

Experimentelle Analyse von Schwingungsdämpfern für Eisenbahn-Stahlbrücken

Sören Franz Thilo Hanisch¹, Jenny Böhm¹, Christoph Gramowski², Markus Hecht¹

¹ TU Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, E-Mail: hanisch@tu-berlin.de

² Schrey & Veit GmbH, Graf-von-Sponheim-Str. 2, 55576 Sprendlingen, E-Mail: christoph.gramowski@sundv.de

Einleitung

Bei Zugfahrten über Eisenbahn-Stahlbrücken tritt neben dem Rollgeräusch häufig sogenanntes Brückendröhnen auf. Das Brückendröhnen ist tieffrequenter Schall, der hauptsächlich durch schwingende Längsträger-Stegbleche abgestrahlt wird. Dieser Schall kann von Anwohnenden als störend empfunden werden [1].

Zur Minderung der Stegblech-Schwingungen werden unter anderem Brückendämpfer verwendet [1]. Gängige Modelle von Brückendämpfern bestehen aus mehreren einseitig eingespannten, gedämpften Balken unterschiedlicher Länge (vgl. Abbildung 1). In der Praxis werden die Brückendämpfer hauptsächlich anhand der Eigenfrequenzen der für das Brückendröhnen relevanten Moden ausgelegt. Die Position wird auf Grundlage der Eigenformen gewählt.

Ziel dieser Arbeit war es, die oben genannten und weitere Einflussparameter auf die Wirkung eines Brückendämpfers mittels eines Prüfstandes zu untersuchen. Zu diesen Parametern zählen:

1. Die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung im Vergleich zum Arbeitsbereich des Dämpfers.
2. Die Dämpferposition im Vergleich zur Eigenform (z.B. im Knoten oder Maximum).
3. Der Aufbau des Dämpfers und seine Masse.
4. Die Ausrichtung des Dämpfers im Vergleich zur Eigenform.
5. Der Verlustfaktor der zu bedämpfenden Struktur.

Anhand der Untersuchungen sollen Möglichkeiten eines optimierten Einsatzes aufgezeigt werden.



Abbildung 1: Modell eines Brückendämpfers (l.) und montierte Brückendämpfer an Längsträger-Stegblechen einer Eisenbahn-Stahlbrücke (r.). © Schrey & Veit GmbH

Dämpferelemente

Als Versuchsobjekt wurden Dämpferelemente der Firma Schrey & Veit GmbH gewählt, die aufgrund des ähnlichen Aufbaus ein vergleichbares Wirkungsprinzip wie ein Brückendämpfer haben.

Die Dämpferelemente bestehen aus je sechs gegenüberliegenden einseitig eingespannten, gedämpften Stahl-Balken unterschiedlicher Länge und Dicke. Die

Dämpfung erfolgt über einen eingezwängten Belag. Die beiden Seiten sind nicht symmetrisch, sodass die Befestigung nicht im Schwerpunkt erfolgt. Es gibt zwei verschiedene Ausführungen der Dämpferelemente. Sie können mit einem Abstandsplättchen modular verbunden werden, sodass die Balken frei schwingen können (vgl. Abbildung 2).

In den durchgeführten Experimenten wurden maximal zwei Dämpferelemente kombiniert.

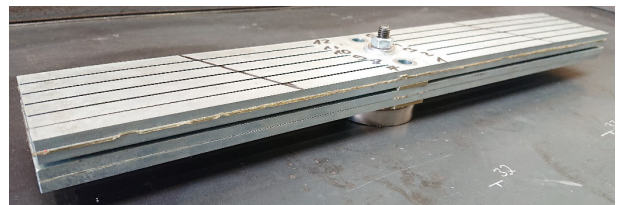


Abbildung 2: Kombination von zwei identischen Dämpferelementen.

