

Erstmalige Installation von Vertikal-Flüssigkeitstilgern zur Schwingungsdämpfung einer Eisenbahnbrücke

Michael Reiterer & Okyay Altay

Bernard Ingenieure ZT GmbH, Fachbereich Dynamik und Bauphysik, Nordbahnstraße 36/2.7, 1020 Wien

ZUSAMMENFASSUNG: In der vorliegenden Arbeit wird die nach derzeitigem Kenntnisstand der Autoren weltweit erstmalige Installation von Vertikal-Flüssigkeitstilgern zur versuchsweisen Schwingungsdämpfung einer alten Eisenbahnhilfsbrücke vorgestellt. Die dynamischen Eigenschaften der Brücke werden mit Hilfe einer permanenten Monitoringanlage bestimmt. Aufgrund der verifizierten hohen Schwingungsanfälligkeit der Brücke werden insgesamt 8 optimal abgestimmte Flüssigkeitstilger installiert. Die spezielle Konfiguration der installierten Tilger wird im Detail beschrieben und die theoretischen Grundlagen zum dynamischen Verhalten werden erläutert. Die nach Installation der Flüssigkeitstilger erzielten Messergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion der Schwingungsspitzen während Zugsüberfahrt und eine Verkürzung der Ausschwingzeiten um mehr als 50%.

1. EINLEITUNG

Der steigende Trend zu immer schlankeren Baukonstruktionen, die teilweise nur mehr durch die Verwendung modernster FE-Berechnungsprogramme nachgewiesen werden können, führt in manchen Fällen auch zu erhöhter Schwingungsanfälligkeit der Strukturen. Während statische Belastungen meist unproblematisch für die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sind, können dynamische Lasten in einigen Fällen sogar zu kritischen Verformungszuständen führen. Hierbei sind insbesondere Brückenbauwerke einem großen Spektrum an dynamischen Einwirkungen ausgesetzt.

Neben vereinzelt Schwingungsproblemen bei schlanken neu errichteten Brücken treten auch im Zuge der Lebensdauer von bestehenden Brücken des öfteren unerwartete dynamische Effekte auf. So können die mit fortschreitender Nutzungsdauer resultierenden Materialveränderungen und/oder die Änderung der Lagerungsbedingungen im Laufe der Zeit zur Veränderung der dynamischen Parameter (Eigenfrequenzen, zugehörige Schwingungsformen und modale Systemdämpfungen) von Brücken führen. Eine Schwingungsanregung die nach Fertigstellung der Brücke unproblematisch erscheint, kann sehr wohl zu einem späteren Zeitpunkt der Brückenlebensdauer ein kritisches dynamisches Verhalten hervorrufen. In umgekehrter Weise können Änderungen des Anregungsspektrums zu Schwingungsproblemen bei Brücken führen.

Eine äußerst effektive und praktisch erprobte Methode zur Reduktion von vertikalen Strukturschwingungen stellt der Masse-Feder-Dämpfer Tilger, im Englischen als „tuned mass damper“ (TMD) bezeichnet, dar. Diese Art von Tilgern ist Stand der Technik und wurde im Hinblick auf Optimierung erstmalig von Den Hartog (1936) untersucht. Weiterführende Untersuchungen wurden von Petersen (2001) durchgeführt. Die optimalen Entwurfparameter werden durch die Eigenfrequenz und die Dämpfung des Tilgers bestimmt und können durch passende Wahl der Federsteifigkeit bzw. der schwingenden Masse und durch parallel geschaltete Dämpfungselemente praktisch voreingestellt werden. Nach Installation des Masse-Feder-Dämpfer Tilgers am vorgesehenen Einbauort ist eine Nachoptimierung der Eigenfrequenz und/oder Dämpfung nur mit erheblichem Aufwand möglich. Die Kosten für derartige Tilger sind aufgrund der aktuellen Stahlpreise relativ hoch und die Federelemente müssen aufgrund von Ermüdungserscheinungen in periodischen Abständen gewartet bzw. ausgetauscht werden.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird der von Sun et al. (1990) erstmalig für Brücken vorgeschlagene Vertikal-Flüssigkeitstilger als im tiefen Frequenzbereich bis ca. 4 Hz wirtschaftliche Alternative zum konventionellen Masse-Feder-Dämpfer Tilger vorgestellt und für die versuchsweise Reduktion der Vertikalschwingungen einer alten Eisenbahnhilfsbrücke erstmalig praktisch eingesetzt. Theoretische Untersuchungen zum Vertikal-Flüssigkeitstilger sowie die Erprobung an umfangreichen Modellversuchen wurden von Reiterer (2007) et al. durchgeführt. Die Masse und Feder des konventionellen Tilgers wird beim Vertikal-Flüssigkeitstilger durch eine in einem teilweise mit Flüssigkeit gefüllten Rohrsystem geführte Flüssigkeitssäule und einer Gasfeder bzw. der Rückstellkraft aus der Schwerkraft ersetzt. Die Wartung von Federelementen ist daher nicht notwendig und eine Nachoptimierung der Eigenfrequenz und Dämpfung des Flüssigkeitstilgers am Einbauort ist bequem über Veränderung des Volumens im gasdicht verschlossenen Rohrteil und über Variation des Luftblendendurchmessers am offenen Rohrteil möglich. Der Vertikal-Flüssigkeitstilger ist kostenmäßig günstiger als der konventionelle Masse-Feder-Dämpfer Tilger und bietet zudem wesentliche Vorteile in der Nachoptimierung.

