

# **Adaptiver magnetostriktiver Tilger für die Schwingungsdämpfung in Strukturen mit tonaler Störung**

## **Adaptive Magnetostrictive Dynamic Vibration Absorber for Vibration Reduction in Structures with Tonal Disturbance**

**Ch. May**, B.Sc.; Dipl.-Ing. (FH) **Th. Würtz**; Prof. Dr.-Ing. habil.  
**H. Janocha**, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

### **Kurzfassung**

Mechatronische Systeme finden zunehmend Anwendung zur Strukturdämpfung, da mit aktiven Werkstoffen ein breitbandiges Dämpfungsverhalten zu bewerkstelligen ist, aber auch wegen ihrer Multifunktionalität. Der im Laufe des europäischen Projektes MESA entwickelte magnetostriktive Schwingungstilger bietet aufgrund seiner passiven Eigenschaften, vor allem aber durch die Möglichkeit der aktiven Krafterzeugung, eine besonders ausgeprägte Strukturdämpfung im Bereich seiner Resonanzfrequenz von ca. 100 Hz, während im geschlossenen Regelkreis eine Schwingungsreduzierung im Frequenzbereich 50...400 Hz erreicht wird. Darüber hinaus kann mit einer Regelung, basierend auf kollozierter Krafrückkopplung, eine stufenlose Reduzierung der effektiven Tilgerresonanzfrequenz um ca. 15% erreicht werden, was den adaptronischen Einsatz des aktiven Schwingungstilgers ermöglicht. Eine elektrische Impedanzanpassung, die bei einem magnetostriktiven Aktor über die Windungszahl der Ansteuerspule vorgenommen werden kann, ergibt für die vorliegende Ausführung die leicht handhabbare Versorgungsspannung von 12 V.

### **Abstract**

Mechatronic systems are increasingly being applied to reduce structural vibrations due to their capability of broadband damping but also because of their multifunctionality. Apart from its passive damping behaviour in the vicinity of its resonant frequency near 100 Hz, the magnetostrictive dynamic vibration absorber developed during the European project MESA contributes in closed-loop control to structural damping over the frequency range 50...400 Hz. Implementing a special control algorithm based on collocated force feedback enables the effective absorber frequency to be reduced continuously up to 15%, thereby fulfilling a requirement for adaptive control using the active vibration absorber. The possibility to tune the electrical impedance of the magnetostrictive actuator via the number of coil turns has in the present example enabled using the conveniently low supply voltage of 12 V.

## 1. Einführung

Heute werden zunehmend aktive Systemlösungen gefordert, wenn aus Gründen der Fertigungsgenauigkeit in technischen Prozessen (z.B. bei der spanenden Werkstückbearbeitung), oder auch aus Gründen des Komforts bzw. bei Lärmbelastigung (in Flugzeugen, Passagierzügen und Automobilen) Strukturschwingungen zu reduzieren sind. In den genannten Fällen, in denen in der Regel tonale bzw. harmonische Schwingungen auftreten, können passive und aktive Schwingungstilger verwendet werden, die auf die harmonischen Anteile des Amplitudenspektrums abgestimmt sind. Sollte die Frequenz der tonalen Schwingung mit den Prozessparametern variieren, wie es beispielsweise in spanenden Werkzeugmaschinen oder in Turbopropflugzeugen häufig der Fall ist, ist eine Adaptierbarkeit des Tilgers anzustreben.

Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes MESA („Magnetostrictive Equipment and Systems for More Electric Aircraft“ [1]) stand unter anderem die Entwicklung von aktiven Schwingungstilgern auf Basis magnetostriktiver Werkstoffe im Mittelpunkt. Hierbei ging es darum, die Lärmbelastigung in Turbopropflugzeugen durch die Bekämpfung von Strukturschwingungen mit aktiven Tilgern auf magnetostriktiver Basis zu reduzieren. Der Einsatz des aktiven Werkstoffes ermöglicht eine breitbandige Schwingungsbedämpfung im Frequenzbereich von 50 Hz bis über 400 Hz, während seine Tilgerfunktion auch bei Stromausfall eine passive Dämpfung in der Umgebung der Eigenfrequenz von etwa 100 Hz bewirkt [2].

