

Temperatur- und Langzeitverhalten von Schwingungstilgern bei Fussgängerbrücken

Glauco Feltrin und Benedikt Weber

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf (CH)

Zusammenfassung: Zwei Fussgängerbrücken, die vor rund 20 Jahren mit Schwingungstilgern ausgerüstet worden sind, sind untersucht worden, um die heutige Funktionstüchtigkeit der Schwingungstilger zu erfassen. Durch Versuche mit einem Schwingungserreger wurden die Parameter der Schwingungstilger bestimmt. Die Untersuchung zeigte, dass die Schwingungstilger beider Fussgängerbrücken noch einwandfrei funktionieren. Beobachtet wurde hingegen ein bedeutender Einfluss der Temperatur auf die Eigenfrequenz und Dämpfung der Schwingungstilger, der eine Verstimmung der Tilger verursachte und praktische Grenzen an eine optimale Auslegung eines Schwingungstilgers setzt.

1 Einführung

Der Einbau eines Schwingungstilgers ist heute eine weit verbreitete Massnahme, um die Schwingungsamplituden von Fussgängerbrücken zu begrenzen. Der Schwingungstilger ist ein Gerät, das aus einer Masse besteht, die mit Federn und Dämpfern an das Bauwerk gekoppelt ist (Abb. 1). Die Aufgabe des Tilgers ist es, dem Bauwerk möglichst viel Schwingungsenergie zu entziehen und diese im Dämpfer zu dissipieren. Wenn das Bauwerk in Schwingungen gerät, so treiben die Schwingungen den Tilger an. Damit der Energietransfer zwischen dem Bauwerk und dem Tilger möglichst effizient erfolgt, muss dieser auf die Eigenfrequenz der Struktur abgestimmt sein. Der Tilger wird dabei in starke Schwingungen versetzt und beruhigt dadurch gleichzeitig die Schwingungen des Bauwerks.

Nach dem Einbau eines Schwingungstilgers in einer Fussgängerbrücke wird oft dessen Wirkung verifiziert, indem die Antwort der Brücke bei Anregung durch Fussgänger (Laufen, Hüpfen) gemessen und mit Grenzwerten verglichen wird (Bachmann & Weber 1995), aber auch indem die Frequenzganglinie (Dallard et al. 2001) oder das Ausschlagen der Brücke mit blockiertem und freiem Tilger (Meinhardt et al. 2008) gemessen wird.



Abb. 1: Fussgängerbrücke mit drei Schwingungstilgern zur Bedämpfung der 1. und 2. Eigenschwingung.

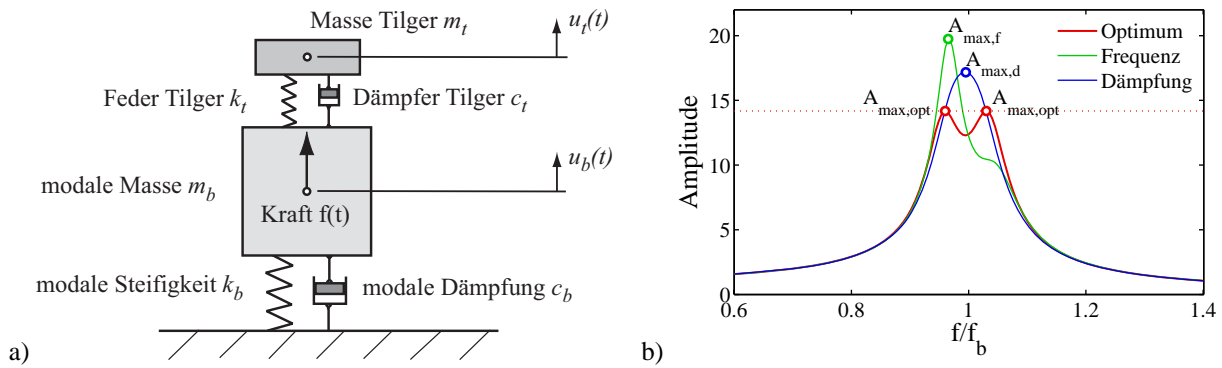


Abb. 2: a) Zweimassenschwinger-Modell einer Brücke mit Schwingungstilger. b) Amplifikationsfaktoren des Zweimassenschwinger-Modells bei verschiedenen Tilger-Abstimmungen.

Aufgrund seiner einfachen und robusten Bauweise benötigt ein Schwingungstilger keinen spezifischen Unterhalt. Gesicherte Informationen zur Funktionstüchtigkeit von Schwingungstilgern nach einer längeren Einsatzphase fehlen jedoch gänzlich. Eine Verminderung der Funktionstüchtigkeit kann eintreten, indem Rostbildung an Führungen die Beweglichkeit der Tilgermasse einschränkt, eine Alterung oder ein Auslaufen der Dämpferflüssigkeit eine Verminderung der Energiedissipation verursacht oder Veränderungen am Bauwerk eine Verstimmung des Tilgers hervorrufen.

Die Autoren haben daher zwei Fussgängerbrücken, die vor ca. 20 Jahren mit Schwingungstilgern ausgerüstet wurden, untersucht, um die heutige Funktionstüchtigkeit der Tilger quantitativ zu erfassen. Die Tilger wurden vom Zweitautor ausgelegt und nach dem Einbau geprüft (Bachmann & Weber 1995).

2 Abriss der Theorie des Schwingungstilgers

Der Schwingungstilger wurde 1909 vom deutschen Ingenieur Frahm erfunden und patentiert, um Schiffe zu stabilisieren (Schlingertank). 1928 wurde der Schwingungstilger erstmals theoretisch untersucht (Ormondroyd & Den Hartog 1928) und Den Hartog hat 1940 erstmals Näherungsformeln veröffentlicht, die eine optimale Auslegung des Schwingungstilgers für ungedämpfte Strukturen erlaubte, welche von einer harmonischen Kraft angeregt werden (Den Hartog 1940). Seither sind unzählige wissenschaftliche Publikationen zum Schwingungstilger erschienen. Ausführliche Darstellungen zur Theorie und Praxis des Schwingungstilgers findet man in Bachmann & Weber 1995, Petersen 2001, Soong & Dargush 1997.

2.1 Optimale Auslegung eines Tilgers

Eine Brücke mit einem Schwingungstilger wird in der Regel als Zweimassenschwinger modelliert (Abb. 2a), da ein Schwingungstilger nur für die Bedämpfung einer einzelnen Eigenschwingung eingesetzt werden kann. Die Parameter des Einmassenschwingers, der die Brücke modelliert, sind die modale Masse, Steifigkeit und Dämpfung der zu bedämpfenden Eigenschwingung. Diese können durch Modellrechnungen oder besser durch Messungen am Bauwerk bestimmt werden. Die modalen Parameter der Brücke werden zweckmässigerweise mit einer Eigenform berechnet, die am Ort des Schwingungstilgers eine Einheitsverschiebung aufweist. Dadurch entspricht die modale Verschiebung der physikalischen Verschiebung am Ort des Schwingungstilgers, und die Parameter des Tilgers können unskaliert ins Modell übernommen werden.

