

Application Potential of Magnetic Field Driven Actuators

H. Janocha

Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA), Universität des Saarlandes,
Im Stadtwald, D-66123 Saarbrücken (Germany)

Abstract

Most of the magnetic field driven actuators can be classified as electromagnetic, electrodynamic, magnetostrictive or magnetorheological. While the first two mentioned have been known for a long time and are widely distributed, the actuators of the latter two groups have been gaining importance only in the last few years. In this paper the principle, design and structure of magnetostrictive and magnetorheological actuators are presented. Typical examples illustrate their application potential which is clarified further by comparing the properties of their dual alternatives, namely the electrostrictive/piezoelectric and the electrorheological actuators. Finally, the often little considered aspect of interaction with the controlling power amplifier is briefly touched upon.

Keywords: Magnetostrictive actuator; magnetorheological fluid; power amplifier; piezoelectric actuator; electrorheological fluid

1 Introduction

Viele bekannte Aktoren basieren auf Kraftwirkungen im magnetischen Feld. Hierbei werden vor allem zwei physikalische Effekte genutzt: Die Kraft auf stromdurchflossene Leiter, wobei das Magnetfeld entweder von einem Permanentmagnet oder von einem anderen stromdurchflossenen Leiter erzeugt wird (elektrodynamische Aktoren), und die Kraft auf Grenzflächen zwischen Werkstoffen mit unterschiedlicher Permeabilität (elektromagnetische Aktoren). Für beide Prinzipien gibt es seit vielen Jahrzehnten zahlreiche Aktorrealisierungen und -anwendungen, beispielsweise in Form von Elektromotoren und Hubmagneten.

Der vorliegende Aufsatz befasst sich mit zwei weiteren, weniger bekannten Möglichkeiten zur Nutzung von Kraftwirkungen im Magnetfeld, nämlich mit dem magnetostruktiven und dem magnetorheologischen Effekt. Beide basieren auf neueren Ergebnissen der Materialforschung, und seit etwa 10 Jahren wird verstärkt daran gearbeitet, entsprechende Aktoren auf dem Markt zu etablieren. Die Eigenschaften und das Einsatzpotential solcher Aktoren werden im Folgenden vorgestellt. Damit wird der interessierte Leser in die Lage versetzt, die Leistungsfähigkeit von realisierten Aktoren dieser Spezies zu beurteilen, aber auch eigene Ideen und Konzepte in sinnvolle Entwürfe umzusetzen.

2 Aktoren mit hochmagnetostruktiven Werkstoffen

Aus Anwendersicht ist der magnetostriktive Effekt das magnetische Gegenstück zum bekannteren, indirekten piezoelektrischen Effekt. Beide Festkörpereffekte ermöglichen die Erzeugung von großen Kräften mit hoher Dynamik.

2.1 *Physikalischer Effekt*

Wird ein ferromagnetischer Kristall magnetisiert, so tritt mit wachsender Feldstärke eine Formänderung des magnetisierten Kristalls auf. Diese Erscheinung wird als magnetostriktiver Effekt bezeichnet. Der wichtigste Anteil der Magnetostriktion ist der 1842 entdeckte Joule-Effekt. Er basiert darauf, dass die sogenannten Weisschen Bezirke sich in die Magnetisierungsrichtung drehen und ihre Grenzen verschieben. Hierdurch erfolgt eine Formänderung des ferromagnetischen Körpers, wobei sein Volumen konstant bleibt. Mit der Bezeichnung magnetostriktiver Effekt ist gewöhnlich dieser Effekt gemeint, da die Volumenänderung der gängigen hochmagnetostriktiven Werkstoffe in ihrer Wirkung vernachlässigt werden kann. Nachfolgend soll hier in Übereinstimmung zum vorherrschenden Sprachgebrauch unter dem Begriff magnetostriktiver Effekt der Joule-Effekt verstanden werden. Obwohl die Magnetostriktion genau genommen als magnetisches Gegenstück zum – quadratischen – elektrostriktiven Effekt aufzufassen ist, erfolgt ihre mathematische Beschreibung in praxi durch ein Gleichungssystem, das formal mit den – linearen – Zustandsgleichungen für den direkten bzw. indirekten Piezoeffekt übereinstimmt.

2.2 *Werkstoffe*

Der magnetostriktive Effekt, der bei Legierungen mit den Bestandteilen Eisen, Nickel oder Kobalt Dehnungen im Bereich von 10 bis 30 $\mu\text{m}/\text{m}$ verursacht, erreicht in hochmagnetostriktiven Werkstoffen aus Seltenerdmetall-Eisen-Legierungen Werte bis zu 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ab Anfang der sechziger Jahre wurden in den USA hochmagnetostriktive Werkstoffe für den Einsatz in Unterwassersonaren entwickelt. Das dort später gefundene Material, Terfenol-D, hat eine vielfach höhere Energiedichte als piezoelektrische Werkstoffe. Terfenol-D ist der Name für die Verbindung $\text{Tb}_{0,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_2$. Die beiden ersten Silben stehen für Terbium und für Ferrum, die dritte erinnert an den Ort der Werkstoff-Entwicklung: Naval Ordnance Laboratory. Das D sagt aus, dass zur Minimierung der Anisotropieenergie das Element Dysprosium benutzt wird.

In Tabelle 1 sind einige Kenngrößen und –werte für Terfenol-D, dem heute am häufigsten verwendeten Werkstoff für magnetostriktive Wandler, zusammengestellt. Hochmagnetostriktive Materialien verhalten sich phänomenologisch analog zu den Ferroelektrika. So weist ihre Kennlinie $S(H)$, ähnlich wie die Abhängigkeit $S(E)$ von Piezokeramik, Sättigung und Hysterese auf, vgl. Bild 1 (H , E : magnetische bzw. elektrische Feldstärke; S : Dehnung). Interessant ist, dass die erzielbare Dehnung S offenbar auch von der mechanischen Vorspannung T_v des Materials abhängt: Sie nimmt mit wachsendem T_v zunächst zu und hat bei ungefähr $T_v = 17 \text{ MPa}$ ein Maximum, um dann wieder abzufallen. Dieses Verhalten, das – allerdings schwächer ausgeprägt – auch bei Piezokeramiken beobachtet wird, spielt für die optimale Auslegung von magnetostriktiven Wandlern eine Rolle.

