

MAURER Massendämpfer



MAURER Massendämpfer für Wolgograd-Brücke

Massendämpfertypen

Problemstellung

Bauwerke können aufgrund ihrer schlanken oder auskragenden Bauweise und wegen ihrer üblicherweise geringen Eigendämpfung im Bereich um 1% anfällig auf Wind- und Erdbeben-induzierte Schwingungen sein. Ohne zusätzliche Dämpfungsmaßnahmen können folgende Probleme auftreten (Abb. 1):

- Hohe und höchste Bauwerke schwingen durch **Windanregung im Resonanzfall mit großen Amplituden**, was zu Unwohlsein (Seekrankheit) der Benutzer führen kann und somit die **Nutzung des Bauwerks massiv eingeschränkt** oder unmöglich ist.
- Das Nachschwingen hoher Bauwerke nach Erdbebenanregung kann zu **low cycle fatigue** führen.
- Bewegungsinduzierte **Galloping- und Flatterschwingungen bei Brücken** führen zu großen und lang anhaltenden Biege- und Torsionsschwingungen (Wolgograd-Brücke), was zu **Ermüdungsbrüchen** und sogar zum **Kollaps** der Brücke führen kann (Tacoma Narrows Bridge).
- **Personen-induzierte Schwingungen bei Decken, Tribünen und Fussgängerbrücken** können nicht-tolerierbar grosse Schwingamplituden erzeugen (Millennium Bridge).

Lösungen von MAURER

Für jedes Schwingungsproblem bietet **MAURER** den optimalen Massendämpfertyp mit bis zu 1000 t Masse.

Passive Massendämpfer:

- **standardTMD**: Feder-Masse-Schwinger mit Öldämpfer für die Schwingreduktion in vertikaler und horizontaler Richtung bei Brücken und Böden resp. Pendelmasse mit Öldämpfer für die Bedämpfung von horizontalen Schwingungen schlanker Bauwerke (Abb. 2, 3).
- **foldedTMD**: verschachtelte Pendelmasse mit Öldämpfer für **reduzierte Einbauhöhe** in hohen Bauwerken (Abb. 3).
- **compactTMD**: Pendelmasse mit Öldämpfer und invertiertem Pendel für **minimale Einbauhöhe** in hohen und höchsten Bauwerken.

Adaptive Massendämpfer:

- **controlledTMD**: Frequenz und Dämpfung sind nach dem Tilgerprinzip in Echtzeit auf die aktuelle Schwingfrequenz des Bauwerks abgestimmt, wodurch die **Schwingreduktion verbessert** wird oder die **Massendämpfermasse reduziert** werden kann (Abb. 2).

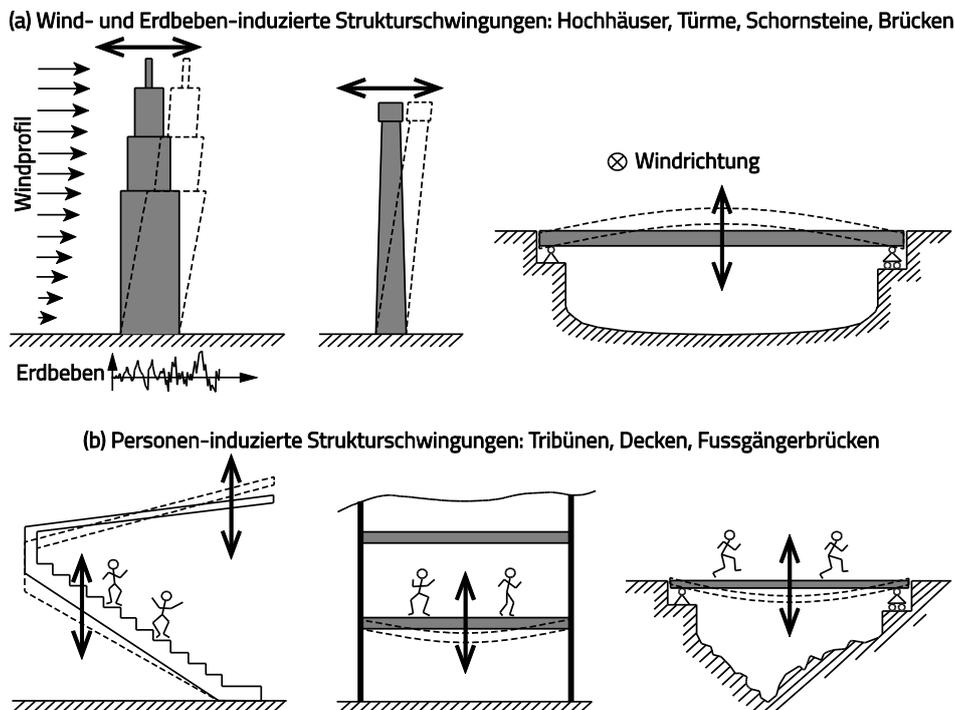


Abb. 1 – Schwingungsanfällige Bauwerke / Strukturen: (a) Wind- und Erdbeben-, (b) Personen-induzierte Schwingungen



Abb. 2 – *standardTMD* und *controlledTMD* in vertikaler und horizontaler Ausführung und präziser Einbau im Bauwerk



Abb. 3 – *standardTMD* in Pendelbauform im Bauwerk eingebaut und *foldedTMD* im Werk München

Generelle Vorteile der MAURER Massendämpfer

- Die verschiedenen Massendämpfertypen ermöglichen die bestmögliche Lösung des Schwingungsproblems.
- Optimale Auslegung aller Massendämpfertypen als Serviceleistung von MAURER.
- Schwingungsmessung am Bauwerk durch MAURER.
- Qualitätssicherung durch Messung der dynamischen Eigenschaften der Massendämpfer im Werk und im Bauwerk.
- Dank optimaler Abstimmung, präziser Fertigung und Qualitätskontrollen sind alle Massendämpfertypen robust, wartungsfrei und langlebig (>20 Jahre).

