

**Simple Models for Including the Vehicle-Bridge Interaction in
Dynamic Analyses of Railway Bridges**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

Dissertation

**Einfache Modelle zur Erfassung der Fahrzeug-Brücken-Interaktion
im Rahmen dynamischer Berechnungen von Eisenbahnbrücken**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Dipl.-Ing. Bernhard Glatz

Matrikelnummer 00825329
Karajangasse 12/6, 1200 Wien

Betreuer: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink
Institut für Tragkonstruktionen – Forschungsbereich Stahlbau
TU Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien

Gutachter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Adam
Institut für Grundlagen der Technischen Wissenschaften – Arbeitsbereich für
Angewandte Mechanik
Universität Innsbruck, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck

Gutachter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Heuer
Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik – Forschungsbereich
Strukturdynamik und Risikobewertung von Tragwerken
TU Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien

Wien, April 2021

Kurzfassung

Die dynamische Berechnung ist seit einigen Jahrzehnten ein wesentlicher Bestandteil der Bemessung von neuen und Bewertung von bestehenden Eisenbahnbrücken im Hochgeschwindigkeitsverkehr. Die überfahrenden Züge können dabei vereinfacht als Abfolge von bewegten Einzellasten oder realitätsnah als schwingungsfähige Mehrkörpersysteme modelliert werden.

Diese Dissertation behandelt die Auswirkungen der Fahrzeugmodellierung auf die Tragwerksantwort von gelenkig gelagerten Einfeldträgerbrücken. Anhand ausgedehnter Vergleichsberechnungen wird der quantitative Nutzen von Mehrkörpermodellberechnungen im Vergleich zu vereinfachten Einzellastmodellen verschiedener Zugtypen aufgezeigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) in Mehrkörpermodellberechnungen in vielen Fällen für eine Reduktion der maximalen Tragwerksantwort sorgt. Die vereinfachte Berücksichtigung dieses Effekts in Einzellastmodellen durch die Zusatzdämpfung gemäß Eurocode 1 führt hingegen oftmals zu nichtkonservativen Ergebnissen. In dieser Dissertation wird deshalb eine alternative, konservative Festlegung für die Zusatzdämpfung erarbeitet, welche die Abhängigkeit der FBI von der Brückengrundfrequenz, der Brückenmasse und des Zugtyps widerspiegelt.

Keywords: Brückendynamik, Zusatzdämpfung, Fahrzeug-Brücken-Interaktion, Einzellastmodell, Mehrkörpermodell, Hochgeschwindigkeitsverkehr.

Abstract

In recent years, the dynamic analysis has been an essential part in the design phase of new and in the evaluation of existing high-speed railway bridges. The trains can be modelled in a simplified manner as a sequence of moving loads or more realistically as multi-body systems.

This thesis deals with the impact of the train models on the dynamic response of simply supported bridges. Based on extensive dynamic computations, the benefit of using multi-body systems compared to simplified moving load models is evaluated for various train types.

The results show that vehicle-bridge interaction (VBI) effects in multi-body models tend to reduce the maximum bridge response. However, the simplified consideration of this effect in moving load models using the additional damping method as integrated in the Eurocode yields non-conservative results in many cases. Therefore, this thesis presents an alternative and conservative approach to the additional damping method, which includes the dependencies of the VBI on the bridge fundamental frequency, the bridge mass and the train type.

Keywords: bridge dynamics, additional damping, vehicle-bridge-interaction, Moving Load Model, Detailed Interaction Model, high-speed railways.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grenzkriterien/Nachweise.....	2
1.2	Dynamische Rechenmodelle.....	3
1.2.1	Eigenschaften des Brückenbalkens	3
1.2.2	Einzellastmodell	6
1.2.3	Mehrkörpermodell.....	7
1.2.4	Numerische Integration der Bewegungsgleichungen	10
1.2.5	Tragwerksdämpfung	12
1.3	Fahrzeug-Brücken-Interaktion.....	14
1.4	Ergebnisauswertung dynamischer Berechnungen.....	15
1.4.1	Resonanzbedingungen und Aufhebungseffekte	15
1.4.2	Geschwindigkeitsbereich und Beschleunigungspeaks.....	17
1.4.3	Beschränkung auf die Brückenmitte	19
1.4.4	Einfluss von Triebfahrzeugen/Lokomotiven	20
1.4.5	Zuglasten.....	20
1.5	Einflussparameter auf die Fahrzeug-Brücken-Interaktion	22
1.6	Forschungsfragen.....	25
1.7	Zusammenfassung der wissenschaftlichen Aufsätze	26
1.7.1	Publikation 1.....	26
1.7.2	Publikation 2.....	27
1.7.3	Publikation 3.....	28
1.7.4	Publikation 4.....	29
1.8	Wissenschaftlicher Beitrag dieser Dissertation.....	29
1.9	Schlussfolgerungen.....	31
1.10	Ausblick und mögliche weitere Forschungsthemen.....	31
2	Wissenschaftliche Aufsätze.....	35
2.1	Publikation 1.....	35
2.2	Publikation 2	35
2.3	Publikation 3	35
2.4	Publikation 4.....	35
	Literatur.....	36

1 Einleitung

Die Europäische Union verfolgt das Ziel, den Anteil der mit der Eisenbahn beförderten Güter und Personen am gesamten Transport- und Mobilitätsaufkommen innerhalb Europas zu erhöhen. Speziell der Ausbau von Strecken für den Hochgeschwindigkeitsverkehr soll die Attraktivität der Eisenbahn erhöhen, sodass Distanzen bis etwa 800 km im Personenverkehr schneller mit dem Zug zurückgelegt werden können, als mit dem Flugzeug [1]. Die Voraussetzung für den sicheren Betrieb von Hochgeschwindigkeitszügen ist die Bereitstellung der entsprechenden Infrastruktur, an die im Vergleich zu konventionellen Eisenbahnstrecken erhöhte Anforderungen gestellt werden. Unter anderem sind niveaugleiche Bahnübergänge an Hochgeschwindigkeitsstrecken unzulässig, weshalb Eisenbahnbrücken einen unerlässlichen Bestandteil solcher Strecken bilden. Für Brückentragwerke steigt mit höherer Überfahrtsgeschwindigkeit von Eisenbahnzügen die Gefahr, dass übermäßige Schwingungen durch Resonanzeffekte ausgelöst werden können. Tradierte Nachweismodelle, die auf statischen Berechnungen beruhen, können diese Schwingungsproblematik von Eisenbahnbrücken im Resonanzbereich nicht erfassen, weshalb in vielen Fällen sowohl im Eurocode [2], als auch in Regelwerken der Bahnbetreiber (für Österreich in [3]) die Durchführung einer dynamischen Berechnung vorgeschrieben wird.

Um die Zugüberfahrt über eine Eisenbahnbrücke mathematisch erfassen zu können, muss die reale Situation durch geeignete Methoden der Diskretisierung in ein Rechenmodell übergeführt werden. Der Grad der Vereinfachungen, der im Rahmen der Diskretisierung für das jeweilige Rechenmodell gewählt wird, hängt unter anderem von der Art des Tragwerks, der gewünschten Ergebnisgenauigkeit und dem Zweck der dynamischen Berechnung ab. *Salcher* und *Adam* wählen in [4] beispielsweise ein dreidimensionales finite-Elemente (FE) Modell zur Erfassung einer Eisenbahnbrücke, das die Eigenschaften der Tragkonstruktion, des Schotteroberbaues, der Schwellen und der Schienen nachbildet. Der überfahrende Zug wird in [4] aus massebehafteten Starrkörpern modelliert, die ebenfalls dreidimensional mit linearen Feder- und viskosen Dämpferelementen verbunden sind. Solche komplexen Modelle eignen sich aufgrund des hohen Berechnungsaufwandes für die detaillierte dynamische Analyse einzelner Tragwerke, die beispielsweise im Zuge von Neubauten oder in der Forschung von Interesse sein kann.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für die dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken ist die Bewertung des Brückenbestands von Hochgeschwindigkeitsstrecken im Rahmen von Neuzulassungen von Zügen, welche nicht durch die Hochgeschwindigkeitslastmodelle (High Speed Load Model – HSLM) des Eurocodes [2] abgedeckt werden. In Österreich wurden zu diesem Zweck in den letzten Jahren hunderte Brücken einer dynamischen Berechnung für die Überfahrt des ÖBB Railjet und des ICE-4 unterzogen. In einer ersten Betrachtung kommen dafür in der Regel vereinfachte, zweidimensionale Modelle zum Einsatz, wobei die Tragwerke als Biegebalken und die überfahrenden Züge als Folge von Einzellasten modelliert werden. Solche Modelle sind in der Ingenieurpraxis aufgrund ihres vergleichsweise geringen Modellierungsaufwands, der Verfügbarkeit von kommerziellen Softwarepaketen und dem Einklang mit Berechnungsnormen [2], [3] weit verbreitet.

1.1 Grenzkriterien/Nachweise

Generell sind dynamische Berechnungen gemäß Eurocode [2] für Geschwindigkeiten über 200 km/h oder für Brücken, deren Grundfrequenzen gewisse Grenzen unterschreiten, durchzuführen. Die Notwendigkeit einer dynamischen Berechnung kann anhand eines Flussdiagramms in [2] beurteilt werden.

Sofern eine dynamische Berechnung der Zugüberfahrt erforderlich ist, wird die Begrenzung der vertikalen Oberbaubeschleunigung in vielen Fällen zum maßgebenden Kriterium. Als mögliche Folgen von zu hohen Vertikalbeschleunigungen beschreiben *Arvidsson* und *Karoumi* [5] die Beeinträchtigung der Gleisstabilität und der Gleislage, was zu erhöhten Instandhaltungsmaßnahmen führt, bis hin zur potentiellen Entgleisungsgefahr. Die Grenzwerte sind im Eurocode [6] mit $3,5 \text{ m/s}^2$ für Brücken mit Schotteroberbau und 5 m/s^2 für Brücken mit direkt befestigten Gleisen (feste Fahrbahn) festgelegt. Die Grundlage für diese Grenzwerte liefern Untersuchungen des European Rail Research Institutes (ERRI) aus [7], in denen der Verlust der Schotterverzahnung bei Beschleunigungen ab etwa $0,7 \text{ g}$ festgestellt wurde. Ein gewählter Sicherheitsfaktor von 2 führt auf den Grenzwert von $3,5 \text{ m/s}^2$ für Brücken mit Schotteroberbau [5]. Die österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) erlauben für den Nachweis der vertikalen Beschleunigung des Brückendecks von Bestandsbrücken mit gutem Erhaltungszustand einen erhöhten Grenzwert von 6 m/s^2 bei Schotteroberbau und 8 m/s^2 bei direkter Befestigung bzw. fester Fahrbahn [3].

Für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Ergebnisse aus dynamischen Berechnungen noch mit Faktoren zu multiplizieren, die die gesteigerte dynamische Antwort im Vergleich zu einer gleich großen statischen Belastung sowie Gleisstörungen und Fahrzeugimperfectionen berücksichtigen [3].

Weitere Gebrauchstauglichkeitsnachweise beschränken den Endtangentialwinkel im Auflagerbereich und die Vertikalbeschleunigung der Wagenkästen. Letzteres ist ein Kriterium für den Reisendenkomfort, wofür die Beschleunigungen entweder direkt im Zuge einer dynamischen Mehrkörpermodellrechnung bestimmt oder indirekt durch eine Beschränkung der maximalen Durchbiegungen des Brückendecks nachgewiesen werden [5].

1.2 Dynamische Rechenmodelle

Alle Berechnungen für die nachfolgenden Publikationen wurden an zweidimensionalen Modellen durchgeführt. Dabei wurden ausschließlich gelenkig gelagerte Einfeldträgerbrücken betrachtet, die als Bernoulli-Euler Balken modelliert sind. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die angewandte Modellierungsstrategie gegeben.

1.2.1 Eigenschaften des Brückenbalkens

In den nachfolgenden Publikationen werden die betrachteten Brückentragwerke ausschließlich als gelenkig gelagerte Bernoulli-Euler Balken (BEB) modelliert (siehe Abbildung 1). In den vertikalen Verschiebungen $w(x,t)$ des Balkens werden die Schubdeformationen vernachlässigt, wodurch hinreichend genaue Ergebnisse nur für schlanke Balken mit kleinen Durchbiegungen zu erwarten sind [8].

