine Stahlbrücke mit ermüdungskritischen Details sowie um drei Spannbetonbrücken mit Ermüdungsproblemen im Bereich der Koppelfugen.

Auf Basis der gesammelten Messdaten wurde untersucht, welche Messzeiträume notwendig sind, um repräsentative Beanspruchungskollektive für Ermüdungsnachweise an Stahl- und Massivbrücken zu erhalten. Speziell bei Massivbrücken wurde neben der Verkehrsbeanspruchung auch die Temperaturbeanspruchung zur Festlegung eines repräsentativen Messzeitraumes berücksichtigt. Des Weiteren wurden die Messergebnisse anhand unterschiedlicher Vorgehensweisen in die vorhandenen rechnerischen Konzepte für Ermüdungsnachweise eingebunden, um mögliche Varianten zur Nutzung von Messdaten im Ermüdungsnachweis aufzuzeigen und miteinander zu vergleichen. Im Wesentlichen münden diese Untersuchungen in die Herleitung eines auf Messdaten basierenden Schadensäquivalenzfaktors λ_{meas} . Damit wird es möglich, Messergebnisse, die streng genommen nur Aussagen zur Beanspruchung an den Messpunkten enthalten, auf das gesamte Bauwerk zu übertragen.

Abstract

In the light of increasing traffic and an ageing infrastructure the assessment of existing road bridges gains in importance. In order to improve the assessment methods it is advantageous to use site specific data from measurements on the specific building as these data contains realistic loads which lead to a better approach in comparison to general load models in the design standards. Therefore the application of measurement technique can improve accuracy in the assessment and stands for advancement in the planning process for maintenance measures.

The objective of this thesis is a conceptual improvement in measurement based fatigue assessment on existing road bridges. In a first step, strain and temperature measurements were carried out on four road bridges over a period of about three years. One of these buildings is a steel deck bridge with fatigue problems on some critical welds. The three other prestressed concrete road bridges are showing cracks in the area of coupling joints which can increase the risk of fatigue damage on tendon couplings.

The collected data was analyzed with regard to the determination of measurement periods which provide a representative stress range spectrum for the fatigue assessment on steel and concrete bridges. Alongside traffic loads also the temperature effects on concrete bridges were considered. Furthermore, the measurement results were integrated in several analyzing concepts which show and compare different options for the usage of measurement data in the fatigue assessment. Basically these investigations lead to the derivation of a damage equivalent factor λ_{meas} which is based on measurement data. As measurement results are usually only valid for those structural points where the measurement was conducted the factor λ_{meas} makes it possible to transfer measurement results from those singular points onto the whole structure.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau der Technischen Universität Berlin. Von der ersten Idee zum Forschungsthema bis zur Fertigstellung dieser Arbeit bin ich vielen Menschen begegnet, die mich auf unterschiedlichen Wegen bei meinem Vorhaben unterstützt haben. Daher möchte ich an dieser Stelle die Gelegenheit nutzen, diesen Wegbegleitern meinen Dank auszusprechen.

Außerordentlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Geißler für die engagierte fachliche Betreuung der Arbeit und die fundierte Ausbildung, die ich unter seiner Regie erhalten habe. Frau Prof. Dr. Freundt danke ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Dr. Petryna sei ausdrücklich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes gedankt.

In einem freundlichen und produktiven Arbeitsumfeld fällt die Erstellung einer solchen Arbeit leichter. Daher möchte ich mich bei den Kollegen am Institut für Bauingenieurwesen, vor allem aber am Fachgebiet Stahlbau für die fachlichen Diskussionen und die sehr kollegiale Unterstützung bedanken. Die Zusammenarbeit war stets erfreulich und bereichernd.

Einen wesentlichen Beitrag zur Themenfindung sowie zur Umsetzung von Messaufgaben haben auch meine Kollegen bei der GMG Ingenieurgesellschaft geleistet. Vor allem Herrn Stein und Herrn Rodemann bin ich hierfür zu respektvollem Dank verpflichtet. Ohne diese beiden Herren hätte ich mich vielleicht nie mit Bauwerksmessungen beschäftigt.

