

Anwendung von magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen

DIETRICH LAMPE

Magnetorheologische Flüssigkeiten haben in den letzten Jahren einen Qualitätssprung erlebt, der ihren seriennmäßigen Einsatz in der Antriebstechnik in naher Zukunft möglich macht. Ihre hohe mechanische Grenzscherspannung, ihre gute zeitliche Stabilität und ihre minimale Reaktionszeit prädestinieren sie für den Einsatz in Sicherheits- und Regelkupplungen. Der folgende Beitrag erläutert das Funktionsprinzip dieser Flüssigkeiten, gibt Hinweise zum Kupplungsentwurf und präsentiert Versuchsergebnisse.

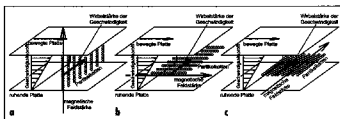
1 Einleitung

Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF) zeichnen sich ebenso wie elektrorheologische Flüssigkeiten (ERF) durch eine Erhöhung ihrer Zähigkeit unter dem Einfluss eines magnetischen bzw. elektrischen Felds aus. Ohne Feldeinwirkung sind sie flüssig; unter Feldeinfluss jedoch können sie – bei Nichtüberschreitung der feldstärkeabhängigen Grenzscherspannung – als Festkörper betrachtet werden.

Schon im Jahr 1949 meldete M. Winslow US-Patente zu Kupplungen mit ERF und darin im Jahr 1953 zu Kupplungen mit MRF an. Über eine technische Anwendung dieser Patente ist wenig bekannt geworden. Die ungenügende Leistungsfähigkeit dieser Kupplungen ließ diese Technologie anschließend für viele Jahrzehnte in Vergessenheit geraten. Forschungsarbeiten in den darauffolgenden Jahrzehnten konzentrierten sich hauptsächlich auf die Beschreibung und Verbesserung des viskositäts erhöhenden Mechanismus von ERF [1, 2]. Nachdem man einerseits deren gute Anwendbarkeit für bestimmte Einsatzfelder, wie z. B. der Hydraulik [3], nachgewiesen und andererseits das Verbesserungspotenzial von ERF ausgereizt hatte, ist in den letzten zirka fünf Jahren eine verstärkte Hinwendung zu MRF zu verzeichnen. Aufgrund der im Vergleich mit elektrischen um Größenordnungen stärkeren magnetischen Wechselwirkung zwischen Partikeln haben MRF, neben anderen Vorteilen, vor allem eine wesentlich höhere Grenzscherspannung. Dass MRF, obwohl prinzipiell schon seit vielen Jahren bekannt, noch nicht in großem Rahmen eine industrielle Anwendung fanden, liegt in der Tatsache begründet, dass sie erst vor zwei bis drei Jahren eine Qualität erlangt haben, die eine kommerzielle Anwendung in greifbarer Nähe rücken lässt.

2 Aufbau und Funktionsprinzip von MRF

Magnetorheologische Flüssigkeiten bestehen aus ferromagnetischen Feststoffpartikeln, einer Basisflüssigkeit und einem Stabilisator. Die magnetisierbaren Partikel sind meist kugelförmig und weisen einen Durchmesser von 1 bis 10 μm auf. Ihr Volumenanteil an der Gesamtflüssigkeit liegt zwischen 20 und 60 Prozent. Als Basis-



1: Effekt der Behinderung der Fluidrotation durch Partikelketten

a und b: Wirbelstärke steht senkrecht zur Feldstärke, d. h. maximale Behinderung der Fluidrotation und somit maximale Erhöhung der Viskosität
c: Wirbelstärke steht parallel zur Feldstärke, d. h. keine Behinderung der Fluidrotation und somit keine Erhöhung der Viskosität

flüssigkeit werden meist isolierende Silikon- oder synthetische Öle verwendet. Der Stabilisator umschließt die einzelnen Partikel und soll deren Koagulation und Absetzen verhindern.

