



Millenniumsbrücke in London mit Flüssigkeitstilgern: Entwurf von M. Reiterer und F. Ziegler

### **DER FLÜSSIGKEITSTILGER**

**Das CMV-Zentrum für Allgemeine Mechanik und Baudynamik am Institut für Hochbau und Technologie der TU-Wien stellt einen kostengünstigen und wartungsfreien Schwingungstilger vor.**

**von Michael Reiterer und Franz Ziegler**

**S**chlanke Hochhäuser und weitgespannte Brücken werden durch Windböen in Schwingungen versetzt. Im ersten Fall führen diese Schwingungen zu einem Komfortverlust bis hin zur „Seekrankheit“, im zweiten Fall u.U. zur Verkehrssperre. Im Vorbauverfahren der Brückenerrichtung ergeben sich kritische Zustände, die bisher nur schwer beherrschbar waren. Der fließende Verkehr erzeugt Lebensdauer vermindern

Schwingungen. Der sogenannte Synchronisierungseffekt lässt Fußgängerbrücken gefährlich schwanken (Beispiele aus jüngerer Zeit sind die Millenniumsbrücke in London und die Toda-Park-Bridge in Japan). Schwingungsanfällige Bauten (dazu gehören auch Talsperren) in seismisch aktiven Zonen sind durch starke Erdbeben in ihrer Standsicherheit gefährdet. Die Schwingungsdämpfung am Bauwerk erfordert teure und komplexe Einbauten. Die Dämpfung durch Übertragung der kinetischen Energie in einen entsprechend abgestimmten mechanischen Zusatzschwinger, einen mechanischen Tilger, führt zur Konzentration dieser Energie und über die Dämpfung zum unschädlichen Wärmeübergang, Petersen [1]. Mechanische Tilger, auch vom Pendeltypus, werden bereits weltweit eingesetzt, sind aber teuer und wartungsintensiv. Abbildung 1 ist eine Prinzipskizze dieses zusätzlichen Feder-Masse-Dämpfer bzw. Pendel-Dämpfer Systems. Seine Optimierung geht auf Den Hartog [2] zurück.

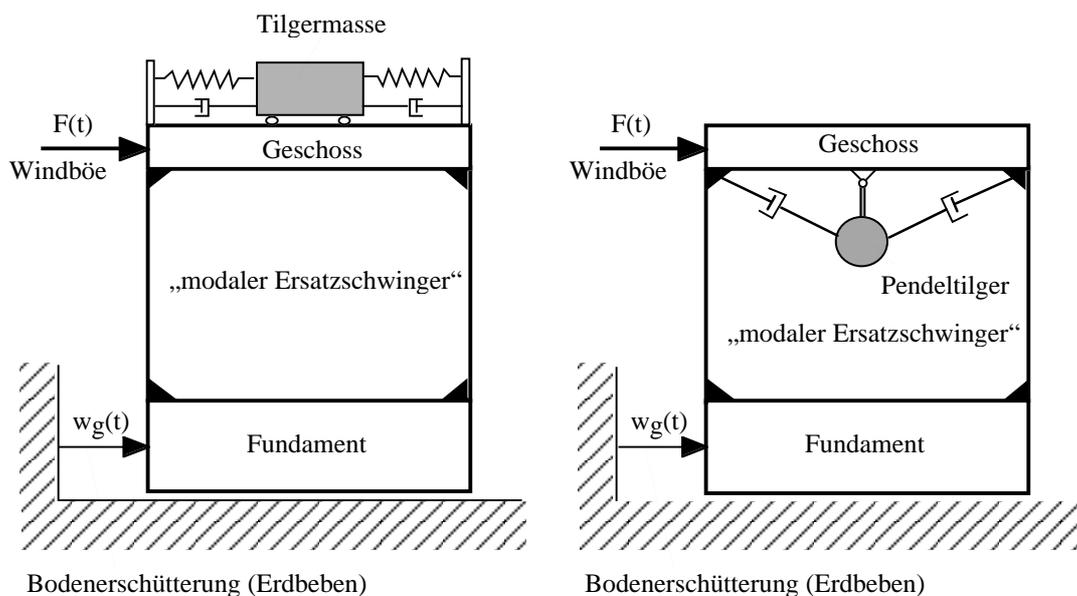


Abb. 1. Mechanische Tilger: Feder-Masse-Dämpfer bzw. Pendel-Dämpfer als Zusatzsystem auf einem modalen Ersatzschwinger.

