

Schwingungsreduzierung am Stabtragwerk mit aktiven virtuellen Tilger

Chip R. Sabirin

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 64289 Darmstadt,
E Mail: chip.sabirin@lbf.fraunhofer.de

Einleitung

Um Schwingungen von Strukturen wie Brücken oder Maschinenbetten zu mindern, werden häufig Tilger verwendet. Adaptive mechanische Tilger bieten die Möglichkeit, die Resonanz einer sich ändernden Erregerfrequenz anzupassen [1] [2]. Unterschiedliche Harmonische bei tonalen Anregungen müssten aber von mehreren adaptiven mechanischen Tilger abgedeckt werden. Die Funktionen können stattdessen von einem einzigen virtuellen Tilger übernommen werden. Hierbei werden Aktoren zur Kraftgenerierung eingesetzt, die Kompensationskräfte entsprechend einer Wirkung von Tilger ausübt, daher der Begriff virtueller Tilger.

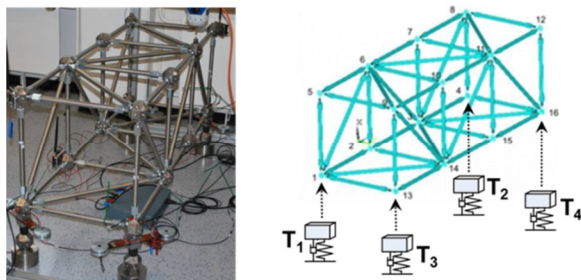


Abbildung 1: Stabtragwerk mit eingebauten Tilger-Aktoren T1...T4 in den Lagerungspunkten

Die Funktionsweise der virtuellen Tilger wird an einem Stabtragwerk (Abbildung 1) untersucht, welches stellvertretend für verschiedene Leichtbaustrukturen steht. Hierzu wird an jedem der vier Lagerungspunkte des Stabtragwerks ein Inertialerreger eingebaut. Die Inertialerreger wurden als Tilger-Aktor (Tilger mit integrierten Piezo-Patches) aufgebaut und bereits bezüglich der Adaptierung als mechanische Tilger untersucht [3]. In diesem Beitrag folgt die Variante als Inertialerreger, die durch eine Echtzeit-Steuerelektronik geregelt werden, so dass die Inertialerreger entsprechend eines Tilgers mit adaptierbaren Größen (Tilgermasse, Resonanzfrequenz und Dämpfungsfaktor) wirken.

Virtueller Tilger

Eine Struktur mit einem angebauten Tilger kann als Zwei-Massen-Schwinger angesehen werden. An der Anbindungsstelle zwischen der Struktur und dem Tilger wirken zwei Größen, nämlich die Strukturbeschleunigung und die Tilgerkraft, die auch als Eingang- und Ausgangsgröße des Tilgers definiert werden können. Gerade deshalb kann das Verhalten von dem Tilger mathematisch im Zustandsraum beschrieben werden [4], wie die folgende Formel zeigt.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \ddot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_c^2 & -2 \cdot \xi_c \cdot \omega_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \ddot{x}_s \quad (1)$$

$$F_{VVA} = m_c \cdot \begin{bmatrix} -\omega_c^2 & -2 \cdot \xi_c \cdot \omega_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \end{bmatrix}$$

Die Strukturbeschleunigung \ddot{x}_s ist die Eingangsgröße für das Zustandsraummodell, während die Tilgerkraft F_{VVA} die Ausgangsgröße darstellt. Die Zustandsgrößen sind (virtuelle) Größen der Tilgerbewegung. Die tilger-typischen Größen (m_c : Tilgermasse, ω_c : Resonanzfrequenz und ξ_c : Dämpfungsfaktor) können als mathematische (virtuelle) Größen prinzipiell beliebig eingestellt werden.