Zu beachten ist, dass ähnlich wie bei den piezoelektrischen Materialien auch bei den realen ferromagnetischen Werkstoffen noch weitere physikalische Effekte auftreten, die sich bei Aktoranwendungen auswirken können. Beispielsweise werden bei zeitlich veränderlicher magnetischer Erregung im magnetostriktiven Werkstoff Wirbelströme induziert. Die dadurch erzeugte elektrische Wirkleistung im Werkstoff wird in Wärme umgesetzt und führt so zu einer

thermischen Dehnung. Um den Werkstoff auch für höherfrequente Anwendungen einsetzen zu können, kann man das aktive Material z. B. schichten, um die Wirbelstromverluste zu reduzieren.

Bekannt ist auch, dass die Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes sich unter Torsionsbeanspruchung (Matteucci-Effekt) ändert. Unabhängig von der Tordierichtung nimmt die Magnetisierung mit wachsender Torsion zunächst zu und fällt dann wieder ab. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass keine ungewollten Torsionsspannungen in den hochmagnetostriktiven Werkstoff eingeleitet werden dürfen. Dies muss durch geeignete konstruktive Vorkehrungen beim Aufbau des Wandlers gewährleistet werden.

2.3 *Design von Aktoren mit hochmagnetostriktiven Werkstoffen*

Im Gegensatz zu piezoelektrischen Wandlern, bei denen unterschiedliche Effekte genutzt werden (Longitudinal-, Transversal-, Schereffekt), spielt bei den heute verfügbaren, ausschließlich stabförmigen Hochmagnetostriktions-Werkstoffen lediglich der Longitudinaleffekt eine Rolle (Feldrichtung und Dehnungsrichtung verlaufen parallel).

2.3.1 Mechanischer Aufbau

Beim Konzipieren von Wandlern mit hochmagnetostriktiven Werkstoffen sind einige grundsätzliche Punkte zu berücksichtigen:

- Sofern die Auslenkung sowohl positiv als auch negativ sein soll, muss das Material mechanisch vorgespannt und vormagnetisiert werden. Letzteres erfolgt mit Hilfe von Permanent- oder Elektromagneten.
- Die maximal zulässige Druckbelastung ist erheblich größer als die Zugbelastung. Diese Eigenschaft erfordert bei entsprechenden Anwendungen ebenfalls eine mechanische Vorspannung.
- Aus der $S(H)$ -Kennlinie ist ersichtlich, dass die maximalen Dehnungen von der mechanischen Vorspannung T_v abhängen. Um bis zu 50 % höhere Dehnungen zu erzielen, muss das Material einer optimalen Vorspannung unterworfen werden.

Eine variable Druckvorspannungseinstellung ermöglicht eine einfache Anpassung des Wandlers an die mechanischen Randbedingungen der Anwendung. Die Vorspannung des Terfenolstabes kann z. B. durch Schraubenfedern oder Tellerfedern bewirkt werden.

Als weiterer Einfluss auf die Wandlerfunktion ist die Temperatur zu berücksichtigen. Erfährt der Terfenolstab eine Temperaturänderung von beispielsweise 100 K, so liegt die thermische Dehnung des Stabes in der gleichen Größenordnung wie die Magnetostriktion. Mit Hilfe von Konstruktionsprinzipien, die aus dem Geräte- und Maschinenbau bekannt sind („thermodynamisches Gleichgewicht“), lassen sich solche thermischen Längenänderungen kompensieren.

2.3.2 Magnetischer Kreis

Der magnetische Kreis besteht aus dem Terfenolstab, der Erregerspule, der Flussführung und den Permanentmagneten. Die Flussführung aus hochpermeablem, elektrisch nicht leitendem

Material (Wirbelströme!) reduziert den magnetischen Streufluss und erhöht so die mittlere magnetische Feldstärke im Terfenol-D und sorgt für eine möglichst homogene Feldverteilung. Mit Hilfe der Permanentmagnete kann man eine Vormagnetisierung erzeugen, wodurch der Wandler negativ und positiv angesteuert werden kann und die Kupferverluste verringert werden.

Da die Permeabilität von Terfenol klein ist ($\mu_r < 10$), dieser Werkstoff also nur über einen mäßigen magnetischen Leitwert verfügt, hat die Führung des Magnetflusses großen Einfluss auf die Feldverteilung im Terfenolstab. Bild 2 zeigt verschiedene Möglichkeiten der Flussführung. Bild 3 präsentiert einige auf dieser Basis per FEM-Rechnung erzeugte Ergebnisse []: Die mittlere normierte magnetische Feldstärke bei vollständiger Flussführung beträgt für alle berechneten Spulenaußenradien nahezu 100 % (Bild 3a). Ohne Flussführung fällt die mittlere normierte Feldstärke bereits bei $r_{\text{coil}}/r_{\text{Ter}} \approx 5$ auf 80 % ab (Bild 3a), wobei die mittlere normierte Feldinhomogenität für alle $r_{\text{coil}}/r_{\text{Ter}}$ ca. 10 % beträgt (Bild 3b).

Aufgrund dieser ungünstigen Feldverteilung muss in der Praxis immer eine Flussführung vorgesehen werden. Ist aufgrund spezieller Anforderungen eine vollständige Flussführung nicht möglich, so kann die Verwendung von hochpermeablen Polschuhen an den beiden Spulenden die mittlere normierte magnetische Feldstärke auf ca. 90 % erhöhen (Bild 3a) und die Feldinhomogenität mit steigendem Außenradius r_{coil} bis unter 1 % gesenkt werden (Bild 3b). Eine nähere Betrachtung zeigt außerdem [], dass die vollständige Flussführung eine Reduzierung der Kupferverluste in der Feldspule um den Faktor drei bewirkt.

Im Allgemeinen sind die magnetischen Eigenschaften eines gegebenen Dauermagnetwerkstoffes, d. h. seine Koerzitivfeldstärke und seine Permeabilität unveränderlich und können nicht direkt an den magnetischen Kreis angepasst werden. Man kann jedoch durch eine schichtweise Anordnung von Magnetwerkstoff und hochpermeablem Flussführungsmaterial einen „Ersatzmagneten“ konstruieren, dessen Ersatzkoerzitivfeldstärke in weiten Bereichen einstellbar ist. Damit lässt sich der magnetische Widerstand des Dauermagneten an die magnetischen Widerstände des Terfenolstabes und der Flussführung anpassen und das Volumen des verwendeten Magnetwerkstoffes minimieren.

Eine nähere Betrachtung zeigt, dass lediglich die drei in Bild 4 dargestellten Möglichkeiten zur Anordnung von Terfenolstab, Spule und Permanentmagnet sinnvoll sind. Bei der Anordnung MTC führt die Forderung nach einem hinreichend hohen statischen Magnetfeld im Terfenolstab (maximal ca. 80 kA/m) auf einen Außendurchmesser des Terfenol-Hohlstabs von mindestens 13 bis 20 mm; diese Mindestabmessung schränkt die Anwendung der MTC-Anordnung so stark ein, dass sie nur in besonderen Fällen genutzt werden kann.