### **DER FLÜSSIGKEITSTILGER ERSETZT DEN MECHANISCHEN TILGER**

Der als Frahm Schlinger-Tank seit 1902 bekannte Flüssigkeitstilger wird zur Dämpfung der Rollbewegung von Schiffen schon lange eingesetzt. Eine modernere Konstruktion beschreibt Den Hartog [2, S. 107]. Isolierte Eigenschwingungen in Bauwerken erlauben zwar den Einsatz von Tankbauwerken wo das Schwappen der Flüssigkeit die Dämpfung



Die Abb. 2 zeigt die Prinzipskizze des passiven einachsigen Flüssigkeitstilgers auf einem modalen Ersatzschwinger, einerseits mit offenem Verbindungsrohr, wenn freie Gasströmung zugelassen wird, andererseits mit abgeschlossenen Gasvolumina in symmetrischer Ausführung, dann mit entsprechender Gasfederwirkung, Hochrainer [4]. Im zweiten Fall kann die Frequenzabstimmung über den statischen Vordruck in den Kammern,  $p_0$ , und über die Größe des Gasvolumens  $A_H H_a$  erfolgen. Der Einsatzbereich lässt sich dadurch bis zu Frequenzen von etwa 5 Hertz erweitern. Linearisiert man die polytrope Zustandsänderung im Gasvolumen,  $1 \leq n \leq 1,4$ , dann ist die Eigenfrequenz des Flüssigkeitstilgers mit

$$f_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_{eff}} \left( \sin\beta + \frac{np_0/\rho g}{H_a} \right)}, \quad \rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3, \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2, \quad (1)$$

in Hertz gegeben, siehe auch Abb. 2. Mit  $H_a \rightarrow \infty$  wird die Gasfederwirkung vernachlässigt. Die relevanten Grundlagen der Mechanik fester und flüssiger Körper sind in Ziegler [5] zusammen gestellt. Tabelle 1 erläutert die Eigenfrequenzformel.

Tabelle 1. Eigenfrequenzen der Flüssigkeitstilger ohne und mit Gasfeder

	Ohne Gasfeder (freie Luftströmung)	Mit Gasfeder (abgeschlossene Gasvolumina)
Effektive Länge des Flüssigkeits- Fadens	Neigungswinkel $\beta = \pi / 3$	Neigungswinkel $\beta = \pi / 3$ , $p_1 = p_2 = p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ , $n = 1.2$ , Gasfederhöhe $H_a = 1.00 \text{ m}$
$L_{eff} = 1,00 \text{ m}$	$f_A = 0,66 \text{ Hz}$	$f_A = 2,55 \text{ Hz}$
$L_{eff} = 5,00 \text{ m}$	$f_A = 0,29 \text{ Hz}$	$f_A = 1,14 \text{ Hz}$
$L_{eff} = 10,00 \text{ m}$	$f_A = 0,21 \text{ Hz}$	$f_A = 0,81 \text{ Hz}$
$L_{eff} = 20,00 \text{ m}$	$f_A = 0,15 \text{ Hz}$	$f_A = 0,57 \text{ Hz}$
$L_{eff} = 40,00 \text{ m}$	$f_A = 0,10 \text{ Hz}$	$f_A = 0,40 \text{ Hz}$

Der Koeffizient  $\delta_L, [1/m]$ , der experimentell von Reiterer [6] festgestellten mittleren Turbulenzdämpfung der relativen Flüssigkeitsströmung, ist mit dem äquivalenten viskosen Dämpfungskoeffizienten  $\zeta_A$  nach Vorgabe einer maximalen Amplitude  $U_{\max}$  durch  $\zeta_A = 4U_{\max}\delta_L / 3\pi$  verknüpft.

Diese Parameter, Eigenfrequenz  $f_A$  und linearer Dämpfungskoeffizient  $\zeta_A$  sind dann in Analogie zum mechanischen Tilger optimal abzustimmen. Dazu ist das Verhältnis Flüssigkeitsmasse  $m_f$  zur ausgewählten modalen Masse  $m_k^*$ , z.B. der k-ten Schwingungsform des Bauwerks, erforderlich. Gleichzeitig ist die Positionierung des Tilgers so vorzunehmen, dass die Komponente  $|\phi_{ki}|$  des Eigenvektors ein Maximum aufweist,  $\mu_k = \phi_{ki}^2 m_f / m_k^* \leq 0,03$ . Die 3% werden kaum überschreitbar sein obwohl im Hochbau Wasser für Feuerlöschzwecke, Klimaanlage und/oder als Trinkwasservorrat gespeichert wird.

Durch die überlineare Turbulenzdämpfung zeigt sich ein weiterer Vorteil des Flüssigkeitstilgers gegenüber dem herkömmlichen mechanischen Tilger. Zusammen mit der überlinearen Gasfeder verstimmt sich der Flüssigkeitstilger zunehmend und schützt sich so vor Überlastung. Mechanische Tilger benötigen einen komplexen Stoßfänger als Ausschlagbegrenzer.