## 2. Realisierung des magnetostriktiven Tilgers

Der Aufbau des magnetostriktiven Schwingungstilgers ist gekennzeichnet durch eine effiziente Nutzung der Eigenmasse zur Erzeugung von inertialen Kräften, siehe **Bild 1a/b**. Mittels einer patentierten Blattfederaufhängung wird die Wirkrichtung des stabförmigen aktiven Materials um  $90^\circ$  gedreht und seine Auslenkung um den Faktor  $a \approx 6$  verstärkt [3]. Der notwendige Magnetkreis inklusive der Erregerspule dient als seismische Masse und erfüllt somit eine Doppelfunktion; lediglich die Fixierungsteile, die ca. 10% der Gesamtmasse von 325 g ausmachen, tragen nicht zur Krafterzeugung bei. Ferner ist die Konstruktion des aktiven Schwingungstilgers gekennzeichnet durch ein robustes dynamisches Verhalten, das fast vollkommen frei ist von parasitären Eigenmoden, was schließlich seinen breitbandigen Einsatz zur Schwingungsreduzierung ermöglicht.

Die Tilgerkonstruktion lässt sich hinsichtlich ihrer Resonanzfrequenz bzw. der Tilgerkraft an andere Systemanforderungen anpassen. Als Fertigungsverfahren ist bereits eine auf diskreten Bauteilen sowie eine auf Drahterosion basierte Aufbauweise erprobt worden.

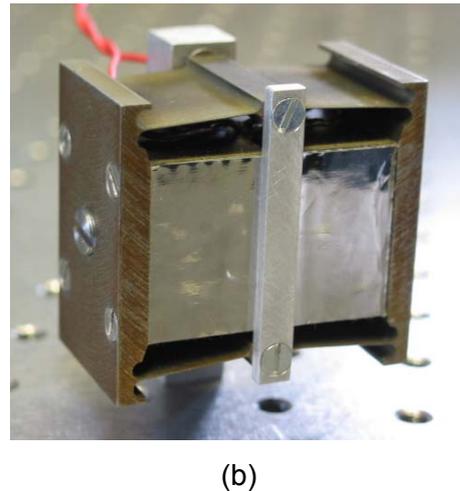
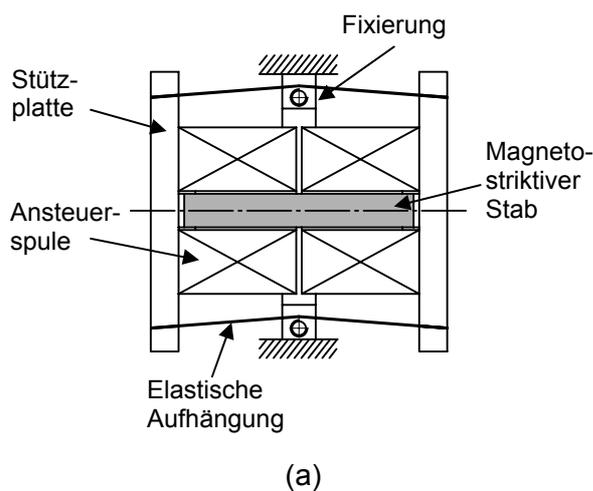


Bild 1: Aufbau des magnetostruktiven Schwingungstilgers: (a) Schnittdarstellung; (b) Aktor (Aufhängung mittels Drahterosion gefertigt)

### 3. Leistungselektronik

Um die Spezifikationen des Aktors unter allen Betriebsbedingungen erfüllen zu können, muss die zugehörige Leistungselektronik gewisse Reserven bereithalten. Sie ist einerseits das Bindeglied zwischen der Feldspule und der zur Verfügung stehenden Energieversorgung, andererseits ist sie ein Glied der geschlossenen Regelkette und muss, um deren Gesamt-Performance sicher zu stellen, auch komplexe Anforderungen erfüllen, die teilweise erst aus der gewählten Regelstrategie folgen.

Die Anforderungen an die Leistungselektronik ergeben sich zum einen direkt aus den Lasteigenschaften (ein magnetostruktiver Aktor ist als stromgesteuerte ohmsch-induktive Last zu beschreiben) und dem geforderten Amplitudengang, zum anderen aber auch aus den Besonderheiten, die der Einsatz magnetostruktiver Materialien zur Schwingungsreduzierung mit sich bringt.

Besondere Beachtung ist dem magnetischen Kreis zu widmen. Das magnetostruktive Material dehnt sich parallel zum magnetischen Feld, ungeachtet der Polarität. Bei einer Ansteuerung mit einem Wechselfeld ergibt sich aufgrund des etwa quadratischen Dehnung-Feldstärke-Kennlinienverlaufs eine mechanische Frequenzverdopplung, sofern nicht – beispielsweise mit Hilfe eines Permanentmagneten – für einen magnetischen Arbeitspunkt gesorgt wird. Wird auf einen Permanentmagneten verzichtet, muss der Steuerstrom einen Gleichanteil beinhalten, der den korrekten magnetischen Arbeitspunkt einstellt. Im vorliegenden Fall wurde ohne Permanentmagnet gearbeitet; die erforderliche Leistungselektronik liefert einen Ruhestrom zur Einstellung des magnetischen Arbeitspunktes, überlagert vom dynamischen Steuersignal.

