

Einführung

Der Einsatz von Schwingungstilgern gehört mittlerweile zu einer Standardlösung, wenn es um die Reduzierung auftretender Gebäude- bzw. Bauteilschwingungen geht. Hauptsächlich werden diese bei Fußgängerbrücken, weitgespannten Deckenfeldern oder Schornsteinen gegen personen- bzw. windinduzierte Schwingungen eingesetzt, kann doch dadurch eine hohe Wirkung bei relativ geringem zusätzlichem Materialaufwand erzielt werden. Dennoch ist das Potential dieser Form der passiven Schwingungskontrolle im Hinblick auf Anwendungsgebiete, Abmessungen und effektive zusätzliche Massen sowie deren Wirksamkeit in der Praxis bei weitem nicht ausgeschöpft. Dies wird vor allem dann deutlich, wenn man bei technischen Veröffentlichungen das Verhältnis zwischen theoretischen Untersuchungen und praktischen Anwendungen betrachtet – über tatsächliche Anwendungen wird in einem deutlich geringeren Maße berichtet.

Der folgende Beitrag soll nun beide Aspekte – die theoretische Optimierung und die praktische Realisierung näher betrachten und einige Beispiele präsentieren.

Optimierungsansätze

Die durch Schwingungstilger erzielbare Reduktionswirkung kann für unterschiedlichste Aufgabenstellungen angepasst werden. Dabei ist zunächst zu entscheiden, wie groß diese Reduzierung sein muss – bspw. um die Gebrauchstauglichkeit zu erhöhen oder aber die Ermüdungsbelastung auf ein akzeptables Niveau zu senken. Dabei sind jedoch auch andere Aspekte zu berücksichtigen. So zum Beispiel ist häufig eine breitbandige Wirkung innerhalb eines bestimmten Frequenzbereiches – also eine gewisse Robustheit erforderlich. Des Weiteren ist die relative Bewegung der Tilgermasse ein speziell bei der praktischen Umsetzung des Tilgerkonzepts relevanter Parameter. Bild 1 fasst diese 3 Optimierungskriterien und deren Abhängigkeit von den Tilgerparametern zusammen.

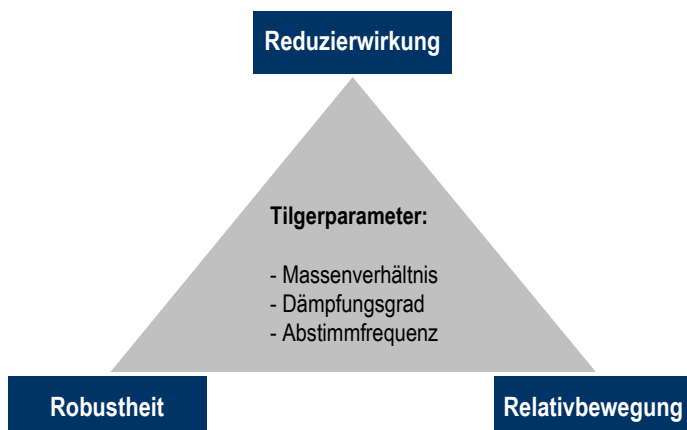


Bild 1:

Übersicht der Optimierungskriterien eines Schwingungstilgers – Optimierung durch Variation der Tilgermasse und des Dämpfungsgrades

Die optimale Abstimmfrequenz sowie der optimale Dämpfungsgrad eines Schwingungstilger werden am häufigsten mit Hilfe der Den Hartog Kriterien (siehe [2]) bestimmt. Allerdings gelten diese nur für eine harmonische Anregung und für ein ungedämpftes Hauptsystem, an dem der Schwingungstilger angekoppelt wird. Daher wurden in [3] Lösungen für Optimierungsprobleme gedämpfter Hauptsysteme für verschiedenen Optimierungskriterien präsentiert, welche in Bild 2 zusammengefasst sind.

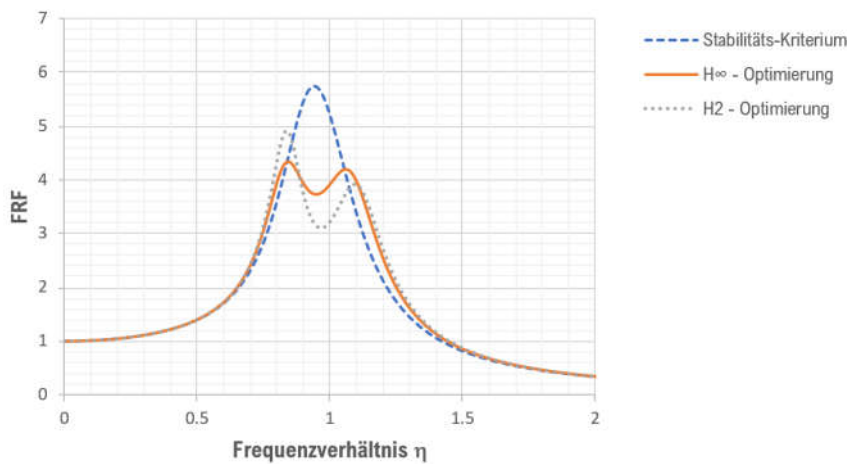


Bild 2:

Übersicht der Optimierungskriterien eines Schwingungstilgers – Optimierung durch Variation der Tilgermasse und des Dämpfungs-

Bei der H_{∞} -Optimierung ist das Kriterium die max. Resonanzüberhöhung zu minimieren. Dieses Kriterium ist bei einer harmonischen Anregung mit einer relativ fixen Anregungsfrequenz relevant. Bei der H_2 -Optimierung ist das Kriterium, die Fläche unterhalb der FRF Kurve zu minimieren, d.h. dieses Kriterium ist eine Optimierung für eine breitbandige, also stochastische Anregung. Eine Optimierung nach dem Stabilitätskriterium verfolgt das Ziel, einer möglichst schnellen Reduktion der auftretenden Schwingungen des Hauptsystems, ohne dass hier für eingeschwungene, stationäre Zustände berücksichtigt werden.

Die analytische Lösung besteht aus vielen Parameter – dementsprechend komplex sind die Lösungsterme. Stellt man diese jedoch grafisch dar, so lassen sich die optimalen Werte bequem ablesen. Bild 3 stellt die optimalen Werte der H_2 -Optimierung (stochastische Anregung) in Abhängigkeit von der intrinsischen Dämpfung des Hauptsystems und dem Massenverhältnis dar.

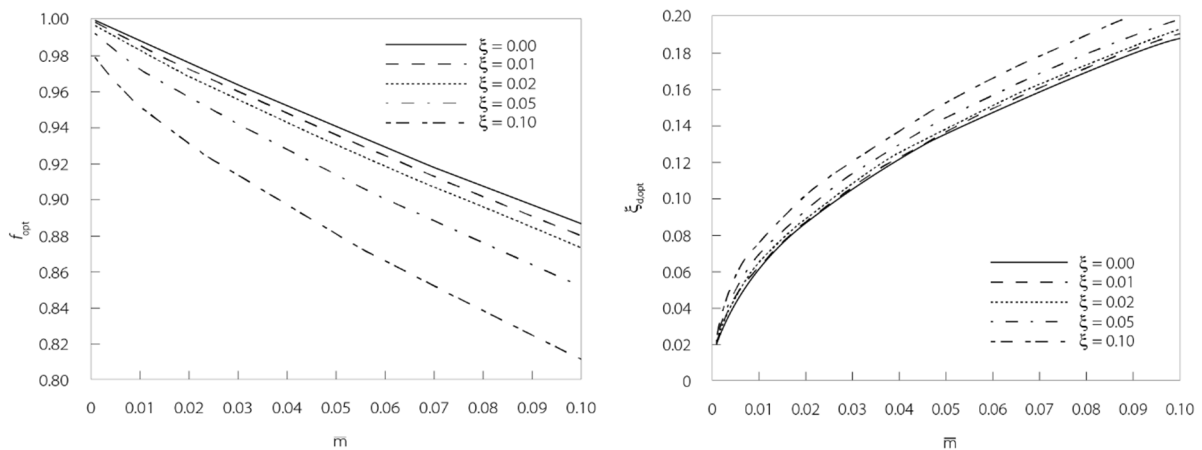


Bild 3: Optimale Abstimmfrequenz und Dämpfungsparameter für die H_2 Optimierung nach [3]

Für die richtige Auswahl der Tilgerparameter ist es wichtig, sich die jeweiligen Abhängigkeiten vor Augen zu führen. Hat das Massenverhältnis des Tilgers bspw. neben dem Einfluss auf die mögliche Reduzierwirkung noch weitere Einflüsse? Verschlimmert ein falsch abgestimmter Schwingungstilger ggf. das Schwingungsverhalten des zu bedämpfenden Systems. Zur Einschätzung dieser Abhängigkeiten sind in den Bildern 4-6 die erzielbaren Reduzierwirkungen und Relativbewegungen in Abhängigkeit vom Massenverhältnis, der Abstimmungsfrequenz (Verhältnis zur optimalen Abstimmungsfrequenz) und dem Dämpfungsgrad des Tilgers (Verhältnis zum optimalen Dämpfungsgrad) als Konturplots dargestellt. Zusammenfassend seien hier die wichtigsten Abhängigkeiten aufgeführt:

- die Robustheit (Reduzierwirkung bei abweichender Abstimmungsfrequenz) steigt mit größer werdendem Massenverhältnis (Bild 4 - links)
- Die Relativbewegungen der Tilgermasse nehmen bei abweichender Abstimmungsfrequenz innerhalb eines gewissen Frequenzbandes zu. Dieses Band ist bei überkritischer Abstimmung ($f_T > f_{opt}$) breiter. Mit größer werdendem Masseverhältnis nehmen die Relativbewegungen und der Einfluss der abweichenden Abstimmungsfrequenz ab (Bild 4 - rechts)
- Eine Abweichung des Dämpfungsgrades führt bei kleinerer Dämpfung zu einer stärkeren Beeinträchtigung der Reduzierwirkung – speziell bei kleinem Massenverhältnis. Erst bei einem Verhältnis > 2 zeigt sich eine deutliche Reduktion der Reduzierwirkung (Bild 5 - links)
- Erwartungsgemäß nehmen die Relativbewegungen mit größerer Dämpfung des Tilgersystems ab (Bild 5 - rechts)
- In einem schmalbandigen Frequenzbereich $f_T / f_{opt} = 1$ ist für Tilgersysteme mit geringer Dämpfung eine größere Reduzierwirkung möglich. Bis zu einem Faktor 1.5 für D_T/D_{opt} ist eine ähnliche Reduzierwirkung möglich, erst bei höherer Dämpfung nimmt die Reduzierwirkung ab – wird jedoch über einen breiteren Frequenzbereich erreicht (siehe Bild 6 – links).
- Mit größer werdender Dämpfung des Tilgersystems nimmt der Einfluss des Abstimmverhältnisses auf die Relativbewegungen der Tilgermasse ab (siehe Bild 6 – rechts).

Die in den Bildern 4-6 gezeigten Reduzierwirkungen U/U_0 ändern sich dabei in Abhängigkeit von der intrinsischen Dämpfung des Hauptsystems. Im dargestellten Fall betrug diese $D = 0.5\%$.

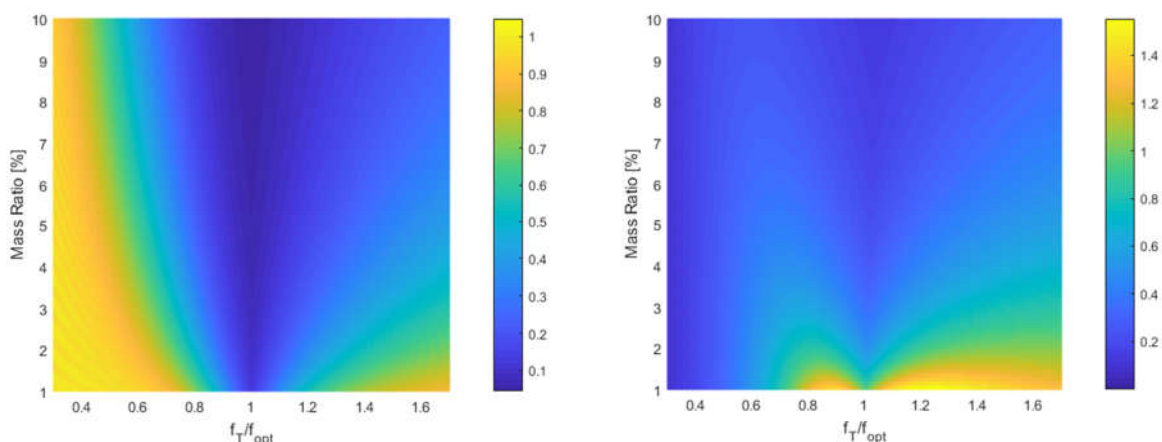


Bild 4: Links: Reduzierwirkung U/U_0 in Abhängigkeit von Massenverhältnis und Abstimmverhältnis (f_T/f_{opt}) eines Schwingungstilgers - Rechts: resultierende Relativbewegungen der Tilgermasse in Abhängigkeit von Massenverhältnis und Abstimmverhältnis (f_T/f_{opt})

