

Diploma Thesis

A Data-Driven Method for Analysing the Multi-Body-Dynamical Behaviour of Simply Supported Bridges Under High-Speed Rail Traffic

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Datengestützte Methode zur Analyse des mehrkörperdynamischen Verhaltens einfeldriger Eisenbahnbrücken bei Hochgeschwindigkeitsverkehr

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Julian Wieser, BSc

Matr.Nr.: 01225754

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Josef Fink**

Dipl.-Ing. **Bernhard Glatz**

Institut für Tragkonstruktionen

Forschungsbereich Stahlbau

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/E212-01, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2019

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt eine datengestützte Methode zur Analyse des mehrkörperdynamischen Verhaltens von Eisenbahnbrücken auf. Dabei wird insbesondere auf die Tragwerksantwort infolge mehrkörperdynamischer Berechnungen eingegangen. Dies ist für die Ingenieurpraxis relevant, da sich aus mehrkörperdynamischen Berechnungen in vielen Fällen eine Reduktion der Tragwerksantwort (im Vergleich zu dynamischen Berechnungen mittels Einkörpermodell) ergibt. Dadurch könnten zukünftige Brückentragwerke wirtschaftlicher werden.

Hierzu wird die Tragwerksantwort von 1000 fiktiven Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m bei der Überfahrt von konkreten Zugkonfigurationen im Hochgeschwindigkeitsverkehr mit zwei unterschiedlichen Berechnungsmodellen numerisch untersucht.

Dazu werden zunächst Brückendaten, die tatsächlich existierende Brückentragwerke beschreiben, ausgewertet. Unter der Anwendung stochastischer Methoden lässt sich anhand dieser Brückendaten ein Parameterfeld aus Brückenparametern erzeugen, das für dynamische Berechnungen herangezogen werden kann. Dabei entspricht jeder Punkt des Parameterfeldes einem fiktiven Brückentragwerk. In einem weiteren Schritt werden dynamische Berechnungen für alle so erzeugten, fiktiven Brücken durchgeführt. Als Berechnungsmodelle kommen dabei ein Einkörpermodell, bei dem überfahrende Züge durch Einzellasten ersetzt werden, sowie ein Mehrkörpermodell, bei dem überfahrende Züge durch Mehrmassenschwinger ersetzt werden, zur Anwendung. Danach wird die Differenz der Tragwerksantwort aus den beiden Berechnungsmodellen in Abhängigkeit der Parameter des Parameterfeldes ausgewertet. Zwischen den Berechnungsergebnissen wird linear interpoliert, wodurch die funktionelle Abhängigkeit oben erwähnter Differenz von den Brückenparametern numerisch beschrieben wird. Zudem werden dynamische Berechnungen an zwei simplen Feder-Dämpfer-Modellen, denen die Parameter des Parameterfeldes zugeordnet werden, vorgenommen. Für die beiden Feder-Dämpfer-Modelle wird ebenfalls die Differenz der Tragwerksantwort berechnet und diese mit der Differenz der Tragwerksantwort aus den ersten beiden Berechnungsmodellen verglichen. Es wird untersucht, ob eine Korrelation zwischen den beiden Differenzen der Tragwerksantwort vorliegt.

Durch obige Vorgangsweise ergibt sich für die betrachteten Zugkonfigurationen ein Zusammenhang zwischen der Differenz der Tragwerksantwort einerseits und Brückenparametern andererseits. Der beschriebene Zusammenhang kann je nach zugrunde gelegtem Berechnungsaufwand entweder zur Abschätzung oder zur Bestimmung der Änderung der Tragwerksantwort zufolge mehrkörperdynamischer Berechnungen (im Vergleich zu dynamischen Berechnungen mittels Einkörpermodell) herangezogen werden. Außerdem zeigen die Berechnungsergebnisse, das simple Feder-Dämpfer-Modelle unter bestimmten Voraussetzungen für eine grobe Abschätzung des gefundenen Zusammenhanges herangezogen werden können.

Abstract

This diploma thesis analyses the multi-body-dynamical behaviour of railway bridges which is characterised in terms of dynamical bridge responses. Predicting this behaviour is astute to engineering design, since multi-body-dynamical analyses of railway bridges often result in a reduction of dynamical bridge responses (compared to the responses obtained by single-body-dynamical analyses). Thus, the design efficiency of railway bridges can be increased.

The study of multi-body-dynamical behaviour of railway bridges was conducted by using 1000 virtual simply-supported railway bridges with spans of up to 40 m subjected to high-speed rail traffic. Using two different mechanical models, all bridges were analysed during the passage of specified train configurations.

First, a data set of existing railway bridges was statistically analysed. Using stochastic methods, a parameter field for bridge parameters could be obtained from the data set. Each point of the parameter field represented a virtual bridge. Second, single-body as well as multi-body dynamic analyses were conducted for every virtual bridge. For the single-body dynamic analyses, trains were replaced by point loads acting on the bridge girder. For the multi-body dynamic analyses, trains were replaced by multiple degree of freedom systems. The differences in bridge responses obtained from the two mechanical models was computed as a function of the bridge parameters. Using linear interpolation, a numerical function describing the differences in bridge responses was obtained. In addition, bridge parameters were assigned to two common spring-damper-models. The two spring-damper-models – subjected to dynamic loads – were analysed using dynamic analysis. The differences in dynamic responses of the two models was computed and compared to the differences in dynamic bridge responses obtained before. The correlation of the differences was also examined.