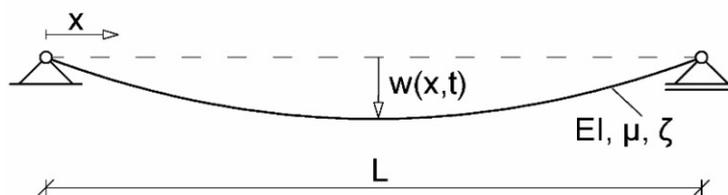


Abbildung 1: Bernoulli-Euler Balken

Die für dynamische Berechnungen wesentlichen Eigenschaften der Brücken für die gewählte Modellierungsstrategie sind die Spannweite L , die Biegesteifigkeit EI , die Massenbelegung μ und das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ . Bei Brücken mit Schotteroberbau wird die Schotteroberbaumasse in der Brückenmasse berücksichtigt, darüber hinaus werden dem

Schotterbett jedoch keine dynamischen Eigenschaften zugeschrieben. Die Eigenkreisfrequenzen ω_j des ungedämpften, gelenkig gelagerten BEB können in Abhängigkeit von L , EI und μ ausgedrückt werden [9]:

$$\omega_j = \left(\frac{j\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad \text{mit } j = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Die gedämpften Eigenkreisfrequenzen $\omega_{D,j}$ lassen sich für unterkritisch gedämpfte Systeme in Abhängigkeit der Lehr'schen Dämpfung aus ω_j bestimmen [10]:

$$\omega_{D,j} = \omega_j \sqrt{1 - \zeta_j^2} \quad (2)$$

Da das Lehr'sche Dämpfungsmaß für reale Brückentragwerke üblicherweise kleine Werte annimmt ($\zeta_j < 0,1$), ist der Unterschied zwischen gedämpfter und ungedämpfter Eigenkreisfrequenz vernachlässigbar, sodass gilt: $\omega_{D,j} \approx \omega_j$. Die Grundfrequenz (erste Biegeeigenfrequenz) wird üblicherweise mit n_0 bezeichnet und folgt für $j=1$ aus Gl. (1) zu:

$$n_0 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad (3)$$

Die Bewegungsgleichung des massebehafteten, gedämpften BEB lautet [9]

$$\mu \ddot{w}(x, t) + 2\zeta_j \mu \omega_j \dot{w}(x, t) + EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = f(x, t) \quad (4)$$

wobei $f(x, t)$ die zeitabhängigen Vertikallasten für den BEB, x die Stabachsenkoordinate und t die Zeit bezeichnet. Die Diskretisierung des Balkens erfolgt durch die Methode der generalisierten Verschiebungen [10], wobei ein Bernoulli'scher Separationsansatz

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^n q_j(t) \phi_j(x) \quad (5)$$

zur Formulierung der vertikalen Verschiebungen gewählt wird. In Gl. (5) bezeichnet $q_j(t)$ die generalisierten Verschiebungen, $\phi_j(x)$ die Ansatzfunktionen und n die Anzahl der berücksichtigten Ansatzfunktionen. Werden die Eigenfunktionen des gelenkig gelagerten BEB [9]

$$\phi_j(x) = \sin\left(\frac{j\pi x}{L}\right) \quad (6)$$

als Ansatzfunktionen in Gl. (5) verwendet, entkoppelt die Bewegungsgleichung des BEB nach dem Einsetzen des Lösungsansatzes aus Gl. (5) in Gl. (4) in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen. Das erhaltene modale Gleichungssystem für den BEB lautet nach Übergang auf Matrix-Schreibweise

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{Z}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{P} \quad (7)$$

wobei \mathbf{M} , \mathbf{Z} und \mathbf{K} die modalen Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen bezeichnen; $\ddot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{q}}$ und \mathbf{q} sind die Vektoren der generalisierten Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Verschiebungen des BEB und \mathbf{P} ist der Lastvektor. Die Zusammensetzung der Matrizen aus Gl. (7) wird in [11] ausführlich beschrieben und daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Der Aufbau des Lastvektors wird in den Kapiteln 1.2.2 und 1.2.3 zu den entsprechenden Zugmodellen behandelt.

Rayleigh'sche Dämpfung

In der modalen Bewegungsgleichung (7) kann prinzipiell für jede Schwingungsform ein eigener Wert des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ_j angesetzt werden. Für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wurde die Rayleigh'sche Dämpfung angewandt, wobei der ersten und der zweiten Schwingungseigenform der Nominalwert der Lehr'schen Dämpfung des Balkens zugeordnet wurde. Als Nominalwert der Lehr'schen Dämpfung wird entweder die Strukturdämpfung gemäß Eurocode (siehe Tabelle 1) oder ein messtechnisch ermittelter Dämpfungswert herangezogen. Die Lehr'sche Dämpfung für die höheren Eigenformen wird in Abhängigkeit der Massen- und Steifigkeitsmatrix des Balkens ermittelt und steigt mit zunehmender Eigenfrequenz. Die genaue Formulierung der Rayleigh'schen Dämpfung ist in [12] dokumentiert und für den schwingenden BEB in [11] spezialisiert. Die zunehmende Dämpfung für höhere Eigenformen steht gemäß [12] im Einklang mit experimentellen Daten. *Stollwitzer* und *Fink* [13] bestätigen anhand einer Versuchsanlage, dass der Schotteroberbau mit zunehmender Anregungsfrequenz einen höheren Beitrag zur Tragwerksdämpfung liefert.

1.2.2 Einzellastmodell

Im Einzellastmodell (ELM, engl.: Moving Load Model) werden die überfahrenden Züge als Folge von bewegten Lasten betrachtet, die den jeweiligen Achslasten F_i der Fahrzeuge entsprechen (siehe Abbildung 2).

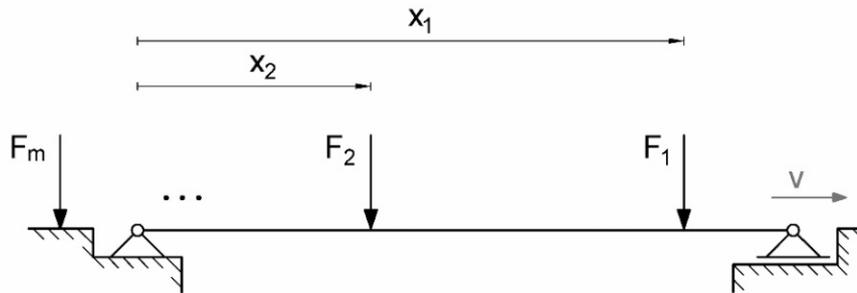


Abbildung 2: Einzellastmodell (ELM)

Der Lastvektor aus Gl. (7) nimmt für das ELM die folgende Form an:

$$P_{ELM} = \sum_{i=1}^m F_i \Gamma_i(x_i) \phi(x_i) \quad (8)$$

In Gl. (8) sind x_i die Positionen der Achslasten F_i auf der Brücke, m ist die Anzahl der Achslasten, ϕ ist der Spaltenvektor der Eigenfunktionen und Γ_i ist eine Rechteckfunktion, die den Wert 1 für jene Lasten annimmt, die sich zum betrachteten Zeitpunkt auf der Brücke befinden und den Wert 0 für die sonstigen Lasten.

Lastverteilung in Längsrichtung

Um die lastverteilende Wirkung des Schotterbetts in Längsrichtung der Brücke zu berücksichtigen, kann eine Einzellast gemäß Eurocode nach Abbildung 3 aufgeteilt werden. Der Schwellenabstand a beträgt in Österreich üblicherweise 0,6 m.

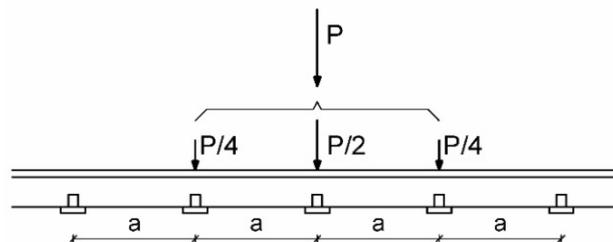


Abbildung 3: Lastverteilung [2]

Der Einfluss dieser Lastverteilung auf die Ergebnisse von dynamischen Berechnungen wird in Publikation 1 (Kapitel 1.7) untersucht, in allen weiteren Studien dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt.

1.2.3 Mehrkörpermodell

Im Mehrkörpermodell (MKM, engl.: Detailed Interaction Model) werden die Züge aus starren Körpern nachgebildet, die über lineare Federn und viskose Dämpferelemente interagieren. Die Primärstufe (Steifigkeit k_1 und Dämpfungskoeffizient c_1) verbindet die Radsätze (Masse m_R) mit den Drehgestellen (Masse m_D und Rotationsträgheit I_D), die Sekundärstufe (Steifigkeit k_2 und Dämpfungskoeffizient c_2) verbindet die Drehgestelle und Wagenkästen (Masse m_W und Rotationsträgheit I_W). Das Mehrkörpermodell für einen herkömmlichen Zug mit zwei Laufdrehgestellen pro Wagenkasten ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Geometrie des Zuges wird über die Wagenlänge d , den Abstand zwischen den Drehgestellen r und den Radsatzabstand b definiert.

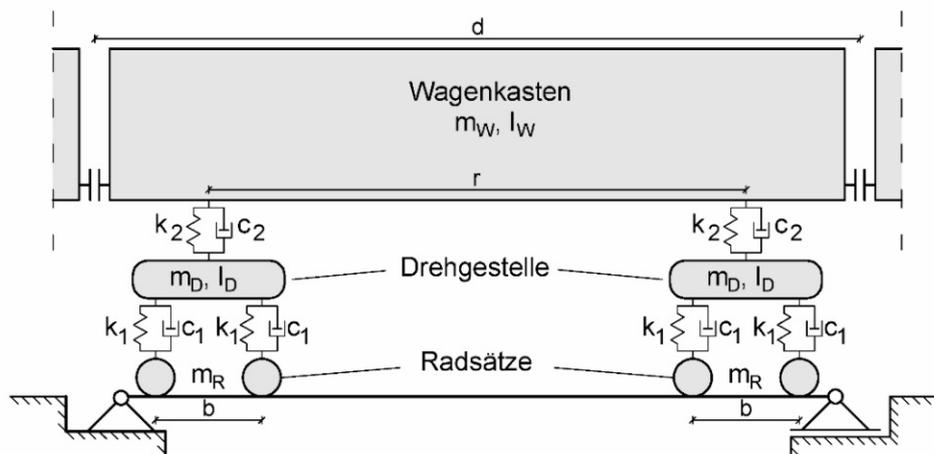


Abbildung 4: Mehrkörpermodell (MKM) herkömmlicher Zug

Für herkömmliche Züge wird üblicherweise die Annahme getroffen, dass sich jeder Wagenkasten in vertikaler Richtung frei bewegen kann, ohne die benachbarten Wagenkästen zu beeinflussen.

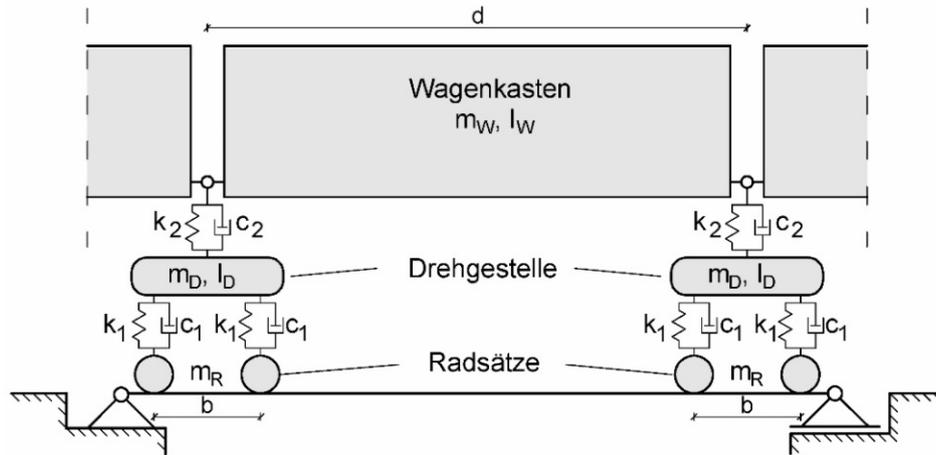


Abbildung 5: Mehrkörpermodell (MKM) Gelenkszug

Eine zweite gängige Bauart im Hochgeschwindigkeits-Personenverkehr sind Gelenkszüge, bei denen sich benachbarte Wagenkästen ein gemeinsames Jakobsdrehgestell teilen (siehe Abbildung 5). Die vertikalen Verschiebungen zweier Wagenkästen im Gelenkspunkt über den Drehgestellen sind für diese Bauart aneinander gekoppelt.