Spezifische Vorteile der MAURER Massendämpfertypen

- *standardTMD*: kostengünstig
- *foldedTMD* & *compactTMD*:
 - deutliche **Kostenersparnis** in hohen und höchsten Bauwerken dank **minimierter Einbauhöhe**
 - optimale Frequenzabstimmung in beiden Hauptrichtungen dank innovativem Pendellängenverstell-Mechanismus
- *controlledTMD*:
 - **Komfortmaximierung** im Bauwerk durch bis zu **80% verbesserter Schwingreduktion** im Vergleich zum passiven Massendämpfer
 - **Reduzierte Massendämpfermasse (75%-85% der nominellen Masse)** für gleiche Schwingreduktion wie mit passivem Massendämpfer
 - **Monitoring** der Bauwerksschwingungen integriert

Optimale Auslegung

Inputgrößen

Die optimale Auslegung der natürlichen Frequenz f_2 und der Dämpfung ζ_2 des Massendämpfers für minimale Bauwerksverschiebung $\min(X_1)$ resp. minimale Bauwerksbeschleunigung $\min(\ddot{X}_1)$ bedarf der Kenntnis folgender Größen (Abb. 4):

- die zu bedämpfende Frequenz des Bauwerks f_1 inkl. Variationsbreite $\pm \Delta f_1 / f_1$ hervorgerufen durch Temperatureinflüsse oder veränderliche Lasten,
- die dazugehörige kinetisch äquivalente Masse m_1 ,
- die maximal tolerierbaren Verschiebungs- und Beschleunigungsamplituden X_1^{\max} und \ddot{X}_1^{\max} des Bauwerks und
- die maximal tolerierbare Dämpfer-Verschiebungsamplitude X_d^{\max} .

Designgröße

Das Massenverhältnis $\mu = m_2 / m_1$ des Massendämpfers ist dessen Designgröße. Das minimal erforderliche Massenverhältnis, welches garantiert, dass die Verschiebungsamplituden des schwingenden Bauwerks mit Massendämpfer nicht größer als X_1^{\max} sind, wird aus folgender Beziehung berechnet (Abb. 5)

$$\frac{X_1}{P/k_1} = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}} \quad (1)$$

indem X_1 durch X_1^{\max} substituiert wird. Das erforderliche Massenverhältnis für die Einhaltung von $\ddot{X}_1 \leq \ddot{X}_1^{\max}$ kann mit (1) unter Berücksichtigung von f_1 abgeschätzt werden.

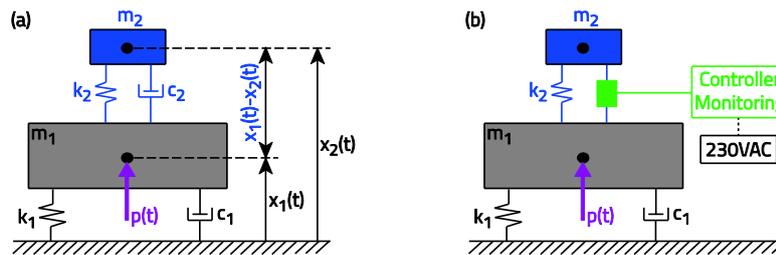


Abb. 4 – Zwei-Masseschwinger: Bauwerk mit (a) passivem und (b) Echtzeit-geregeltem Massendämpfer

Nomenklatur Bauwerk:

- f_1 : zu bedämpfende Eigenfrequenz [Hz]
- m_1 : kinetisch äquivalente Masse [kg]
- ζ_1 : Lehr'sches Dämpfungsmass [-]
- k_1 : Steifigkeitskoeffizient [N/m]
- c_1 : viskoser Dämpfungskoeffizient [Ns/m]
- x_1 : Verschiebung [m]
- X_1 : Verschiebungsamplitude [m]
- \ddot{X}_1 : Beschleunigungsamplitude [m/s^2]
- p : Anregungskraft [N]
- P : Anregungskraftamplitude [N]

Spezifikationen:

- X_1^{\max} : maximal zulässige Verschiebungsamplitude des Bauwerks mit Massendämpfer [m]
- \ddot{X}_1^{\max} : maximal zulässige Beschleunigungsamplitude des Bauwerks mit Massendämpfer [m/s^2]
- X_d^{\max} : maximal zulässige Dämpfer-Verschiebungsamplitude [m]

Nomenklatur Massendämpfer:

- μ : Massenverhältnis [-]
- f_2 : natürliche Frequenz [Hz]
- ζ_2 : Lehr'sches Dämpfungsmass [-]
- m_2 : Masse [kg]
- k_2 : Steifigkeitskoeffizient [N/m]
- c_2 : viskoser Dämpferkoeffizient [Ns/m]
- x_2 : (absolute) Verschiebung [m]
- $x_1 - x_2$: (relative) Dämpfer-Verschiebung [m]
- X_d : (relative) Dämpfer-Verschiebungsamplitude [m]

