

Schriftenreihe des

Lehrstuhls für
Stahlbau und Leichtmetallbau
der RWTH Aachen

Heft 82 - 2018

Vereinfachte dynamische Bemessung von WiB-Eisenbahnverbundbrücken für den Hochgeschwindigkeitsverkehr

von Hetty Bigelow

Vereinfachte dynamische Bemessung von WiB-Eisenbahn-
verbundbrücken für den Hochgeschwindigkeitsverkehr

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Hetty Bigelow

Berichter: apl. Professor Dr.-Ing. Benno Hoffmeister
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Guido De Roeck

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Mai 2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Gründer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Gerhard Sedlacek

Heft 82

Hetty Bigelow

**Vereinfachte dynamische Bemessung von WiB-Eisenbahn-
verbundbrücken für den Hochgeschwindigkeitsverkehr**

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6258-8

ISSN 0722-1037

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

Vorwort des Herausgebers

Eisenbahnbrücken aus Walzträgern in Beton, kurz WIB-Brücken genannt, gibt es seit Ende des 19. Jahrhunderts. Sie sind für kurze Spannweiten besonders vorteilhaft, weil sie hohe Tragfähigkeiten mit einfacher Bauweise kombinieren. Gleichwohl ist die Bemessung dieses Brückentyps für heutige Ansprüche unbefriedigend. Beispielsweise erfolgt die Ermittlung der dynamisch wirksamen Querschnittssteifigkeit nur unter Ansatz der isolierten Struktur, aber ohne den Beitrag von weiteren Elementen, was zu deutlichen Abweichungen führt. Fehlende Forschungen zur WIB-Brückenbemessung haben dazu geführt, dass das spezifische Trag- und Verformungsverhalten dem Grunde nach nur unzureichend bekannt ist, insbesondere vor dem Hintergrund des integralen Charakters der Bauweise. Dieses Defizit stellt ein Hindernis für die Verwendung von WIB-Brücken für Hochgeschwindigkeitsverkehre dar, da hier die dynamischen Eigenschaften der Brücke besonders wichtig sind.

Hier stellt sich die wissenschaftliche Aufgabe, eine Methodik zur Implementierung unterschiedlicher Randbedingungen in handhabbaren mechanischen Modellen zur Vorhersage der dynamischen Antwort solcher Brückenstrukturen zu entwickeln. Frau Hetty Bigelow hat sich dankeswerterweise mit der vorliegenden Dissertation dieser Aufgabe mit theoretischen und experimentellen Untersuchungen angenommen.

Denn die realitätsnahe Prognose der dynamischen Bauwerkeigenschaften wie Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfungsparameter, sowie die Prognose der Bauwerksantwort auf überfahrende Züge stellt insbesondere bei WIB-Brücken eine besondere Herausforderung dar.

Mit der Ableitung eines vereinfachten Verfahrens zur Vorhersage einiger dynamischer Eigenschaften, vornehmlich der Eigenfrequenzen und Dämpfungsparameter hat Frau Bigelow es geschafft, bei Wahrung der Einfachheit des Rechengangs, die Bemessung solcher Strukturen realistischer zu gestalten, die wesentlichen Komponenten des dynamischen Verhaltens zu identifizieren und so die Komplexität deutlich zu reduzieren.

Der Stiftung Stahlanwendungsforschung und der Forschungsgesellschaft Stahlanwendung e.V. FOSTA ist besonders für die Förderung der Arbeiten im Projekt P 941 „Dynamische Auslegung von Eisenbahnbrücken in Stahl- und Stahlverbundbauweise mit kleinen und mittleren Spannweiten für den Hochgeschwindigkeitsverkehr“, aus dem diese Dissertation hervorging, zu danken.