Die Bewegungsgleichung für die überfahrenden Fahrzeuge kann in der Form

$$\mathbf{M}_F \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{Z}_F \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_F \mathbf{u} = -\mathbf{F}_w - \mathbf{F}_{\dot{w}} \quad (9)$$

angeschrieben werden [11]. In Gl. (9) bezeichnet \mathbf{M}_F , \mathbf{Z}_F und \mathbf{K}_F die Massen-, Dämpfungs- bzw. Steifigkeitsmatrix des Fahrzeugs, die Vektoren \mathbf{F}_w und $\mathbf{F}_{\dot{w}}$ enthalten die Feder- und Dämpferkräfte der Primärstufe, der Vektor \mathbf{u} enthält die Verschiebungen und Rotationen der Drehgestelle und Wagenkästen und die Vektoren $\ddot{\mathbf{u}}$ und $\dot{\mathbf{u}}$ enthalten die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsgrößen der Drehgestelle und Wagenkästen. Die Herleitung der Bewegungsgleichung (9) basiert auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen, das für die Vertikaldynamik von Schienenfahrzeugen in [14] angeschrieben ist. Die Zusammensetzung der Matrizen und Vektoren aus Gl. (9) ist detailliert in [11] beschrieben, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

Die Bewegungsgleichungen für den Brückenbalken (4) und für die Fahrzeuge (9) sind durch die Annahme von ständigem Kontakt zwischen Radsätzen und Schiene aneinander gekoppelt. Ein mögliches Abheben der Radsätze von der Schiene wird somit aus dem Berechnungsmodell ausgeschlossen. Im Kontaktpunkt zwischen Radsätzen und dem Brückenbalken wirken

während einer Zugüberfahrt zeitabhängige Kontaktkräfte F_{kon} , die am freigeschnittenen Radsatz (siehe Abbildung 6) erkennbar werden.

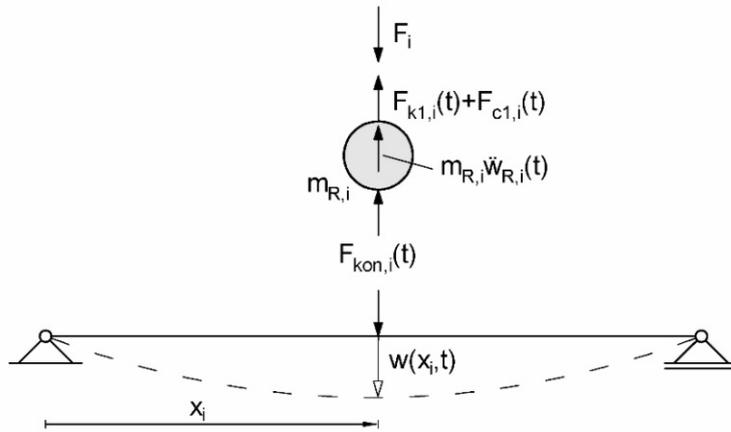


Abbildung 6: Kräfte am freigeschnittenen Radsatz

Die Formulierung des dynamischen Gleichgewichts für den i -ten Radsatz aus Abbildung 6 führt auf

$$F_{kon,i}(t) = F_i - F_{k1,i}(t) - F_{c1,i}(t) - m_{R,i} \ddot{w}(x_i, t) \quad (10)$$

wobei F_i die statische Achslast, $F_{k1,i}$ die primäre Federkraft, $F_{c1,i}$ die primäre Dämpferkraft und $m_{R,i} \ddot{w}(x_i)$ die Trägheitskraft bezeichnet. In Gl. (10) wurde berücksichtigt, dass die Vertikalbeschleunigung des Radsatzes wegen der Annahme des ständigen Kontakts zur Schiene durch die Vertikalbeschleunigung des Brückenbalkens an der Kontaktstelle ausgedrückt werden kann ($\ddot{w}_{R,i} = \ddot{w}(x_i)$).

Als Belastung für den Brückenbalken treten bei der MKM-Berechnung diese Kontaktkräfte auf, sodass der Lastvektor als

$$\mathbf{P}_{MKM} = \sum_{i=1}^m [F_i - F_{k1,i}(t) - F_{c1,i}(t) - m_{R,i} \ddot{w}(x_i, t)] \Gamma_i(x_i) \phi(x_i) \quad (11)$$

geschrieben werden kann. Die vertikalen Brückenbeschleunigungen $\ddot{w}(x_i)$ können in generalisierter Form durch die zweite Zeitableitung des Separationsansatzes aus Gl. (5) ausgedrückt werden [9], [11]:

$$\ddot{w}(x_i, t) = \sum_{j=1}^n [\ddot{q}_j(t) \phi_j(x_i) + 2v \dot{q}_j(t) \phi_{j,x}(x_i) + v^2 q_j(t) \phi_{j,xx}(x_i)] \quad (12)$$

In Gl. (12) bezeichnen $\phi_{j,x}$ und $\phi_{j,xx}$ die ersten bzw. zweiten Ableitungen der Eigenfunktionen nach der Stabachsenkoordinate x ; v bezeichnet die Überfahrtsgeschwindigkeit. Das Ersetzen des Lastvektors in Gl. (4) durch \mathbf{P}_{MKM} führt unter Berücksichtigung der Gleichungen (11) u. (12) auf die Bewegungsgleichung des Brückenbalkens in der Form:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{Z}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \sum_{i=1}^m \{F_i - F_{k1,i}(t) - F_{c1,i}(t) - m_{w,i}[\phi(x_i)\ddot{\mathbf{q}} + 2v\phi_{,x}(x_i)\dot{\mathbf{q}} + v^2\phi_{,xx}(x)\mathbf{q}]\}\Gamma_i(x_i)\phi(x_i) \quad (13)$$

1.2.4 Numerische Integration der Bewegungsgleichungen

Die Bewegungsgleichungen für das Einzellastmodell (ELM) als auch für das Mehrkörpermodell (MKM) werden in der Software MATLAB [15] mithilfe des Solvers *ode113* numerisch integriert. Die detaillierte Beschreibung des Solvers *ode113*, der nach der *Adams-Bashforth-Moulton* Methode mit variablen Integrationszeitschritten arbeitet, ist in [16] zu finden. Da der Solver für gewöhnliche Differentialgleichungssysteme erster Ordnung (ODE steht für *ordinary differential equation*) konzipiert ist, müssen die beschreibenden Bewegungsgleichungen für das ELM und das MKM zunächst entsprechend aufbereitet werden. Die Vorgangsweise dazu wird in den folgenden zwei Abschnitten beschrieben.

Aufbereitung der Bewegungsgleichung für das Einzellastmodell (ELM)

Die Bewegungsgleichung für das ELM aus Gl. (7) wird durch Multiplikation mit der inversen Massenmatrix auf explizite Form gebracht. Unter Berücksichtigung von Gl. (8) ergibt sich daraus:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1} \left[\sum_{i=1}^m F_i \Gamma_i(x_i) \phi(x_i) - \mathbf{Z}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{K}\mathbf{q} \right] \quad (14)$$

In einem nächsten Schritt wird Gl. (14) in ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung transformiert, wobei die gesuchten Größen $\ddot{\mathbf{q}}$ durch neue Variablen ersetzt werden. Die genaue Vorgangsweise dieser Transformation ist in [17] dokumentiert und wird deshalb hier nicht näher ausgeführt. Das verbleibende Differentialgleichungssystem kann nun mit dem Solver *ode113* integriert werden.

Aufbereitung der Bewegungsgleichungen für das Mehrkörpermodell (MKM)

In der beschreibenden Bewegungsgleichung für den Brückenbalken aus Gl. (13) sind die gesuchten Variablen $\ddot{\mathbf{q}}$ gleichzeitig auch in den Belastungstermen auf der rechten Seite der Gleichung enthalten. Diese algebraische Schleife wird eliminiert, indem alle Terme, die in Gl. (13) mit $\ddot{\mathbf{q}}$ multipliziert werden, formal in einer modifizierten Massenmatrix \mathbf{M}_{mod} zusammengefasst werden [11]:

$$\mathbf{M}_{mod} \equiv \mathbf{M} + \sum_{i=1}^m m_{R,i} \Gamma(x_i) \boldsymbol{\phi}(x_i) \boldsymbol{\phi}^T(x_i) \quad (15)$$

Aus dieser Festlegung folgt der modifizierte Lastvektor \mathbf{P}_{mod} zu:

$$\mathbf{P}_{mod} \equiv \sum_{i=1}^m \{F_i - F_{k1,i}(t) - F_{c1,i}(t) - m_{w,i} [2v \boldsymbol{\phi}_{,x}(x_i) \dot{\mathbf{q}} + v^2 \boldsymbol{\phi}_{,xx}(x_i) \mathbf{q}]\} \Gamma_i(x_i) \boldsymbol{\phi}(x_i) \quad (16)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (15) u. (16) lässt sich die Bewegungsgleichung des Balkens für MKM Berechnung folgendermaßen anschreiben:

$$\mathbf{M}_{mod} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{Z} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{P}_{mod} \quad (17)$$

Um die Bewegungsgleichungen für den Balken und für die überfahrenden Fahrzeuge gemeinsam numerisch integrieren zu können, werden die Gleichungen (17) u. (9) zunächst in einem globalen Gleichungssystem zusammengefasst:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mod} & \emptyset \\ \emptyset & \mathbf{M}_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{u}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z} & \emptyset \\ \emptyset & \mathbf{Z}_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \emptyset \\ \emptyset & \mathbf{K}_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{mod} \\ -\mathbf{F}_w - \mathbf{F}_{\dot{w}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Die Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) bei MKM Berechnung kann aus Gl. (18) einerseits anhand des Vektors \mathbf{P}_{mod} nachvollzogen werden, der von den primären Feder- und Dämpferkräften und somit von den Verschiebungen \mathbf{u} und Geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{u}}$ der Fahrzeuge abhängig ist; andererseits sind die Lastterme der Fahrzeuge \mathbf{F}_w und $\mathbf{F}_{\dot{w}}$ vom Bewegungszustand der Radsätze abhängig, der durch die generalisierten Verschiebungen \mathbf{q} und Geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}}$ des Balkens ausgedrückt wird. Zur numerischen Integration mittels *ode113* wird das Gleichungssystem (18) zunächst auf die explizite Form

$$\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mod} & \emptyset \\ \emptyset & \mathbf{M}_V \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{mod} \\ -\mathbf{F}_w - \mathbf{F}_{\dot{w}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Z} & \emptyset \\ \emptyset & \mathbf{Z}_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{u} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \emptyset \\ \emptyset & \mathbf{K}_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ u \end{bmatrix} \right) \quad (19)$$

gebracht und anschließend auf ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung transformiert, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben. Das verbliebene Differentialgleichungssystem kann nun mithilfe des Solvers *ode113* integriert werden.

1.2.5 Tragwerksdämpfung

Die Dämpfung einer Eisenbahnbrücke reduziert die dynamische Tragwerksantwort und führt dazu, dass das Tragwerk bald nach einer erfolgten Zugüberfahrt wieder in seine statische Ruhelage zurückkehrt [9]. Die Ursachen für die Dämpfung können laut *Fryba* [9] einerseits in interne Mechanismen wie innere Reibung der Materialien während der Deformation, Materialinhomogenitäten, Einfluss der Rissbildung und andererseits in äußere Faktoren wie Reibung in den Brückenlagern, Reibung im Oberbau (speziell im Schotter), Reibung in den Verbindungsmitteln oder viskoelastische Untergrundeigenschaften eingeteilt werden. Eine treffsichere Aussage zur Dämpfung einer Eisenbahnbrücke kann aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren praktisch nur mittels Messung erfolgen, wobei auch dabei je nach Anregungsart und Auswertemethode eklatante Unterschiede auftreten können [18].

Strukturdämpfung gemäß Eurocode

Im Eurocode sind untere Grenzwerte der Tragwerksdämpfung definiert, die vom Brückentyp und der Spannweite abhängig sind (siehe Tabelle 1). Sofern keine Messdaten vorliegen (beispielsweise in der Planungsphase einer Brücke oder wenn eine Messung zu aufwändig ist), sind diese Dämpfungswerte anzuwenden.

Tabelle 1: Bei der Bemessung anzuwendende Dämpfungswerte [2]

Brückentyp	ζ unterer Grenzwert der kritischen Dämpfung [%]	
	Spannweite $L < 20$ m	Spannweite $L \geq 20$ m
Stahl und Verbund	$\zeta = 0,5 + 0,125(20 - L)$	$\zeta = 0,5$
Spannbeton	$\zeta = 1,0 + 0,125(20 - L)$	$\zeta = 1,0$
Walzträger in Beton (WIB) und Stahlbeton	$\zeta = 1,5 + 0,07(20 - L)$	$\zeta = 1,5$

Fryba [9] führt den Anstieg der Dämpfung für kürzere Spannweiten von $L < 20$ m darauf zurück, dass der Einfluss der Auflagerbedingungen und des durchgehenden Schotterbetts im Vergleich zur viskosen Dämpfung der Tragstruktur bei kürzerer Spannweite zunimmt und somit für eine größere Dämpfung sorgt.