Passive Massendämpfer

Muss die Verschiebungsamplitude X_1 des Bauwerks minimiert werden, sind die natürliche Frequenz f_2 und das Lehr'sche Dämpfungsmass ζ_2 der passiven Massendämpfertypen *standardTMD*, *foldedTMD* und *compactTMD* nach Den Hartog [1] anzusetzen

$$f_2 = \frac{f_1}{1+\mu} \quad (2)$$

$$\zeta_2 = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (3)$$

Soll die Beschleunigungsamplitude \ddot{X}_1 des Bauwerks minimiert werden, werden f_2 und ζ_2 des passiven Massendämpfers wie folgt ausgelegt

$$f_2 = \frac{f_1}{\sqrt{1+\mu}} \quad (4)$$

$$\zeta_2 = \sqrt{\frac{3\mu}{4(2+\mu)(1+\mu)}} \quad (5)$$

Die Federsteifigkeit und der viskose Dämpferkoeffizient des

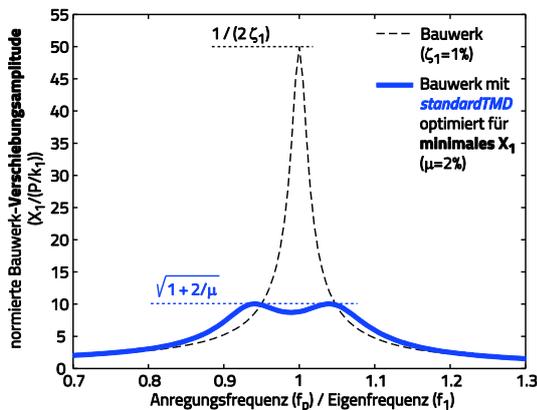


Abb. 5 – Bauwerk ohne und mit *standardTMD* für $\min(X_1)$

passiven Öldämpfers des *standardTMD* berechnen sich aus (2, 3) für $\min(X_1)$ resp. aus (4, 5) für $\min(\ddot{X}_1)$ wie folgt

$$k_2 = m_2 (2\pi f_2)^2 \quad (6)$$

$$c_2 = 2\zeta_2 m_2 (2\pi f_1) \quad (7)$$

Die Abb. 5 zeigt die Reduktion der Verschiebungsamplitude des Bauwerks, wenn der passive Massendämpfer für minimale Verschiebungsamplitude des Bauwerks nach (2, 3) optimiert ist. Die Abb. 6 verdeutlicht, dass die Massendämpferauslegung für $\min(X_1)$ die Beschleunigungsamplitude des Bauwerks nicht minimiert, was nur mit der Auslegung (4, 5) erzielt wird.

Je grösser das Massenverhältnis ist, desto grösser sind Schwingreduktion und Breitbandigkeit des Massendämpfers (Abb. 7) und desto kleiner ist die Dämpfer-verschiebungsamplitude (Abb. 8).

Die Pendellängen, Pendelstützen und Öldämpfer der passiven Massendämpfertypen *foldedTMD* und *compactTMD* werden von MAURER über eine nicht-lineare dynamische Simulation des Bauwerks mit diesen Massendämpfertypen modellbasiert für $\min(X_1)$ resp. $\min(\ddot{X}_1)$ ausgelegt.

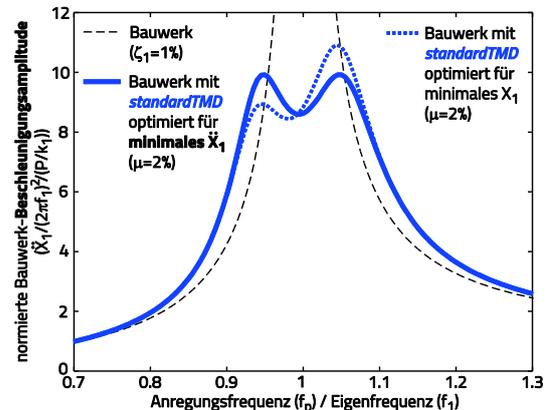


Abb. 6 – Bauwerk ohne und mit *standardTMD* für $\min(\ddot{X}_1)$

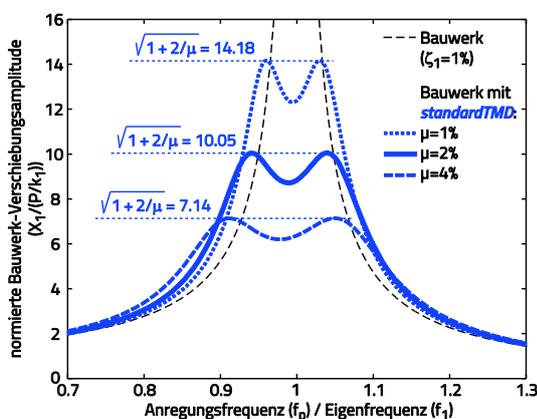


Abb. 7 – Einfluss Massenverhältnis auf Schwingreduktion des Bauwerks mit *standardTMD* für $\min(X_1)$

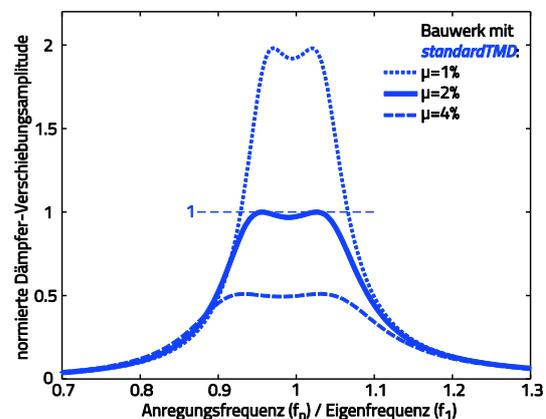


Abb. 8 – Einfluss Massenverhältnis auf Dämpfer-Verschiebungsamplitude des *standardTMD* für $\min(X_1)$