Die TMC-Anordnung darf nicht über eine vollständige Flussführung verfügen, da diese zwar eine gute magnetische Kopplung der Spule bewirkt, jedoch gleichzeitig den Dauermagneten magnetisch kurzschließt. Bei der TCM-Anordnung dienen die Polschuhe und der Magnet als vollständige Flussführung. Eine zusätzliche Flussführung würde auch hier den Dauermagneten magnetisch kurzschließen und ist deshalb nicht sinnvoll. Für beide Anordnungen wurde das statische und dynamische Magnetfeld unter vereinfachenden Annahmen berechnet []. Aus dem Ergebnis folgt, dass die TCM-Anordnung der TMC-Anordnung bis auf eine Ausnahme gleichwertig oder überlegen ist: Sie besitzt eine wesentlich geringere Feldinhomogenität, weniger Kupferverluste und eine gute Kopplung des magnetischen Wechselfeldes. Lediglich die Kopplung des statischen Magnetfeldes ist bei der TMC-Anordnung geringfügig besser. Hieraus ist zu folgern, dass die TCM-Anordnung bevorzugt verwendet werden sollte.

2.4 Anwendungsbeispiele

Wandler für schwere Lasten

Bild 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die wichtigsten technischen Daten eines kommerziellen magnetostriktiven Energiewandlers, der im Rahmen eines europäischen Verbundprojektes entwickelt worden ist []. Der Terfenolstab wird durch Permanentmagnete vormagnetisiert und über Tellerfedern mechanisch vorgespannt, so dass bipolarer Betrieb möglich ist. Der robuste Aufbau prädestiniert diesen Wandler für industrielle Anwendungen in den Bereichen Feinpositionierung von schweren Lasten und aktive Schwingungsdämpfung.

Die bei der aktiven Schwingungsdämpfung mittels Festkörperaktoren benötigten hohen Leistungen können durch Verstärkerkonzepte mit Energierückgewinnung reduziert werden, vgl. Abschnitt 4.2. Hierbei wird beim Feldabbau die im Wandler gespeicherte Energie in den Leistungsverstärker zurückgeführt, um für den anschließenden Feldaufbau zur Verfügung zu stehen. Auf diese Weise wird das Versorgungsnetz entlastet, also der Aktor-Gesamtwirkungsgrad erhöht.

Schallwandler

Das elektromechanische Ersatzschaltbild eines Piezowandlers entspricht näherungsweise einem elektromechanischen Schwingkreis hoher Güte. Ein großes Anwendungsfeld von Piezowandlern betrifft daher die Schallerzeugung, wobei die Schwingfrequenz von den Abmessungen der Wandler abhängt und durch elektrische und mechanische äußere Beschaltung abgestimmt werden kann. Auf diese Weise lässt sich ein Frequenzbereich vom oberen Ultraschall (Ultraschall-Hochleistungsreiniger) bis hinunter zu hörbaren Frequenzen (Piezo-Hochtöner) abdecken.

Für magnetostriktive Wandler gelten analoge Überlegungen, wobei sich hier aufgrund der geringeren Schallgeschwindigkeit im magnetostriktiven Material Frequenzen bis hinunter in den Sonarbereich ökonomisch erzielen lassen. Die erste Entwicklung mit einem magnetostriktiven Wandler war deswegen ein Unterwasser-Sonar, bei dem die abgegebene Schalleistung höher als bei vergleichbaren Aufbauten mit konventionellen Aktoren war. Butler und Ciosek [5.19] haben einen Unterwasser-Ultraschallwandler in Form eines achteckigen Ringes mit ca. 25 cm Durchmesser realisiert (vgl. Bild 6), der durch 16 Terfenolstäbe angetrieben wird (je 2 Stäbe mechanisch parallel). Er liefert bei einer Eigenfrequenz von 775 Hz eine Ausgangsschalleistung von max. 350 W.

Ventilantrieb

Der größtmögliche Hub von Festkörperwandlern erfolgt im Großsignalbetrieb. Dann machen sich außer dem nichtlinearen Übertragungsverhalten im dynamischen Betrieb auch hysteresenabhängige innere Wärmeverluste bemerkbar. Aus diesem Grund ist die maximale Arbeitsfrequenz der Wandler bei Vollaussteuerung auf wenige hundert Hertz beschränkt; einzelne Schaltvorgänge können jedoch unterhalb einer Millisekunde ausgeführt werden. Diese Werte liegen weit oberhalb der Grenzen konventioneller Aktoren, daher sind schnell schaltende Ventile ein wachsendes Einsatzgebiet für Festkörperwandler.

Ein zur Zeit mit hohem Entwicklungsaufwand realisierter Anwendungsbereich sind Einspritzventile für Verbrennungsmotoren auf der Basis von Piezowandlern. Bild 7a zeigt als Alternative das Prinzip eines solchen Antriebs mit magnetostruktivem Wandler. Der Einspritzdruck beträgt ca. 1500 bar. Neben der hohen Stellkraft ist hier das wichtigste Kriterium für den Einsatz von Festkörperwandlern, dass der Einspritzverlauf nahezu beliebig geformt werden kann. Der in Bild 7b dargestellte Verlauf führt zu einer besser optimierbaren Verbrennung im Motor und reduziert Kraftstoffverbrauch und Geräuschemissionen. Da die Ansteuerung der Ventile von der Motorelektronik kontrolliert werden kann, ist eine Anpassung der Verlaufsformung an jeden Arbeitspunkt des Motors realisierbar.

2.5 Vergleich zwischen piezoelektrischen und magnetostruktiven Wandlern

Die übereinstimmende formal-analytische Beschreibung des magnetostruktiven und des piezoelektrischen Effektes legt einen anwenderbezogenen Vergleich der wesentlichen Werkstoffeigenschaften nahe. Wandler mit diesen Werkstoffen haben

- Maximaldehnungen im Promillebereich,
- große Kräfte bis in den Kilonewtonbereich,
- Reaktionszeiten im Mikro- bis Millisekundenbereich,
- hohe elektromechanische Wirkungsgrade.

Da beide Werkstoffe spröde sind, können sie schlecht spanend bearbeitet werden. Für Aktoranwendungen können auch die folgenden Unterschiede wichtige Entscheidungskriterien darstellen.