Es ist also möglich, das Verhalten des Tilgers als Regelgleichung in einer Feedback-Regelung abzubilden, die in Form einer Übertragungsfunktion zu implementieren ist. Für diesen Zweck lässt sich das Zustandsraummodell in eine Übertragungsfunktion umformen, wie folgt

$$\frac{F_{VVA}(s)}{\ddot{x}_s(s)} = m_c \cdot \frac{(2 \cdot \xi_c \cdot \omega_c) \cdot s + \omega_c^2}{s^2 + (2 \cdot \xi_c \cdot \omega_c) \cdot s + \omega_c^2} \left[\frac{\text{N}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-2}} \right] \quad (2)$$

In der folgenden Abbildung wird der Amplitudengang der Übertragungsfunktion mit einer beispielhaften Resonanzfrequenz von 53Hz dargestellt. Unterhalb der Resonanz verhält sich die Übertragungsfunktion mit einem konstanten Wert der virtuellen Masse und an der Resonanzfrequenz hängt die Pegel der Kräfte vom virtuellen Dämpfungsfaktor ab.

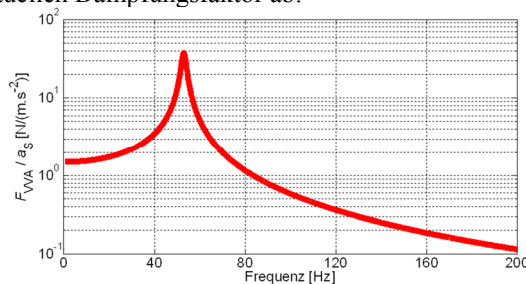


Abbildung 2: Die Übertragungsfunktion eines virtuellen Tilgers.

Implementierung der Regelung

Die Übertragungsfunktion in (2) wurde lokal für jeden Tilger-Aktor implementiert. Die Implementierung erfolgt auf einem digitalen Regler (Embedded-PC mit 10kHz Abtastrate) und die analoge Übertragungsfunktion wurde dafür in die diskrete Form umgewandelt [5], bei der die tilger-typischen Größen (m_c , ω_c und ξ_c) als Variablen erhalten bleiben, die vorteilhaft bei veränderlicher Anregungsfrequenz adaptiv eingestellt werden können.

An jedem Lagerungspunkt (Fußpunkt) des Stabtragwerks ist jeweils ein Beschleunigungssensor angebracht (Abbildung 3), der das Eingangssignal \ddot{x}_s für die Regelung bereitstellt. Der Tilger-Aktor als Inertialmassenerreger leitet die in den Piezo-Patches erzeugte Kraft in die jeweilige Einspannung an dem Fußpunkt des Stabtragwerks zur Schwingungsreduzierung. Das Ansteuersignal für die Piezo-Patches wird von der Regelung über einen Hochspannungspiezoverstärker erzeugt und beinhaltet zwei summierte Kräfte aus zwei virtuellen Tilger unterschiedlicher Resonanzen (53 Hz und 204 Hz), die sich aus dem modalen Schwingungsverhalten des Stabtragwerks ausgesucht wurden.

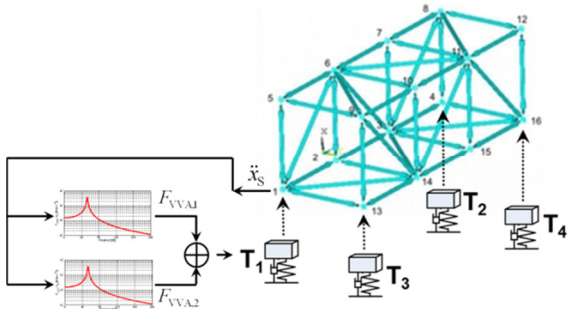


Abbildung 3: Zwei virtuelle Tilger-Regelgleichungen (mit den Resonanzen bei 53Hz und 204Hz) an jedem Fußpunkt des Stabtragwerks

Experimentelle Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt das Spektrum der Beschleunigung am Stabtragwerk durch eine breitbandige Pseudo-Random-Anregung. Der Fall mit Tilger-Aktor (mechanische Resonanz von 16,25Hz) als passiver Tilger wird durch die durchgezogene Kurve gezeigt. Mit der Aktivierung der Regelung, die als zwei virtuelle Tilger bei 54Hz und 204Hz wirkt, können die dortigen Strukturresonanzen unterdrückt werden (gestrichelte Kurve).

