

# Experimentelle Charakterisierung von piezoelektrischen Aktorsystemen für die aktive Lärm- und Schwingungsreduktion

Timo Jungblut, Dirk Mayer, Sven Herold

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

## Einleitung

Durch den anhaltenden Trend zum Leichtbau bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an das Komfort- und Betriebsverhalten technischer Systeme, werden immer häufiger aktive Maßnahmen im Bereich der Lärm- und Schwingungsreduktion erforderlich. Hierfür sind zahlreiche Aktor-, Sensor- und Regelungskonzepte bekannt (siehe z. B.: [1, 2]). Neben anderen sind in diesem Zusammenhang insbesondere piezoelektrische Aktorsysteme von großer Bedeutung. Um diese Aktoren mit ausreichend elektrischer Energie zu versorgen, ist – wie bei anderen Aktorprinzipien auch – eine Leistungsverstärkung der von der Regelung berechneten Steuersignale erforderlich. Während das Verhalten der Aktoren relativ gut untersucht und verstanden ist, sind Leistungsverstärker häufig Zukaufteile, deren interner Aufbau für eine exakte Beschreibung nur unzureichend bekannt ist. Da die erreichbare Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems allerdings vielfach durch das Verhalten der Leistungsverstärkung begrenzt wird, ist für eine ganzheitliche Auslegung und Optimierung aktiver strukturdynamischer Systeme eine möglichst genaue Kenntnis des dynamischen Verhaltens dieser Systemkomponente erforderlich. Zur Beschreibung der Nichtlinearitäten eines Verstärkers wird in der Regel der dimensionslose Klirrfaktor

$$K = \frac{\sqrt{\hat{u}_2^2 + \hat{u}_3^2 + \dots + \hat{u}_n^2}}{\sqrt{\hat{u}_1^2 + \hat{u}_2^2 + \hat{u}_3^2 + \dots + \hat{u}_n^2}} \quad (1)$$

herangezogen, der das Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Gesamt-Effektivwert einschließlich der Grundschwingung eines Signals  $u$  angibt. Anhand des Klirrfaktors können bei der Beschreibung der dynamischen Eigenschaften der Leistungsverstärkung zwei Bereiche unterschieden werden (siehe auch Abbildung 3). Innerhalb des quasi-linearen Betriebsbereiches ist der Klirrfaktor – je nach Bauart und Qualität des Verstärkers – üblicherweise kleiner einem Prozent. Ein harmonisches Eingangssignal hat hier ein phasenverschobenes, aber nahezu harmonisches Ausgangssignal zur Folge. In Abhängigkeit von der angeschlossenen elektrischen Last und der Amplitude der Steuerspannung wird ab einer bestimmten Frequenz dann die Strom- bzw. Leistungsgrenze des Verstärkers erreicht. Durch Abschneideeffekte kommt es in diesem zweiten Bereich zu erheblichen Signalverzerrungen, sodass der Klirrfaktor stark ansteigt. Ein Betrieb des Verstärkers in diesem Bereich ist in der Regel nicht zielführend. Für die Auslegung aktiver strukturdynamischer Systeme wird somit neben dem dynamischen Verhalten im quasi-linearen Be-

triebsbereich auch eine Aussage zu den Grenzen dieses Bereiches benötigt. Um Verstärker für piezoelektrische Aktoren experimentell zu charakterisieren, ist es daher zweckmäßig sowohl die linearen Signalanteile als auch höherharmonischen Signalanteile für verschiedene Betriebspunkte in Abhängigkeit der Frequenz messtechnisch zu erfassen. Ein geeigneter Ansatz wird im Folgenden vorgestellt. Aufbauend auf den Messergebnissen wird ein einfaches Modell zur Nachbildung der Leistungsverstärkung in numerischen Simulationen aktiver strukturdynamischer Systeme vorgeschlagen.

