

# Magnetorheologische Aktoren in der Automatisierungstechnik

## Magnetorheological Actuators for the Automation Technology

Ansgar Wiehe, Jürgen Maas, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, juergen.maas@hs-owl.de

### Kurzfassung

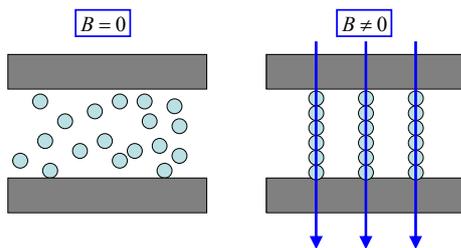
Aktoren auf Basis magnetorheologischer Fluide zeichnen sich durch eine hochdynamische und weitgehend lineare Verstellung der Schubspannung aus und stellen deshalb eine interessante Alternative zu bestehenden Bremsen, Kupplungen und Dämpfern im Automatisierungsbereich dar. Im Rahmen dieses Beitrags werden zunächst die Vorzüge dieser neuartigen Aktoren gegenüber konventionellen Technologien herausgestellt, bereits im Markt befindliche MRF-Aktoren mit ihren Anwendungen präsentiert sowie anschließend Konzepte für den Entwurf von MRF-Aktoren vorgeschlagen, mit denen unter Berücksichtigung spezifischer Vorgaben die applikationsgerechte Gestaltung der Komponenten vorgenommen werden kann.

### Abstract

Actuators based on magnetorheological fluids offer a high dynamical and almost linear force generation and represent therefore an interesting alternative for conventional brakes, clutches and dampers in the automation technology. In this paper the advantages of the novel actuators in contrast to conventional-based technologies are pointed out, in-use MR actuators are presented by its applications and concepts for the development of MR actuators are proposed finally, which meet specific guidelines for the its design with respect to the utilisation in the automation technology.

## 1 Einführung

Magnetorheologische Fluide sind Flüssigkeiten, deren Fließwiderstand durch magnetische Felder signifikant verändert werden kann. Bei magnetorheologischen Fluiden (MRF) sind magnetisierbare Partikel (Carbonyl-Eisenpulver mit Partikeldurchmesser von einigen  $\mu\text{m}$ ) in eine Trägerflüssigkeit, wie z.B. Mineralöl oder ähnlichem, suspensiert, die, wie in Bild 1 dargestellt, unter Einwirkung eines magnetischen Feldes entlang der Feldlinien Festkörperbrücken ausbilden.



**Bild 1** Mechanismus der Festkörperbrückenbildung.

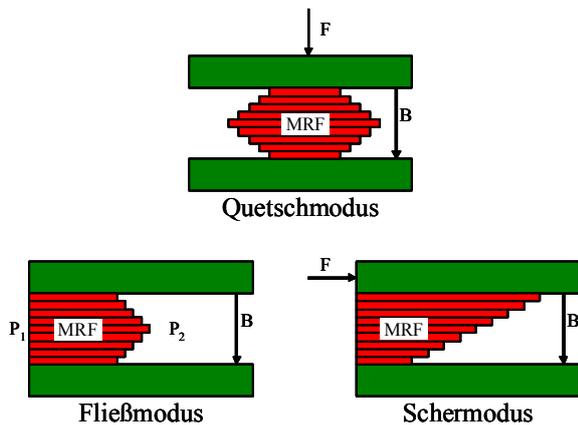
Im Vergleich zu elektrorheologischen Fluiden (ERF) lassen sich mit MRF deutlich größere Schubspannungen übertragen, eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen feststellen und Aktoren mit Betriebstemperaturen von bis zu  $150^{\circ}\text{C}$  darstellen. MRF verhalten sich aus Sicht des elektrischen Klemmenverhaltens induktiv-ohmsch, während ERF kapazitiv-ohmsches Verhalten aufweisen und Versorgungsspannungen von bis zu einigen kV benötigen.

Bereits um 1950 wird über die Ausnutzung der als magnetorheologischer Effekt bezeichneten Erscheinung in Kupplungen und Bremsen berichtet, [1]. Die geringe Leistungsfähigkeit der damaligen MRFs verhinderte jedoch eine kommerzielle Nutzung.

