

Anwendung von Magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen

Dietrich Lampe

M.S.(USA) Dietrich Lampe ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Luft- und Raumfahrttechnik der TU Dresden

Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF) 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 machen sie prädestiniert für den Einsatz in Sicherheitskupplungen und Kupplungen mit steuerbarem Drehmoment. Der Beitrag erläutert das Funktionsprinzip und die fluidmechanische Beschreibung von MRF, gibt Hinweise zum Entwurf von MRF-Kupplungen und präsentiert Untersuchungsergebnisse an einer Versuchskupplung.

Application of Magnetorheological Fluids for Clutches

Magnetorheological Fluids (MRF) made a considerable quality jump over the last few years. Therefore standard usage in various actors is to be expected soon. Their high yield stress at usual magnetic field strength, good long term stability and short reaction time make them very well suited for application in safety clutches and clutches with controllable torque. This article explains the working principle and fluid mechanical description of MRF as well as it describes design considerations and test results of MRF-clutches.

1. Einleitung

Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF) zeichnen sich ebenso wie elektrorheologische Flüssigkeiten (ERF) durch eine Erhöhung ihrer Zähigkeit unter dem Einfluß eines magnetischen bzw. elektrischen Feldes aus. Ohne Feldeinwirkung sind sie flüssig und können unter Feldeinfluß bei Nichtüberschreitung der feldstärkeabhängigen Grenzscherspannung als Festkörper betrachtet werden.

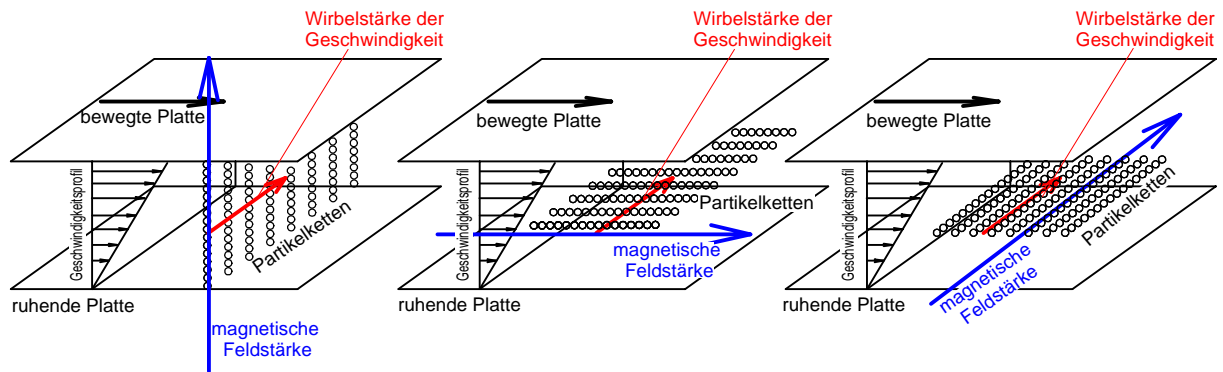
Schon im Jahre 1949 meldete M. Winslow US-Patente zu Kupplungen mit ERF und dann im Jahre 1953 zu Kupplungen mit MRF an. Über eine technische Anwendung dieser Patente ist wenig bekannt geworden. Die ungenügende Leistungsfähigkeit dieser Kupplungen ließen diese Technologie anschließend für viele Jahrzehnte 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 Verbesserungspotential von ERF ausgereizt hatte, ist in den letzten ca. 5 Jahren eine verstärkte Hinwendung zu MRF zu verzeichnen. Aufgrund der im Vergleich zur 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 Anwendung fanden, liegt in der Tatsache begründet, daß sie erst vor 2-3 Jahren eine Qualität erlangt haben, die eine kommerzielle Anwendung in greifbare Nähe rücken lassen.

