

# Neues dynamisches Lastmodell für die dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken - Modellbeschreibung und vereinfachte Prognosemodelle

Andrei Firus<sup>1</sup>, Maciej Kwapisz<sup>2</sup>, Michael Reiterer<sup>3</sup>, Maximilian Rupp<sup>4</sup>, Roman Kemmler<sup>5</sup>, Geert Lombaert<sup>6</sup>, Alois Vorwagner<sup>2</sup>, Jens Schneider<sup>4</sup>

<sup>1</sup>isea tec GmbH, Friedrichshafen

<sup>2</sup>AIT Austrian Institute of Technology, Wien

<sup>3</sup>REVOTEC zt gmbh, Wien

<sup>4</sup>Institut für Statik und Konstruktion, Technische Universität Darmstadt

<sup>5</sup>Fakultät Bauingenieurwesen, HTWG Konstanz

<sup>6</sup>Structural Mechanics Section, KU Leuven

**Zusammenfassung:** Die neuesten Fortschritte in der Fahrzeugtechnik mit Bezug auf die Radsatzanordnung, Zuggeschwindigkeiten und Radsatzlasten haben dazu geführt, dass das derzeit gültige Norm-Lastmodell für die dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken (HSLM) die tatsächlich verkehrenden Züge nicht mehr vollständig abdeckt. Daher bestand die Notwendigkeit, eine umfassende Untersuchung zur Entwicklung eines neuen dynamischen Lastmodells für dynamische Berechnungen von Eisenbahnbrücken durchzuführen. Diese erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojektes des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung (DSZF). Der vorliegende Beitrag gibt einen kurzen Einblick in das neu entwickelte dynamische Lastmodell, das dem heutigen und weitgehend zukünftigen Fahrzeugbestand gerecht wird, und fokussiert sich anschließend auf die Darstellung einer vereinfachten Methode zur Prognose der maximalen Beschleunigungsantwort einer Eisenbahnbrücke unter Einwirkung des neuen Lastmodells, die auf Basis des Antwortspektrumprinzips entwickelt wurde.

## 1 Einführung

Der Eurocode DIN EN 1991-2 [1] enthält die für dynamische Berechnungen der Zugüberfahrten anzusetzenden Hochgeschwindigkeitsmodellzüge HSLM-A und HSLM-B, die Ende

der 1990er Jahre entwickelt wurden. Neue Fahrzeugkonzepte, Wagenkastenlängen und Drehgestellabstände sowie immer schneller fahrende (Güter-)Züge führen dazu, dass die aktuell gültigen Modellzüge aus der Norm unzureichend für die dynamische Beurteilung von Eisenbahnbrücken sind. Es besteht daher die dringende Notwendigkeit zur Entwicklung neuer dynamischer Lastmodelle, welche die Neuerungen der Fahrzeugindustrie sowie verkehrende Betriebszüge abdecken. Dies ist das Ziel des vorliegenden Projekts gewesen, das im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung bearbeitet worden ist. Dieser Beitrag gibt im Abschnitt 2 einen kurzen Einblick in das während dieses Projekts neu entwickelte dynamische Lastmodell. Dieses besteht aus einem Set von Modellzügen, die über den Ansatz der bewegten Lasten auf das Strukturmodell aufgebracht werden. Die Berechnung der Strukturantworten kann über modale Superposition oder direkte Integration erfolgen [7].

Neben der dynamischen Berechnung über Zeitschrittintegration, können auch vereinfachte Methoden angewendet werden, die eine schnelle überschlägige Ermittlung der Strukturantworten erlauben. Hierfür bietet sich das aus dem Erdbebeningenieurwesen bekannte Antwortspektrenverfahren [7] an. Erste Ansätze von Antwortspektren im Kontext von Eisenbahnbrücken wurden durch [11, 6, 10, 4] vorgestellt. Der Ansatz des vorliegenden Beitrags grenzt sich von den genannten Quellen insofern ab, dass er die Entwicklung eines Antwortspektrums für Beschleunigungen auf Basis einer Großrechenserie anvisiert, wobei sich das Antwortspektrum anhand von einfachen geschlossenen analytischen Gleichungen beschreiben lässt. Damit entsteht ein für die Ingenieurpraxis leicht anwendbares und einfach automatisierbares Verfahren zur Ermittlung der maximalen Beschleunigungsantwort in Feldmitte einer Einfeldträgerbrücke.