In der Zwischenzeit sind jedoch entscheidende Verbesserungen erreicht worden, so dass auf dem MR-Effekt basierende Komponenten vor allem als Schwingungsdämpfer im Automobilbereich die Serienreife erreicht haben, [2]. Während sich aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten vor allem mit Systemen zur Schwingungsdämpfung befassen, werden in diesem Beitrag Aktoren behandelt, mit denen anspruchsvolle Antriebsaufgaben aus dem Bereich steuerbarer Bremsen und Kupplungen gelöst werden können.

Nach [3] werden drei Wirkungsprinzipien (Moden) unterschieden, für die im Weiteren entsprechende Anwendungen vorgestellt werden. In Bild 2 sind die Wirkungsprinzipien, die sowohl für MRF als auch für ERF gelten, dargestellt.

Bei der Verwendung des Quetschmodus (squeeze mode) ist eine Polfläche normal zur Hauptausdehnung des Arbeitsspaltens verschiebbar, so dass bei Beanspruchung das MRF eine Quetschströmung ausführt. Der Quetschmodus eignet sich vor allem zum Erzeugen hoher Dämpfungskräfte bei kleinen Wegamplituden, ist für die Realisierung von Bremsen und Kupplungen aber weniger relevant.



**Bild 2** Wirkungsmodi steuerbarer Flüssigkeiten.

Im Fließmodus (flow mode) wird das MRF z.B. durch einen Kanal gepresst. Wird der Bereich des Kanals mit einem magnetischem Feld beaufschlagt, verändert sich der Fließwiderstand und der zum Durchströmen des Kanals benötigte Druck steigt. Eine technologische Anwendung des Fließmodus sind z.B. steuerbare Dämpfer in translatorischer Ausführung, die bereits in Serie in Kraftfahrzeugen für adaptive Fahrwerke verbaut werden, [4]. Das Charakteristische des Fließmodus ist, dass sämtliche das MRF begrenzenden Flächen sich nicht relativ zueinander bewegen, sondern das MRF an diesen vorbeiströmt.

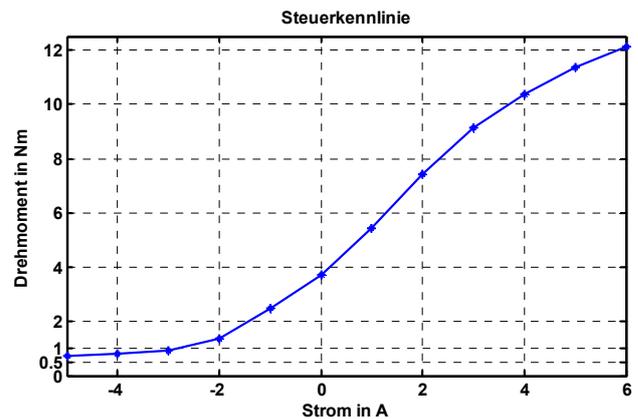
Im Gegensatz dazu bewegen sich beim Schermodus (shear mode) die das MRF begrenzenden Flächen relativ zueinander, so dass das MRF direkt geschert wird. Der Schermodus wird bei einem Großteil der rotatorischen MRF-Aktoren genutzt, [5]. Dieser Modus bildet die Grundlage für den Aufbau von Bremsen und Kupplungen.

## 2 Eigenschaften von MRF-Aktoren

Gegenüber konventionellen semi-aktiven Systemen, wie steuerbaren Dämpfern, Kupplungen oder Bremsen, weisen MRF-Aktoren wesentliche Vorteile auf. Diese resultieren vor allem daraus, dass bei Aktoren, die auf steuerbaren Flüssigkeiten basieren, keinerlei Mechanik zur Verstellung der übertragenen Kraft benötigt wird. Das Fließverhalten der MRF und somit die vom Aktor übertragene Kraft hängen ausschließlich vom Betrag des magnetischen Feldes ab. Wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Systemen sind deshalb:

- gut linearisierbare Steuerkennlinien und
- niedrige Zeitkonstanten zur Kraftverstellung.

Die Steuerkennlinie von MRF ist eindeutig und weist eine gute Reproduzierbarkeit auf, [6]. In Bild 3 ist die Steuerkennlinie eines rotatorischen MRF-Aktors dargestellt. Das Kraftverhalten von MRF-Aktoren lässt sich somit gut linearisieren, bzw. über einen weiten Arbeitsbereich als linear betrachten. In vielen Anwendungen kann die Kraft gesteuert vorgegeben werden und auf eine Drehmomentmessung verzichtet werden.