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUM FLÜSSIGKEITSTILGER

Die theoretischen Grundlagen des Flüssigkeitstilgers zur Dämpfung von horizontalen Schwingungen von Baukonstruktion wurden von Reiterer (2004) und von Reiterer und Ziegler (2006) dargelegt. Für die Anwendung des Flüssigkeitstilgers für vertikale Schwingungen ist eine geänderte Konfiguration notwendig.

2.1 BESCHREIBUNG UND DYNAMISCHE PARAMETER

In der Abbildung 1 ist die Konfiguration des Vertikal-Flüssigkeitstilgers, an der Stelle $x = \xi$ einer Brückenkonstruktion befestigt, dargestellt.

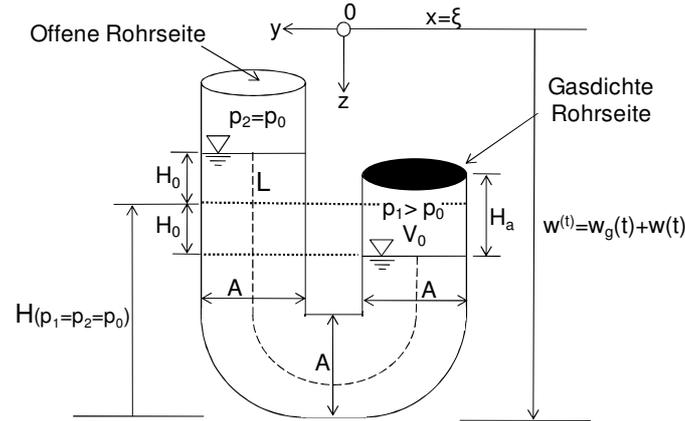


Abbildung 1: Vertikal-Flüssigkeitstilgers in statischer Gleichgewichtslage

Das teilweise mit Flüssigkeit der Dichte ρ gefüllte Rohrsystem mit der Querschnittsfläche A wird einseitig gasdicht geschlossen und mit einem Überdruck $p_1 = p_0 + 2\rho g H_0$ beaufschlagt. Hierbei bezeichnet p_0 den natürlichen atmosphärischen Luftdruck in Bodennähe. Die zweite Seite des U-förmigen Rohrsystems wird nach oben hin offen ausgeführt, wobei die Flüssigkeitsspiegeloberfläche in der statischen Gleichgewichtslage um $2H_0$ höhenversetzt wird. Durch Anordnung einer Luftblende am Ausströmquerschnitt des offenen Rohrteils wird die Flüssigkeitsdämpfung eingestellt.

Die lineare Eigenfrequenz des in Abbildung 1 dargestellten Vertikal-Flüssigkeitstilgers ergibt sich nach Anwendung der instationären Bernoulli-Gleichung entlang der relativen inkompressiblen Stromlinie im bewegten Bezugssystem, siehe Reiterer et al. (2007), zu

$$f_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L} \left[1 + \frac{nh_0}{2H_a} \left(1 + \frac{2H_0}{h_0} \right) \right]}, \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2, \quad h_0 \approx 10 \text{ m}, \quad (1)$$

wo L die Gesamtlänge des Flüssigkeitsfadens bezeichnet. Die gesamte Flüssigkeitsmasse ergibt sich dann zu $m_f = \rho AL$. Der Faktor $1 \leq n \leq 1,4$ definiert den Exponenten der linearisiert eingesetzten polytropen Gaskompression. Die Abstimmung der Eigenfrequenz erfolgt nach Festlegung der Länge des Flüssigkeitsfadens, über den Parameter der fiktiven Gasfederhöhe $H_a = V_0/A$, wo V_0 das Luftvolumen im gasdicht verschlossenen Rohrteil in statischer Gleichgewichtslage bezeichnet.