Beim Anlegen eines magnetischen Felds werden die Partikel polarisiert und ordnen sich in Kettenform entlang der magnetischen Feldlinien an. Diese bei MRF gewünschte möglichst starke Kettenbildung ist der Hauptunterschied zu sogenannten Ferrofluiden, bei denen dieser Effekt unterbunden und eine Viskositätssteigerung unter Feldeinfluss vermieden werden soll. Die Gemeinsamkeit zwischen MRF und Ferrofluiden besteht in deren ähnlicher Zusammensetzung und in deren Magnetisierbarkeit, also der Möglichkeit, auch magnetische Volumenkräfte auf sie ausüben zu können.

Die Kraftübertragung durch MRF erfolgt im Festkörpermodus direkt über die Partikelketten. Nach Überschreitung einer bestimmten Grenzbelastung kommt es jedoch zu einem Abriss der Ketten. Es bleiben aber noch genügend viele und ausreichend große Ketten übrig, die durch eine Orientierung entlang der Feldlinien die Scherung des Fluids behindern und damit eine Erhöhung der Viskosität hervorrufen. Die Teilbilder von Bild 1 veranschaulichen den Effekt der Behinderung der Fluidrotation durch die Partikelketten, welche durch das Magnetfeld „festgehalten“ werden, am Beispiel einer ebenen Couette-Strömung.

In der Praxis geht man bis heute stets von Anwendungen aus, bei denen die magnetische Feldstärke wie in Bild 1a senkrecht zur Wirbelstärke des Geschwindigkeitsfelds steht. Man entwickelt Aktoren so, dass die magnetischen Feldlinien senkrecht zu den Kraftübertragungsflächen durch die MRF gehen. Dass die Rotation des Geschwindigkeitsfelds in bestimmten Fällen auch eine zu den Kraftübertragungsflächen senkrechte Komponente haben kann, wird dabei vernachlässigt. Dies hätte eine von der Strömungsrichtung abhängige Viskosität zur Folge. Eine Vernachlässigung dieser Richtungsabhängigkeit ist aber meist gerechtfertigt.

3 Makroskopische Beschreibung von MRF

Magnetorheologische Flüssigkeiten fallen unter die Kategorie nichtnewtonscher Flüssigkeiten, und ihre Beschreibung als Binghamkörper hat sich allgemein durchgesetzt. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass die übertragbaren Schubspannungen durch ein magnetisches Feld beeinflusst werden können. Die Schubspannung setzt sich also aus einem newtonschen Anteil, dessen Größe durch die Basisviskosität und die Scherrate bestimmt wird, und einem Binghamanteil zusammen. Der Binghamanteil ist eine Materialkenngröße, die durch die Größe der magnetischen Feldstärke

M. S. (USA) Dietrich Lampe ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Luft- und Raumfahrttechnik (Professur für Thermofluidynamik, Prof. Dr.-Ing. Roger Grundmann) der Technischen Universität Dresden

und die Strömungsrichtung beeinflusst werden kann. Zwischen Schubspannung τ in Pa und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ in 1/s (oft gleich du/dy) gilt folgende Beziehung:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

In dieser Gleichung 1 ist τ_0 die feldinduzierte Schubspannung in Pa und η die dynamische Viskosität in Pas (oft mit μ bezeichnet). Die Beziehung zwischen den beiden Größen illustriert Bild 2. Die dynamische Viskosität η liegt in der Größenordnung der Viskosität der Basisflüssigkeit. Sie ist hauptsächlich temperaturabhängig.

Die feldinduzierte Schubspannung τ_0 hängt von der magnetischen Feldstärke ab. Für diese Abhängigkeit wurden theoretische Modelle hergeleitet, die aber bisher noch nicht in der Lage sind, die Realitäten adäquat widerzuspiegeln. Als grober Anhaltspunkt kann aber dienen, dass die feldinduzierte Schubspannung erst quadratisch mit der magnetischen Feldstärke wächst und dann gegen einen Maximalwert konvergiert. Liegt die aufgebrauchte Schubspannung unterhalb der feldinduzierten, so verhält sich die MRF wie ein Festkörper. Dabei kann man aber nicht von einem linearelastischen Körper ausgehen, sondern muss berücksichtigen,

- dass die durch eine Belastung hervorgerufene Verformung bei Rücknahme der Last nicht vollständig zurückgeht (remanente-Verformung) und
- dass die Verformung bei Annäherung an die von der magnetischen Flussdichte abhängigen Grenzbelastung stärker als linear zunimmt.

