

# Experimentelle Untersuchung von ER-Suspensionen im Squeeze-mode

## Experimental Investigation of ER-Suspensions in the Squeeze Mode

Die Fließeigenschaften elektrorheologischer Flüssigkeiten (ERFs) sind durch elektrische Felder steuerbar. Zur Felderzeugung dienen Elektrodenanordnungen, zwischen denen sich die ERF befindet und an die eine elektrische Hochspannung gelegt wird. Bei einer Änderung des Elektrodenabstands (Squeeze-mode) tritt eine Quetschströmung auf, wobei die zur Abstandsänderung nötige Normalkraft feldstärkeabhängig ist. Dieser Beitrag erläutert den Aufbau eines Squeeze-mode-Meßstandes für Elektrodenabstände im Bereich weniger Millimeter und Abstandsänderungen im Submillimeterbereich. Außerdem wird der experimentell ermittelte Einfluß des Zeitverlaufes der Steuerfeldstärke auf die auftretende Normalspannung bei einer ER-Suspension beschrieben.

### 1 Einleitung

Elektrorheologische Flüssigkeiten (ERFs) ändern unter dem Einfluß elektrischer Felder reversibel und kontinuierlich steuerbar ihre Fließeigenschaften. Dadurch lassen sie sich in Energiewandlern von Aktoren (ERF-Aktoren) einsetzen, wie z. B. in Kupplungen, Schwingungsdämpfern, Motorlagern und Ventilen in Hydrauliksystemen. Hierbei werden als Energiesteller zur Felderzeugung Hochspannungsquellen benötigt [5], [7]. Energiewandler in ERF-Aktoren besitzen Elektrodenanordnungen, zwischen denen sich die ERF befindet und an welche die elektrische Steuerspannung gelegt wird. Es sind drei Wirkprinzipien zu unterscheiden: das Scherungsprinzip (Shear-mode), das Strömungsprinzip (Flow-mode) und das Quetschprinzip (Squeeze-mode).

Beim Scherungsprinzip bewegen sich die Elektroden relativ zueinander (Prinzip der Kupplung). Durch ein elektrisches Feld sind die dabei übertragene Kraft oder das Moment steuerbar. Beim Strömungsprinzip fließt die ERF zwischen zueinander stillstehenden Elektroden (Prinzip des Ventils). Ein elektrisches Feld beeinflusst hier den Fließwiderstand. Schließlich verursacht beim Quetschprinzip eine Abstandsänderung der parallelen Elektrodenflächen eine Quetschströmung, wobei die zur Elektrodenbewegung notwendige Normalkraft durch ein elektrisches Feld steuerbar ist [7].

Konventionelle ERFs sind Suspensionen aus einer Trägerflüssigkeit mit geringer elektrischer Leitfähigkeit (z. B. Siliconöle), in die polarisierbare Feststoffteilchen mit Abmessungen zwischen 1  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  dispergiert sind [1], [2], [5]. Ein angelegtes elektrisches Feld führt zu einer Polarisierung der suspendierten Teilchen, wodurch sie sich ausrichten und mechanisch

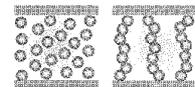
The flow properties of electrorheological fluids (ERFs) can be controlled via electric fields. A field can be produced by positioning the ERF between electrodes and applying a high voltage. Changing the gap between the electrodes induces a squeeze flow; the normal force necessary to effect the gap change depends on the electric field strength. This paper describes construction of a squeeze mode fixture for electrode gaps on the order of a few millimeters, with corresponding gap changes in the submillimeter range. In addition, we present experimental measurements showing how the time-dependent electric field strength influences the resulting normal stresses in an ER-suspension.

### 1 Introduction

The flow properties of electrorheological fluids (ERFs) can be reversibly and continuously controlled by application of an electric field. They are therefore useful as energy transfer fluids in actuators such as clutches, vibration dampers, motor bearings, and valves in hydraulic systems. These applications require a high voltage energy source to create the electric field [5], [7]. The energy converter consists of electrodes surrounding an ERF such that an electric field can be applied to the fluid.

