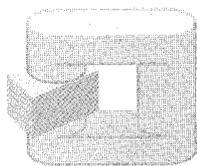


Messungen an MR-Flüssigkeiten mit Rotationsviskosimetern

Measurements of MR-Fluids using Rotational Viscometers

H. Janocha, B. Rech
Lehrstuhl für Prozeß-
automatisierung (LPA),
Universität des
Saarlandes,
Saarbrücken,
Germany



1 Magnetorheologischer Effekt

In den vierziger Jahren wurde erstmals über Suspensionen aus magnetischen Partikeln berichtet, die auf das Anlegen eines magnetischen Feldes mit einer reversiblen Änderung ihres rheologischen Verhaltens reagieren [1]. Diese Erscheinung, die sowohl bei Gleich- als auch bei Wechselfeldern auftritt, wird magnetorheologischer Effekt (MR Effekt) genannt und man spricht von magnetorheologischen Flüssigkeiten (MRFs). Der MR Effekt entsteht dadurch, daß solange das magnetische Steuerfeld anliegt ($H > 0$), die dispergierten Partikel ausgerichtet werden und sich Ketten und Agglomerate entlang der magnetischen Feldlinien aufbauen. Diese Strukturen sind mechanisch belastbar und der Grund für die Bildung einer von der Feldstärke abhängigen Fließgrenze und für eine durch die Feldamplitude steuerbare Zunahme der übertragbaren Schubspannung. Ohne magnetisches Steuerfeld ($H = 0$) verhält sich die ideale MRF wie eine newtonsche Flüssigkeit, d. h. die Schubspannung hängt linear von der Scherrate D ab.

Dieses Verhalten kann durch einen sogenannten Bingham-Körper beschrieben werden, bei dem die Fließgrenze τ_0 mit wachsender Feldstärke zunimmt. In Abb. 1 sind Schubspannung-Scherrate-Kennlinien (Fließkurven) einer idealen MRF dargestellt.

MRFs dürfen nicht mit Ferrofluiden verwechselt werden, die aus ferromagnetischen Teilchen bestehen, aber unter dem Einfluß eines magnetischen Feldes nur eine sehr geringe Zunahme des Fließwiderstandes zeigen. Dies wird dadurch erreicht, daß die Partikeldurchmesser nur einige Nanometer betragen und die Partikel mit einer Beschichtung versehen sind, die eine Haftung verhindert und ein Abgleiten bewirkt.

2 Reale MRF

Durch die Steuerbarkeit des rheologischen Verhaltens können MRFs als einfache, schnell reagierende Schnittstellen zwischen Steuerelektronik und mechanischem

Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRFs) ändern ihre Fließeigenschaften unter dem Einfluß magnetischer Felder. Zur Bestimmung ihres rheologischen Verhaltens können Rotationsviskosimeter dienen, die mit Elektromagneten zur Erzeugung von magnetischen Feldern ausgestattet sind und durch deren Meßanordnungen der magnetische Fluß gezielt geführt wird. Ausgehend von einer kurzen Darstellung der wesentlichen MRF-Eigenschaften werden die Anforderungen an einen MRF-Meßplatz abgeleitet und wichtige, in der meßtechnischen Praxis auftretende Fragen behandelt.

The flow properties of magnetorheological fluids (MRFs) change when subjected to a magnetic field. Rotational viscometers that have been fitted with electromagnets to induce a magnetic field can be used to measure the rheological properties of MRFs. In this article, representative MRF properties are shown and the requirements for measuring MR-fluids as well as important problems arising in measurement practice are discussed.

1 Magnetorheological Effect

In the 1940s the first reports appeared of suspensions filled with magnetic particles that showed reversible changes in their rheological behavior when subjected to a magnetic field [1]. This effect, which occurs under both direct and alternating fields, is known as the magnetorheological effect (MR effect) and fluids exhibiting this behavior are termed magnetorheological fluids (MRFs). The MR effect results from imposition of a magnetic field ($H > 0$) which orients the dispersed particles and leads to alignment of chains and agglomerates of particles along the

magnetic field lines. The developed structures are subject to mechanical deformation; their presence accounts for the yield stress (which depends on the field strength) and the observed increase in shear stress exhibited by the MRF (which can also be controlled by the field amplitude). In the absence of a magnetic field ($H = 0$) an ideal MRF exhibits Newtonian behavior, i. e., the shear stress τ is directly proportional to the shear rate D .