In den Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass MRF eine Dauerlast ohne messbares Kriechen ertragen können. Bei Überschreitung der Grenzscherungspannung geht die MRF in den flüssigen Zustand über, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Schubspannung linear mit der Schergeschwindigkeit wächst. Der Proportionalitätsfaktor ist dabei, wie aus dem Binghammodell ersichtlich, die Viskosität η .

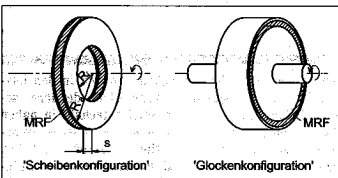
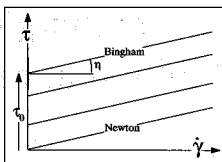
In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass der Übergang von festem zu flüssigen Zustand (Erhöhung der Schubspannung) meist bei einer anderen Schubspannung, wenn auch bei gleichen Größenordnungen, erfolgt, als der entgegengesetzte Übergang von flüssig auf fest (Verringerung der Schubspannung). Die Grenzscherungspannung, bei welcher der Übergang von fest auf flüssig erfolgt, wird dabei mit „statischer Grenzscherungspannung“ τ_{st} (static yield stress) bezeichnet und der entgegengesetzte Übergang erfolgt bei der „dynamischen Grenzscherungspannung“ $\tau_{st,d}$ (dynamic yield stress). Ob nun die statische oder die dynamische Grenzscherungspannung höher ist, hängt von dem jeweiligen Fluid ab, wobei der Fall $\tau_{st} > \tau_{st,d}$ häufiger vorkommt und auch mit dem Abreißverhalten der Ketten leichter zu erklären ist. Leider liegen für die meisten Fluide keine konkreten Messwerte für die statische und die dynamische Grenzscherungspannung vor, sondern es lässt sich meist nur eine Grenzscherungspannung τ_0 aus dem Schergeschwindigkeits-Schubspannungs-Diagramm (Bild 2) entnehmen.

4 Einsatz von MRF in Kupplungen

Die potenziellen Vorteile von magnetorheologischen gegenüber herkömmlichen Kupplungen liegen vor allem in der einfachen, exakten und reproduzierbaren Steuerbarkeit des übertragenen Drehmoments, der schnellen Reaktionszeit und dem geringen Verschleiß. Im Vergleich mit Magnetpulverkupplungen liegen die Vorzüge besonders in der wesentlich kleineren Größe der Partikel, welche zur Folge hat, dass deren Magnetisierung schneller erfolgen kann und dass eine Veränderung der Eigenschaften durch Teilchenabrieb nicht zu befürchten ist. Die schnelle Reaktionszeit ergibt sich vor allem aus dem fundamentalen Vorteil, dass die elektrische Information direkt, d. h. ohne mechanische Bewegung von Teilen, auf das Wirkmedium übertragen wird. Im Gegensatz zu elektrothologischen Flüssigkeiten wirken sich bei magnetorheologischen Flüssigkeiten sowohl eine Verunreinigung als auch eine Temperaturveränderung nur unwesentlich auf die Eigenschaften aus.

Magnetorheologische Kupplungen sind sowohl als Sicherheitskupplungen als auch als Kupplungen mit steuerbarer Ausgangsdrehzahl bzw. -drehmoment (sogenannte Regellekupplungen) anwendbar. Ihr möglicher Anwendungsbereich reicht von Werkzeugmaschinen über Hausräte bis hin zum Automobiliereich.

2: Schubspannung τ in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ für einen Binghamkörper



3: Mögliche Grundformen für MRF-Kupplungen

Prinzipiell hat man beim Bau von MRF-Kupplungen zwei Grundformen zur Auswahl, für die man sich leicht die Drehmomentgleichungen für die schlupfende und nichtschlupfende Übertragung ableiten kann. Bei der Ableitung der Gleichungen ist zu berücksichtigen, dass das Fluid MRF einmal als Festkörper und zum anderen bei Überschreitung einer bestimmten Grenzlast als Flüssigkeit zu behandeln ist.