## 2 Das neu entwickelte dynamische Lastmodell

Basis für die Entwicklung der Modellzüge des neuen dynamischen Lastmodells war eine umfangreiche Zugsammlung der aktuell in Europa verkehrenden Betriebszüge, die aus über 3.000 Personen- und 140.000 Güterzügen besteht. Unter Einbezug von möglichen künftigen Entwicklungstrends wurde mit Anwendung der DER- und LIR-Spektren sowie der dynamischen Signatur [2] ein Set dynamisch relevanter Betriebszüge abgeleitet. Zusätzlich wurde anhand des Brückenportfolios der DB und ÖBB ein parametrisiertes Brückenset definiert.

Aus den vorausgewählten dynamisch relevanten Zügen und unter Heranziehung des generischen Brückensets wurde jeweils eine Umhüllungsfläche für Personen- und Güterzüge berechnet. Diese ist als Referenz im Rahmen eines Optimierungsprozesses verwendet worden, mit dem Ziel, die optimale Konfiguration der neuen Modellzüge zu finden, die die Referenzflächen am besten reproduziert. Als Ergebnis der Optimierungsprozedur ergeben sich mehrere Modellzugsets mit konventionellen und Jakobs-Drehgestellen (siehe Abb. 1). Letztlich konnten so ein neues Lastmodell für Personenzüge (DLM-PT), ein Güterzuglastmodell (DLM-FT) sowie mit Hilfe eines iterativ ermittelten Abminderungsfaktors auch ein Lastmodell für leichte, schnell fahrende Güterzüge (DLM-FT light) entwickelt werden. Im vorliegenden Beitrag wird nur das DLM-PT aufgegriffen, deren Beschreibung in den Tab. 1 und 2 sowie den Abb. 1 und 2 angegeben ist. Die Modellzüge mit Parameter  $d$  in Tab. 1 besitzen eine konventionelle Drehgestellkonfiguration. Die restlichen Modellzüge weisen Jakobs-Drehgestelle auf (siehe Abb. 1).

Modellzug	$d$	$P$	$b$	$D$	Länge des Modellzugs [m]
DLM-PT 01		180	2,5	15	232,5
DLM-PT 02		200	2,5	16,5	235,5
DLM-PT 03		130	1,8	17	394,5
DLM-PT 04		180	3,2	18	397,5
DLM-PT 05		170	5,6	18	397,5
DLM-PT 06	2,6	225	7,1	19	399,8
DLM-PT 07	2,5	225	7,3	20	398,8
DLM-PT 08		190	3	21	394,5
DLM-PT 09		170	2,1	22	389,5
DLM-PT 10		180	1,9	23	382,5
DLM-PT 11	3	225	8,6	24	399,0
DLM-PT 12		225	1,8	25	387,5
DLM-PT 13	2,6	190	8,1	26	376,8
DLM-PT 14	2	175	10,5	26,5	383,0
DLM-PT 15		225	1,8	27	388,5
DLM-PT 16		200	4,9	28	373,5
DLM-PT 17	2,6	225	9	29	386,8

Tabelle 1: Konfiguration der Modellzüge DLM-PT 1 bis DLM-PT 17

### 3 Antwortspektrenmethode

#### 3.1 Grundüberlegungen

Die Grundüberlegungen zum entwickelten Antwortspektrenansatz zur vereinfachten Ermittlung der Beschleunigungsantwort von Eisenbahnbrücken infolge Zugüberfahrt werden im Folgenden in aller Kürze anhand der modalen Bewegungsgleichung veranschaulicht:

$$\ddot{\alpha}_j(t_i) + 2 \cdot \xi_j \cdot \omega_j \cdot \dot{\alpha}_j(t_i) + \omega_j^2 \cdot \alpha_j(t_i) = \frac{\sum_{k=1}^{m_F} F_k \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot v \cdot t_i}{L}\right)}{M_j} \quad (1)$$

$\alpha_j$  ist die modale Koordinate der  $j$ -ten Eigenform.  $\xi_j$  und  $M_j$  stellen das dazugehörige modale Dämpfungsmaß und die modale Masse dar.  $m_F$  beschreibt die Anzahl der sich zum Zeitpunkt  $t_i$  auf der Brücke befindlichen Einzelkräfte  $F_k$ . Weiterhin ist  $v$  die Zuggeschwindigkeit und  $L$  die Brückenspannweite, während  $\omega_j$  die  $j$ -te Eigenkreisfrequenz der unter-