Aachen, Juli 2018

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Kurzfassung

Eisenbahnbrücken in Walzträger in Beton (WiB-) Bauweise weisen viele Vorteile auf: Sie sind langlebig, können mit hohen Schlankheiten ausgeführt werden und bedürfen beim Bau nur einem geringen Schalungsaufwand. Da sie i.d.R. als Einfeldträger ausgeführt werden, erweisen sich ihre hohen Schlankheiten gleichzeitig in gewisser Weise auch als Nachteil: Die berechneten Eigenfrequenzen sind üblicherweise relativ klein und lassen bereits bei niedrigen Überfahrtsgeschwindigkeiten Resonanzeffekte infolge der regelmäßigen Achsabstände der überfahrenden Züge erwarten. Bauwerksmessungen haben allerdings wiederholt gezeigt, dass sie sich in der Realität deutlich besser verhalten als prognostiziert und erwartete Resonanzeffekte erst bei deutlich höheren Geschwindigkeiten zu erwarten sind.

Die z.T. beachtlichen Unterschiede zwischen Realität und Prognose sind seit längerem bekannt und werden allgemein zusätzlichen Beiträgen zu Systemsteifigkeit und Dämpfung von s.g. baulichen Randbedingungen zugeschrieben, beispielsweise Schotterbett, Schienen, Schwellen oder Randkappen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt zunächst eine ausführliche Betrachtung verschiedener Einflussparameter auf das dynamische Verhalten von WiB-Eisenbahnbrücken zur Klärung, welche zusätzlichen Beiträge sich zuverlässig von anderen Effekten isolieren und identifizieren lassen, um sie in einer Bemessung berücksichtigen zu können und welche Einflussparameter weiterer Forschung bedürfen.

Experimentelle Untersuchungen zum Koppeleffekt zwischen Eisenbahnbrücken, deren Überbauten durch eine Längsfuge getrennt ausgeführt werden, sich aber ein gemeinsames Schotterbett teilen, werden anhand eines speziell konzipierten Versuchsstandes durchgeführt, welcher eine Überlagerung mit anderen, an realen Bauwerken gleichzeitig wirkenden Effekten, ausschließt. Untersucht werden die zusätzlichen Beiträge des Koppeleffektes zu Systemsteifigkeit und zur Dämpfung.

Basierend auf den in Deutschland gültigen Normen werden Modellierungsvereinfachungen hergeleitet. Die Herleitung einer horizontalen Ersatzfedersteifigkeit zur Abbildung des Einspanneffektes von über die Brückenenden hinauslaufenden Gleisen ermöglicht eine signifikante Reduzierung von Modellierungsaufwand und Berechnungsdauer. Zur vereinfachten Berechnung von gelenkig gelagerten, balkenartigen Einfeldträgerbrücken mit konstanter Steifigkeits- und Masseverteilung werden die, in der Schienenebene wirkenden, horizontalen Ersatzfedern in Drehfedern an den Auflagern umgewandelt.

Das so entstandene Balkensystem mit Drehfedern an den Auflagern wird anschließend in ein äquivalentes Einmassensystem überführt. Mit den entwickelten

Formeln lässt sich nun direkt die erste Biegeeigenfrequenz n_0 unter Berücksichtigung der Einspannwirkung der Gleise analytisch berechnen. Für den Anwender ergibt sich so die Möglichkeit, ohne numerisches Brückenmodell eine vereinfachte Überprüfung des Resonanzrisikos unter Berücksichtigung der Einspannwirkung der Gleise durchzuführen, bei der n_0 den normativ geregelten Grenzwerten gegenübergestellt wird. Kann Resonanz ausgeschlossen werden, so ist bei Überfahrtsgeschwindigkeiten bis 200 km/h im typischen Anwendungsbereich der WiB-Brücken (Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m) eine Bemessung anhand statischer Ersatzlastmodelle ausreichend.