### **ABSTIMMUNG DER FLÜSSIGKEITSTILGER**

Wie Hochrainer [4] feststellte, unterscheidet sich das optimale Frequenzverhältnis nur durch das Auftreten von zwei Geometriefaktoren aus dem Entwurf, siehe Abb. 2, vom klassischen, - der lineare Dämpfungskoeffizient bleibt ungeändert, Hochrainer und Ziegler [7],

$$\delta_{opt} = \frac{f_A}{f_k} = \frac{\sqrt{1 + \mu_k(1 - \kappa\bar{\kappa})}}{1 + \mu_k}, \quad \zeta_{A,opt} = \zeta_{A,opt}^* = \sqrt{\frac{3\kappa\bar{\kappa}\mu}{8(1 + \mu)}}, \quad (2)$$

$$\kappa\bar{\kappa} = \frac{(B + 2H \cos \beta)^2}{L_{eff} L_1} \leq 1, \quad L_{eff} = 2H + \frac{A_H}{A_B} B, \quad m_f = \rho A_H L_1. \quad (3)$$

Die Tilgung der Grundschwingung erfordert meist eine für einen Flüssigkeitstilger zu große Masse, so dass eine Aufspaltung in mehrere parallel wirkende Tilger notwendig wird. Feinabstimmung, die auch den Einfluß benachbarter Resonanzstellen berücksichtigt, ergibt dann eine optimale Dämpfung in einem breiteren Frequenzspektrum der Anregung, Hochrainer [4]. Sind die Unsicherheitsgrenzen der Steifigkeit eines Bauwerkes gegenüber dem Sollzustand bekannt, werden diese in die Feinabstimmung mit einbezogen und daher bereits im Planungsstadium berücksichtigt, Hochrainer und Ziegler [7].

Die Dämpfung in zwei horizontalen Hauptschwingungsrichtungen eines Hochbaues kann kombiniert werden. Dazu werden die U-förmigen Rohre an den Außenwänden des Geschoßes installiert. Diese komplexe Konstruktion wird hier nicht näher beschrieben.

### **FLÜSSIGKEITSTILGER IM HOCHBAU**

Flüssigkeitstilger lassen sich auch in bestehende schwingungsanfällige Hochbauten relativ einfach und kostengünstig einbauen. Im Entwurfsstadium können die Tilger in die tragende Konstruktion integriert werden. Für alle Eigenschwingungen im unteren Frequenzbereich ist dazu das oberste Geschoß geeignet. Die Abbildungen 3 bis 5 zeigen sowohl den Einbau des einachsigen Tilgers als auch den u.U. zur Dämpfung von Drehschwingungen der Geschoßplatten erforderlichen speziell angepaßten Flüssigkeitstilger.

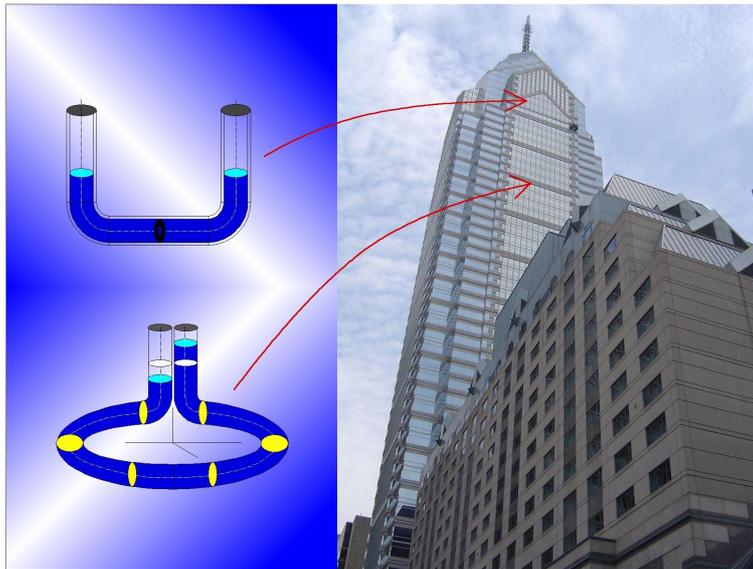


Abb. 3. Gebäudemodell mit einachsigen Tilgern und speziell angepassten (Torsions-) Flüssigkeitstilgern zur Dämpfung von Translations- und Drehschwingungen