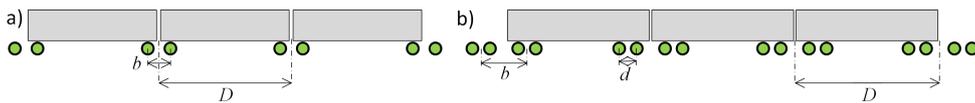
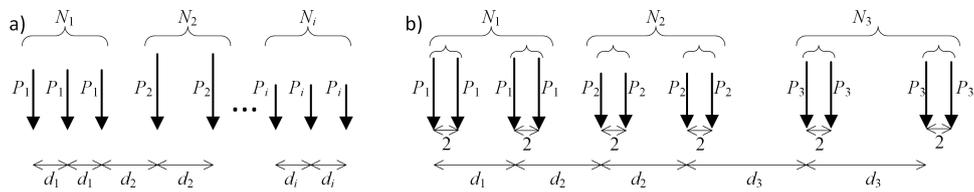


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Zugs mit Jakobs-Drehgestellen (Teilbild a) und mit konventionellen Drehgestellen (Teilbild b)



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung DLM-PT 18 und DLM-PT 19 (a) und DLM-PT 20 (b)

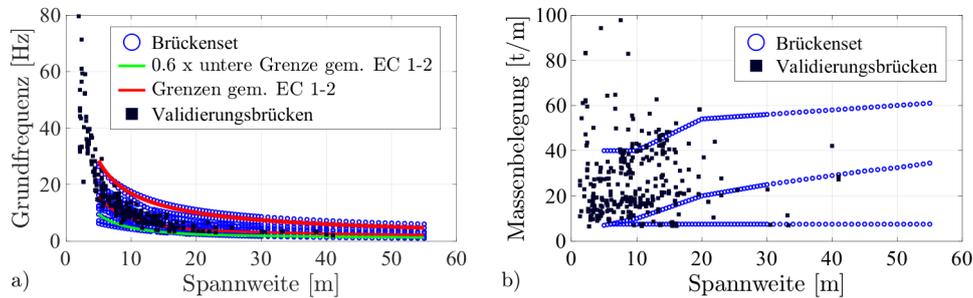
Achsgruppe	DLM-PT-18			DLM-PT-19			DLM-PT-20		
	$N$	$d$	$P$	$N$	$d$	$P$	$N$	$d$	$P$
1	8	1,90	120	10	3,80	155	9	7,85	150
2	10	3,05	130	14	6,00	140	18	8,25	120
3	11	2,25	150	7	4,15	190	7	11,5	140
4	14	3,25	135	10	6,40	125			
5	13	2,45	140	5	4,85	165			
6	6	3,45	170	10	6,80	145			
7	8	2,70	140	5	5,45	130			

**Tabelle 2:** Konfiguration der Modellzüge DLM-PT 18 bis DLM-PT 20

suchten Einfeldträgerbrücke darstellt. Gl. 1 verdeutlicht, dass sich die (modale) Masse – im Gegensatz zur Antwortspektrenherleitung bei Fußpunkterregung im Erdbebeningenieurwesen [7] – hier nicht heraus kürzt, sondern als Skalierungsparameter wirkt. Führt man ferner die Anregungswellenlänge  $\lambda = v/f_1$  als Verhältnis zwischen Zuggeschwindigkeit und erster Eigenfrequenz der Brücke ein, kann unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus Gl. 1 geschlossen werden, dass alle Systeme mit gleicher Spannweite, gleichem Dämpfungsmaß und gleicher Anregungswellenlänge bei Anregung eines gewissen Lastzugs identische bzgl. der modalen Masse skalierte Beschleunigungen liefern. Eine zweidimensionale Darstellung der Antwortspektren, wie im Erdbebeningenieurwesen üblich, ist in diesem Fall nicht zweckmäßig. Hingegen ist eine dreidimensionale Darstellung für jedes Dämpfungsmaß erforderlich: die auf die modale Masse skalierte Beschleunigung wird über die Wellenlänge der Anregung  $\lambda$  und die Spannweite  $L$  aufgetragen [3]. Die Grundidee des entwickelten Antwortspektrumsansatzes besteht also darin, die maximale Beschleunigung mit Hilfe einfach anwendbarer Gleichungen, die Funktionen der modalen Masse, der Eigenfrequenz, des Dämpfungsmaßes und der Spannweite der Struktur sind, sowie eines gegebenen Geschwindigkeitsbereichs bei Anregung durch die 20 Modellzüge zu bestimmen.

