

## 4. Diplomarbeit im Themengebiet Brückendynamik: Einfluss von nicht-linearen Systemeigenschaften bei der Ermittlung des Lehr'schen Dämpfungsmaßes im Zeit- und Frequenzbereich

Dipl.-Ing. Bernhard Winkler | Technische Universität Wien

### Hintergrund und Auswirkungen dynamischer Beanspruchungen

Angesichts der dynamischen Belastungen, die durch den Zugverkehr entstehen, sind Eisenbahnbrücken Schwingungsbeanspruchungen ausgesetzt. Durch den fortschreitenden Ausbau des Hochgeschwindigkeitsnetzes und den zunehmenden Achslasten im Güterverkehr kommt es vermehrt zu Schwingungsanregungen von Brücken. Die Auswirkungen betreffen sowohl den Bahnbetrieb als auch die Brückenstruktur sowie die Fahrzeuge selbst. Damit verbunden steigt das Risiko für Materialermüdung der Tragkonstruktion, übermäßige Verformungsantworten oder es treten Schäden wie Gleislagefehler oder Auflockerung des Schotterbetts auf. Zudem liegt es in der Verantwortung des Infrastrukturbetreibers, die Betriebssicherheit von Brücken zu gewährleisten, welche unter anderem durch dynamische Berechnungen nachgewiesen wird. Unter normativen Gesichtspunkten gilt der Nachweis als erbracht, wenn die maximalen Vertikalbeschleunigungen der Brücke  $\ddot{w}_{max}$  (berechnet aus den Schwingungsprognosen) einen zulässigen Grenzwert  $\ddot{w}_{zul}$  nicht überschreiten. Andernfalls müssen Maßnahmen wie beispielsweise Geschwindigkeitsreduktionen angeordnet werden, die sich jedoch negativ auf die Verkehrsmobilität auswirken können. Allgemein wird die Größe der maximalen Vertikalbeschleunigung  $\ddot{w}_{max}$  von zahlreichen Eingangsparametern beeinflusst, wie z. B. der Reisegeschwindigkeit, den Achslasten und der Brückeneigenfrequenz. Ebenfalls von großer Bedeutung ist das Lehr'sche Dämpfungsmaß  $\zeta$ , welches die Dämpfungseigenschaften der Brücke beschreibt. Ein hoher Dämpfungswert  $\zeta$  führt zu geringerer Schwingungsintensität.

### Dämpfungsmaßbestimmung – Methodische Ansätze und Problematik

Grundsätzlich gibt es zwei Zugänge zur Bestimmung des Lehr'schen Dämpfungsmaßes  $\zeta$ : Zum einen erfolgt dies unter normativen Vorgaben (Regelfall), zum anderen durch die Auswertung eines In-situ-Messversuchs

an realen Bestandsobjekten. Letzteres ist jedoch mit hohen Kosten verbunden und kommt nur in Einzelfällen vor. Insbesondere weisen die verankerten Empfehlungen des Eurocodes und die konservativen Ansätze zur Regelung des Dämpfungsmaßes  $\zeta$  eine erhebliche Diskrepanz zu den messtechnisch erfassten Ergebnissen auf. Dies führt dazu, dass Schwingungsanregungen seitens der Norm überschätzt werden können, was potentiell zu überkonservativen und damit unwirtschaftlichen dynamischen Beurteilungen von Brücken führt. Die wirklichkeitsnahe Bestimmung des Dämpfungsmaßes  $\zeta$  rückt somit in den Fokus und ist damit aktuell ein großer Forschungsschwerpunkt in der Eisenbahnbrückendynamik.



### Neuentwicklung modellbasierter Dämpfungsmaßbestimmung von Eisenbahnbrücken

Aus diesem Grund wird im Rahmen von Forschungsprojekten des Instituts für Tragkonstruktionen / Forschungsbereich Stahlbau an der TU Wien mittels einer Großversuchsanlage im Maßstab 1:1 das dynamische Dämpfungsverhalten des Schotteroberbaus näher untersucht. In der Dissertation von Stollwitzer ([1]) wurden bereits zwei Brückenmodelle auf Grundlage des Euler-Bernoulli-Balkens vorgestellt: Modell 1 (rein vertikal schwingendes System) und Modell 2 (ein komplexeres Modell, das die horizontale Gleis-Tragwerk-Interaktion berücksichtigt). Des Weiteren konnte aus zahlreichen Versuchen für das entsprechende Modell ein energieäquivalenter Einmassenschwinger (kurz: EMS) abstrahiert und die zugehörigen Materialgesetze abgeleitet werden, dessen Werkstoffcharakteristik (verschiebungsabhängige Feder- sowie frequenz- und beschleunigungsabhängige Dämpferkennlinie) sich hauptsächlich nichtlinear verhält. Die standardmäßig verwendete Vorgehensweise zur rechnerischen Bestimmung des Dämpfungsmaßes

von Eisenbahnbrücken berücksichtigt nur den Fall, das Lehr'sche Dämpfungsmaß  $\zeta$  (= die Summe aus dem Dämpfungsanteil des Tragwerks und des Schotteroberbaus) näherungsweise auf Basis eines linearen EMS mit konstanten Materialparametern abzuschätzen. Auch wenn bereits das bisherige lineare Rechenmodell gute Übereinstimmungen im Vergleich zu den empirischen Messungen aufweist, besteht weiterhin die Motivation, die Diskrepanz zwischen Rechnung und Messung zu verringern und die vollen Dämpfungsreserven auszuschöpfen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit weiterführende Forschung betrieben, um den Einfluss nichtlinearer Systemeigenschaften bei der Bestimmung des Lehr'schen Dämpfungsmaßes  $\zeta$  anhand eines EMS mit nichtlinearem Materialverhalten zu untersuchen.

