

# Schwingungsminderung an einer Tragwerkstruktur mit Hilfe Adaptiver Tilger

T. Röglin<sup>1</sup>, C. Sabirin<sup>1</sup>, J. Rausch<sup>2</sup>, D. Mayer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 64289 Darmstadt, E-Mail: tobias.roeglin@lbf.fraunhofer.de, chip.sabirin@lbf.fraunhofer.de, dirk.mayer@lbf.fraunhofer.de

<sup>2</sup> Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 64283 Darmstadt, E-Mail: j.rausch@emk.tu-darmstadt.de

## Einleitung

Um Schwingungen von Strukturen wie Brücken oder Maschinenbetten zu mindern werden häufig Tilger verwendet. Adaptive Tilger bieten zusätzlich die Möglichkeit, die Resonanz einer sich ändernden Erregerfrequenz anzupassen. Hier wird ein modular aufgebauter, adaptiver Tilger vorgestellt und dessen Funktionsweise an einem Tragwerk getestet, das stellvertretend für verschiedene Leichtbaustrukturen steht.

## Konstruktion des Tilgers

Der Aufbau des Tilgers stellt eine Weiterentwicklung des Tilgers aus [1] dar. Er ist in Details geändert, behält aber das zugrundeliegende Funktionsprinzip bei. Ziel des Designprozesses war ein modular aufgebauter und skalierbarer Tilger, der leicht angepasst werden kann und so für verschiedene Anwendungen und Forschungsarbeiten verwendbar ist.

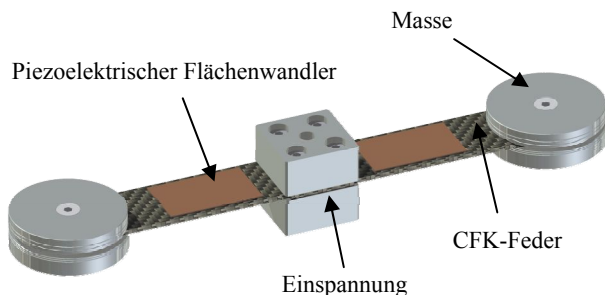


Abbildung 1: Aufbau des adaptiven Tilgers

Der Tilger besteht aus Massen, die an den Enden zweier Kragbalken befestigt sind, welche als Federn wirken (Abbildung 1). Die Kragbalken sind Teil einer gemeinsamen Feder, die durch eine Einspannung geteilt wird. Die Einspannung dient zudem als Verbindung zu einer beliebigen zu bedämpfenden Grundstruktur. Die Feder besteht aus 0°/90° Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK).

Die Massen des Tilgers werden aus Stahlscheiben unterschiedlicher Dicke zusammengesetzt. Die Abstufung der Gewichte ähnelt dabei der von Prüfungsgewichten und erlaubt das Zusammensetzen einer bestimmten Masse bei geringer Abweichung mit Hilfe von maximal vier verschiedenen Gewichtsdicken. Die runde Form der Gewichte erlaubt eine einfache Fertigung und ermöglicht das Befestigen und Ausrichten mehrerer gestapelter Massen mit nur einer Schraube. Die Massen sind über ein Langloch mit der CFK-Feder verbunden. Durch Variation der Massen, deren Position auf der Feder und der Federgeometrie kann die passive

Resonanzfrequenz des Tilgers bereits in einem weiten Bereich eingestellt werden.

Auf beiden Seiten des Kragbalkens sind zwei piezoelektrische Flächenwandler des Typs DuraAct™ aufgeklebt, die auf der oberen Seite als Aktor und auf der unteren Seite als Sensor verwendet werden.

## Versuchsaufbau

Ein Stabtragwerk [2] (Abbildung 2) dient als eine Entwicklungsplattform innerhalb des Projekts „LOEWE AdRIA“ für die Untersuchung unterschiedlicher Maßnahmen zur Schwingungsreduktion, u.a. mit adaptiven Tilgern.

Das Stabtragwerk besteht aus drei Zellen und ist 1290 mm lang und jeweils 470 mm breit und hoch. Das Gewicht liegt bei etwa 34 kg. Es wird über einen der oben liegenden Knotenpunkte mit Hilfe eines Shakers zu Schwingungen angeregt. An den vier Fußpunkten soll jeweils einer der adaptiven Tilger angebracht werden, um dort die Schwingungen zu mindern.