2.2 OPTIMALE ABSTIMMUNG DES FLÜSSIGKEITSTILGERS

Die optimale Abstimmung des Flüssigkeitstilgers erfolgt in Analogie zum konventionellen Masse-Feder-Dämpfer Tilger, wie von Reiterer (2004) gezeigt. Für den Masse-Feder-Dämpfer Tilgern wurden von Den Hartog (1936) die folgenden optimalen Parameter für das Frequenzverhältnis und Tilgerdämpfung dargelegt,

$$\delta_{opt}^* = \frac{f_A^*}{f_S^*} = \frac{1}{1 + \mu^*}, \quad \zeta_{A,opt}^* = \sqrt{\frac{3\mu^*}{8(1 + \mu^*)}}, \quad \mu^* = \frac{m_A^*}{M^*}, \quad (2)$$

wo μ^* das Masseverhältnis von Tilgermasse zur schwingenden Masse der zu bedämpfenden Struktur bezeichnet. Aus der Analogiebeziehung ergibt sich das äquivalente Masseverhältnis unter Einbeziehung des Geometriefaktors $\kappa = 2H_0 / L$ zu,

$$\mu^* = \frac{m_A^*}{M^*} = \frac{\mu \kappa^2}{1 + \mu(1 - \kappa^2)}, \quad \mu = \frac{m_f}{M} . \quad (3)$$

Das optimale Frequenzverhältnis und die optimale Flüssigkeitsdämpfung sind dann wie folgt definiert,

$$\delta_{opt} = \frac{f_A}{f_S} = \frac{\delta_{opt}^*}{\sqrt{1 + \mu(1 - \kappa^2)}}, \quad \zeta_{A,opt} = \zeta_{A,opt}^* . \quad (4)$$

Mit Hilfe der Analogie zum konventionellen Masse-Feder-Dämpfer Tilger ist eine sehr einfache Abstimmung des Flüssigkeitstilgers möglich.

3. PRAKTISCHE ERPROBUNG EISENBAHNBRÜCKE

3.1 BRÜCKENEIGENSCHAFTEN

Bei der untersuchten Brücke handelt es sich um eine alte Sonderhilfsbrücke der ÖBB vom Typ SHB 304/12. Eisenbahnhilfsbrücken erlauben ein ungehindertes Arbeiten unterhalb des bestehenden Zugverkehrs und werden daher zum Beispiel auch bei der Herstellung von Straßenunterführungen angewendet. Die an den Widerlagern gelenkig gelagerte Stahlbrücke mit offener Fahrbahn weist eine Stützweite von ca. 30m auf. Vier Stahllängsträger, die über Querträger miteinander verbunden sind, bilden das Tragsystem. An den beiden äußeren Stahllängsträgern der Brücke ist jeweils über auskragende Konsolen ein Gehweg angeschlossen. Die Gesamtmasse der Brücke beträgt inkl. der beiden Gehwege ca. 80t, wodurch sich die modale Masse für das Einfeldsystem zu 40t ergibt. Mit Hilfe von durchgeführten dynamischen Messungen wurde die Grundfrequenz mit dominant vertikaler Schwingungsform mit 3,42Hz und das Lehr'sche Dämpfungsmaß mit ca. 0,50% der kritischen Dämpfung ermittelt. Nach der Überfahrt von schweren Güterzügen wurden sehr lange Ausschwingzeiten bis zu ca. 20 Sekunden messtechnisch festgestellt. Diese Eigenschaften weisen auf eine geringe Energiedissipation hin und stufen das Eisenbahntragwerk als äußerst schwingungsanfällig ein.