### 3.2 Datengrundlage

Die Entwicklungen basieren auf Ergebnissen einer Großrechenserie. Hierzu wurde eine generische Brückenpopulation mit Spannweiten zwischen 5 und 55 m und realistischen Strukturparametern definiert. Die Beschreibung der Brückenparameter (Eigenfrequenz und Massenbelegung) ist in Abb. 3 angegeben. Diese beinhaltet auch die Gegenüberstellung eines realen Brückensets, das im Abschnitt 3.5 zur Validierung herangezogen wird.

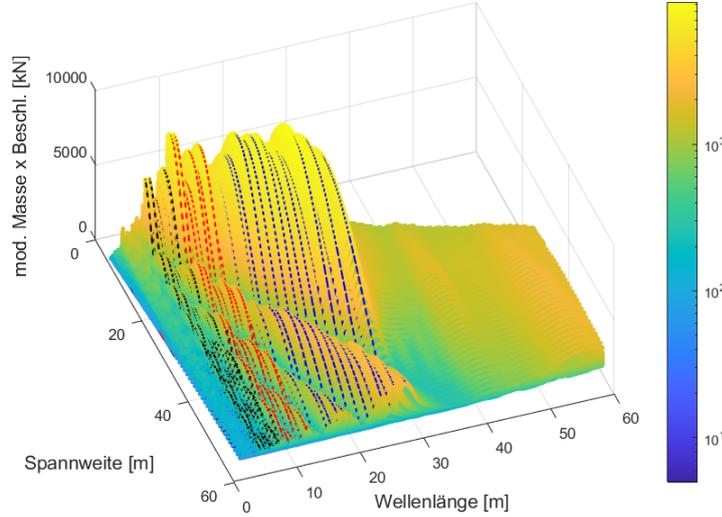


**Abbildung 3:** Eigenfrequenzen und Massenbelegungen der berücksichtigten Brücken

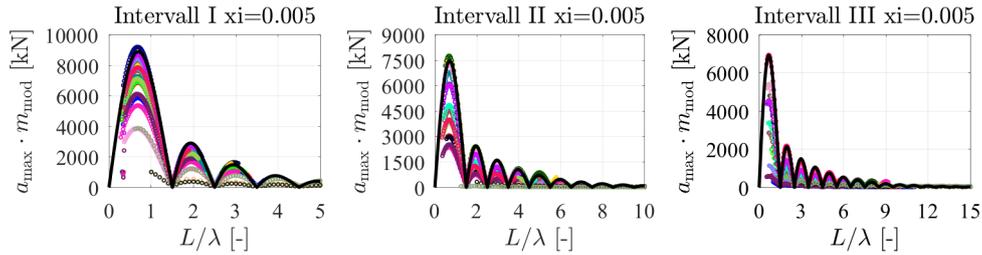
Insgesamt ergeben sich 1368 Brückenkombinationen, die für 8 Dämpfungsmaße untersucht wurden. Der betrachtete Geschwindigkeitsbereich wurde mit 60–420 km/h und einer Schrittweite von 1 km/h gewählt. Unter Berücksichtigung der 20 Modellzüge ergibt sich eine Gesamtanzahl von ca. 80 Mio. Zugüberfahrten, die mittels dynamischer Analyse berechnet wurden. Die Ergebnisfläche der bzgl. der modalen Masse skalierten Beschleunigungen für das Dämpfungsmaß  $\xi = 0,5\%$  ist in der Abb. 4 dargestellt. Die gestrichelten Linien stellen dabei die Einhüllende der Ergebnisfläche entlang der kritischen Wellenlängen dar. Die in Abb. 4 gezeigten Ergebnisse ergeben sich lediglich mit Beteiligung der ersten Eigenform. Durch die Annahme, dass die dynamische Berechnung einer Eisenbahnbrücke in der Regel für einen gewissen Geschwindigkeitsbereich durchgeführt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die maximalen Antworten bei einer kritischen Wellenlänge auftreten. In diesen Bereichen ist die Antwort durch die ersten Eigenform dominiert.