**Bild 3** Typische Steuerkennlinien von rotatorischen MRF-Aktoren, [21].

Da keine Mechanik zur Verstellung der Kraft bewegt werden muss und somit die Zeitkonstante dieser mechanischen Domäne entfällt, lassen sich bei adäquater Auslegung des MRF-Aktors sehr niedrige Zeitkonstanten realisieren. Die Reaktionszeit typischer MRF liegt im Bereich einiger Millisekunden, jedoch ruft die Verzögerung des magnetischen Feldes bei Stromänderung einen wesentlichen Verzögerung der Drehmomentbildung hervor.

Rotatorische MRF-Aktoren bieten auf Grund ihres Funktionswerkstoffes gegenüber konventionellen, reibbelag-basierten Kupplungen und Bremsen weitere wesentliche Vorteile:

- keine Schalt- oder Betriebsgeräusche,
- nahezu beliebig viele Schaltzyklen,
- volumenbasierte Energiedissipation.

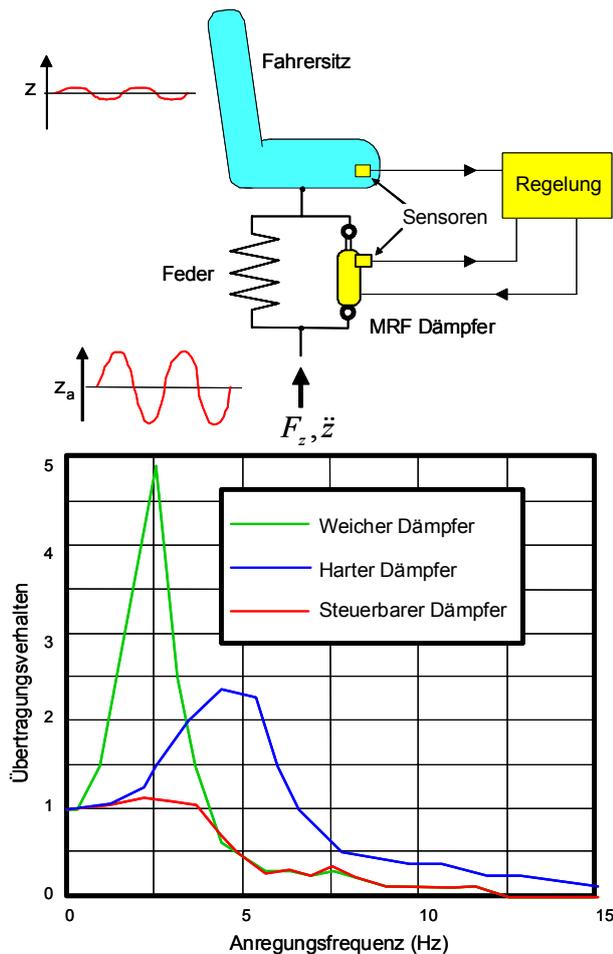
Sowohl die von der Verstellmechanik emittierten Schaltgeräusche als auch die auf den Stick-Slip-Effekt zurückzuführenden Betriebsgeräusche konventioneller Kupplungen und Bremsen werden bei MRF-Aktoren prinzipbedingt umgangen. Die Anzahl der möglichen Schaltzyklen konventioneller Kupplungen und Bremsen wird durch Verschleiß der Verstellmechanik begrenzt, die bei MRF-Aktoren prinzipbedingt nicht vorhanden sind.

Auf Grund der flächenbasierten Energiedissipation konventioneller Bremsen können hohe Energieeinträge, wie sie beispielsweise bei Notstopps auftreten, zu vorzeitigem Ausfall führen. Durch die in der Grenzschicht entstehenden hohen Temperaturen können Einzelkomponenten wie etwa der Reibbelag thermisch zerstört werden. Die volumenbasierte Energiedissipation von MRF-Aktoren resultiert in wesentlich niedrigeren Temperaturen bei gleicher kurzfristiger Belastung, [7].

Technologische Schwierigkeiten wie beispielsweise das Sedimentieren der MRF sind in der Zwischenzeit beherrschbar, sodass sich MRF-Aktoren in zahlreichen Anwendungen in der Entwicklung, Erprobung oder im Serieneinsatz befinden, [8].