Das geforderte Amplitudenspektrum des Ausgangsstromes ergibt in Verbindung mit dem komplexen elektrischen Widerstand des Aktors und den Leitwerten, namentlich den Endstufentransistoren, die minimal erforderliche Betriebsspannung. Falls die Betriebsspannung z.B. aufgrund der Bordspannung vorgegeben ist, kann der komplexe Widerstand der Erregerspule über eine Variation von Windungszahl und Drahtdurchmesser den Gegebenheiten angepasst werden. Im vorliegenden Fall reicht eine Betriebsspannung von 12 V aus, um den magnetostriktiven Schwingungstilger mit einem sinusförmigen Strom im Bereich 0...4 A bei 630 Hz anzusteuern. Die im Potenzial darüber und darunter liegenden Betriebsspannungen für die Treiberschaltung erzeugt sich die Schaltung über Bootstrap-Kondensatoren aus der Ausgangsspannung selbst, die negative Spannung wird aus der abzubauenen magnetischen Feldenergie des Aktors generiert.

Die Ansprüche an den Phasengang der Leistungselektronik sind weitaus höher, als es sich aus den Anforderungen an den Aktor direkt ablesen lässt. Der Aktor soll im Frequenzbereich von 50 Hz bis über 400 Hz arbeiten, was an sich für eine Leistungselektronik kein Problem darstellt. Die Analyse der Einsatzbedingungen verschärft die Anforderungen jedoch deutlich. Um das aktoreigene Hystereseverhalten zu kompensieren, werden inverse Hystereseoperatoren eingesetzt, die bei stochastischen Steuersignalen auch beim Durchfahren von lokalen Minor-loops arbeiten müssen. Dies erfordert die Erweiterung des Frequenzbereiches nach unten bis hin zum DC-Betrieb. Nach oben muss der Frequenzbereich ebenfalls wesentlich erweitert werden, denn um ein hystereseffreies Weg- oder Kraftsignal am Ausgang des Aktors zu erhalten, wird sein Magnetfeld und somit der Ansteuerstrom mit dem

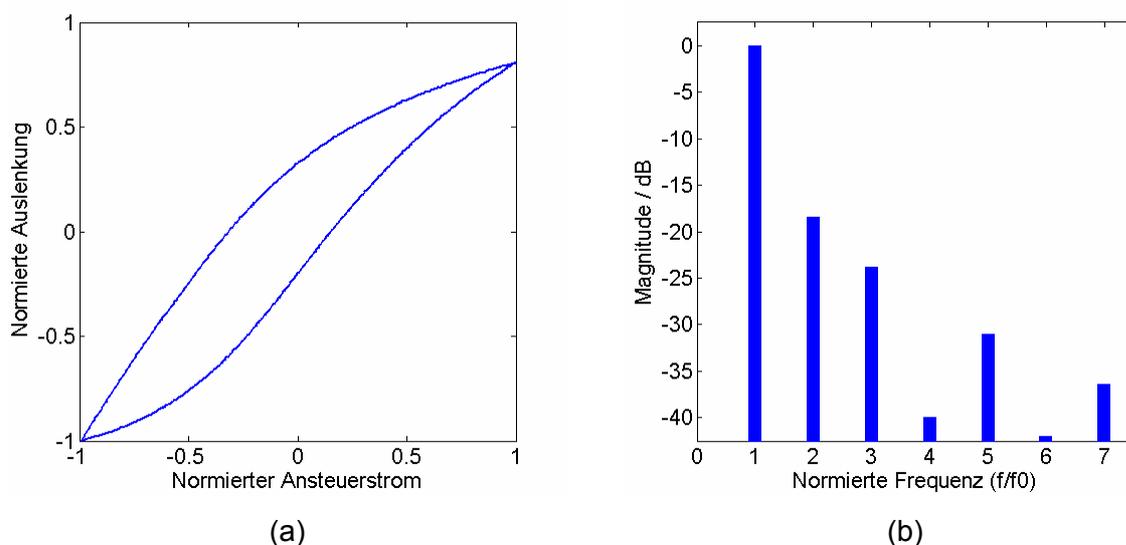


Bild 2: Aktorkennlinienhysterese: (a) Trajektorie eines normierten und mittelwertfreien Aktormesssignals; (b) Amplitudenspektrum des Wegsignals nach Übertragung eines harmonischen Ansteuerstromes über die Hysterese kennlinie in (a)

