

# LINEARE ELEKTROMAGNETISCHE AKTOREN FÜR AKTIVE HOCHDYNAMISCHE SCHWINGUNGSANREGUNGEN IM MASCHINENBAU

C. Oberbeck, H. Ulbrich

*Lehrstuhl für Mechanik, Fachbereich Maschinenwesen*

*Universität Essen*

*Schützenbahn 70*

*45117 Essen, Deutschland*

*Tel.: +49 201 1833283, Fax: +49 201 1832871*

*Email: claus.oberbeck@uni-essen.de, ulbrich@uni-essen.de*

## **Kurzfassung**

Um den wachsenden Anforderungen des internationalen Marktes an die Leistungsfähigkeit von Maschinen gerecht werden zu können, finden immer häufiger mechatronische Lösungsansätze Anwendung bei der Optimierung technischer Systeme. Dabei nehmen Aktoren Schlüsselpositionen ein, weil sie den zielorientierten Energietransfer realisieren. Für eine Vielzahl industrieller Applikationen im allgemeinen Maschinenbau sowie in der Verkehrstechnik sind elektromagnetische Aktoren besonders geeignet, da sie das geforderte Leistungsprofil bezüglich der guten dynamischen Eigenschaften kombiniert mit Stellwegen bis in den mm-Bereich erfüllen.

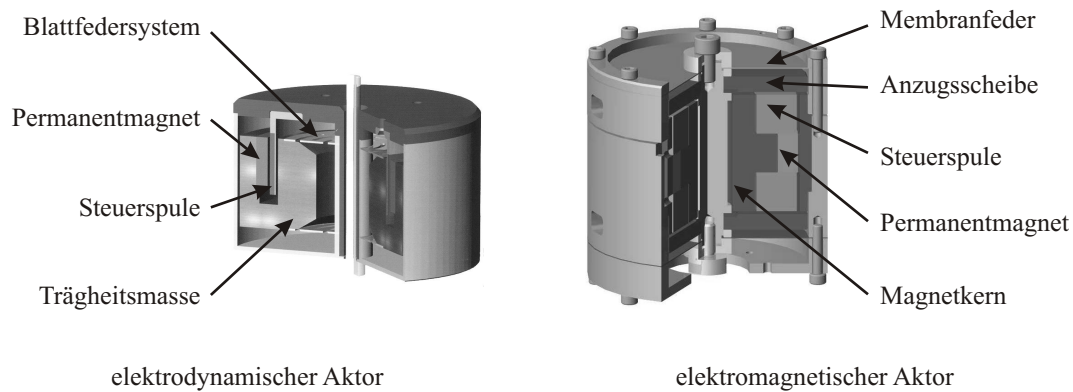
Innerhalb des vorliegenden Beitrags werden elektromagnetische Aktoren untersucht, die eine gute Dynamik (Stellkräfte im kN-Bereich und Stellfrequenzen bis ca. 500 Hz) mit Stellwegen im mm-Bereich und einer kompakten und robusten Bauweise verknüpfen. Die Vormagnetisierung der Systeme erfolgt durch den Einsatz starker Permanentmagnete. Die aus der hohen negativen Systemsteifigkeit resultierende schlechte Regelbarkeit der Aktorik wird mit Hilfe eines ECU-gestützten (ECU: electronic-control-unit) Kompensationsverfahrens gelöst. Das Übertragungsverhalten wird diskutiert und experimentell verifiziert. Abschließend wird die Einsatzfähigkeit der diskutierten Aktorik an einem ersten, industrienahen Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der definierten Schwingungsanregung erprobt.

## **1 Einleitung**

In vielen Bereichen des Maschinenbaus und der Verkehrstechnik werden bereits seit einigen Jahren verstärkt Aktoren eingesetzt, die für verschiedenste Anwendungen genutzt werden. Auf der einen Seite handelt es sich dabei um Applikationen, in denen z.B. eine definierte Schwingungsanregung benötigt wird (z.B. in der Shaker- oder Siebmaschinen-Technik) oder genaue Stellbewegungen gefordert werden. Auf der anderen Seite nehmen seit einiger Zeit auch Anwendungen zu, bei denen „passive“ Optimierungsmaßnahmen an Grenzen stoßen und daher Aktoren für eine „aktive“ Optimierung der dynamischen Eigenschaften der technischen Systeme eingesetzt werden [1-3]. Diese mechatronischen Lösungsansätze werden zukünftig noch mehr an Bedeutung gewinnen und wesentlich verbesserte oder sogar gänzlich neue innovative Produkte ermöglichen.

Bei dem Einsatz von Mechatronik stellt die Aktorik einen zentralen Bestandteil dar. Sie setzt eine von der Sensorik bereitgestellte und von einem entsprechend ausgelegten Regler aufbereitete Systeminformation optimal im Sinne einer gewünschten Zielsetzung in die erforderlichen physikalischen Wirkungen um. Aus diesem Grund wird seit mehreren

Jahren intensivst an der Entwicklung leistungsstarker Aktoren geforscht, so dass mittlerweile Systeme mit stark unterschiedlichen Wirkprinzipien entstanden sind [4]. Für viele Anwendungen im Maschinenbau und in der Verkehrstechnik sind allerdings Aktoren, die auf einem der magnetischen Wirkprinzipie basieren, besonders geeignet.



