

# Realistische Bewertung schwingungsaktiver Maschinen und deren Lagerungen mittels aktiver Anbindungsimpedanzen

Timo Jungblut, Stefan Wolter, Holger Hanselka

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF  
64289 Darmstadt, Deutschland, Email: timo.jungblut@lbf.fraunhofer.de

## Einleitung

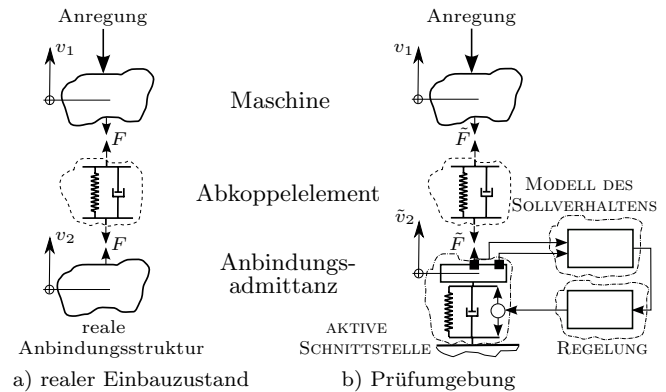
Die Anforderungen an das vibroakustische Verhalten technischer Systeme nehmen stetig zu. Dies betrifft beispielsweise auch den Körperschalleintrag von Maschinen in angrenzende Strukturen. Da die an den Koppelstellen übertragenen Kräfte von den dynamischen Eigenschaften der verwendeten Lagerungselemente sowie der Trägerstruktur, auf der die Maschine gelagert ist, beeinflusst werden, können festgelegte Anforderungen häufig erst nach der Installation der Maschine an ihrem Einsatzort überprüft werden.

Um bereits auf Basis von Testläufen zuverlässige Aussagen bezüglich des Schwingungsverhaltens einer Maschine oder eines Lagerungssystems treffen zu können, ist es in vielen Fällen erforderlich, die Eigenschaften der Anbindungsstruktur am späteren Aufstellort in der Prüfumgebung zu berücksichtigen. Testaufbauten, die dieser Forderung gerecht werden, sind häufig kosten- und materialintensiv, kaum an sich ändernde Randbedingungen anpassbar und können viel Bau- bzw. Lagerraum benötigen. Abweichungen zu den realen Bedingungen müssen in der Regel trotzdem in Kauf genommen werden. Insbesondere bei großen Maschinen kleiner Stückzahl, die in Großstrukturen integriert werden, ist eine Berücksichtigung der realen Anbindungsbedingungen in der Versuchsumgebung häufig überhaupt nicht möglich.

Eine interessante Möglichkeit, bei der Bewertung der vibroakustischen Eigenschaften einer Maschine die Wechselwirkungen mit angrenzenden Strukturen zukünftig berücksichtigen zu können, besteht darin, das dynamische Verhalten von Anbindungsstrukturen innerhalb der Prüfumgebung durch aktive oder semi-aktive Systeme nachzubilden (vgl. auch [1, 2]). Im Rahmen dieses Beitrags wird zunächst ein geeigneter Ansatz zur experimentellen Simulation von Anbindungsbedingungen mittels aktiver Systeme in allgemeiner Form vorgestellt. Anschließend werden die experimentelle Umsetzung einer möglichen Kombination von Teillösungen beschrieben und Versuchsergebnisse präsentiert.

## Konzept

Um das Verhalten von angrenzenden Teilsystemen in Prüfaufbauten nachzubilden, wird wie in Abbildung 1 dargestellt einer aktiven Schnittstelle durch eine geeignete Signalverarbeitung das in einem Modell abgelegte Sollverhalten aufgeprägt. Damit die sich im Prüfaufbau einstellenden Kräfte  $\tilde{F}$  und Geschwindigkeiten  $\tilde{v}$  mit den Kräften  $F$  und Geschwindigkeiten  $v$  übereinstimmen, die