Adaptive Massendämpfer

Frequenzabstimmung in Echtzeit

Der **controlledTMD** ist eine MAURER-Entwicklung [2-5], dessen Frequenz $f_{2\text{-controlled}}$ nach dem Tilgerprinzip (Frahm, [6]) in **Echtzeit** auf die aktuelle Schwingfrequenz f_p des Bauwerks **geregelt** wird

$$f_{2\text{-controlled}} = f_p \quad (8)$$

unabhängig davon, ob f_p eine erzwungene Schwingfrequenz oder eine Eigenfrequenz des Bauwerks inkl. Variationsbreite $\pm \Delta f_1 / f_1$ darstellt. Dank der Auslegung der passiven Federsteifigkeit $k_2 = m_2 (2\pi f_1)^2$ muss der Aktor nur folgende Differenzsteifigkeit emulieren (Abb. 4(b))

$$k_{2\text{-controlled}} = m_2 (2\pi f_{2\text{-controlled}})^2 - k_2 \quad (9)$$

was den Leistungsbedarf des Aktors minimiert.

Dämpfungsabstimmung in Echtzeit

Die Dämpfung $\zeta_{2\text{-controlled}}$ des **controlledTMD** wird nach dem Prinzip des ungedämpften Schwingstilgers (Frahm, [6]) in **Echtzeit** wie folgt **geregelt**:

- optimale Anpassung an die aktuelle Schwingfrequenz f_p des Bauwerks und
- Minimierung der Dämpfung unter Berücksichtigung der aktuellen und maximal zulässigen Dämpfer-Verschiebungsamplituden X_d und X_d^{\max} über eine **adaptive Dämpfungsregelung**

$$\zeta_{2\text{-controlled}} = \text{function}(f_p, X_d, X_d^{\max}) \quad (10)$$

Semi-aktiver Dämpfer

Für die Erzeugung von $k_{2\text{-controlled}}$ und $\zeta_{2\text{-controlled}}$ wird ein semi-aktiver Dämpfer eingesetzt, weshalb das geregelte System **inhärent stabil** und **ausfallsicher** ist [7].

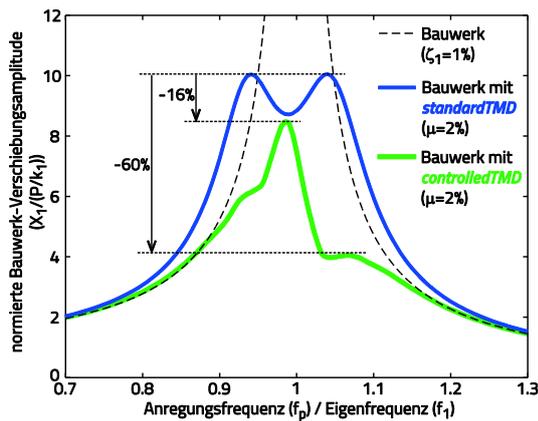


Abb. 9 – Bauwerk mit **controlledTMD** bei Worst Case Anregung durch Wind oder Erdbeben

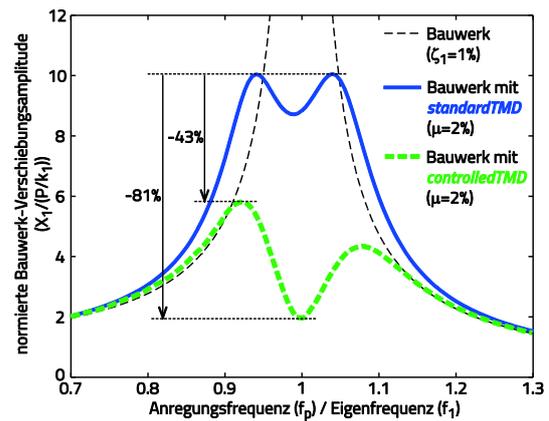


Abb. 10 – Bauwerk mit **controlledTMD** bei mittleren bis kleinen Windlasten oder Erdbeben (<50% Worst Case)

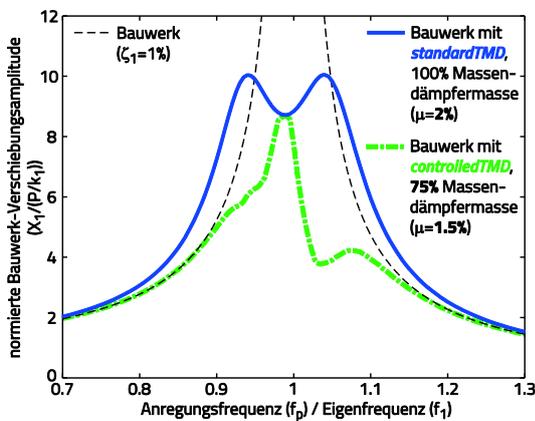


Abb. 11 – Bauwerk mit **controlledTMD** mit 75% Massendämpfermasse (Worst Case Anregung durch Wind oder Erdbeben)