Abbildung 2: Eisenbahnhilfsbrücke-Tulln, SHB 304/12

Stützweite l	29,90m
Gesamtmasse M_{ges}	80t
Modale Masse M	40t
Vertikale Grundfrequenz f_s	3,42Hz
Strukturdämpfung ζ_s	0,50%

Tabelle 1: Zusammenfassung der relevanten Brückeneigenschaften

In der Abbildung 3 ist der Beschleunigungsverlauf während Überfahrt eines schweren Güterzuges vor der Installation der Flüssigkeitstilger exemplarisch dargestellt. Maximale Beschleunigungsamplituden von über 10 m/s^2 und eine sehr lange Ausschwingzeit der Brückenkonstruktion kennzeichnen die ungünstigen dynamischen Eigenschaften. Aufgrund der hohen Schwingungsanfälligkeit wurde die Installation von Flüssigkeitstilgern im Zuge eines mit dem Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur (BOKU Wien) laufenden Forschungsprojekts vorgeschlagen und von Seiten der ÖBB Betrieb AG wurde die Zustimmung erteilt.

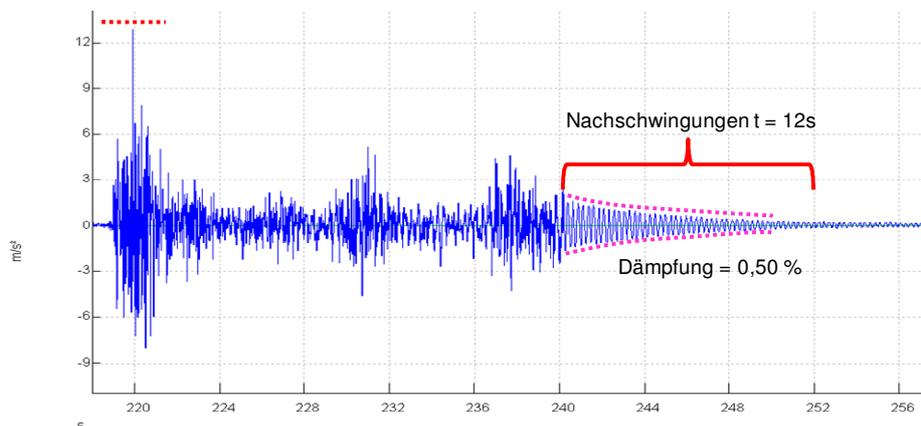


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Schwingbeschleunigung $[\text{m/s}^2]$ während bzw. nach Überfahrt eines schweren Güterzuges und vor der Installation von Flüssigkeitstilgern

3.2 INSTALLATION EINER PERMANENTEN MESSANLAGE

Das dynamische Verhalten der Brücke wurde mit einem permanenten Monitoringsystem, bestehend aus 4 Lasersensoren, 2 Beschleunigungssensoren und 2 Lichtschranken, permanent aufgezeichnet und mit Fernwartung überwacht. Um die vertikalen dynamischen Verformungen zu untersuchen, wurden die Lasersensoren in

Feldmitte und im Viertelpunkt der Brücke installiert. Die Messwertauflösung der Lasersensoren betrug 0,1 mm. Zur Erzielung von möglichst genauen Messergebnissen, wurden die Lasersensoren auf weiße, ebene Reflektionsflächen unterhalb der Brücke gerichtet. Die zwei Beschleunigungssensoren wurden in Feldmitte positioniert und mit einer Auflösung von 16bit betrieben. Die Abtastrate wurde mit 500Hz festgelegt. Die Montage der Sensoren erfolgte mit Hilfe von Magneten. Die jeweils vor- und nach der Eisenbahnhilfsbrücke auf Gleisebene installierten Lichtschranken, lieferten permanente Informationen über die Zeitdauer der Zugüberfahrten und erlaubten somit eine sehr exakte Bestimmung der aktuellen Zuggeschwindigkeiten. Die Zeitsignale der Lasersensoren lieferten zusätzliche Angaben zur Achsfolge der überfahrenden Züge.

Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch einen der installierten Laser- und Beschleunigungssensoren in Feldmitte. In der Abbildung 5 sind die Positionen der Sensoren auf der Brücke dargestellt.