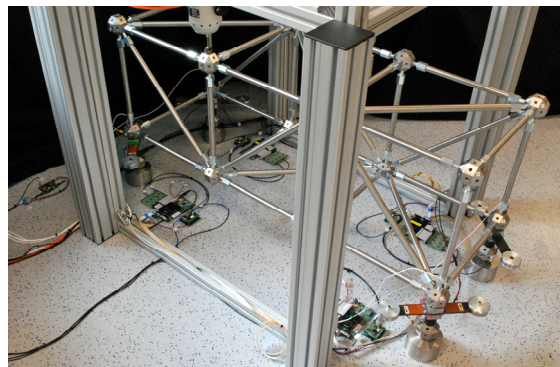


Abbildung 2: Das Tragwerk mit den vier adaptiven Schwingungstilgern an den Fußpunkten und dem oberhalb angebrachten Shaker zur Erregung.

Hierzu werden vier Tilger gefertigt und auf eine Resonanzfrequenz von 16,25 Hz eingestellt. Dabei haben sie eine unterschiedliche Tilgermasse zwischen 1,14 kg und 1,54 kg pro Tilger. Die Gesamtmasse an den vier Tilgern liegt bei ca. 5,5 kg, also etwa 16 % der Masse des Stabtragwerks.

Zusätzlich zu den piezoelektrischen Sensoren soll auch die Eignung strukturintegrierbarer resistiver Miniatur-Dehnmessstreifen (DMS) untersucht werden. Hierzu sind drei Sensortechnologien auf der Federunterseite eines weiteren Tilgers integriert. Zum Einsatz kommen siebgedruckte Silber-DMS (10 x 5 x 0,05 mm<sup>3</sup>) und Silizium-DMS (0,5 x 0,5 x 0,05 mm<sup>3</sup>), die beide im Rahmen des Projekts entworfen und realisiert wurden, sowie konventionelle Folien-DMS (10,6 x 4,5 x 0,5 mm<sup>3</sup>, HBM). Aufgrund der

reduzierten Abmessungen ist eine nahezu punktuelle Dehnungserfassung möglich und die Rückwirkungen auf das Biegeverhalten der CFK-Feder sind im Gegensatz zu den piezoelektrischen Wandlern vernachlässigbar gering. Es konnten bereits die dynamischen Übertragungseigenschaften der Silber-DMS und der Folien-DMS mit denen der Piezoelemente verglichen und hinsichtlich der Eignung zum Einsatz in der adaptiven Echtzeit-Regelung positiv bewertet werden. Ein Vergleich dieser Technologien mit den Silizium-DMS ist geplant.

### Konzept der adaptiven Echtzeit-Regelung

Bei den vorgestellten adaptiven Tilgern lässt sich die Tilger-Resonanzfrequenz durch dynamische Dehnungsrückführung verstellen, so dass die Resonanzfrequenz an die vorliegende Anregungsfrequenz angepasst wird. In dem Fall wird die Schwingung der primären Struktur reduziert, abhängig von der mechanischen Dämpfung der Tilger.

Die adaptive Regelung der Tilger basiert auf einem Gütekriterium in Form der Phasendifferenz zwischen der Beschleunigung der Tilgermasse  $a_T(t)$  und der Beschleunigung der primären Struktur  $a_S(t)$ , die bei der Tilgerresonanz bekanntlich einen Betrag von  $90^\circ$  aufweist [3]. Zur Berechnung der Phasendifferenz kann eine Echtzeit-Mittelwertbildung  $\zeta_{\text{phase}}$  aus den beiden Signalvorzeichen  $\text{sign}(a_T(t))$  und  $\text{sign}(a_S(t))$  auf dem Regler implementiert werden (Formel 1). Die grundlegende Idee für eine solche Methode wurde in [4] ausführlich gezeigt.

$$\zeta_{\text{phase}} = \frac{1}{T} \cdot \int_{(n-k)T}^{nT} \text{sign}(a_T(t)) \cdot \text{sign}(a_S(t)) \cdot dt \quad (1)$$

$n \in \mathfrak{R} \quad ; \quad k = 1, 2, 3, \dots$

Die Verstärkung der Dehnungsrückführung soll solange adaptiert werden, bis die Phasendifferenz von  $90^\circ$  innerhalb einer bestimmten Toleranz erreicht wird. Dabei muss man wegen des steilen Übergangs der Phasendifferenz im Bereich der Resonanzfrequenz des Tilgers die Empfindlichkeit der Adaptierung gegenüber kleinen Änderungen der Phasendifferenz berücksichtigen. Es kann eine passende Adaptionsrate festgelegt werden, die eine bestimmte Gewichtung in Abhängigkeit von der Phasendifferenz ausführt [5].