Die optimale Abstimmung eines Tilgers erfolgt über dessen Frequenz und Dämpfung und wird noch heute oft gemäss dem Den Hartog'schen Konzept durchgeführt. Der Tilger ist genau dann optimal abgestimmt, wenn der Amplifikationsfaktor der Brückenverschiebung zwei gleich grosse Maxima aufweist (Abb. 2b, rote Kurve). Bei einer Verstimmung der Tilgerfrequenz ist das eine Maximum grösser als das andere (Abb. 2b, grüne Kurve). Ist hingegen die Tilgerdämpfung grösser als das Optimum, so tritt ein Maximum des Amplifikationsfaktors in der Nähe $f \approx f_b$ auf (Abb. 2b, blaue Kurve).

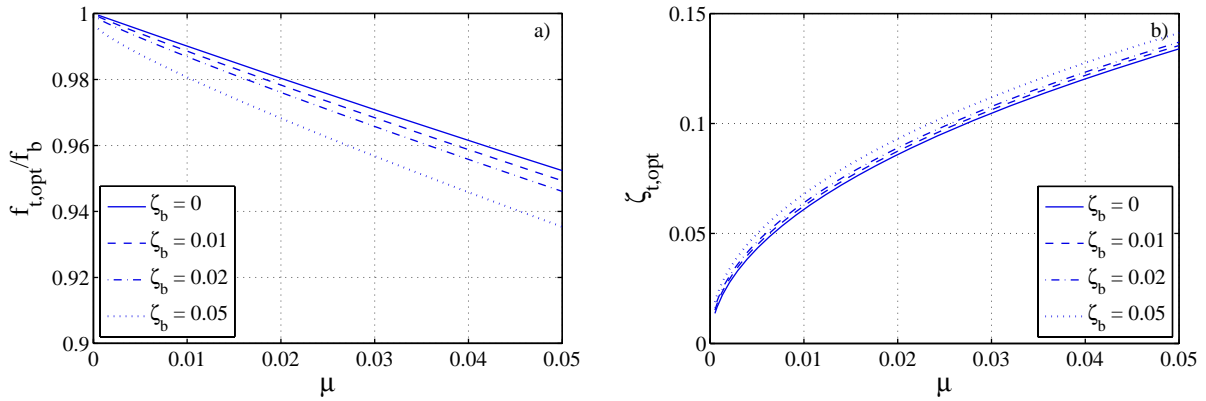


Abb. 3: Optimale Frequenz (a) und Dämpfung (b) des Schwingungstilgers für verschiedene Dämpfungsmasse der Brücke.

Zur Bestimmung der optimalen Tilgerfrequenz und Tilgerdämpfung wurden von Den Hartog einfache Formeln hergeleitet. Sie lauten

$$f_{t,opt} = \frac{1}{1 + \mu} f_b \quad \text{und} \quad \zeta_{t,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (1)$$

mit

$f_{t,opt}$ optimale Frequenz des Tilgers

$\zeta_{t,opt}$ optimales Dämpfungsmass des Tilgers

f_b Frequenz der Brücke

μ Verhältnis von Tilgermasse zur modalen Masse der Brücke

Die Parameter des Schwingungstilgers sind dabei wie folgt definiert:

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{m_t}}, \quad \zeta_t = \frac{c_t}{4\pi m_t f_t} \quad \text{und} \quad \mu = \frac{m_t}{m_b} \quad (2)$$

Für sehr kleine μ sind die Den Hartog'schen Formeln sehr genaue Näherungsformeln. Die viel komplizierteren exakten Formeln wurden erst kürzlich gefunden (Nishihara & Asami 2002). Die optimale Frequenz des Schwingungstilgers ist immer kleiner als die Eigenfrequenz der Brücke und nimmt mit zunehmendem Massenverhältnis μ ab (Abb. 3a). Die Dämpfung nimmt hingegen mit zunehmendem Massenverhältnis μ zu (Abb. 3b). Wie aus (Abb. 3) zu entnehmen ist, ist der Einfluss der Brückendämpfung klein, so dass die Den Hartog'schen Formeln auch eine gute Näherung für Brücken mit geringer Dämpfung darstellen. Analoge Bemessungsformeln für Strukturen mit Dämpfung und für andere Belastungsarten und Optimierungskriterien findet man in Warburton 1982, Chang 1999, Asami et al. 2002 und Feltrin 2005.

2.2 Auswirkung einer Verstimmung des Tilgers

Weichen die Tilgerfrequenz und Tilgerdämpfung von den optimalen Werten ab (Verstimmung des Tilgers), so vermindert sich die Wirksamkeit des Tilgers. Als Mass für die Wirksamkeit kann der Wirkungsgrad eingeführt werden, der als Verhältnis zwischen der maximalen Amplitude der Frequenzganglinie im optimierten Zustand $A_{max,opt}$ und der maximalen Amplitude der Frequenzganglinie im verstimmten Zustand A_{max} definiert wird (Abb. 2b):

$$w = \frac{A_{max,opt}}{A_{max}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Da $A_{max} \geq A_{max,opt}$ ist der Wirkungsgrad immer kleiner gleich 100%.

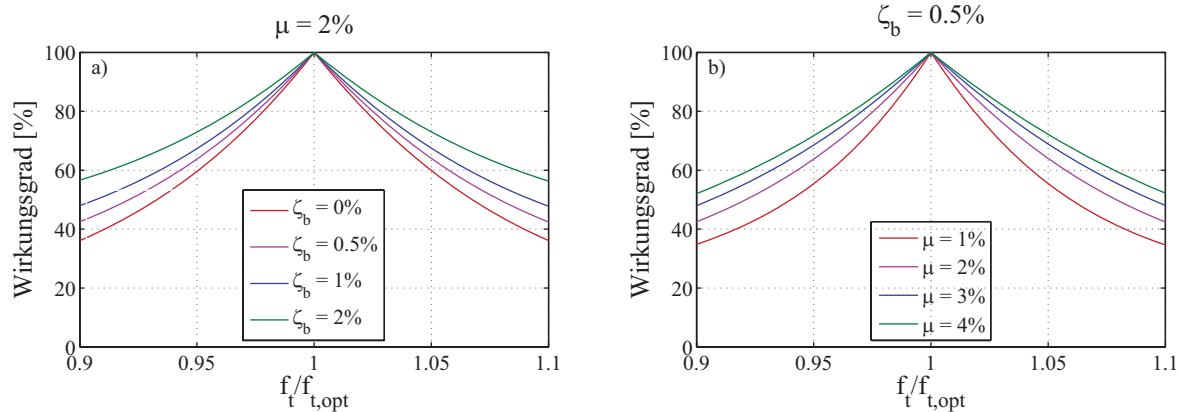


Abb. 4: Wirkungsgrad eines Tilgers bei einer Verstimmung der Tilgerfrequenz.