Prüfstand

Der Prüfstand soll die Schwingung von Brücken-Stegblechen annähern. Es bestand die Anforderung, dass die Platte manuell mit zwei Personen ausgetauscht werden kann, damit die Dämpfer auf verschiedenen Platten untersucht werden können.



Abbildung 3: Umgesetzte Plattenkonstruktion.

Der Prüfstand besteht aus zwei geschweißten U-Profil-Stahlrahmen und einer auswechselbaren Platte (vgl. Abbildung 3). Folgende drei Platten wurden untersucht:

1. Platte: 4 mm Dicke.
2. Platte: 8 mm Dicke.
3. Platte: 8 mm Dicke mit innenliegender, umlaufender Nut, zur Reduzierung der Momente am Plattenrand.

Mit der 3. Platte sollte eine gelenkige Lagerung angenähert werden, um die gemessenen Eigenformen und Eigenfrequenzen mit der bekannten Theorie vergleichen zu können [2].

Der untere Rahmen des Prüfstandes wurde an den Ecken auf Metallspitzen gelagert, um eine Entkopplung vom Boden zu erreichen (vgl. Abbildung 4 links). Zur Befestigung an der

Prüfstandsplatte wurden die Dämpferelemente mit einem Neodym-Magneten verschraubt (vgl. Abbildung 4 rechts).

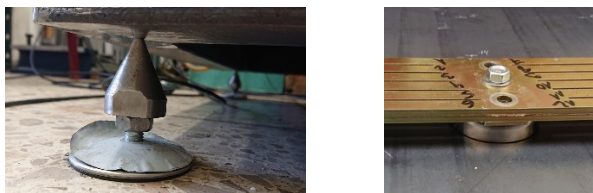


Abbildung 4: Metallspitzen zum Aufstützen des Prüfstandes (l.) und Befestigung des Dämpfers (r.).

Messdurchführung

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Variationen messtechnisch untersucht:

- Art der Platte (unterschiedliche Dicke, ohne/mit Nut (vgl. die Abbildungen 5 und 6)),
- Art des Schwingungsdämpfers (verschiedene Dämpferelemente),
- Position des Schwingungsdämpfers (zentrisch oder im oberen linken Viertel der Platte (vgl. die Abbildungen 5 und 6)),
- Ausrichtung des Schwingungsdämpfers (senkrecht/parallel zur langen Plattenseite).



Abbildung 5: Platte (8 mm Dicke) mit Nut und zentraler Position des Dämpfers.



Abbildung 6: Platte (4 mm Dicke) mit Dämpfer im oberen linken Viertel.

Für jede Variation wurde eine experimentelle Modalanalyse der Platte durchgeführt. Die Anregung erfolgte ortsfest mit einem Impulshammer und die Antwort wurde mit wandernden Beschleunigungsaufnehmern gemessen. Die Platte wurde mit insgesamt 45 möglichen Messpunkten diskretisiert. Es konnten je nach Konfiguration nicht alle Messpunkte verwendet werden, da manche durch den Schwingungsdämpfer verdeckt waren.

In einer ersten Messung an den einzelnen Platten im Prüfstand zeigte sich, dass die verschiedenen Platten nicht nur unterschiedliche Eigenfrequenzen sondern auch Verlustfaktoren besitzen. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Maßnahmen zur Veränderung der Verlustfaktoren der Platten untersucht. Die Ursachen für die unterschiedlich

großen Verlustfaktoren der Platten wurden nicht näher analysiert. Vermutlich werden die Unterschiede durch das unterschiedlich starke Schwingungsverhalten des Rahmens und der dadurch höheren Reibverluste in den Schraubenverbindungen verursacht.

Auswertemethodik

Anhand der experimentellen Modalanalyse wurden die Eigenfrequenzen, die modalen Verlustfaktoren sowie die Eigenformen der Platte bis 400 Hz über das Amplituden-Fit-Verfahren bestimmt. Es wurden nur die Eigenformen ausgewertet, die eindeutig einer Eigenform aus der Theorie der allseitig gelenkig gelagerten Platte zugeordnet werden konnten [3]. Hierzu und für den Vergleich der Eigenformen zweier Konfigurationen wurde das Modal Assurance Criterion (MAC) herangezogen [4].