Als Grundlage für die Dämpfungswerte nach Eurocode aus Tabelle 1 dient eine statistische Auswertung gemessener Dämpfungswerte von 24 Stahl-, 9 Beton-, 7 Verbund- und 14 WIB-Brücken, die im Jahr 1999 vom European Rail Research Institute (ERRI) [18] durchgeführt wurde. Aus heutiger Sicht scheint die Anzahl der Stichproben für diese Auswertung sehr gering zu sein, nachdem allein in Österreich mittlerweile eine vergleichbare Anzahl an Eisenbahnbrücken einer dynamischen Messung unterzogen wurden. Das Zusammenführen von Messdaten der Bahnbetreiber im europäischen Raum birgt das Potential für eine aktualisierte Datenbank, auf deren Grundlage aussagekräftigere statistische Auswertungen erstellt und somit möglicherweise weniger konservative Dämpfungswerte erzielt werden könnten.

Zusatzdämpfung

Sofern in der dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken ein Modell angewandt wird, das die Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) nicht berücksichtigt, darf gemäß Eurocode [2] eine Zusatzdämpfung $\Delta\zeta$ gemäß Gl. (20) bzw. Abbildung 7 angesetzt werden. Diese Zusatzdämpfung soll die gegenseitige Beeinflussung der schwingenden Massen des Fahrzeugs und der Brücke näherungsweise abbilden.

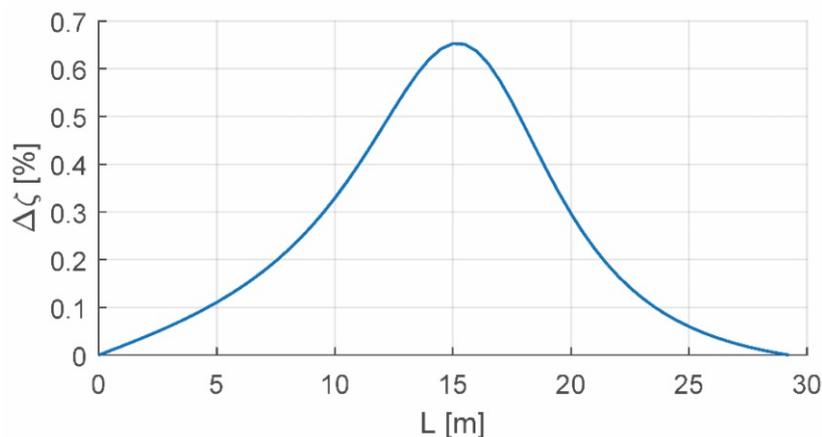


Abbildung 7: Zusatzdämpfung [2]

$$\Delta\zeta[\%] = \frac{0,0187L - 0,00064L^2}{1 - 0,0441L - 0,0044L^2 + 0,000255L^3} \quad (20)$$

Die Grundlagen zu dieser Definition der Zusatzdämpfung wurden ebenfalls vom ERRI erarbeitet und im Jahr 1999 in [19] dokumentiert. In der Literatur wird die Zusatzdämpfung in der derzeit gültigen Fassung vielfach diskutiert, wobei sich die Hauptkritikpunkte auf die mögliche Überschätzung der FBI [20], [21] und die Abhängigkeit der Zusatzdämpfung von der Spannweite [5], [20], [22] beziehen.

Die Publikationen 1, 2 und 4 dieser Dissertation liefern zahlreiche Beispiele für die nichtkonservative Festlegung der Zusatzdämpfung gemäß Eurocode.

Die Unzulänglichkeiten der zugrundeliegenden Untersuchungen für die Zusatzdämpfung gemäß Eurocode sind in Publikation 4 ausführlich thematisiert. Als Ergebnis dieser Publikation wird ein alternativer Vorschlag für die Festlegung einer konservativen Zusatzdämpfung präsentiert.

1.3 Fahrzeug-Brücken-Interaktion

Sobald die überfahrenden Züge mittels massebehafteter Körper modelliert werden, treten zeitabhängige Kontaktkräfte zwischen dem schwingenden Brückenbalken und den Fahrzeugen auf und es kommt zur Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI). Auf der Brücke befindliche Zugmassen erhöhen die Massenträgheit des Systems, wodurch sich die Eigenfrequenzen des Brückenbalkens temporär verringern und die Tragwerksantwort im Resonanzbereich reduziert wird [5].

In der Ingenieurpraxis bedeutet die Berücksichtigung der Fahrzeugmassen im Rechenmodell oftmals einen großen Mehraufwand. Abgesehen von den deutlich längeren Berechnungszeiten im Vergleich zu Einzellastmodellen wird die Modellierung wesentlich komplexer und die entsprechenden Zugdaten bzw. kommerzielle Softwarelösungen sind oftmals nicht verfügbar. Deshalb wurden in den letzten Jahrzehnten vielzählige Untersuchungen zur FBI angestellt, die Anhaltspunkte für den quantitativen Nutzen einer Mehrkörpermodellrechnung liefern. Solche Untersuchungen basieren oftmals auf dem Ergebnisvergleich zwischen Überfahrten des Einzellastmodells und des Mehrkörpermodells.

Im nachfolgenden Abschnitt 1.4 werden zunächst wesentliche Einflussfaktoren auf solche Ergebnisvergleiche behandelt, die im Zuge der Modellierung bzw. der Ergebnisauswertung

definiert werden müssen. Der Abschnitt 1.5 fasst wesentliche Erkenntnisse zur FBI ausgewählter Literaturquellen zusammen.

1.4 Ergebnisauswertung dynamischer Berechnungen

1.4.1 Resonanzbedingungen und Aufhebungseffekte

Für eine Folge von bewegten Achslasten mit regelmäßigen Abständen können kritische Geschwindigkeiten ermittelt werden, bei denen der Bernoulli-Euler-Balken (BEB) in Resonanz angeregt wird [5]:

$$v_{cr,n,k} = \frac{df_n}{k}, \quad n = 1,2,3, \dots \quad k = 1,2,3, \dots \quad (21)$$

In Gl. (21) bezeichnet v_{cr} die kritische Geschwindigkeit bzw. Resonanzgeschwindigkeit, f_n die Eigenfrequenzen des BEB, n die Nummer der Eigenfrequenz und d die charakteristische Distanz zwischen den Achslasten.

Für reale Züge sind die Abstände zwischen den Einzelachsen nicht konstant über die gesamte Zuglänge. Als charakteristische Distanz wird üblicherweise die Wagenlänge d (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5) herangezogen, womit der wiederkehrende Abstand der Lastgruppen für eine gewisse Anzahl an gleichen Reisezugwagen beschrieben wird. Weitere charakteristische Distanzen für einen realen Zug können auch die Abstände der Drehgestelle r innerhalb eines Wagens oder die Radsatzabstände b sein (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5).

Die primäre Resonanz ($k = 1$) für die Grundfrequenz des Balkens ($n = 1$) und die Wagenlänge d erzeugt oftmals die maximale Tragwerksantwort [5]. Die zugehörige kritische Geschwindigkeit liegt für Brücken mit kurzer und mittlerer Spannweite jedoch häufig jenseits des realistischen Geschwindigkeitsbereichs, weshalb auch Resonanzen höherer Ordnung ($k > 1$) maßgebend für die Ermittlung der maximalen Tragwerksantwort sein können. Speziell für kurze Brücken mit hohen Eigenfrequenzen kann die Zuordnung von Resonanzbedingungen zur maximalen Tragwerksantwort im betrachteten Geschwindigkeitsbereich jedoch schwierig werden. Dies kann auf drei mögliche Ursachen zurückgeführt werden:

1. Die Dominanz der kritischen Geschwindigkeiten für die Wagenlänge nimmt bei höherer Resonanzordnung ab. Bei Ordnung $k = 5$ durchläuft die Brücke beispielsweise fünf freie

Schwingungszyklen, bevor sie durch die nächste Lastgruppe erneut angeregt wird. Durch die Dämpfung klingen die Amplituden während den freien Schwingungszyklen ab, weshalb die Resonanzeffekte bei höherer Ordnung weniger stark ausgeprägt sind.

2. Die Resonanzgeschwindigkeiten verschiedener Ordnung für die Wagenlänge d , die Drehgestellabstände r und die Radsatzabstände b für Brücken mit hohen Eigenfrequenzen können knapp beisammen liegen und sich so gegenseitig überlagern. Eine eindeutige Zuordnung zu einem bestimmten Resonanzmechanismus ist in solchen Fällen kaum mehr möglich.
3. An Brücken mit geringer Gesamtmasse (i.d.R. kurze Brücken mit dementsprechend hohen Eigenfrequenzen) können nicht nur Resonanzeffekte, sondern auch die impulsartige Anregung schwerer Einzelachsen (z.B. der Lokomotive) maximale Tragwerksantworten im betrachteten Geschwindigkeitsbereich erzeugen.

Aufhebungseffekte

Bei der Überfahrt eines Zuges über den Brückenbalken kann es bei gewissen Geschwindigkeiten zu Aufhebungseffekten kommen, wobei das Auftreten einer Nachschwingung am ungedämpften System unterbunden wird [25]. Die Aufhebungsgeschwindigkeiten v_{can} (engl.: cancellation speed) sind unabhängig von den Zugeigenschaften und werden für gerade und ungerade Eigenformen gemäß *Xia et al.* [23] folgendermaßen berechnet:

$$v_{can,n,m} = \frac{2f_n L}{2m - 1}, \quad n = 1,3,5 \dots \quad m = 1,2,3, \dots \quad n \neq 2m - 1 \quad (22)$$

$$v_{can,n,m} = \frac{2f_n L}{2m}, \quad n = 2,4,6 \dots \quad m = 1,2,3, \dots \quad n \neq 2m \quad (23)$$

Yang et al. [24] zeigen, dass die Aufhebung stärker ist, als die Resonanz. Sofern also eine Aufhebungsgeschwindigkeit und eine Resonanzgeschwindigkeit zusammenfallen, wird die Nachschwingung dennoch unterdrückt. Darüber hinaus zeigt *Brandstetter* [25], dass die Aufhebungsgeschwindigkeit meist einen lokalen Tiefpunkt im Geschwindigkeitsverlauf verursacht.

Umgang mit kritischen Geschwindigkeiten in dieser Dissertation

Viele Studien zur Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) studieren die auftretenden Effekte ausschließlich für Resonanzbedingungen niedriger Ordnung (z.B. für $k = 1$ und $n = 1$ in [27] oder $k = \{1; 2\}$ und $n = 1$ in [21]). In der Arbeit des ERRI [19] wird lediglich darauf verwiesen, dass nur solche Ergebnisse verwendet wurden, für die eine „physikalische Resonanzbedingung“ vorlag, ohne deren Ordnung genauer zu definieren. Für die Ergebnisauswertung im Rahmen dieser Dissertation wird bewusst darauf verzichtet, nur die Resonanzbedingungen niedriger Ordnung zu analysieren. Dies hat folgende Gründe:

- Für Brücken mit kurzer Spannweite befinden sich die Resonanzgeschwindigkeiten niedriger Ordnung oftmals über der definierten Maximalgeschwindigkeit von 350 km/h (siehe z.B. Abbildung 8). Eine Beschränkung auf Resonanzen niedriger Ordnung lässt für solche Tragwerke somit keine Aussagen in Bezug auf die FBI zu.
- Die Zusatzdämpfung nach Eurocode (siehe Abschnitt 1.2.5) als Ergebnis von Studien zur FBI ist nicht an das Vorhandensein von Resonanzbedingungen geknüpft und wird daher in der Ingenieurpraxis auch ungeachtet dessen angewandt.

1.4.2 Geschwindigkeitsbereich und Beschleunigungspeaks

Für Nachweise an realen Brückentragwerken (mit Ausnahme der Überprüfung von Komfort- und Ermüdungskriterien) sind dynamische Berechnungen gemäß Eurocode [2] bis zur 1,2-fachen örtlich zulässigen Geschwindigkeit durchzuführen. Für die Publikationen aus dem Abschnitt 1.7 wurde die maximale Überfahrtsgeschwindigkeit in Anlehnung an die Arbeiten des ERRI [19] zu 350 km/h festgelegt. Eine solche Festlegung eines fixen Geschwindigkeitsbereichs kann in Vergleichsstudien zur Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) zu unerwünschten Ergebnisbeiträgen führen, was anhand einer fiktiven Brücke für die Überfahrt des ICE-2 in Abbildung 8 veranschaulicht wird.

Die maximalen Vertikalbeschleunigung im betrachteten Geschwindigkeitsbereich treten für die gewählte Brücke bei 350 km/h auf und betragen für das Einzellastmodell (ELM) $3,72 \text{ m/s}^2$ und für das Mehrkörpermodell (MKM) $4,50 \text{ m/s}^2$. Diese Werte sind für den Nachweis gegenüber der Grenzbeschleunigung laut Eurocode (vgl. Abschnitt 1.1) heranzuziehen. Gemäß dieser

Betrachtungsweise liefert die Berücksichtigung der FBI im MKM somit eine Erhöhung der maximalen Vertikalbeschleunigungen im Vergleich zum ELM.