Three different ERF actuator working principles can be distinguished: shear, flow, and squeezing. In the shear mode, electrodes move relative to one another (as in a clutch). The force or torque transferred to the fluid can be controlled through the electric field. In the flow mode the ERF flows between fixed electrodes (as in a valve). In this case, the electric field controls the flow resistance. In the squeezing mode, squeeze flow is created by changing the gap distance between the parallel electrode surfaces. The normal force required to move the electrodes can be controlled via the electric field [7].

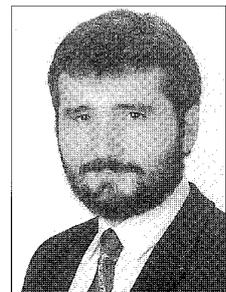
Bernd Rech,  
Wolfsburg, Germany



#### 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.



**Abb. 4:**  
**Normalspannung einer ER-Suspension. Zeitverlauf**  
 a) der relativen Änderung der Spaltweite  
 mit einer Frequenz von  $f_{sq} = 1$  Hz,  
 b) der Normalspannung bei Phasensprüngen  
 bei den Maxima der ERF-Deformation,  
 c) der Normalspannung bei Phasensprüngen bei den  
 Nulldurchgängen der ERF-Deformation

**Fig. 4:**  
**Normal stress time response of an ER-suspension.**  
 a) the relative change in the gap distance  
 with a frequency  $f_{sq} = 1$  Hz;  
 b) normal stress for a step change in electric field strength  
 at the maximum ERF deformation;  
 c) normal stress for a step change in electric field strength  
 at the zero crossover of the ERF deformation

feldstärke im Nulldurchgang der ERF-Deformation erfolgt. Hier bricht die Normalspannung kurzzeitig bis fast auf den Wert Null zusammen. Im übrigen Verlauf zeigt sich ein zu Abb. 4 b entsprechendes Verhalten.

Im Vergleich zu den beim Shear-mode erreichbaren Schubspannungswerten sind die im Squeeze-mode auftretenden Werte der Normalspannung wesentlich größer. Dies verdeutlicht Abb. 5, in der die Abhängigkeit der Normalspannung  $\sigma$  von der ERF-Deformation dargestellt ist. Die Messungen erfolgten bei einer Ansteuerung durch rechteckförmige elektrische Steuerungen, bei denen der Wechsel von positiven zu negativen Pulsen und umgekehrt gleichzeitig mit den Nulldurchgängen der ERF-Deformation stattfindet. Hier treten bei einer elektrischen Steuerfeldstärke von 3,5 kV/mm Normalspannungswerte von über 100 kPa auf. Die gleiche ER-Suspension überträgt bei dieser Feldstärke im Shear-mode nur eine Schubspannung von ca. 3 kPa.

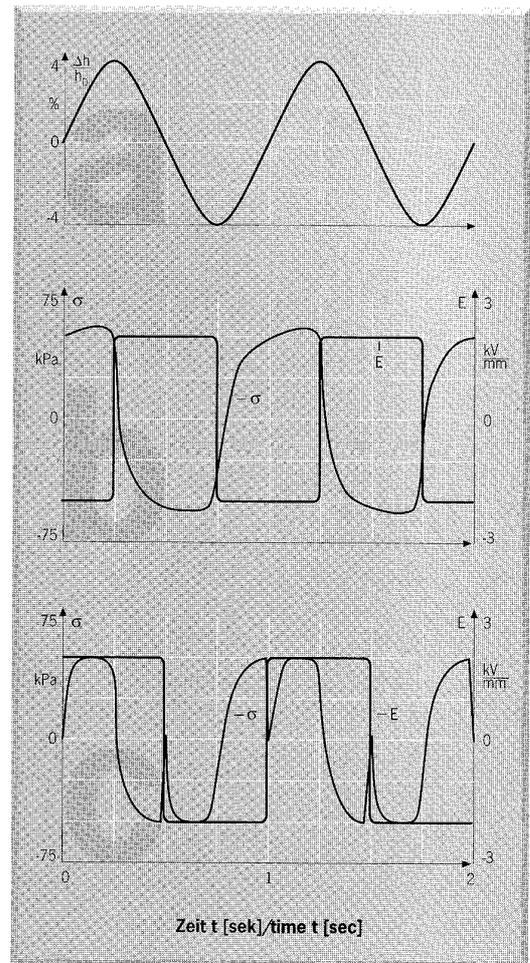
Die bisher durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, daß die im Squeeze-mode erreichbare Amplitude der Normalspannung mit zunehmender Deformationsamplitude, mit zunehmender Deformationsfrequenz und mit wachsender Amplitude der angelegten elektrischen Steuerfeldstärke größer wird. Außerdem wächst sie mit größer werdender Elektrodenfläche.