### 3 Anwendungen von MRF-Aktoren

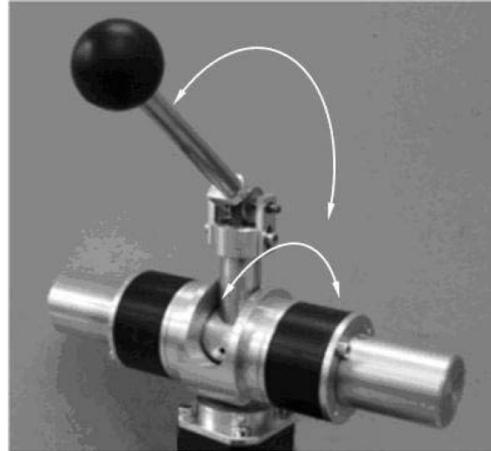
Am weitesten entwickelt ist die Anwendung als Dämpferelement in Fahrwerken von Kraftfahrzeugen. MRF-Dämpfer werden bereits von mehreren OEM als Serienkomponente verwendet, [4]. Neben der Verwendung als Fahrwerkskomponente werden ähnliche Dämpfer in Kabinen- und Sitzfederungen eingesetzt. In Bild 4 ist das Prinzip eines entsprechenden Fahrersitzes und die mit einem steuerbaren Dämpfer erreichbaren Verbesserungen dargestellt. Weiterhin gibt es Bestrebungen, auf MRF basierende steuerbare Motor- und Aggregatlager zu entwickeln, [8], [9], [10].



**Bild 4** Anwendung als steuerbarer Dämpfer, [11].

Auf Grund der gut linearisierbaren Steuerkennlinie und der hohen Dynamik der Kraftverstellung sind MRF-Aktoren für haptisch anspruchsvolle Anforderungen sehr geeignet. So werden MRF-Aktoren als Force-Feedback-Komponente für die manuelle Steuerung von Industrierobotern, [12], oder in Steer-by-Wire-Systemen von Flurförderfahrzeugen erprobt, [8]. In Bild 5 ist ein auf MRF basierender Force-Feedback-Joystick dargestellt, der zur manuellen Steuerung von Industrierobotern verwendet werden kann. Eine weitere haptisch anspruchsvolle Anwendung ist die Funktionserweiterung einer Pkw-Tür, [6]. Anstatt eines konventionellen Haltebandes, welches die Tür in wenigen vorgegeben Positionen verrasten kann wird zur

Beeinflussung der Türbewegung ein (vorzugsweise) rotatorischer MRF-Aktor verwendet. Somit sind neue Funktionen wie beispielsweise eine variable Türaste, mit der die Tür an beliebiger Position verrastet werden kann oder eine Kollisionsschutzfunktion, die die Tür vor einem Hindernis anhält und so Beschädigungen verhindert, implementierbar.



**Bild 5** Anwendung als Force-Feedback-Joystick, [13].

Neben den haptischen Eigenschaften ist die sehr niedrige Geräuschentwicklung der wesentliche Vorteil, auf Grund dessen MRF-Aktoren für den Einsatz in humaniden Umgebungen, wie zum Beispiel in der Logistik als integrierte Komponente bei Rollenförderern, besonders geeignet sind.

Ein weiteres Anwendungsfeld von MRF-Aktoren ist die medizinische Gerätetechnik. So wird die in Bild 6 dargestellte Knieprothese bereits als kommerzielles Produkt vertrieben und zeigt damit deutlich, dass die MRF-Technologie die grundsätzliche Marktreife erreicht hat, [14].



**Bild 6** Rheoknee [www.Ossur.com].

Eine andere Anwendung der Medizintechnik ist ein kompaktes Trainingsgerät für die Rehabilitation des Bewe-

gungsapparates auf Basis von MRF-Aktoren, [15]. Das erforderliche Belastungsmoment kann unter Verwendung eines MRF-Aktors unabhängig von der Bewegung verstellt werden.

