

dynamische Beurteilung der zuginduzierten Schwingungen von Eisenbahnbrücken

Michael Reiterer, REVOTEC zt gmbh
Roman Geier, Schimetta Consult
Sebastian-Zoran Bruschetini-Ambro, ÖBB-Infrastruktur AG
Alfred Hüngsberg, ÖBB-Infrastruktur AG
Thomas Petraschek, ÖBB-Infrastruktur AG

Einleitung

Im Jahr 2014 wurde von der ÖBB-Infrastruktur AG das **Projekt „Dynamik ÖBB-Bestandsbrücken“** zur Ermittlung und **Beurteilung der zuginduzierten Schwingungen von 321 Eisenbahnbrücken** initiiert. Das Projekt wurde vom **Konsortium REVOTEC zt gmbh und Schimetta Consult** ausgeführt. Ziel des Projektes war es, für künftig auf dem hochrangigen Streckennetz der ÖBB verkehrende neue Züge, eine rasche Prüfung der Gefahr von möglicherweise auftretenden Resonanzerscheinungen bei Zugüberfahrt durchzuführen. Die bei Zugüberfahrt resultierenden Brückenschwingungen und dadurch bedingten möglichen Destabilisierungen des Schotterbettes und/oder unzulässigen dynamischen Brückenendverdrehungen sowie tragsicherheitskritischen Schnittgrößen der Brückentragwerke sollten identifiziert und beurteilt werden. Betrachtet wurden nur Eisenbahnbrücken des hochrangigen Streckennetzes der ÖBB (Geschwindigkeit der Züge am Ort der Brücke $v_{\max} > 160$ km/h).

Anlass des Projekts

Anlass des Projekts war die für das Jahr 2017 geplante Zulassung des von der Firma Siemens neu entwickelten Zugtyps ICx im hochrangige Streckennetz der ÖBB. Es galt zu prüfen, ob der Zugtyp ICx aufgrund seiner Zuglänge und Achskonfiguration eine Resonanzgefahr für die bestehenden Eisenbahnbrücken darstellt. Es stellte sich daher die Aufgabe, die aus der Zugüberfahrt resultierenden Brückenschwingungen vorab rechnerisch zu ermitteln und in Bezug auf die Gefahr der Destabilisierung des Schotters sowie der Einhaltung von Grenzwerten der Brückenendverdrehung sowie der sich ergebenden dynamischen Schnittgrößen zu beurteilen.

Einzuhaltende Grenzwerte

Als zulässige vertikale Tragwerksbeschleunigung wurde für die ÖBB-Bestandsbrücken gemäß „ONR 24008 – Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken (Ausgabe: 2014-03-01)“, der Wert $a_{\text{zul}} \leq 6$ m/s² festgelegt. Die zulässige Brückenendverdrehung wurde gemäß „Richtlinie Dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken (Ausgabe: 2011-02-01)“ mit $\Phi_{\text{End,grenz}} = 6,7$ ‰ festgelegt. Bei den dynamischen Schnittgrößen wurden als Grenzwerte die bei der statischen Berechnung gemäß „EN 1991-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken (Ausgabe: 2012-03-01)“ zugrunde gelegten Lastmodelle LM 71 und SW/2 (bei Einfeldträgerbrücken) bzw. zusätzlich SW/0 bei Durchlaufträgerbrücken sich ergebenden statischen Schnittgrößen herangezogen. Als Klassifizierungsfaktor wurde bei den Lastmodellen LM 71 und SW/0 $\alpha = 1,21$ angesetzt. Bei dem Lastmodell SW/2 wurde $\alpha = 1,0$ angesetzt.

Beschreibung des entwickelten Analyseverfahrens

Aufgrund der großen Anzahl von zu analysierenden Brückentragwerken war es notwendig ein in Bezug auf Zeitaufwand, Kosten und Aussagequalität effizientes Analyseverfahren zu entwickeln das nachfolgend beschrieben wird:

Im **ersten Schritt** des Projekts wurden für alle zu analysierenden Eisenbahnbrücken die für die Berechnung der Zugüberfahrt notwendigen statischen und dynamischen Brückenparameter aus Bestandsplänen oder direkt insitu am Objekt erhoben und in ein speziell erstelltes, sogenanntes Tragwerksdatenblatt eingetragen. Neben den Geometrieparametern wurden alle ständigen Massen, die Materialparameter und Querschnittswerte eingetragen bzw. formelmäßig berechnet. Als Ergebnis lag ein analytisch ermittelter Wert der ersten Eigenfrequenz für die Eisenbahnbrücken vor.