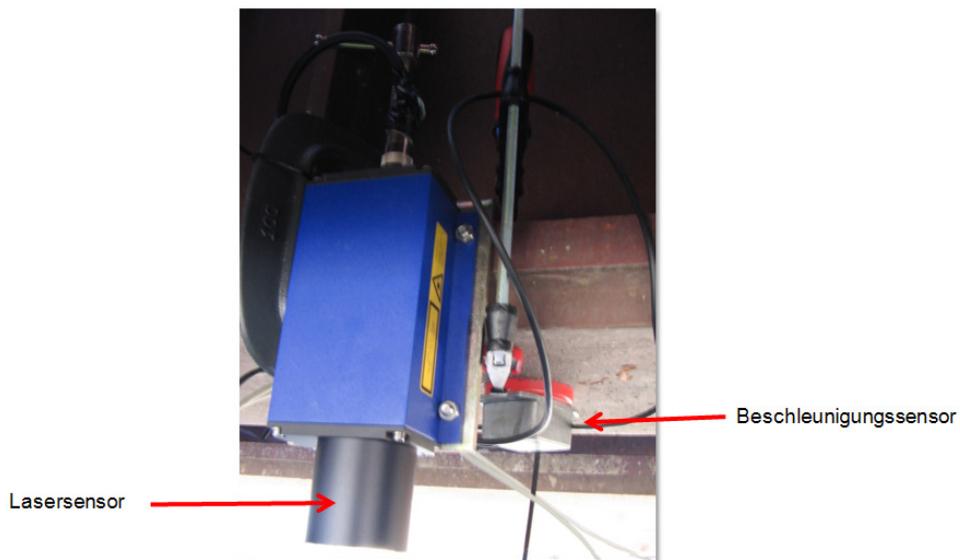


Abbildung 4: Installierte Laser- und Beschleunigungssensor

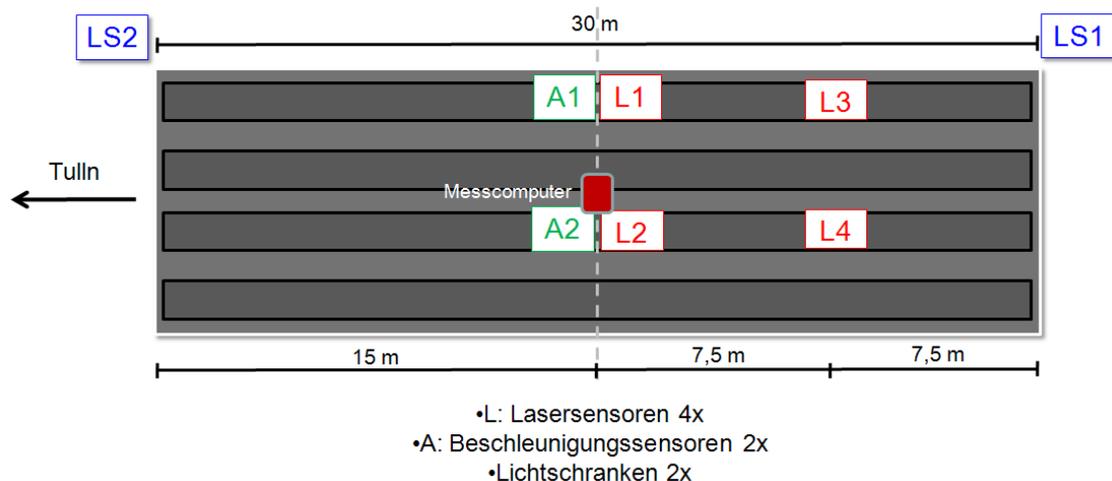


Abbildung 5: Positionen der installierten Messsensoren

In der Abbildung 6 sind die gemessenen Zeitsignale der Lichtschranken, Beschleunigungs- und Lasersensoren exemplarisch für die Überfahrt eines schweren Güterzuges dargestellt.

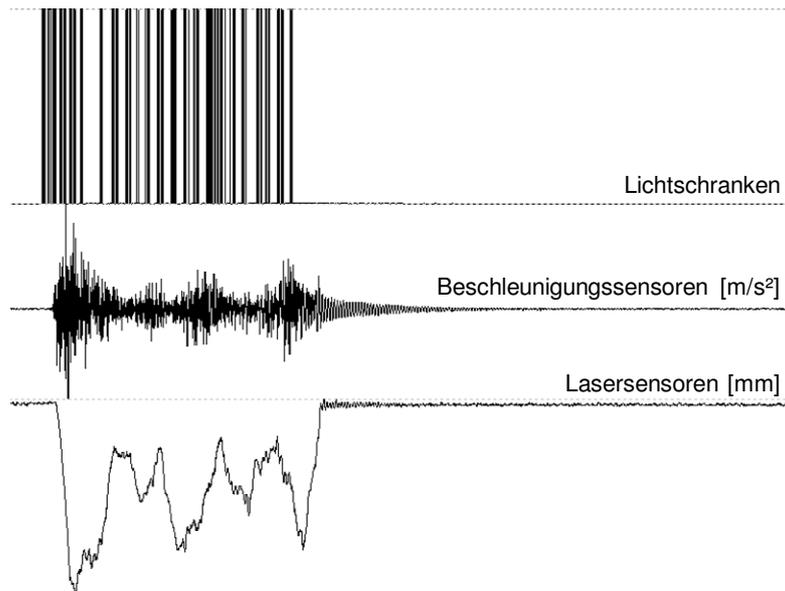


Abbildung 6: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse aus Lichtschranken, Beschleunigungs- und Lasersensoren bei Überfahrt eines schweren Güterzuges