Zusätzlich zu den modalen Verlustfaktoren wurden die Terzband-Verlustfaktoren anhand der Nachhallzeit ermittelt. Hierfür wurde die Zeit betrachtet, nach der die Schwingungsamplitude nach dem Hammeranschlag um 20 dB abgefallen ist. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere für Bauteile mit kleinen Verlustfaktoren [5].

Zur Untersuchung des Tilgereffekts wurde der über die Messpunkte gemittelte Pegel der Akzeleranz gebildet. Der Tilgereffekt zeigt sich in dem gemittelten Pegel der Akzeleranz u. a.:

- in einer Verschiebung der Eigenfrequenz-Spitze,
- in der Ausbildung einer zweiten Spitze in der direkten Umgebung der ursprünglichen Eigenfrequenz und
- im Idealfall eines optimal gedämpften Tilgers in einer deutlichen Reduzierung dieser Spitzen [6].

Um einen Vergleich mit anderen Konfigurationen zu ermöglichen, wurde jeweils nur über die Messpunkte gemittelt, an denen bei allen Konfigurationen eine Messung möglich war.

Wesentliche Ergebnisse

Bei der Verwendung des Schwingungsdämpfers auf der Platte konnte das Auftreten sowohl eines dämpfenden Effekts als auch des Tilgereffekts festgestellt werden.

Zunächst konnten die bekannten Zusammenhänge aus der Theorie bestätigt werden. Eine bestimmte Eigenform wird am besten gedämpft, wenn sich der/die Schwingungsdämpfer in deren Maximum bzw. Maxima befindet. Für eine breitbandige dämpfende Wirkung sollte der Dämpfer außerhalb der Knotenlinien möglichst vieler Eigenformen positioniert werden.

Die Wirkung auf das Schwingverhalten der Plattenkonstruktion ist abhängig vom Frequenz-Arbeitsbereich des Schwingungsdämpfers. So wird unterhalb des Arbeitsbereichs ein geringer dämpfender Effekt und innerhalb sowie oberhalb des Arbeitsbereichs ein erhöhter dämpfender Effekt erreicht. Zusätzlich kann innerhalb des Arbeitsbereichs ein schwingungstilgender Effekt auftreten.

Diese Beobachtungen können Abbildung 7 entnommen werden. Hier werden die Pegel der gemittelten Akzeleranzen von zwei unterschiedlichen Platte-Dämpfer-Konfigurationen mit denen der Platte ohne Dämpfer verglichen. Bei der zur (1,1)-Eigenform korrespondierenden Eigenfrequenz (unterhalb des Arbeitsbereiches) ist nur eine geringe Pegelreduktion durch den Dämpfer festzustellen. Der dämpfende Effekt ist klein. Für die (2,1)-Eigenform (innerhalb des Arbeitsbereiches) ist hingegen eine deutliche Reduktion durch Anbringung eines Dämpfers im oberen Viertel der Platte zu erkennen. Es bildet sich je eine Pegelspitze oberhalb und unterhalb der ursprünglichen Eigenfrequenz aus. Hier liegt ein Tilgereffekt vor. Dieser kann sich jedoch nur ausprägen, wenn sich der Schwingungsdämpfer möglichst in einem Maximum der Eigenform befindet. Bei zentrischer Position des Schwingungsdämpfers liegt dieser bei der (2,1)-Eigenform in einer Knotenlinie und zeigt nur einen geringen Effekt. Bei der (3,1)-Eigenform (oberhalb des Arbeitsbereiches) liegt für beide Dämpfer-Positionen ein reiner dämpfender Effekt vor. Dieser ist für die zentrische Position wesentlich stärker, da der Schwingungsdämpfer hier in einem Schwingungsmaximum platziert ist.