2. Aufbau und Wirkungsmechanismus in MRF

MRF bestehen aus ferromagnetischen Feststoffpartikeln, einer Basisflüssigkeit und einem Stabilisator. Die magnetisierbaren Partikel sind meist kugelförmig mit einem Durchmesser von 1-10 µm. Ihr Volumenanteil liegt zwischen 20 und 60%. Als Basisflüssigkeit 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 Feldes 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 Ferrofluiden, bei denen dieser Effekt unterbunden und eine Viskositäts erhöhung 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 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 Fluides behindern und damit eine Erhöhung der Viskosität hervorrufen. Die Bilder 1-3 veranschaulichen den Effekt der Behinderung der Fluidrotation durch die durch das Magnetfeld 'festgehaltenen' Partikelketten am Beispiel einer ebenen Couette-Strömung.



1:
Wirbelstärke steht **senkrecht**
auf Feldstärke
=> maximale Behinderung
der Fluidrotation und somit
maximale Erhöhung der
Viskosität

2:
Wirbelstärke steht **senkrecht**
auf Feldstärke
=> maximale Behinderung
der Fluidrotation und somit
maximale Erhöhung der
Viskosität

3:
Wirbelstärke steht **parallel**
zur Feldstärke
=> keine Behinderung
der Fluidrotation und somit
keine Erhöhung der
Viskosität

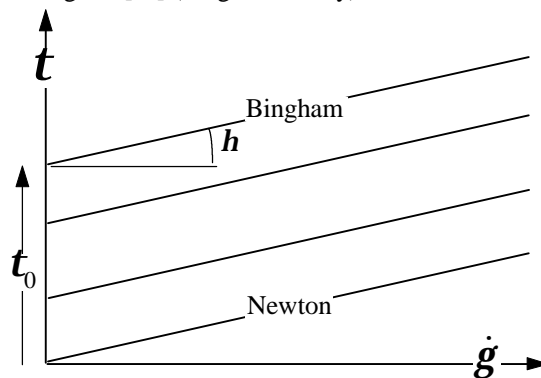
In der Praxis geht man bis zum heutigen Tage stets von Anwendungen aus, bei denen die magnetische Feldstärke wie in Bild 1 senkrecht zur Wirbelstärke des Geschwindigkeitsfeldes ist und entwickelt die Aktoren so, daß die magnetischen Feldlinien senkrecht zu den Kraftübertragungsflächen durch die MRF gehen. Daß die Rotation des Geschwindigkeitsfeldes 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 meist gerechtfertigt.

3. Makroskopische Beschreibung von MRF

MRF fallen unter die Kategorie nichtnewtonscher Flüssigkeiten und ihre Beschreibung als Bingham-Körper 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 und die Strömungsrichtung beeinflussbar ist. Zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit gilt folgende Beziehung:

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

mit: τ - Schubspannung [Pa]; τ_0 - Feldinduzierte Schubspannung [Pa]; η - Dynamische Viskosität [Pa s] (oft mit μ bezeichnet); \dot{g} - Schergeschwindigkeit [s^{-1}] (oft gleich du/dy)



4: Schubspannung vs. Schergeschwindigkeit für Bingham-Körper

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 Abhängigkeiten wurden theoretische Modelle hergeleitet, die aber bisher noch nicht in der Lage sind, die Realitäten adäquat widerzuspiegeln. Als grober Anhaltspunkt kann aber dienen, daß τ_0 erst quadratisch mit der magnetischen Feldstärke wächst und dann gegen einen Maximalwert konvergiert.

Liegt die aufgebrauchte Schubspannung unterhalb von τ_0 , so verhält sich das Fluid 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)
- die Verformung bei Annäherung an die von der magnetischen Flußdichte abhängigen Grenzbelastung stärker als linear zunimmt

In Versuchen konnten wir nachweisen, daß MRF eine Dauerlast ohne meßbares Kriechen ertragen können.

Bei Überschreitung der Grenzscherspannung geht das Fluid in den flüssigen Zustand über, der dadurch gekennzeichnet ist, daß die Schubspannung linear mit der Schergeschwindigkeit wächst. Der Proportionalitätsfaktor ist dabei, wie aus dem Bingham-Modell ersichtlich, die Viskosität η .