In Studien zur FBI hingegen sollten die Effekte auf die Tragwerksantwort anhand von Beschleunigungspeaks beurteilt werden, weshalb ein Ergebnisvergleich zwischen ELM und MKM bei einer festen Geschwindigkeit (z.B. am Rand des gewählten Geschwindigkeitsbereichs) nicht zielführend ist. Durch eine Erweiterung des Geschwindigkeitsbereichs auf 400 km/h werden im gewählten Beispiel (siehe Abbildung 8) die Peaks für die dritte Resonanz der ersten Eigenform ($n = 1, k = 3$) und die Wagenlänge d sichtbar. Bei Betrachtung dieser Spitzenwerte führt die Berücksichtigung der FBI im MKM ($11,03 \text{ m/s}^2$ bei 375 km/h) zu einer Reduktion der maximalen Vertikalbeschleunigung im Vergleich zum ELM ($12,42 \text{ m/s}^2$ bei 381 km/h).

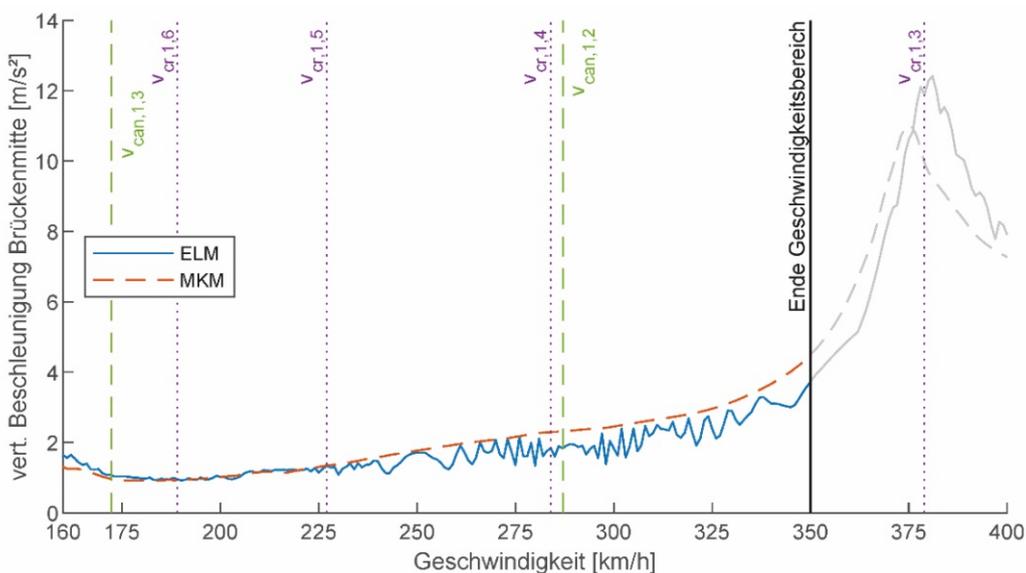


Abbildung 8: Maximale Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte für die Überfahrt des ICE-2; $L=10 \text{ m}$; $n_0=11,96 \text{ Hz}$; $\mu=12,21 \text{ t/m}$; $\zeta=2,2 \%$

In Studien zur FBI ist folglich danach zu trachten, nur die tatsächlichen Peaks im Geschwindigkeitsverlauf des MKM und des ELM zu vergleichen. Wird dies nicht beachtet und werden für das Beispiel in Abbildung 8 die Ergebniswerte für das MKM und das ELM bei 350 km/h miteinander verglichen, geht jegliche Aussagekraft für die mechanische Wirkung der FBI verloren.

Auswahl von Beschleunigungspeaks in dieser Dissertation

Ungeachtet von Resonanzbedingungen wurden die dynamischen Berechnungen im Rahmen dieser Dissertation im Geschwindigkeitsbereich zwischen 160 km/h und 350 km/h und einer

Schrittweite von 1 km/h durchgeführt. Zur Auswertung wird für jede Brücken-Zug Kombination der maximale Beschleunigungspeak für das ELM herangezogen, der sich im betrachteten Geschwindigkeitsbereich befindet. Besonders wird hierbei darauf geachtet, dass es sich um lokale Maxima im Beschleunigungsverlauf handelt, wodurch nicht aussagekräftige Spitzenwerte wie in Abbildung 8 bei 350 km/h aus der Ergebnisanalyse ausgeschlossen werden. Zur Beurteilung der FBI wird das zugehörige lokale Maximum im Ergebnisverlauf des MKM herangezogen, das bei ähnlicher Geschwindigkeit wie das identifizierte Maximum aus der ELM Berechnung auftritt.

1.4.3 Beschränkung auf die Brückenmitte

Museros und Alarcón untersuchen in [26] den Einfluss der zweiten Biegeeigenform auf die maximale Tragwerksantwort von Einfeldträgerbrücken. Darin zeigt sich, dass die maximale Verschiebung des Bernoulli-Euler-Balkens (BEB) bei Zugsüberfahrt im praktisch relevanten Geschwindigkeitsbereich immer in Brückenmitte auftritt. Für die Vertikalbeschleunigungen hingegen können die Resonanzgeschwindigkeiten der zweiten Eigenform maßgebend werden, wobei die Maximalwerte im Viertelpunkt der Brücke erhalten werden. An einem ausgewählten Beispiel wurden in [26] im Viertelpunkt um 30 % höhere Vertikalbeschleunigungen ermittelt als in Brückenmitte.

In einigen Untersuchungen zur Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI), beispielsweise in [19] und [27], wurden dennoch ausschließlich die Vertikalbeschleunigungen in Brückenmitte als Bewertungskriterium herangezogen. Da die zweite Eigenform keinen Beitrag zur Tragwerksantwort in Brückenmitte liefert, sind die Resonanzen der zweiten Eigenform durch diese Festlegung aus den Ergebnissen ausgeschlossen.

Beschränkung auf die Brückenmitte in dieser Dissertation

Um die Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen des ERRI aus [19] (Grundlage für die Zusatzdämpfung gemäß Eurocode) zu wahren, werden die maximalen Vertikalbeschleunigungen in dieser Dissertation ausschließlich in Brückenmitte ausgewertet. Inwiefern sich die Ergebnisse zur FBI für jene Situationen ändern, wo die maximale Beschleunigung durch den Einfluss der zweiten Biegeeigenform deutlich außerhalb der Brückenmitte auftritt, ist eine Fragestellung für mögliche zukünftige Forschungsarbeiten.

1.4.4 Einfluss von Triebfahrzeugen/Lokomotiven

Triebfahrzeuge haben üblicherweise kürzere Wagenlängen und höhere Achslasten als Reisezugwagen. Kommt es zufolge regelmäßiger Anregung durch eine Folge an gleichen Reisezugwagen zu Resonanzeffekten an der Brücke, können die Triebfahrzeuge die Amplituden der Tragwerksantwort beeinflussen [26]. Dieser Effekt kann entweder vorteilhaft sein, wenn die Triebfahrzeuge die regelmäßige Anregung durch die Reisezugwagen unterbrechen oder ungünstig, wenn die schwereren Achsen des ersten Drehgestells eines Triebwagens in Phase auf die schwingende Brücke auffahren. Je nach Position im Zugverband und der Anzahl der Triebfahrzeuge kann dieser Effekt unterschiedlich stark ausgeprägt sein.

Einige Studien zur Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) fokussieren sich auf die reine Untersuchung des Resonanzverhaltens von Brücken, weshalb die Triebfahrzeuge entweder gänzlich vernachlässigt werden [28], durch einen Reisezugwagen ersetzt werden [21] oder die Achsabstände der Triebfahrzeuge an jene der Reisezugwagen angepasst werden [29].

Triebfahrzeuge in dieser Dissertation

Grundsätzlich werden die Berechnungen für diese Dissertation anhand von realen Zugmodellen inklusive den entsprechenden Triebfahrzeugen bzw. Lokomotiven durchgeführt. Daraus folgt, dass in der Ergebnisauswertung nicht nur Beschleunigungspeaks zufolge diverser Resonanzbedingungen, sondern auch mögliche Peaks zufolge impulsartiger Anregung durch die höheren Achslasten der Triebfahrzeuge enthalten sein können.

Publikation 3 widmet sich ausführlich dem Einfluss der Triebfahrzeuge auf die dynamische Tragwerksantwort und vergleicht fiktive Zugmodelle ohne Triebfahrzeuge mit einer realen Zugkonfiguration des ÖBB Railjet.

1.4.5 Zuglasten

Die Achslasten von Hochgeschwindigkeitszügen für die dynamische Berechnung mit Einzellastmodellen sind üblicherweise in Normen oder Richtlinien angegeben. Beispielsweise legt der österreichische nationale Anhang zum Eurocode [30] die Achslasten für den Railjet fest. Für die Lokomotiven des Railjet sind demnach 225 kN und für die Reisezugwagen 155 kN als Achslasten anzusetzen.

Die benötigten Fahrzeugdaten (Massen, Steifigkeiten, Dämpfungskoeffizienten) für Mehrkörpermodellrechnungen können entweder aus der Literatur entnommen werden oder müssen direkt vom Zugerhersteller zur Verfügung gestellt werden.¹ Die aus den Fahrzeugmassen aus [11] resultierenden Gewichtskräfte sind für den Railjet um etwa 4 % geringer als die Achslasten nach Norm. Für den Zugtyp Eurostar aus [19] ist diese Diskrepanz mit etwa 10 % für die Lokomotiven und etwa 16 % für die Reisezugwagen deutlich größer.

Für die Durchführung von Studien zur Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) ist demnach darzulegen, ob im Einzellastmodell (ELM) die Achslasten nach Normvorschriften (inkl. Sicherheitsfaktor) oder die an die Gewichtskräfte des Mehrkörpermodells (MKM) angepassten Achslasten verwendet werden. Der erste Fall kann von Interesse sein, wenn die MKM-Ergebnisse einer ELM-Berechnung (mit Achslasten gemäß Normvorschriften) gegenübergestellt werden sollen. Der Ergebnisunterschied der beiden Modelle ist in diesem Fall auf den mechanischen Effekt der FBI in Kombination mit einer genaueren Berücksichtigung der Fahrzeugmassen (geringere Gewichtskräfte im MKM gegenüber den Achslasten des ELM) zurückzuführen.

Liegt der Zweck einer MKM-Berechnung in der Untersuchung des rein mechanischen Effekts der FBI, sollten die Achslasten des ELM unbedingt an die Gewichtskräfte aus dem MKM angeglichen werden.

Zuglasten in dieser Dissertation

In Publikation 1 und Publikation 2 wird der Nutzens einer detaillierteren Modellbildung mittels MKM im Vergleich zum ELM nach derzeitigem Stand der Normung betrachtet. Dafür kommen im ELM die normgemäßen Achslasten für den ÖBB Railjet zum Einsatz, die um etwa 4 % höher sind, als die Gewichtskräfte aus dem MKM. Die Ergebnisse beinhalten somit nicht nur den mechanischen Effekt der FBI, sondern auch den Anteil aus dem Ungleichgewicht der Achslasten zwischen ELM und MKM.

Die Publikationen 3 und 4 betrachten den rein mechanischen Effekt der FBI, weshalb darin die Achslasten des ELM an die Gewichtskräfte aus dem MKM angeglichen wurden.

¹ Eine Übersicht über Literaturquellen mit Fahrzeugdaten internationaler Züge ist in [31] angegeben.

1.5 Einflussparameter auf die Fahrzeug-Brücken-Interaktion

Ob der Vielzahl an Publikationen zur Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) werden in diesem Abschnitt nur die wesentlichen Erkenntnisse ausgewählter Studien zusammengefasst, welche die FBI anhand von zweidimensionalen Mehrkörpermodellen (MKM) untersuchen. Die Brücken sind darin jeweils als einfeldrige Bernoulli-Euler-Balken ohne Berücksichtigung der dynamischen Oberbaueigenschaften idealisiert.

Ergebnisse von Liu et al. aus [27]

Liu et al. untersuchen in [27] verschiedene Einflussparameter auf die FBI für die Überfahrt des italienischen Hochgeschwindigkeitszugs ETR500Y über eine Brücke mit den Eigenschaften $L = 34$ m; $\mu = 11,4$ t/m; $EI = 9,92e10$ Nm²; $n_0 = 4,01$ Hz und $\zeta = 2$ %. Als Kriterium für die Auswertung wird darin die maximale Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte für das Einzellastmodell (ELM), vereinfachte Fahrzeugmodelle mit einem bzw. zwei Freiheitsgraden und das komplette MKM herangezogen. Die folgenden Einflussparameter werden als wesentlich für die FBI identifiziert:

- die Überfahrtsgeschwindigkeit v

Deutliche Reduktionen der Vertikalbeschleunigung zufolge FBI treten für Überfahrten im Bereich der primären Resonanzgeschwindigkeit $v_{cr,1,1}$ für die Grundfrequenz der Brücke auf. Bei geringeren Geschwindigkeiten sind die Unterschiede zwischen ELM und MKM gering.

