

Dynamik von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr

Entwicklung eines Antwortspektrums
zur Erfassung der dynamischen Tragwerksreaktion

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Markus Spengler

aus
Simmern / Rheinland-Pfalz

D 17

Darmstadt 2010

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner

Tag der Einreichung: 15. Juni 2009

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Januar 2010

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstrasse 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Spengler, Markus:

Dynamik von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr
Entwicklung eines Antwortspektrums zur Erfassung der dynamischen Tragwerksreaktion

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 19

ISBN 978-3-9811881-6-5

Dr.-Ing. Markus Spengler

Geboren 1976 in Simmern. Von 1996 bis 2002 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2002 bis Ende 2004 Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main. Von Ende 2004 bis 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main tätig. Seit 2009 technischer Projektleiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für seine Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eröffneten Möglichkeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Bei Herrn Dr.-Ing. Herbert Duda, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Greck, Herrn Dr.-Ing. Lars Richter, Herrn Dipl.-Ing. Jeroen Pieterse und meiner lieben Frau Miriam möchte ich mich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Meinen Kollegen und Kolleginnen danke ich ganz besonders für die in beruflicher und privater Hinsicht ausgesprochen herzliche und angenehme Zeit am Institut, an die ich mich gerne erinnern werde. Meinem Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Ing. Andreas Greck danke ich für das stets vorhandene Interesse und die Diskussionsbereitschaft bezüglich meiner Forschungsarbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich auch bei allen Studentinnen und Studenten bedanken, die im Rahmen von Studienarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnen möchte ich hierbei Herrn Dipl.-Ing. Martin Heimann, Frau Dipl.-Ing. Daniela Schneider, Frau Dipl.-Ing. Pia Hannewald, Herrn Dipl.-Ing. Michael Schmitt, Herrn Dipl.-Ing. Dasu Liu, Herrn cand.-Ing. Jochen Zeier und Herrn cand.-Ing. Kai-Steffen Zeier.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern für ihre fortwährende Unterstützung, die mir insbesondere während meines Studiums eine große Hilfe war.

Der größte Dank gilt jedoch meiner lieben Frau Miriam und meinen Töchtern Lara-Marie und Jule, die durch ihren Rückhalt, ihr Verständnis und die immer willkommene Ablenkung großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten. Ihr seid das Wichtigste in meinem Leben.

Darmstadt, Januar 2010

Markus Spengler

Zusammenfassung

Die Dimensionierung und Bemessung von Eisenbahnbrücken bei der Planung von Hochgeschwindigkeitsstrecken im europäischen Fernverkehrsnetz erfordert in zunehmendem Maße die Berücksichtigung dynamischer Effekte infolge hoher Zuggeschwindigkeiten.

Diese Arbeit enthält eine systematische Untersuchung der strukturdynamischen Eigenschaften von einfeldrigen Eisenbahnbrücken unter bewegten Lasten. Die gewonnenen Erkenntnisse werden für die Definition einer *bezogenen dynamischen Vergrößerung* verwendet, welche in graphischer Darstellung für alle gängigen Brückenbauweisen und getrennt in unterschiedliche Resonanzbereiche aufbereitet wird.

Auf Grundlage dieser bezogenen dynamischen Vergrößerung kann ein *Antwortspektrum für Eisenbahnbrücken* definiert werden, welches zur Ermittlung der maximalen dynamischen Tragwerksreaktion verwendet und ohne aufwendige dynamische Tragwerksanalysen vom planenden Ingenieur eigenständig ermittelt werden kann.

Die abschließend entwickelten Abgrenzungskriterien zur Abschätzung einer Resonanzgefahr können bereits in einem frühen Planungsstadium zur Wahl eines in statischer und dynamischer Hinsicht ausreichenden Überbauquerschnitts eingesetzt werden.

Abstract

Due to increasing train speeds in recent years, the application of dynamic calculations of railway bridges becomes more and more relevant in the design process of European high speed rail projects.

This doctoral thesis includes a systematic analysis of the structural dynamics of single-span railway bridges exposed to moving loads. The conclusions are applied to define a so-called *normalised dynamic amplification factor* graphically illustrated for all commonly known methods of bridge construction and separated into different resonance velocity ranges.

Based on the normalised dynamic amplification factor a *response spectrum related to railway bridges* can be defined. This proposal of a simplified assessment of the dynamics of railway bridges without the need for extensive dynamic calculations can easily be applied by conventional project engineers in the field of bridge construction.