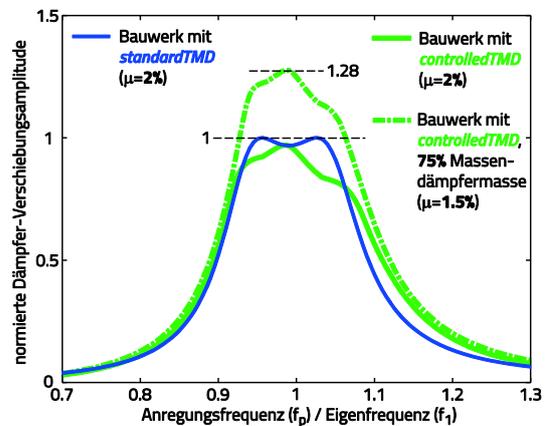


Abb. 12 – Dämpfer-Verschiebungsamplitude des **controlledTMD** bei 100% und 75% Massendämpfermassen (Worst Case Anregung durch Wind oder Erdbeben)

Hauptmerkmale

- Verbesserte Schwingreduktion bei gleicher Massendämpfermasse:
 - Bis zu **60% verbesserte Schwingreduktion** im Vergleich zum passiven Massendämpfer bei größter Wind- oder Erdbebenanregung (Worst Case Anregung, Abb. 9) bei nicht größerer Dämpfer-Verschiebungsamplitude (Abb. 12)
 - **Komfortmaximierung** dank bis zu **80% verbesserter Schwingreduktion** bei mittleren bis kleinen und daher häufig auftretenden Windlasten oder Erdbeben (<50% Worst Case Anregung, Abb. 10)
- Gleiche Schwingreduktion wie mit passivem Massendämpfer: **Reduktion der Masse auf 75% bis 85%** der nominellen Masse möglich bei 28% bis 16% größerer Dämpfer-Verschiebungsamplitude (Abb. 11, 12)
- Automatische Kompensation von Frequenzänderungen:
 - **Änderungen** der zu **bedämpfenden Eigenfrequenz** des Bauwerks durch Temperatureinflüsse oder veränderliche Lasten werden **automatisch kompensiert** (Abb. 13, 14)
 - Änderungen der zu bedämpfenden Eigenfrequenz von $\pm \Delta f_1 / f_1 \leq \pm 10\%$ und Änderungen der Anregungsfrequenz von $\pm \Delta f_p / f_1 \leq \pm 15\%$ kompensierbar
- **Monitoring** relevanter Zustandsgrößen:
 - Beschleunigung \ddot{x}_1 und Beschleunigungsamplitude \ddot{X}_1 des Bauwerks
 - Dämpfer-Verschiebungsamplitude X_d
 - weitere Zustandsgrößen gemäss Kundenspezifikation

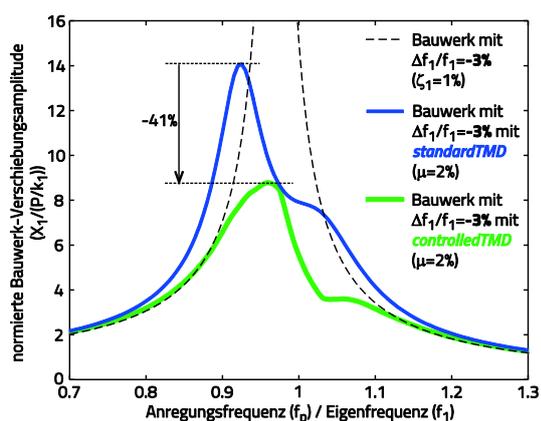


Abb. 13 – Bauwerk mit $\pm \Delta f_1 / f_1 = -3\%$ mit **controlledTMD**
(Worst Case Anregung durch Wind oder Erdbeben)

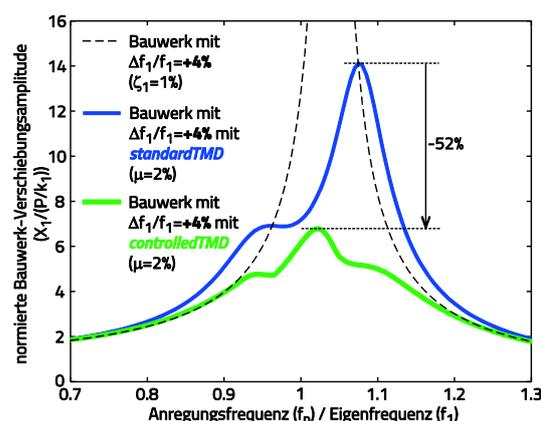


Abb. 14 – Bauwerk mit $\pm \Delta f_1 / f_1 = +4\%$ mit **controlledTMD**
(Worst Case Anregung durch Wind oder Erdbeben)

Serviceleistungen durch MAURER

Basierend auf dem Windgutachten resp. der Erdbebenanalyse des Bauwerks ohne Massendämpfer durch den Planer bietet MAURER folgende Serviceleistungen:

- Beratung bezüglich:
 - optimalem Massendämpfertyp
 - minimal erforderlichem Massenverhältnis und Dämpferanzahl
 - Planung der entsprechenden Bauwerksbefestigungen
- **Nicht-lineare, Zeit-basierte Simulation mit Wind- oder Erdbebenanregung:**
 - modellbasierte Auslegung des evaluierten Massendämpfertyps für gegebene Anregungskräfte durch Wind oder Erdbeben
 - Berechnung der Schwingreduktion des Bauwerks mit evaluiertem Massendämpfertyp im gesamten Frequenzbereich und Vergleich mit der maximal tolerierbaren Bauwerksbeschleunigung resp. Bauwerksverschiebung
- Einbau Massendämpfer und Aufschwingversuch als finale Funktionskontrolle