**Bild 1:** Aufbau eines elektro-dynamischen [5] und elektromagnetischen Aktors

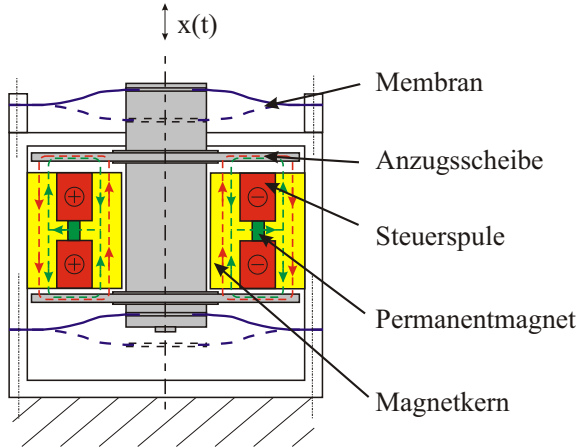
Eine Vielzahl industrieller Anwendungen fordert von der einzusetzenden Aktorik Stellkräfte im kN-, realisierbare Stellhübe im mm-Bereich und Stellfrequenzen bis ca. 250 Hz. Dieses Leistungsprofil muss kombiniert werden mit einer möglichst kompakten Bauweise und einer einfachen Systemcharakteristik. Für ein derartiges Anforderungsprofil sind elektromagnetische Aktoren, deren Wirkprinzip auf dem Reluktanz-Kraft-Prinzip basieren, besonders geeignet.

Da in vielen Anwendungen des Maschinenbaus bzw. der Verkehrstechnik Aktoren mit ausschließlich eindimensionaler Stellwirkung benötigt werden, soll innerhalb des vorliegenden Artikels ein am Lehrstuhl für Mechanik entwickelter entsprechender elektromagnetischer Aktor diskutiert werden. Das behandelte System weist sehr gute dynamische Eigenschaften auf (Stellkräfte im kN-Bereich und Stellfrequenzen bis ca. 500 Hz), die einerseits mit den geforderten Stellwegen im mm-Bereich und andererseits mit einer vom Stellweg unabhängigen und zum Spulenstrom linearen Stellkraft verknüpft werden. Ein weiteres besonderes Merkmal der entwickelten Aktorik ist die Realisierung der erforderlichen Vormagnetisierung durch starke Permanentmagnete. Dies führt zu einer Reduktion des zum Betrieb der Aktorik erforderlichen Energiebedarfs und zu einer wesentlichen Verminderung der durch eine elektrische Vormagnetisierung entstehenden Temperaturentwicklung.

## 2 Aufbau und Wirkungsweise der untersuchten Aktorik

Der Aufbau und die Wirkungsweise der untersuchten elektromagnetischen Aktoren sind gut in dem Bild 2 zu erkennen. Zwei Anzugsscheiben, die als magnetische Reaktionskörper dienen, sind fest mit einer in axiale Richtung beweglichen Stellachse verbunden und an den Kopfenden eines Magnettropfes positioniert. Die Stellachse ist wiederum durch zwei parallel zueinander geschalteten Membranfedern geringer Plattendicke radialstief gelagert, was zu einer nahezu reibungsfreien Führung der Stellachse führt.

In dem Magnettopf sind zwei Steuerspulen integriert, die miteinander durch eine Differenzschaltung verbunden sind, so dass zur Ansteuerung des Aktors ausschließlich eine Leistungselektronik eingesetzt wird. Die in dem elektromagnetischen Aktor zu einem



**Bild 2:** Prinzipskizze des elektromagnetischen Aktors

Ring angeordneten Permanentmagnete dienen der magnetischen Vorspannung des Systems und erzeugen eine starke Grunddurchflutung des magnetischen Kernmaterials. Bei Bestromung der Magnetspulen wird das Magnetfeld der Vormagnetisierung durch ein in das Material induziertes Steuermagnetfeld überlagert. Somit verstärken sich beide Magnetfelder in der einen Aktorhälfte, in der anderen schwächen sie sich gegenseitig ab, so dass eine Stellwirkung in Form einer Stellkraft erzeugt und damit die gewünschte Stellbewegung realisiert wird.

Aufgrund der hohen Vormagnetisierung lassen sich bei dem untersuchten Aktor Stellkräfte von bis zu  $\pm 1,5$  kN bei unausgelenkten Anzugsscheiben erzielen (der maximale Stellhub beträgt bei dem System 1 mm). Der massive Kern des Magnetaktors ist aus einem weichmagnetischen Material auf NiFe-Basis gefertigt, so dass Ummagnetisierungsverluste und Wirbelstromeinflüsse gerade bei höheren Frequenzen erheblich reduziert werden, um somit eine gute Stellkraftdynamik der diskutierten Aktorik für Stellfrequenzen bis ca. 500 Hz zu ermöglichen.