- das Frequenzverhältnis $\kappa = f_v/n_0$ zwischen der Eigenfrequenz der Drehgestelle f_v und der Grundfrequenz der Brücke n_0

Die Reduktion der Vertikalbeschleunigung zufolge FBI wird am größten, wenn die Eigenfrequenz der Drehgestelle etwas höher ist, als die Grundfrequenz der Brücke ($\kappa \approx 1,5$).

- das Massenverhältnis $\gamma = M_v/M_b$ zwischen der Gesamtmasse des Zuges M_v und der Brückenmasse M_b

Mit zunehmenden Massenverhältnis steigt der Einfluss der FBI.

- Das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ

Für eine höhere Brückendämpfung nimmt der Einfluss der FBI ab.

Ergebnisse von Doménech et al. aus [21]

Die Studie von Doménech et al. [21] kann als Erweiterung zu [27] gesehen werden, wobei die Effekte der FBI anhand einer umfangreichen Parameterstudie beurteilt werden, die praktisch relevante Einfeldträgerbrücken ($10 \text{ m} \leq L \leq 30 \text{ m}$) und verschiedene Fahrzeugabmessungen und –steifigkeiten abdeckt. Die maximale Vertikalbeschleunigung für das ELM und das MKM wird nicht nur in Brückenmitte, sondern an 19 Stellen des Balkens $x/L = \{0,05; 0,1; \dots; 0,9; 0,95\}$ ausgewertet. Für eine feste Stelle des Stabes werden 16 Parameter identifiziert, die den Effekt der FBI beeinflussen. Die Ergebnisse werden für die primäre und die sekundäre Resonanz der Brückengrundfrequenz ($k = 1$; $k = 2$ und $n = 1$ in Gl. (21)) anhand der folgenden drei Hauptparameter diskutiert:

- Distanzverhältnis $\beta_d = L/d$ zwischen der Spannweite L und der Wagenlänge d

Der Einfluss der FBI steigt mit zunehmendem Distanzverhältnis β_d .

- Frequenzverhältnis $\eta_p = n_0/n_p$ zwischen der Brückengrundfrequenz n_0 und der Eigenfrequenz der Drehgestelle n_p

Der Einfluss der FBI ist im Bereich $\eta_p = 1$ am größten.

- Massenverhältnis $\mu_D = \mu L/m_D$ zwischen der Brückenmasse μL und der Drehgestellmasse m_D

Der Einfluss der FBI sinkt mit zunehmendem Massenverhältnis μ_D .

Die Bedeutung der drei Hauptparameter β_d , η_p und μ_D auf die FBI im Vergleich zu den verbliebenen Nebenparametern ist für die sekundäre Resonanz ($k = 2$) weniger stark ausgeprägt, als für die primäre Resonanz ($k = 1$).

Als weiteres wesentliches Ergebnis dieser Arbeit wird festgehalten, dass sich der Effekt der FBI bei kleiner Strukturdämpfung und einer größeren Wagenanzahl im Zugmodell stärker auswirkt.

Analytische Formel zur Bestimmung der Zusatzdämpfung nach Yau et al. [32]

Anhand eines vereinfachten Ersatzmodells präsentieren Yau et al. in [32] die Herleitung einer analytischen Formel zur Bestimmung einer Zusatzdämpfung für gelenkig gelagerte Einfeldträgerbrücken. Der sogenannte „Equivalent Additional Damping Approach“ (kurz: EADA) berücksichtigt ausschließlich die erste Biegeeigenform, sodass die Brücke als äquivalenter Einmassenschwinger mit modaler Masse M_1 , modaler Steifigkeit K_1 und modaler Dämpfung C_1 betrachtet werden kann. Eine weitere Vereinfachung wird durch die Annahme getroffen, dass sich genau zwei Drehgestelle benachbarter Wagenkästen auf dem Tragwerk befinden, welche im Ersatzsystem als zwei Schwingungstilger wirken (siehe Abbildung 9a). Die modale Masse m_1^* , die modale Steifigkeit k_1^* und die modale Dämpfung c_1^* der Schwingungstilger repräsentieren die dynamischen Eigenschaften eines halben Wagenkastens. Das Lehr'sche Dämpfungsmaß eines Schwingungstilgers kann somit als

$$\zeta_1 = \frac{c_1^*}{2m_1^* \omega_1^*} \quad \text{mit} \quad \omega_1^* = \sqrt{\frac{k_1^*}{m_1^*}} \quad (24)$$

angeschrieben werden [32]. Die Zusatzdämpfung c_a des Ersatzsystems aus Abbildung 9b wird unter der Prämisse bestimmt, dass die Amplituden der modalen Brückenmassen M_1 für die beiden Systeme aus Abbildung 9 bei vertikaler Resonanzanregung gleich groß sind.

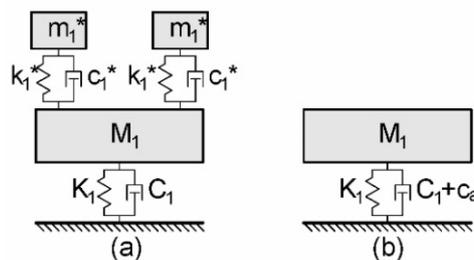


Abbildung 9: Mechanische Modelle für das gekoppelte Fahrzeug-Brücken-System; (a) vereinfachtes Modell mit zwei Schwingungstilgern; (b) Ersatzsystem mit Zusatzdämpfung c_a [32]

Als Ergebnis dieser Modellierungsstrategie wird in [32] eine vereinfachte Formel zur Bestimmung einer Zusatzdämpfung für das Brückentragwerk präsentiert:

$$\Delta\zeta_{EADA} \approx \mu_1 r_1 \sqrt{r_1^2 + (2\zeta_1)^2} \quad \text{mit} \quad \mu_1 = \frac{m_1^*}{M_1}; \quad r_1 = \frac{\omega_1^*}{\Omega_1}; \quad \Omega_1 = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}} \quad (25)$$

Die Treffgenauigkeit von Gl. (25) wird in Publikation 4 für vier ausgewählte Brückentragwerke und drei verschiedene Zugtypen untersucht.

1.6 Forschungsfragen

Durch die Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI, siehe Kapitel 1.5) ist es für reale Tragwerke und Züge oftmals schwierig abzuschätzen, in welchem Maße die FBI die dynamischen Berechnungsergebnisse beeinflusst. Auch die direkte Übertragbarkeit von Forschungsergebnissen – die oftmals für fiktive Tragwerke und andere Zugtypen formuliert sind – auf einen realen Anwendungsfall ist nicht immer einfach. Dies führt zur ersten Forschungsfrage:

1. Welchen Beitrag zur Reduktion der Vertikalbeschleunigungen liefert die Berücksichtigung der FBI in vereinfachten Rechenmodellen für existierende Eisenbahnbrücken und reale Zugmodelle?

Sofern die vertikalen Grenzbeschleunigungen an Eisenbahnbrücken auch unter Einbeziehung der FBI nicht eingehalten werden können, sind andere Anpassungen des Berechnungsmodells zur Reduktion der Vertikalbeschleunigungen möglich. Eine einfach umzusetzende Option ist die Berücksichtigung der lastverteilenden Wirkung des Schotterbetts. Eine zweite Option ist die messtechnische Ermittlung der Dämpfung von realen Tragwerken, wodurch üblicherweise höhere Werte, als im Eurocode vorgegeben, erzielt werden können. Die zweite Forschungsfrage lautet somit:

2. Welches Potential zur rechnerischen Reduktion der Vertikalbeschleunigungen von existierenden Eisenbahnbrücken hat die Berücksichtigung von messtechnisch ermittelten Dämpfungswerten und einer Lastverteilung in Längsrichtung?

Einige Studien zum Thema FBI beschränken die Ergebnisauswertung auf die primäre und/oder sekundäre Resonanzgeschwindigkeit. Darin werden die Triebfahrzeuge der betrachteten Züge zum Teil nicht in die Berechnung einbezogen, um die gleichmäßige Anregung der Brücke durch wiederkehrende Achsabstände nicht zu unterbrechen. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

3. Welche Rolle spielen die Triebfahrzeuge/Lokomotiven in der dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken?
4. Können die Ergebnisse von Studien zur FBI, die unter Vernachlässigung der Triebfahrzeuge durchgeführt wurden, auf reale Situationen für Züge mit Triebwagen angewandt werden?

Dynamische Berechnungen von Eisenbahnbrücken mittels Einzellastmodell (ELM) sind vergleichsweise einfach in der Handhabung und in der Ingenieurpraxis weit verbreitet. Um darin auch die oftmals günstigen Effekte der FBI berücksichtigen zu können, erlaubt der Eurocode als Ersatz zur Anwendung von Interaktionsmodellen die fiktive Erhöhung der Tragwerksdämpfung für Brücken mit $L < 30$ m. Dabei stellt sich die Forschungsfrage:

5. Ist die Berücksichtigung einer fiktiven Zusatzdämpfung ein probates Mittel, um die Effekte der FBI vereinfacht im ELM berücksichtigen zu können?

Nachdem die aktuelle Festlegung der Zusatzdämpfung in Abhängigkeit der Spannweite im Eurocode zu unsicheren Ergebnissen führen kann, lautet die letzte Forschungsfrage:

6. Wie kann eine konservative und trotzdem einfach handhabbare Definition einer fiktiven Zusatzdämpfung für das ELM aussehen?

1.7 Zusammenfassung der wissenschaftlichen Aufsätze

1.7.1 Publikation 1

Die erste Publikation dieser Dissertation widmet sich der rechnerischen Reduktion der maximalen Vertikalbeschleunigungen in Brückenmitte von 75 ausgewählten Eisenbahnbrücken des österreichischen Streckennetzes. Als überfahrender Zug dient dabei eine Konfiguration des ÖBB Railjet (herkömmlicher Zug, vgl. Abbildung 4). Anhand von Vergleichsrechnungen für das Einzellastmodell (ELM, siehe Abbildung 2), das ELM mit Lastverteilung gemäß Abbildung 3, das ELM mit messtechnisch ermittelter Dämpfung und das Mehrkörpermodell (MKM, siehe Abbildung 4) werden die Forschungsfragen 1 und 2 behandelt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass der Ansatz einer **Lastverteilung** in Längsrichtung gemäß Abbildung 3 im ELM die Vertikalbeschleunigungen von kurzen Brücken deutlich

reduziert. Mit zunehmender Spannweite nimmt dieser Effekt ab. Aufgrund der einfachen Anwendbarkeit empfiehlt sich die Berücksichtigung der Lastverteilung in der dynamischen Berechnung von Brücken mit $L \leq 11$ m. In Einzelfällen können damit auch für längere Spannweiten noch nennenswerte Reduktionen erzielt werden.

Für 30 der 75 betrachteten Brücken liegen **messtechnisch ermittelte Dämpfungswerte** vor, die durchwegs höher als die unteren Grenzwerten gemäß Eurocode (siehe Tabelle 1) liegen. Bei Berücksichtigung der Messwerte betragen die Reduktionen der Vertikalbeschleunigung im Vergleich zur Normdämpfung zwischen 0 % und 50 %, wobei keinerlei Abhängigkeiten vom Brückentyp oder der Spannweite ersichtlich sind.

Der Effekt der **Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI)** bewirkt an allen betrachteten Tragwerken eine Reduktion der maximalen Vertikalbeschleunigung, wobei auf die Diskrepanz der Achslasten zwischen ELM und MKM (siehe Abschnitt 1.4.5) hinzuweisen ist. Speziell für Stahl- und Verbundbrücken werden hohe Reduktionen von etwa 25 % bis 60 % ermittelt, was vermutlich auf deren geringe Massenbelegung und die geringe Dämpfung zurückzuführen ist.

Für eine der 75 Brücken liefert die Berücksichtigung der Zusatzdämpfung nach Eurocode im ELM unsichere Ergebnisse in Bezug auf das MKM.

1.7.2 Publikation 2

Publikation 2 beinhaltet die Erweiterung der FBI-Untersuchungen von Publikation 1 für die Zugtypen ICE-4 (herkömmlicher Zug, vgl. Abbildung 4) und EC250 (Gelenkszug, vgl. Abbildung 5).

Für den **ICE-4** ergeben sich durch die FBI Reduktionen der maximalen Vertikalbeschleunigungen in Brückenmitte von etwa 10 % bis 35 %. Für zwölf Tragwerke im Spannweitenbereich $10 \text{ m} < L < 15 \text{ m}$ liefert die Berücksichtigung der Zusatzdämpfung nach Eurocode im Einzellastmodell (ELM) unsichere Ergebnisse in Bezug auf das Mehrkörpermodell (MKM).