An MRF can be described as a Bingham fluid, whereby the yield stress τ_0 increases with increasing field strength. The shear stress versus shear rate relationship (flow curve) for an ideal MRF is shown in Figure 1.

MRFs should not be confused with ferro-fluids, which consist of ferromagnetic particles but exhibit only slight increase in the flow resistance as a function of magnetic field strength. The minimal effect exhibited by ferro-fluids arises because the iron particles have a diameter of only several nanometers and are coated to prevent agglomeration.

2 Real MRFs

As a result of their controllable rheological response, MRFs can function as simple, fast-reacting connections between electronic and mechanical systems, such as in clutches, oscillation dampers, bearings, and valves in hydraulic systems [2].

Abb. 4:
Fließkurven einer Nano-MRF (Quelle: BASF)

Fig. 4:
Flow curves of a nano-MRF (source BASF)

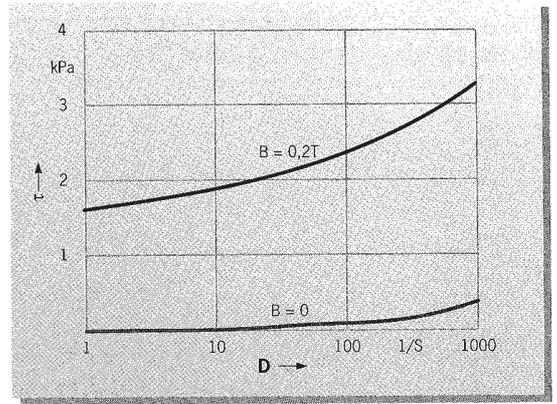
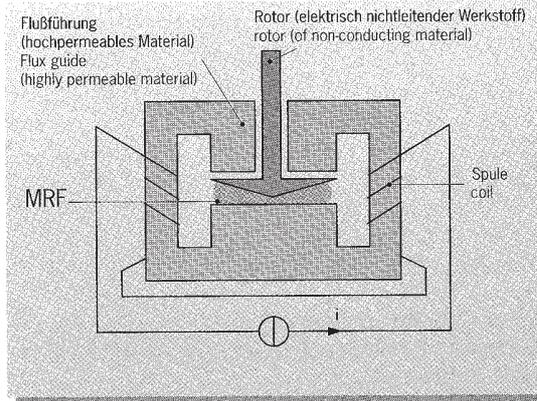


Abb. 3b:
Meßanordnungen für
MRF-Viskosimeter:
Kegel-Platte-Anordnung
Fig. 3b:
Measurement arrangement
for the MRF-viscosimeter:
cone and plate

Kegel-Platte-Meßanordnungen zur MRF-Vermessung können so konstruiert werden, daß ein Kegel aus elektrisch nichtleitendem Material den Rotor bildet, der sich zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten dreht. Die Flußführung bildet den Stator, wobei ein Polschuh als Scherungsfläche ausgeführt ist (Platte) und der zweite eine Durchführung für den Rotor besitzt (vgl. Abb. 3 b).

Magnetische Feldlinien treten senkrecht an der Stirnseite einer magnetischen Flußführung in ein Material mit wesentlich niedriger Permeabilität ein. Weil außerdem der Kegelöffnungswinkel klein und die Differenz zwischen der Permeabilität der MRF und der des Rotormaterials gering ist, können die magnetischen Feldlinien in der MRF in guter Näherung als senkrecht zur Strömungsrichtung angenommen werden.

Zur besseren Handhabung kann die Flußführung teilbar ausgeführt werden. Im Betrieb ziehen sich die Trennflächen durch die Kraftwirkung des Magnetfeldes gegenseitig an. Damit dabei kein störender Luftspalt entsteht, sollten die Flächen möglichst eben sein.

Zur Flußführung wird ein Material mit geringer Remanenz benötigt. Geeignet ist z. B. Weicheisen, in dem aber bei Wechselfeldansteuerung Wirbelströme entstehen, die das Magnetfeld abschwächen und das Flußführungsmaterial erwärmen. Wirbelstromverluste können durch den Einsatz von geschichteten Trafoblechen oder durch die Verwendung von Ferrit verringert werden. Allerdings besteht in der Praxis eine eingeschränkte Bearbeitungsmöglichkeit dieser Materialien.