### 3 Modell des elektromagnetischen Aktors

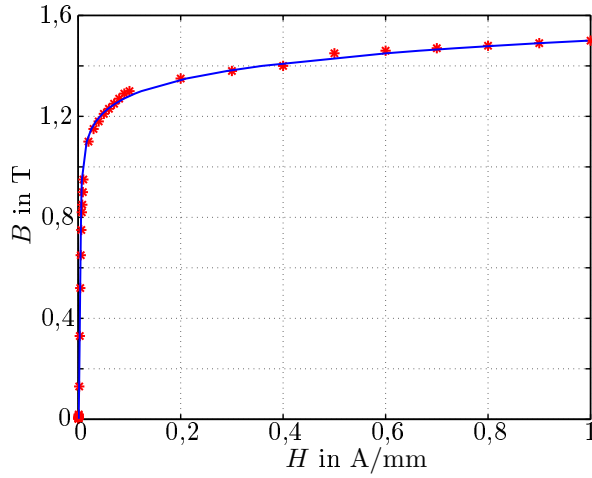
#### 3.1 Nichtlineare Magnetkraft

Das Kennfeld  $F_{Mag}(i, x)$  der Magnetkraft im quasi-statischen Zustand wird durch eine nichtlineare Funktion in Abhängigkeit der Ankerpositionen  $x_0 \pm x$  und der Steurdurchflutung  $\Theta = w \cdot i$  beschrieben. Hierbei entspricht  $x_0$  dem Ruheluftspalt zwischen einer Anzugsscheibe und dem Magnettopf im unausgelenkten Zustand,  $x$  der Verschiebung der Anzugsscheiben aus der mittigen Ruhelage,  $w$  der Anzahl der Windungen einer Steuer- spule und  $i$  dem Spulenstrom. Die Magnetkraft des Aktors ergibt sich nach

$$\begin{aligned}
 F_{Mag} &= F_{Mag,1} - F_{Mag,2} \\
 &= k_{\mu}(i, x)^2 \cdot k_1 \cdot \left\{ \frac{(k_2 (\Theta_{PM} + \Theta) \cdot (x_0 + x) + k_3 \cdot R_{PM} \Theta)^2}{(k_4 \cdot R_{PM} \cdot x_0 + k_5 \cdot (x_0^2 - x^2))^2} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{(k_2 (\Theta_{PM} - \Theta) \cdot (x_0 - x) - k_3 \cdot R_{PM} \cdot \Theta)^2}{(k_4 \cdot R_{PM} \cdot x_0 + k_5 \cdot (x_0^2 - x^2))^2} \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

aus der Differenz der zwei in Differenzschaltung miteinander gekoppelten Elektromagnete. Innerhalb dieser Gleichung beschreibt  $\Theta_{PM}$  die Grunddurchflutung durch den Ring aus Permanentmagneten,  $R_{PM}$  den magnetischen Widerstand der Permanentmagnete und die Parameter  $k_1$  bis  $k_5$  setzen sich aus geometrischen, elektrischen und magnetischen Kenngrößen zusammen, die das Systemverhalten der elektromagnetischen Aktorik beeinflussen. Der vom Steuerstrom und vom Stellweg abhängige Faktor  $k_{\mu}(i, x)$  berücksichtigt die Kommutierungskennlinie des verwendeten Kernmaterials. Dadurch ist es möglich, auftretende Sättigungseffekte und damit die durch das eingesetzte Material vorliegenden

physikalischen Grenzen der realisierbaren Magnetkräfte bei großen Aussteuerungen ausreichend genau zu modellieren. In Abbildung 3 ist die ungescherte Kommutierungskurve für das verwendete Kernmaterial dargestellt.



**Bild 3:** Kommutierungskurve des Kernmaterials: — Modell, \* Messwerte [6]

Die Aufmagnetisierung kann durch einen Polynomansatz für die magnetische Feldstärke  $H$  mit den beschreibenden Koeffizienten  $c_0$  bis  $c_2$  und  $n$  nach [7] in der Form

$$H = c_0 + c_1 \cdot B + c_2 \cdot B^n \quad (2)$$

formuliert werden. Der Einfluss der magnetischen Scherung wird gemäß [8] durch

$$H_{Sch} = H + \frac{x_0 \cdot B}{(l_K + x_0) \mu_0} \quad (3)$$

mit  $l_K$  für die mittlere Kernlänge und  $\mu_0$  für die magnetische Feldkonstante formuliert. Somit lässt sich die veränderliche relative Permeabilität  $\mu_r(H)$ , die eine Funktion der magnetischen Feldstärke ist, durch den Faktor  $k_\mu(i, x)$  mit

$$k_\mu(i, x) = \frac{B(i, x)}{B_{lin}(i, x)} = \frac{\mu_r(H)}{\mu_{r,max}} \quad (4)$$

berücksichtigen, wenn  $B_{lin}(i, x)$  die von Sättigungseffekten unbeeinflusste magnetische Induktion bei der als konstant angenommenen relativen Permeabilität  $\mu_{r,max}$  darstellt.

Die Gleichung (1) lässt sich schließlich in die nichtlineare Funktion

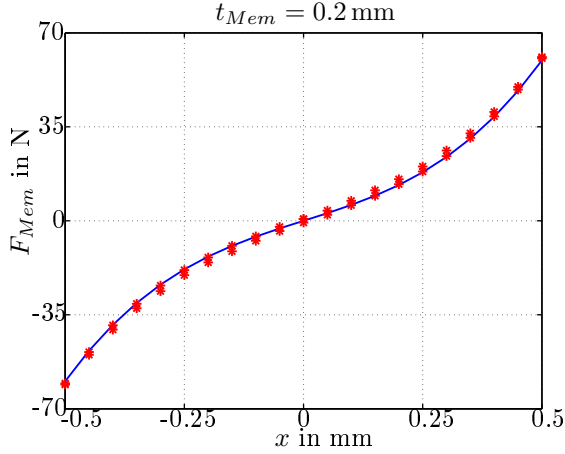
$$F_{Mag}(i, x) = k_i(i, x) \cdot i + k_x(i, x) \cdot x \quad (5)$$

überführen, in der die Faktoren  $k_i(i, x)$  und  $k_x(i, x)$  den Kraft-Strom-Faktor bzw. den Kraft-Stellweg-Faktor (die negative Steifigkeit des magnetischen Systems) zur Beschreibung der Magnetkraft bilden.