### 3.3 Antwortspektrum

Bei der Entwicklung stellt sich die Aufgabe, die in Abb. 4 dargestellten Einhüllenden mit Formeln zu beschreiben, um eine vereinfachte Ermittlung der maximalen Beschleunigung zu erlauben. Hierfür eignet sich die zweidimensionale Darstellung über die auf die jeweilige kritische Wellenlänge bezogene Spannweite ( $\bar{\zeta} = L/\lambda$ ). Die Ergebnisse für  $\xi = 0,5\%$  sind in Abb. 5 exemplarisch dargestellt. Es wurde eine Intervallaufteilung eingeführt, die die jeweils 20 Einhüllenden der ersten drei Resonanzgeschwindigkeiten separat betrachtet. Durch den Bezug der Spannweite auf die jeweilige kritische Wellenlänge wird sichergestellt, dass die in Abb. 4 ersichtlichen Auslöschungseffekte bei gleicher dimensionsloser Koordinate auftreten [8]. Der erste Auslöschungspunkt tritt bei  $L/\lambda = 1,5$  auf, alle weiteren entstehen in Abständen von 1. Im Sinne der Entwicklung anwendungsfreundlicher Gleichungen zur Beschreibung der Antworten, ist es hierbei erforderlich, zwei Bereiche entlang der dimensionslosen bezogenen Spannweite zu definieren: Bereich I für  $\bar{\zeta} = L/\lambda \leq 1,5$  und Bereich II für  $\bar{\zeta} = L/\lambda > 1,5$ . Die untersuchten Dämpfungsmaße haben eine annähernd exponentielle Abhängigkeit ergeben, die in Abb. 6 dargestellt ist (die Parameter  $s_1$  und  $s_2$  in Abb. 6 entsprechen jeweils dem Term  $A \cdot e^{B \cdot \xi_1} / \xi_1^C$  in Gl. 2 und 3). Unter deren Berücksichtigung ergeben sich für die Bereiche I und II die folgenden Regressionsgleichungen zur Ermittlung der maximalen Beschleunigungsantworten in Feldmitte:



**Abbildung 4:** Auf die modale Masse skalierte Beschleunigungen in der 1. Eigenform,  $\xi = 0,5 \%$



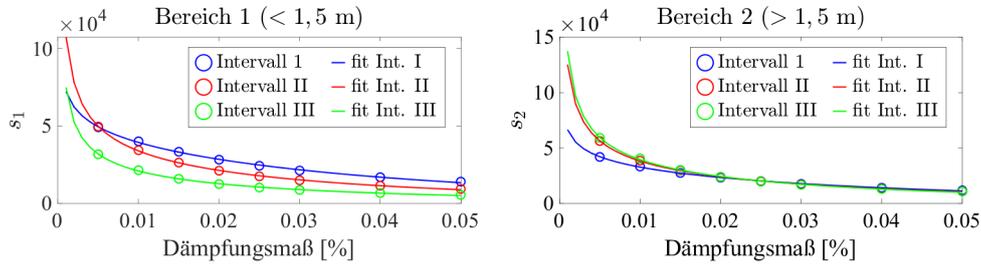
**Abbildung 5:** Einhüllenden der auf die modale Masse skalierten Beschleunigungen in den drei Intervallen an den kritischen Wellenlängen für das Dämpfungsmaß  $\xi = 0,5 \%$

$$a_{AS,1}(\bar{\zeta}) = \frac{A \cdot e^{B \cdot \xi_1}}{\xi_1^C} \cdot \varphi_{DLM-PT} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{1,5} \cdot \bar{\zeta}\right)}{t_1 + \bar{\zeta}^2} \cdot \frac{1}{M_1} \quad \text{für Bereich I} \quad (2)$$

$$a_{AS,2}(\bar{\zeta}) = \frac{A \cdot e^{B \cdot \xi_1}}{\xi_1^C} \cdot \varphi_{DLM-PT} \cdot \left| \frac{\cos(\pi \cdot \bar{\zeta})}{1 - t_2 \cdot e^{p_2 \cdot \bar{\zeta}}} \right| \cdot \frac{1}{M_1} \quad \text{für Bereich II} \quad (3)$$

Die Parameter  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  und  $p_2$  sind den Tab. 3 und 4 zu entnehmen. Der Reduktionsfaktor  $\varphi_{DLM-PT}$  berücksichtigt die maximale zu berücksichtigende Wellenlänge und die dadurch eventuell entstehenden Antwortreduktionen. Die Werte von  $\varphi_{DLM-PT}$  können für alle untersuchten Dämpfungsmaße aus Abb. 7 abgelesen werden. In [5] findet sich eine entsprechende tabellarische Aufstellung.