Für die Überfahrten des **EC250** sind die maximalen Vertikalbeschleunigungen in Brückenmitte bei MKM Berechnung an 32 Tragwerken höher als bei ELM Berechnung. Für diese Tragwerke liefert die ELM-Berechnung (ohne Zusatzdämpfung) somit unsichere Ergebnisse. Jeglicher Ansatz einer Zusatzdämpfung verschiebt die ELM-Ergebnisse für diese 32 Tragwerke weiter in

den unsicheren Bereich, weshalb die Zusatzdämpfung nach Eurocode zur vereinfachten Berücksichtigung der FBI für diesen Zugtyp ungeeignet ist.

Generell zeigt Publikation 2, dass die Effekte der FBI für konkrete Brückentragwerke stark vom betrachteten Zugtyp abhängig sind.

1.7.3 Publikation 3

Publikation 3 widmet sich dem Einfluss der Triebfahrzeuge auf die dynamische Tragwerksantwort. Die maximalen Vertikalbeschleunigungen in Brückenmitte für die Überfahrt dreier fiktiver Modelle, in denen die Triebfahrzeuge für die dynamische Berechnung vernachlässigt werden, werden mit den Ergebnissen einer realen Zugkonfiguration des Railjets (Modell 1) verglichen. Im Modell 2 werden die Triebfahrzeuge durch einen Reisezugwagen ersetzt, sodass die Wagenanzahl des Zuges unverändert bleibt. Im Modell 3 werden die Triebfahrzeuge gänzlich weggelassen, sodass sich die Wagenanzahl verringert. Im Modell 4 werden die Achsabstände der Triebfahrzeuge an jene der Reisezugwagen angeglichen, die schwereren Achslasten bleiben jedoch erhalten. Die Berechnungen werden für parametrisierte Beton- und Stahlbrücken, sowie für das Einzellastmodell (ELM) und das Mehrkörpermodell (MKM) aller vier Modelle durchgeführt.

Die Ergebnisse für das ELM zeigen, dass das Modell 1 mit **Triebfahrzeugen** vor allem für kurze Tragwerke mit $L < 10$ m um bis zu 50 % höhere Vertikalbeschleunigungen liefert, als die Modelle 2 und 3 (ohne Triebwagen). Die maximalen Vertikalbeschleunigungen resultieren für diese Tragwerke somit nicht ausschließlich aus Resonanzbedingungen wiederkehrender Lastgruppen, sondern werden von den hohen Achslasten der Triebfahrzeuge mitbeeinflusst. Modell 4 liefert bereichsweise deutlich konservative Werte im Vergleich zu Modell 1.

Trotz der großen Unterschiede im Vergleich der vier Modelle zueinander, ist der **Einfluss der FBI** (Ergebnisvergleich ELM des Modells j zu MKM des Modells j ; $j = 1,2,3,4$) in allen vier betrachteten Modellen ähnlich. Die Ergebnisse von Studien zur FBI, in denen die Triebfahrzeuge vernachlässigt wurden, können somit ohne nennenswerten Verlust ihrer Aussagekraft auch für die Überfahrt realer Züge mit Triebwagen herangezogen werden. Vice versa können Studien zur FBI auch für reale Züge mit Triebwagen durchgeführt werden.

1.7.4 Publikation 4

In Hinblick auf die teils nichtkonservative Festlegung der Zusatzdämpfung gemäß Eurocode (siehe Abschnitt 1.2.5) werden in Publikation 4 zunächst die Grundlagen (dokumentiert in [19]) dieser Festlegung analysiert. Anhand einer Datenbank europäischer Eisenbahnbrücken wird ein Parameterfeld fiktiver Tragwerke definiert, für welche die Zusatzdämpfung durch dynamische Berechnungen mittels Einzellastmodellen (ELM) und Mehrkörpermodellen (MKM) für vier Hochgeschwindigkeitszüge ermittelt wird. Die Zugtypen ICE-2 und Eurostar dienen zum Vergleich mit den Ergebnissen des ERRI in [19], wobei für das ELM des Eurostar in der genannten Literaturquelle offenbar um etwa 16 % höhere Achslasten im Vergleich zu den Gewichtskräften des MKM angesetzt wurden. Die daraus resultierende Zusatzdämpfung nach Eurocode enthält somit nicht nur den mechanischen Einfluss der FBI, sondern auch einen gewissen Verzerrungs- bzw. Sicherheitsfaktor (vgl. Abschnitt 1.4.5). Als aktuelle Zugtypen wurden der Railjet und der ICE-4 in die Berechnung aufgenommen.

Die Berechnungsergebnisse zeigen für alle vier Zugtypen, dass die **Zusatzdämpfung nach Eurocode nichtkonservative Ergebnisse** liefert. Ebenso kann die Begrenzung der Zusatzdämpfung für Tragwerke mit $L < 30$ m in der Normvorschrift nicht nachvollzogen werden. Darüber hinaus scheint eine konservative, aber dennoch brauchbare Festlegung einer Zusatzdämpfung in Abhängigkeit der Spannweite nicht möglich zu sein.

Durch die Darstellung der ermittelten **Zusatzdämpfungen in Abhängigkeit der Grundfrequenz** der Tragwerke können hingegen konservative Funktionsverläufe, getrennt für die vier verschiedenen Zugtypen und für verschiedene Massenbelegungen der Tragwerke gefunden werden. Für die praktische Anwendung können konservative Werte der Zusatzdämpfung in Abhängigkeit der Brückengrundfrequenz aus Diagrammen ausgelesen werden, womit die Handhabung der in Publikation 4 vorgestellten Methode ähnlich einfach ist, wie die derzeitige Methode nach Eurocode.

1.8 Wissenschaftlicher Beitrag dieser Dissertation

In der dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken ist die Wahl der Modellierungstiefe der Tragstruktur und der Fahrzeuge von zentraler Bedeutung. Die Berechnungsmodelle sollen die auftretenden Effekte bei der Überfahrt von Eisenbahnzügen realitätsnah erfassen und

gleichzeitig möglichst effizient sein. In der Ingenieurpraxis kommen häufig vereinfachte Berechnungsmodelle zur Anwendung, in denen die überfahrenden Fahrzeuge als Folge von bewegten Einzellasten idealisiert werden. Im Vergleich zu komplexeren Modellen, die die Interaktion von Fahrzeugen und Brücken (Fahrzeug-Brücken-Interaktion, FBI) miteinbeziehen, liefern vereinfachte Einzellastmodelle teilweise deutlich konservative Ergebnisse. Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten widmen sich daher der Frage, unter welchen Umständen die Berücksichtigung der FBI im Berechnungsmodell einen wesentlichen Nutzen mit sich bringt. Aus den daraus formulierten Erkenntnissen ist der quantitative Nutzen der FBI für ein Einzeltragwerk ob der Vielzahl an Einflussparametern dennoch nur in eher groben Schranken vorherzusagen.

Diese Dissertation liefert einerseits quantitative Analysen zum Nutzen der FBI in dynamischen Rechenmodellen für 75 existierende Einfeldträgerbrücken und drei Zugtypen und analysiert gleichzeitig die Methode der Zusatzdämpfungen (MZD) gemäß Eurocode für diese Tragwerke (Publikationen 1 und 2).

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die MZD zu nichtkonservativen Ergebnissen führen kann, was auch in Forschungsarbeiten anderer Autoren bestätigt und kritisiert wird. Anhand einer umfangreichen Parameterstudie wird in dieser Dissertation eine alternative Methode zur Festlegung einer konservativen Zusatzdämpfung erarbeitet (Publikation 4). Durch die Anwendung dieser Methode können die Berechnungsergebnisse von vereinfachten Einzellastmodellen auf der sicheren Seite liegend an die Ergebnisse eines komplexeren FBI-Modells angenähert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Dissertation bearbeitet den Einfluss von Triebfahrzeugen auf die dynamische Tragwerksantwort. Triebfahrzeuge haben üblicherweise kürzere Achsabstände und höhere Achslasten als Reisezugwagen. Dies kann sich im Vergleich zu einem Zug ohne Triebfahrzeuge günstig auswirken, wenn die regelmäßige Anregung der Brücke durch die kürzeren Achsabstände unterbrochen wird oder ungünstig, wenn die höheren Achslasten der Triebfahrzeuge größere Tragwerksantworten verursachen. In dieser Dissertation wird gezeigt, für welche Tragwerke der Triebfahrzeugeinfluss relevant wird (Publikation 3). Ebenso wird gezeigt, dass das Vorhandensein von Triebfahrzeugen die FBI kaum beeinflusst. Diese Aussage ist insofern von Bedeutung, da einige Studien zur FBI in der Literatur unter Vernachlässigung

von Triebfahrzeugen durchgeführt wurden. Diese Studienergebnisse können somit auch auf reale Züge mit Triebfahrzeugen angewandt werden.

1.9 Schlussfolgerungen

Der Ansatz einer Lastverteilung in Brückenlängsrichtung, die Berücksichtigung der Fahrzeug-Brücken-Interaktion sowie die Anwendung von messtechnisch ermittelten Dämpfungswerten sind taugliche Mittel zur rechnerischen Reduktion der maximalen Tragwerksantwort von einfeldrigen, gelenkig gelagerten Eisenbahnbrücken. Ohne konkrete dynamische Berechnung unter Berücksichtigung der genannten Modellierungsvarianten ist die quantitative Abschätzung des Reduktionsmaßes jedoch kaum möglich.

Der Ansatz einer Zusatzdämpfung gemäß Eurocode in einem Einzellastmodell kann zu nichtkonservativen Ergebnissen im Vergleich zur Verwendung von Fahrzeug-Brücken-Interaktionsmodellen führen.

Eine Zusatzdämpfung als vereinfachte Methode zur Berücksichtigung der Fahrzeug-Brücken-Interaktionseffekte in Einzellastmodellen steht in wesentlich deutlicherem Zusammenhang mit der Grundfrequenz von Brücken als mit deren Spannweite.

Triebfahrzeuge können die dynamische Tragwerksantwort verringern oder erhöhen. In Bezug auf die Fahrzeug-Brücken-Interaktion treten kaum Unterschiede zwischen realen Zugmodellen mit Triebfahrzeugen oder fiktiven Modellen ohne Triebfahrzeugen auf.

1.10 Ausblick und mögliche weitere Forschungsthemen

Obwohl die in Abschnitt 1.6 formulierten Forschungsfragen anhand der Ergebnisse dieser Dissertation beantwortet werden, bleiben folgende weitere Fragestellungen für zukünftige Forschungsarbeiten bestehen:

Abhängigkeit der FBI-Effekte/Zusatzdämpfungen von Resonanzbedingungen

Viele Studien zur FBI beschränken sich auf die Auswertung von Berechnungsergebnissen für Resonanzbedingungen niedriger Ordnung (z.B. nur primäre bzw. primäre und sekundäre Resonanz). Vor allem für Brücken mit kurzer und mittlerer Spannweite können aber auch

Resonanzen höherer Ordnung die maximale Tragwerksantwort innerhalb eines definierten Geschwindigkeitsbereichs verursachen. Eine ausführliche Studie zu den Effekten der FBI in Abhängigkeit verschiedener Resonanzbedingungen könnte möglicherweise für eine bessere Abschätzbarkeit des Nutzens einer FBI-Berechnung sorgen bzw. auch die sinnvolle Festlegung einer konservativen Zusatzdämpfung erleichtern. Eine solche Studie müsste die zu untersuchenden Resonanzgeschwindigkeiten beinhalten und dürfte demnach nicht auf realistische Höchstgeschwindigkeiten beschränkt sein.

Ursachen für mögliche höhere Tragwerksantworten bei Berücksichtigung der FBI

Die Ergebnisse aus den Publikationen 2 und 4 zeigen, dass die rechnerische Tragwerksantwort bei Berücksichtigung der FBI im Mehrkörpermodell höher sein kann, als bei Berechnung mittels Einzellastmodell. Dieser Effekt tritt vor allem bei kurzen Tragwerken mit $L < 10$ m, für den Eurostar und EC250 auch für Brücken mit $L < 15$ m auf. Daraus ergeben sich mehrere Fragestellungen:

- Wie kommt es zu diesem Effekt? Tritt möglicherweise eine Art Rückfederung von Fahrzeugmassen auf, wodurch höhere Belastungen auf das Tragwerk im Vergleich zum Einzellastmodell entstehen? Hierfür könnte die Analyse der Kopplungskräfte zwischen Schiene und Fahrzeugen aufschlussreich sein.
- Gibt es Gesetzmäßigkeiten, in welchen Situationen dieser Effekt auftritt? Vorstellbar wäre, dass dieser Effekt beispielweise nur bei Resonanzen höherer Ordnung oder nur bei impulsartiger Anregung (keine Resonanzbedingung) zu beobachten ist. Hierfür kann die Betrachtung der Beschleunigungen im Zeitbereich Aufschluss geben.