Im **zweiten Schritt** des Projekts wurden die Parameter aller zu analysierenden Eisenbahnbrücken in die Berechnungssoftware „RailAIXpert, Version 3.50a“ eingegeben und es wurden in Abstimmung mit der ÖBB neben dem zu analysierenden Zugtyp ICx, weitere für Vergleichszwecke darzustellende Zugtypen ausgewählt, die für die dynamische Beurteilung der Brücken heranzuziehen sind. Als Zugtyp wurde neben dem Zugtyp ICx die Normzüge (HSLM-A) sowie alle Railjet und ICE Typen gewählt.

Für alle ausgewählten Zugtypen wurde die dynamische Berechnung der Zugüberfahrt im Geschwindigkeitsbereich von 60 bis 300 km/h in 5 km/h Schritten gemäß ÖNORM EN 1991-2 durchgeführt und die Berechnungsergebnisse wurden in der Form von Resonanzkurven dargestellt und ausgewertet. Die Berechnungsergebnisse wurden weiters in Bezug auf die Einhaltung der vorab definierten Grenzwerte beurteilt. Als Ergebnis lag eine Ergebnisdarstellung aller analysierten Eisenbahnbrücken vor, bei denen im Falle einer Überschreitung der vorab definierten Grenzwerte eine rote Einfärbung der Brücke erfolgte. Die Größe der Lehr'schen Dämpfung wurde dabei gemäß ÖNORM EN 1991-2 gewählt.

Im **dritten Schritt** wurde ausschließlich bei Rahmenbrücken aus Beton eine Zusatzdämpfung von 1,5 % und eine in der Realität vorhandene seitliche Bettung der Rahmenstiele angesetzt und die Berechnung der Zugüberfahrten mit der Software „RailAIXpert“ nochmals durchgeführt. Dadurch konnte die Anzahl der als „kritisch“ eingestuften Rahmenbrücken aus Schritt zwei reduziert werden. **Die Größe der angenommenen Zusatzdämpfung von 1,5 % bei Rahmenbrücken konnte im Zuge der im Projekt durchgeführten dynamischen Messungen durchwegs bestätigt werden.**

Im **vierten Schritt** wurden für die als „kritisch“ eingestuften Brücken bereits vorliegende Messdaten der Eigenfrequenzen und Strukturdämpfungen herangezogen bzw. es wurden gesonderte dynamische Messungen (mit künstlicher Anregung) durchgeführt. Die Ergebnisse der dynamischen Messungen wurden ausgewertet und das „RailAIXpert“ Berechnungsmodell wurde mit den Messergebnissen kalibriert bzw. an das realitätsnahe Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten angepasst. Trotzdem konnten für einige Tragwerke nicht alle Nachweise positiv geführt werden.

Im **fünften Schritt** des Projekts wurde die örtlich (im Bereich des jeweiligen Brückenobjekts) zulässige Maximalgeschwindigkeit v_{ZG} vom Jahr 2016 in die Auswertung der Berechnungsergebnisse einbezogen. Die bei Überfahrt des Zugtyps ICx resultierenden maximalen vertikalen Tragwerksbeschleunigungen, maximale Endverdrehungen und maximalen Schnittgrößen wurden nur noch im Geschwindigkeitsbereich $v_{ZG} \times 1,2$ ausgewertet.

Bei den Stahltragwerken lag nach diesem Schritt nur noch ein einziges Tragwerk vor, bei dem der Grenzwert der vertikalen Tragwerksbeschleunigung überschritten wird.

Bei den Betontragwerken lagen insgesamt 21 Rahmentragwerke vor, bei denen das negative Biegemoment im Rahmeneck überschritten war, d.h. der Grenzwert konnte nicht eingehalten werden. Tragwerke mit einer Überschüttung von mehr als 1,5 m wurden vorher ausgeschieden.

