

# Meßfehler bei der Untersuchung von ERFs mit Rotationsviskosimetern

## Measurement Errors during Characterization of ERFs with Rotational Viscometers

Die Fließeigenschaften elektrorheologischer Flüssigkeiten (ERFs) sind durch elektrische Felder steuerbar. Eine Untersuchung der Abhängigkeit der Schubspannung von der Scherrate und der Stärke des angelegten elektrischen Feldes kann mit Hilfe von Rotationsviskosimetern mit elektrisch isolierten Meßanordnungen durchgeführt werden. Die bisher verfügbaren kommerziellen Viskosimeter sind nicht für die Vermessung von ERFs konstruiert, sondern stellen lediglich umgerüstete Standardviskosimeter dar. Bei ihnen können durch die Wirkung der ERF-Steuerfelder Störungen und Meßfehler auftreten. Dieser Beitrag erläutert die wichtigsten Fehlerursachen. Außerdem werden zur Reduzierung der Meßunsicherheit notwendige Anforderungen an ERF-Rotationsviskosimeter sowie an das Meßverfahren und die Meßauswertung behandelt.

### 1 Elektrorheologische Flüssigkeiten

Elektrorheologische Flüssigkeiten (ERFs) ändern unter dem Einfluß elektrischer Felder reversibel und kontinuierlich steuerbar ihre Fließeigenschaften. Konventionelle ERFs sind Suspensionen aus einer Trägerflüssigkeit mit geringer elektrischer Leitfähigkeit (z. B. Siliconöle), in die polarisierbare Feststoffteilchen mit Abmessungen zwischen 1 µm und 100 µm dispergiert sind. Ihr Anteil an der ERF reicht üblicherweise von 30 % bis 50 % [1], [2], [3].

Ohne Steuerfeld liegt die typische Viskosität dieser ER-Suspensionen im Bereich von hundert bis einigen hundert mPa s. Ein angelegtes elektrisches Feld führt zu einer Polarisierung der suspendierten Teilchen, wodurch sie sich ausrichten und mechanisch belastbare Ketten entlang der elektrischen Feldlinien bilden. Dadurch zeigen ER-Suspensionen neben einer Zunahme des Fließwiderstandes das Auftreten einer Fließgrenze, die von der Stärke des angelegten Feldes abhängt. Mit elektrischen Feldstärken von 5 kV/mm bis 8 kV/mm lassen sich bei ihnen typischerweise Schubspannungswerte in der Größenordnung von 5 kPa erreichen.

Neben den konventionellen ERFs mit dispergierten Feststoffteilchen sind vor kurzem homogene ERFs auf der Basis von oligomeren Carbonsäuren und ihren Seifen in Mineralöl entwickelt worden, bei denen ebenfalls der Fließwiderstand durch ein elektrisches Feld steuerbar ist [4]. Das Wirkprinzip dieser homogenen ERFs wird zur Zeit erforscht. Im Unterschied zu ER-Suspensionen zeigen sie unter Feldeinfluß keine Fließgrenze. Weiterhin treten bei ihnen nicht

The flow properties of electrorheological fluids (ERFs) can be controlled via electric fields. The dependence of shear stress on shear rate and on the applied electric field strength can be investigated using a rotational viscometer equipped with electrically isolated test fixtures. Commercially available viscometers are not designed for ERF testing and therefore standard viscometers have been modified for this purpose. However, application of an electric field can produce deviations and lead to measurement inaccuracies when using such devices. This paper describes the primary causes of such deviations. In addition, methods for reducing measurement uncertainty are discussed, including modifications to the ERF rotational viscometer itself and changes in the measurement procedure and data reduction techniques.

### 1 Electrorheological Fluids

The flow properties of electrorheological fluids (ERFs) can be reversibly and continuously controlled by application of an electric field. Conventional ERFs are suspensions that consist of a carrier fluid with very low electrical conductivity (such as silicone oils) and polarizable solid particles with dimensions between 1 µm and 100 µm. The solids content usually ranges from 30 % to 50 % [1], [2], [3].