Bild 3 zeigt mögliche Grundformen für MRF-Kupplungen wie Scheiben- und Glockenkonfiguration. Aus der unterschiedlichen radialen Schubspannungsverteilung im festen und flüssigen Zustand resultiert, dass man bei der Scheibenkonfiguration durch eine geschickte Wahl der Radien R_1 und R_2 erreichen kann, dass der Übergang zwischen starrer Verbindung und schlupfender Drehmomentübertragung ohne Drehmomentsprung erfolgt. Des Weiteren bietet die Scheibenkonfiguration den fundamentalen Vorteil gegenüber der Glockenkonfiguration, dass bei einer eventuellen MRF-Entmischung aufgrund von Zentrifugalkräften die Grenzscherungspannung nicht durch Partikelentmischung an einer Übertragungsfäche gegen Null gehen kann.

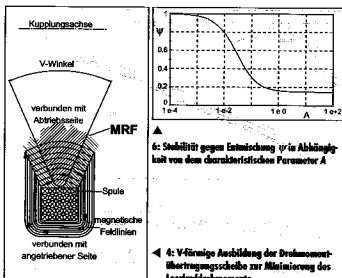
4.1 Temperatureinsatzbereich

Der Temperatureinsatzbereich von MRF-Kupplungen wird hauptsächlich durch die Siedetemperatur des Basisöls und die Beständigkeit des Stabilisators bestimmt. Die Grenzscherungspannung selbst unterliegt wegen der sehr viel höheren Curie-Temperatur der Partikel nur einem geringen Temperatureinfluss. MRF-Hersteller geben einen Einsatzbereich von -40 bis $+150$ °C an. Zur Vermeidung der Überhitzung (besonders die im Leerlauf entstehende Wärme ist sicher abzuleiten) sind folgende Maßnahmen sinnvoll:

- große und stark strukturierte Kupplungsaußenflächen zur Gewährleistung einer größtmöglichen Oberfläche zur Wärmeabstrahlung sowie
- außenliegendes Antriebselement, damit auch bei Stillstand des abtreibenden Elements ein turbulenter konvektiver Wärmetransport gegeben ist.

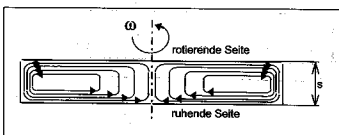
4.2 Leerlaufdrehmoment

Da es technisch aufwendig wäre, zur gänzlichen Vermeidung eines Leerlaufdrehmoments bei MRF-Kupplungen die MRF aus dem Drehmomentübertragungspalt zu pumpen, wurden andere Möglichkeiten zur Verringerung des Leerlaufdrehmoments gesucht. Dazu bietet sich in erster Linie eine Vergrößerung der Spaltbreite an, weil das Leerlaufdrehmoment umgekehrt proportional zu dieser abnimmt. Dadurch vergrößert sich aber das magnetisierende MRF-Volumen, so dass man einen Kompromiss zwischen verfügba-



▲ 6: Stabilität gegen Entmischung ψ in Abhängigkeit von dem charakteristischen Parameter A

◀ 4: V-förmige Ausbildung der Drehmomentübertragungsscheibe zur Minimierung des Leerlaufdrehmoments



5: Zirkulation der MRF bei Reynoldszahlen ab 10^4

rer Steuerungsenergie und dem Minimum des Leerlaufdrehmoments finden muss.

Als zweite Möglichkeit bietet sich eine V-förmige Ausbildung der Drehmomentübertragungsscheibe an (Bild 4), weil durch diese Maßnahme die nicht zum übertragbaren Drehmoment beitragende benetzte Spaltfläche minimiert werden kann. Des Weiteren wird durch eine sinnvolle Wahl des Winkels der V-förmigen Ausbildung sowohl erreicht, dass die magnetische Induktion im Antriebsselement so hoch ist, dass es zu einer optimalen Ausnutzung der Magnetisierbarkeit des Materials kommt, als auch erreicht, dass es zu einer Minimierung des elektrischen Spulenwiderstands durch Vergrößerung der Querschnittsfläche kommt. Dadurch kann die erforderliche elektrische Steuerleistung verringert werden.