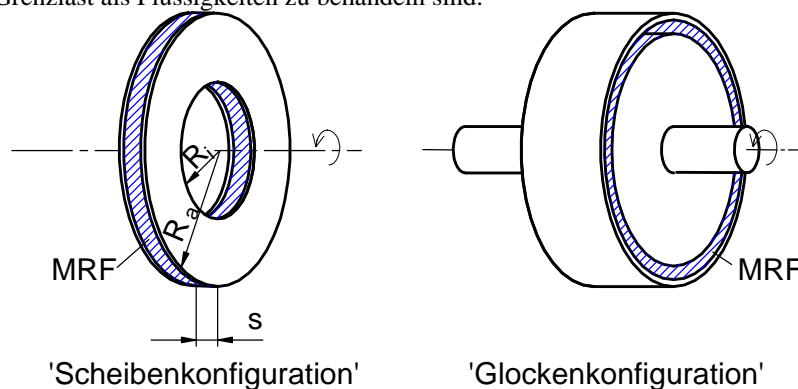
In der Literatur besteht Einigkeit darüber, daß der Übergang von fest zu flüssig (Erhöhung der Schubspannung) meist bei einer anderen Schubspannung, wenn auch bei gleichen Größenordnungen, erfolgt, als der Übergang von flüssig zu fest (Verringerung der Schubspannung). Die Grenzscherspannung, bei welcher der Übergang von fest zu flüssig erfolgt, wird dabei mit 'statischer Grenzscherspannung' τ_{ys} (static yield stress) bezeichnet und der entgegengesetzte Übergang erfolgt bei der 'dynamischen Grenzscherspannung' τ_{yd} (dynamic yield stress). Ob nun die statische oder die dynamische Grenzscherspannung höher ist, hängt von dem jeweiligen Fluid ab, wobei der Fall $\tau_{ys} > \tau_{yd}$ häufiger vorkommt und auch mit dem Abreißverhalten der Ketten leichter zu erklären ist. Leider liegen für die meisten Fluide keine konkreten Meßwerte für τ_{ys} und τ_{yd} vor, sondern es läßt sich meist nur eine Grenzscherspannung τ_0 aus den Schergeschwindigkeits-Schubspannungs-Kurven entnehmen.

4. Einsatz von MRF in Kupplungen

Die potentiellen Vorteile von magnetorheologischen gegenüber herkömmlichen Kupplungen liegen vor allem in der einfachen, exakten und reproduzierbaren Steuerbarkeit des übertragenen Drehmomentes, der schnellen Reaktionszeit und dem geringen Verschleiß. Im Vergleich zu Magnetpulverkupplungen liegen die Vorzüge besonders in der wesentlich kleineren Größe der Partikel, welche zur Folge hat, daß deren Magnetisierung schneller erfolgt 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 elektrorheologischen Flüssigkeiten wirken sich sowohl eine Verunreinigung, als auch eine Temperaturveränderung nur unwesentlich auf die Eigenschaften der MRF aus.

Magnetorheologische Kupplungen sind sowohl als Sicherheitskupplungen, als auch als Kupplungen mit steuerbarer Ausgangsdrehzahl bzw. -drehmoment anwendbar. Ihr möglicher Anwendungsbereich reicht von Werkzeugmaschinen über Hausgeräte bis hin zum Automobilbereich.

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 MRF einmal als Festkörper und zum anderen bei Überschreitung einer bestimmten Grenzlast als Flüssigkeiten zu behandeln sind.



5: Mögliche Grundanordnungen für MRF-Kupplungen

Aus der unterschiedlichen radialen Schubspannungsverteilung im festen und flüssigen Zustand resultiert, daß man durch eine geschickte Wahl von R_a und R_i bei der Scheibenkonfiguration erreichen kann, daß der Übergang zwischen starrer Verbindung und schlupfender Drehmomentübertragung ohne Drehmomentensprung erfolgt. Desweiteren bietet die Scheibenanordnung den fundamentalen Vorteil, daß bei Fluidentmischung aufgrund von Zentrifugalkräften die Grenzscherspannung nicht durch Partikelentmischung an einer Übertragungsfläche 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 Grenzscherspannung selbst unterliegt wegen der sehr viel höheren Curietemperatur der Partikel nur geringem Temperatureinfluß. MRF-Hersteller geben einen Einsatzbereich von -40°C - 150°C an.