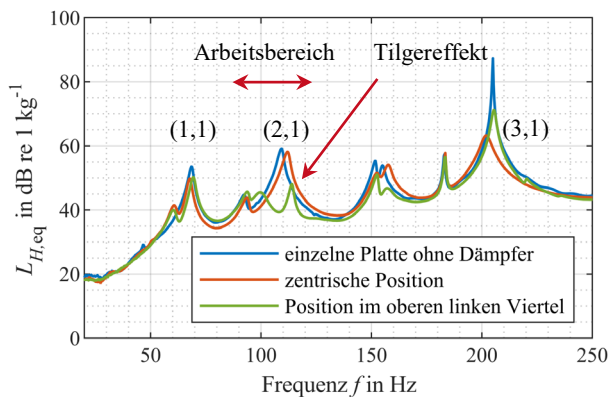


Abbildung 7: Verlauf der Pegel der gemittelten Akzeleranzen für verschiedene Positionen des Dämpfers auf der Platte mit 8 mm Dicke und umlaufender Nut mit Angabe der Platten-Eigenform.

Der dämpfende Effekt wird durch den Einsatz mehrerer kombinierter Dämpferelemente verstärkt. Ein wesentlicher Einfluss der dadurch erhöhten Masse auf das Schwingverhalten der Platte konnte nicht festgestellt werden. Die Ausrichtung des Schwingungsdämpfers (senkrecht oder parallel zur langen Plattenseite) zeigte einen – wenn auch nur geringen – Einfluss. Diese Beobachtung kann damit erklärt werden, dass die Befestigung außerhalb des Schwerpunktes liegt. Es kann ein etwas größerer schwingungsmindernder Effekt erzielt werden, wenn sich der Schwerpunkt des Dämpfers weiter im Maximum der Eigenform befindet.

Die Betrachtung der Terzband-Verlustfaktoren (vgl. Abbildung 8) zeigt, dass eine Steigerung des Verlustfaktors durch den Schwingungsdämpfer bei bereits hohen initialen Verlustfaktoren der Plattenkonstruktion nur begrenzt möglich ist. Die initialen Verlustfaktoren sind vor allem für die dickeren Platten im niedrigen Frequenzbereich relativ groß. Für die dünnere Platte können hingegen die Terzband-Verlustfaktoren durch den Schwingungsdämpfer erhöht werden. Die Wirkung nimmt zu höheren Frequenzen hin ab,

da hier nicht mehr für alle Eigenformen eine optimale Position des Schwingungsdämpfers vorliegt. Diese Eigenformen werden kaum gedämpft.

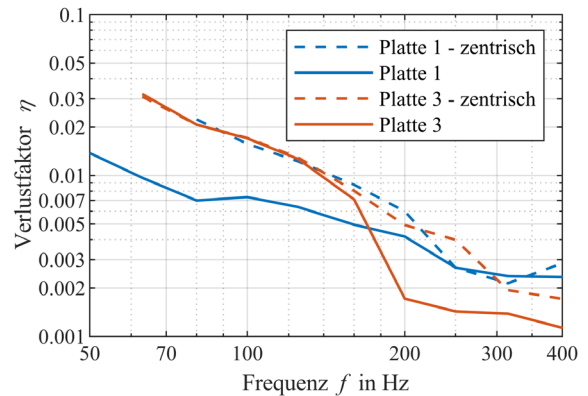


Abbildung 8: Terzband-Verlustfaktoren für die Platte mit 4 mm Dicke (Platte 1) und die Platte mit 8 mm Dicke und umlaufender Nut (Platte 3) jeweils ohne/mit zentrisch positioniertem Dämpfer.