4.3 Magnetisierbarkeit

Magnetorheologische Flüssigkeiten sind ebenso wie Ferrofluide magnetisierbar. Sie haben eine relative Permeabilität von bis zu 5 und werden als superparamagnetische Stoffe bezeichnet. Diese Magnetisierbarkeit kann zur Ausübung von magnetischen Volumenkräften auf die MRF ausgenutzt werden. Diese Eigenschaft ist nutzbar, um eine berührunglose Abdichtung auf der Basis von Permanentmagneten zur Verhinderung des Auslaufens der MRF im Stillstand zu entwerfen. Durch diese Art der Abdichtung wird erreicht, dass die MRF ohne zusätzliche Reibungskräfte und ohne jeden Dichtungsverschleiß kontinuierlich in den Übertragungsspalten gehalten werden kann und zudem das Eindringen der MRF in unerwünschte Bereiche verhindert wird. Außerdem zeichnet sie sich dadurch aus, dass keine elektrische Leistung zur dauerhaften Aufrechterhaltung der Dichtungswirkung erforderlich ist.

4.4 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit, welche eine MRF-Kupplung benötigt, wird in erster Linie durch die benötigte Zeit zum Auf- bzw. Abbau des Magnetfelds bestimmt. Bedingt durch das minimale Volumen der Partikel erfolgt die Ausrichtung der Weissenbergschen Bezirke in wenigen Millisekunden. In Versuchen wurde nachgewiesen, dass sich das gewünschte Drehmoment rund 2 bis 3 ms nach dem Aufbau der Fluidsdichte einstellt. Je nach Anforderung an die Reaktionszeit wird es für praktische Anwendungen erforderlich sein, den Mag-

netkreis günstig auszulagern und vermehrt in die Steuerungselektronik zu investieren.

4.5 Entmischung

Da die magnetisierbaren Partikel in der MRF eine wesentlich höhere Dichte als die Basisflüssigkeit haben, muss Vorsorge getroffen werden, damit sie im Leerlauf nicht durch Zentrifugalkräfte nach außen wandern und es zu einer Entmischung der MRF kommt. Bei angelegtem Magnetfeld, also bei Übertragung eines Drehmoments, stellt dies kein Problem dar, weil die Partikel durch das Magnetfeld in ihrer radialen Position gehalten werden.

Bei der Scheibenkonfiguration gibt es bei Reynoldszahlen ab 10^4 (also bei hohen Drehzahlen ω) eine Zirkulationsbewegung des Fluids. An der rotierenden Seite wandert die MRF nach außen und an der nichtrotierenden Seite nach innen. Bild 5 zeigt die Strömungsrichtung der Zirkulation auf.

Unter Berücksichtigung der auf die Partikel wirkenden Zentrifugal- und Reibungskräfte, welche von der lokalen MRF-Geschwindigkeit abhängen, sowie unter Annahme kugelförmiger und nur kriechender Partikel lässt sich ein charakteristischer Parameter A ableiten, der die Stabilität gegen Entmischung charakterisiert:

$$A = \left(\frac{R_p}{s} \right)^2 \frac{v_{MRF} \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\eta} \quad (2)$$

In dieser Gleichung 2 ist R_p der Partikelradius, s die Spaltbreite, ρ_p die Partikeldichte, ρ_f die Basisölldichte und v_{MRF} die kinematische Viskosität der MRF.

Trägt man das Verhältnis zwischen nach innen und nach außen gerichtetem Partikelstrom ψ über dem charakteristischen Parameter A auf, so kann man in Bild 6 erkennen, dass ψ für kleiner werdendes A gegen den Wert 1 geht. Dies bedeutet dann, dass genau so viele Partikel durch die Zentrifugalkräfte nach außen getragen werden, wie durch die Zirkulationsbewegung wieder nach innen transportiert werden; d. h. eine Entmischung wäre vollständig verhindert. Bild 6 zeigt ebenfalls, dass der Parameter A wenigstens kleiner als 0,1 sein muss, um überhaupt eine Verbesserung zu erzielen.