### 3.2 Einfluss der Membran-Rückstellkraft

Neben der eigentlichen Magnetkraft haben die zur radialsteifen Lagerung der Stellachse eingesetzten Membranfedern einen signifikanten Einfluss auf das Stellkraftverhalten des elektromagnetischen Aktors. Um die geforderten großen Stellwege realisieren zu können, werden Membranen geringer Plattendicke eingesetzt, was im Gegensatz zu Platten größerer Federsteifigkeit zu einem stärkeren nichtlinearen Verhältnis zwischen der Federkraft  $F_{Mem}$  und der Auslenkung  $x$  führt. Die Federkraft der eingesetzten Membranen lässt sich durch die Beziehung

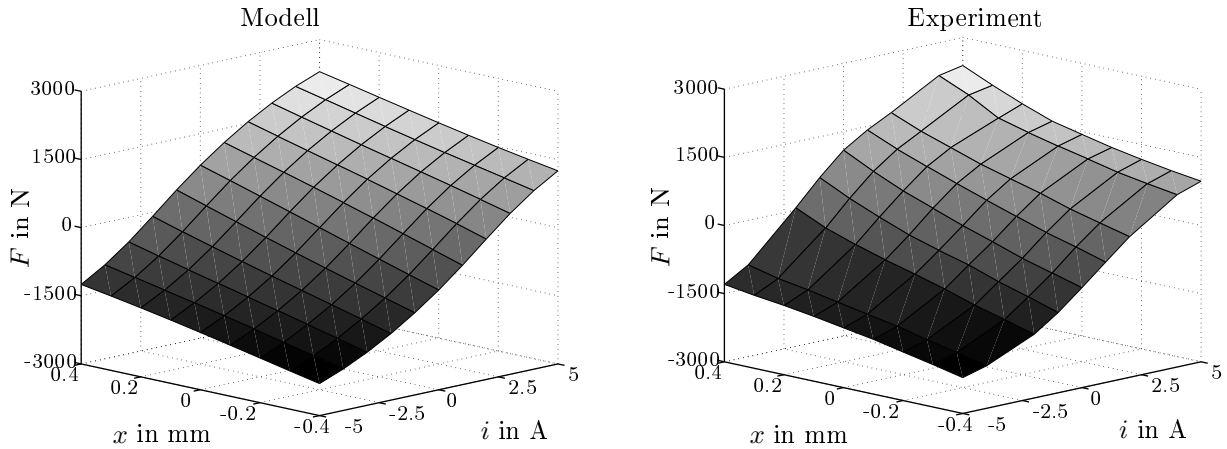
$$\begin{aligned} F_{Mem} &= \frac{E \cdot t_{Mem}^3}{(1 - \nu^2)} \cdot \left\{ a_1 + a_2 \cdot \left( \frac{x}{t_{Mem}} \right)^2 \right\} \cdot x \\ &= k_{Mem}(x) \cdot x \end{aligned} \quad (6)$$



**Bild 4:** Rückstellkraft der Membranfedern; — Modell, \* Experiment  
federn nach (6) zu

$$\begin{aligned}
 F(i, x) &= F_{Mag}(i, x) - F_{Mem}(x) \\
 &= k_i(i, x) \cdot i + [k_x(i, x) - k_{Mem}(x)] \cdot x \quad .
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

In Bild 5 ist das analytisch berechnete Stellkraftverhalten dem experimentell erfassten gegenübergestellt.



**Bild 5:**  $F(i, x)$ -Kennfeld des elektromagnetischen Aktors

### 3.3 Modellbildung der Dynamik des elektromagnetischen Aktors

Das dynamische Übertragungsverhalten der Aktorik ist vor allem geprägt durch die eingesetzte Leistungselektronik und den Ummagnetisierungsprozess innerhalb des Kernmaterials. Die Übertragungsfunktion  $G_L(s)$  des Leistungsverstärkers wird als  $PT_1$ -Glied modelliert, da die begrenzte Ausgangsspannung einen lastunabhängigen Betrieb des eingesetzten Verstärkers als ideale Stromquelle nicht zulässt. Die Dynamik der Magnetkraft  $G_{Mag}(s)$  ist durch den verzögerten Aufbau des Magnetfeldes und die materialimmanenten Ummagnetisierungsverluste des Kernmaterials gekennzeichnet und wird durch ein  $PT_1$ - und ein amplituden- und phasensenkendes Lag-Glied modelliert. Das Übertragungsverhalten des elektromagnetischen Aktors zwischen der Stellkraft des Aktors  $F(s)$  und der