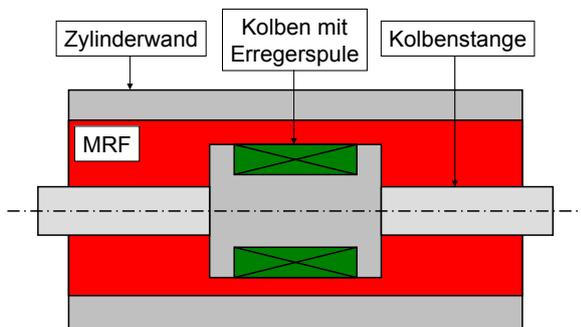
Neben fahrzeugtechnischen Anwendungen im Fahrwerks- und Komfortbereich werden rotatorische MRF-Aktoren für Anwendungen im Antriebsstrang erprobt. Die gegenüber konventionellen Systemen wesentlich kürzeren Reaktionszeiten von MRF-Allrad-Kupplungen ermöglichen beispielsweise eine wesentliche Verbesserung des Fahrverhaltens von Allradfahrzeugen, [16].

## 4 Grundlegende Aktorkonzepte

Bei der Entwicklung von MRF-Aktoren sind nach [17] unterschiedlichste Gesichtspunkte auf Grundlage erforderlicher Drehmoment- bzw. Kraft-Charakteristika zu berücksichtigen:

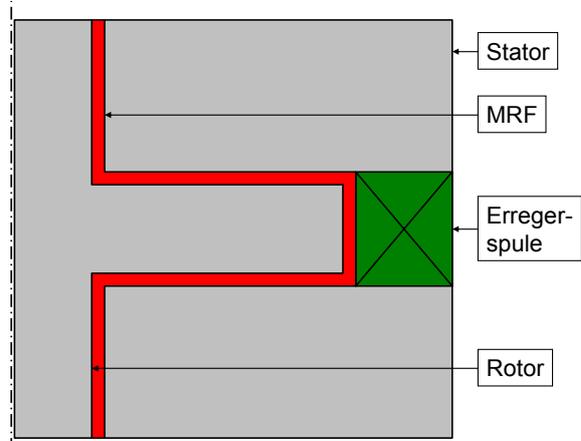
- Gestaltungsvorgaben wie Abmessungen und Gewicht,
- Arbeitsprinzipien unter Berücksichtigung von Herstellbarkeit und Kostenstrukturen,
- Eigenschaften des verwendeten MRF und betriebsbedingte Strömungen des MRF,
- der Entwurf des magnetischen Kreises sowie das elektrische Klemmenverhalten,
- Lebensdauerbetrachtungen zum MRF sowie von Dichtungen und Lagerungen,
- thermodynamische Betrachtungen für die Gesamtkomponente.

Die sich aus der Anwendung ergebenden Anforderungen an die Kraft-Weg-Charakteristik beeinflussen die Gestaltung eines MRF-Aktors wesentlich. Zurzeit werden vor allem Aktoren entwickelt, die entweder auf dem Schermodus oder auf dem Fließmodus basieren. Wobei sich der Fließmodus besonders für translatorische Aktoren, wie etwa Fahrwerksdämpfern, eignet. Für diese Anwendungen hat sich, der in Bild 7 dargestellte, prinzipielle Aufbau bewährt. Dabei fungiert der aktive Arbeitspalt als steuerbares Ventil, bei dem der durch die Kolbenbewegung entstehende Massenstrom reguliert werden kann.

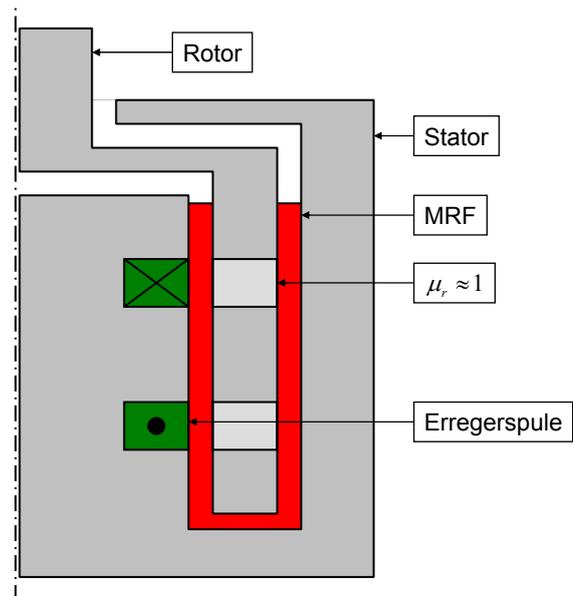


**Bild 7** Prinzip eines MRF-Dämpfers.

Rotatorische MRF-Aktoren basieren im Allgemeinen auf dem Schermodus. Dazu gibt es zwei grundsätzliche Prinzipien, die sich aus dem in Bild 8 dargestellten Scheibenaktor und den in Bild 9 dargestellten Zylinderaktor ergeben.