- Die Curietemperatur des magnetostruktiven Werkstoffes ist mit 380°C höher als bei Piezokeramik (165 bis 300 °C), d. h. er kann bei höheren Temperaturen betrieben werden. Im Unterschied zur Piezokeramik verschwinden die magnetostruktiven Eigenschaften nur so lange, bis der Curie-Punkt wieder unterschritten wird.
- Die Energiedichte in hochmagnetostruktiven Werkstoffen ist wesentlich größer als in Piezomaterialien. Die Folge ist, dass man für den Bau leistungsstarker Aktoren weniger aktives Material benötigt. Dieser Vorteil wird allerdings durch den Platzbedarf für die Erregerspule und magnetische Flussführung teilweise zunichte gemacht.
- Bei Piezowandlern wird das elektrische Feld zwischen Metallelektroden aufgebaut, die unmittelbar auf der Keramikoberfläche appliziert sein müssen (Quellenfeld); das Erregerfeld für den magnetostruktiven Wandler dagegen ist ein Wirbelfeld und kann durch eine Erregerspule oder einen Permanentmagneten „abseits des aktiven Werkstoffes“ erzeugt werden.
- Die Stromsteuerung von magnetostruktiven Wandlern vermeidet hohe Spannungen, allerdings können größere Ströme als bei Piezowandlern auftreten. (Hohe Induktionsspannungen beim Schalten des Magnetfeldes werden mit Hilfe von Freilaufdioden abgebaut).
- Im Vergleich zu magnetostruktiven Werkstoffen ist die Variantenvielfalt handelsüblicher Piezokeramiken wesentlich größer. Außerdem kann von unterschiedlichen Effekten (longitudinal, transversal) Gebrauch gemacht werden, während bei der Magnetostruktion für aktorische Anwendungen zur Zeit nur der Transversal-Mode genutzt wird.

- Piezowandler können ihre statische Auslenkung nahezu ohne Zuführung elektrischer Energie beibehalten, für eine statische Auslenkung von magnetostriktiven Wandlern ist dagegen eine Vormagnetisierung mit Gleichstrom oder Permanentmagneten erforderlich. Bei höheren Frequenzen im Großsignalbetrieb führen die hystereseabhängigen Verluste in der Piezokeramik zu einer starken Erwärmung, diese ist bei magnetostriktiven Wandlern aufgrund der geringeren Hysterese weniger ausgeprägt.

Heute werden heute noch überwiegend Piezowandler eingesetzt, die fertig konfektioniert in einer großen Typenvielfalt kommerziell angeboten werden. Für magnetostriktive Aktoren gibt es dagegen nur wenige Lieferanten, die den magnetostriktiven Werkstoff in einigen Formen und Abmessungen anbieten. Darüber hinaus sind magnetostriktive Werkstoffe zur Zeit wesentlich teurer als Piezokeramiken.

3 Aktoren mit magnetorheologischer Flüssigkeit

Elektrorheologische und magnetorheologische Fluide, also Flüssigkeiten, deren Fließwiderstand durch elektrische und magnetische Felder kontinuierlich gesteuert werden kann, sind schon seit etwa 1945 bekannt, hatten anfangs aber noch eine Reihe von anwendungstechnischen Nachteilen.

3.1 *Physikalischer Effekt*

Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRFs) sind Suspensionen feiner magnetisierbarer Teilchen in einer niederpermeablen Basisflüssigkeit. Unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes ändert sich neben den magnetischen, elektrischen, thermischen, akustischen und optischen Eigenschaften insbesondere das rheologische Verhalten der Suspensionen. Der Fließwiderstand nimmt mit wachsender magnetischer Flussdichte erheblich zu. Die suspendierten Partikel bilden dann magnetische Dipole, die sich entlang der magnetischen Feldlinien ausrichten, in Wechselwirkung zueinander stehen und Ketten und Agglomerate entlang der magnetischen Feldlinien bilden. Diese Ketten sind mechanisch belastbar und bewirken die Ausbildung einer Fließgrenze und die Zunahme des Fließwiderstandes. Dieser magnetorheologische Effekt wurde erstmals Ende der 40er Jahre von Rabinow beschrieben. Der Prozess ist stufenlos einstellbar und reversibel, d. h. nach Abschalten des magnetischen Feldes kehren die Teilchen wieder in ihre ursprüngliche, statistische Verteilung zurück. Die Schaltzeiten für die Strukturänderungen liegen im Bereich einiger Millisekunden.

Die Bildung der Strukturen und die damit verbundene Änderung des Fließwiderstandes unterscheidet MRFs von Ferrofluiden, die ebenfalls aus winzigen magnetisierbaren Teilchen in einer Basisflüssigkeit bestehen. Im Gegensatz zu MRFs bilden die Partikel in einem Ferrofluid keine mechanisch belastbaren Strukturen. Der Fließwiderstand bleibt nahezu unabhängig vom Magnetfeld. Unter Beibehaltung des geringen Fließwiderstandes werden die Teilchen und somit das ganze Ferrofluid durch die magnetischen Kräfte in das Magnetfeld gezogen.

3.2 *Werkstoffe*

MRFs bestehen aus den suspendierten magnetisierbaren Teilchen, der Basisflüssigkeit und dem Stabilisator. Die Teilchen besitzen einen Durchmesser zwischen $1\mu\text{m}$ und $10\mu\text{m}$ mit einer Dichte von etwa 7 g/cm^3 . Sie bestehen häufig aus Carbonyleisen-Legierungen und können

einen Anteil von bis zu 60 % Gewicht an der Suspension besitzen. Als niederpermeable Basisflüssigkeit werden meistens Silikon- oder Mineralöle verwendet. Die Basisflüssigkeit sollte eine geringe Viskosität besitzen und über einen weiten Temperaturbereich stabil sein. Die dritte Komponente, der Stabilisator, soll ein Sedimentieren der Partikel und Teilchenkoagulation verhindern. Die Dichte der gesamten Suspension liegt im Bereich von 3 g/cm³ bis 4 g/cm³.

Neben den MRFs basierend auf Mikrometerteilchen gibt es auch MRFs mit Teilchen, die einen Durchmesser von nur 30 nm besitzen. Die Partikel dieser Nano-MRFs bestehen aus Ferrit und besitzen einen Anteil von etwa 60 % Gewicht an der Suspension. Die Dichte der Nano-MRF beträgt ca. 2 g/cm³. Aufgrund der sehr geringen Teilchengröße ist die Nano-MRF äußerst sedimentationsstabil und besitzt eine in der Praxis vernachlässigbare Abrasivität.

Die Basisviskosität der üblichen Suspensionen beträgt bei Raumtemperatur mehrere hundert mPas. Eine Erhöhung der Schubspannung kann durch einen größeren Volumenanteil der Teilchen oder bei gleichem Volumenanteil der Partikel durch die Verwendung größerer Teilchen erreicht werden. Beides ist allerdings mit einem drastischen Anstieg der Basisviskosität und somit einer Abnahme des MR-Effektes verbunden.