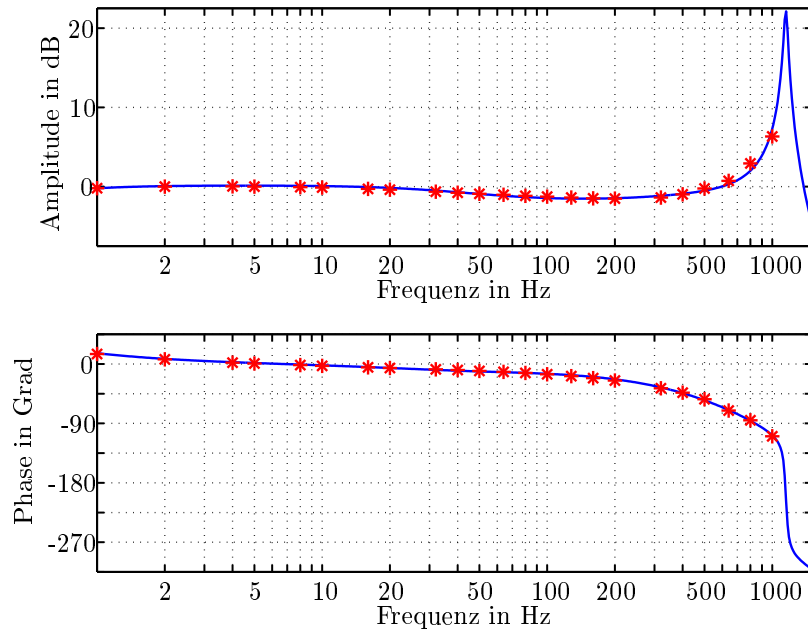
als eine Funktion in Abhängigkeit des Aktorstellweges  $x$ , des Elastizitätsmoduls  $E$ , der Plattendicke  $t_{Mem}$ , der Poisson-Zahl  $\nu$  und der geometrischen Konstanten  $a_1$  und  $a_2$  formulieren. Entsprechend des konstruktiven Aufbaus der elektromagnetischen Aktoren erhält man für zwei parallel zueinander geschalteten Membranfedern den in Bild 4 grafisch aufgetragen und experimentellen Ergebnissen gegenübergestellten funktionalen Zusammenhang nach Gleichung (6).

Die Stellkraft des elektromagnetischen Aktors resultiert somit aus der Überlagerung der Magnetkraft gemäß Gleichung (5) und der entgegengerichteten Rückstellkraft der Membranfedern

Eingangsspannung  $U(s)$  des Leistungsverstärkers setzt sich somit zu

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{F(s)}{U(s)} = G_{Mag}(s) \cdot G_L(s) \\
 &= \frac{k_i}{1 + s \cdot T_{Mag}} \cdot \frac{1 + s \cdot T_{Z,Mag}}{1 + s \cdot T_{N,Mag}} \cdot \frac{k_L}{1 + s \cdot T_L}
 \end{aligned} \tag{8}$$

zusammen. Der Parameter  $k_L$  stellt den proportionalen Übertragungsfaktor des Leistungsverstärkers,  $T_{Mag}$ ,  $T_{Z,Mag}$ ,  $T_{N,Mag}$  und  $T_L$  die Zeitkonstanten des Magnetisierungsprozesses und der Leistungselektronik dar. Zur Beschreibung des in Bild 6 dargestellten experimen-



**Bild 6:** Übertragungsverhalten  $G_{erw}(s)$  des elektromagnetischen Aktors: – Modell, \* Experiment

tell aufgenommenen Übertragungsverhaltens des elektromagnetischen Aktors wird die in Gleichung (8) formulierte Funktion nach

$$G_{erw}(s) = G_P(s) \cdot G_V(s) \cdot G(s) = \frac{s \cdot T_P}{1 + s \cdot T_P} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_{V,1} + (s \cdot T_{V,2})^2} \cdot G(s). \tag{9}$$

noch durch ein Hochpass-Glied mit der Zeitkonstante  $T_P$  und ein  $PT_2$ -Element mit den Zeitkonstanten  $T_{V,1}$  und  $T_{V,2}$  erweitert. Das Hochpass-Glied berücksichtigt hierbei die Dynamik des zur Kraftmessung eingesetzten Piezo-Sensors und dessen Ladungsverstärkers und das  $PT_2$ -Glied beschreibt den Einfluss der Versuchsstand-Dynamik auf die Messung ab ca. 600 Hz.

#### 4 Optimierung des Stellkraftverhaltens

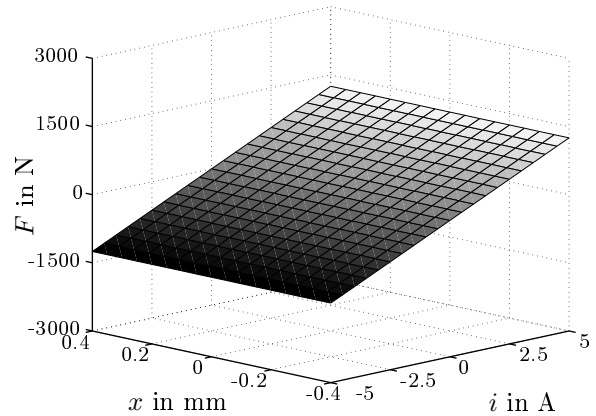
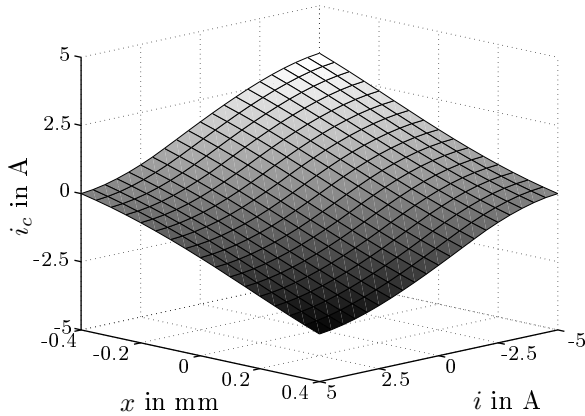
Der Einsatz starker Permanentmagnete führt zu einer großen negativen Systemsteifigkeit des elektromagnetischen Aktors, was eine schlechte Regelbarkeit zur Folge hat. Darüber hinaus werden von Seiten der Anwender Aktoren gefordert, die zu einem Eingangssignal eine proportionale Stellkraft erzeugen und unabhängig von der Auslenkung der Anzugs-scheibe sind. Ein derartiges Verhalten kann grundsätzlich durch zwei unterschiedliche