Kann Resonanz nicht vereinfacht ausgeschlossen werden oder generell bei Überfahrtsgeschwindigkeiten über 200 km/h, müssen dynamische Berechnungen zur Simulation von Überfahrten aller auf der Brücke vorgesehenen Zugtypen durchgeführt und ausgewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu Berechnungstools entwickelt, die anhand äquivalenter Einmassensysteme die automatisierte Simulation einer Vielzahl von Zugüberfahrten in sehr kurzer Zeit unter Berücksichtigung der Einspannwirkung der Gleise ermöglichen. Zur Beschreibung der Brücke werden lediglich die Eingabeparameter Biegesteifigkeit, Masse, Stützweite, die im Rahmen der Arbeit hergeleitete Drehfedersteifigkeit an den Auflagern und die nach Norm anzusetzende Dämpfung benötigt. Auch hier ergibt sich eine signifikante Reduzierung des Modellierungs- und Berechnungsaufwandes, verglichen mit herkömmlicher Berechnungssoftware.

Summary

Filler beam railway bridges have many advantages. They are durable, can feature high slenderness and require only a small amount of framework material during construction. They are usually constructed as simply supported beams, i.e. their high slenderness can also be in some respects disadvantageous. Calculated eigenfrequencies are often relatively small, thus leading to anticipation of resonance effects already at low crossing velocities induced by equally spaced axle loads. Measurements have repeatedly shown though, that filler beam bridges behave much better in reality than predicted by calculations. The anticipated resonance effects occur eventually at much higher crossing velocities than predicted.

The sometimes significantly high differences between measurements and calculations have been generally noticed before and are affiliated with additional contributions of non-structural elements to system stiffness and damping, e.g. the contributions of ballast, tracks, sleepers or edge caps.

The thesis at hand presents a detailed examination of the contributions of individual parameters influencing the dynamic behavior of filler beam bridges. The examination aims at separating parameters, which can be clearly identified and isolated from other effects and thus could be considered in design, from those parameters, that require further extensive research.

Experimental tests regarding interaction effects between bridge decks, which are separated by longitudinal gaps but share a ballast bed, are performed with a newly developed test set up. This set up eliminates effects, which occur simultaneously with the interaction effects on real bridges. The contribution of the interaction effects to stiffness and damping are tested.

Based on German codes, modelling simplifications are derived. The derivation of a horizontal equivalent spring stiffness, representing restraining effects of railway tracks exceeding bridges, enables a significant reduction of modelling effort and computational time. The equivalent horizontal spring, which is effective in the centroidal axis of the track, is afterwards converted into an equivalent rotational spring, which can be applied at the hinges of simple beam models, thus simplifying the design of simple span bridges.

The developed beam system with rotational springs is then converted into an equivalent single degree of freedom (SDOF) system. With the derived analytical formulas, the fundamental frequency n_0 can directly be calculated considering the restraining effects of tracks. Users can now include the restraining effects of tracks into a simplified estimation of resonance risks, where n_0 is compared to limiting values given by the codes. If resonance can be ruled out and crossing velocities are 200 km/h (56 m/s) at most, the dynamic design of single span bridges with spans up to 40 m (thus the scope of application of filler beam bridges) can be performed with equivalent static loads only.

If resonance cannot be ruled out using the simplified approach, or, if crossing velocities are above 200 km/h (56 m/s), dynamic simulations have to be performed considering all train types designated for the bridge in question. The results of all simulations then have to be interpreted. In scope of the presented thesis, computation tools using SDOFs are programmed, which enable automated simulations of large numbers of train crossings in a short time, including the restraining effects of tracks. The tool requires only the input parameters bending stiffness, mass, span length, the rotational spring stiffness just derived in this thesis and a damping ratio provided by the codes. This again leads to a significant reduction of modelling effort and computation time compared to conventional calculation software.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur und Symbole	1
1 Einleitung	7
1.1 Motivation	7
1.2 Zielsetzung	9
1.3 Vorgehen	10
2 Dynamisches Verhalten von Eisenbahnbrücken	11
2.1 Bemessung und Modellierung von Eisenbahnbrücken	11
2.1.1 Vereinfachte Verfahren	11
2.1.2 Dynamische Berechnung und Modellierung	15
2.1.3 Erforderliche spezielle Nachweise	22
2.1.4 Numerische Verfahren/Berechnungsmethodik	26
2.1.5 Belastungscharakteristik durch überfahrende Züge	44
2.1.6 Reduzierung des Aufwandes für dynamische Berechnungen	48
2.2 Gegenüberstellung Berechnung und Messung	50
2.2.1 Gegenüberstellung reales System und Berechnungsmodell	50
2.2.2 Auswertungsmethoden Messdaten	50
3 Einflussfaktoren auf das dynamische Verhalten von Eisenbahnbrücken	54
3.1 Temperatur und Witterungsbedingungen	54
3.2 Statisches System und Interaktion Brückenparameter	55
3.3 Tragwerksmodellierung	56
3.4 Lagerbedingungen bei Elastomerlagern	59
3.5 Eisenbahnschienen	59
3.6 Walzträger in Beton (WiB-) Überbau	60