MR-Suspensionen sind superparamagnetisch, d. h. ideal weichmagnetisch. Sie besitzen eine Sättigungsmagnetisierung und eine von der magnetischen Feldstärke abhängige Permeabilität. Ihr magnetisches Verhalten ist hysteresefrei. Die übertragbare Schubspannung t nimmt mit wachsender magnetischer Flussdichte B_{MRF} zunächst nach einem Potenzgesetz zu; bei mittleren magnetischen Induktionen ergibt sich eine lineare Zunahme, vgl. Bild 8a. Nähert sich die magnetische Flussdichte der Sättigungsmagnetisierung (je nach MRF-Typ bis 0,8 T), wird die Zunahme der Schubspannung immer geringer. Die mit einer MRF maximal übertragbare Schubspannung wird durch die Sättigungsmagnetisierung beschränkt; daher können MR-Suspensionen mit Teilchen aus Carbonyleisen deutlich höhere Schubspannungen (bis etwa 100 kPa) übertragen als Nano-MRF (bis ca. 7 kPa).

MR-Suspensionen bilden im magnetischen Steuerfeld eine Fließgrenze t_γ aus, verursacht durch die kettenförmige Anordnung der suspendierten Partikel. Ohne Steuerfeld verhalten sich ideale MRF wie newtonsche Flüssigkeiten, d. h. unter Scherung hängt die Schubspannung t linear von der Scherrate D ab, vgl. Bild 8.b. Unter dem Einfluss eines Steuerfeldes haben sie die Eigenschaften eines Bingham-Körpers, die Fließgrenze nimmt mit wachsender Steuerfeldstärke zu. Bei Strömung entsteht ein Plateau identischer Strömungsgeschwindigkeit (Pfropfenströmung). Die Breite des Pfropfens nimmt mit wachsender Steuerfeldstärke zu; reicht er über die gesamte Kanalbreite, fließt kein Volumenstrom mehr.

3.3 *Design von MRF-Energiewandlern*

Die anfangs geringe Reproduzierbarkeit der MRF-Eigenschaften, die starke Sedimentation der Teilchen und die hohe Abrasivität standen lange Zeit einer technischen Entwicklung magnetorheologischer Anwendungen im Weg. In den letzten Jahren wurden allerdings insbesondere in den USA und in Deutschland MR-Suspensionen entwickelt, die sich neben einem großen MR-Effekt durch eine wesentlich verbesserte Sedimentationsstabilität und eine geringere Abrasivität auszeichnen. Da diese Flüssigkeiten großtechnisch hergestellt werden können, wurde im Laufe der 90er Jahre eine Vielzahl von Ideen entwickelt, wie der MR-Effekt in Energiewandlern genutzt werden kann, z. B. in Kupplungen, Stoß- und Schwingungsdämpfern, Motorlagern.

Ein magnetorheologischer Energiewandler besteht aus dem mechanischen Aufbau sowie dem magnetischen Kreis (MRF, Spule, Flussführung und eventuell Dauermagnete). Ausgangspunkt beim Design des MRF-Energiewandlers sind die Vorgaben der mechanischen Anwendung, z. B. die geforderten Minimal- und Maximalkräfte und das maximale Bauvolumen. Weitere Bedingungen ergeben sich aus der Art der Anwendung, z. B. maximaler elektrischer Leistungsbedarf, Reaktionszeit, und den Umgebungsbedingungen, z. B. dem Betriebstemperaturbereich.

3.3.1 Wandlerprinzipien

Für Energiewandler mit MRF existieren drei Wirkprinzipien, die kombiniert oder einzeln auftreten können: Scherungsmodus, Strömungsmodus und Quetschmodus. Bei MRF-Energiewandlern befindet sich die Flüssigkeit in einem Spalt der magnetischen Flussführung. Die Feldlinien des magnetischen Steuerfeldes verlaufen senkrecht zur Scherungs-/Strömungsrichtung der Flüssigkeit. Die Wirkprinzipien von MRF-Energiewandlern sind in Bild 9 dargestellt. Im Scherungsmodus bewegen sich die parallel angeordneten Platten relativ zueinander, und durch das Magnetfeld kann die übertragbare Kraft bzw. ein Moment gesteuert werden. Der Scherungsmodus kommt insbesondere in Kupplungen und Bremsen, aber auch in elektrisch einstellbaren Dämpfern zum Einsatz. Beim Strömungsmodus fließt die MRF durch einen Spalt in der magnetischen Flussführung. Das Steuerfeld beeinflusst den Fließwiderstand der MRF und damit den Druckabfall über einem solchen Ventil. MRF-Ventile benötigen keine bewegten mechanischen Teile. Sie werden insbesondere in Stoß- und Schwingungsdämpfern und in Hydrauliksystemen mit der MRF als hydraulischem Medium eingesetzt. Beim Quetschmodus ändert sich der Abstand zwischen zwei parallelen Platten und eine Quetschströmung tritt auf. In diesem Modus können vergleichsweise hohe Kräfte aufgebracht werden, er eignet sich insbesondere zur Dämpfung von Schwingungen mit geringen Schwingungsamplituden bis zu einem Millimeter und hohen dynamischen Kräften (z. B. in Werkzeugmaschinen).

3.3.2 Magnetische Auslegung

Bei MRF-Energiewandlern ist der wesentliche Parameter für die Ansteuerung das in der magnetorheologischen Flüssigkeit wirkende Feld B_{MRF} . Weil die mit einer MRF maximal übertragbare Schubspannung durch ihre Sättigungsmagnetisierung begrenzt ist, sollte der maximale B_{MRF} -Wert am Beginn magnetischer Sättigungseffekte in der MRF liegen.

Zu beachten ist, dass B_{MRF} von der jeweiligen MRF abhängt. Soll ein Vergleich von MRFs untereinander vorgenommen werden, muss für jeden MRF-Typ gesondert der magnetische Kreis berechnet werden bzw. B_{MRF} in Abhängigkeit vom Steuerstrom der Spule bestimmt werden. Für einen Vergleich unterschiedlicher MRF-Typen bezüglich einer spezifischen Anwendung muss in den meisten Fällen eine rheologische und magnetische Auslegung des Energiewandlers für jeden MRF-Typ erfolgen, da die rheologischen Eigenschaften der MRF die Geometrie des Arbeitsraumes der MRF in dem Energiewandler bestimmen, wodurch der magnetische Kreis wesentlich beeinflusst wird.