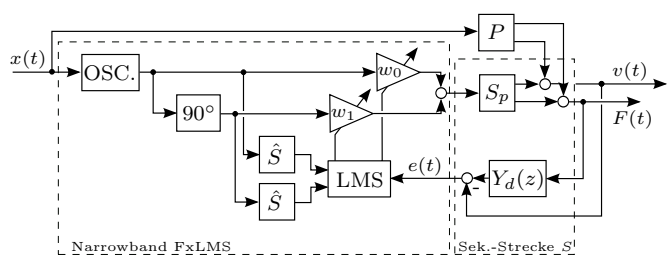


**Abbildung 1:** Nachbildung des Verhaltens einer Anbindungsstruktur in Versuchs- und Prüfumgebungen durch aktives System

sich im realen Einbauzustand ergeben, muss die aktive Schnittstelle die Impedanz der realen Anbindungsstruktur annehmen. Dementsprechend sind die Ansteuerungssignale in Abhängigkeit der aktuell wirkenden Kraft und des momentanen Geschwindigkeitszustandes so zu berechnen, dass das Verhältnis dieser beiden Größen mit der frequenzabhängigen Vorgabe übereinstimmt.

Diese Aufgabe kann in eine Kraftregelung überführt werden, indem in jedem Zeitschritt die einzustellende Sollkraft durch Filterung des gemessenen Geschwindigkeitssignals mit einem Modell des gewünschten Verhaltens im Impedanzformulierung berechnet wird [2]. Eine Beschreibung des Sollverhaltens in Admittanzformulierung führt entsprechend auf die Vorgabe einer Sollgeschwindigkeit und somit auf eine Geschwindigkeitsregelung. Letztere bietet insbesondere für die Nachbildung von Struktureigenschaften unter anderem den Vorteil, dass die Kausalität des Sollmodells gewährleistet ist [3].

Für die Minimierung des Fehlersignals, das jeweils durch den Vergleich der berechneten Soll- mit der gemess-



**Abbildung 2:** Schmalbandige Admittanzsimulation mittels Narrowband-FxLMS

senen Istgröße berechnet wird, kommen verschiedene Ansätze in Frage. Insbesondere wenn die Eigenschaften der Anbindungsstrukturen in einem großen Frequenzbereich simuliert werden sollen, die nachzubildende Struktur schwach gedämpfte Moden aufweist und ein Referenzsignal, wie z. B. die Drehzahl der zu charakterisierenden Maschine, zur Verfügung steht, bieten sich adaptive Vorsteuerungen für die Minimierung des Fehlersignals an.

Abbildung 2 zeigt eine schmalbandige Implementierung einer adaptiven Vorsteuerung zur Admittanznachbildung basierend auf dem Narrowband FxLMS-Algorithmus (vgl. auch [4]). Hierbei umfasst die Primärstrecke  $P$  die Übertragungsfunktionen vom Referenzsignal  $x(t)$  zu den beiden Sensorsignalen  $F(t)$  und  $v(t)$  und die Sekundärstrecke  $S$  den Übertragungsweg vom Ausgang des adaptiven Filters zum zu minimierenden Fehlersignal  $e(t)$ . Für die Adaption der Filterkoeffizienten erfordert ein solcher Ansatz ein mit einem Modell der Sekundärstrecke  $\hat{S}$  gefiltertes Referenzsignal. Wie Abbildung 2 entnommen werden kann, ergibt sich für den Fall einer Impedanz- bzw. Admittanznachbildung hierbei die Besonderheit, dass das Modell der Sekundärstrecke neben der physikalischen Sekundärstrecke  $S_p$  auch das Modell der nachzubildenden Dynamik  $Y_d(z)$  enthalten muss. Die Vorgabe des zeitdiskreten Sollverhaltens  $Y_d(z)$  kann ebenfalls auf unterschiedliche Weise erfolgen. Für die Beschreibung der Admittanz kontinuierlicher Strukturen bieten sich unter anderem modale Zustandsraumbeschreibungen an, die sowohl numerisch als auch experimentell ermittelt werden können [3].

Für die aktive Schnittstelle kommen sowohl relativ steife Aktoren (z.B.: piezoelektrische Aktoren) als auch inertialmassenbasierte Konzepte in Kombination mit passiven Steifigkeiten in Frage.

### Realisierungsbeispiel

Der Ansatz aus Abbildung 2 soll im Folgenden dazu verwendet werden, die Eingangsadmittanz eines Balkens nachzubilden. Die für die Parametrierung des Sollmodells benötigten modalen Daten der ersten drei Moden wurden vorab numerisch in einer FE-Simulation ermittelt.