3.7	Randkappen	66
3.8	Schotteroberbau	69
3.8.1	Biegesteifigkeit und Dämpfung	70
3.8.2	Koppeleffekt Zwillingsbrücken	73
4	Experimentelle Untersuchungen zum Koppeleffekt	76
4.1	Vorüberlegungen	76
4.2	Versuche	77
4.2.1	Voruntersuchungen der Brücke (ohne Koppeleffekt)	79
4.2.2	Brücke mit vollständigem Schotterbett (Koppeleffekt)	88
4.3	Ausblick auf zukünftige Versuche	110
4.3.1	Erste Ergebnisse	111
5	Modellentwicklung für die vereinfachte Bemessung	113
5.1	Modellentwicklung äquivalentes Einmassensystem für Überfahrtssimulationen	113
5.2	Berücksichtigung zusätzlicher Biegesteifigkeiten	120
5.2.1	Allgemeines	120
5.2.2	Beitrag der Gleise zu Biege- und Dehnsteifigkeit	121
5.3	Modellentwicklung zur Berücksichtigung zusätzlicher Systemsteifigkeiten	123
5.3.1	Systemveränderung durch Einspannwirkung der Gleise	123
5.3.2	Entwicklung linearer Ersatzfedersteifigkeiten	125
5.3.3	Modellentwicklung äquivalentes Einmassensystem zur Ermittlung der ersten Biegeeigenfrequenz n_0	131
5.3.4	Modellentwicklung äquivalentes Einmassensystem für Überfahrtssimulationen unter Berücksichtigung der Einspannwirkung	137
5.3.5	Modellentwicklung zur Bestimmung weiterer Systemgrößen	144

5.3.6	Betrachtung höherer Moden	151
5.4	Modellentwicklung für Systeme mit veränderlichen Steifigkeiten und Dämpfungen	155
5.4.1	Entwicklung Nicht-linearer Ersatzfedersteifigkeiten	155
5.4.2	Simulation von Zugüberfahrten auf veränderlichen Systemen	159
5.5	Ausblick: Berücksichtigung Koppeleffekt bei Zwillingenbrücken	168
6	Zusammenfassung Berechnungsablauf	172
6.1	Ermittlung Systemeingangsparameter	172
6.2	Berechnungen und Ergebnisverwertung	173
6.2.1	Ermittlung Biegeeigenfrequenzen	173
6.2.2	Simulation von Zugüberfahrten	174
7	Zusammenfassung und Ausblick	176
8	Literaturverzeichnis	180
Anhang A	Schienen	I
A.1	Lineare Ersatzfedersteifigkeiten	I
A.2	Nicht-lineare Federcharakteristiken	X
Anhang B	Matlab Codes	XIII
B.1	Ermittlung Biegeeigenfrequenzen und Formen	XIII
B.2	lineare Ersatzfedersteifigkeiten „Bahndamm“	XIII
B.3	nicht-lineare Ersatzfedersteifigkeiten „Bahndamm“	XVI
B.4	Einmassensystem ohne c_φ	XXIII
B.5	Einmassensystem mit c_φ (konstant)	XXV
B.6	Einmassensystem mit c_φ (variabel)	XXIX