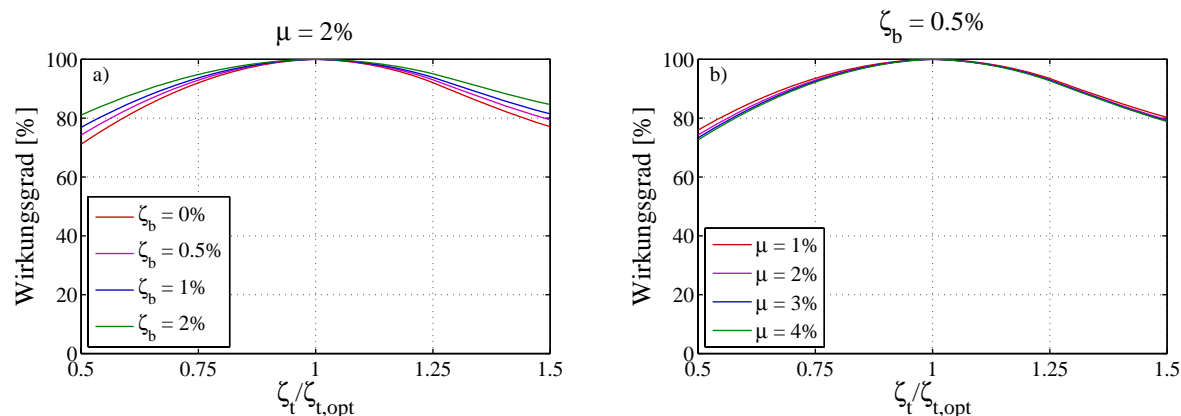


Abb. 5: Wirkungsgrad eines Tilgers bei einer Verstimmung der Tilgerdämpfung.

Abb. 4 zeigt den Wirkungsgrad eines Tilgers bei einer Verstimmung der Tilgerfrequenz. Bereits bei einer Verstimmung der Tilgerfrequenz um wenige Prozent treten bedeutende Verluste des Wirkungsgrads auf. Diese sind nahezu unabhängig davon, ob die Tilgerfrequenz grösser oder kleiner als die optimale Tilgerfrequenz ist. Die Verluste sind grösser, wenn die modale Dämpfung der Brücke oder das Massenverhältnis klein sind. Daher ist es wichtig, beim Einbau eines Tilgers insbesondere auf eine gute Abstimmung der Tilgerfrequenz zu achten.

Weniger dramatisch ist die Lage bei einer Verstimmung der Tilgerdämpfung (Abb. 5), denn auch bei einer Abweichung der vorhandenen Tilgerdämpfung zur optimalen Tilgerdämpfung um 50% beträgt der Verlust des Wirkungsgrads bescheidene 20%. Der Verlust des Wirkungsgrads ist bei zu geringer Tilgerdämpfung etwas grösser als bei zu grosser Tilgerdämpfung. Die Verluste sind auch in diesem Fall umso grösser, je kleiner die modale Dämpfung der Brücke oder das Massenverhältnis sind.

3 Brücken und Auslegung der Tilger

Vor rund 20 Jahren sind in der Umgebung von Zürich zwei Fussgängerbrücken, eine Balkenbrücke und eine Schrägseilbrücke, mit Schwingungstilgern ausgerüstet worden. Eine ausführliche Beschreibung der Brücken, der Auslegung der Tilger und der Versuche ist in Bachmann & Weber 1995 zu finden. In diesem Kapitel wird kurz auf die Brücken und die Auslegung der Tilger eingegangen.

3.1 Balkenbrücke

Die erste Brücke ist eine Balkenbrücke, die aus zwei stählernen Längsträgern besteht, die mit Querträgern versteift sind (Abb. 6a). Sie weist vier Felder auf und das Hauptfeld hat eine Spannweite von 25.1 m. Die Gehplatte besteht aus vorgefertigten Betonplatten, die beidseitig auf Gummilager aufgestützt sind.



Abb. 6: a) Fussgängerbrücke über die Kantonsstrasse. b) Im Längsträger eingebauter Schwingungstilger. c) Abdeckung des Tilgers.

Aufgrund ihrer sehr kleinen Dämpfung wurde die Brücke durch Fussgänger und Druckstösse, die durch unter der Brücke durchfahrende Lastfahrzeuge verursacht wurden, in für Fussgänger unangenehme Schwingungen versetzt. Zur Abminderung der Schwingungen wurden im August 1990 in der Mitte des Hauptfeldes zwei Schwingungstilger in die seitlichen Längsträger eingebaut und mit Stahlhauben vor der Witterung geschützt (Abb. 6b und c). Die Masse der Tilger, die von vier Gewindestangen geführt und auf Stahlfedern gestützt ist, beträgt je 175 kg. Die Energiedissipation erfolgt über zwei Dämpfer, die aus einem mit Silikonöl gefüllten, zylindrischen Behälter bestehen, in dem ein Stab eingetaucht ist (Abb. 6b).

Zur Auslegung der Tilger wurde durch Messungen die Grundfrequenz der Brücke aus einem Frequenzspektrum entnommen. Sie betrug $f_b = 2.46 \text{ Hz}$. Die modale Dämpfung von $\zeta_b = 0.2 \dots 0.4 \%$ wurde mit Ausschwingversuchen ermittelt. Die modale Masse der ersten Eigenschwingung wurde hingegen analytisch mit einem Brückenmodell abgeschätzt, das aus dem Hauptfeld und zwei gleich langen Nebefeldern bestand. Die Modalform wurde aus Sinus-Funktionen konstruiert, die über die Auflager eine kontinuierliche erste Ableitung besaßen. Die Schätzung ergab eine modale Masse von $m_b = 30'500 \text{ kg}$.

Mit diesen Grössen wurden die Tilger gemäss den Formeln von den Hartog, d.h. ohne Berücksichtigung der modalen Dämpfung, ausgelegt. Die gesamte Tilgermasse von 350 kg ergab ein Massenverhältnis von $\mu = 1.15 \%$. Die daraus resultierende Tilgerfrequenz und Tilgerdämpfung betrug $f_t = 2.43 \text{ Hz}$ bzw. $\zeta_t = 6.5 \%$. Die Feinabstimmung der Tilger erfolgte im Labor.

3.2 Schrägseilbrücke

Die zweite Brücke ist eine Schrägseilbrücke mit einer Spannweite von 45 m (Abb. 7a). Der Querschnitt besteht aus einem stählernen Hohlkasten mit einer Breite von 3.1 m. Der Tilger wurde bereits in der Planungsphase mitberücksichtigt und nach Fertigstellung der Brücke im Juli 1992 im Hohlkasten eingebaut (Abb. 7b). Der Tilger besteht aus einer Masse von 1000 kg, die auf 4 Federn gelagert und mit 4 Dämpfern ausgerüstet ist (Abb. 7c). Die Dämpfer basieren auf dem gleichen Bauprinzip wie die Dämpfer, die in den Tilgern der Balkenbrücke eingebaut wurden.