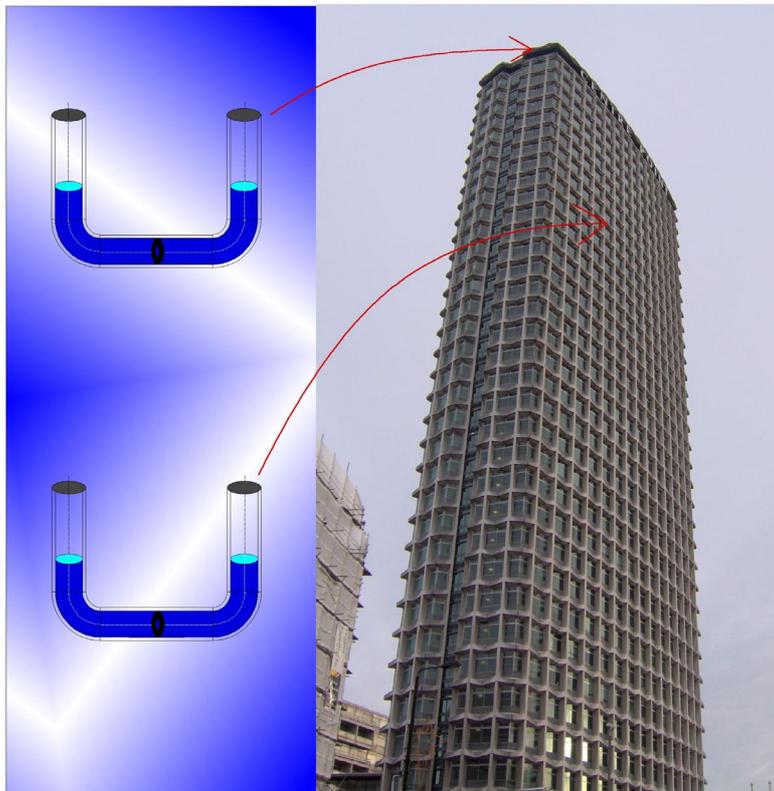


Abb. 4. Gebäudemodell mit einachsigen Flüssigkeitstilgern zur Dämpfung von translatorschen Schwingungen



Abb. 5. Gebäudemodell mit einachsigen Tilgern und speziell angepassten (Torsions-) Flüssigkeitstilgern zur Dämpfung von Translations- und Drehschwingungen

Diese Flüssigkeitstilger werden für das Bauwerk maßgeschneidert entworfen und modellhaft abgestimmt. Nach dem Einbau kann dann die letzte Adjustierung in-situ erfolgen, da die Tilger auch zur Schwingungsanregung geeignet sind und so die dynamischen Eigenschaften meßtechnisch erfaßt werden können. Beim offenen Tilger ist die effektive Länge des Flüssigkeitsfadens der geeignete Parameter. Beim geschlossenen Tilger kann zusätzlich der Gasdruck die Frequenzanpassung erleichtern. Numerische Simulationen an Modellen ausgeführter Bauwerke lassen Reduktionen der Schwingungsantwort bis zu 70% erwarten, insbesondere bei Anregung durch

Windböen. Die Abb. 6 zeigt in der Resonanzkurve, Dynamischer Vergrößerungsfaktor (DMF), eine starken Erhöhung der natürlichen Strukturdämpfung  $\zeta_S = 1\%$  auf die effektiven Dämpfung mit Flüssigkeitstilger  $\zeta_{S,eff} = 5\%$ .