Finally boundary criteria have been developed to evaluate the risk of resonance useful in an early design stage to choose a suitable cross-section of the superstructure in terms of static and dynamic aspects.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Variablen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Vorgehensweise	5
2 Einwirkungen auf Eisenbahnbrücken	7
2.1 Einführung	7
2.2 Historische Eisenbahnlasten für Brücken	7
2.3 Aktuell gültige Regelungen zu Einwirkungen auf Eisenbahnbrücken	12
2.3.1 Allgemeines.....	12
2.3.2 Brücken ohne Resonanzgefahr.....	13
2.3.2.1 Das Lastmodell UIC 71	13
2.3.2.2 Hintergründe zur Entwicklung des Lastmodells UIC 71	15
2.3.3 Brücken mit Resonanzgefahr	21
2.3.3.1 Abgrenzungskriterien zur Notwendigkeit einer dynamischen Berechnung.....	21
2.3.3.2 Berechnungsgrundlagen für resonanzgefährdete Brücken	24
2.4 Zusammenfassung.....	33
3 Dynamik von Brücken unter bewegten Lasten	35
3.1 Einführung	35
3.2 Grundlagen.....	35
3.3 Rechenverfahren	39
3.3.1 Modale Superposition	39
3.3.2 Zeitschrittverfahren	42
3.4 Besonderheiten bei Eisenbahnbrücken	46
3.4.1 Modellbildung von Eisenbahnbrücken.....	46
3.4.2 Angeregte Eigenformen infolge Zugüberfahrt.....	51
3.4.3 Einwirkungen infolge Zugüberfahrt und Berücksichtigung der Interaktion Zug – Brücke.....	54

4	Dynamische Berechnungen zur Simulation von Zugüberfahrten	57
4.1	Einführung	57
4.2	Beschreibung des Berechnungsmodells.....	58
4.2.1	Allgemeines.....	58
4.2.2	Modellbildung einer Eisenbahnbrücke.....	61
4.2.3	Dynamisches Berechnungsverfahren	68
4.2.4	Vergleich ausgewählter Berechnungsergebnisse mit Schnittkrafttabellen aus der DB-Richtlinie 804	71
4.3	Eingangsgrößen für das Berechnungsmodell.....	72
4.4	Einfluss der Lastverteilung durch den Oberbau in Längsrichtung	79
4.5	Dynamische Effekte am Beispiel des Biegemoments in Feldmitte	87
4.5.1	Einführung.....	87
4.5.2	Hochgeschwindigkeitslastbilder HSLM-A01 bis A10.....	87
4.5.2.1	Maximale statische Biegemomente	87
4.5.2.2	Dynamischer Zuwachs.....	91
4.5.2.3	Bezogene dynamische Vergrößerung	96
4.5.3	Aktuelle Betriebszüge im deutschen Streckennetz	101
4.5.3.1	Allgemeines	101
4.5.3.2	Auswahl maßgebender Betriebszüge	105
4.5.3.3	Maximale statische Biegemomente	106
4.5.3.4	Dynamischer Zuwachs.....	109
4.5.4	Vergleich der Betriebszüge mit den Hochgeschwindigkeitslastbildern...	112
4.6	Berücksichtigung beliebiger Bauwerksdämpfungen	114
4.6.1	Allgemeines.....	114
4.6.2	Approximation des Dämpfungseinflusses.....	116
4.6.3	Beispiel.....	120
4.7	Beziehung zwischen Biegemoment und anderen Antwortgrößen	124
4.7.1	Allgemeines.....	124
4.7.2	Approximationsgleichungen für Querkraft, Durchbiegung und Beschleunigung	125
4.8	Zusammenfassung.....	129

5	Entwicklung eines Antwortspektrums	131
5.1	Einführung	131
5.2	Kritische Zuggeschwindigkeiten	132
5.3	Ermittlung eines Antwortspektrums	134
5.3.1	Hochgeschwindigkeitslastbilder HSLM-A	134
5.3.2	Betriebszüge	141
5.4	Beispiele.....	142
5.4.1	Beispiel 1: Spannbetonbrücke, L = 25m	142
5.4.2	Beispiel 2: Stahlbetonbrücke, L = 6,50m	145
5.4.3	Beispiel 3: Verbundbrücke, L = 12m, Betriebszüge	148
5.5	Zusammenfassung.....	150
6	Bemessungshilfen zur Vordimensionierung	151
6.1	Einführung	151
6.2	Entwicklung von Abgrenzungskriterien	153
6.3	Zusammenfassung.....	162
7	Resümee und Ausblick.....	165
8	Literaturverzeichnis.....	171
Anhang.....	177