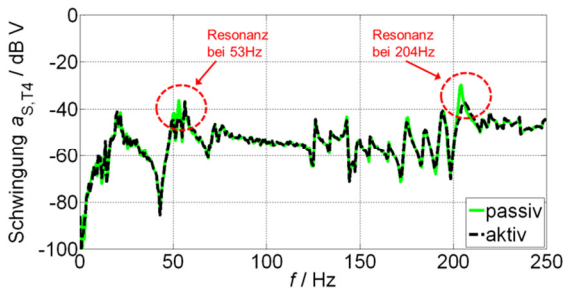


Abbildung 4: Beschleunigungsspektrum am Stabtragwerk durch breitbandige Anregung (passiv bzw. virtuelle Tilger)

Abbildung 5 und 6 zeigen den Fall vom Hochlauf einer tonalen Anregung des Stabtragwerks. Entsprechend wurden auch die Resonanzen der virtuellen Tilger (Schwingung 1.Ordnung und 4.Ordnung) adaptiv verändert. Hierbei konnten die Schwingungen um bis zu -11dB verringert werden.

Ausblick

Der Tilger-Aktor mit integrierten Piezo-Patches hat auf jeden Fall das Potential, gleichzeitig als adaptiver passiver Tilger und als Inertialerreger (mit der

Eigenschaft von virtuellem Tilger) zu wirken. Diese Eigenschaft zusammen mit der optimierten örtlichen Platzierung der Tilger an der Struktur werden die Schwerpunkte der weiteren Untersuchungen bilden, die am Funktionsdemonstrator und an realitätsnahen Technologiedemonstratoren im Rahmen vom AdRIA-Projekt durchgeführt werden.

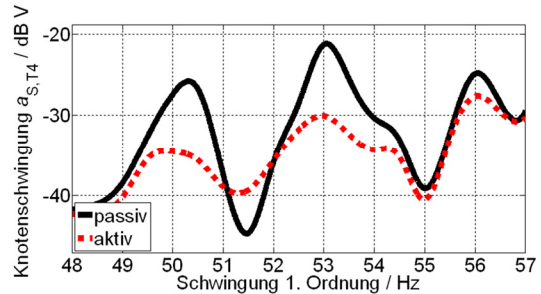


Abbildung 5: Verhalten der Schwingung 1.Ordnung beim Hochlauf der tonalen Anregung (passiv bzw. virtuelle Tilger)

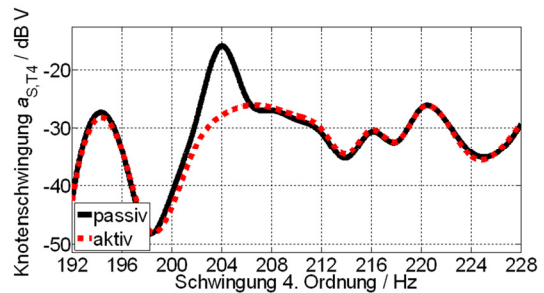


Abbildung 6: Verhalten der Schwingung 4.Ordnung beim Hochlauf der tonalen Anregung (passiv bzw. virtuelle Tilger)

Danksagung

Der Autor dankt dem Land Hessen für die finanzielle Förderung des Zentrums AdRIA (Adaptronic Research, Innovation, Application) im Rahmen der LOEWE – Initiative (Landes-Offensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz).

Literatur

- [1] T. Röglin, C. Sabirin, J. Rausch, D. Mayer: Schwingungsminderung an einer Tragwerkstruktur mit Hilfe Adaptiver Tilger, 37. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2011), 695-696, Düsseldorf, 2011.
- [2] M. Schmidt, H. Atzrodt, C. Sabirin, G. de Rue, T. Melz: Comparative Operational Modal Analysis-Application of a Semi-Active Vibration Absorber to a Manufacturing Machine, Proceedings IOMAC 2011, Istanbul, Turkey.
- [3] C. Sabirin: Application of Adaptive Vibration Neutralizers for Vibration Attenuation of a Truss Structure, SMART 11, Saarbrücken.
- [4] S. Huyanan, N.D. Sims: Vibration Control Strategies for Proof-mass Actuators, Journal of Vibration and Control, 13(12): 1785-1806, 2007.
- [5] H. Lutz, W. Wendt: Taschenbuch der Regelungstechnik - mit MATLAB und Simulink, Harri Deutsch Verlag, 8. Auflage, 2010.