Zu berücksichtigen ist ebenso, daß die Magnetisierung M eines hochpermeablen Materials begrenzt ist. Wenn sich das Material der Flußführung in der Sättigung befindet, führt eine Erhöhung der Durchflutung θ der Erregerspulen zu einer deutlichen Zunahme des Energieanteils des Streufeldes. Dadurch weicht die tatsächliche Feldform von der Sollfeldverteilung ab. Weiterhin können durch das Streufeld EMV-Probleme auftreten, wie z. B. Störungen der Steuer- und Auswerteelektronik des Viskosimeters. Aus diesem Grund sollte die magnetische Feldstärke kleiner bleiben als die Sättigungsfeldstärke der Flußführung.

Aufgrund auftretender Wirbelstromverluste und Streufelder ist es nicht möglich von einer Messung des Spulenstromes genau auf die magnetische Flußdichte B zu schließen. Diese muß deshalb gemessen werden, z. B. mit Hilfe einer Hall-Sonde.

Cone and plate arrangements can also be designed for MRF measurements by fabricating the cone from non-conducting material and rotating it between the pole pieces of an electromagnet. As shown in Figure 3b, the flux guide forms the stator and one of the pole pieces serves as the flat plate. The second pole piece has a duct through which the rotor extends.

Magnetic field lines parallel to the front face of a magnetic flux guide enter a material with relatively low permeability. Because the cone angle is small and the difference in permeability of the MRF and the rotor material is slight, the magnetic field lines within the MRF can be considered to be approximately perpendicular to the flow direction.

For better handling, the flux guide can be fabricated in pieces. In this case, the interfaces will be attracted to each other as a result of the magnetic field. The interfaces must be as flat as possible to prevent air gaps that would distort the magnetic field.

For fabricating the flux guide, a material with a small retentivity is required. Soft iron is an example of a suitable material; however, when used with alternating fields, vortices will form, causing a weakening of the magnetic field and warming of the iron. Vortex losses can be minimized by incorporating coated transformer plate or ferrite. However, in practice, the possibilities for machining these materials are limited.

One must also account for the inherent limitation in the magnetization M of a highly permeable material. When the flux guide material becomes saturated, increasing the magnetic flux θ of the exciter coils leads to a sharp increase in the energy content of the stray field. As a result, the actual field deviates from the field distribution desired. The stray field can also cause EMC problems such as disturbing the control or data reduction electronics of the viscosimeter. Therefore, the magnetic field strength should always be lower than the saturation field strength of the flux guide.

Because of the presence of vortex losses and the stray field, it is not possible to precisely determine the magnetic flux density B from measurements of the coil flux. The magnetic flux density must thus be measured, e. g., using a Hall probe.

6 Measurement Examples

Figures 4 and 5 show examples of measurements using a rotational viscosimeter with a double gap (gap width = 0.8 mm), in which a polyamide rotor with a diameter $d = 20$ mm was employed.

A nano-MRF obtained from BASF was measured. Figure 4 shows flow curves for flux densities of $B = 0$ and $B = 0.2$ T. Figure 5 shows the MR effect

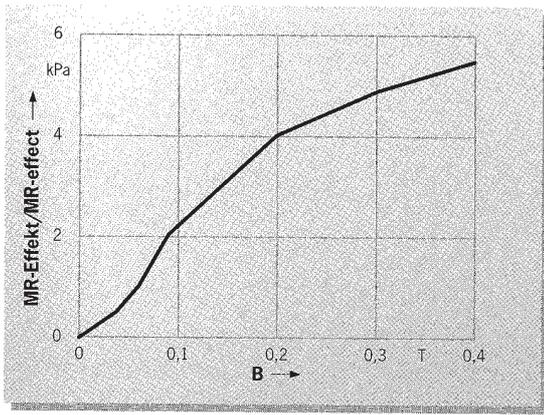


Abb. 5:
MR-Effekt einer Nano-MRF (Quelle: BASF)

Fig. 5:
MR-effect of a nano-MRF (source BASF)

6 Meßbeispiele

In den Abbildungen 4 und 5 sind Meßbeispiele gezeigt, die unter Verwendung eines Rotationsviskosimeters mit Doppelspalt-Meßanordnung aufgenommen wurden, bei dem der Rotor aus Polyamid einen Durchmesser von $d = 20$ mm und die beiden Scherungsspalte jeweils eine Breite von $h = 0,8$ mm besitzen.