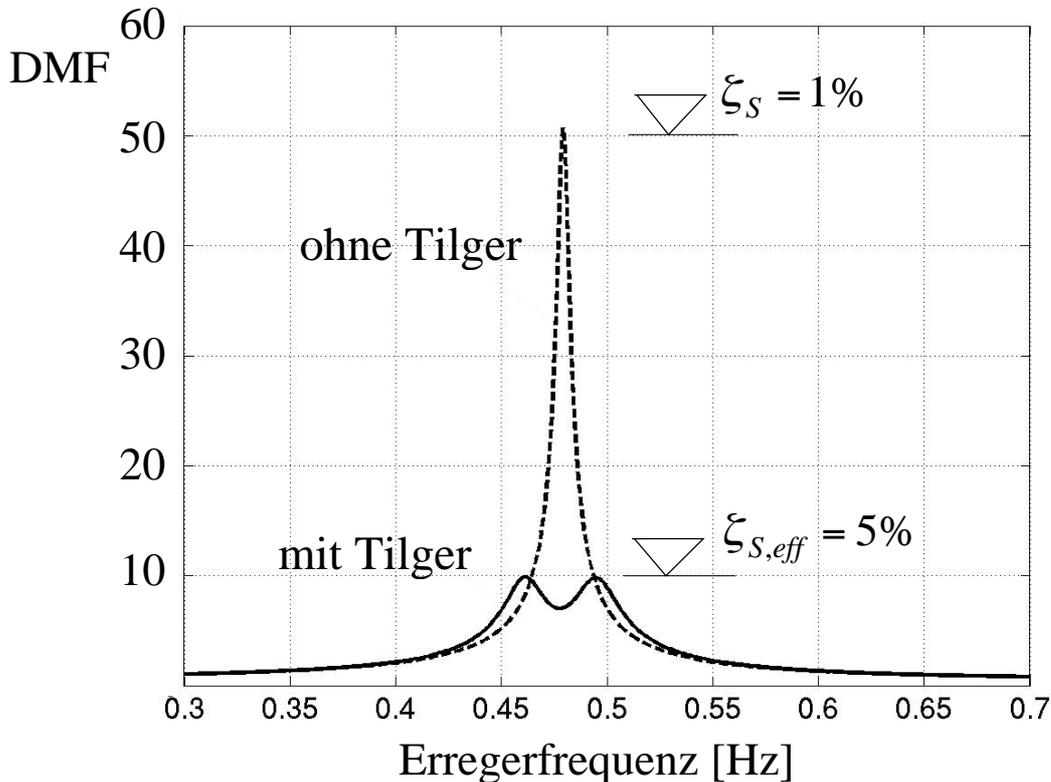


Abb. 6. Resonanzkurve mit starker Erhöhung der natürlichen Strukturdämpfung  $\zeta_S = 1\%$  auf die effektiven Dämpfung mit Flüssigkeitstilger  $\zeta_{S,eff} = 5\%$

Bei Erdbebenanregung kann es zu extremen Erdstößen vom „Schmiedehammertypus“ kommen, worauf dann die passive Dämpfungswirkung zu spät einsetzt. Abhilfe schafft eine aktive Regelung des optimal abgestimmten Flüssigkeitstilgers durch gezielte Beaufschlagung mit Gasüberdruck (Studien von Hochrainer [3] haben 1,5 bar als ausreichend nachgewiesen) aus einem beigestellten „Hochdruckbehälter“, also unabhängig von der öffentlichen Energieversorgung. Wesentlich ist auch der Nachweis der Unempfindlichkeit des Tilgers gegen die vertikale seismische Anregung. Wird ein

Grenzwert des Dämpfungskoeffizienten  $\xi_{A,0}$  überschritten, er ist der maximalen vertikalen Bodenbeschleunigung  $\max|\ddot{v}_{g,0}|$  proportional, dann kommt es zu keiner „Parameteranregung“ der Flüssigkeitsströmung, Reiterer und Ziegler [8],

$$\xi_A = \frac{4U_0}{3\pi} \delta_L > \xi_{A,0} = \frac{\max|\ddot{v}_{g,0}|/g}{4\left(1 + \frac{np_0/\rho g}{H_a \sin\beta}\right)}. \quad (4)$$

Durch diese Maßnahmen können die von den Normen geforderten Duktilitätsnachweise entfallen, da die Bauwerke wesentlich stärkeren Beben im elastischen Bereich standhalten. Die Installation von Flüssigkeitstilgern sollte insbesondere in Gebäuden mit großen Menschenansammlungen und mit wichtigen infrastrukturellen Einrichtungen, wie z.B. Schulen, Krankenhäuser, Elektrizitätsversorgungseinrichtungen etc., erfolgen. Weitere Anwendungsgebiete des Flüssigkeitstilgers im Hochbau sind z.B. die Dämpfung von erdbebenerregten Schwingungen von Talsperren oder die Reduzierung der Starrkörperbewegung von Gebäuden die mit einer „Erdbebenisolierung“ ausgestattet sind. Im letzten Fall werden die parallel geschalteten Tilger im Untergeschoß angeordnet.

### **FLÜSSIGKEITSTILGER IM BRÜCKENBAU**

Weitgespannten Brücken (Fussgänger-, Eisenbahn-, und Strassenbrücken) werden bei dynamischer Belastung durch gehende bzw. laufende (Stadt-Marathon) Personen, Windböen oder fließenden Verkehr zu Schwingungen angeregt. Oftmals dominiert bei Fußgängeranregung die Schwingbewegung horizontal quer zur Brücke. Der Grund für dieses Phänomen sind die räumlichen Kontaktkräfte zur schwingenden Unterlage. Dabei ist die Erregerfrequenz der horizontalen Kraftkomponente immer gleich der halben