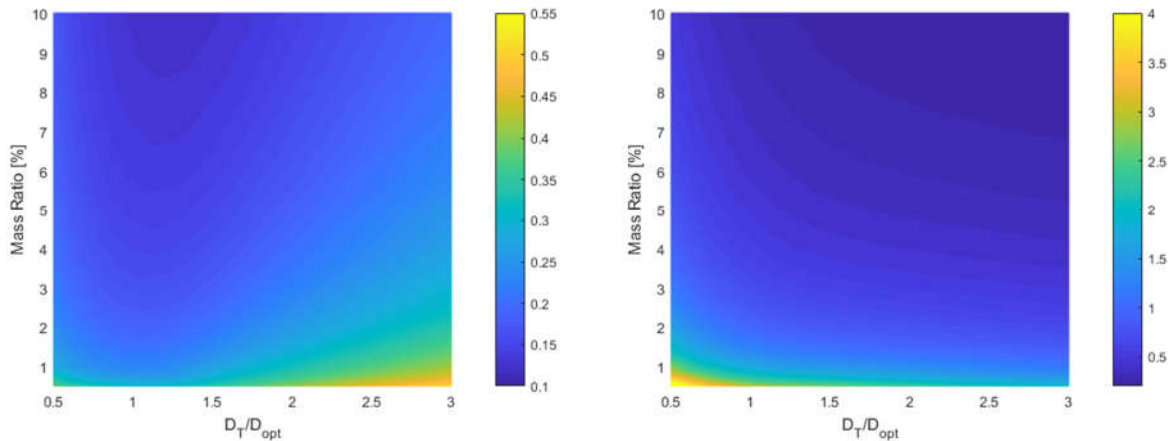


Bild 5: Links: Reduzierwirkung U/U_0 in Abhängigkeit von Massenverhältnis und Dämpfungsverhältnis (D_T/D_{opt}) eines Schwingungstilgers - Rechts: resultierende Relativbewegungen der Tilgermasse in Abhängigkeit von Massenverhältnis und Dämpfungsverhältnis (D_T/D_{opt})

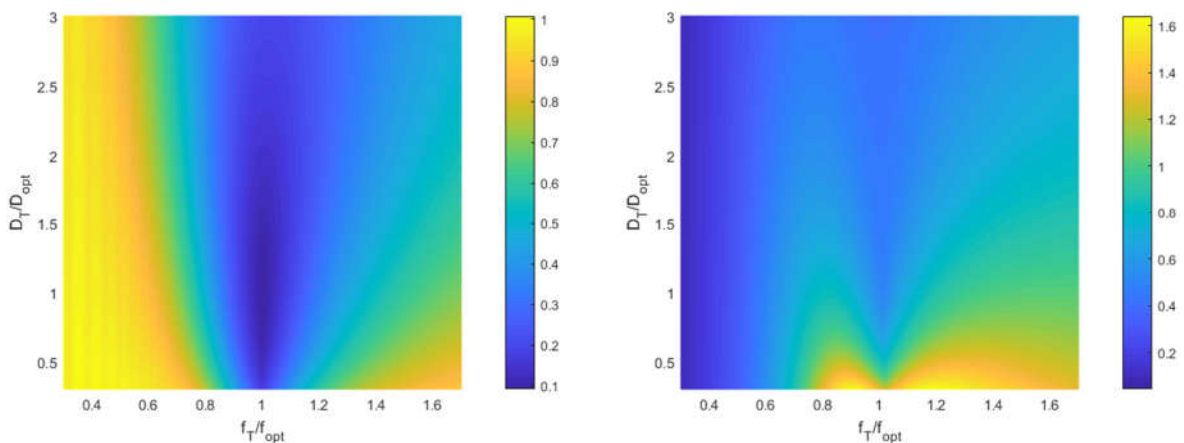


Bild 6: Links: Reduzierwirkung U/U_0 in Abhängigkeit von Abstimmverhältnis (f_T/f_{opt}) und Dämpfungsverhältnis (D_T/D_{opt}) eines Schwingungstilgers mit einem Massenverhältnis von 2% - Rechts: resultierende Relativbewegungen der Tilgermasse in Abhängigkeit von Abstimmverhältnis (f_T/f_{opt}) und Dämpfungsverhältnis (D_T/D_{opt})

Anwendungsgebiete von Schwingungstilgern und deren jeweilige Besonderheiten

Die Bandbreite der Anwendungen von passiven Schwingungstilgern bewegt sich zum einen zwischen effektiven Tilgermassen von unter einem Kilogramm bis hin zu hunderten von Tonnen. Auch im Hinblick auf die Abstimmfrequenzen ist eine große Bandbreite möglich. Diese kann zwischen Abstimmfrequenzen von unter 0.1 Hz bis hin zu Frequenzen im Bereich von 300 Hz liegen.

Während im Hinblick auf die effektive Schwingmasse mit zunehmenden Massen häufig ein Augenmerk auf eine Optimierung hinsichtlich einer möglichst geringen Tilgermasse gelegt wird, erfolgt im Hinblick auf die Abstimmfrequenz meist eine Optimierung der relativen Tilgerbewegungen. Bei niedrigen Abstimmfrequenzen sind die Relativbewegungen trotz niedrigem Beschleunigungsniveau meist sehr groß, so dass dies Einfluss auf den benötigten Bauraum bzw. die Abmessungen des Schwingungstilgers hat. Bei hohen Frequenzen sorgen große Relativbewegungen der Tilgermasse für entsprechend große dynamische Belastungen auf die Baukomponenten des Tilgersystem, so dass aus diesen Gesichtspunkten ebenfalls eine Optimierung der Relativbewegungen erforderlich ist.