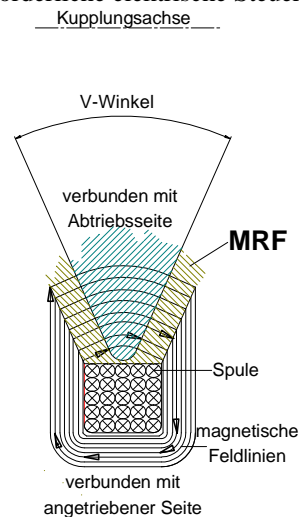
Zur Vermeidung der Überhitzung (besonders die im Leerlauf entstehende Wärme ist sicher abzuleiten) sind folgende Maßnahmen sinnvoll:

- große und stark strukturierte Kupplungsaußenflächen zur Gewährleistung einer größtmöglichen Oberfläche
- antreibendes Element liegt außen, damit auch bei Stillstand des abtreibenden Elementes ein turbulenter konvektiver Wärmeabtransport gegeben ist

4.2 Leerlaufdrehmoment

Da es technisch aufwendig wäre, zur gänzlichen Vermeidung eines Leerlaufdrehmomentes bei MRF-Kupplungen die MRF aus dem Drehmomentübertragungsspalt zu pumpen, wurden andere Möglichkeiten zur Verringerung des Leerlaufdrehmomentes gesucht. Dazu bietet sich in erster Linie eine Vergrößerung der Spaltdicke an, da das Leerlaufdrehmoment umgekehrt proportional zu dieser abnimmt. Dadurch vergrößert sich aber das zu magnetisierende MRF-Volumen, so daß man einen Kompromiß zwischen verfügbarer Ansteuerenergie und dem Minimum des Leerlaufdrehmomentes finden muß.

Als weitere Möglichkeit bietet sich eine V-förmige Ausbildung der Drehmomentübertragungsscheibe an, da durch diese Maßnahme die nicht zum übertragbaren Drehmoment beitragende benetzte Spaltfläche minimiert werden kann. Desweiteren wird durch eine sinnvolle Wahl des V-Winkels sowohl erreicht, daß die magnetische Induktion im Antriebsteil so hoch ist, daß es zu einer optimalen Ausnutzung der Magnetisierbarkeit des Materials, als auch zu einer Minimierung des elektrischen Spulenwiderstandes durch Vergrößerung der Querschnittsfläche kommt. Dadurch kann die erforderliche elektrische Steuerleistung verringert werden.



6: V-förmiger Übertragungsspalt

4.3 Magnetisierbarkeit der MRF

MRF 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 ($f_m = m_0 M \nabla H$) auf die MRF ausgenutzt werden. Diese Eigenschaft ist nutzbar, um eine berührungslose 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 Reibkräfte und ohne jeden Dichtungsverschleiß kontinuierlich in den Übertragungsspalten gehalten werden kann und zudem das Eindringen der MRF in unerwünschte Bereiche verhindert wird. Desweiteren zeichnet sie sich dadurch aus, daß keine elektrische Leistung zur dauerhaften Aufrechterhaltung der Dichtungswirkung erforderlich ist.

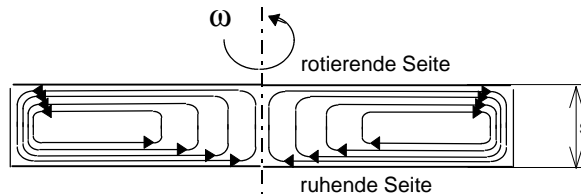
4.4 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit, welche eine MRF-Kupplung benötigt, wird in erster Linie durch die benötigte Zeit zum Auf- bzw. Abbau des Magnetfeldes bestimmt. Bedingt durch das minimale Volumen der Partikel erfolgt die Ausrichtung der Weißschen Bezirke in wenigen Millisekunden. In Versuchen wurde nachgewiesen, daß sich das gewünschte Drehmoment ca. 2-3 ms nach dem Aufbau der Flußdichte einstellt. Je nach Anforderung an die Re-

aktionszeit wird es für praktische Anwendungen erforderlich sein, den Magnetkreis günstig auszulegen und in die Ansteuerelektronik zu investieren.