FBI für Gelenkszüge und herkömmliche Züge

Die Ergebnisse der Publikationen 2 und 4 zeigen, dass die FBI bei Überfahrten durch den EC250 und den Eurostar (beides Gelenkszüge) geringere Auswirkungen auf die Tragwerksantwort hat als für die betrachteten herkömmlichen Züge. Es ist allerdings unklar, ob dies nur an der Art des Zuges (Kinematik der Gelenkszüge, Federung bzw. Dämpfung der Züge) liegt oder beispielsweise an der geringeren Wagenlänge der Gelenkszüge.

Zusatzdämpfung für Tragwerke mit hohen Grundfrequenzen (und geringer Spannweite)

Für Tragwerke mit hohen Grundfrequenzen ($n_0 > 15$ Hz) werden in Publikation 4 teils hohe und teils negative Zusatzdämpfungen ermittelt. Solche Tragwerke sind im festgelegten Parameterfeld nicht besonders stark repräsentiert. Um eventuell sinnvolle Zusatzdämpfungen auch für diese Tragwerke formulieren zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig. Dabei stellt sich jedoch auch die Frage, ob es für diese Tragwerke überhaupt sinnvoll ist, eine Zusatzdämpfung zu bestimmen, wenn bereits bekannt ist, dass für kurze Tragwerke andere Parameter wie beispielsweise Auflagernachgiebigkeiten, Untergrundeigenschaften (vgl. [33]), oder die Berücksichtigung einer Lastverteilung für die Tragwerksantwort an Bedeutung gewinnen.

Zusatzmasse

Anstatt einer fiktiven Zusatzdämpfung könnte auch eine fiktive Zusatzmasse auf das Tragwerk angesetzt werden, um die Effekte der FBI näherungsweise im Einzellastmodell zu berücksichtigen. Dadurch wird die Trägheit der Tragwerke erhöht, was geringere Grundfrequenzen und Beschleunigungsamplituden nach sich zieht. Beides sind Effekte, die tendenziell auch durch die Berücksichtigung der FBI auftreten. Wie die Festlegung einer solchen Zusatzmasse ausgestaltet sein sollte, ist ein Thema für zukünftige Untersuchungen.

Analysen zur FBI anhand der Tragwerksantwort in Brückenmitte oder maximaler Tragwerksantwort

Wie in Abschnitt 1.4.3 beschrieben tritt die maximale Tragwerksantwort bei Berücksichtigung mehrerer Eigenformen nicht immer in der Nähe der Brückenmitte auf. Inwiefern sich die Einflüsse der FBI unterscheiden, wenn die Tragwerksantwort in Brückenmitte oder an der Stelle der maximalen Tragwerksantwort ausgewertet wird, ist ebenfalls ein Thema für zukünftige Untersuchungen.

Aktuelle Entwicklungen

In einer Serie an Publikationen von *Stoura* und *Dimitrakopoulos* [34], [35], [36] wird eine Methode zur Entkopplung des Problems der Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) vorgestellt. Im

Rahmen der sogenannten „Modified Bridge System Method“ werden die Differentialgleichungen (DGL) für das Interaktionsproblem zunächst auf dimensionslose Form gebracht, wodurch die maßgeblichen Effekte für die FBI (z.B. Massenträgheit, Fahrzeugsteifigkeiten, Dämpfungen von Fahrzeug bzw. Tragwerk) quantitativ vergleichbar werden. Eine mathematische Umformulierung des Problems führt auf zeitabhängige Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen in der Differentialgleichung des Brückensystems, die den Interaktionseffekt mit den Fahrzeugen berücksichtigen. Es ist somit ausreichend, die modifizierte DGL für die Brücke zu lösen, was mit vergleichbarem Berechnungsaufwand zum Einzellastmodell (ELM) möglich ist. Die Methode ist unabhängig vom Brückentyp anwendbar und liefert für die gezeigten Fallbeispiele praktisch idente Ergebnisse wie eine wesentlich aufwändigere Mehrkörpermodellberechnung.

In einer weiteren Publikation stellen *Stoura* und *Dimitrakopoulos* [37] die Herleitung analytischer Formeln zur zeitabhängigen Bestimmung einer Zusatzdämpfung für Brückentragwerke zufolge FBI vor. Die Formeln sind unabhängig vom Brückentyp anwendbar und die Eingangsparameter sind a priori bekannt. Diese Studie zeigt, dass die Zusatzdämpfung hauptsächlich vom sogenannten „Impedanzverhältnis“ abhängig ist, das aus der Fahrzeugdämpfung in der Primärstufe und den dynamischen Eigenschaften der Brücke bestimmt wird.

Die „Modified Bridge System Method“ und die Formeln zur Bestimmung der Zusatzdämpfung aus [37] sollten in zukünftigen Studien zur FBI unbedingt miteinbezogen werden, da sich die genannten Problemstellungen für zukünftige Forschungsarbeiten damit wahrscheinlich auf analytischem Wege lösen lassen.

2 Wissenschaftliche Aufsätze

2.1 Publikation 1

Glatz B., Fink J. *Einfluss der Zugmodelle auf die dynamische Antwort von 75 Stahl-, Verbund- und Stahlbetonbrücken*. Stahlbau 2019; 88(5); 470-477. DOI: 10.1002/stab.201900014

2.2 Publikation 2

Glatz B., Fink J., Bruschetini-Ambro S. *Untersuchungen zum Einfluss der Fahrzeug-Brücke-Interaktion auf die dynamische Tragwerksantwort von 75 bestehenden Eisenbahnbrücken*. In: C. Adam, G. Achs, T Furtmüller (Hrg.): *16. D-A-CH Tagung Erdbebeningenieurwesen & Baudynamik*. S. 565-572. Innsbruck, Austria, 2019. ISBN: 978-3-200-06454-6

2.3 Publikation 3

Glatz B., Bettinelli L., Fink J. *Triebfahrzeuge und Fahrzeug-Brücken-Interaktion in der dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken*. Bautechnik 2020; 97(7): S. 453-461. DOI: 10.1002/bate.201900113

2.4 Publikation 4

Glatz B., Fink J. *A redesigned approach to the additional damping method in the dynamic analysis of simply supported railway bridges*. Engineering Structures 2021; 241. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112415

Literatur

- [1] European Commission. *High-speed Europe, a sustainable link between citizens*. Publications Office of the European Union, Luxembourg; 2010. DOI: 10.2768/17821
- [2] EN 1991-2: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. CEN, Brüssel; 2012.
- [3] ÖBB Infrastruktur. *Richtlinie für die dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken*. 2011.
- [4] Salcher P., Adam C. *Modeling of dynamic train-bridge interaction in high-speed railways*. Acta Mech 2015; 226: 2473-2495. DOI: 10.1007/s00707-015-1314-6
- [5] Arvidsson T., Karoumi R. *Train-bridge interaction – a review and discussion of key model parameters*. International Journal of Rail Transportation 2014; 2(3): 147-186. DOI: 10.1080/23248378.2014.897790
- [6] EN 1990/A1: *Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung; Änderung 1: Anwendung bei Brücken*. CEN, Brüssel; 2013.
- [7] ERRI D214/RP9. *Eisenbahnbrücken für Geschwindigkeiten > 200 km/h – Schlussbericht*. Utrecht: European Rail Research Institute; 1999.
- [8] Ziegler F. *Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper*. Springer-Verlag Wien; 1998.
- [9] Frýba L. *Dynamics of Railway Bridges*. Thomas Telford; 1996.
- [10] Clough R.W., Penzien J. *Dynamics of Structures*. 3rd ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc.; 2003.
- [11] Mähr T.C. *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Eisenbahnbrücken mit Schotteroberbau unter Verkehrslast*. Dissertation, TU Wien; 2008.
- [12] Chopra A.K. *Dynamics of Structures*. Prentice-Hall, 2001.

- [13] Stollwitzer A., Fink J. *Analyse des dynamischen Schotteroberbauverhaltens anhand einer Großversuchsanlage mit vertikaler Kraftanregung*. Bauingenieur 2020; 95 (1): 12-21.
- [14] Knothe K., Stichel S. *Schienenfahrzeugdynamik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2003.
- [15] MATLAB. Version 9.5.0.944444 (R2018b). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2018.
- [16] Shampine L.F., Reichelt M.W. *The MATLAB ODE Suite*. SIAM J Sci Comput 1997; 18(1); 1-22. DOI: 10.1137/S1064827594276424
- [17] Shampine L.F., Gladwell I., Thompson S. *Solving ODEs with MATLAB*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003.
- [18] ERRI D214/RP3. *Eisenbahnbrücken für Geschwindigkeiten über 200 km/h – Empfehlungen für die Ermittlung der Dämpfung von Eisenbahnbrückentragwerken*. Utrecht: European Rail Research Institute; 1999.
- [19] ERRI D214/RP4. *Eisenbahnbrücken für Geschwindigkeiten über 200 km/h – Wechselwirkung zwischen Zug und Brücke*. Utrecht: European Rail Research Institute; 1999.
- [20] Arvidsson T., Karoumi R., Pacoste C. *Statistical screening of modelling alternatives in train-bridge interaction systems*. Engineering Structures 2014; 59: 693-701.
- [21] Doménech A., Museros P., Martínez-Rodrigo M.D. *Influence of the vehicle model on the prediction of the maximum bending response of simply-supported bridges under high-speed railway traffic*. Engineering Structures 2014; 72: 123-139. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.04.037
- [22] Doménech A., Museros P. *Influence of the vehicle model on the response of high-speed railway bridges at resonance*. In: De Roeck G., Degrande G. Lombaert G., Müller G. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011. Leuven, Belgium, 2011.
- [23] Xia H., Zhang N., Guo W. *Dynamic Interaction of Train-Bridge Systems in High-Speed Railways, Theory and Applications*. Springer-Verlag GmbH Berlin; 2018.

- [24] Yang Y., Lin C., Yau J., Chang D. *Mechanism of resonance and cancellation for train-induced vibrations on bridges with elastic bearings*. Journal of Sound and Vibration 2004; 269: 345-360.
- [25] Brandstetter G. *Analyse einfacher Tragwerksmodelle zur dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken mit Schwerpunkt Schotteroberbau*. Dissertation, TU Wien; 2018.
- [26] Museros P., Alarcón E. *Influence of the second bending mode on the response of high-speed bridges at resonance*. Journal of Structural Engineering 2005; 131(3): 405-415.
- [27] Liu K., De Roeck G., Lombaert G. *The effect of dynamic train-bridge interaction on the bridge response during a train passage*. Journal of Sound and Vibration 2009; 325; 240-251. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.03.021
- [28] Arvidsson T. *Train-Bridge Interaction: Literature Review and Parameter Screening*. Licentiate Thesis, KTH Royal Institute of Technology Stockholm, 2014.
- [29] Hauser A., Adam C. *Abschätzung der Schwingungsantwort von Brückentragwerken für Hochgeschwindigkeitszüge*. D-A-CH Tagung 2007 der Österreichischen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, Wien.
- [30] ÖN B 1991-2: *Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-2 und nationale Ergänzungen*. ASI, Wien; 2018.
- [31] Cantero D., Arvidsson T., O'Brien E., Karoumi R. *Train-track-bridge modelling and review of parameters*. Structure and Infrastructure Engineering 2016, 12:9, 1051-1064.
- [32] Yau J.D., Martínez-Rodrigo M.D., Doménech A. *An equivalent additional damping approach to assess vehicle-bridge interaction for train-induced vibration of short-span railway bridges*. Eng Struct 2019; 188; 469-479. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.144
- [33] Adam C., Hirzinger B. *Ein Modell mit Boden-Bauwerk-Interaktion zur dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken*. Bauingenieur 2020; 95(7-8):289-298. DOI: 10.37544/0005-6650-2020-07-08-81

[34] Stoura C.D., Dimitrakopoulos E.G. *A rational method to decouple the train-bridge interaction problem*. In: Papadrakakis M., Fragiadakis M. (eds.) 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2019. Crete, Greece, 2019.

[35] Stoura C.D., Dimitrakopoulos E.G. *A Modified Bridge System method to characterize and decouple vehicle-bridge interaction*. Acta Mech 2020; 231(12). DOI: 10.1007/s00707-020-02699-3

[36] Stoura C.D., Dimitrakopoulos E.G. *MDOF extension of the Modified Bridge System method for vehicle-bridge interaction*. Nonlinear Dynamics 2020; 102(12); 1-21. DOI: 10.1007/s11071-020-06022-6

[37] Stoura C.D., Dimitrakopoulos E.G. *Additional damping effect on bridges because of vehicle-bridge interaction*. Journal of Sound and Vibration 2020, 476. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115294