Strategien erzielt werden. Auf der einen Seite lässt sich das gewünschte Verhalten durch entsprechend optimierte und robust ausgelegte Regelalgorithmen erzielen, auf der anderen Seite ist dies mit Hilfe einer entsprechend ausgelegten Vorsteuerung möglich, die eine aktive Kompensation der negativen Systemsteifigkeit und nichtlinearen Effekte bewirkt. Der Vorteil der zweiten Methode liegt darin, dass durch die Kompensationssteuerung ein System geschaffen wird, das für sich ein lineares Stellkraftverhalten aufweist, dadurch mit linearen klassischen Regelkonzepten behandelt werden kann und der Kompensationsalgorithmus wiederum nicht von der späteren Applikation des Aktors und der dafür benötigten Reglerstrukturen abhängig ist. Daher wird innerhalb dieser Arbeit der zweite Lösungsweg besprochen. In [9] wurde die angesprochene Methode in Anlehnung an die Arbeiten von [10] erfolgreich auf Systeme mit permanentmagnetischer Vormagnetisierung übertragen. Dabei stützten sich die Untersuchungen auf empirische Zwischenergebnisse, die zur Umsetzung des Kompensationsverfahrens eingesetzt wurden.

Innerhalb dieses Beitrags wird zur Optimierung des Stellkraftverhaltens der elektromagnetischen Aktorik ein Kompensationsstrom  $i_c(i, x)$  errechnet und dem gewünschten Steuerstrom  $i$  aufgeschaltet. Der Strom  $i_c(i, x)$ , aufgetragen in Bild 7, teilt sich gemäß

$$\begin{aligned} i_c(i, x) &= i_{c,x}(i, x) + i_{c,nlin}(i, x) \\ &= -\frac{k_x(i, x) - k_{Mem}(x)}{k_i(i, x)} \cdot x + \frac{k_i^* - k_i(i, x)}{k_i(i, x)} \cdot i \end{aligned} \quad (10)$$

auf in eine Komponente  $i_{c,x}(i, x)$ , die der Kompensation der negativen Systemsteifigkeit dient und in eine zweite ( $i_{c,nlin}(i, x)$ ), die zur Linearisierung des von dem Steuerstrom abhängigen Stellkraftverhaltens eingesetzt wird. Durch Einsetzen der Gleichung (10) in



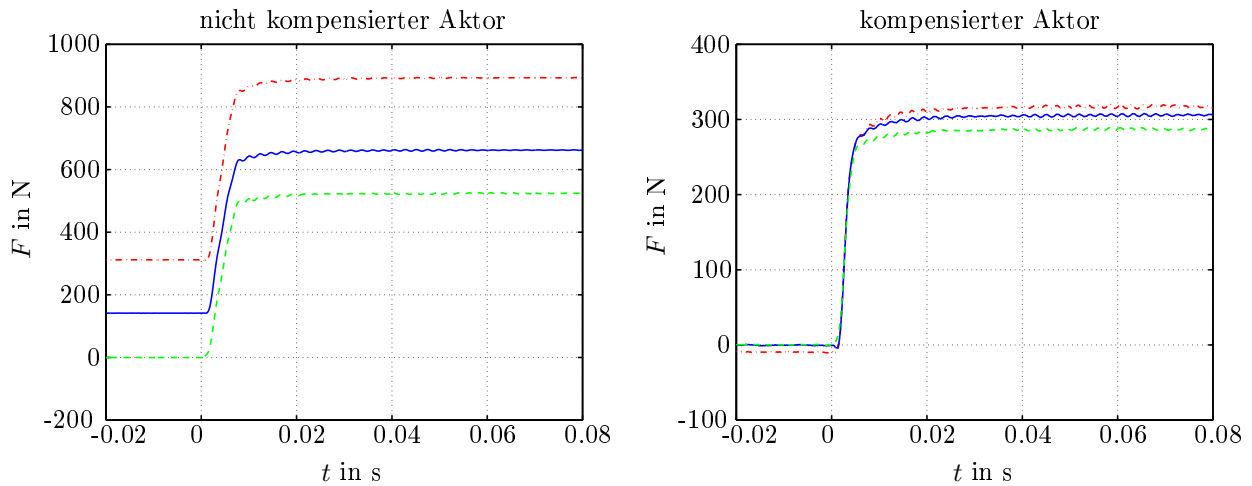
**Bild 7:** Kennfeld des Kompensationsstroms **Bild 8:** Kompensiertes Stellkraft-Kennfeld

die Berechnungsvorschrift (5) erhält man für den quasi-statischen Fall das gewünschte stromproportionale und wegunabhängige Stellkraftverhalten gemäß

$$F = k_i(i, x) \cdot (i + i_c(i, x)) + [k_x(i, x) - k_{Mem}(x)] \cdot x = k_i^* \cdot i,$$

das in Bild 8 dargestellt ist. Die experimentelle Verifikation zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der durchgeführten Kompensationssteuerung ist in Bild 9 dargestellt.