Den häufigsten Einsatz finden Schwingungstilger bei Fußgängerbrücken oder leichten, weitgespannten Decken- oder Treppenkonstruktionen. Deren Schwingungsanfälligkeit gegenüber personeninduzierten Schwingungen definieren auch die „Komfortzone“ bei der Realisierung von Schwingungstilgern. Die Abstimmfrequenzen liegen in einem Bereich zwischen 1.5 Hz – 5 Hz, die max. Tilgerbewegungen zwischen 10-50 mm und aufgrund der leichten, jedoch tragfähigen Hauptstrukturen kann ein Tilgersystem mit einem relativ großen Massenverhältnis eingesetzt werden, welches dadurch robust gegen Frequenzverschiebungen ist und nur kleine Relativbewegungen aufweist, so dass die dynamischen Belastungen der Baukomponenten ebenfalls bleiben. Dadurch kann auch eine hohe Langlebigkeit erzielt werden. Herausforderungen bei dieser Art Anwendung ergeben sich eher aus ästhetischen Anforderungen - wenn bspw. das Tilgersystem komplett im Hauptsystem integriert werden soll und der verfügbare Bauraum nur sehr gering ist (siehe Beispiel Bild 7), oder wenn es Einschränkungen bei Montage der Tilger oder deren Zugänglichkeiten gibt.

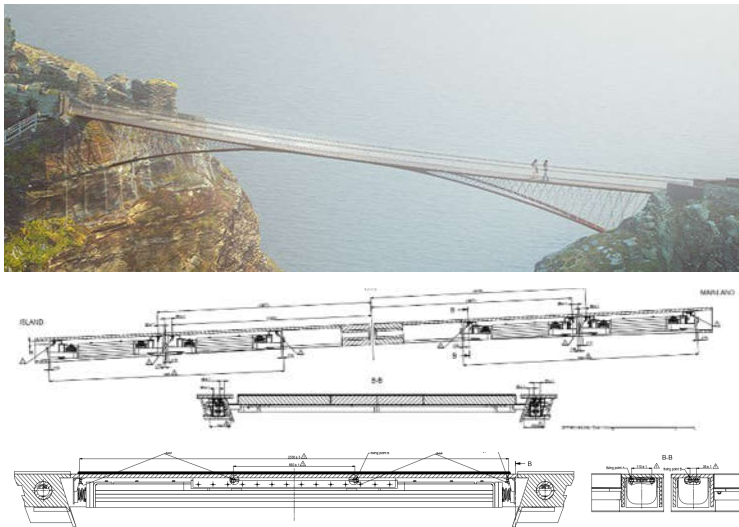


Bild 7:

Oben: Tintagel Footbridge in Cornwall – Mitte: vertikal wirksame Schwingungstilger integriert in die filigrane Tragstruktur – Unten: lateral wirkender Schwingungstilger, integriert in die filigrane Tragstruktur

Bild 8:

Schwingungstilger-Containment: Nachträgliche Montage an einem Schornstein



Ähnlich verhält es sich bei einem weiteren, häufig in der Praxis auftretenden Einsatzgebiet – der Applikation von Tilgern bei Schornsteinen o.ä. zur Reduktion wirbelinduzierten Schwingungen. Auch hier wird häufig mit einem großen Massenverhältnis – teilweise über 10%- gearbeitet um durch die resultierende Robustheit auf eine Frequenzabstimmung oder sogar auf ein Dämpfungselement verzichten zu können. Durch die Möglichkeit, eine Feinabstimmung vornehmen zu können und durch die Verwendung zusätzlicher Dämpfungselemente kann die notwendige effektive Schwingmasse des Tilgers deutlich reduziert werden – zumal die erforderliche zusätzliche Strukturdämpfung zur Verringerung der Vortex Shedding Effekte meist nur im Bereich von 1-2% liegt. Durch Verringerung der notwendigen effektiven

Schwingmasse ist es auch möglich, kleinere Containments einzusetzen – ein attraktives Mittel speziell bei der nachträglichen Ertüchtigung (siehe Bild 8).

Weitaus größere Herausforderungen ergeben sich beim Einsatz von passiven Tilgersystemen bei weitgespannten Hänge- oder Schrägseilbrücken. Auch hier erfolgt eine dynamische Anregung durch Wirbelablösung, welche jedoch zu Vertikalschwingungen des Brückendecks führen. Der Einsatz von Schwingungstilger und die damit verbundene Erhöhung der Strukturdämpfung stellt dabei eine gute Möglichkeit dar, die auftretenden Schwingungen zu reduzieren. Exemplarisch ist in Bild 9 das Reduktionpotential eines Brückendecks (Strouhal-Zahl 0.17) in Abhängigkeit von der Strukturdämpfung dargestellt.