Abb. 7: a) Fussgängerbrücke über die Kantonsstrasse. b) Einbau des Schwingungstilgers in den Hohlkasten des Brückenlängsträgers. c) Schwingungstilger im Labor.

Die Grundfrequenz und die modale Dämpfung der Grundschiwingung wurden mit Versuchen an der fertig erstellten Brücke bestimmt und betragen $f_b = 2.12 \text{ Hz}$ bzw. $\zeta_b = 0.5 \%$. Die modale Masse, $m_b = 23'000 \text{ kg}$, wurde mit einem Finiten Element Modell ermittelt. Die Tilgermasse von 1000 kg ergab daher ein Massenverhältnis von $\mu = 4.35 \%$. Die aus den Formeln von den Hartog berechneten Tilgerfrequenz und Tilgerdämpfung betragen $f_t = 2.03 \text{ Hz}$ bzw. $\zeta_t = 12.5 \%$. Die Feinabstimmung der Tilger erfolgte wiederum im Labor.

4 Versuche und Auswertung

Um das Temperatur- und Langzeitverhalten festzustellen, sind die beiden Brücken in der Zeitperiode 2008 und 2009 erneut untersucht worden.

4.1 Versuche

Ziel der Versuche war es, einerseits die Systemparameter der Brücke und des Tilgers, d.h. die Grundfrequenz, die modale Masse und Dämpfung der Brücke wie auch die Eigenfrequenz und modale Masse des Tilgers, und andererseits die Wirksamkeit des Tilgers bei einer Anregung durch Fussgänger zu bestimmen, um einen Vergleich mit den Ergebnissen beim Einbau der Tilger durchführen zu können.

Die Versuche zur Bestimmung der Systemparameter wurden mit einem Schwingungserreger durchgeführt (Abb. 8a und b). Mit einer beweglichen Masse von 31 kg konnten damit Kräfte bis zu 430 N aufgebracht werden. Es wurden Versuche mit harmonischer und stochastischer (weisses Rauschen), bandbegrenzter Anregung durchgeführt. Die vertikale Antwort der Brücke wurde mit Beschleunigungsaufnehmern am Standort des Tilgers auf beiden Seiten der Brücke erfasst (Abb. 8c). An der Balkenbrücke, wo die Schwingungstilger zugänglich waren, wurde auch die vertikale Beschleunigung der Tilgermassen erfasst. Mit einem weiteren Beschleunigungsaufnehmer wurde die Bewegung der Erregermasse gemessen (Abb.



Abb. 8: a) Schwingungserreger in der Mitte und Beschleunigungsaufnehmer auf beiden Seite der Gehplatte. b) Schwingungserreger. c) Beschleunigungsaufnehmer.

8b), um die Kraft, die der Schwingungserreger auf die Brücke ausübte, zu bestimmen. Darüber hinaus wurde mit einem Thermometer die Lufttemperatur erfasst. Die Versuche wurden je im Sommer und Winter durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur auf die Systemparameter zu erfassen.

4.2 Auswertung

Mit den Versuchsergebnissen aus der stochastischen Anregung sind die Transferfunktionen aus dem Quotienten der gemittelten Kreuzkorrelation zwischen der Antwort und der Anregung und der gemittelten Autokorrelation der Anregung berechnet worden. Dazu wurde die Funktion „*tfestimate*“ aus der „*Signal Processing Toolbox*“ von MATLAB verwendet (MATLAB 2009a). Die Amplitude und Phase der Anregung und der Antwort bei den Versuchen mit harmonischer Anregung ist mit der Matrix-Pencil-Methode (Lin et al. 1997) ermittelt worden.

Die Identifikation der Systemparameter des Zweimassenschwinger-Modells erfolgte mit der Funktion „*pem*“ aus der „*System Identification Toolbox*“ von MATLAB (MATLAB 2009b). Die Identifikationsmethode arbeitet im Zeitbereich und minimiert den Fehler zwischen der vorausgesagten und der gemessenen Systemantwort. Da die Anregung bandbegrenzt war, wurden die Zeitsignale der Antwort und der Anregung vorgängig mit einem Bandpassfilter bearbeitet. Das Resultat der Systemidentifikation lieferte direkt die physikalischen Parameter des Zweimassenschwinger-Modells.

5 Ergebnisse

5.1 Balkenbrücke

5.1.1 Wirksamkeit des Schwingungstilgers

Die visuelle Inspektion ergab, dass beide Tilger sich auch nach 18 Jahren Betrieb in einem sehr guten Zustand befanden. Die Gewindestangen, die als Führungen der Tilgermasse dienten, wiesen keinerlei Abnutzungserscheinungen auf. An einigen Stellen der Tilger hatte sich lediglich etwas Rost angesetzt.

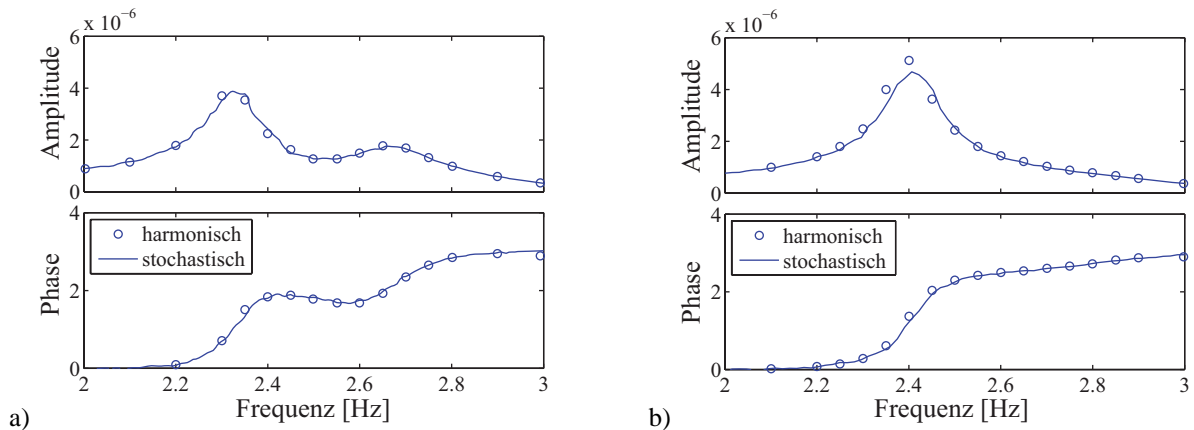


Abb. 9: a) Amplitude und Phase der Transferfunktion im Sommer 2008. b) Amplitude und Phase der Transferfunktion im Winter 2009.

Zur Bestimmung der Wirksamkeit des Schwingungstilgers wurden die Versuche wiederholt, die beim Einbau durchgeführt wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Ergebnisse im Sommer 2008 sind vergleichbar mit den ursprünglichen Ergebnissen beim Einbau der Tilger. Die kleinen Abweichungen sind hauptsächlich auf die unumgänglichen Streuungen zurückzuführen, die aus den unscharfen Versuchsbedingungen (unterschiedliche Fussgänger, transienter Vorgang) herrühren. Bedeutender ist hingegen die Abweichung zwischen der Messung im Winter 2009 und den Messungen im Sommer. Die Wirksamkeit des Tilgers beträgt im Winter rund die Hälfte der Wirksamkeit im Sommer.