In einem weiteren Schritt wird die Dynamik der Magnetkraft kompensiert, so dass der elektromagnetische Aktor innerhalb eines anvisierten Frequenzbereichs bis ca. 500 Hz ein

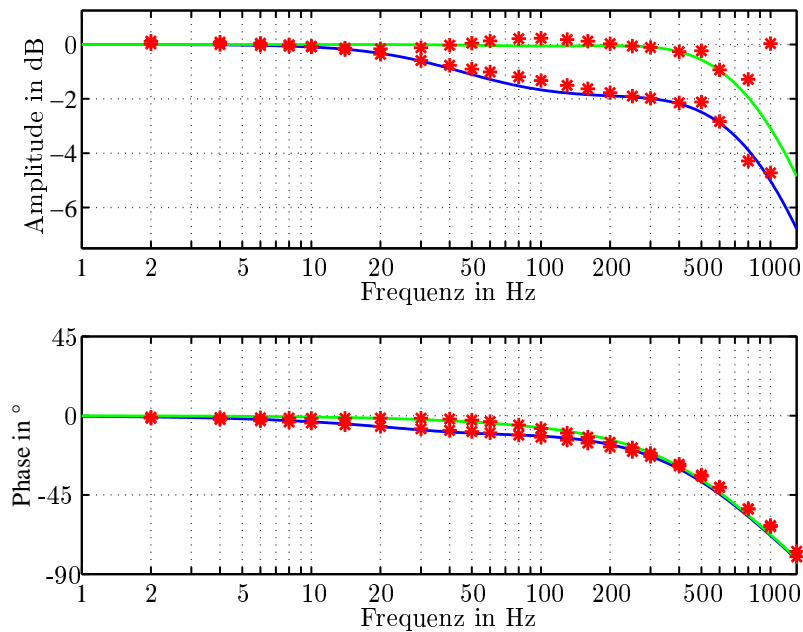


**Bild 9:** Sprungantworten; ---  $x = 0,3 \text{ mm}$ , -  $x = 0 \text{ mm}$ , - -  $x = -0,3 \text{ mm}$

nahezu proportionales Übertragungsverhalten aufweist. Hierzu wird dem Kompensationsfeld  $i_c(i, x)$  noch das Übertragungsglied

$$G_c(s) = \frac{1 + s \cdot T_{N, Mag}}{1 + s \cdot T_{Z, Mag}} \quad (11)$$

vorgesaltet, das den Amplitudenabfall für Frequenzen ab 20 Hz kompensiert. In Abbildung 10 ist das dynamische Übertragungsverhalten des elektromagnetischen Aktors mit und ohne Kompensation dargestellt.



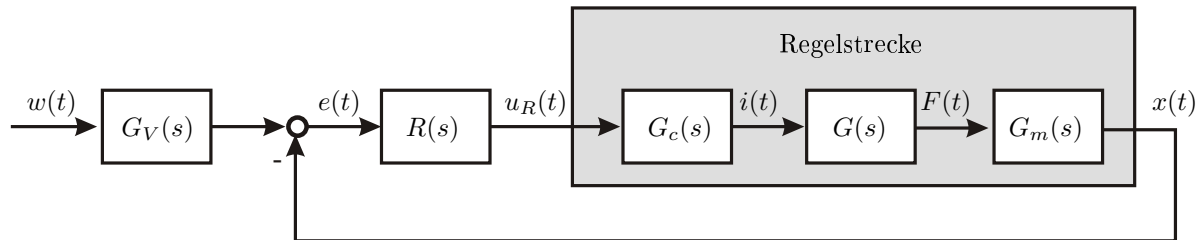
**Bild 10:**  $G(s)$  der Stellkraft des elektromagnetischen Aktors; - Modell des Inertialsystems, - Modell mit kompensierter Dynamik, \* Experiment

## 5 Erprobung der Einsatzfähigkeit der optimierten Aktorik

Die untersuchte Aktorik befindet sich zur Zeit noch im Prozess der Erprobung. Daher soll

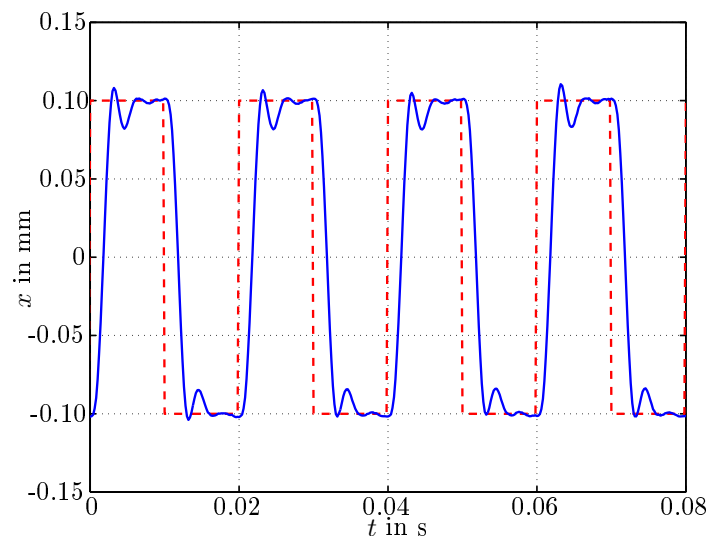


innerhalb dieses Beitrags ausschließlich ein erster Test des elektromagnetischen Aktors aus dem Bereich der aktiven Schwingungsanregung vorgestellt werden. Hierzu wird eine Masse  $m$  auf den Aktor befestigt und einem Vorgabesignal mit der Form einer Rechteckschwingung (Frequenz  $f = 50 \text{ Hz}$ ) nachgeführt. Diese Untersuchung lehnt sich an ein industrienahes Applikationsbeispiel aus dem Bereich der Siebmaschinen-Industrie an.