**Bild 8** Halbschnitt: Prinzip eines MRF-Scheibenaktors.



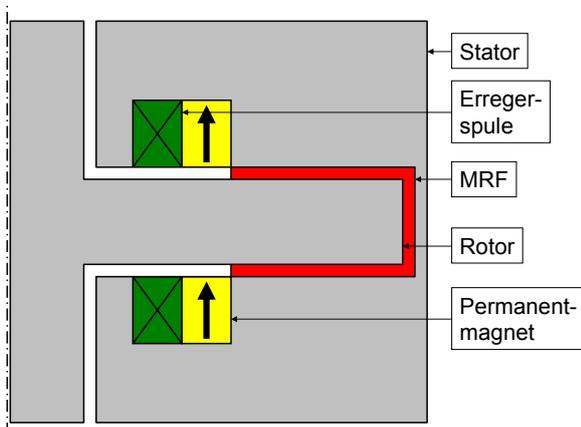
**Bild 9** Halbschnitt: Prinzip eines MRF-Zylinderaktors.

## 5 Anwendungsspezifische Aktorkonzepte

Die dargestellten Prinzipien weisen im stromlosen Zustand den minimalen Kraftarbeitspunkt auf. Davon ausgehend steigt die übertragbare Kraft proportional zum Betrag des Erregerefeldes. Ist eine andere Strom-Kraft-Charakteristik um einen mittleren stromlosen Arbeitspunkt erforderlich, müssen die magnetischen Kreise der erläuterten Prinzipien erweitert werden. Eine gute Möglichkeit dafür bietet der Einsatz von Permanentmagneten. In der Literatur werden entsprechende Prinzipien sowohl für translatorische MRF-Dämpfer, [18], als auch für rotatorische MRF-Aktoren beschrieben, [6].

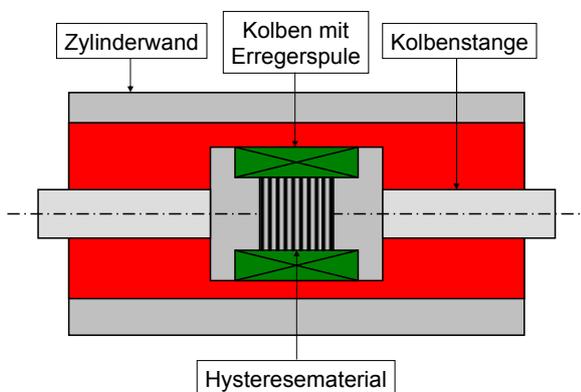
Eine weitere Möglichkeit zur Darstellung einer mittleren stromlosen Haltekraft ist die Verwendung von sog. halbhartem magnetischen Werkstoffen. Diese Werkstoffe verfügen zum einen über eine ausreichende Hysteresekarakteristik. Zum anderen ist die Koerzitiv-Feldstärke ausreichend niedrig, um eine Auf- und Ummagnetisierung mit dem elektrischen Erregerfeld des Aktors zu ermöglichen. Ein auf magnetisch-halbhartem Werkstoffen basierender, rotatorischer MRF-Aktor wurde bereits in [19] untersucht. Auf Hystereseeigenschaften beruhende Prinzipien erfordern in der Regel eine regelungstechnische Linearisierung der Strom-Kraft-Charakteristik, [20].

Neben diesen bekannten Prinzipien gibt es weitere Anordnungen zur Darstellung einer stromlosen Haltekraft. In Bild 10 ist ein prinzipieller Aufbau eines rotatorischen MRF-Aktors dargestellt. Bei dieser Anordnung liegt der Arbeitsspalt im Bereich des äußeren Durchmessers, wodurch eine höhere Drehmomentdichte als bei den zuvor erwähnten Anordnungen erzielt werden kann.