Die Messungen wurden an einer Nano-MRF der Firma BASF durchgeführt. Abb. 4 zeigt Fließkurven bei Flußdichten von $B = 0$ und $B = 0,2$ T. In Abb. 5 ist von der gleichen MRF als Maß für die Steuerbarkeit des Fließverhaltens der MR-Effekt $\tau(B) - \tau(0)$ dargestellt, d. h. die Differenz zwischen der Schubspannung mit und der Schubspannung ohne magnetisches Feld in Abhängigkeit von der Flußdichte. Der nichtlineare Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke H und der Flußdichte B wurde während der Messung mit Hilfe einer Hall-Sonde bestimmt.

7 Ausblick

Magnetorheologische Flüssigkeiten eröffnen durch die Steuerbarkeit ihres Fließverhaltens die Möglichkeit, bekannte Bauteile mit verbesserten Eigenschaften und auch neue Anwendungen zu realisieren. Der Vorteil besteht darin, daß MRF-Bauteile im Vergleich zu konventionellen Lösungen oft einfacher und kompakter aufgebaut werden können. So werden beispielsweise keine zusätzlichen mechanischen Teile wie Absperrkörper bei einem Ventil und mechanische Stellglieder, wie z. B. elektrische Stellmotoren, benötigt.

Der Einsatz von MRFs erfordert aber auch ein Systemdenken, das dem komplexen rheologischen Verhalten dieser Flüssigkeiten Rechnung trägt und insbesondere die Ansteuerelektronik zur Felderzeugung berücksichtigt. Da die Fließeigenschaften von MRFs durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst werden und zur Zeit keine einheitlichen Vorschriften für ihre Charakterisierung existieren, konzentrieren sich wesentliche Anstrengungen im Forschungsschwerpunkt „Aktoren mit steuerbaren Flüssigkeiten“ des Lehrstuhls für Prozeßautomatisierung (LPA) und des kooperierenden Dienstleistungszentrums D*ASS darauf, standardisierte Meßverfahren für MRFs zu erarbeiten. Diese sollen sich an den bereits vorliegenden Ergebnissen einer vom D*ASS organisierten ERF-Meßtechnik-initiative orientieren, die das Ziel hat, eine Standardisierung der ERF-Meßtechnik zu erreichen.



$\tau(B) - \tau(0)$ as a function of B for the same MRF. The MR effect, i. e., the difference between the shear stress with and without an applied magnetic field, is a measure of the controllability of the flow behavior. A Hall probe was used to measure the nonlinear dependence of the magnetic field strength H on the flux density B during the experiment.

7 Outlook

As a result of their controllable fluid properties, magnetorheological fluids offer the possibility for fabrication of new parts with improved properties and even the creation of completely new applications. MRF parts are often simpler to build and more compact than currently used items. For example, valves built using this concept would not require mechanical shut-off parts and servo components such as electrical servo motors would not be needed.

Application of MRFs also requires a systems engineering approach that includes accounting for the complex rheological behavior of the MRF and the electronic controls necessary to create a magnetic field. The flow properties of MRFs are dependent on many parameters and there are currently no standardized methods for their characterization. Therefore, under the research area “Actuators with controllable fluids” the Chair for Process Automation (LPA) and the Consultant Agency D*ASS are cooperating to develop standardized methods for characterizing MRFs. These efforts will be patterned after an existing ERF-measurement initiative organized by D*ASS, which is directed towards development of standardized measurement techniques for ER-fluids.



- [1] Rabinow, J., AIEE Transactions, 67 (1948) 1308-1315.
- [2] Kordonsky, W., J. Intellig. Mat., Syst. and Struct., Vol. 4, (1993), p. 65-69
- [3] Carlson, J. D., Proc. Actuator 94, p. 261-270
- [4] Kormann, Cl.; Laun, M.; Klett, G., Proc. Actuator 94, p. 271-274
- [5] Janocha, H.; Rech, B.; Bolter, R., Proc. Actuator 94, p. 271-274
- [6] Janocha, H.; Rech, B., Proc. 4th Int. Conf. on ER Fluids (1993), p. 344-357
- [7] Janocha, H.; Rech, B., Rheology 93, Vincentz Verlag, p. 39-47