Frequenz der vertikalen Kontaktkraft, Bachmann [9]. Bewegt sich also ein Mensch mit der durchschnittlichen Schrittfrequenz von 2 Hertz (zwei Schritte pro Sekunde) so beträgt die Frequenz der horizontalen Erregung immer 1 Hertz. Im Falle der dreifeldrigen Millenniumsbrücke in London, siehe Titelbild, wurden die größten horizontalen Schwingungsamplituden (bis ca. 70 mm) im Hauptfeld mit einer Eigenfrequenz der Brücke von 0,95 Hertz beobachtet. Insbesondere war hier der auftretende Synchronisationseffekt des dichten Menschenstromes bei der Eröffnung für die Aufschaukelung verantwortlich: Es zeigt sich nämlich, dass eine sich anfangs regellos fortbewegende Fußgängergruppe die Schrittfrequenz an eine benachbarte Eigenfrequenz der Brücke in natürlicher Reaktion auf die Bewegung der Unterlage anpasst (vgl. mit dem Seemannsgang). Ausschlaggebend für das Zustandekommen des Synchronisationseffektes ist die Größe der Strukturdämpfung der Brücke. Liegt sie über einem Grenzwert dann wird der Synchronisationseffekt nicht wirksam. Im Falle der originalen, d.h. noch nicht modifizierten Millenniumsbrücke, war die natürlich Dämpfung lediglich 0,8%, und lag unter dem Grenzwert, wie von Newland [10] angegeben. Kurz nach der Eröffnung (im Juni 2001) wurde die Millenniumsbrücke bereits für jeglichen Personenverkehr gesperrt. Die nachfolgende klassische Sanierung der Brücke dauerte insgesamt fast zwei Jahre und verursachte Kosten in der Höhe von ca. 10 Millionen Euro (entspricht ungefähr 1/3 der gesamten Herstellungskosten). Es wurden insgesamt 37 viskose Dämpferelemente und 52 konventionelle Feder-Masse-Dämpfer Tilger unter dem Tragwerk eingebaut. Reiterer [6] gelang der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Brückenmodells nach dem Einbau von nur fünf Flüssigkeitstilgern mit je  $m_f = 1000\text{kg}$ , wie im Titelbild illustriert, also mit einem Bruchteil des tatsächlichen Sanierungsaufwandes. Im Nord- und Südfeld der Brücke

wäre jeweils ein Tilger und im Hauptfeld wären insgesamt drei Tilger einzubauen. Von Reiterer [6] wurde auch die Toda-Park-Bridge in Japan mit nur einem einzigen Flüssigkeitstilger (Flüssigkeitsmasse  $1500\text{kg}$ ), angeordnet im Hauptfeld, ausreichend gedämpft.

Straßenbrücken werden häufig mit einem Verbundkastenquerschnitt ausgeführt, der die Integration eines Flüssigkeitstilgers erlaubt, Abb. 7 zeigt das Prinzip. Speziell an der Auckland Harbour Bridge in Neuseeland zeigt sich Schwingungsempfindlichkeit, so dass der Stadtmarathon von Auckland wegen der Brücke unterbrochen werden muß.

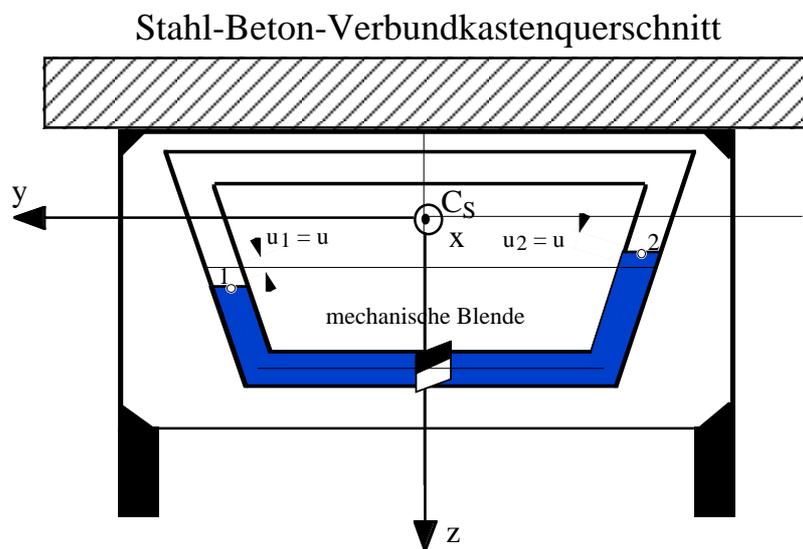


Abb. 7. Integration des Flüssigkeitstilgers im Kasten einer Verbundbrücke

Flüssigkeitstilger reduzieren auch winderregte Brückenschwingungen wie Reiterer [6] erfolgreich nachgewiesen hat. Die optimale Abstimmung der Flüssigkeitstilger mit Gasfeder soll dann zu einem möglichst raschen Abklingen der freien Schwingungsantwort der Brücke führen. Anhand numerischer Simulationen wird gezeigt, dass durch Installation von drei optimal abgestimmten Flüssigkeitstilgern im

Brückenfeld das Ausschwingverhalten erfolgreich und wirtschaftlich verbessert werden kann. Die Feinabstimmung durch Optimierung im Zustandsraum ist hier von besonderer Bedeutung. Die Erhöhung der effektiven Dämpfung,  $\zeta_S = 0.6\%$  auf  $\zeta_{S,eff} = 1.7\%$  mit Flüssigkeitstilger, wird durch die in Abb. 8 dargestellte Ausschwingganglinie, Abklingen der Verdrehung  $\vartheta$  des Brückenquerschnittes in Feldmitte,  $x = l/2$ , z.B. nach einer Windböe, illustriert.