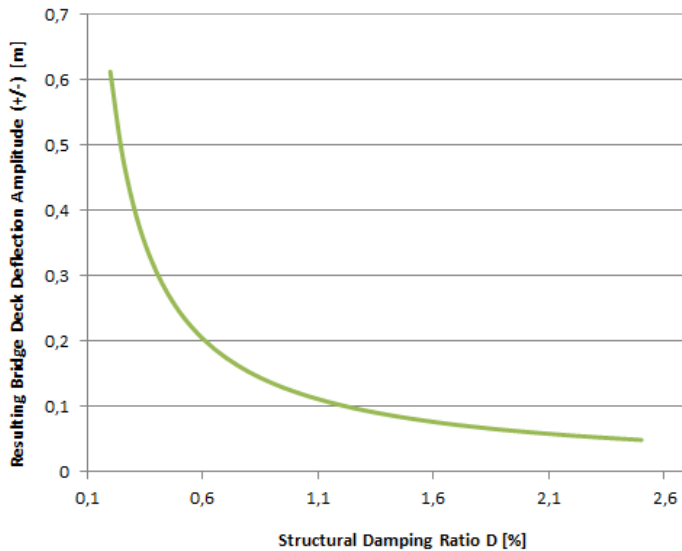


Bild 9:
Reduktionspotential für die auftretenden Schwingbewegungen eines Brückendecks (Strouhal-Zahl 0.17) in Abhängigkeit von der Strukturdämpfung

Größtes Problem bei der Realisierung von passiven Schwingungstilger-Systemen für weitgespannten Brücken sind die niedrigen, zusätzlich zu bedämpfenden Eigenfrequenzen und die Wahl des elastischen Bauteils zum Erzielen der niedrigen Abstimmfrequenzen. Bei einem erforderlichen Frequenzbereich zwischen 0.25 Hz -0.5 Hz, erfährt das elastische Bauteil eine statische Zusammendrückung von bis zu 4.5 m (siehe Bild 10), so dass der Einsatz von Standard Druck- oder Zugfedern hier nicht mehr möglich ist und spezielle konstruktive Lösungen – auch hier in Abstimmung mit dem verfügbaren Bauraum innerhalb des Brückendecks – erarbeitet werden müssen.

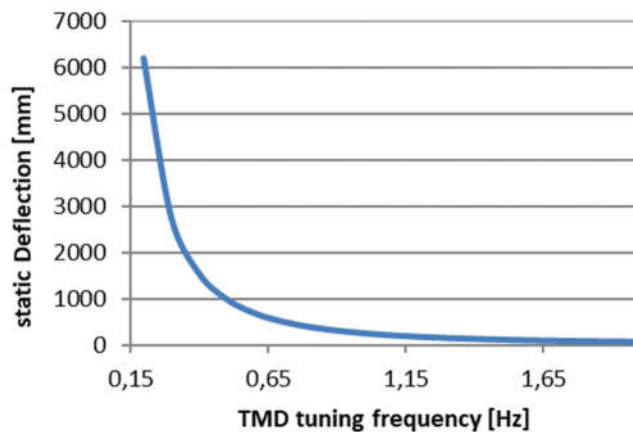


Bild 10:
Zusammendrückung des elastischen Elements in Abhängigkeit von der Tilger-Abstimmungsfrequenz

So war es zum Beispiel möglich, Schwingungstilger für eine Hängebrücke in China mit einer Abstimmfrequenz von 0.23 Hz zu applizieren (siehe [5]). Aufgrund der großen Zusammendrückung und des

begrenzten Bauraumes gilt den Relativbewegungen der Tilgermasse eines besonderen Augenmerks. So werden in der Regel größere Massenverhältnisse als für die erforderliche zusätzliche Strukturdämpfung nötig eingesetzt um die Relativbewegungen zu begrenzen und auch eine Lebensdauer, ähnlich der Lebensdauer der Brücke, zu ermöglichen.



Bild 11:

Humen- Brücke in China (oben) – installierte Schwingstilger-Systeme (unten) [5]

Aufgrund der ohnehin schon sehr hohen modalen Massen schwingungsanfälliger Hochhäuser (ca. 30.000 t– 80.000 t), wäre hier eine Anwendung passiver Systeme zur Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit – speziell zur Sicherstellung des Komforts der Bewohner- mit einem hohem Massenverhältnis sehr unwirtschaftlich. Daher muss eine Optimierung der effektiven Schwingmasse erfolgen, welche wiederum eine sehr akkurate Abstimmung des Tilgersystems bezüglich der optimalen Abstimmfrequenz und der Dämpfung erfordert. Die damit verbundenen großen Relativbewegungen müssen dafür in Kauf bzw. realisiert werden. Speziell Gebäude mit sehr langen Schwingperioden (8-15 s) weisen sehr große Bewegungen auf, so dass auch die relativen Bewegungen der Tilgermasse entsprechend groß sind.