Bei einer Belastung in Normalrichtung zeigt die untersuchte ER-Suspension ein elastisches Verhalten, wobei bis zu relativen Änderungen der Spaltweite von ca. 0,3 % ein linearer Zusammenhang zwischen der ERF-Deformation und der Normalspannung auftritt (hookeischer Bereich). Mit zunehmender Feldstärke wird dieser Bereich größer. Bei darüber hinausgehenden relativen Spaltweitenänderungen nimmt die Steigung der Normalspannungskurve immer weiter ab (vgl. Kurven bei Feldstärken von 1 kV/mm und 1,5 kV/mm).

### 5 Schlußfolgerung

Die dargestellten Messungen zeigen, daß es durch den Amplituden-Zeitverlauf der Steuerspannung möglich ist, den Zeitverlauf der Normalspannung einer ER-Suspension gezielt zu beeinflussen. So ist es beispielsweise denkbar, durch eine geeignete Steuerspannung einen Zeitverlauf von zu erzeugen, wie er sich bei einem Material mit rein viskosem Verhalten ergibt. Durch eine sinusförmige Deformation entsteht hier ein sinusförmiger Verlauf der Normalspannung mit einem Maximum bei der größten Deformationsgeschwindigkeit.

Diese Arbeit zeigt aber auch, daß ein rein elastisches Verhalten, das bei sinusförmiger Deformation durch einen sinusförmigen Verlauf von  $\sigma$  mit Maxima bei der

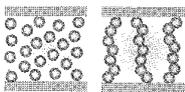


Loading the ER-suspension in the normal direction results in an elastic response. For relative gap changes up to  $\sim 0.3\%$ , the normal stress responds linearly to changes in the ERF deformation (Hookean region). With increasing electric field strength, the extent of the Hookean region increases. However, at gap distances beyond the Hookean region, the slope of the normal stress curve steadily decreases (compare curves at field strengths of 1 kV/ $\mu$ m and 1.5 kV/ $\mu$ m).

### 5 Conclusions

The data presented demonstrates that the normal stress time response of ER-suspensions can be influenced by the amplitude and time-dependence of the applied electric field. For example, it is possible to generate the time-dependence of  $\sigma$  of a pure viscous material. Here the application of a sinusoidal deformation produces a sinusoidal normal stress with a maximum at the maximum deformation rate.

This work also shows that a pure elastic response, i. e., sinusoidal deformation in which the sinusoidal  $\sigma$  response exhibits maxima corresponding to the deformation maxima, cannot be realized. During the compression phase when the gap between the electrodes decreases, the ER-suspension behaves like a pressure spring with nonlinear character. Unlike a spring, the ER-suspension does not recover after the electrodes have reached their maximum deformation. The force in a spring would decrease as the spring bounced back and would eventually go to zero as the



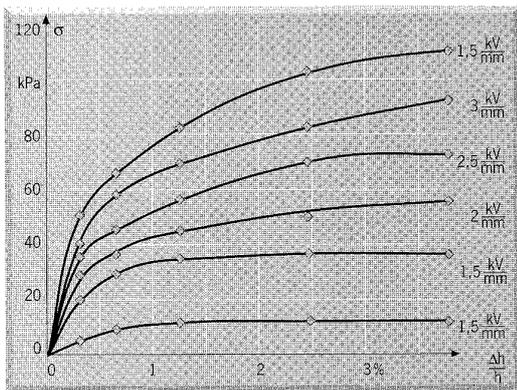
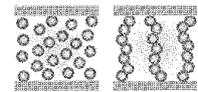


Abb. 5:  
Abhängigkeit der Normalspannung  
einer ER-Suspension von der relativen  
Änderung der Spaltweite

Fig. 5:  
Normal stress dependence  
on the relative change in the  
gap distance