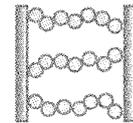
The viscosity of such ER suspensions ranges from hundred to several hundred mPa s in the absence of an electric field. Application of such a field causes polarization of the suspended particles, leading to formation of oriented, mechanically deformable chains along the direction of the electric field lines. As a result, ER-suspensions exhibit a thickening effect as well as a yield stress. The magnitude of these effects is dependent on the strength of the applied field. Using an electric field from 5 kV/mm–8 kV/mm typically leads to shear stresses in the test fluid on the order of 5 kPa.

#### Dr.-Ing. Bernd Rech

Jahrgang 1961, studierte an der Universität des Saarlandes Elektrotechnik, wo er auch als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war und über ERF-Aktoren promovierte. Zur Zeit ist er Forschungsmitarbeiter bei einem deutschen Automobilhersteller.

born in 1961, studied electrotechnology at the University of Saarland, where he received his doctorate in the area of ERF actuators. He is presently employed as a researcher with a German automobile manufacturer.

Bernd Rech,  
Wolfsburg, Germany



Drehmomentsignal wird ein Anfangswert des Drehmomentes  $M_i$  durch Extrapolation auf den Drehmomentwert des Anschlagzeitpunktes des elektrischen Feldes ermittelt. Aus den Anfangswerten von  $M_i(t)$  wird für jede Scherrate  $D$  und für jede Steuerfeldstärke  $E$  aus den mit dem kurzen und dem langen Innenzylinder ermittelten Drehmomentwerten die ERF-Schubspannung nach Gleichung (2) ermittelt.

#### 4.5 Meßbeispiele zur Wirkung der Randeinflüsse

Unter Verwendung dieses Differenzenverfahrens wurden die Auswirkungen der Randeinflüsse und der Endflächengeometrie des Innenzylinders auf das gemessene Drehmoment untersucht. Für die Messungen fanden Zylindermeßanordnungen Verwendung, deren Innenzylinder sich nur in ihrer Höhe und damit in der Länge des Meßspaltes sowie in der Geometrie der Zylinderendflächen unterscheiden und deren Außenzylinder einen Keramikboden besitzt (Abb. 4). Die Spaltweite betrug 0,5 mm. Die Messungen wurden bei einer Temperatur von 40 °C mit einer ERF-Suspension aus Polyurethanpartikel in Siliconöl [2] durchgeführt. Um die Wirkung der Elektrophorese zu vermeiden, diente zur ERF-Ansteuerung eine mittelwertfreie sinusförmige Wechselspannung. Ihre Frequenz betrug 50 Hz.

Messungen mit den beiden Innenzylindern mit konischem Boden zeigten, daß die Differenz zwischen den Drehmomentwerten der beiden Innenzylinder  $\Delta M_i$  mit zunehmender Drehzahl und mit größer werdender Feldstärke steigt. Das gleiche Verhalten kann ebenso bei Innenzylindern mit flachem Boden beobachtet werden. Ein Vergleich der mit Innenzylindern mit flacher und konischer Endfläche ermittelten Drehmomente liefert in beiden Fällen identische Werte. Dies gilt sowohl für die langen als auch für die kurzen Meßzylinder. Daraus folgt, daß bei Verwendung eines Außenzylinders mit elektrisch nichtleitendem Becherboden die Geometrie der Zylinderendfläche keinen Einfluß auf die Meßwerte hat [8].

In Abb. 5 werden die mit einem Zylinder der Länge  $L_i = 60$  mm und planem Boden gemessenen Drehmomente  $M_i$  und die errechneten Werte  $M_{\text{gap}}$  miteinander verglichen. Hier ist zu erkennen, daß das zusätzliche Drehmoment  $M_{\text{dis}}$  durch die Randeinflüsse mit wachsender Feldstärke und größer werdender Drehzahl zunimmt. Während  $M_{\text{dis}}$  bei einer elektrischen Feldstärke von  $\dot{E} = 1$  kV/mm vergleichsweise klein ist, werden bis zu über 20% des übertragenen Drehmoments bei höheren Feldstärken von den Randeinflüssen verursacht.