Tabelle 1: Max. Beschleunigung an der Balkenbrücke infolge Anregung durch einen Fussgänger [ms^{-2}].

	Sommer 1990	Sommer 2008	Winter 2009
Tilger blockiert	1.2	1.3	1.1
Tilger frei	0.3	0.25	0.45
Abminderungsfaktor	4	5.2	2.4

Aufschluss über diesen Unterschied gibt Abb. 9 wieder, welche die Amplitude und Phase der Transferfunktionen im Sommer 2008 bei einer Lufttemperatur von 28°C und im Winter 2009 bei einer Lufttemperatur von 6°C darstellt. Da beim Einbau des Tilgers die Lufttemperatur nicht erfasst wurde, musste diese nachträglich aus den Messungen einer Wetterstation in der näheren Umgebung der Brücke bestimmt werden. Am Tag der Messungen im Jahr 1990 betrug die max. Lufttemperatur 27°C und war somit vergleichbar mit der an der Wetterstation gemessenen max. Lufttemperatur am Tag der Messungen im Sommer 2008 (24°C).

Die durchgezogenen Kurven stellen die Resultate aus der stochastischen Anregung und die Kreise die Resultate aus der harmonischen Anregung dar. Obwohl die Transferfunktionen bei stark unterschiedlichen Schwingungsamplituden ermittelt wurden, ist die Übereinstimmung sehr gut und bestätigt dadurch das weitgehend lineare Verhalten des Gesamtsystems.

Die Amplitude der Transferfunktion im Sommer 2008 zeigt den vertrauten Verlauf mit den zwei lokalen Maxima. Da die beiden Maxima jedoch nicht die gleiche Amplitude aufweisen, liegt eine Verstimmung des Tilgers vor. Um festzustellen, ob diese Verstimmung durch den langjährigen Einsatz hervorgerufen wurde, sind die Messungen der Sandsackversuche aus dem Sommer 1990 nochmals ausgewertet worden. Abb. 10 vergleicht die Amplitude der Transferfunktion im Sommer 2008 mit jener im Sommer 1990. Diese zeigt, dass der Tilger bereits beim Einbau verstimmt war. Da die Lufttemperaturen im Sommer 1990 und Sommer 2008 nahezu gleich waren, wird die Hypothese einer Verstimmung durch den langjährigen Einsatz hinfällig.

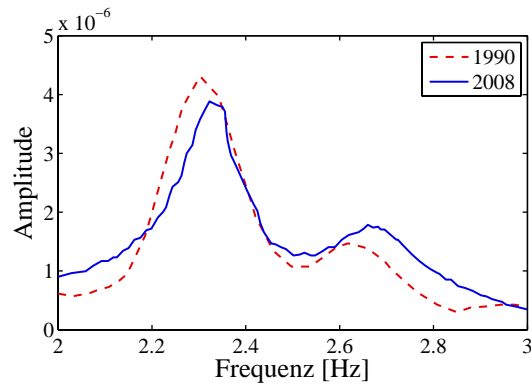


Abb. 10: Vergleich der Amplitude der Transferfunktionen im Sommer 1990 und im Sommer 2008.

Die Amplitude der Transferfunktion im Winter 2009 zeigt nur noch ein Maximum (Abb. 9b). Die Verstimmung des Tilgers ist daher noch grösser geworden. Diese Änderung ist bedeutender als jene zwischen Sommer 1990 und Sommer 2008. Mit zunehmender Verstimmung nimmt die Wirksamkeit des Tilgers ab und erklärt den deutlich schlechteren Abminderungsfaktor in Tabelle 1.

5.1.2 Identifikation der Systemparameter mit blockiertem Tilger

Durch Versuche mit blockiertem Tilger konnten die Systemparameter der Brücke ermittelt werden. Diese sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Sie zeigen, dass sich die Grundfrequenz der Brücke in den letzten 18 Jahren nur geringfügig verändert hat. Die Grundfrequenz veränderte sich auch nicht zwischen Sommer und Winter. Die ursprüngliche Messung der modalen Dämpfung ergab etwas grössere Werte als die Messungen im Sommer 2008 und im Winter 2009, doch dürften die Unterschiede von den unterschiedlichen Amplituden und Auswerteverfahren herrühren.

Tabelle 2: Systemparameter der Brücke mit blockiertem Tilger.

	Sommer 1990	Sommer 2008	Winter 2009
Frequenz [Hz]	2.44	2.46	2.46
Modale Dämpfung [%]	0.2 – 0.4	0.15	0.15
Modale Masse [kg]	30'500*	18'150	17'300

* berechnet

Eine signifikante Abweichung ist hingegen bei der modalen Masse festzustellen. Die ursprüngliche, rein rechnerisch bestimmte modale Masse weicht massiv von der modalen Masse ab, die durch die neuerlich durchgeführten Versuche bestimmt wurde. Zur Überprüfung wurde die modale Masse mit einem Finite Element Modell der Brücke erneut berechnet. Das Ergebnis ergab eine modale Masse von 17'000 kg. Werden dazu die Massen der beiden Tilger (350 kg) und die unbewegliche Masse des Schwingungserregers (96 kg) noch zugerechnet, so resultiert eine modale Masse von ca. 17'450 kg, die gut mit den modalen Massen übereinstimmt, die experimentell bestimmt wurden. Übrigens zeigen die Versuchsergebnisse, dass die modale Masse nur auf mehrere Prozente genau experimentell bestimmt werden kann.

Die ursprüngliche, rein rechnerisch bestimmte modale Masse ist offensichtlich falsch und erklärt teilweise die Verstimmung des Tilgers bereits beim Einbau. Da die tatsächliche modale Masse wesentlich kleiner als die berechnete war, betrug das tatsächliche Massenverhältnis nicht $\mu = 1.15\%$ sondern $\mu = 2.2\%$. Die daraus resultierende optimale Tilgerfrequenz und Tilgerdämpfung gemäss den Hartog hätte daher $f_t = 2.41\text{ Hz}$ bzw. $\zeta_t = 9.1\%$ anstatt $f_t = 2.43\text{ Hz}$ bzw. $\zeta_t = 6.5\%$ betragen. Die Abweichung der Tilgerfrequenz ist kleiner als 1%. Jene der Tilgerdämpfung beträgt hingegen rund 30%. Aufgrund der Frequenzganglinie, die beim Einbau der Tilger gemessen wurde (Abb. 10), musste bereits damals eine Frequenzverstimmung der Tilger vorliegen, da die fehlerhafte modale Masse alleine die Messung nicht erklä-