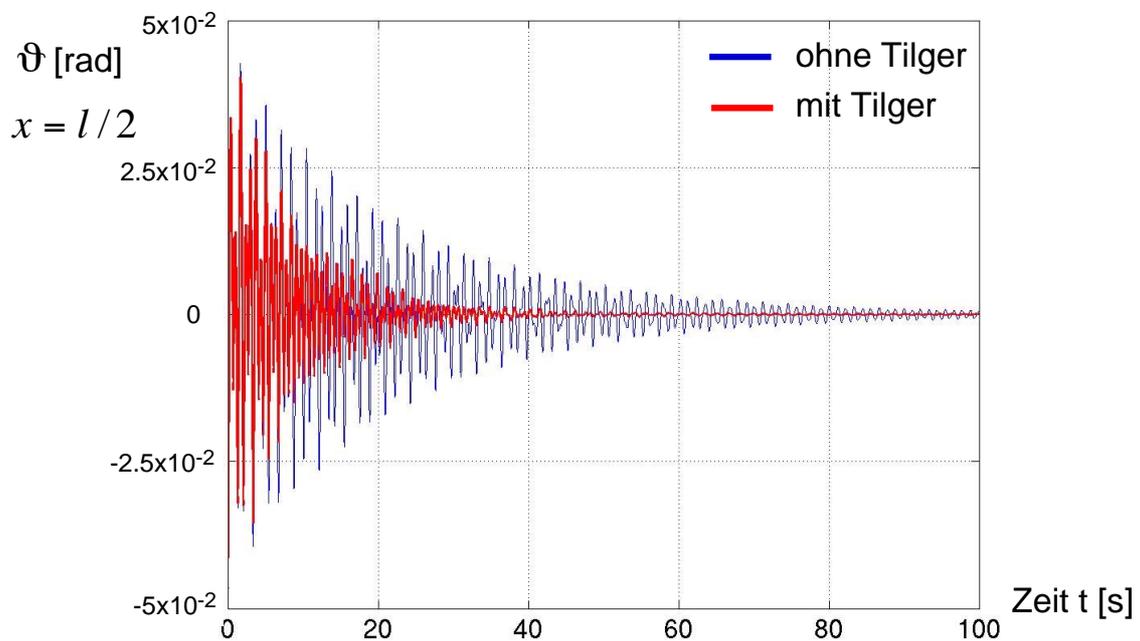


Abb. 8. Ausschwingganglinie mit und ohne Flüssigkeitstilger, Abklingen der Verdrehung  $\vartheta$  in Feldmitte,  $x = l/2$ , z.B. nach einer Windböe, Erhöhung der Dämpfung von  $\zeta_S = 0.6\%$  auf  $\zeta_{S,eff} = 1.7\%$  mit Flüssigkeitstilger

Die Anwendung des Flüssigkeitstilgers im Vorbauverfahren der Brückenherstellung soll kritische Zustände bei Windanregung unterdrücken. Im Ausbauzustand wird eine Brücke meist über große Längen freitragend oder an Kabeln abgehängt vorgeschoben. Die Brücke weist dann nur eine geringe Steifigkeit auf und beginnt bei Windbelastung

im tieffrequenten Bereich Biegedrillschwingungen mit großen Amplituden auszuführen. Ein mitgeführter Flüssigkeitstilger, abgestimmt durch Zugabe von Flüssigkeit mit wachsender Vorbaulänge, kann die Schwingungen weitgehend beseitigen. Eine Modellhafte Darstellung ist in der Abb. 9 illustriert.