With the help of results obtained using the methods described above, a relation between bridge parameters and the differences in dynamic bridge responses between the single-body and the multi-body model was derived. Depending on the computational effort made, this relation can be used to either estimate or to predict the differences in dynamic bridge responses between the single-body and the multi-body model. It is concluded that the results obtained using the spring-damper-models allow for a gross estimate of the differences in dynamic bridge responses between the single-body and the multi-body model.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation der vorliegenden Arbeit	11
1.2	Stand der Technik	12
1.2.1	Dynamische Analyse einfeldriger Eisenbahnbrücken	12
1.2.2	Überblick über vorhandene Publikationen	12
1.3	Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	14
1.4	Umfang der vorliegenden Arbeit	15
2	Mechanische Grundlagen	16
2.1	Modellbildung Brücken	16
2.1.1	Verwendete Strukturmechanische Theorie	16
2.1.2	Mechanisches Modell	17
2.2	Modellbildung Züge	20
2.2.1	Moving Load Model	20
2.2.2	Detailed Interaction Model	21
2.3	Kritische Geschwindigkeiten aus Resonanzphänomenen	24
2.3.1	Bestimmungsformel für kritische Geschwindigkeiten	26
2.3.2	Änderung der kritischen Geschwindigkeiten bei DIM Berechnungen	26
2.4	Eingangsgrößen für dynamische Berechnungen	27
2.4.1	Eingangsgrößen für MLM Berechnungen	27
2.4.2	Eingangsgrößen für DIM Berechnungen	27
2.5	MLM versus DIM - Eine Gegenüberstellung	29
2.5.1	Zusammenfassung MLM	29
2.5.2	Zusammenfassung DIM	29
2.6	Numerische Lösung der Differentialgleichungen bei MLM und DIM	30
3	Methode zur Parameterfelderzeugung	31
3.1	Stochastische Grundlagen	32
3.1.1	Verwendete Schätzer	32
3.1.2	Verwendete Verteilungsfunktionen	33
3.1.3	Verteilungstests	33
3.1.4	Nataf Modell	34
3.2	Statistische Analyse von Brückendaten	37
3.2.1	Ermittlung statistischer Kenngrößen aus Brückendaten	37
3.2.2	Histogramme	39
3.3	Erzeugung des Parameterfeldes	40
3.3.1	Gewählte Verteilungsfunktionen	40
3.3.2	Verteilungstests an gewählten Verteilungsfunktionen	42
3.3.3	Rechtfertigung für die Annahme einer lognormalverteilten Dämpfung	45
3.3.4	Anwendung des Nataf Modells zur Parameterfelderzeugung	46

4	Dynamische Berechnung	55
4.1	Festlegung der Eingangsgrößen	55
4.1.1	Festlegung der Brückenparameter	55
4.1.2	Festlegung der Zugparameter	56
4.1.3	Festlegung weiterer Eingangsgrößen	58
4.2	Programmstruktur und Ausgabegrößen	59
4.3	Methodik zur Ergebnisauswertung	61
4.3.1	Ergebnisauswertung für kritische Geschwindigkeiten zwischen 100 und 350 km/h	61
4.3.2	Ergebnisauswertung für die erste kritische Geschwindigkeit	63
4.3.3	Ergebnisauswertung für weitere kritische Geschwindigkeiten	63
4.4	Ergebnisdarstellung	64
5	Berechnungsergebnisse	65
5.1	Berechnungsergebnisse für kritische Geschwindigkeiten zwischen 100 und 350 km/h	66
5.1.1	Erste Zugkonfiguration: acht Reisezugwagen	66
5.1.2	Zweite Zugkonfiguration: sieben Reisezugwagen mit Lok	70
5.2	Berechnungsergebnisse für die erste kritische Geschwindigkeit	75
5.2.1	Erste Zugkonfiguration: acht Reisezugwagen	75
5.2.2	Zweite Zugkonfiguration: sieben Reisezugwagen mit Lok	79
5.3	Berechnungsergebnisse für weitere kritische Geschwindigkeiten	83
5.4	Einschränkung des Definitionsbereichs der linearen Interpolationsfunktion	83
5.5	Anwendungsbeispiel	89
6	Feder-Dämpfer-Modelle	92
6.1	SDOF – Einmassenschwinger	92
6.2	MDOF – Zweimassenschwinger	94
6.3	Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen – SDOF-MDOF versus MLM-DIM	96
6.3.1	Gegenüberstellung für die erste kritische Geschwindigkeit zwischen 100 und 350 km/h	97
6.3.2	Gegenüberstellung für die erste kritische Geschwindigkeit	101
6.3.3	Anwendungsbeispiel	105
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	108
7.1	Schlussfolgerungen	108
7.1.1	Erste Kernfrage – Parameterfeld	108
7.1.2	Zweite Kernfrage – Brückenparameter und Änderung der Tragwerksantwort	109
7.1.3	Dritte Kernfrage – Abstraktion mittels Feder-Dämpfer-Modellen	109
7.2	Ausblick	110
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	113
	Symbolverzeichnis	115
	Anhang A	120
	Program Code zur Erzeugung des Parameterfeldes	120
	Anhang B	137
	Program Code zur Ergebnisauswertung	137

Anhang C	169
Program Code zur Einschränkung des Definitionsbereichs	169
Anhang D	175
Program Code zur Berechnung der Feder-Dämpfer-Modelle	175
Anhang E	198
Tabellarische Auswertung für die erste Zugkonfiguration	198
Anhang F	201
Tabellarische Auswertung für die zweite Zugkonfiguration	201