Die Gl. 2 und / oder 3 sind in jedem Intervall für alle Werte  $\bar{\zeta}$  auszuwerten, die größer als die minimal zu berücksichtigende bezogene Spannweite  $\bar{\zeta}_{min,i}$  sind. Diese ergibt sich zu:



**Abbildung 6:** Gefittete Exponentialkurven zur Erfassung des Dämpfungseinflusses

Ber.	Intervall I			Intervall II			Intervall III		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	20.156	-19,57	0,188	5.273,7	-16,15	0,439	2.531,0	-15,98	0,493
2	12.725	-17,12	0,242	5.248,7	-14,36	0,461	4.945,4	-15,18	0,483

**Tabelle 3:** Parameter  $A$ ,  $B$ ,  $C$  der Gl. 2 und 3

$$\bar{\zeta}_{\min,i} = \frac{L}{\lambda_{\text{int,max},i}} \quad (4)$$

Die intervallspezifische Wellenlänge  $\lambda_{\text{int,max},i}$  kann gleich der maximal zu berücksichtigenden Wellenlänge  $\lambda_{\text{max}} = v/f_1$  angenommen werden, solange  $\lambda_{\text{max}}$  kleiner als die im betroffenen Intervall größte kritische Wellenlänge ist. Sollte  $\lambda_{\text{max}}$  größer als diese sein, dann wird die größte kritische Wellenlänge in dem betrachteten Intervall angenommen. Diese beträgt 29 m für das Intervall I, 14,5 m für das Intervall II und 9,67 m für das Intervall III. Die maximale Beschleunigungsantwort ergibt sich als Maximalwert der Auswertungen der Gl. 2 und 3 für alle drei Intervalle.

### 3.4 Anwendungsbeispiel

Im Folgenden wird die Anwendung der entwickelten Antwortspektrenmethode am Beispiel einer in der Entwicklung nicht verwendeten Brücke aufgezeigt. Die Beispielbrücke weist eine Spannweite  $L = 15$  m, eine Massenbelegung  $\mu = 48,19$  t/m und ein Dämpfungsmaß  $\xi = 1,85$  % auf. Die dazugehörige erste Eigenfrequenz  $f_1$  ist 6,12 Hz. Der berücksichtigte Geschwindigkeitsbereich ist 60-420 km/h (d.h.  $v_{\text{max}} = 116,67$  m/s). Die maximale zu berücksichtigende Wellenlänge lässt sich wie folgt ermitteln:  $\lambda_{\text{max}} = v_{\text{max}}/f_1 = 19,07$  m.

	Intervall I	Intervall II	Intervall III
$t_1$	5,00	6,12	4,06
$t_2$	4,39	10,91	14,63
$p_2$	0,64	0,40	0,34

**Tabelle 4:** Parameter  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $p_2$  der Gl. 2 und 3

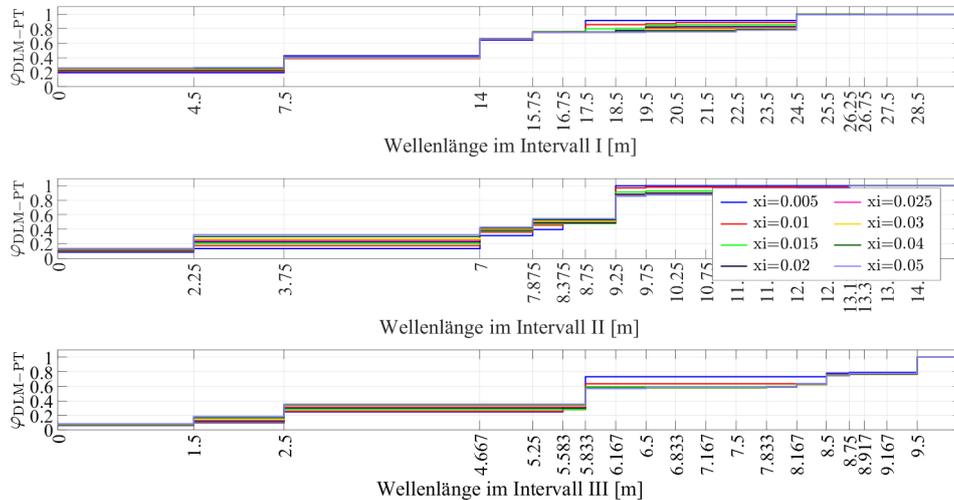


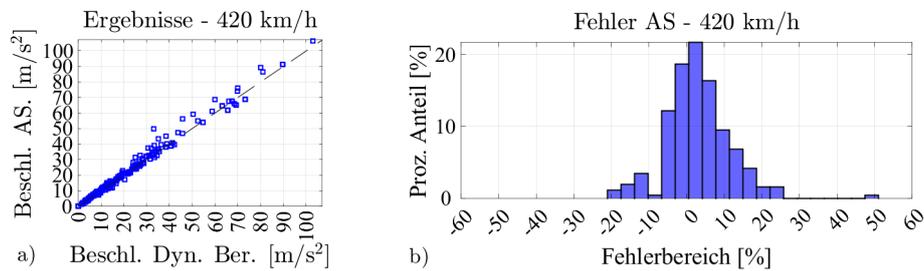
Abbildung 7: Reduktionsfaktor  $\varphi_{\text{DLM-PT}}$