4.5 MRF-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 Drehmomentes, stellt dies kein Problem dar, da die Partikel durch das Magnetfeld in ihrer radialen Position gehalten werden. Bei der Scheibenkonfiguration gibt es bei Reynoldszahlen ab 10^4 eine Zirkulationsbewegung des Fluides. An der rotierenden Seite wandert die MRF nach außen und an der nichtrotierenden Seite nach innen.



7: Fluidzirkulation

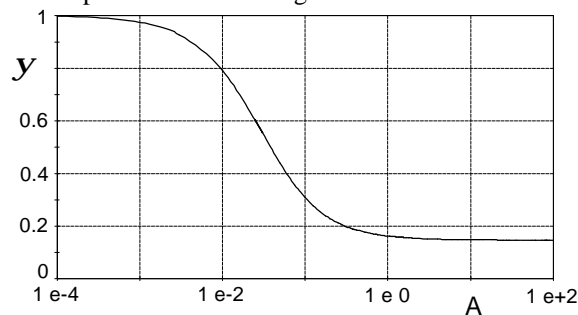
Unter Berücksichtigung der auf die Partikel wirkenden Zentrifugal- und Reibungskräfte, welche von der lokalen MRF-Geschwindigkeit abhängen, sowie unter Annahme kugelförmiger und nur kriechender Partikel läßt sich ein charakteristischer Parameter A ableiten, der die Stabilität gegen Entmischung charakterisiert:

$$A = \left(\frac{R_p}{s} \right)^2 \frac{\mathbf{n}_M (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_f)}{\mathbf{h}_f} \quad (2)$$

mit: R_p - Partikelradius; s - Spaltdicke; \mathbf{r}_p - Partikeldichte; \mathbf{r}_f - Dichte des Basisöls;

\mathbf{n}_M - Kinematische Viskosität der MRF

Trägt man das Verhältnis ψ zwischen nach innen und nach außen gerichtetem Partikelstrom über A auf, so kann man erkennen, daß ψ für kleiner werdendes A gegen 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 8 zeigt ebenfalls, daß A wenigstens kleiner als 0,1 sein muß, um überhaupt eine Verbesserung zu erzielen.



8: Stabilität gegen Entmischung vs. charakteristischem Parameter A

Da man bei Verwendung einer bestimmten MRF in einer Kupplung von den in Gleichung (2) vorkommenden Parametern lediglich die Spaltdicke s beeinflussen kann, ist es für die praktische Auslegung einer MRF-Kupplung erforderlich, diese nicht zu klein zu wählen. Für die im folgenden Kapitel beschriebene Versuchskupplung konnte in Versuchen gezeigt werden, daß durch Berücksichtigung obiger Überlegungen die MRF-Entmischung kein Problem darstellt.

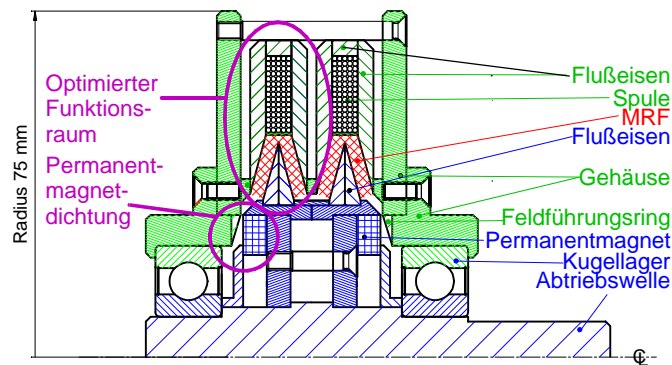
5. Versuchskupplung

Für die am Institut für Luft- und Raumfahrttechnik gebaute und getestete Versuchskupplung lagen folgende Entwurfsvorgaben zugrunde: übertragbares Drehmoment $M = 10 \text{ Nm}$; Nenndrehzahl $n = 3000 \text{ U/min}$; maximaler Außendurchmesser $D = 20 \text{ cm}$. Desweiteren wurden bei der Auslegung folgende Ziele angestrebt: A) - geringes Leerlaufdrehmoment B) - niedrige zur Steuerung erforderliche Leistungsaufnahme C) - geringes Gewicht und niedriges Trägheitsmoment D) - einfacher möglichst modularer Aufbau E) - einfache und preisgünstige Herstellbarkeit.