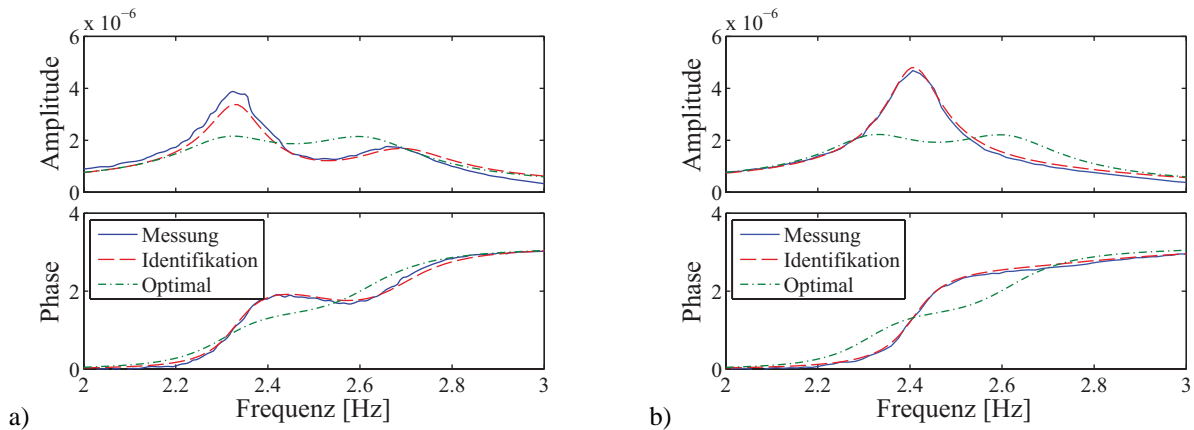


Abb. 11: Transferfunktionen der Messung, der Identifikation und bei optimaler Tilgerauslegung.
 a) Sommer 2008, b) Winter 2009.

ren kann. Indem die modale Masse überschätzt und dadurch das Massenverhältnis unterschätzt wurde, hatte der Fehler jedoch nahezu keine Auswirkungen auf die Abschwächung der Schwingungsamplituden der Brücke durch den Tilger.

5.1.3 Identifikation der Systemparameter mit frei schwingendem Tilger

Zur Identifikation der Systemparameter des Tilgers wurden die Systemparameter der Brücke aus Tabelle 2 als bekannt vorausgesetzt. Allerdings wurden die Massen der beiden Tilger (350 kg) und die unbewegliche Masse des Schwingungserregers (96 kg) in den Systemparametern berücksichtigt. Dadurch erhöht sich die Grundfrequenz der Brücke auf $f_b = 2.49$ Hz und die modale Masse der Brücke nimmt auf 17'100 kg ab. Tabelle 3 stellt die identifizierten Systemparameter dar. Die Identifikation erfolgte mit den gemessenen Beschleunigungen der Brücke und der Tilger. Die Messungen an beiden Tilgern ergaben die gleichen Systemparameter.

Tabelle 3: Systemparameter der Brücke mit frei schwingendem Tilger (* Parameter fixiert).

	Brücke			Tilger			
	Freq. [Hz]	Dämpf. [%]	Masse [kg]	Freq. [Hz]	Dämpf. [%]	Masse [kg]	Wirkungsgrad [%]
Sommer	2.49*	0.15*	17'100*	2.52	6.5	410	65
Winter	2.49*	0.15*	17'100*	2.66	14	380	46
Optimal	2.49	0.15	17'100	2.44	9.1	380	100

Man stellt fest, dass die identifizierte Tilgerfrequenz im Sommer deutlich grösser als die optimale Tilgerfrequenz ist. Diese Verstimmung ist hauptsächlich für die ungleiche Amplitude der Maxima der Frequenzganglinie verantwortlich. Die gemessene Tilgerdämpfung entspricht der ursprünglich geplanten Tilgerdämpfung. Im Winter nehmen die Tilgerfrequenz und auch die Tilgerdämpfung weiter zu, wobei sich die letztere mehr als verdoppelt. Diese Beobachtung lässt sich dadurch erklären, dass die Viskosität des Silikonöls der Dämpfer temperaturabhängig ist und bei kalten Temperaturen zu einer höheren Steifigkeit und Dämpfung des Tilgers führt. Durch die Verstimmung des Tilgers beträgt im Sommer der Wirkungsgrad nur 65%. Im Winter sinkt sie noch weiter auf 46%.

Der Unterschied der identifizierten Tilgermasse zwischen Sommer und Winter hat keinen physikalischen Hintergrund und beruht hauptsächlich auf Ungenauigkeiten des Identifikationsverfahrens. Die identifizierten Tilgermassen entsprechen jedoch recht genau der geplanten Tilgermasse. Die tatsächliche Tilgermasse ist unbekannt, da sie vor dem Einbau nicht gewogen wurde.

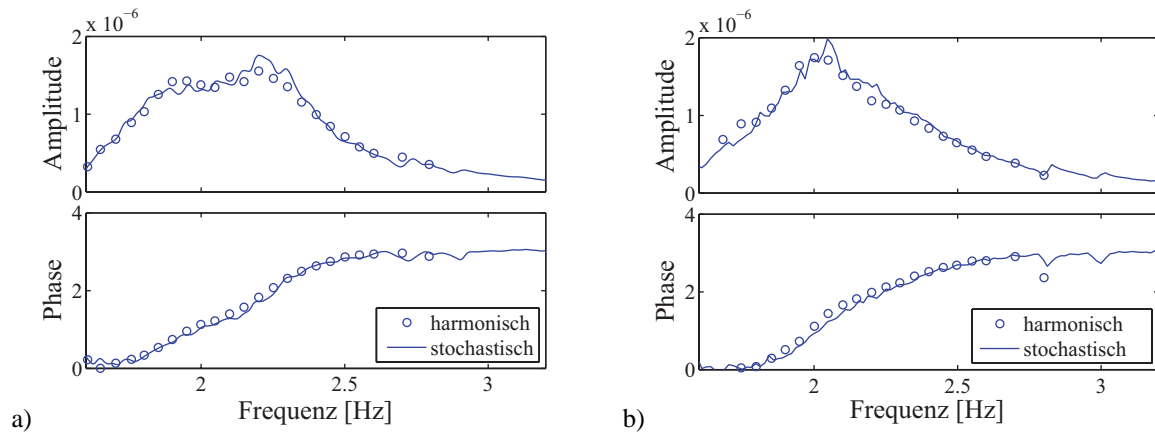


Abb. 12: a) Amplitude und Phase der Transferfunktion im Sommer 2009. b) Amplitude und Phase der Transferfunktion im Winter 2009.

Abb. 11 zeigt die gemessenen und mit den identifizierten Parametern berechneten Amplituden und Phasen der Transferfunktionen der Messungen (stochastische Anregung) im Sommer 2008 und im Winter 2009. Die berechneten Amplituden weisen generell eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Amplituden auf. Abb. 11 zeigt auch, dass die Amplituden und Phasen der Transferfunktionen substantiell von den Amplituden und Phasen mit den optimalen Parametern abweichen. Das Maximum der Amplitude der Transferfunktion im Winter 2009 ist etwa doppelt so gross wie das Maximum mit den optimalen Parametern.