Da man bei Verwendung einer bestimmten MRF in einer Kupplung von den in Gleichung 2 vorkommenden Parametern lediglich die Spaltbreite beeinflussen kann, ist es für die praktische Auslegung einer MRF-Kupplung erforderlich, diese Spaltbreite nicht zu klein zu wählen. Für die im folgenden Abschnitt beschriebene Kupplung konnte in Versuchen gezeigt werden, dass durch Berücksichtigung der hier gemachten Überlegungen die Entmischung der MRF kein Problem darstellt.

5 Vorgaben der Versuchskupplung

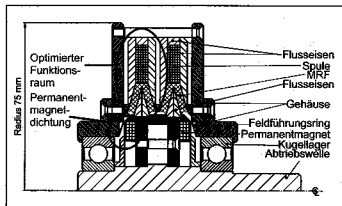
Für die am Institut für Luft- und Raumfahrttechnik gebaute und getestete Versuchskupplung lagen folgende Entwurfsvorgaben zugrunde: übertragbares Drehmoment $M = 10$ Nm, Nenndrehzahl $n = 3000$ min⁻¹ und maximaler Außendurchmesser $D = 200$ mm. Des Weiteren wurden bei der Auslegung folgende Ziele angestrebt:

- geringes Leerlaufdrehmoment,
- niedrige zur Steuerung erforderliche Leistungsaufnahme,
- geringes Gewicht und niedriges Trägheitsmoment,
- einfacher möglichst modularer Aufbau sowie
- einfache und preisgünstige Herstellbarkeit.

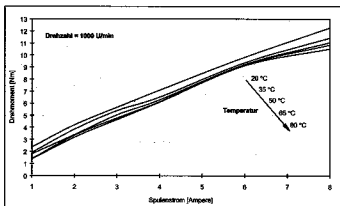
5.1 Realisierung der Versuchskupplung

Der Aufbau der realisierten Versuchskupplung ist in Bild 7 dargestellt. Für den Drehmomentübertragungspalt wurde die Scheibenkonfiguration gewählt, weil diese aufgrund der günstigen Schubspannungsverteilung über den Radius im festen Zustand der MRF einen ruckfreien Übergang vom Festkörpermodus zum Flüssigkeitsmodus gewährleisten kann. Der Übertragungspalt ist dabei V-förmig ausgebildet. Die Versuchskupplung besitzt eine Permanentmagnetabdichtung, die das Auslaufen der MRF verhindert und welche die Magnetisierbarkeit der MRF zur Erzeugung eines magnetischen Drucks ausnutzt.

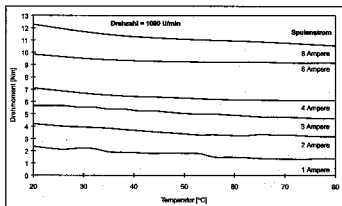
Der V-Winkels wurde so optimiert, dass für gegebene Materialkurven, vorgegebene Außenabmessungen der Einheit Spule, Eisenleiste und MRF sowie für vorgegebene Spaltlänge und -breite dann für eine Reihe von elektrischen Leistungen und V-Win-



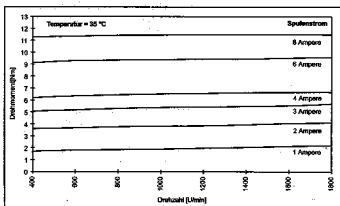
7: Aufbau der Versuchskupplung



8: Übertragenes Drehmoment in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Temperaturen



9: Übertragenes Drehmoment in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Spulenströme



10: Übertragenes Drehmoment in Abhängigkeit von der Drehzahl für verschiedene Spulenströme

keln die daraus resultierende magnetische Induktion in der MRF berechnet wurde. Aus den erhaltenen 3D-Diagrammen ist dann für jede gewünschte magnetische Induktion der V-Winkel ablesbar, bei dem die optimal niedrige elektrische Leistung zur Erzeugung der Induktion zur Verfügung steht. Auch bisher bekannte zur Magnetkreisauslegung verwendete Verfahren wären prinzipiell zur günstigen Abstimmung zwischen MRF-Querschnitt und Eisenquerschnitt in der Lage. Sie können aber nicht den Gewinn berücksichtigen, der durch eine mit der Eisenquerschnittsverringering verbundenen Vergrößerung der Spulenquerschnittsfläche einhergeht.