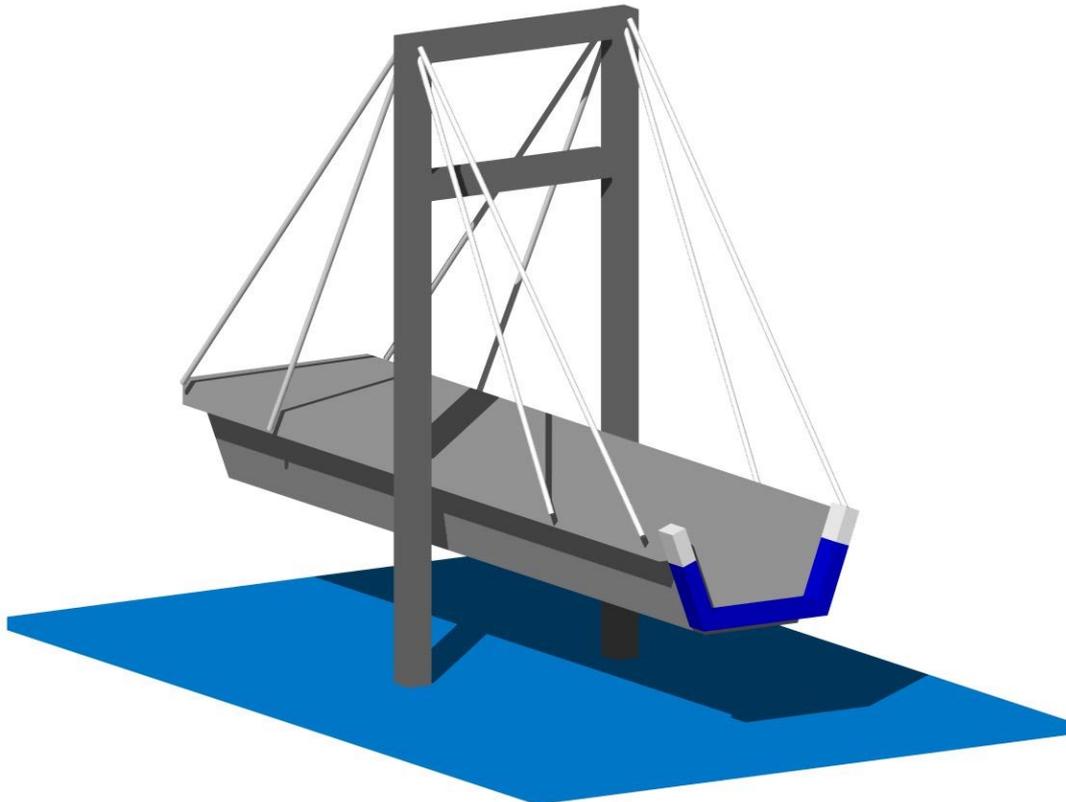


Abb. 9. Modellhafte Darstellung der Mitführung eines Flüssigkeitstilgers im kritischen Zustand des Vorbauverfahrens bei der Brückenherstellung

## **5. ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN**

Biegedrillschwingungen von Brücken sind durch U-förmige Flüssigkeitstilger im passiven Modus gut beherrschbar. Zur Zeit wird ein neuartiger Flüssigkeitstilger zur Reduzierung der dominant vertikalen Schwingungsantwort von Eisenbahn- und Straßenbrücken von den Autoren entwickelt. Flüssigkeitstilger scheinen auch ideal geeignet zu sein, um Wind- bzw. Regen-Wind-induzierte Schwingungen von

Schrägseilen zu dämpfen. Die Kooperation mit Architektur- und Ingenieurbüros soll die Anwendung des Flüssigkeitstilgers im Hoch- und Brückenbau vorantreiben. Der Flüssigkeitstilger ist eine attraktive kostengünstige Alternative zum konventionellen mechanischen Schwingungstilger und Dämpfer System.

### Literatur

1. Petersen C. Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau. Herausgeber: Maurer Söhne GmbH & Co.Kg, München, Innovation im Stahl, 2001.
2. Den Hartog JP. Mechanical Vibrations. Reprint of 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill 1956.
3. Brunner A., Amortisseur d'oscillation hydraulique pour cheminees. Societe Hydrotechnique de France, Journees de l'Hydraulique VIII, Rapp. 5 / p. 1-7, 1964.
4. Hochrainer MJ. Control of vibrations of civil engineering structures with special emphasis on tall buildings. Dissertation (in Englisch), TU-Wien, A-1040 Wien, 2001.
5. Ziegler F. Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper. Dritte, verbesserte Auflage, Springer Wien New York, 1998.
6. Reiterer M. Schwingungsdämpfung von Baukonstruktionen, insbesondere von Brücken. Dissertation, TU-Wien, A-1040 Wien, 2004.
7. Hochrainer MJ und Ziegler F. Tuned Liquid Column Damper-A cheap device for control of tall building vibrations. In: Proc. 3rd European Conference on Structural Control. Schriftenreihe der technischen Universität Wien, *in press*.
8. Reiterer M und Ziegler F. Bi-axial Seismic Activation of Civil Engineering Structures Equipped with Tuned Liquid Column Dampers. Journal Seismology and Earthquake Engineering, *in press*.
9. Bachmann H und Ammann W. Schwingungsprobleme bei Bauwerken, Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen, Structural Engineering Documents, IABSE-AIPC-IVBH, 1987.
10. Newland DE. Pedestrian Excitation Of Bridges – Recent Results, Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 7-10 July 2003, CD-Rom Paper, p. 533-547, 2003.