4. BESCHREIBUNG DER INSTALLIERTEN FLÜSSIGKEITSTILGER

Für die Herstellung der installierten Vertikal-Flüssigkeitstilger wurden Kunststoffrohre mit einem Durchmesser von 300mm verwendet. Die maximale Höhe der Flüssigkeitstilger wurde aufgrund der angestrebten dynamischen Parameter und den beengten Platzverhältnissen der Brücke mit 1m bestimmt. Der Überdruck an der gasdichten Rohrseite wurde mit Hilfe eines Drucksensors überwacht, siehe Abbildung 7. Eine Hilfskonstruktion aus Stahl stellte die schubfeste Verbindung der Vertikal-Flüssigkeitstilger mit der Brücke sicher. Insgesamt wurden 8 Tilgern zwischen den Längsträgern, konzentriert in Feldmitte der Eisenbahnbrücke, montiert. Die Abbildung 9 zeigt die Positionen der installierten Vertikal-Flüssigkeitstilger.

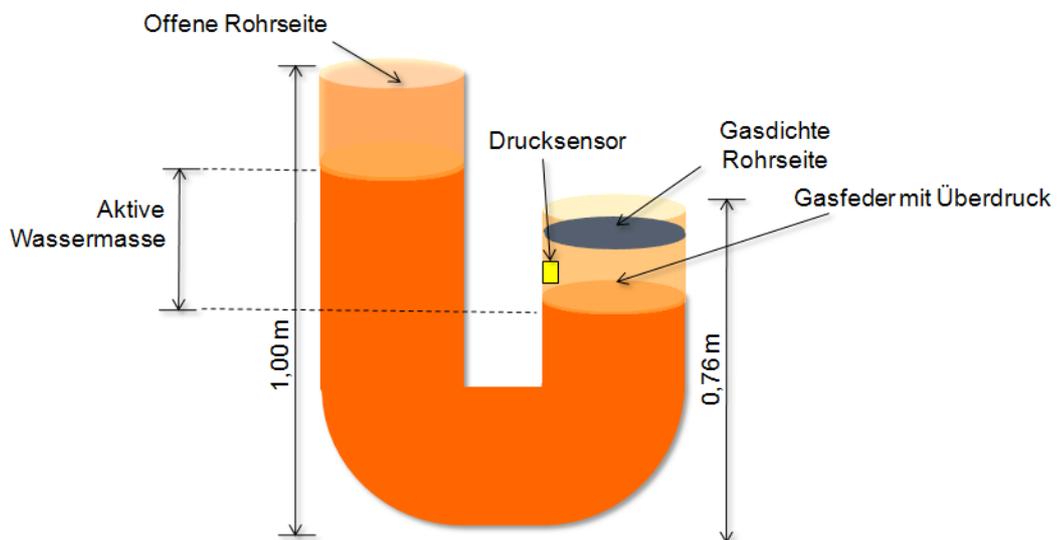


Abbildung 7: Prinzipskizze der installierten Vertikal-Flüssigkeitstilger



Abbildung 8: Installation der Vertikal-Flüssigkeitstilger bei ÖBB-Eisenbahnbrücke