Um ein kompaktes Design des magnetischen Kreises zu erzielen, muss die Flussführung unterhalb ihrer magnetischen Sättigung betrieben werden. Dann wird der magnetische Widerstand des Kreises nahezu ausschließlich durch die Arbeitsräume der MRF bestimmt, da MRFs eine Permeabilitätszahl $\mu \leq 10$ haben. Dieser Wert ist von gleicher Größenordnung wie

derjenige für Terfenol; somit können die Aussagen und Ergebnisse von Abschnitt 2.9.2 (einschließlich der Bilder 2 bis 4) sinngemäß übernommen werden. Zu berücksichtigen ist, dass die magnetischen Feldlinien, die im Arbeitsraum der MRF senkrecht zur Scherungsrichtung verlaufen sollten.

Mit Hilfe von Dauermagneten kann der Arbeitspunkt des MRF-Energiewandlers eingestellt und gleichzeitig die elektrische Ansteuerleistung bzw. das Bauvolumen der Spule drastisch reduziert werden. Die Querschnittsfläche der Permanentmagneten sollte dazu einen ähnlichen Flächeninhalt wie die Querschnittsfläche der MRF-Spalte besitzen. Die Reaktionszeit eines MRF-Energiewandlers wird wesentlich von der Induktivität des magnetischen Kreises bestimmt. Eine Reduzierung der Induktivität kann durch die Auslegung der Spule für hohe Stromdichten erreicht werden. Allerdings führt dieses zu einem Anstieg der elektrischen Ansteuerleistung.

3.3.3 Rheologische Auslegung

Kupplungen und Bremsen

MRF-Kupplungen werden im Scherungsmodus aufgebaut. Sind beide Scherungsflächen, die den Arbeitsraum der MRF begrenzen, aus hochpermeablem Material gefertigt, so ist eine stärkere Haftung der Teilchenstrukturen im magnetischen Feld an den Scherungsflächen gewährleistet. Dadurch sind die erzielbaren Schubspannungen deutlich höher als bei nicht magnetischen Scherungsflächen. Durch eine Oberflächenrauheit, die das zwei- bis dreifache des Radius der suspendierten Teilchen beträgt, kann bei niedrigen magnetischen Flussdichten eine weitere Zunahme der von der MRF übertragenen Kräfte erzielt werden, [1].

MRF-Kupplungen und Bremsen im Scherungsmodus können nach zwei unterschiedlichen Bauformen realisiert werden: Scheibenkupplung und zylindrische Kupplung [1]. Die Scheibenkupplung besitzt im Vergleich zur zylindrischen Kupplung ein geringeres Bauvolumen und Gewicht, das durch eine Auslegung der Kupplung auf geringere maximale Induktionen in der MRF weiter reduziert werden kann. Auch die elektrische Ansteuerleistung der Scheibenkupplung nimmt dadurch ab. Zu beachten ist bei der Scheibenkupplung allerdings, dass bei hohen Drehzahlen der Kupplung und niedrigen Magnetfeldern die suspendierten Teilchen aus den MRF-Spalten nach außen wandern, wodurch in den Spalten eine Verarmungszone an Partikeln entsteht.

Dämpfer für größere Schwingungsamplituden

Dämpfer mit MRF für größere Schwingungsamplituden werden überwiegend im Strömungsmodus aufgebaut, wobei das MRF-Ventil entweder im Kolben oder bei Doppelrohrdämpfern im Bypass integriert ist. Bei der Auslegung der MRF-Ventile muss insbesondere bei hohen Kolbengeschwindigkeiten eine ausreichende Verweildauer der suspendierten Teilchen im magnetischen Feld des MRF-Ventils beachtet werden. Ist die Verweildauer wesentlich größer als die Reaktionszeit der MRF auf Änderungen des magnetischen Feldes, ergibt sich mit zunehmender Kolbengeschwindigkeit eine deutliche Zunahme der Dämpfungskraft. Ist die Verweildauer der MRF-Partikel im Ventil aufgrund der geringen Ventillänge bzw. der hohen Strömungsgeschwindigkeit geringer als die Reaktionszeit, ist die Dämpfungskraft nahezu unabhängig von der Kolbengeschwindigkeit des Dämpfers. Mit Hilfe der Ventillänge kann aber auch gezielt ein bestimmtes Verhalten des Dämpfers in Abhängigkeit von der Kolbengeschwindigkeit eingestellt werden, z. B. nimmt die

Dämpfungskraft bei geringen Kolbengeschwindigkeiten zunächst mit wachsender Geschwindigkeit zu, um bei hohen Geschwindigkeiten in einen nahezu konstanten Bereich überzugehen [].

Dämpfer für geringe Schwingungsamplituden

Dämpfer für geringe Schwingungsamplituden werden insbesondere bei hohen Kraftamplituden bevorzugt im Quetschmodus aufgebaut. Aufgrund der geringen Schwingungsamplituden zeigen Dämpfer im Quetschmodus häufig ein viskoelastisches Verhalten. Die elastischen Schwingungsanteile bewirken u. a. eine Abnahme der vom Dämpfer dissipierten Energie. Eine Reduzierung der elastischen Schwingungsanteile kann durch eine der Dämpferbewegung angepasste elektrische Ansteuerung erfolgen. Ein möglicher Einsatzbereich von Quetschströmungsdämpfern sind Werkzeugmaschinen, bei denen die mit hoher Kraftamplitude auftretenden Resonanzüberhöhungen verringert werden können.

3.4 Anwendungsbeispiele

Kupplungen und Bremsen

Die Lord Corp. vertreibt kommerziell eine Scheibenbremse auf Basis einer magnetorheologischen Flüssigkeit. Im Vergleich zu Wirbelstrombremsen stellt die MRF-Bremse bereits bei geringen Drehraten ein hohes Bremsmoment zur Verfügung, das in einem weiten Bereich unabhängig von der Drehzahl über den Steuerstrom einstellbar ist. Der konstruktive Aufbau und das erzeugte Bremsmoment M in Abhängigkeit vom Steuerstrom I sind in Bild 10 dargestellt. Die beiden Spalte zwischen Gehäuse und Bremscheibe sind mit MRF gefüllt, und das von der Spule erzeugte magnetisch Feld verläuft senkrecht zur Scherungsrichtung durch die MRF. Die Bremse besitzt den Außendurchmesser $d = 92$ mm und erfordert eine maximale Steuerleistung von etwa $P = 10$ W bei einem maximalen Steuerstrom $I = 1$ A. Sie setzt eine mechanische Leistung von maximal $P_w = 700$ W in Wärme um. Durch geringe konstruktive Änderungen kann diese Bremse zu einer Scheibenkupplung modifiziert werden. Ein möglicher Anwendungsbereich von MRF-Kupplungen ist in Kraftfahrzeugen die Kraftübertragung zu Nebenaggregaten des Motors, z. B. Generator, Lüfterrad. So kann erreicht werden, dass der Generator unabhängig von der Drehzahl des Motors immer im Drehzahlbereich mit dem höchsten Wirkungsgrad betrieben wird.