Referenzen

SOCAR Tower in Baku, Aserbaidschan

- Die Seilaufhängung des 2-dimensionalen *foldedTMD* erlaubt die optimal abgestimmte Bedämpfung der beiden Eigenschwingungen in beiden Hauptrichtungen bei 0.22 Hz und 0.32 Hz (Abb. 15).
- Die gesamte Höhe des Doppelpendels inklusive Rahmenkonstruktion, Seilverankerung und Bleikernlager konnte dank der verschachtelten Bauweise von ca. 11 m auf ca. 7 m reduziert werden (Abb. 16).
- Die Masse von 450 Tonnen des *foldedTMD* entspricht einem Massenverhältnis von 4.5%.
- Die Konstruktion des *foldedTMD* und die passiven Öldämpfer sind auf maximale Dämpfer-Verschiebungsamplituden von ± 480 mm ausgelegt.
- Der *foldedTMD* des SOCAR Towers ist seit Januar 2015 in Betrieb.

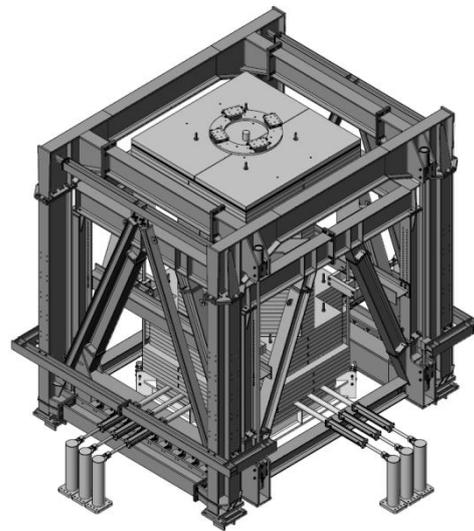


Abb. 15 – SOCAR Tower in Baku, Aserbaidschan, und isometrische Darstellung des *foldedTMD* des SOCAR Towers

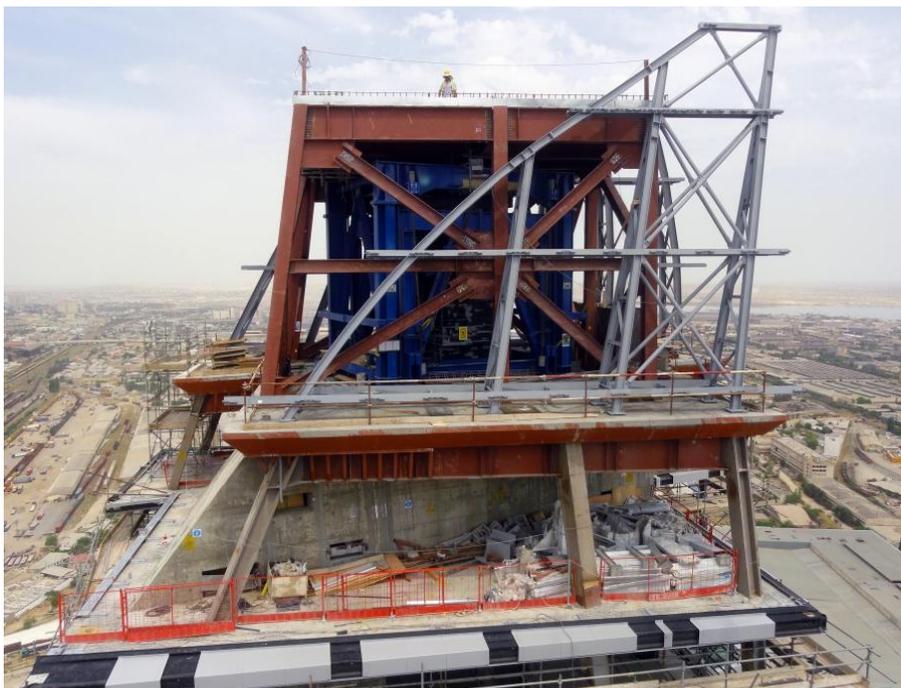


Abb. 16 – *foldedTMD* eingebaut im SOCAR Tower

Alphabetic Tower in Batumi, Georgien

- Der *standardTMD* in Pendelbauweise (Abb. 17) ist auf die Eigenfrequenz von 0.498 Hz in beiden Hauptrichtungen des Alphabetic Towers in Batumi (Abb. 18) optimal abgestimmt.
- Die Masse von 62.85 Tonnen des *standardTMD* entspricht einem Massenverhältnis von 3.50%.
- Die Mechanik der Aufhängung der Pendelmasse und die zylindrischen Öldämpfer sind auf eine maximale Verschiebungsamplitude des Dämpfers von ± 0.24 m ausgelegt.
- Der *standardTMD* des Alphabetic Towers in Batumi ist seit Dezember 2011 in Betrieb.