Für den Drehmomentübertragungsspalt wurde die 'Scheibenkonfiguration' gewählt, da diese aufgrund der günstigen Schubspannungsverteilung über den Radius im festen Zustand der MRF, einen ruckfreien Übergang vom

Festkörpermodus zum Flüssigkeitsmodus gewährleisten kann. Der Übertragungsspalt ist dabei V-förmig. Die Versuchskupplung besitzt eine Permanentmagnetabdichtung, die das Auslaufen der MRF verhindert und die Magnetisierbarkeit der MRF zur Erzeugung eines magnetischen Druckes ausnutzt.

Der V-Winkel wurde so optimiert, indem für gegebene Materialkennkurven, vorgegebene Außenabmessungen der Einheit Spule, Eisenteile und MRF, sowie für vorgegebene Spallänge und -breite, dann für eine Reihe von elektrischen Leistungen und V-Winkeln die daraus resultierende magnetische Induktion in der MRF berechnet wurde. Aus den erhaltenen 3-d Diagrammen ist dann für jede gewünschte magnetische Induktion der V-Winkel ablesbar, bei dem die optimal niedrige elektrische Leistung zur Erzeugung der Induktion erforderlich ist. 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, der durch eine mit der Eisenquerschnittsverringerung verbundenen Vergrößerung der Spulenquerschnittsfläche einhergeht, berücksichtigen.

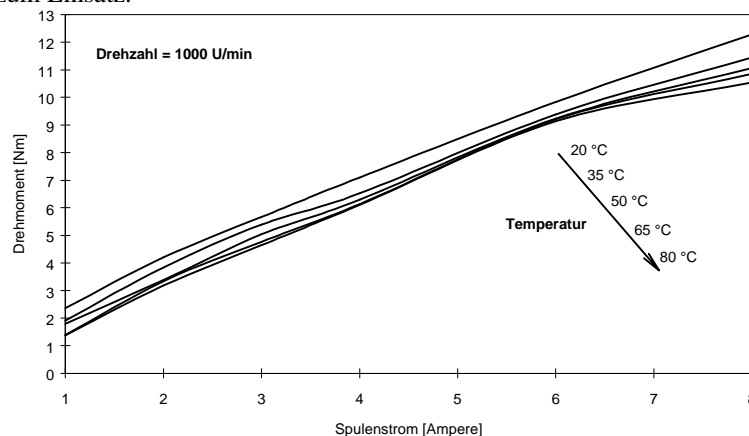


9: Aufbau der Versuchskupplung

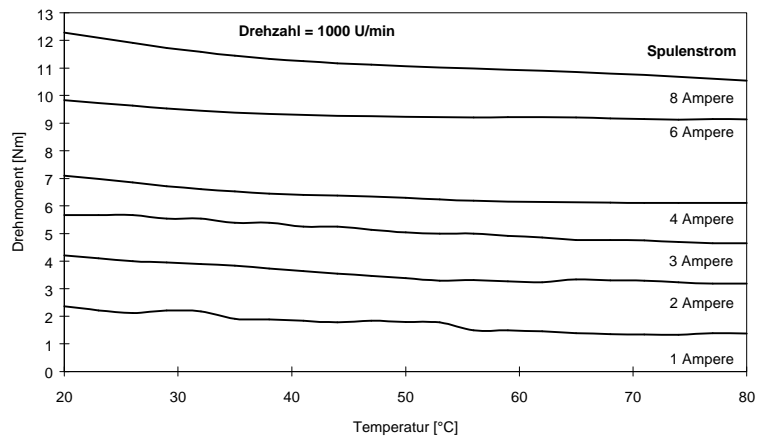
5.1 Gemessene Eigenschaften der Versuchskupplung:

Die Untersuchungen an der Versuchskupplung sollten vor allem Aufschluß über die Zusammenhänge zwischen Spulenstrom, Drehzahl und Drehmoment liefern, sowie Auskunft über den Einfluß von Temperatur, Fluidentmischung etc. geben. Die folgenden Diagramme zeigen das gemessene Drehmoment in Abhängigkeit von Spulenstrom, Temperatur und Drehzahl. Dabei ist besonders gut zu erkennen, daß der durch den Spulenstrom (bzw. die Flußdichte) steuerbare Drehmomentenbereich die durch Temperatur- und Drehzahlvariation hervorgerufenen Veränderungen um Größenordnungen übersteigt.

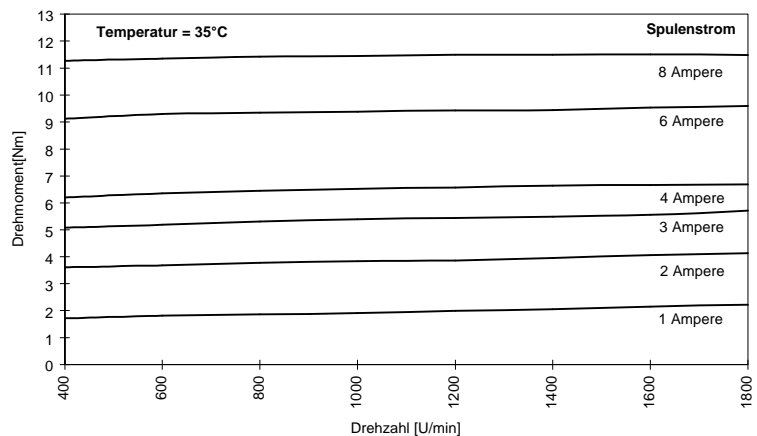
Bei den Messungen an der Versuchskupplung auf unserem Versuchsstand kam die MRF 132 LD der LORD-Corporation zum Einsatz.



Dia. 1: übertragenes Drehmoment vs. Spulenstrom für verschiedene Temperaturen



Dia. 2: übertragenes Drehmoment vs. Temperatur für verschiedene Spulenströme



Dia. 3: übertragenes Drehmoment vs. Drehzahl für verschiedene Spulenströme

6. Laufende Forschung

Neben der weiterführenden Entwicklung und Untersuchung anwendungsspezifischer Kupplungen wurde mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Innovationskolleges 'Magnetofluidynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten' ein Projekt in Angriff genommen, welches zum Ziel hat, die Eigenschaften von MRF, wie die Richtungsabhängigkeit der Viskosität und den Einfluß der Schergeschichte in ein numerisches Strömungsberechnungsprogramm 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 Programmes bis zum heutigen Tage liegen im Mangel an praktikablen Modellen für die Richtungsabhängigkeit zwischen Feldstärke und Schubspannung und in der fehlenden Erfahrung bei der Implementierung des Schergeschichteeinflusses bei MRF in Berechnungsprogramme. Aus diesem Grunde soll in diesem Projekt ein Modell für die nichtisotrope Viskosität für MRF entworfen und vor allem in einem Strömungsberechnungsprogramm getestet werden.

Literaturhinweise:

- [1] Block, H.; Electrorheology; Journal of Physics D; 1988; Band 21
- [2] Halsey, T.C.; Electrorheological Fluids-Structure and Dynamics; Advanced Materials; 1993; Band 5; Nr. 10
- [3] Wolff, C.; Elektorrheologische Flüssigkeiten-Neue Möglichkeiten in der Hydraulik; Ölhydraulik und Pneumatik; 1994, Band 38, Nr. 5
- [4] Rosensweig, R.E., On magnetorheology and electrorheology as states of unsymmetric stress, Journal of Rheology, 1995, Band 39, Nr. 1
- [5] Lemaire, E.; Yield stress and structuration of magnetorheological suspensions, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1993, Band 122
- [6] Rosensweig, R.E.; Ferrohydrodynamics, Dover Publications, Mineola, 1998