Daraus ergeben sich gem. Gl. 4 die minimalen bezogenen Spannweiten in den drei Intervallen zu:  $\zeta_{\text{min,I}} = 15/19,07 = 0,787$ ,  $\zeta_{\text{min,II}} = 15/14,50 = 1,034$  und  $\zeta_{\text{min,III}} = 15/9,67 = 1,551$ . Für die Intervalle I und II sind Bereich 1 und Bereich 2 zu berücksichtigen. Für das Intervall III reicht eine Auswertung des zweiten Bereichs aus. Die Reduktionsfaktoren sind:  $\varphi_{\text{DLM-PT,I}} = 0,779$ ,  $\varphi_{\text{DLM-PT,II}} = 1,00$  und  $\varphi_{\text{DLM-PT,III}} = 1,00$  (s. Abb. 7).

Bei Auswertung von Gl. 2 ergeben sich folgende max. Beschleunigungen:  $a_{\text{max,AS,1,I}} = 11,36 \text{ m/s}^2$  für das Intervall I und  $a_{\text{max,AS,1,II}} = 7,19 \text{ m/s}^2$  für das Intervall II. Im zweiten Bereich ( $\zeta > 1,5$ ) ergeben sich gem. Gl. 3:  $a_{\text{max,AS,2,I}} = 3,63 \text{ m/s}^2$  für das Intervall I,  $a_{\text{max,AS,2,II}} = 3,04 \text{ m/s}^2$  für das Intervall II und  $a_{\text{max,AS,2,III}} = 2,56 \text{ m/s}^2$  für das Intervall III. Die gesuchte maximale Brückenbeschleunigung in Feldmitte ergibt sich somit nach dem Antwortspektrumansatz als Maximum aller Intervallmaxima zu:  $a_{\text{max,AS}} = 11,36 \text{ m/s}^2$ . Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit dem sich aus der vollen dynamischen Berechnung ergebenden Wert von  $11,27 \text{ m/s}^2$ . Dieser wurde unter Berücksichtigung von drei Eigenformen gem. [1, 9] ermittelt. Das Antwortspektrumverfahren überschätzt im untersuchten Fall die Beschleunigungsantwort um ca. 1 %.

### 3.5 Validierung

Zur Validierung wurde die entwickelte Methode an insgesamt 344 Brückenmodellen automatisiert angewendet (s. Abb. 3). Die Brücken mit Spannweiten von weniger als 5 m wurden hierbei nicht betrachtet, da die Methode nur für Brücken mit Spannweiten zwischen 5 und 55 m entwickelt wurde (s. Abschnitt 3.2). Die Ergebnisse sind in Abb. 8 dargestellt. Teilbild a stellt die Beschleunigungen, die sich aus der Auswertung des Antwortspektrums und der vollen dynamischen Berechnung ergeben, gegenüber. Im Falle einer perfekten Übereinstimmung liegen die Ergebnisse exakt auf der Winkelhalbierenden, die durch eine gestrichelte



**Abbildung 8:** Abweichungen der Antwortspektrumergebnisse für Brücken mit Spannweite größer als 5 m: a) Beschleunigungskorrelation; b) Histogramm der rel. Abweichungen

Linie dargestellt ist. Das Teilbild b illustriert die prozentualen Anteile der sich in unterschiedlichen Wertebereichen ergebenden relativen Abweichungen in Form eines Histogramms. Es ist ersichtlich, dass die mit dem Antwortspektrum erhaltenen Ergebnisse unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsbands zwischen 60 und 420 km/h in sehr guter Übereinstimmung mit den entsprechenden Ergebnissen der vollständigen dynamischen Berechnung sind. Die relativen Abweichungen liegen zwischen ca.  $-20\%$  und  $+25\%$ , wobei ca.  $90\%$  der Werte im Intervall  $-7\%$  bis  $+15\%$  enthalten sind.