## Experimentelle Charakterisierung

Um bei der Vermessung der Verstärker Signalverzerrungen durch mechanische Lasten ausschließen zu können, werden diese, wie in Abbildung 1 dargestellt, zunächst mit rein kapazitiven Lasten betrieben. Die Generierung des Eingangssignals  $U_{ctr}$  für den zu vermessenden Verstärker, die Steuerung des Versuchsablaufes und die Auswertung der Messsignale erfolgt digital in Echtzeit auf einer geeigneten Hardware (z. B. dSpace). Zur Anregung des Systems werden vom Messprogramm sinusförmige Steuersignale verschiedener Amplituden für frei wählbare Frequenzstützstellen über eine festgelegte Schwingungszahl hinweg erzeugt. Gemessen wird die Ausgangsspannung  $U_p$  des Verstärkers. Die Auswertung

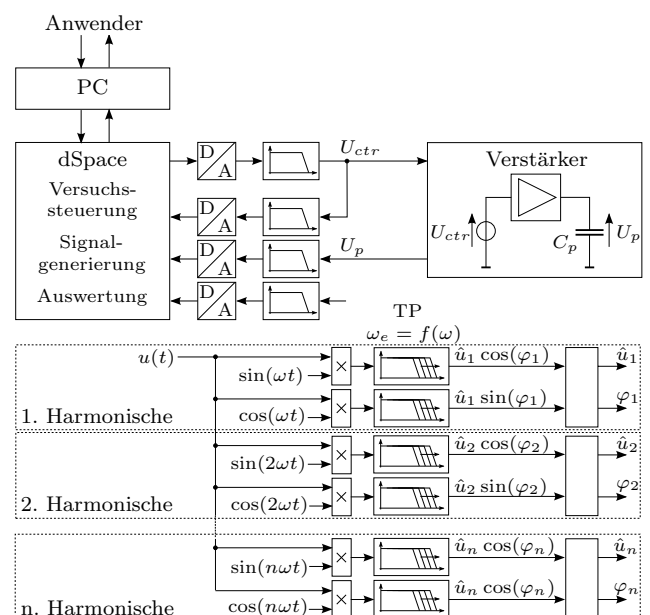
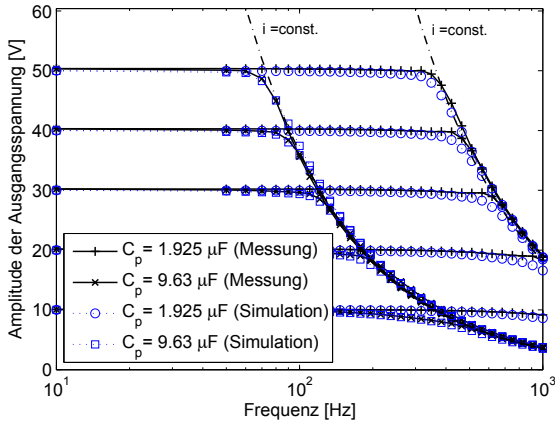


Abbildung 1: Prinzipieller Messaufbau.



**Abbildung 2:** Gemessene und simulierte Amplituden der Ausgangsspannung bei zwei verschiedenen Kapazitäten.

erfolgt für jede der vorgegebenen Frequenzen einzeln. Hierzu wird, wie ebenfalls in Abbildung 1 gezeigt, die Amplitude und Phase für jede zu betrachtende Ordnung aus den stationären Ausgangssignalen der Tiefpassfilter

$$E\{u(t) \cdot \sin(\omega_n t)\} = \frac{1}{2} \hat{u}_n \cos(\varphi_n) \quad (2)$$

bzw.

$$E\{u(t) \cdot \cos(\omega_n t)\} = \frac{1}{2} \hat{u}_n \sin(\varphi_n), \quad (3)$$

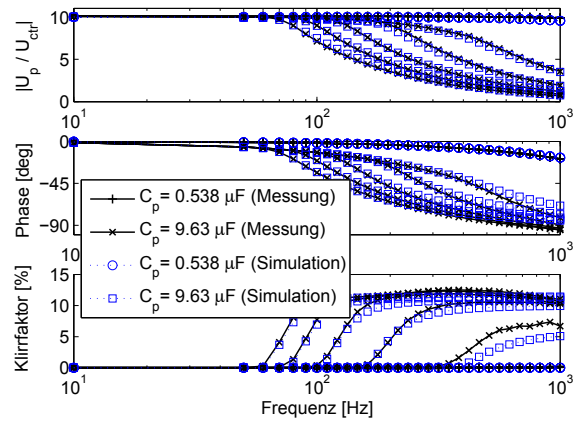
bestimmt, sodass das jeweilige Übertragungsverhalten sowie eine Approximation des Klirrfaktors nach Gleichung (1) in Abhängigkeit von der Frequenz unter Berücksichtigung der ersten  $n$  Ordnungen berechnet werden kann. Im Rahmen dieses Beitrags werden die ersten fünf Harmonischen der Ausgangsspannung berücksichtigt.