Zusammenfassung und Ausblick

Mittels eines Prüfstandes wurden Einflussfaktoren auf die Wirkung eines Schwingungsdämpfers untersucht. Aus der experimentellen Modalanalyse verschiedener Platte-Dämpfer-Konfigurationen können folgende Ergebnisse abgeleitet werden:

1. Die Wirkung des Dämpfers ist frequenzabhängig. Unterhalb des Arbeitsbereiches tritt eine marginale dämpfende Wirkung auf, innerhalb des Arbeitsbereiches sind Dämpfung und ggf. Tilgung (siehe Punkt 2) zu beobachten, oberhalb tritt Dämpfung auf.
2. Die Dämpferposition hat einen hohen Einfluss. Im Knoten wirkt der Dämpfer kaum, im Maximum am meisten. Um eine breitbandige Wirkung zu erzielen muss sich der Dämpfer nach Möglichkeit in wenigen Knoten der zu dämpfenden Eigenformen befinden. Für die Tilgung von Eigenformen ist die Position des Dämpfers von noch größerer Bedeutung. Der Dämpfer sollte hierfür möglichst im Maximum der zu tilgenden Eigenform liegen.
3. Die Verwendung mehrerer, gekoppelter Dämpferelemente ist vorteilhaft. Die zusätzliche Masse einer solchen Konstruktion beeinflusst die Schwingung für die hier betrachtete Anwendung kaum.
4. Die Ausrichtung des Dämpfers im Vergleich zur Eigenform spielt eine geringe Rolle. Es zeigt sich aber, dass es vorteilhaft ist, den Schwerpunkt des Dämpfers als Kriterium für die Wahl der Position (siehe Punkt 2) heranzuziehen.
5. Der Verlustfaktor der zu bedämpfenden Struktur hat einen sehr großen Einfluss. Bei hohen Verlustfaktoren zeigt der Dämpfer nur eine geringe bis keine zusätzliche Wirkung.

Aus den Untersuchungen ergibt sich, dass die bereits in der Praxis berücksichtigten Parameter des Dämpfer-Arbeitsbereiches und der Position mit zu den wichtigsten Faktoren zählen, um eine hohe Dämpfung zu erzielen. Außerdem spielt aber der Verlustfaktor des zu dämpfenden Stegbleches eine entscheidende Rolle. Dabei ist es zwingend erforderlich die drei Parameter in Kombination zu betrachten.

Die im Labor gewonnenen Erkenntnisse sind nun im Rahmen von Messungen an realen Brückenstrukturen mit Brückendämpfern zu validieren. Hierbei könnte außerdem der Einfluss der Befestigungsart der Brückendämpfer untersucht werden. Diese können entweder über Schraubverbindungen oder über Magneten an die Stegbleche montiert werden.

Danksagung

Die Autor*innen danken dem Fachgebiet Technische Akustik der Technischen Universität Berlin, insbesondere Dr.-Ing. Roman Tschakert, für die fachlichen Diskussionen und dem zur Verfügung stellen von Messequipment.

Der vorliegende Beitrag wurde gefördert durch das Grant-Agreement Nr. 826250 (Assets4Rail) des Shift2Rail Joint Undertakings als Teil des Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramms der Europäischen Union. Der Inhalt dieses Dokuments spiegelt nur die Ansicht der Autoren wider.

Literatur

- [1] DB Netzt AG (Hrsg.): Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen an bestehenden und neuen Eisenbahnbrücken im Netz der DB AG – Brückenleitfaden (Version 2018), Frankfurt am Main, 2018.
- [2] Greussing, D.: Near-Field Structure-Borne Sound Holography: Extrapolation of bending wave fields in homogenous plates. Dissertation, TU Berlin, 2014.
- [3] Leissa, A. W.: Vibrations of Plates. Report NASA Sp-160. Washington, 1960.
- [4] Ewins, D. J.: Modal Testing: Theory and Practice. Research Studies Press Ltd., Letchworth, Hertfordshire, England, 1984.
- [5] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Springer, Berlin Heidelberg, 2010.
- [6] Mead, D. J.: Passive Vibration Control. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 1999.