Im **sechsten Schritt** wurde für die Rahmentragwerke eine statische Kontrolle durchgeführt. Dabei wurde anhand von Bestandsplänen die vorhandene Bewehrung ermittelt und es wurde geprüft, ob die Überschreitung des Rahmeneckmoments von der vorhandenen Bewehrung aufgenommen werden kann. Als Ergebnis dieses Schrittes verblieben lediglich zwei Tragwerke für welche die Nachweise nicht erbracht werden konnten.

Im **siebenten Schritt** wurde daher für die zwei verbleibenden Betontragwerke eine detaillierte Finite Elemente Berechnung mit räumlicher Modellierung des Tragwerks und Simulation der Zugüberfahrten durchgeführt. Die Detailberechnung zeigte, dass die Ergebnisse durch RailAIXpert überschätzt werden, also auf der sicheren Seite liegen. Unter Einbeziehung der durchgeführten Messungen und Kalibrierung der Modelle auf die gemessenen Eigenfrequenzen und messtechnisch erfassten Dämpfungen konnten die Nachweise für die vertikale Tragwerksbeschleunigung sowie die Rahmeneckmomente positiv geführt werden.

Im **achten Schritt** wurden für die verbleibenden als kritisch eingestuften Eisenbahnbrücken, bei denen die Überfahrt des ICx aufgrund der ausgewerteten Berechnungsergebnisse zur Destabilisierung des Schotterbettes ($a_{zul} > 6 \text{ m/s}^2$) führt, Maßnahmen zur Sicherstellung der Gleislagestabilität abgeleitet.

Ergebnisse der dynamischen Analyse

Nach Ausführung der oben beschriebenen Schritte eins bis acht des entwickelten Analyseverfahrens verblieb von den 321 untersuchten Eisenbahnbrücken nur noch ein einziges Tragwerk bei dem bei **Überfahrt des Zugstyps ICx** der Grenzwert der zulässigen vertikalen Tragwerksbeschleunigung geringfügig überschritten ist.

Strecke	km	Bezeichnung	Stützweite	a_{vorh}	a_{zul}
2307	127,271	A08 Url Vorlandbrücke, Achse 10-20, (Stahl Deckbrücke), $v_{\text{ZG}} = 200 \text{ km/h}$	16,10 m	6,23 m/s ² (bei $V=195\text{km/h}$)	6,00 m/s ²

Vergleich Zugtyp ICx mit Zugtyp Railjet

Bei der Überfahrt der Railjet Typen mit $V = 185 \text{ km/h}$ ergeben sich mit $a_{\text{vorh}} = 6,17 \text{ m/s}^2$ rechnerisch nahezu die gleich großen maximalen vertikalen Tragwerksbeschleunigungen wie bei den ICx Typen.

Empfohlene Maßnahmen für das angeführte Tragwerk mit Grenzwertüberschreitung

Da die Railjet Typen bereits seit einem längeren Zeitraum mit Geschwindigkeiten von bis zu $V = 200 \text{ km/h}$ über das Tragwerk fahren und es bis dato trotz rechnerisch ermittelter vertikaler Tragwerksbeschleunigungen von bis zu $a_{\text{max,Rechnung}} = 6,17 \text{ m/s}^2$ (vgl. ICx $a_{\text{max,Rechnung}} = 6,23 \text{ m/s}^2$) zu keiner negativen Veränderung (Destabilisierung) der Gleislage gekommen ist, wird der Zugtyp ICx mit den folgenden Einschränkungen **ohne Maßnahmen** freigegeben:

- Keine Erhöhung der örtlichen v_{ZG} Geschwindigkeit ($v_{\text{ZG}} = 200 \text{ km/h}$)