Um diesen dennoch in einem realisierbaren Rahmen zu halten, werden Dämpferkomponenten eingesetzt, welche für die relevanten häufiger wiederkehrenden Windereignisse (1 bzw. 10 Jahres- Wiederkehrperiode) optimiert sind, bei Extremereignissen (50 bzw. 700 Jahres-Wiederkehrperiode) jedoch deutlich größere Dämpfungswiderstände aufweisen um die Relativbewegungen geringer zu halten. Bei diesen Extremereignissen ist dann der geforderte Komfort für die Bewohner zweitrangig. Auch bei diesen Anwendungen, stellt der nur bedingt verfügbare Bauraum eine weitere Herausforderung dar. Pendellösungen, wie sie z. Bsp. aus dem Taipeh 101 Tower in Taiwan bekannt sind benötigen bei größeren Schwingperioden deutlich größere Pendellängen (siehe Bild 12).

Hier wurden in den vergangenen Jahren Lösungen entwickelt, wie zum Bsp. Doppel-Pendel Lösungen oder das von GERB entwickelte Low Friction Rail System (siehe Bild 13), welches mit einem deutlich geringeren Platzbedarf auskommen. Letztgenanntes vereint noch weitere Vorteile, da eine Frequenzanpassung auch nachträglich problemlos in beide Richtungen des Frequenzspektrums möglich ist, während Pendelsysteme durch die Pendellänge zum unteren Frequenzbereich hin beschränkt sind.

Bild 12:

Erforderliche freie Pendellänge zum Erreichen einer Abstimmfrequenz bei Pendel-Tilgersystemen

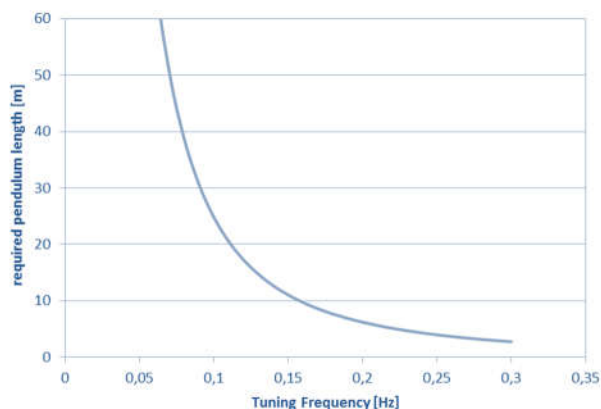


Bild 13:

GERB Low Friction Rail – Tilgersystem installiert in einem New Yorker Hochhaus (3 x 220 t) – Höhe: 260 m

Letztlich soll der Einsatz von Schwingungstilger-Systemen bei Windenergieanlagen bzw. für deren Turmstruktur als weiteres Beispiel für die Erweiterung der Leistungsfähigkeit von Schwingungstilgern durch Anwendung verschiedener Optimierungskriterien vorgestellt werden.

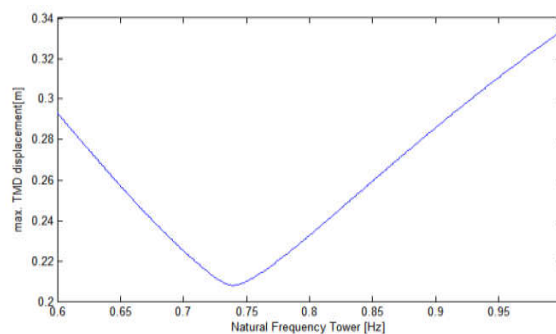
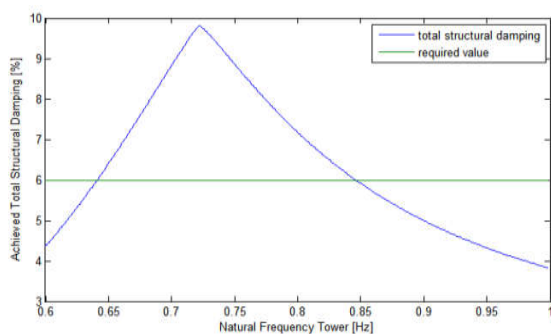


Bild 14: Ergebnisse der Optimierung für Turmkonstruktionen von Windenergieanlagen – links: erzielte Strukturdämpfung in Abhängigkeit von der Abstimmfrequenz des Tilgers - rechts: resultierende Relativbewegungen der Tilgermasse

Designkriterium in diesem speziellen Fall ist es, eine zusätzliche Strukturdämpfung für einen breiten Bereich an Eigenfrequenzen der Struktur zu erzielen, da die Turmstruktur in verschiedenen Bauzuständen (Offshore, Seetransport und Offshore) unterschiedliche Eigenfrequenzen aufweist, ein optimales Einstellen des Tilgers für den jeweiligen Bauzustand beim Errichtungsprozess jedoch zu aufwändig ist. In diesem Fall liegt der Fokus der Optimierung also auf der Robustheit und Tilgermasse und Dämpfungsgrad müssen so angepasst werden, dass die Mindest-Strukturdämpfung erreicht wird. Für den speziellen Fall ergab sich ein Massenverhältnis von 9% und eine Dämpfung des Tilgersystems von 20% - Parameter für

die auch die Relativbewegungen der Tilgermasse auf akzeptablem Niveau bleiben (siehe Bild 14). Die Tilgersysteme wurden so konstruiert, dass sie im Liegen auf dem Hebemittel montiert werden können und befinden sich nach dem Aufrichten der Turmstruktur an dessen Spitze (Bild 15).