inversen Fehlersignal beaufschlagt. Um eine wirkungsvolle Hysteresekompensation zu betreiben, muss größenordnungsmäßig wenigstens noch die siebenfache Signalfrequenz verarbeitet werden können, vgl. **Bild 2a/b** (2,8 kHz). Um die Verarbeitung dieser Oberwellen ohne nennenswerte Phasenverschiebung gewährleisten zu können, muss die Reaktionszeit der Endstufe im aktuellen Beispiel einer (Kleinsignal-)Grenzfrequenz von ca. 20 kHz entsprechen. So erwächst aus der Anforderung an den Aktor, mechanische Signale von 50 Hz bis 400 Hz zu erzeugen, die von der zugehörigen Leistungselektronik geforderte Bandbreite von Null bis ca. 20 kHz.

Die im Rahmen des Projektes MESA entwickelte Leistungselektronik erfüllt diese Anforderungen mit einer sehr geringen Zahl von Bauteilen. Durch die exakte Anpassung an den zu treibenden Aktor, an die elektrischen Bedingungen im Einsatzumfeld (Energieversorgung, Bordnetz) und vor allem an die durch den Betrieb im geschlossenen Regelkreis mit Hysteresekompensation sich ergebenden Signalverläufe ist der erforderliche Bauraum auf ein Minimum reduziert.

#### 4. Dynamisches Verhalten und Schwingungsdämpfung

**Bild 3a** zeigt das Kraftübertragungsverhalten des aktiven Tilgers bei Effektivwerten des Ansteuerstromes von 0,2 A, 0,6 A und 1,0 A. Bei der Tilger-Eigenfrequenz werden Spitzenkräfte von über 80 N erzeugt. Der robuste Aufbau des magnetostriktiven Schwingungstilgers resultiert in der nahezu konstanten Kraftübertragung oberhalb der Resonanzfrequenz bis 500 Hz. Mit Hilfe einer einfachen Proportionalregelung lässt sich der magnetostriktive

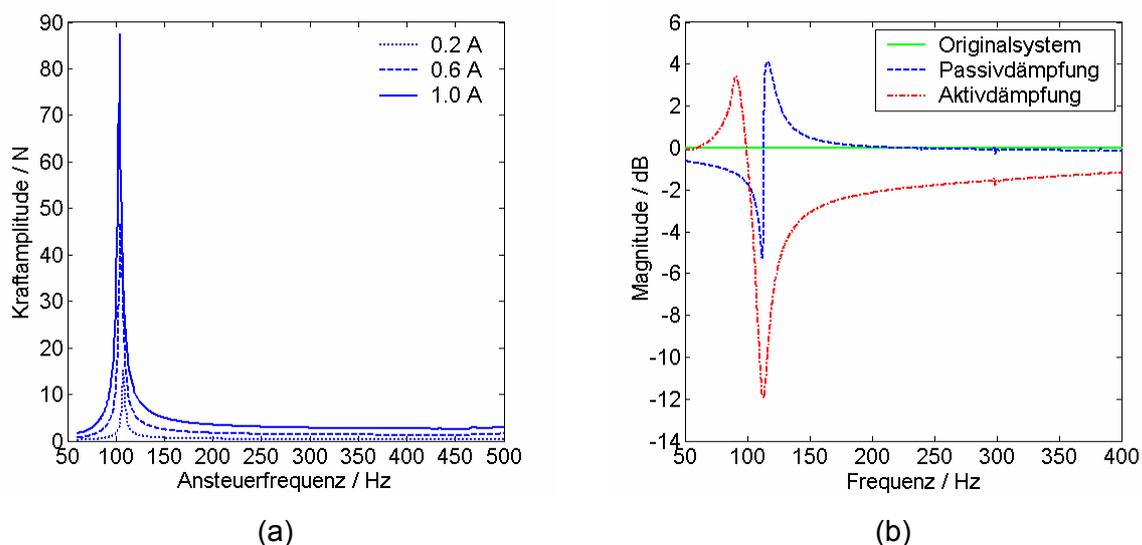


Bild 3: Leistungsfähigkeit des aktiven magnetostriktiven Tilgers: (a) Erzeugbare Kräfte bei unterschiedlichen Ansteuerstromamplituden; (b) Schwingungsdämpfung mit Tilger

Schwingungstilger zur Minimierung der Fußpunktbeschleunigung einsetzen [2]. So ist die breitbandige Schwingungsdämpfung erzielt worden, die in **Bild 3b** gezeigt wird.