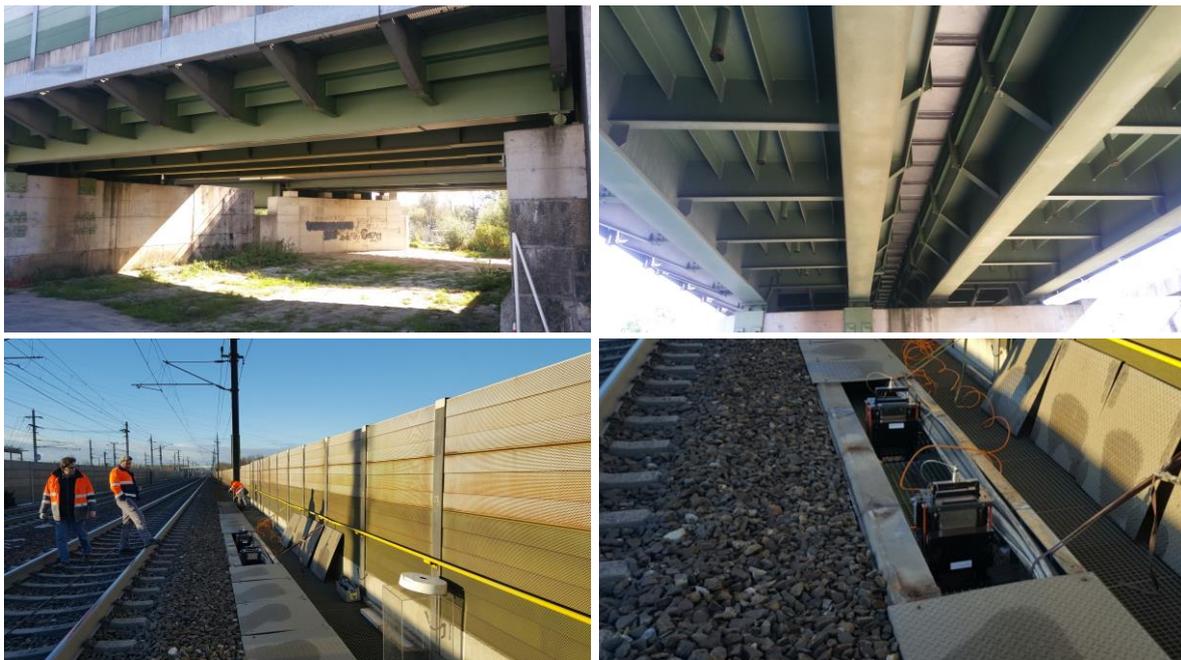
Von Seiten REVOTEC und Schimetta wird bei dem o.a. Tragwerk „A08 Url Vorlandbrücke, Achse 10-20“ eine dynamische Messung der Überfahrt des Zugtyps ICx zur Ermittlung und Beurteilung der tatsächlich auftretenden vertikalen Tragwerksbeschleunigungen empfohlen. Die Überfahrt des ICx soll dabei im Geschwindigkeitsbereich von 120 bis 240 km/h in 10 km/h Schritten erfolgen.

Hinweis zu den Berechnungsergebnissen

Die mit der Software RailAIXpert für die 321 untersuchten Eisenbahnbrücken rechnerisch ermittelten Ergebnisse der vertikalen Tragwerksbeschleunigungen, der Endverdrehungen und der Schnittgrößen gelten nur unter Berücksichtigung der örtlich zulässigen maximalen Geschwindigkeit V_{ZG} vom Jahr 2016 und unter Miteinbeziehung von Ergebnissen durchgeführter dynamischer Messungen zur Kalibration des Rechenmodells. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse erfolgte bis $V_{\text{ZG}} \times 1,20$.

Bei zukünftigen Änderungen der V_{ZG} Geschwindigkeit ist die dynamische Beurteilung für den geänderten Geschwindigkeitsbereich neu durchzuführen.

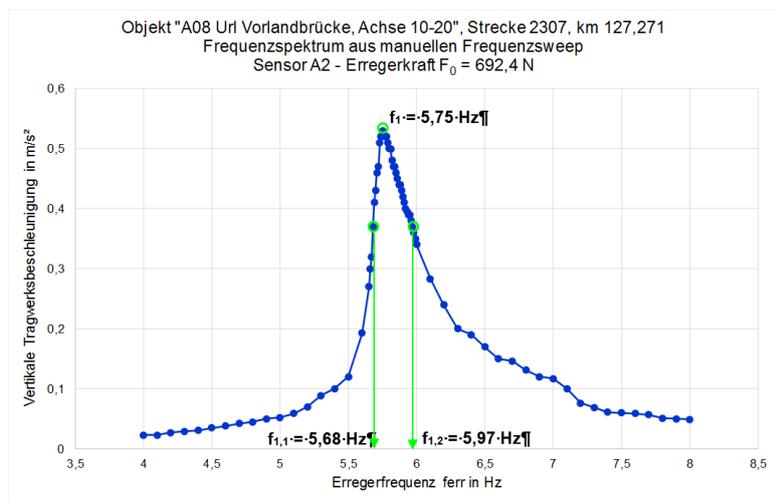
Dynamischen Messungen zur Ermittlung der tatsächlichen Eigenfrequenz und Lehr'schen Dämpfung beim Objekt „A08 Url Vorlandbrücke, Achse 10-20“ auf Strecke 2307, km 127,271, Spannweite 16,10 m