### Experimentelle Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt das Beschleunigungsspektrum am Stabtragwerk mit passiven bzw. adaptiven Tilgern. Dabei beträgt die tonale Anregungsfrequenz bei der Schwingung 1. Ordnung 16,25 Hz, auf die auch die passiven Tilger abgestimmt wurden. Gerade hier zeigt sich, dass eine weitere Verminderung der Schwingung um ca. -5 dB durch die Adaption der Tilger möglich ist.

Der Effekt der adaptiven Regelung ist in Abbildung 4 dargestellt. Bei veränderlicher tonaler Anregungsfrequenz der 1. Ordnung konnte für die meisten Arbeitspunkte eine

Verbesserung der Schwingungsreduzierung durch die Adaption der Tilger erreicht werden. An zwei Arbeitspunkten zwischen 17,5 und 18 Hz wurde im Gegensatz dazu eine Verschlechterung der Schwingung sichtbar.

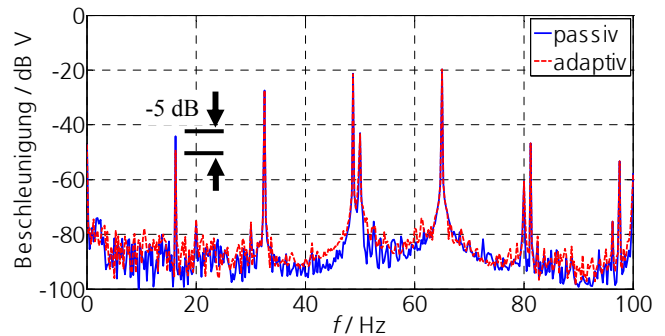


Abbildung 3: Das Frequenzspektrum der Schwingung am Stabtragwerk durch tonale Anregung zum Vergleich der Effekte von passiven und adaptiven Tilger.

Dies könnte in der Wechselwirkung zwischen den verteilten Tilgern ihre Ursache haben, da die adaptiven Regelungen der vier adaptiven Tilger entkoppelt voneinander laufen.

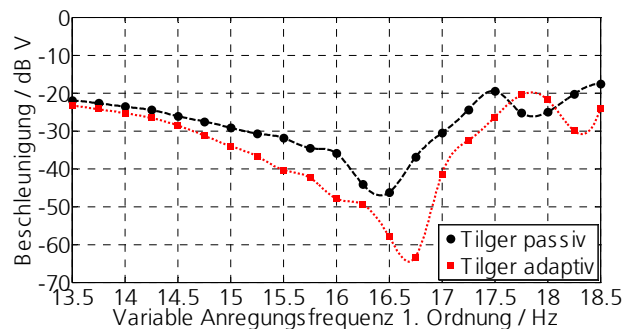


Abbildung 4: Das Beschleunigungsspektrum der Schwingung 1. Ordnung am Stabtragwerk. Vergleich der passiven und adaptiven Tilger.

### Literatur

- [1] Bös, J. et al.: Reduction of Compressor Vibrations by Means of an Active Tuned Vibration Absorber. DAGA 2008, p. 315-316, Dresden.
- [2] Flaschenträger, D. et al.: Implementation and Characterisation of the Dynamic Behaviour of a Three-dimensional Truss Structure for Evaluating Smart Devices. Proceedings of ISMA 2010, p. 547-558, Leuven.
- [3] Buhr, C., Franchek, M., Bernhard, R.J.: Non-collocated Adaptive-Passive Vibration Control. Journal of Sound and Vibration 1997 206(3), p. 371-378.
- [4] Kidner, M.R.F.; Brennan, M.J.: Real-time Control of Both Stiffness and Damping in an Active Vibration Neutralizer. Smart Mater. Struct. 10 (2001), p. 758-769, Institute of Physics Publishing.
- [5] Howard, C.: Review of adaptive tuned vibration neutralisers. Proceedings of ACOUSTIC 2009, p. 1-6, Adelaide, Australia.