Darüber hinaus wurde ein Regelkreis entworfen, mit dem sich die Frequenz der mechanischen Resonanzüberhöhung sowie die effektive Dämpfung des aktiven Tilgers einstellen lassen [4]. Mit dieser auf einer kollozierten Krafrückkopplung basierenden Regelung, die hier eine Übertragungsfunktion erster Ordnung zwischen der gemessenen Kraft und der Wanderauslenkung bildet, lässt sich die Resonanzfrequenz bis zu ca. 15% verringern. Diese Adaptierbarkeit ist eine Voraussetzung für die Anpassung des magnetostriktiven Schwingungstilgers an variable Störfrequenzen.

In [5] werden die Ergebnisse von Laborversuchen mit diesem Tilger an einem Flugzeugrahmenteil beschrieben, an dem die in einem Turbopropflugzeug vorkommenden Strukturschwingungen messtechnisch nachgebildet wurden. Passiv – sprich stromlos – werden Schwingungen um ca. 20 dB gedämpft, während im geschlossenen Regelkreis Schwingungsreduzierungen von teilweise über 50 dB erzielt werden. Der Einsatz eines inversen Hysterese Modells [6] in der Steuerkette sorgt für eine erhöhte Bandbreite des aktiven Tilgers sowie eine verbesserte Anpassbarkeit der effektiven Tilgerresonanzfrequenz.

## **5. Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammen mit der kompakten Leistungselektronik und einer geeigneten Regelung lässt sich der beschriebene magnetostriktive Schwingungstilger zur breitbandigen Tilgung von Strukturschwingungen einsetzen, insbesondere wenn das Vibrationsspektrum durch tonale Schwingungen geprägt ist. Diese vorteilhafte Eigenschaft prädestiniert ihn zur Komfortsteigerung in Passagierflugzeugen und -zügen, wo bedingt durch systeminhärente Störkräfte bzw. Eigenschwingverhalten ein tonales bzw. harmonisches Vibrationsspektrum vorliegt. Da in diesen Fällen, aber auch in Werkzeugmaschinen, die Störfrequenz oft betrieblichen Schwankungen unterliegt, ist der Einsatz einer geeigneten Regelungsstrategie zur adaptiven Anpassung der Tilgerfrequenz an die Störfrequenz anzustreben. Eine adaptive Ausführung des Tilgers ist Bestandteil laufender Forschungsaktivitäten.

Eine Multifunktionalität des magnetostriktiven Tilgers ist gegeben, wenn z.B. seine aktorischen und sensorischen Eigenschaften zur Überwachung der Strukturintegrität verwendet werden bzw. wenn im Generatorbetrieb elektrische Energie aus den Strukturschwingungen gewonnen wird. Ergänzend zu den weiterführenden Untersuchungen zur Schwingungsreduzierung mit aktiven Tilgern wird derzeit der Generatorbetrieb am Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA) der Universität des Saarlandes im Rahmen des EU-Folgeprojektes MESEMA untersucht [7].

## 6. Literaturangaben

- [1] MESA-Projektwebseite: <http://www.eurice.de/mesa>
- [2] May, C.; Kuhnen, K.; Pagliarulo, P.; Janocha, H.: Magnetostrictive Dynamic Vibration Absorber (DVA) for Passive and Active Damping. In: Proc. of the 5th European Conf. on Noise Control, Naples, 2003, Aufsatz-Nr. 159.
- [3] DE 103 21 110.1
- [4] Pagliarulo, P.; Kuhnen, K.; May, C.; Janocha, H.: Tunable Magnetostrictive Dynamic Vibration Absorber. In: Proc. of the 9th International Conf. on New Actuators, Bremen, 2004, S. 698-701.
- [5] Aurilio, G.; Cavallo, A.; Lecce, L.; Monaco, E.; Napolitano, L.; Natale, C.; Fuselage Frame Vibration Control Using Magnetostrictive Hybrid Dynamic Vibration Absorbers. In: Proc. of the 5th European Conf. on Noise Control, Naples, 2003, Aufsatz-Nr. 227.
- [6] Kuhnen, K.: Modeling, Identification and Compensation of Complex Hysteretic Nonlinearities - A modified Prandtl-Ishlinskii Approach. In: European Journal of Control, Vol. 9, No. 4, 2003, S. 407-418.
- [7] MESEMA-Projektwebseite: <http://www.mesema.info>