Zur Realisierung der Langzeitmessungen an Straßenbrücken war ich stets auch auf die Unterstützung durch die zuständige Straßenbaubehörde angewiesen. Für das entgegengebrachte Interesse und die organisatorische Hilfe möchte ich mich vor allem bei Frau Foth, Frau Ritter, Herrn Teuber und Herrn Barthel vom Objektbereich Ingenieurbauwerke der Senatsverwaltung Berlin bedanken.

Explizit sei allen Kollegen, Freunden und Familienmitgliedern gedankt, die durch fleißiges Korrekturlesen zur Fehlerminimierung in dieser Arbeit beigetragen haben.

Von allen Wegbegleitern gibt es zwei, deren Unterstützung mir über mehrere Jahrzehnte hinweg bedingungslos zuteil geworden ist. Meinen Eltern danke ich von Herzen dafür, meinen Weg bis zu dieser Zielmarke geebnet zu haben und stets ehrbares Vorbild gewesen zu sein.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Frau Irina, die mich zusammen mit unseren beiden Kindern während der Erstellung der Arbeit beständig unterstützt und motiviert hat. Die drei waren und sind meine stärkste Antriebsfeder.

Berlin, Dezember 2013

Sebastian Krohn

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Anlass der Arbeit - Beurteilung bestehender Brücken	1
1.2	Zielstellung	2
1.3	Vorgehen und Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen der Materialermüdung	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Ermüdungsbruch	5
2.2.1	Ermüdungsbruch in metallischen Werkstoffen	5
2.2.2	Ermüdungsbruch im Beton	6
2.3	Beschreibung von Einwirkung und Widerstand	7
2.3.1	Kerben und Kerbfälle	7
2.3.2	Schwingbreite und Schwingspielzahl	8
2.4	Grundlagen für Ermüdungsnachweise	10
2.4.1	Klassierung und Schadensakkumulation	10
2.4.2	Bemessungswöhlerlinien	13
2.4.3	Unsicherheiten der Miner-Regel	14
2.4.4	Schadensäquivalenz	14
2.4.5	Restnutzungsdauer	16
2.5	Einflussfaktoren auf die Ermüdungsfestigkeit	17
2.5.1	Einfluss der Mittelspannung	17
2.5.2	Einfluss der Eigenspannungen	20
2.5.3	Einfluss der statischen Festigkeit	21
2.5.4	Einfluss der Zähigkeit und der Temperatur	22
2.5.5	Einfluss der Reibkorrosionsermüdung	22
2.5.6	Einfluss der Umweltbedingungen	23
2.5.7	Größeneinfluss bei metallischen Werkstoffen	24

3	Nachweiskonzepte und Widerstandsgrößen.....	27
3.1	Nennspannungskonzept.....	27
3.1.1	Nennspannungen im Stahlbau.....	27
3.1.2	Nennspannungen im Massivbau	31
3.1.3	Ermüdungsfestigkeit	40
3.1.4	Nachweisformate im Stahl- und Massivbau	45
3.1.5	Besonderheiten bei Massivbrücken mit Koppelfugen	51
3.1.6	Vor- und Nachteile des Nennspannungskonzeptes	60
3.2	Strukturspannungskonzept	60
3.2.1	Allgemeines.....	60
3.2.2	Ermittlung von Strukturspannungen im Stahlbau	60
3.2.3	Wöhlerlinien für Strukturspannungen.....	63
3.2.4	Nachweise mit Strukturspannungen.....	64
3.3	Bruchmechanisches Nachweiskonzept	65
3.3.1	Anwendungsfälle.....	65
3.3.2	Bruchmechanische Grundlagen	66
3.3.3	Linear elastische Bruchmechanik	69
3.3.4	Bruchmechanik bei zyklischer Beanspruchung	72
3.3.5	Restnutzungsdauernachweis	75
3.3.6	Betriebsintervallnachweis	76
3.4	Probabilistische Nachweismethoden.....	76
3.4.1	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie	76
3.4.2	Probabilistische Ermüdungsnachweise	85
4	Einwirkungen	101
4.1	Ermüdungslastmodelle in den Normen.....	101
4.1.1	Entwicklung der Ermüdungslastmodelle	101
4.1.2	Ermüdungslastmodell 3.....	108
4.1.3	Ermüdungslastmodell 4.....	118
4.1.4	Das modifizierte Ermüdungslastmodell 4.....	121
4.1.5	Ermüdungslastmodell 5 nach EC1-2.....	123