In Abbildung 2 sind die Amplituden der Ausgangsspannung eines analogen Niedervolt-Verstärkers für zwei verschiedene Kapazitäten dargestellt. Außerhalb des quasilinearen Betriebsbereiches liegt die erreichte Spannungsamplitude auf den Kurven einer konstanten Stromamplitude. Für den gleichen Verstärker zeigt Abbildung 3 die dynamische Verstärkung zwischen Steuerspannung und Ausgangsspannung, die Phasendifferenz zwischen beiden Signalen sowie den approximierten Klirrfaktor der Ausgangsspannung für verschiedene Steuerspannungen am Beispiel von zwei verschiedenen Kapazitäten.

## Modellbildung und Simulation

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich ist, weist der Verstärker mit angeschlossener Kapazität innerhalb seines quasilinearen Betriebsbereiches in guter Näherung ein Verzögerungsverhalten 1. Ordnung auf. Außerhalb dieses Bereiches wird das Verhalten des Systems durch die Strombegrenzung dominiert (vgl. Abb. 2). Es bietet sich daher an, den Verstärker durch das einfache Modell mit der statischen Verstärkung  $K_{pv}$  und dem im Allgemeinen von der Kapazität abhängigen Widerstand  $R(C_p)$

$$i(t) = \frac{1}{R(C_p)} (K_{pv} U_{ctr}(t) - U_p(t)) \quad (4)$$



**Abbildung 3:** Variation der Steuerspannung für zwei verschiedene Kapazitäten (Mess- und Simulationsergebnisse).

zu beschreiben und den maximalen Ausgangsstrom  $i(t)$  zu begrenzen. Die Simulationsergebnisse für rein kapazitive Lasten sind in den Abbildungen 2 und 3 den entsprechenden Messergebnissen gegenübergestellt.

In Gleichung (4) wird der Strom in Abhängigkeit der Steuerspannung  $U_{ctr}(t)$  und der Spannung  $U_p(t)$  an der Kapazität berechnet. Für die gekoppelte Simulation von elektrischem und mechanischem Teilsystem kann das vorgeschlagene Modell des Verstärkers daher leicht mit dem elektro-mechanischen Modell eines piezoelektrischen Aktors in Impedanzformulierung [3]

$$\begin{bmatrix} U_p(s) \\ F(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_p \cdot s} & \frac{\alpha}{C_p \cdot s} \\ \frac{\alpha}{C_p \cdot s} & \frac{C_p d \cdot s + C_p c + \alpha^2}{C_p \cdot s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(s) \\ \Delta v(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

kombiniert werden. Hierdurch können sowohl das dynamische Verhalten der Leistungsverstärkung innerhalb ihres Betriebsbereiches als auch die Grenzen dieses Bereiches in der Simulationen aktiver strukturdynamischer Systeme berücksichtigt werden.

## Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA (Adaptronic-Research, Innovation, Application), das vom Fraunhofer LBF koordiniert und vom Land Hessen finanziell gefördert wird. Die Autoren Bedanken sich für die Unterstützung. Besonderer Dank gilt auch unseren studentischen Mitarbeitern Oliver Alber und Alex Guedia Sonkeng.

## Literatur

- [1] Janocha, H.: Aktoren, Grundlagen und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [2] Fuller, C.; Elliot, S.; Nelson, P.: Active Control of Vibrations. Academic Press, 1996
- [3] Mayer, D.; Atzrodt, H.; Herold, S.; Thomaier, M: An approach for the modelbased monitoring of piezoelectric actuators. II Eccomas Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Lisbon, 2005