Den für die Umsetzung verwendeten prinzipiellen Versuchsaufbau zeigt Abbildung 3. Dieser besteht im Wesentlichen aus zwei piezoelektrischen Stapelaktoren, die über einen Impedanzmesskopf (PCB 288D01) miteinander verbunden und in einem gemeinsamen Prüfrahmen

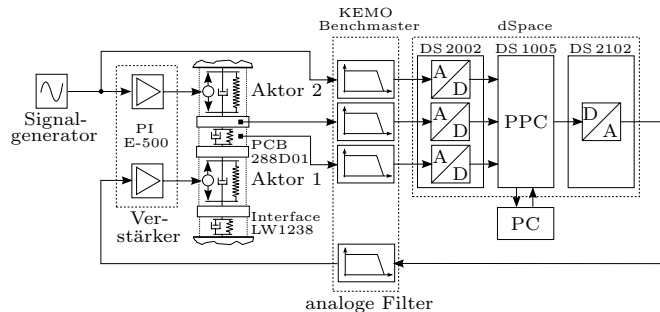


Abbildung 3: Prinzipieller Versuchsaufbau

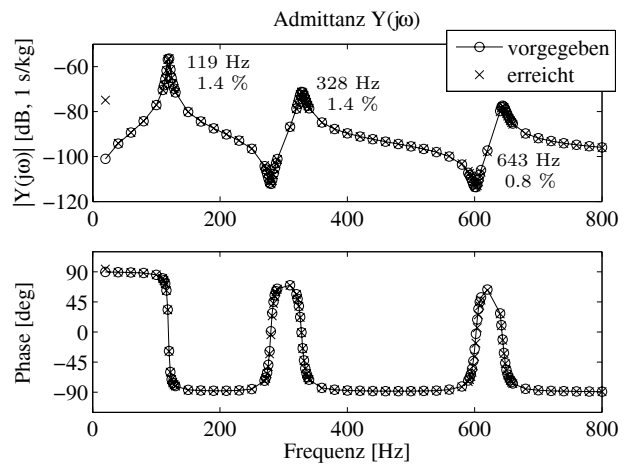


Abbildung 4: Nachbildung der Eingangsadmittanz einer schwach gedämpften Anbindungsstruktur (Messergebnisse)

angeordnet sind. Einem der beiden Aktoren (Aktor 1) wird das gewünschte Sollverhalten aufgeprägt, der zweite Aktor (Aktor 2) wird für die Anregung der aktiven Schnittstelle genutzt. Als Referenzsignal  $x(t)$  dient das von einem Signalgenerator erzeugte Steuersignal des Belastungsaktors. Die Berechnung der Stellgröße für den Impedanzaktor, die Adaption der Filterkoeffizienten und die Berechnung des Fehlersignals erfolgen mit gleicher Zeitschrittweite ( $f_a = 6 \text{ kHz}$ ) auf einem dSpace-System. In Abbildung 4 sind die vorgegebene und erreichte Admittanz im jeweils eingeschwungenen Zustand gegenübergestellt. Wie Abbildung 4 entnommen werden kann, ist es prinzipiell möglich, mittels adaptiver Vorsteuerung das dynamische Verhalten schwach gedämpfter mechanischer Strukturen in einem großen Frequenzbereich nachzubilden. Aktuelle Arbeiten haben sowohl die Übertragung des Ansatzes auf aktive Schnittstellen mit mehreren Freiheitsgraden als auch den Funktionsnachweis unter Betriebslasten zum Ziel.

### Literatur

- [1] Edwards, T. S.: Using passively shunted electromechanical transducers to control the boundary impedance of dynamic test fixtures. *Journal of Sound and Vibration* 323 (2009), 35-50
- [2] Bras, J.-M. F.: Development of a standardized method for actuator characterization using active control of impedance. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 1996
- [3] Herold, S.; Jungblut, T.; Kurch, M.: A Systematic Approach to Simulate Active Mechanical Structures. NAFEMS-Seminar: „Multi-Disciplinary Simulations - The Future of Virtual Product Development“, Wiesbaden, November 2009
- [4] Kuo, S. M.; Morgan, D. R.: *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. John Wiley & Sons, New York, 1996