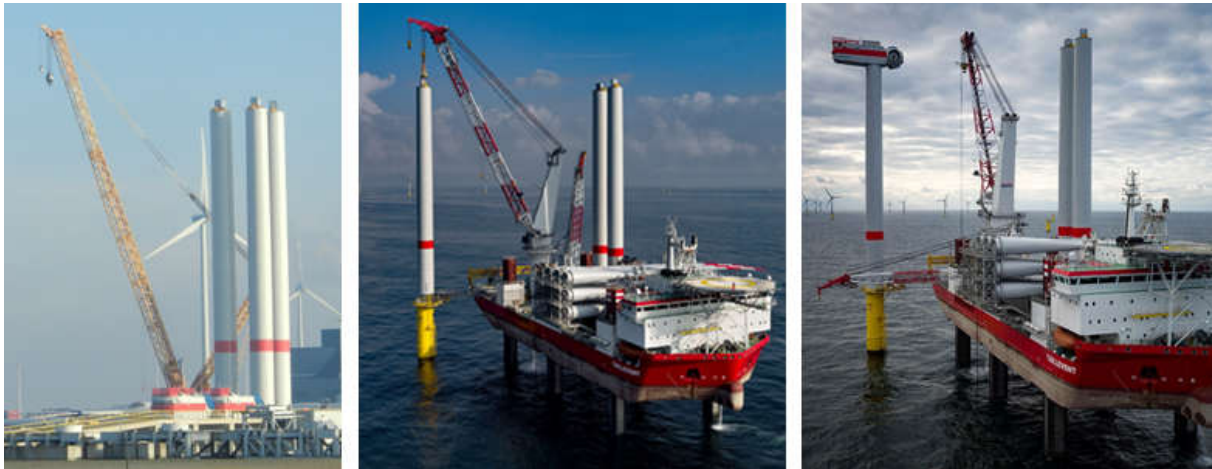


Bild 15: Verschiedene Bauzustände (Onshore, Errichterschiff, Offshore) – montierte Schwingungstilger am Turm

Zusammenfassung & Ausblick

Neben einer Vergrößerung des Reduzierungspotentials durch Anwendung einer auf die Anregung und intrinsische Dämpfung des Hauptsystems bezogenen Optimierung, verdeutlichen die hier gezeigten Zusammenhänge der einzelnen Tilgerparameter, dass auch die Einsatzbereiche von Schwingungstilgern durch geeignete Anpassung dieser Parameter deutlich vergrößert werden können. Speziell eine Optimierung der Schwingmasse stellt dabei eine offensichtliche Kostenoptimierung dar.

Die vorgestellten Beispiele aus der Praxis zeigen jedoch, dass auch andere Optimierungskriterien für eine Kostenreduktion oder aber eine Verbesserung der Reduzierungswirkung relevant sein können.

Die vorgestellten theoretischen Hintergründe als auch die genannten Beispiele konzentrieren sich dabei ausschließlich auf passive Schwingungstilgersysteme. Durch den Einsatz aktiver, semi-aktiver oder hybrider Systeme lässt sich noch eine weitere Reduktion der effektiven Tilgermasse bei gleichzeitiger Erhöhung der Robustheit erzielen.

Literatur

- [1] Weber, B., Feltrin, G.: Schwingungstilger – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung, 19. Symposium – Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, EMPA, 2016
- [2] Den Hartog, J.P., 1956, Mechanical Vibrations, 4th ed., McGraw-Hill, New York
- [3] Asami, T., Nihihara, O., Baz, A.M.: Analytical Solutions to H_∞ and H_2 Optimization of Dynamic Vibration Absorbers Attached to Damped Linear Systems, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.124, 2002
- [4] Meinhardt, C., Nawrotzki P.: Experimental Verification, International Conference on Industrial Chimneys and Cooling Towers ICCT 2016 Rotterdam, 2016
- [5] Gao, X., Meinhardt, C.: Anwendung der TMD-Technologie zu Wirbelschwingungsdämpfung in Brücken mit großer Spannweite, China Highway, Vol.604 No. 24, 2021
- [6] Meinhardt, C.: Ambiente Schwingungsmessungen an Hochhäusern zur Bestimmung der Wirksamkeit von Schwingungstilgern, VDI Tagung Baudynamik, 2009