Bei den dynamischen Messungen der ÖBB-Bestandsbrücken wurden zur Ermittlung der tatsächlich vorhandenen Eigenfrequenz und der Lehr'schen Dämpfung die folgenden Anregungsmethoden angewendet:

- Künstliche Schwingungsanregung mit 2 Stk „Long Stroke Vibration Excitern“
- Anregung durch Zugüberfahrt
- Impulsanregung durch Sandsack
- Ambiente Schwingungsanregung

Bei den durchgeführten dynamischen Messungen hat sich herausgestellt, dass mit der künstlichen Schwingungsanregung die Eigenfrequenz und insbesondere die Lehr'sche Dämpfung am zuverlässigsten und eindeutig reproduzierbar bzw. vergleichbar mit etwaigen Folgemessungen ermittelt werden kann. In der nachfolgenden Abbildung ist daher das mit den 2 Stk Shakern in Parallelbetrieb ermittelte Frequenzspektrum dargestellt. Die Erregerkraftamplitude wurde mit $F_0 = 692,4 \text{ N}$ gewählt



Die **erste Eigenfrequenz** wird als Spitze im Frequenzspektrum mit $f_{1,M} = 5,75 \text{ Hz}$ identifiziert. Die Anwendung der Bandbreitenmethode auf den mit 2 Stk Shakern in Parallelbetrieb ermittelten manuellen Frequenzsweep ergibt eine **Lehr'sche Dämpfung** von $\zeta_M = 2,49 \%$. Bei der Bandbreitenmethode werden die Frequenzstellen der mit dem Faktor $\sqrt{2}$ reduzierten maximalen Beschleunigungsamplitude $a_{\max} / \sqrt{2} = 0,53 / \sqrt{2} = 0,375 \text{ m/s}^2$ als Eingangswerte für die folgende Gleichung zur Ermittlung der Lehr'schen Dämpfung verwendet:

$$\zeta_M = \frac{f_{1,2} - f_{1,1}}{f_{1,1} + f_{1,2}} = 2,49 \%$$

Messergebnisse bei Anregung der Brücke mit 2 Stk „Long Stroke Shakern“			
Messtechnisch ermittelte erste Eigenfrequenz $f_{1,M}$	$f_{1,M} = 5,75 \text{ Hz}$	$f_{1,Rechnung} = 5,84 \text{ Hz}$	Faktor 0,98
Messtechnisch ermittelte Lehr'sche Dämpfung ζ_M	$\zeta_M = 2,49 \%$	$\zeta_{EN 1991-2} = 0,99 \%$	Faktor 2,52

Die mit den 2 Stk Long Stroke Shakern ermittelte erste Eigenfrequenz und Lehr'sche Dämpfung (2,52-facher Normwert!) wurde zur Kalibrierung des RailAIXpert Rechenmodells herangezogen und die dynamische Berechnung wurde mit den adaptierten Werten nochmals durchgeführt.

Mit Ausnahme des Objekts „A08 Url Vorlandbrücke, Achse 10-20“ konnte bei allen Eisenbahnbrücken nach Miteinbeziehung der Messwerte und Ausführung der weiteren Schritte wie oben beschrieben, eine Reduktion der Ergebnismerte bis unterhalb der geforderten Grenzwerte erreicht werden. Bei dem Objekt „A08 Url Vorlandbrücke, Achse 10-20“ konnte trotz der Kalibrierung des Rechenmodells mit den gegenüber der Norm, in der Realität stark erhöhten gemessenen Lehr'schen Dämpfungen (Faktor 2,52), der Grenzwert für die vertikale Tragwerksbeschleunigung knapp nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund wurden für dieses einzig verbleibende Brückenobjekt eine geringfügige Einschränkung zur Sicherstellung der Gleislagestabilität abgeleitet (keine Erhöhung VzG).