Schwingungsdämpfer

Die Lord Corp. realisierte einen Schwingungsdämpfer für Fahrersitze in großen Lkw bzw. Arbeitsfahrzeugen, die abseits befestigter Straßen eingesetzt werden [3]. Der steuerbare Schwingungsdämpfer dient zur Entkopplung des Fahrersitzes vom Chassis des Fahrzeugs s. Bild 11a. Das Gehäuse des Dämpfers besitzt eine Länge von 100 mm und einen Durchmesser von 35 mm. Der maximale Federweg beträgt etwa 50 mm, und es können Dämpfungskräfte von über 2000 N aufgebracht werden. Zur elektrischen Einstellung der Dämpfereigenschaften wird ein MRF-Ventil benutzt, insgesamt sind etwa 50 ml MRF in dem Dämpfer enthalten. Das Dämpfungsverhalten dieses Systems beschreibt Bild 11b. Ohne elektrische Ansteuerung wird nur die schwache Grunddämpfung wirksam, was zu einer deutlichen Resonanzüberhöhung bei 2,5 Hz und einer guten Schwingungsisolierung bei Frequenzen $f > 4$ Hz führt. Durch eine sehr harte Dämpfung lässt sich die Resonanzüberhöhung nahezu eliminieren, allerdings hat das eine schlechtere Schwingungsisolierung bei Frequenzen $f > 6,5$ Hz zur Folge. Eine adaptive Schwingungsdämpfung wird möglich, wenn der MRF-Dämpfer in Abhängigkeit von der

Fahrsituation elektrisch angesteuert wird: Die hohen Amplituden der Resonanzschwingungen werden gedämpft, und die gute Schwingungsisolation bei Frequenzen $f > 4$ Hz bleibt erhalten.

3.5 Vergleich zwischen ERF- und MRF-Aktoren

Elektorrheologische Flüssigkeiten (ERFs), die ebenfalls seit den 40er Jahren bekannt sind, zeigen ähnliche rheologische Eigenschaften wie MRFs. Während MRFs auf Magnetfelder reagieren, ändert sich bei ERFs der Fließwiderstand unter dem Einfluss elektrischer Felder. Die elektrische Feldstärke zur Ansteuerung von ERFs beträgt üblicherweise einige kV/mm. Der ER-Effekt ist ebenfalls reversibel, und die Reaktionszeiten der ERFs auf Änderungen des elektrischen Feldes liegen gleichfalls bei wenigen Millisekunden.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen ERF- und MRF-Aktoren folgen aus ihren jeweiligen Wechselwirkungen mit elektrischen und magnetischen Feldern:

- ERF-Aktoren sind spannungsgesteuert und stellen für die Leistungselektronik ohmsch-kapazitive Lasten dar; sie benötigen hohe Spannungen (einige Kilovolt) bei geringem Stromfluss (wenige mA). MRF-Aktoren dagegen sind stromgesteuert; zur Ansteuerung der Feldspulen genügen Spannungen bis ca. 10 V und Ströme bis ca. 2 A. Die maximale Ansteuerleistung vergleichbarer ERF-/MRF-Energiewandler ist bei Temperaturen < 80 °C ähnlich und liegt im Bereich von einigen Watt.
- Bereits geringe Mengen an Fremdkörpern oder eingeschlossene Luftblasen können zu einer Verschlechterung der ERF-Eigenschaften führen oder einen elektrischen Durchbruch in der ERF bewirken. Bei einem elektrischen Durchbruch bilden sich Verbrennungsrückstände auf den Elektroden, welche die ERF verunreinigen. Die Durchschläge stellen hohe Anforderungen an die Kurzschlussfestigkeit der Ansteuerelektronik. MRF reagieren wesentlich unempfindlicher auf Verunreinigungen. Beide Flüssigkeiten sind allerdings hygroskopisch und sollten daher vor Luftfeuchtigkeit geschützt werden, da diese eine Neigung zur Partikelkoagulation bewirkt.
- Die Basisviskosität bei Raumtemperatur gängiger ERFs ist mit unter hundert mPas geringer als bei den meisten MRFs, hierdurch verursachen ERFs in Hydraulikkreisläufen deutlich geringere Strömungsverluste als MRFs. Allerdings sind die mit einer MRF übertragbaren Schubspannungen um bis zu einer Größenordnung höher als bei ERFs. Mit ERFs können Schubspannungen bis etwa 10 kPa übertragen werden, während bei MRFs mit Mikrometerteilchen bereits Schubspannungen von 100 kPa gemessen wurden.
- Die elektrische Leitfähigkeit der ERF steigt mit wachsender Temperatur exponentiell an. Dadurch ergibt sich in vielen Anwendungen (z.B. Kupplungen, Bremsen, Dämpfer im Scherungsmodus) eine obere Temperaturgrenze nicht aus der chemischen Stabilität der ERF, sondern durch die hohe elektrische Ansteuerleistung des ERF-Energiewandlers. Ein vergleichbares Verhalten ist bei MRFs nicht vorhanden. Gängige MRFs können bis zu Temperaturen von 150 °C und höher eingesetzt werden.
- Mit Hilfe von Permanentmagneten lässt sich bei MRF der Arbeitspunkt des Aktors (ein bestimmter Fließwiderstand) ohne elektrischen Leistungsaufwand einstellen. Eine Aussteuerung um diesen Arbeitspunkt herum kann mit Hilfe von Elektromagneten vorgenommen werden, die das Feld des Permanentmagneten stärken oder schwächen. Eine

vergleichbare Möglichkeit zur Einstellung des Arbeitspunktes ohne elektrische Leistung gibt es bei ERF-Aktoren nicht.