5.2 Gemessene Eigenschaften der Versuchskupplung

Die Untersuchungen an der Versuchskupplung sollten vor allem Aufschluss über die Zusammenhänge zwischen Spulenstrom, Drehzahl und Drehmoment liefern sowie eine Auskunft geben über den Einfluss von Temperatur, Fluidmischung usw. Die Bilder 8 bis 10 zeigen das gemessene Drehmoment jeweils in Abhängigkeit von Spulenstrom, Temperatur und Drehzahl. Dabei ist besonders gut zu erkennen, dass der durch den Spulenstrom (bzw. die Flüssichtigkeit) steuerbare Drehmomentbereich die durch Temperatur- und Drehzahlvariationen hervorgerufenen Veränderungen um Größenordnungen übersteigt. Bei den Messungen an der Versuchskupplung auf dem Instituts-Versuchsstand kann die MRF des Typs 132 LD der Firma Lord Corporation zum Einsatz.

6 Forschungsansatz

Neben der weitergeführten Entwicklung und Untersuchung anwendungsspezifischer Kupplungen wurde mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Innovationskollegs „Magnetofluidodynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten“ ein zusätzliches Projekt in Angriff genommen. Dieses Projekt hat sich zum Ziel gesetzt, die Eigenschaften von MRF, wie die Richtungsabhängigkeit der Viskosität und den Einfluss der Schergeschichte, in ein numerisches Programm zur Strömungsberechnung zu integrieren.

Gegenwärtige kommerzielle Programme können ausschließlich eine isotrope Abhängigkeit der Viskosität entweder von Eigenschaften der Strömung, wie z. B. der Temperatur oder der Schergeschwindigkeit, oder von externen Größen modellieren. Die Ursachen für das Fehlen eines solchen Programms bis zum heutigen Tage liegen im Mangel an praktikablen Modellen für die Richtungsabhängigkeit zwischen Feldstärke und Schubspannung und in einer fehlenden Erfahrung bei der Implementierung des Schergeschichteinflusses bei MRF in Berechnungsprogrammen. Aus diesem Grund soll in diesem Projekt ein Modell für die nichtisotrope Viskosität für MRF entworfen und vor allem in einem Strömungsberechnungsprogramm getestet werden.

7 Zusammenfassung

Magnetorheologische Flüssigkeiten haben in den letzten Jahren einen Qualitätssprung erlebt, der ihren serienmäßigen Einsatz in Aktoren in naher Zukunft erwarten lässt. Ihre hohe mechanische Grenzscherspannung bei üblichen magnetischen Feldstärken, ihre gute zeitliche Stabilität und ihre minimale Reaktionszeit prädestinieren sie für den Einsatz in Sicherheitskupplungen und Kupplungen mit steuerbarem Drehmoment. Der Beitrag erläuterte das Funktionsprinzip und die fluidmechanische Beschreibung dieser Flüssigkeiten, gibt Hinweise zum Entwurf von Kupplungen und präsentiert Forschungsergebnisse aus Versuchen an einer MRF-Kupplung.

Literaturhinweise:

[1] Block, H.: *Electrorheology*. Journal of Physics D. Volume 21 (1988)
 [2] Halsey, T. C.: *Electrorheological Fluids-Structure and Dynamics*. Advanced Materials. Volume 5 (1993), No 10
 [3] Wolff, C.: *Elektrorheologische Flüssigkeiten – Neue Möglichkeiten in der Hydraulik*. *Öst-Öhydrozähl und Pneumatik* 38 (1994), Nr. 5
 [4] Rosensweig, R. E.: *On Magnetorheology and Electrorheology as States of Unsymmetric Stress*. Journal of Rheology. Volume 39 (1995), Nr. 1
 [5] Lemaire, E.: *Yield Stress and Structuration of Magnetorheological Suspensions*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Volume 122 (1993)
 [6] Rosensweig, R. E.: *Ferrohydrodynamics*. Dover Publications, Mineola, 1998