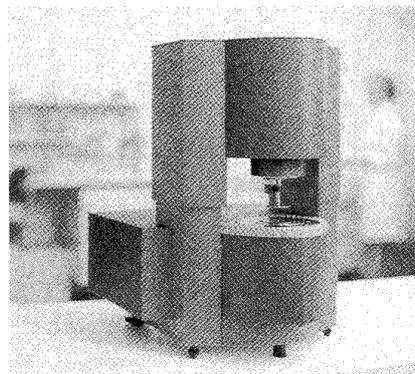
maximalen Deformation gekennzeichnet ist, nicht realisiert werden kann. In der Druckphase bei einem sich verringenden Elektrodenabstand verhält sich die ER-Suspension ähnlich einer Druckfeder mit nichtlinearer Kennlinie. Im Gegensatz zu einer Feder zeigt sie jedoch nach dem Überwinden des Scheitelpunktes der Elektrodenbewegung keine Entlastungsphase, in der die Federkraft mit zunehmendem Weg abnimmt und am Ausgangspunkt der Bewegung wieder zu Null wird. Statt dessen ordnen sich im Stillstand der Elektroden die polarisierten Teilchen im elektrischen Feld um, wobei gleichzeitig die Normalspannung bis auf den Wert Null absinkt. Danach verhält sich die ER-Suspension wie eine Zugfeder mit nichtlinearer Kennlinie. Daher kann das Verhalten der ER-Suspension am Umkehrpunkt der Deformationsrichtung durch das Umschalten einer belasteten Druckfeder auf eine entlastete Zugfeder und umgekehrt beschrieben werden. Durch dieses Verhalten ist es auch im Gegensatz zu einer Feder nicht möglich, Energie, die in der Druckphase gespeichert wurde, in der Zugphase zurückzugewinnen. Entsprechend kann auch die in der Zugphase gespeicherte Energie nicht zurückgewonnen werden.

spring assumed its original length. However, in the ER-suspension when the electrodes are still the polarized particles remain ordered in the electric field and the normal stress value relaxes to zero. Afterwards, the ER-suspension behaves like a tension spring with nonlinear character. The behavior of the ER-suspension as the direction of deformation changes can thus be characterized as going from a loaded pressure spring to an unloaded tension spring, and vice versa. Thus, unlike a spring, it is impossible for energy stored in the compression phase to be recovered in the tension phase. Correspondingly, energy stored in the tension phase cannot be recovered.



- [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] Bridgestone; Endo, Sh. et al.: Electrorheological Fluid-Applied Apparatus, Electrorheological Fluid-Applied Vibration Controller and Electrorheological Fluid-Applied Fixing Apparatus. U. S. Patent 5, 267, 633 (1993)
- [4] Monkman, G. J.: J. App. Phys. D, 28, (1995), pp. 588-593
- [5] N.N.: Electrorheological Fluids - A Research Needs Assessment. Final Report, U.S. Department of Energy, (1993)
- [6] DE 41 39 065 A1
- [7] Rech, B.: Aktoren mit elektrorheologischen Flüssigkeiten. In „Technischer Einsatz Neuer Aktoren“, Jendritza, D. J. und Mitautoren, expert verlag GmbH, Renningen-Malmsheim, (1995)
- [8] Rech, B.: Aktoren mit elektrorheologischen Flüssigkeiten. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Verlag Mainz, Aachen, (1996)
- [9] Sproston, J. L.; El Wahed, A. K.: A Comparison of the Performance of ER Fluids in Squeeze. Proc. 5th Int. Conf. on ER Fluids, MR Suspensions and Associated Technology, pp. 259-269
- [10] Sproston, J. L.; et al.: J. App. Phys. D, 27, (1994), pp. 338-343
- [11] Stanway, R.; et al.: J. of Electrostatics, 28, (1992), pp. 89-94
- [12] Williams, E. W.; et al.: J. of Non-Newtonian Fluid Mech., 47, (1993), pp. 221-238

Have We Got An Attitude. . .



and what a difference it makes!

It's our pride in STRESSTECH,  
the WORLD'S FINEST RHEOMETER

It's our commitment to unparalleled  
service and technical support

It's our dedication to  
total customer satisfaction



Scheelevägen 30, S - 223 63 Lund, Sweden, Phone +46 46 12 77 60, Fax +46 46 12 50 57  
E-mail: info@reologica.se  
WWW: http://www.algonet.se/~reologic