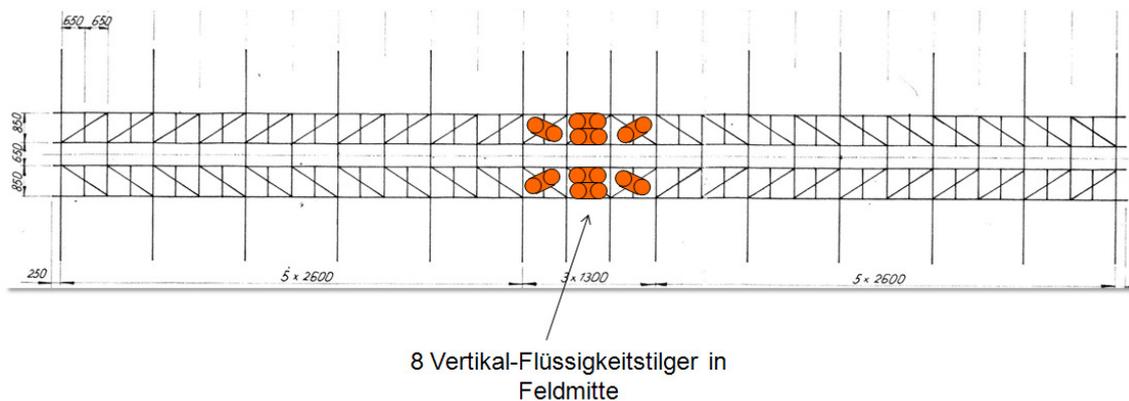


Abbildung 9: Positionen der installierten Vertikal-Flüssigkeitstilgern

Die 8 Flüssigkeitstilger wurden optimal auf die Grundfrequenz mit dominant vertikaler Schwingungsform der Eisenbahnbrücke abgestimmt, $f_s = 3,42 \text{ Hz}$. Die gesamte Flüssigkeitsmasse der 8 installierten Tilger wurde mit $m_f = 831,2 \text{ kg}$ gewählt. Das Massenverhältnis m_f zur schwingenden Brückenmasse M beträgt dann $\mu = 2,10\%$. Die optimale Eigenfrequenz und Flüssigkeitsdämpfung ergeben sich gemeinsam mit $\kappa = 0,33$ durch Auswertung der Gleichung (4) zu $f_{A,opt} = 3,39 \text{ Hz}$ und $\zeta_{A,opt} = 2,7\%$.

5. ERGEBNISSE DER MESSUNGEN OHNE UND MIT FLÜSSIGKEITSTILGER

Die Dämpfungseffekte der installierten Flüssigkeitstilger wurden mit Hilfe von Ergebnissen der dynamischen Messungen vor und nach Installation verifiziert. In diesem Abschnitt wird exemplarisch die Überfahrt eines schweren Güterzuges ohne und mit Vertikal-Flüssigkeitstilgern diskutiert.

Die Abbildung 10 illustriert den zeitlichen Verlauf der Schwingbeschleunigung der Brücke ohne und mit den installierten Flüssigkeitstilgern bei Überfahrt eines schweren Güterzuges. Eine deutliche Reduktion der Schwingbeschleunigungsspitzen ist während der Zugsüberfahrt zu sehen. Während beim Zeitverlauf ohne Flüssigkeitstilger bis zum Ende der Überfahrt mehrere Beschleunigungsamplituden über 4 m/s^2 vorkommen, ist während der Überfahrt mit Flüssigkeitstilgern nach dem Einschwingvorgang eine nennenswerte Reduktion der Amplituden zu beobachten. Der zweite wesentliche Unterschied ist die deutliche Verkürzung der Ausschwingzeit nach Installation der Flüssigkeitstilger. Die Größe der Reduktion wird mit ca. 60% bewertet. Mit der Installation der Vertikal-Flüssigkeitstilger hat sich die effektive Dämpfung der Eisenbahnbrücke erhöht. Die Auswertung des Zeitverlaufs mit Flüssigkeitstilger liefert ein Lehr'sche Dämpfungsmaß von ca. 1,2% der kritischen Dämpfung (vgl. 0,5% ohne Flüssigkeitstilger).

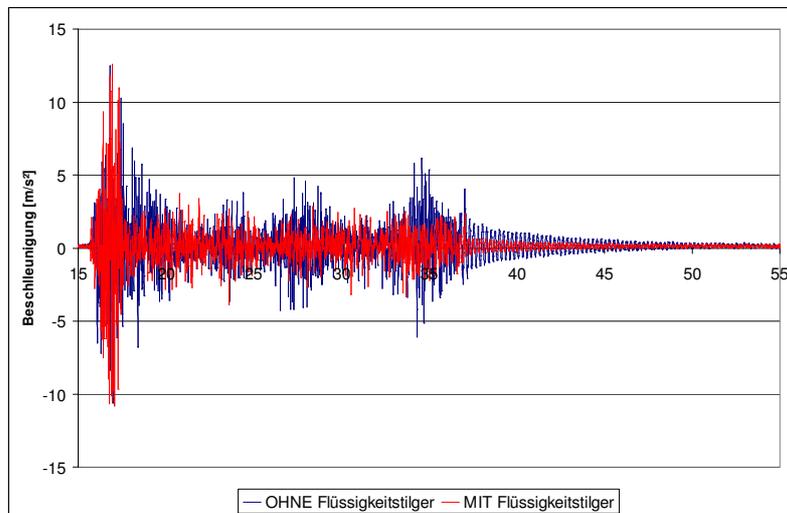


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Schwingbeschleunigung bei Überfahrten eines schweren Güterzuges ohne und mit Vertikal-Flüssigkeitstilgern

Der Vergleich der vertikalen Verformungen ist in der Abbildung 11 dargestellt. Wie bei den Beschleunigungsverläufen zu sehen ist, hat sich das Nachschwingen mit Vertikal-Flüssigkeitstilgern deutlich reduziert.