## 4 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Ergebnisse bestätigen anhand eines Sets von 344 realen Eisenbahnbrücken, dass der entwickelte Antwortspektrenansatz die Ermittlung der infolge Zugüberfahrt sich ergebenden maximalen Beschleunigungsantwort in Feldmitte eines Brückenbauwerks (einfeldrig, beidseitig gelenkig gelagert) mit wenig Aufwand und ausreichender Genauigkeit erlaubt. Die Methode erfordert die Angabe der Brückeneigenfrequenz, der Spannweite, der modalen Masse, des Dämpfungsmaßes sowie des zu berücksichtigenden Geschwindigkeitsbandes. Diese Größen werden in einen sehr einfachen Formelapparat eingesetzt, um die maximale Beschleunigungsantwort einer Eisenbahnbrücke infolge Zugüberfahrt zu ermitteln. Die Ergebnisse der entwickelten Antwortspektrenmethode weichen für das untersuchte Geschwindigkeitsband um maximal bis zu ca.  $\pm 25\%$  von den Ergebnissen der vollen dynamischen Berechnung ab. Im Allgemeinen können die Ergebnisse als sehr zufriedenstellend beurteilt werden, vor allem wenn der Aspekt der unkomplizierten Anwendung und die Zielsetzung als einfache Methode zur Plausibilisierung dynamischer Berechnungsergebnisse und groben Abschätzung der Beschleunigungswerte berücksichtigt werden.

## Danksagung

Die Arbeiten, die diesem Beitrag zugrunde liegen, wurden im Auftrag des BMDV (FE-Nr. 2019-T-1-1217) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich bei den Autoren. Die Autoren danken dem Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim

Eisenbahn-Bundesamt und den Mitgliedern des Begleitkreises: EBA, DB Netz AG und ÖBB-Infrastruktur AG und der Arbeitsgruppe Fahrzeug- und Brückendynamik für die hervorragende Zusammenarbeit und die wertvollen fachlichen Diskussionen.

## Literatur

- [1] DIN EN 1991-2: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010*. 2010
- [2] EUROPEAN RAIL RESEARCH INSITUTE: ERRI D214/RP 6 Eisenbahnbrücken für Geschwindigkeiten >200 km/h - Berechnung einfach gelagerter Brücken bei der Durchfahrt eines Zugverbandes. 1999. – Forschungsbericht
- [3] GRUNERT, G. : Data and evaluation model for the description of the static–dynamic interface between trains and railway bridges. In: *Engineering Structures* 262 (2022), Nr. November 2021, 114335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114335>. – DOI 10.1016/j.engstruct.2022.114335. – ISSN 18737323
- [4] HAUSER, A. ; ADAM, C. : Abschätzung der Schwingungsantwort von Brückentragwerken für Hochgeschwindigkeitszüge. In: *D-A-CH Tagung*. Wien, 2007
- [5] KOHL, A. ; FIRUS, A. ; RUPP, M. ; SCHNEIDER, J. ; KWAPISZ, M. ; VORWAGNER, A. ; REITERER, M. ; VOSPERNIG, M. ; TUKHBATULLIN, R. ; LOMBAERT, G. : Forschungsprojekt Dynamisches Lastmodell - Abschlussbericht Teil III: Vereinfachte Verfahren / Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung. 2023. – Forschungsbericht
- [6] MÄHR, T. ; FINK, J. : Adoption of the response spectra method to calculate the dynamic response of railway-bridges. In: *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas* 3 (2010), Nr. 4, S. 636–637. <http://dx.doi.org/10.2749/222137810796063058>. – DOI 10.2749/222137810796063058. ISBN 9783857481222
- [7] PETERSEN, C. ; WERKLE, H. : *Dynamik der Baukonstruktionen*. 2. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2017. – 1748 S. – ISBN 9783834814593
- [8] PÜTHE, L. : *Zur Entwicklung eines Antwortspektrenverfahrens für Eisenbahnbrücken von Hochgeschwindigkeitsstrecken*, HTWG Konstanz, Masterarbeit, 2021
- [9] RIL 804: *Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten (DB Netz AG)*. 2013
- [10] SAVIN, E. : Dynamic amplification factor and response spectrum for the evaluation of vibrations of beams under successive moving loads. In: *Journal of Sound and Vibration* 248 (2001), Nr. 2, S. 267–288. <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.2001.3787>. – DOI 10.1006/jsvi.2001.3787. – ISSN 0022460X
- [11] SPENGLER, M. ; GRAUBNER, C.-A. : Vorschlag für ein Antwortspektrum zur Erfassung der Dynamik von Eisenbahnbrücken. In: *Bauingenieur* 84 (2009), S. 1–9