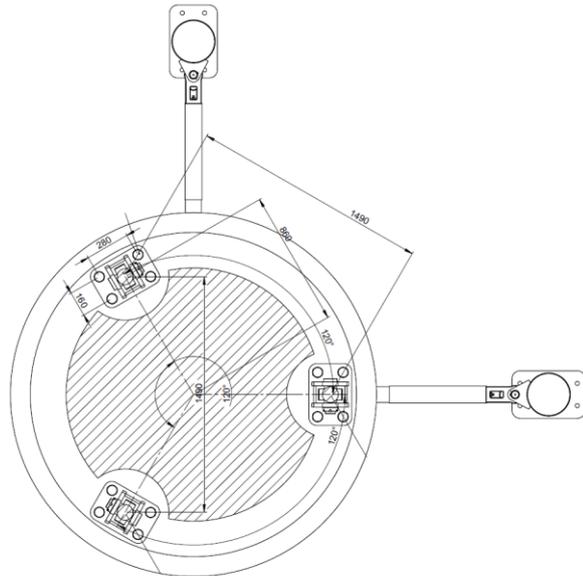


Abb. 17 – *standardTMD* in Pendelbauform des Alphabetic Towers in Batumi, Georgien



Abb. 18 – Alphabetic Tower in Batumi, Georgien

Donau City Tower in Wien, Österreich

- Der *controlledTMD* des Donau City Towers erzeugt optimale Frequenz- und Dämpfungsabstimmung in Echtzeit der ersten Biegeschwingung im Frequenzbereich von 0.17 Hz bis 0.21 Hz [4, 5, 7], was mittels HIL-Tests nachgewiesen wurde (Abb. 19).
- Die Pendelmasse von 300 Tonnen (nicht von MAURER geliefert) des *controlledTMD* entspricht einem Massenverhältnis von 0.75%.
- Der regelbare Kraftbereich beider in Echtzeit geregelten semi-aktiven Dämpfer ist durch die Grundreibung von ca. 3 kN und die maximale Kraft von ca. 90 kN gegeben.
- Ab ± 0.6 m Dämpfer-Verschiebungsamplitude wird die geregelte Dämpfung überproportional erhöht, um Überschwinger der Pendelmasse zu verhindern; zusätzlich sind Shock-Impact-Dämpfer installiert.
- Der *controlledTMD* des Donau City Towers inkl. Monitoring ist seit Oktober 2014 in Betrieb (Abb. 20).

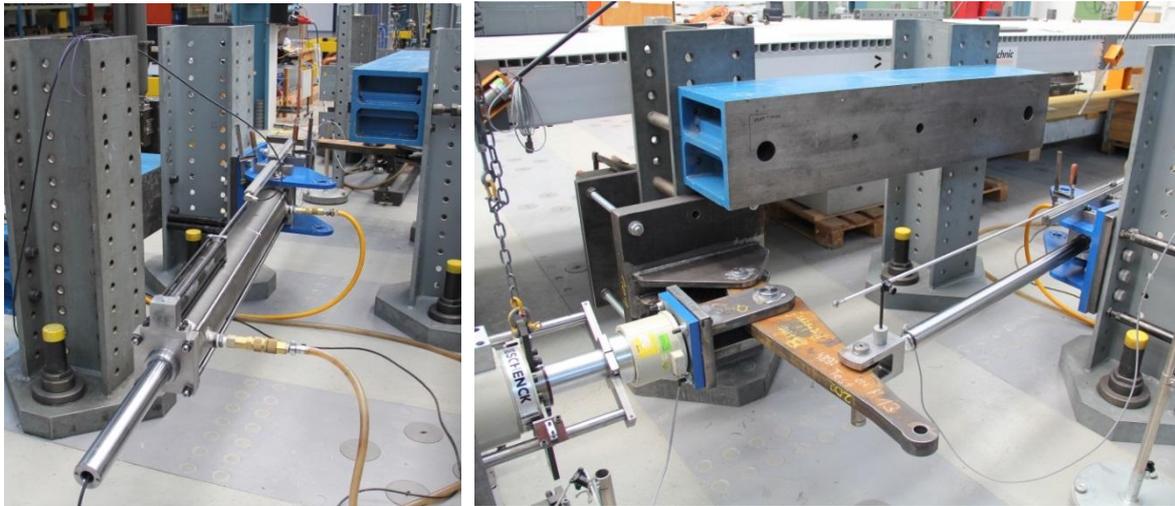


Abb. 19 – HIL-Tests am semi-aktiven Dämpfer des *controlledTMD* des Donau City Towers: Gesamtansicht und kinematische Übersetzung für HIL-Tests bei grossen Dämpfer-Verschiebungsamplituden



Abb. 20 – Donau City Tower in Wien, Österreich

Wolgograd-Brücke, Russland

- Messungen und Windkanalversuche zeigten, dass die ersten drei vertikalen Biegeschwingungen bei 0.45 Hz, 0.56 Hz und 0.68 Hz zu bedämpfen sind.
 - MAURER löste dieses Problem mit drei Gruppen von *controlledTMDs* in Brückenfelder 3, 7 und 8 wie folgt:
 - die natürliche Frequenz der passiven Feder-Masse-Pakete jeder Gruppe ist optimal auf die entsprechende Eigenfrequenz abgestimmt und
 - Frequenz und Dämpfung aller *controlledTMDs* sind in Echtzeit auf die aktuelle Schwingfrequenz der Brücke geregelt,
- wodurch die gleiche Schwingreduktion der Brücke wie mit passiven Massendämpfern mit ca. 2-3-mal so viel Massendämpfermasse erzielt wird.
- Die Frequenzabstimmung in Echtzeit wurde an der Universität der Bundeswehr München in einem Frequenzbereich von $\pm 20\%$ um die Eigenfrequenz der Biegeschwingung bei 0.56 Hz experimentell nachgewiesen [2, 3] (Abb. 21).
 - Die 12 *controlledTMDs* der Wolgograd-Brücke inkl. Monitoring sind seit Oktober 2012 in Betrieb (Abb. 22).