- Energiewandler mit ER-Suspensionen müssen gegebenenfalls mit mittelwertfreien elektrischen Wechselfeldern angesteuert werden, da sich ansonsten der Effekt der Elektrophorese bemerkbar macht: Bei Ansteuerung einer ER-Suspension mit elektrischen Gleichfeldern über einen längeren Zeitraum wandern die Partikel je nach Oberflächenladung zur Elektrode mit höherem oder niedrigerem elektrischen Potential. Es entstehen eine Zone sehr hoher Teilchenkonzentration und eine Verarmungszone, wodurch eine deutliche Abnahme des ER-Effektes bewirkt wird.
- In ERFs können weiche Teilchen mit einer deutlich geringeren Dichte als bei den in MRFs eingesetzten Eisen- oder Ferritteilchen suspendiert werden. Dadurch kann bei ER-Suspensionen eine Reduzierung der Abrasivität bei niedriger Sedimentationsneigung und geringer Basisviskosität erzielt werden. Sogenannte homogene ERFs, bei denen eine Zunahme der dynamischen Viskosität im elektrischen Feld erfolgt, zeigen sogar weder Sedimentation noch Abrasivität; allerdings ist bei ihnen der ER-Effekt geringer.

Generell können sowohl MRF als auch ERF in Aktoren mit steuerbaren Flüssigkeiten eingesetzt werden. Die Entscheidung für eine der beiden Möglichkeiten ergibt sich aus den Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls, d. h. die zu realisierende Aktorlösung mit ihren Randbedingungen führt auf den einzusetzenden Flüssigkeitstyp.

4. Leistungsverstärker

Generell lassen sich die bekannten schaltungstechnischen Verstärkervarianten in die beiden Gruppen analoge und schaltende Leistungsverstärker unterteilen, vgl. Tabelle 2. Allgemein haben analoge Verstärker eine höhere Signalgüte, wogegen schaltende Verstärker regelungstechnisch robuster sind und die Möglichkeit der Blindenergie-Rückgewinnung offerieren. Eine Energierückgewinnung ist theoretisch auch mit einem analogen Konzept möglich, jedoch nur mit unwirtschaftlich hohem Aufwand. Da Aktoren in der Mehrzahl der Fälle unipolar betrieben werden, kommen vor allem Verstärkerkonzepte in Betracht, die in der Lage sind, asymmetrisch und mit der unteren Grenzfrequenz Null zu arbeiten.

4.1 Analoge Leistungsverstärker

Die große Verlustleistung von Klasse-A-Verstärkern wird in Kauf genommen, um die sehr hohe Signalgüte (Kleinsignalgrenzfrequenz bis über 100 kHz zu nutzen. Bei höheren Dauerleistungen (> 60 W) oder extrem großen Pulsleistungen (bis 16 kW) ist die Klasse-C-Technik mit Kleinsignalgrenzfrequenzen bis über 40 kHz der geeignete Kompromiss.

Da der magnetostruktive Effekt eine Funktion der magnetischen Feldstärke ist, werden zur Ansteuerung magnetostruktiver Aktoren spannungsgesteuerte Stromquellen oder –senken verwendet. Diese werden je nach Anforderungen und Aufbau des Aktors (z. B. mit oder ohne magnetischen Bias) als Viertel-, Halb- oder Vollbrückenschaltung ausgeführt. Auch hier kann zwischen Klasse-A und Klasse-C gewählt werden.

Tabelle 2

4.2 Leistungsverstärker

Schaltende Leistungsverstärker unterscheiden sich von analogen dadurch, dass die Leistungstransistoren nicht als kontinuierlich arbeitendes Stellglied für Strom oder Spannung dienen, sondern als binär angesteuerte Schalter. Damit ist jedoch eine genaue und direkte Signalverlaufsformung nicht mehr ohne weiteres möglich, denn die Ströme und Spannungen ergeben sich aus den festen Werten der verwendeten passiven Bauelemente und aus den Schaltzeiten.

Schaltende Konzepte ohne Energierückgewinnung verlagern die Wärmeleistung von analog angesteuerten aktiven Bauteilen auf robustere passive Elemente (Widerstände) und können so bezüglich der elektrischen und thermischen Dimensionierung der Transistoren Vorteile gegenüber der Analogtechnik bieten. Da die zulässige Betriebstemperatur passiver Elemente meistens höher ist als die von Halbleitern, können der Kühlaufwand und somit die Herstellungskosten reduziert werden.

Bei schaltenden Konzepten mit Energierückgewinnung wird ein zusätzliches Bauteil zur Energiespeicherung (bei Piezoaktoren eine Spule) oder die Aktorblindkomponente selbst (bei magnetostriktiven oder magnetorheologischen Aktoren) verwendet. Die Ausführung eines solchen Verstärkers lässt sich als bidirektionales Schaltnetzteil für variable Eingangs- bzw. Ausgangsspannungen beschreiben. Die erreichbare Energieeinsparung ist neben anderen Faktoren auch von der Signalform abhängig und liegt bei ca. 80 bis 90 % gegenüber einer analogen Steuerung.

Figures and Tables

- Fig. 1. Kennlinienverlauf $S(H)$ für den hochmagnetostriktiven Werkstoff Terfenol-D bei unterschiedlicher mechanischer Vorspannung T_v .
- Fig. 2. Möglichkeiten zur Führung des magnetischen Flusses. **a** Ohne Flussführung. **b** Mit Polschuben. **c** Mit vollständiger Flussführung.
- Fig. 3. Feldverläufe bei unterschiedlicher Flussführung gemäß Fig. 2 ($l_{\text{Ter}}/r_{\text{Ter}} = 25$). **a** z-Komponente \bar{h}_z der mittleren normierten Feldstärke. **b** Mittlere relative Feldinhomogenität $d|h^p/h$ [].
- Fig. 4. Sinnvolle Anordnungen von terfenol rod (T), field coil (C) und permanent magnet (M) (Polschuhe nicht dargestellt).
- Fig. 5. Construction of magnetostrictive actuator for heavy loads [].
- Fig. 6. Prinzipieller Aufbau eines Unterwasser-Schallwandlers [].
- Fig. 7. Injection valve with magnetostrictive actuator. **a** Valve design. **b** Forming of the injection progression [].
- Fig. 8. Kennlinienverläufe der MRF DEA 252. **a** Schubspannung T als Funktion der Flussdichte B_{MRF} in der MRF. **b** Schubspannung t als Funktion der Scherrate D mit B_{MRF} als Parameter [].
- Fig. 9. Wirkprinzipien von MRF-Energiewandlern. **a** Shear mode. **b** Flow mode. **c** Squeeze mode.
- Fig. 10. MRF-Bremse **a** Prinzipieller Aufbau **b** Abhängigkeit des Bremsmoments M vom Steuerstrom I im Drehzahlbereich $200 \text{ min}^{-1} < n < 1000 \text{ min}^{-1}$
- Fig. 11. MRF-Dämpfer für Fahrersitze. **a** Aufbau des Systems. **b** Amplitudengang der Schwingung []
- Table 1. Einige Kennwerte des hochmagnetostriktiven Werkstoffes Terfenol-D
- Table 2. Important characteristics of class AB and switch mode amplifiers.