5.2 Schrägseilbrücke

5.2.1 Wirksamkeit des Schwingungstilgers

Da eine visuelle Inspektion des Tilgers, der sich im Brückenkasten befindet, die Sperrung einer Fahrspur der Kantonsstrasse verursacht hätte, wurde auf die Inspektion verzichtet. Sein heutiger Zustand ist daher unbekannt. Die Wirksamkeit des Schwingungstilgers wurde mit Versuchen überprüft, die auch beim Einbau des Tilgers im Sommer 1992 durchgeführt wurden. Da der Tilger nicht zugänglich war, wurden nur Versuche mit dem frei schwingenden Tilger vorgenommen.

Tabelle 4: Max. Beschleunigung an der Schrägseilbrücke [ms^{-2}].

	Sommer 1992	Sommer 2009	Winter 2009
Hüpfen 1 Person	0.45	0.45	0.55
Hüpfen 2 Personen	0.8	0.7	0.9
Laufen 1 Person	0.3	0.2	0.25
Laufen 2 Personen	0.4	0.3	0.4

Tabelle 4 listet die Ergebnisse der Versuche auf. Generell sind keine bedeutenden Abweichungen zwischen den neuerlich durchgeführten und den ursprünglichen Messungen zu beobachten. Die Messergebnisse des Winters 2009 sind hingegen durchwegs etwas grösser als jene des Sommers 2009 und deuten auf eine Verschlechterung der Wirksamkeit hin, die jedoch bedeutend kleiner als jene bei der Balkenbrücke ist. Die Amplituden der gemessenen Transferfunktionen, die in Abb. 12 dargestellt sind, unterlegen diese Beobachtung, denn das Maximum der Amplitude der Transferfunktion im Winter 2009 ist nur etwas grösser als jene im Sommer 2009. Wie bei der Balkenbrücke, doch weniger stark ausgeprägt, zeigt die Amplitude der Transferfunktion im Sommer 2009 zwei lokale Maxima auf, während jene im Winter 2009 eindeutig nur ein Maximum besitzt. Die Lufttemperaturen betragen im Winter 2009 3°C und im Sommer 2009 30°C . Mit den Daten einer benachbarten Wetterstation wurde die max. Lufttemperatur während der

Versuche im Sommer 1992 auf 25°C geschätzt. Bei der gleichen Wetterstation betrug die max. Lufttemperatur im Sommer 2009 29°C.

5.2.2 Identifikation der Systemparameter mit frei schwingendem Tilger

Im Gegensatz zur Balkenbrücke, bei der die Parameter der Brücke mit Versuchen mit blockierten Tilgern bestimmt werden konnten, mussten, bedingt durch die Unzugänglichkeit des Tilgers, bei der Schrägseilbrücke alle 6 Systemparameter gleichzeitig und nur aus den Messungen der Beschleunigung auf der Brückenplatte bestimmt werden. Das Ergebnis ist in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Systemparameter mit frei schwingendem Tilger (alle Parameter frei).

	Brücke			Tilger		
	Freq. [Hz]	Dämpf. [%]	Masse [kg]	Freq. [Hz]	Dämpf. [%]	Masse [kg]
Sommer	2.15	3.4	22'300	2.03	8.9	470
Winter	2.21	-2.9	27'800	2.13	22	2380

Auffallend am Ergebnis ist, dass einige Parameter offensichtlich unphysikalisch (negative Dämpfung) oder sehr ungenau (Tilgermasse) sind. Andere Parameter wie die Brücken- und Tilgerfrequenz und die modale Dämpfung des Tilgers scheinen durchaus realistisch zu sein. In diesem Fall ist die modale Masse der Brücke offenbar nur mit grosser Unsicherheit bestimmbar.

Es drängt sich daher auf, im Identifikationsprozess die Anzahl Parameter zu reduzieren, indem die Tilgermasse und die modale Dämpfung der Brücke fixiert werden. Da die geplante Tilgermasse bekannt ist, dürften durch deren Fixierung keine bedeutenden Unsicherheiten auftreten. Ähnliches gilt für die modale Dämpfung der Brücke, da sie einerseits sehr klein ist, sonst wäre ein Tilger nicht erforderlich, und andererseits einen geringen Einfluss auf die Tilgerfrequenz und einen noch geringeren auf die Tilgerdämpfung hat (siehe Abb. 3). Sie kann z.B. als verschwindend klein angenommen werden.

Die Ergebnisse des Identifikationsprozesses mit fixierter Tilgermasse bzw. modaler Dämpfung der Brücke sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Schätzung der Parameter erfolgt nun weit zuverlässiger als ohne Fixierung. Unphysikalische Werte treten nicht mehr auf und die Unsicherheiten bewegen sich innerhalb der Schwankungsbreiten, die auch bei der Balkenbrücke beobachtet wurden.

Tabelle 6: Systemparameter mit frei schwingendem Tilger (* Parameter fixiert).

	Brücke			Tilger			Wirkungsgrad [%]
	Freq. [Hz]	Dämpf. [%]	Masse [kg]	Freq. [Hz]	Dämpf. [%]	Masse [kg]	
Sommer	2.15	0.8	24000	2.01	13.6	1000*	87
	2.15	0*	24600	2.00	14.6	1180	84
Optimal	2.15	0.8	24000	2.07	12	1000	100
Winter	2.18	1.0	26100	2.18	14.9	1000*	77
	2.19	0*	26600	2.16	17.0	1300	78
Optimal	2.18	0.9	25900	2.10	11.8	1000	100

Die identifizierten Parameter belegen, dass sich die Frequenz und Dämpfung des Tilgers analog verändert wie bei der Balkenbrücke. Mit abnehmender Lufttemperatur nehmen sowohl die Tilgerfrequenz wie auch die Tilgerdämpfung zu. Auch bei dieser Brücke ist der Grund im Temperaturverhalten des Silikonöls des

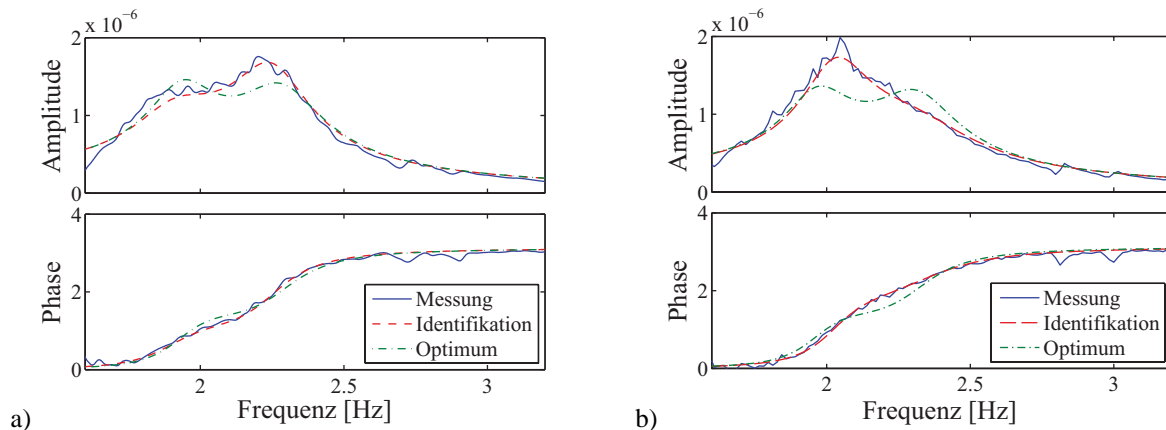


Abb. 13: Transferfunktionen der Messung, der Identifikation und bei optimaler Tilgerauslegung.
a) Sommer 2009, b) Winter 2009.