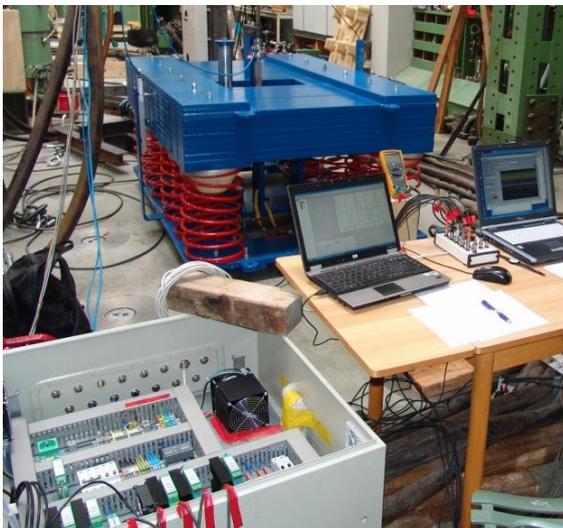


Abb. 21 – Frequenzabstimmungstests an der Universität der Bundeswehr München am *controlledTMD* der Wolgograd-Brücke und finale Aufschwingversuche an den in der Wolgograd-Brücke eingebauten *controlledTMDs*



Abb. 22 – Wolgograd-Brücke, Russland

Marina Bay Sands Hotel, Singapur

Der *standardTMD* des Marina Bay Sands Hotel bedämpft die vertikalen Schwingungen bei 0.99 Hz der auskragenden Nase des Skypark des Marina Bay Sands Hotels mit 5 Tonnen Masse, was einem Massenverhältnis von 1.2% entspricht (Abb. 23).



Abb. 23 – Marina Bay Sands Hotel mit Skypark, Singapur

Olympic Flame Monument, Sotschi, Russland

Der *standardTMD* mit dreimal 0.75 Tonnen Masse resp. einem Massenverhältnis von 13.7% bedämpft die horizontalen Schwingungen bei 1.05 Hz des Olympic Flame Monument in Sotschi (Abb. 24).



Abb. 24 – Olympic Flame Monument, Sotschi, Russland

AlpSpix, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland

Je zwei *standardTMDs* mit je 150 kg bedämpfen die vertikalen Schwingungen bei 0.85 Hz der beiden Plattformen mit einem Massenverhältnis von 7.2% (Abb. 25).



Abb. 25 – AlpSpix, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland

Olympia Brücke / Ponte Moi, Turin, Italien

Die zwei *controlledTMDs* mit je 4 Tonnen Masse bedämpfen die zwei Eigenschwingungen in horizontaler Richtung bei 0.55 Hz und 0.95 Hz mit je 1% Massenverhältnis (Abb. 26).



Abb. 26 – Olympia Brücke / Ponte Moi, Turin, Italien

Coimbra-Brücke, Coimbra, Portugal

Zwei *standardTMDs* mit total 4930 kg bedämpfen die lateralen Schwingungen bei 0.69 Hz und sechs *standardTMDs* mit Massen zwischen 1581 kg und 9692 kg bedämpfen die vertikalen Schwingungen im Frequenzbereich von 1.52 Hz bis 3.0 Hz (Abb. 27).



Abb. 27 – Coimbra-Brücke, Coimbra, Portugal

Fußgängerbrücke für Landesgartenschau in Tirschenreuth, Deutschland

Die *standardTMDs* mit Blattfedern bedämpfen die ersten zwei vertikalen Biegeschwingungen bei 1.69 Hz mit 685 kg ($\mu = 4.6\%$) und 2.6 Hz mit 485 kg ($\mu = 3.2\%$, Abb. 28).



Abb. 28 – Fußgängerbrücke für Landesgartenschau in Tirschenreuth, Deutschland

Qualitätskontrolle

Im Werk

- Die Leichtgängigkeit jedes Massendämpfers wird geprüft.
- Die natürliche Frequenz des Feder-Masse-Schwingers resp. der Pendelmasse wird mittels Aufschwingen der Massendämpfermasse verifiziert (Abb. 29) und nötigenfalls justiert.
- Frequenz- und Dämpfungsregelung in Echtzeit bei *controlledTMDs* werden mittels HIL-Tests verifiziert.

Im Bauwerk

- Finale Funktionskontrollen bez. Leichtgängigkeit und natürliche Frequenz mittels Aufschwingen der Massendämpfermasse.
- Funktionskontrollen der Echtzeitregelung und Monitoring bei *controlledTMDs*.



Abb. 29 – Qualitätskontrollen im Werk und an der Universität der Bundeswehr München

Literatur

- [1] Den Hartog JP. *Mechanical Vibrations*. York, PA: McGraw-Hill Book Company, The Maple Press Company, 1934.
- [2] Weber F and Distl H. Real-time controlled tuned mass dampers for Wolgograd Bridge. *Beton- und Stahlbetonbau* 2013; **108**(Heft 6) 362-72.
- [3] Weber F, Distl H and Mašlanka M. Semi-active TMD Concept for Volgograd Bridge. In: F. Necati, et al. (Eds.), *Topics in Dynamics of Civil Structures* 2013; **4**(10): 79-88. New York: Springer.
- [4] Weber F. Semi-active vibration absorber based on real-time controlled MR damper. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2014; **46**(2): 272-88.
- [5] Weber F. Optimal semi-active vibration absorber for harmonic excitation based on controlled semi-active damper. *Smart Mater. Struct.* 2014; **23**: 095033.
- [6] Frahm H. *Devices for damping vibrations of bodies*. US Patent no. 989, 958, 1911.
- [7] Weber F. Robust force tracking control scheme for MR dampers. *Struct. Control Health Monit.* 2015; **22**(12): 1373-95.