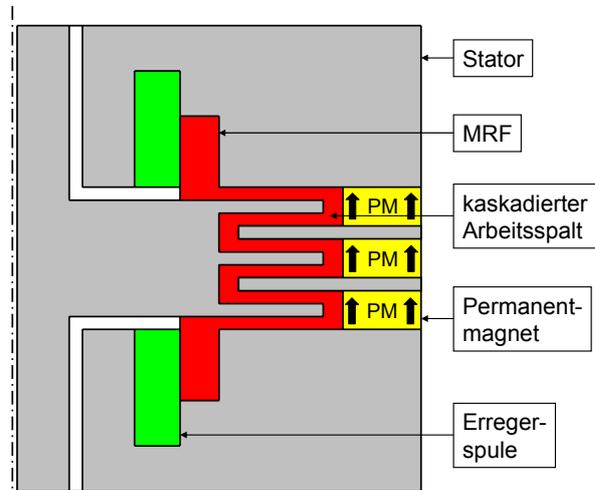
**Bild 10** Prinzip eines MRF-Scheiben-Aktors mit stromlosem Haltemoment durch Permanentmagnet.

In Bild 11 ist ein prinzipieller Aufbau eines auf Hystereseeigenschaften basierenden translatorischen MRF-Dämpfers dargestellt. Das Hysteresematerial kann dabei beliebig im magnetischen Kreis angeordnet werden.



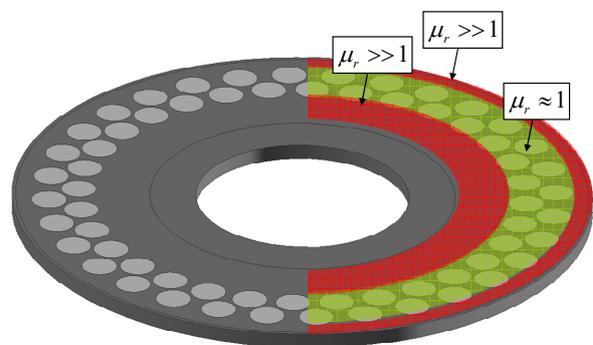
**Bild 11** Prinzip eines MRF-Dämpfers mit stromlosem Haltemoment durch hysteresbehaftetes Magnetmaterial.

In [1] wird eine Kaskadierung der radial verlaufenden Arbeitsspalte vorgeschlagen. Das Kaskadierungsprinzip kann auch auf MRF-Aktoren mit modifiziertem stromlosem Betriebszustand angewendet werden. Ein entsprechendes Beispiel des in [6] vorgestellten MRF-Aktors ist in Bild 12 dargestellt.



**Bild 12** Kaskadierter MRF-Aktor mit stromlosem Haltemoment, [21].

Zur Führung des magnetischen Flusses ist es häufig notwendig, innerhalb eines Bauteils unterschiedliche Permeabilitäten darzustellen (siehe Bild 9). Dies kann zum einen mit einem Materialwechsel innerhalb eines Bauteils geschehen, was jedoch meistens fertigungstechnisch aufwendig ist. Eine Alternative stellt die in Bild 13 dargestellte Maßnahme dar. Durch die Bohrungen wird in den betreffenden Bereichen des Materials schneller eine Sättigung im Vergleich zu den übrigen Bereichen des magnetischen Kreises hervorgerufen, wodurch die mittlere Permeabilität dieses Bereiches stark verringert wird. Da magnetorheologische Fluide ebenfalls eine nennenswerte Permeabilität besitzen, sollten zur Verhinderung des Eindringens der MRF die Bohrungen mit geeigneten Materialien verfüllt werden.



**Bild 13** Maßnahme zur Verringerung der lokalen Permeabilität.

## 6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden ausgehend von einer Darstellung der Eigenschaften und Besonderheiten steuerbarer Flüssigkeiten, die Wirkprinzipien zu deren technologischen Nutzung dargestellt. Anschließend werden kommerziell eingesetzte MRF-Aktoren aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen vorgestellt, bei denen die besonderen Charakteristika der Funktionsfluide zu einer wesentlichen Verbesserung der Systemeigenschaften beitragen. Basierend auf einer Beschreibung grundlegender Konzepte für MRF-Aktoren, werden Modifikationen und Erweiterungen zur Anpassung an anwendungsspezifische Anforderungen vorgeschlagen. MRF-Aktoren eignen sich unter anderem für den Einsatz in anspruchsvollen Automatisierungsanwendungen, die mit konventionellen, semiaktiven Aktoren wegen ihrer unzulänglicher Drehmomenteigenschaften, der Geräuschbeeinträchtigung und des Verschleißverhaltens nicht zufrieden stellend gelöst werden können und ermöglichen in vielen Fällen erst die Darstellbarkeit von neuen Funktionen.

## Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes "MRF-Bremse – Bremsen und Kupplungen auf Basis magnetorheologischer Flüssigkeiten", welches durch das BMBF unter dem Zeichen 17N0307 gefördert wird.

## Literatur

- [1] Rabinow, J.: *Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device*. US Patent, US 2 575 360, 1951.
- [2] Carlson, J.D.; Sheng, P.; Wen, W.: *MRF and ERF Highlights – 2006*. 10th International Conference on New Actuators, Bremen, S.235-239, 2006.
- [3] Janocha, H.: *Neue Aktoren aus der Sicht der Mechatronik*. Automatisierungstechnik AT, Bd. 12.1995, S. 589-593.
- [4] Hackenberg, U.; Dick, M.; Isgen, D.: *Der Audi R8 - Rennsporttechnik für die Straße*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Nr.: 02-2007.
- [5] Bölter, R.: *Design von Aktoren mit magnetorheologischen Flüssigkeiten*. Shaker Verlag GmbH, Aachen, 1999.
- [6] Wiehe, A.; Kern, S.; Maas, J.: *Rotatorischer MRF-Aktor für einen Türassistenten*. at - Automatisierungstechnik 56 (2008) 3, S. 155-164, Oldenbourg-Wissenschaftsverlag.
- [7] Wiehe, A.; Noack, V.; Maas, J.: *MR based Brake for Peak Loads*. 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden, 2008.
- [8] Carlson, J.D.: *MR Fluid Technology – Commercial Status in 2006*. 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Lake Tahoe, 2006.
- [9] Barber, D.E., Carlson, J.D., Wilder, R.: *Prototype MR Mounts Utilizing Glycol-Based MR Fluids*. 11th International Conference on New Actuators, Bremen, S.830-833, 2008.
- [10] Janocha, H.: *Steuerbares Motorlager mit MRF*. Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren, VDI-Berichte 1931, 2006, 313-326.
- [11] Janocha, H.: *Magnetic Field Driven Unconventional Actuators – Design Rules and Application Potential*. Adaptronic Congress 2008, Berlin.
- [12] Bachmann, P.; Milecki, A.: *MR Haptic Joystick in Control of Virtual Servo Drive*. 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden, 2008.
- [13] Milecki, A.; Myszkowski, A.: *Applications of MR Brakes in Manual Control of Lifting Devices and Manipulators*. 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden, 2008.
- [14] Gudmundsson, K.H.; Jonsdottir, F.; Olafsson, S.: *The Viscosity of Magneto-Rheological Fluids in a Prosthetic Knee Actuator*. 11th International Conference on New Actuators, Bremen, S.481-484, 2008.
- [15] Avraam, M.; Horodincea, M.; Preumont, A.: *MR-Tech: A Portable Smart Wrist Rehabilitation Device*. 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden, 2008.
- [16] Kieburg, C. et al.: *All-Wheel-Drive Prototype Car Driving Tests and Durability Requirements for the MR Fluids used*. 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden, 2008.
- [17] Carlson, J.D.: *MR Fluids and Devices in the Real World*. International Journal of Modern Physics, Bd. 19.2005, S. 1463-1470.
- [18] Ehrlich, J.; Böse, H.: *Novel MR Damper with Outstanding Fail-safe Characteristics*. 11th International Conference on New Actuators, Bremen, S.495-498, 2008.
- [19] Wiehe, A.; Güth, D.; Maas, J.: *Hysteresis based MR Actuator for Current Less Torque Generation*. 11th International Conference on New Actuators, Bremen, S.856-859, 2008.
- [20] Wiehe, A.; Voth, K.; Maas, J.: *Rotary MR Actuators with Current less Holding Torque for a Vehicle Door Assistant*. 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden, 2008.
- [21] Wiehe, A.; Maas, J.: *Rotatorischer MRF-Aktor*. Mechatronik 2007, VDI-Berichte 1971, 2007, S.767-783.