### **Methodik zur Verifizierung des Einflusses nichtlinearer Systemeigenschaften**

Ein wesentlicher Bestandteil der Diplomarbeit befasst sich mit dem Lösen nichtlinearer Bewegungsgleichungen im Frequenz- und Zeitbereich. Durch die Formulierung eigener Berechnungsalgorithmen werden für bestimmte Einflussparameter (z. B. Eigenfrequenz  $f_0$ , Beschleunigungsniveau  $\ddot{w}_0$ , Geometriekenngößen wie Exzentrizitäten) auf Basis realer Brückentragwerke diskrete Systemantworten mittels numerischer Werkzeuge generiert und ausgewertet.

Bei den Auswertungsverfahren kommen Näherungsmethoden zum Einsatz, die auch bei In-Situ-Messungen Anwendung finden, wie beispielsweise im Frequenzbereich die Kurvenanpassungsmethode mittels äquivalentem linearem EMS. Hierbei wird eine optimale Frequenzgangkurve bestimmt, um die Abweichungen zwischen nichtlinearen und äquivalenten linearen Modellen so gering wie möglich zu halten. Dadurch ist es möglich, das Lehr'sche Dämpfungsmaß eines nichtlinearen EMS  $\zeta_{\text{nichtlinear}}$  zu quantifizieren.

In der weiteren Folge wird (auf analytischem Wege) das Dämpfungsmaß des linearen EMS  $\zeta_{\text{linear}}$  (Referenzmodell) berechnet und verglichen. Als wesentliche Bezugsgröße wird der Relationsfaktor  $\beta$  (Quotient aus  $\zeta_{\text{nichtlinear}}$  und  $\zeta_{\text{linear}}$ ) eingeführt. Kurz gesagt, je größer die Abweichung von  $\beta=1$  wird, desto bedeutsamer wird der Einfluss des nichtlinearen Materialverhaltens. Um die Forschungsfrage „Welche Werte nehmen die Relationsfaktoren  $\beta$  für verschiedene Modellvarianten an?“ zu beantworten, sind für eine Vielzahl von Brücken Parameterstudien erstellt worden.

### **Einblick in die Forschungsergebnisse**

Das Modell 1, mit seinem rein vertikal orientierten Mechanismus (bestehend aus nichtlinearen frequenz- und beschleunigungsabhängigen Dämpfern), zeigt im niedrigen Dämpfungsbereich ( $\zeta_{\text{linear}} \leq 5\%$ ) die Tendenz, das Dämpfungsverhalten des linearen Referenzmodells beizubehalten. Wie aus zahlreichen Analysen hervorgeht, liegt der Relationsfaktor im Bereich von  $\beta=1 \pm 0,05$ . Angesichts möglicher Mess- und Modellierungsungenauigkeiten ist eine lineare Berechnungsmethode bei Modell 1 durchaus vertretbar. Mit steigender Komplexität weist Modell 2, insbesondere im niederfrequenten Bereich (Eigenfrequenz  $f_0 < 7,88$  Hz), aufgrund einer horizontalen, verschiebungsabhängigen Feder Relationsfaktoren  $\beta > 1,50$  auf, was rechnerisch auf die Nutzung möglicher Dämpfungsreserven hindeutet. Dies könnte Vorteile für die zukünftige nachhaltige Beurteilung der Brückensicherheit bieten. Allerdings zeigt sich in den nichtlinearen Systemantworten von Modell 2 im niederfrequenten Bereich eine deutliche Linksschiefe (d. h. der Amplitudenfrequenzgang hat eine Ausprägung nach links), wodurch die Kurvenanpassungsmethode aufgrund der großen Abweichungen an ihre Grenzen stößt und die Ergebnisse daher kritisch hinterfragt werden müssen.

### **Praktischer Nutzen und weiterer Forschungsbedarf**

Aus dem hergeleiteten Faktor  $\beta$  ergibt sich die Möglichkeit, die Auswirkungen der tatsächlichen Nichtlinearität am idealisierten linearen Rechenmodell (das aufgrund seiner einfacheren Handhabung primär verwendet wird) per Handrechnung anzupassen. Im umgekehrten Fall besteht das Potential, basierend auf den Ergebnissen eines realen In-situ-Messversuchs an Bestandsobjekten, den Dämpfungskennwert  $C$  des linearen Rechenmodells zu kalibrieren. Durch weitere empirische Untersuchungen ist abzuklären, inwiefern sich die derzeit extrapolierten Regressionlinien (Erregerfrequenzen  $f_0 \geq 9$  Hz) des Materialgesetzes des Dämpfers eignen und welche Auswirkungen ein neuer Kenntnisstand auf beide Modelle haben kann. Auch die Erweiterung und Vertiefung der Modellgenauigkeit, z. B. unter Berücksichtigung einer last- und temperaturabhängigen Schotterfedersteifigkeit und deren Auswirkungen auf den Faktor  $\beta$ , wäre zu untersuchen.

- [1] A. Stollwitzer. Entwicklung eines Ansatzes zur rechnerischen Bestimmung der Dämpfung von Eisenbahnbrücken mit Schotteroberbau. Dissertation TU Wien, 2021