Dämpfers zu suchen. Die Zunahme der Tilgerfrequenz ist ausgeprägter (ca. 8% statt 5.5%) und die der Tilgerdämpfung hingegen wesentlich kleiner (ca. 12% statt 115%).

Der Tilger ist sowohl im Sommer wie auch im Winter verstimmt, doch sind die Auswirkungen kleiner als bei der Balkenbrücke, da das Massenverhältnis ($\mu = 4.5\%$ statt $\mu = 2.2\%$) und die modale Dämpfung ($\zeta_b = 0.8\%$ statt $\zeta_b = 0.15\%$) der Brücke grösser sind. Im Sommer beträgt der Wirkungsgrad rund 85% und im Winter sinkt er auf 77% ab. Die gemessenen, die mit den identifizierten Parametern berechneten und die optimalen Transferfunktionen sind in Abb. 13 dargestellt.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der zwei Brücken, die vor ca. 20 Jahren mit Tilgern ausgerüstet wurden, hat folgende Ergebnisse geliefert:

- Der knapp zwei Jahrzehnte dauernde Betrieb hat keine Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Tilger gehabt. Beide Tilger sind noch unvermindert funktionsfähig. Soweit rückverfolgbar entsprach die neu gemessene Wirksamkeit der Tilger der ursprünglichen Wirksamkeit beim Einbau. Die visuelle Inspektion der Tilger der Balkenbrücke hat keine nennenswerten Verschleisserscheinungen zu Tage gebracht.
- Beobachtet wurde hingegen ein bedeutender Einfluss der Temperatur auf die Frequenz und Dämpfung der Tilger, wobei mit abnehmender Temperatur sowohl die Tilgerfrequenz wie auch die Tilgerdämpfung zunehmen. Diese Beobachtung lässt sich dadurch erklären, dass die Viskosität des Silikonöls der Dämpfer temperaturabhängig ist und bei kalten Temperaturen zu einer höheren Steifigkeit und Dämpfung des Tilgers führen. Die bedeutende Änderung der Tilgerparameter mit der Temperatur hat folgende praktische Konsequenzen:
 1. Die Einhaltung eines gleichbleibenden Wirkungsgrades eines Tilgers während eines vollständigen Jahreszykluses ist nicht möglich. Aufgrund der unvermeidlichen Verstimmung des Tilgers sollte daher bei seiner Planung eine Reduzierung des Wirkungsgrades auf 50 – 70% berücksichtigt werden.
 2. Ein Tilger kann ausreichend genau mit den Formeln von Den Hartog bemessen werden. Alle weiter gehenden Bemessungskriterien haben nur theoretische Bedeutung, da ihre Abweichungen zu den Den Hartog'schen Formeln viel kleiner als die Änderungen eines Tilgers sind, die durch Temperaturänderungen während eines Jahres hervorgerufen werden.
- Die Parameter des Zweimassenmodells des Brücke-Tilger-Systems lassen sich mittels Versuche mit stochastischer Anregung und anschliessender Anwendung eines Systemidentifikationsverfahrens ausreichend genau bestimmen. Falls der Tilger zugänglich ist und blockiert werden kann, so ist es empfehlenswert, die Identifikation der Parameter in zwei Schritten durchzuführen. Im ersten Schritt wer-

den die Parameter der Brücke (modale Masse, Eigenfrequenz und modale Dämpfung) aus Versuchen mit blockiertem Tilger ermittelt. Im zweiten Schritt werden die Versuche mit frei schwingendem Tilger verwendet, um die Parameter des Tilgers zu identifizieren, wobei die bereits bekannten Parameter der Brücke festgehalten werden. Ist ein Blockieren des Tilgers nicht möglich, so wird empfohlen, die Identifikation der Parameter mit fixierter Tilgermasse und/oder modaler Brückendämpfung durchzuführen. Als Tilgermasse soll die geplante Tilgermasse und als Brückendämpfung eine sehr kleine Dämpfung eingesetzt werden. Die gleichzeitige Bestimmung aller Parameter wird nicht empfohlen, da die Ergebnisse zu ungenau ausfallen.

Literatur

- Asami, T., Nishihara, O. & Baz, A. M. (2002) Analytical solutions to H-infinity and H-2 optimization of dynamic vibration absorbers attached to damped linear systems. *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, 124, 284–295.
- Bachmann, H. & Weber, B. (1995) Tuned vibration absorbers for "lively" structures. *Structural Engineering International*, 5, 31–36.
- Chang, C. C. (1999) Mass dampers and their optimal designs for building vibration control. *Engineering Structures*, 21, 454–463.
- Dallard, P., Fitzpatrick, A. J., Flint, A., Le Bourva, S., Low, A., Ridsdill-Smith, R. M. & Willford, M. R. (2001) The London Millennium Footbridge. *Structural Engineer*, 79, 17–33.
- Den Hartog, J. P. (1940) *Mechanical vibrations*. McGraw-Hill Book Company, New York and London.
- Feltrin, G. (2005) The tuned mass damper. In Weber, F., Feltrin, G. & Huth, O. (Eds.) *SAMCO-Guidelines on structural control*. http://www.samco.org/network/download_area/guidelines_sc.pdf.
- Lin, Y., Hodgkinson, P., Ernst, M. & Pines, A. (1997) A novel detection–estimation scheme for noisy NMR signals: Applications to delayed acquisition data. *Journal of Magnetic Resonance*, 128, 30–41.
- MATLAB (2009a) Signal processing toolbox V6.12. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts.
- MATLAB (2009b) System identification toolbox V7.3. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts.
- Meinhardt, C., Dressen, O. & Dalmer, F. (2008) Increase of the structural damping due to the application of tuned mass dampers TMD subject to the footbridge construction. *Footbridge conference*. Porto.
- Nishihara, O. & Asami, T. (2002) Closed-form solutions to the exact optimizations of dynamic vibration absorbers (minimizations of the maximum amplitude magnification factors). *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, 124, 576–582.
- Ormondroyd, J. & Den Hartog, J. P. (1928) The theory of the dynamic vibration absorber. *Transactions of the ASME*, APM-50-7, 9–22.
- Petersen, C. (2001) *Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau*. Maurer und Söhne, GmbH & Co. KG, München.
- Soong, T. T. & Dargush, G. F. (1997) *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Warburton, G. B. (1982) Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10, 381–401.