Bei der Untersuchung homogener ERFs mit Zylinderviskosimetern treten keine Probleme mit Elektrophorese oder Dielektrophorese auf, weil sie keine suspendierten Teilchen enthalten. Aber auch hier ist die Wirkung von Randeinflüssen durch das elektrische Steuerfeld zu berücksichtigen. Aus diesem Grund soll-

Fig. 5 shows a comparison of torque values  $M_i$  and the resulting calculated values  $M_{\text{gap}}$  for measurements with a cylinder of length  $L_i = 60$  mm and a planar bottom surface. One sees that the additional torque  $M_{\text{dis}}$  resulting from edge effects increases with increasing field strength and rotation rate. While  $M_{\text{dis}}$  is relatively small at a field strength of  $\dot{E} = 1$  kV/mm, at higher field strengths up to 20% of the total torque value is the result of edge effects.

Because they contain no suspended particles, electrophoretic and dielectrophoretic effects do not occur when homogeneous ERFs are characterized with cylindrical viscometers. However, edge effects from the electric field must still be considered. Therefore, one should use the difference technique described above to accurately determine the shear stress within the gap.

#### 5 Conclusions and Outlook

To use electrorheological fluids (ERFs) in newly designed actuators, information on the electrical and rheological properties of the ERFs is necessary. Such fluids can be characterized under shear using cylindrical viscometers with electrically insulated fixtures. Employing commercial viscometers can result in faulty measurements due to disturbances to the transducer and/or data reduction electronics caused by the applied electric field. Other sources of error include friction and the electrical resistance of the high voltage lead connected to the rotating member, as well as imperfect alignment of the inner and outer cylinders.

The special properties of ERFs may also lead to errors. At certain frequencies of alternating current, the viscometer may undergo mechanical

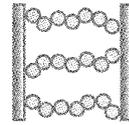
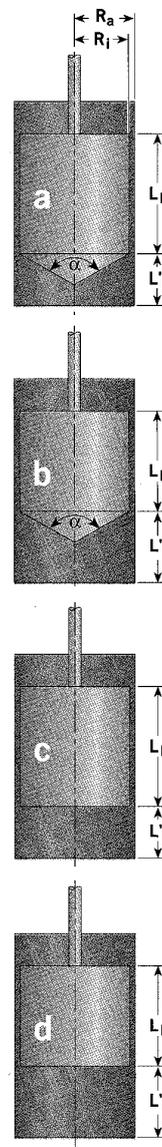


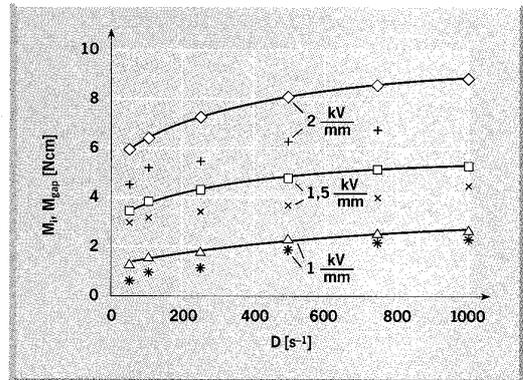
Abb. 4:  
Zylindermeßanordnungen:  
 $L_i = 60$  mm,  $L_k = 48$  mm,  
 $L'_i = 20$  mm,  $L'_k = 38$  mm,  
 $R_i = 20,5$  mm,  $R_o = 21$  mm,  
 $\alpha = 120^\circ$

Fig. 4:  
Cylindrical fixtures:  
 $L_i = 60$  mm,  $L_k = 48$  mm,  
 $L'_i = 20$  mm,  $L'_k = 38$  mm,  
 $R_i = 20.5$  mm,  $R_o = 21$  mm,  
 $\alpha = 120^\circ$



**Abb. 5:**  
Scherrateabhängigkeit der Drehmomente  $M_t$  (Symbole:  $\diamond$ ,  $\square$ ,  $\triangle$ ) und  $M_{gap}$  (Symbole:  $+$ ,  $x$ ,  $*$ ) bei verschiedenen Feldstärken

**Fig. 5:**  
Shear rate as a function of torque  $M_t$  (symbols:  $\diamond$ ,  $\square$ ,  $\triangle$ ) and  $M_{gap}$  (symbols:  $+$ ,  $x$ ,  $*$ ) at various field strengths



ten sie, um die tatsächlich im Scherungsspalt übertragene Schubspannung zu ermitteln, ebenso wie ER-Suspensionen mit Hilfe des oben beschriebenen Differenzenverfahrens vermessen werden.

### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Konstruktion von Aktoren mit elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERFs) sind Informationen über die elektrischen und rheologischen ERF-Eigenschaften erforderlich. Untersuchungen bei einer Scherbelastung der ERF können mit Hilfe von Zylinderviskosimetern mit elektrisch isolierten Meßanordnungen durchgeführt werden. Die zur Zeit verfügbaren kommerziellen Viskosimeter stellen lediglich modifizierte Standardviskosimeter dar. Bei ihnen können unter anderem Fehler aufgrund von Störungen der Meßaufnehmer und der Auswertelektronik durch die ERF-Steuerspannung auftreten. Weitere Fehlerursachen sind die Reibung und der elektrische Übergangswiderstand der Hochspannungszuführung auf den rotierenden Teil der Meßanordnung sowie eine exzentrische Anordnung von Außen- und Innenzylinder.

Auch die besonderen Eigenschaften von ERFs selbst können zu Fehlern führen. So kann bei einer Wechselspannungsansteuerung das Viskosimeter zu mechanischen Schwingungen angeregt werden. Weiterhin tritt bei ER-Suspensionen eine Beeinflussung der Meßwerte durch Elektrophorese und Dielektrophorese auf. Außerdem liefern Streufelder an den Kanten des Innenzylinders zusätzliche Drehmomentanteile. Meßunsicherheiten lassen sich durch eine geeignete konstruktive Ausführung des Viskosimeters und durch die Ermittlung der ERF-Schubspannung mit Hilfe eines Differenzenverfahrens minimieren, bei dem die Messungen mit Innenzylindern unterschiedlicher Länge bei diskreten Scherraten durchgeführt werden.

Weil bisher keine Standardisierung der ERF-Meßtechnik existiert, werden ERFs von den verschiedenen Herstellern häufig unter unterschiedlichen Bedingungen vermessen. Das macht die ERFs nur eingeschränkt vergleichbar und erschwert die Konstruktion von ERF-Aktoren. Aus diesem Grund sollte für die Zukunft eine praxisorientierte Standardisierung der ERF-Meßtechnik angestrebt werden.

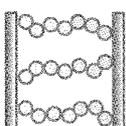
oscillation. In addition, when using ER suspensions the measurements can be affected by electrophoresis and dielectrophoresis. Also, residual field effects at the cylinder edges can cause additional contributions to the torque. Measurement uncertainty can be minimized by appropriate design of the viscometer as well as the use of a difference procedure to determine the ERF shear stress. In this procedure, measurements are conducted at discrete shear rates with inner cylinders of different lengths.

Because there are currently no standards for measuring ERFs, materials made by different manufacturers are frequently tested under varying conditions. This makes comparisons difficult and complicates the design of ERF actuators. For these reasons, a practically oriented standardization of ERF measurement techniques should be a goal for the future.

**Rh**



- [1] Block, H.; Kelly, J. P.: Materials and Mechanisms in Electro-rheology. Proc. 2nd Int. Conf. on ER Fluids, pp. 1-26
- [2] Bayer AG: Produktinformation RHEOBAY VP Al 3565 und VP Al 3566. Leverkusen, 1994
- [3] N.N.: Electrorheological Fluids - A Research Needs Assessment. Final Report, U.S. Department of Energy, 1993
- [4] DE 41 39 065 A1
- [5] Rech, B.: Aktoren mit elektrorheologischen Flüssigkeiten. In „Technischer Einsatz Neuer Aktoren“, Jendritza, D. J., expert verlag GmbH, Renningen-Malmsheim, 1995
- [6] Janocha, H.; Rech, B.: Determination of Rheological and Electrical Parameters of ER Fluids Using Rotational Viscometers. Proc. 4th Int. Conf. on ER Fluids, pp. 344-357
- [7] Hellbrück, St.: Einsatzmöglichkeiten von elektrisch steuerbaren Flüssigkeiten in hydrodynamischen Gleitlagern zur Exzentrizitätsverminderung. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Saarbrücken, 1995
- [8] Rech, B.: Aktoren mit elektrorheologischen Flüssigkeiten. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Verlag Mainz, Aachen, 1996
- [9] Stangroom, J. E.: Basic Consideration in Flowing Electro-rheological Fluids. J. of Statistical Phys., Vol. 64 (1991), pp. 1059-1072



**Rh**