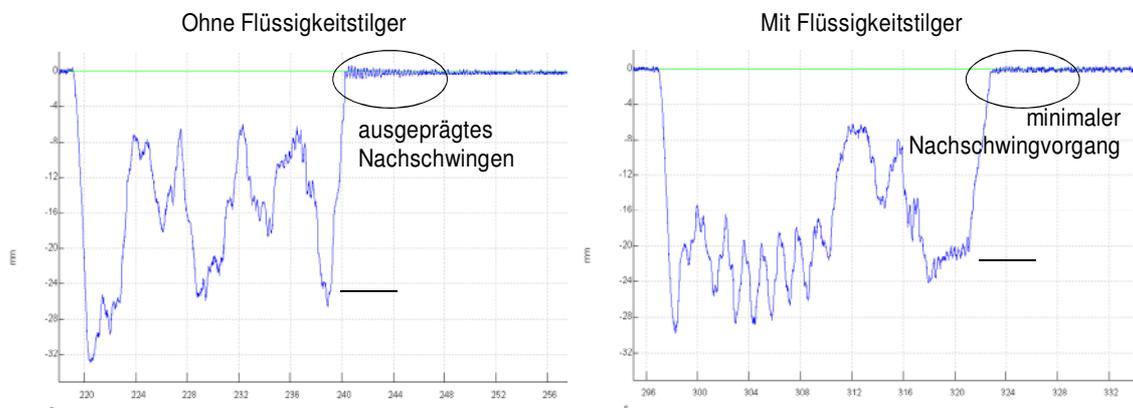


Abbildung 11: Vertikale Verformungen in Feldmitte

6. SCHLUSSBEMERKUNG

Die Anwendung von Vertikal-Flüssigkeitstilgern zur Schwingungsdämpfung von Eisenbahnbrücken erweist sich als äußerst effektive und kostengünstige Alternative zum konventionellen Masse-Feder-Dämpfer Tilger. Im Falle des Flüssigkeitstilgers sind keine im Laufe der Zeit auszutauschenden Federelemente vorhanden und die Kosten für die Stahlmassen entfallen. Die nachträgliche Feinabstimmung des Flüssigkeitstilgers ist insitu bequem über die Steifigkeit der Gasfeder zu steuern. Nach Installation der Flüssigkeitstilger wird eine Reduktion der Brückenschwingungen um mehr als 50% erreicht.

7. DANKENSWORTE

Die Autoren bedanken sich bei den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB Betrieb AG) für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit zur erstmaligen Installation von Vertikal-Flüssigkeitstilgern an einem realen Eisenbahnbrückenobjekt. Weiters möchten wir unserem Forschungspartner, dem Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur (BOKU-Wien), für die Unterstützung im Zuge des Forschungsprojekts danken.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Den Hartog, J.P., 1936. Mechanische Schwingungen. Verlag von Julius Springer: Berlin.
- Petersen, C., 2001. Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau. Herausgeber: Maurer Söhne GmbH&Co.KG, München.
- Sun et al., 1990. Tuned liquid damper for suppressing vertical vibration. In: Proceedings 45th JSCE annual meeting, Vol. 1, p. 978 – 979 (in Japanese).
- Reiterer, M., Wendner, R., Hoffmann, S., Strauss, A., Bergmeister, K., 2007. Tuned Liquid Column Dampers – Effective Damping of Vertical Vibrations. In: Proceedings of 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-3), Vancouver, Canada, in print.
- Reiterer, M., 2004. Schwingungsdämpfung von Baukonstruktionen, insbesondere von Brücken. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien, Institut für Allgemeine Mechanik.
- Reiterer, M., Ziegler, F., 2006. Control of Pedestrian-Induced Vibrations of Long Span Bridges. Journal of Structural Control & Health Monitoring. John Wiley & Sons, Ltd. ISSN 1545-2255, Vol. 13, No. 6, p. 1003-1027.