4.2	Verkehrslastsimulationen	124
4.3	Temperaturbeanspruchungen	128
4.3.1	Allgemeines	128
4.3.2	Temperaturgradienten in den Normen	129
4.3.3	Jahresverteilungen von $\Delta T_{M,y}$ für Massivbrücken	134
4.3.4	Tageszeitliche Verteilungen von $\Delta T_{M,y}$ für Massivbrücken	135
5	Bauwerksmessungen	138
5.1	Einführung	138
5.1.1	Vorgehen	138
5.1.2	Messung der Verkehrsbeanspruchung	138
5.1.3	Messung der Temperaturbeanspruchung	143
5.1.4	Untersuchte Bauwerke	145
5.2	Untersuchungen zum Messzeitraum	151
5.2.1	Vorgehen	151
5.2.2	Verkehrslastbeeinflusste Messung	152
5.2.3	Verkehrs- und temperaturlastbeeinflusste Messungen	156
5.2.4	Fazit zur Festlegung des Messzeitraumes	165
5.3	Messwertgestützte Nachweise bei Stahlbrücken	167
5.3.1	Allgemeines	167
5.3.2	Schadensäquivalenzfaktor λ_{meas} aus Messdaten	170
5.3.3	Messdaten in deterministischen Nachweiskonzepten	184
5.3.4	Messdaten im probabilistischen Nachweiskonzept	187
5.4	Messwertgestützte Nachweise für Massivbrücken	187
5.4.1	Allgemeines zu Dehnungsmessungen an Massivbrücken	187
5.4.2	Stand der Wissenschaft und Technik bei Messungen an Koppelfugen	188
5.4.3	Untersuchungen an Koppelfugen	192
5.4.4	Verwendung von λ_{meas} bei Massivbrücken	202
5.4.5	Messdaten im deterministischen Nachweiskonzept	207
5.4.6	Messdaten im probabilistischen Nachweiskonzept	210

6	Beispiel Stahlbrücke.....	211
6.1	Bauwerk 1	211
6.2	Rechnerische Ermüdungsnachweise	211
6.2.1	Vorgehen	211
6.2.2	Nennspannungskonzept deterministisch	212
6.2.3	Nennspannungskonzept probabilistisch	213
6.3	Messwertgestützte Nachweise	215
6.3.1	Ergebnisse zum Systemtragverhalten	215
6.3.2	Nachweis mit λ_{meas} für Haupt- und Querträger	217
6.3.3	Messwertgestützte probabilistische Nachweise	220
6.4	Fazit.....	221
7	Beispiel Spannbetonbrücke mit Koppelfugen	223
7.1	Auswahl eines Bauwerkes.....	223
7.2	Bauwerk 4	223
7.3	Rechnerische Ermüdungsnachweise	223
7.3.1	Nachweisstufen 1 und 2 deterministisch.....	223
7.3.2	Probabilistische Nachweise.....	225
7.4	Messwertgestützte Nachweise	226
7.4.1	Systemtragverhalten und Auswahl der Messquerschnitte	226
7.4.2	Ergebnisse der zerstörungsfreien Messung.....	226
7.4.3	Schädigungssumme aus Messung am Spannstahl	227
7.4.4	Nachweis unter Verwendung von λ_{meas}	229
7.4.5	Messwertgestützte probabilistische Nachweise	231
7.5	Fazit.....	232
8	Zusammenfassung.....	235
8.1	Ziele und Vorgehen.....	235
8.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	236
8.2.1	Kurzzeitmessungen	236
8.2.2	Festlegung des Messzeitraumes für Langzeitmessungen.....	236
8.2.3	Ermüdungsnachweis unter Verwendung von Messdaten	236

8.2.4	Messdaten und probabilistische Nachweise	238
8.3	Weiterer Forschungsbedarf	238
	Anhang A - Berechnungsbeispiel Stahlbrücke.....	241
	Anhang B - Berechnungsbeispiel Massivbrücke.....	255
	Nomenklatur	263
	Abbildungsverzeichnis	269
	Tabellenverzeichnis	277
	Literaturverzeichnis	281