**Bild 11:** Regelkreis zur Umsetzung einer definierten Schwingungsanregung

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde ein Leistungsverstärker mit einer maximalen Ausgangsspannung von  $\pm 40 \text{ V}$  für eine lastunabhängige Stromsteuerung eingesetzt. Die Stabilisierung des elektromagnetischen Aktors erfolgt mit Hilfe eines klassischen  $PDT_1$ -Reglers, so dass der geschlossene Regelkreis das Übertragungsverhalten eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems annimmt. Dem geschlossenen Regelkreis wird darüber hinaus ein Übertragungsglied  $G_V(s)$  zur Vorverstärkung vorgeschaltet, das die gewünschte Übertragungscharakteristik  $G_{ges}(s)$  zwischen der Sollvorgabe  $w(t)$  und der Auslenkung  $x(t)$  des elektromagnetischen Aktors prägt. In Bild 12 ist die Antwort  $x(t)$  des geregelten Systems der Sollvorgabe  $w(t)$  gegenübergestellt.



**Bild 12:** Vergleich Systemanregung (---)/-antwort (—) des geregelten Aktors für eine definierte Schwingungsanregung

## 6 Zusammenfassung

Aktoren realisieren den zielorientierten Energietransfer und nehmen dadurch eine Schlüsselposition innerhalb eines aktiven Systemeingriffs ein. In vielen Applikationen des allgemeinen Maschinenbaus aber auch der Verkehrstechnik weist hierbei der Einsatz elektromagnetischer Aktoren Vorteile gegenüber Systemen mit anderen Wirkprinzipien auf.

Aus diesem Grund wurde am Lehrstuhl für Mechanik ein elektromagnetischer Aktor, dessen magnetische Vorspannung durch einen Ring aus starken Permanentmagneten realisiert wurde, entwickelt. Den Vorteilen, höhere Stellkräfte und die Vormagnetisierung ohne zusätzliche Leistungselektronik erzielen zu können, das darüber hinaus noch begleitet wird von einer geringen Temperaturentwicklung, steht zunächst der Nachteil einer schlechten Regelbarkeit gegenüber. Diese kann mit Hilfe einer gezielten Kompensation der negativen Systemsteifigkeit eliminiert werden. Darüber hinaus wird mit einer entsprechenden Vorsteuerung der nichtlineare Zusammenhang zwischen der Magnetkraft und dem Steuerstrom linearisiert und die Dynamik der Magnetkraft für Stellfrequenzen bis 500 Hz derart berücksichtigt, dass ein stromproportionales Stellkraftverhalten des elektromagnetischen Aktors erzielt wird. Das Systemverhalten der optimierten Aktorik ist somit leicht regelbar und lässt sich mit klassischen linearen Regelalgorithmen behandeln, was innerhalb der Erprobung der Einsatzfähigkeit der diskutierten Aktorik exemplarisch gezeigt wurde.

### Literatur

1. Eberhard, G.; et al: Aktive Schwingungskompensation im Kfz. Adaptronic Congress 2000, Potsdam, Deutschland, 2000, 57-62.
2. Genesseeaux, A.: A New Generation of Engine Mounts. In: SAE – Society of Automotive Engineers, SAE-paper no. 951296, 1996, 511-518.
3. Sauer, W.; Krug, P.E.: Aktive Systeme zur Aggregatlagerung im PKW. In: VDI-Berichte Nr. 1416, Düsseldorf: VDI, 1998, pp. 617-629.
4. Jendritza, D.J.: Technischer Einsatz neuer Aktoren – Grundlagen, Werkstoffe, Designregeln und Anwendungsbeispiele. Band 484, Renningen-Malmsheim: expert, 1995.
5. N.N.: Continental Performance - Technologies for the Future. Informationsbroschüre der CONTINENTAL AG, Hannover, Deutschland, 1998.
6. N.N.: Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge. Informationsbroschüre der VAC VACUUMSCHMELZE GmbH, Hanau, Deutschland, 1998.
7. Eckhardt, H.: Numerische Verfahren in der Energietechnik. Stuttgart: Teubner, 1978.
8. Boll, R.: Weichmagnetische Werkstoffe - Einführung in den Magnetismus, VAC-Werkstoffe und ihre Anwendungen. 4., völlig neu überarb. und erw. Aufl., Berlin, München: Siemens-Aktiengesellschaft, [Abt. Verl.], 1990.
9. Oberbeck, C.; Ulbrich, H.: Active Compensation of the Eigen-Dynamics of Electromagnetic Actuators by ECU-Based Non-linear Feedback Control. Proceedings of the 7th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich (CH), 2000, pp. 425-430.
10. Hoffmann, K.-J.; Laier, D.; Markert, R.; et al: Integrated Active Magnetic Bearings. Proceedings of the 6th International Symposium on Magnetic Bearings, Cambridge (USA), 1998, pp. 256-265.