

Optische Messungen des Geschwindigkeitsprofils eines ER-Fluids im Flachkanal

Optical Measurements of the Velocity Profile of an ER-Fluid in a Rectangular Conduit

B. Abu-Jdayil,
P.O. Brunn,
Erlangen-Nürnberg,
Germany

Schon früher wurden Möglichkeiten erkannt, die sich aus der technischen Umsetzung des ER-Phänomens ergeben, wie z. B. in Kupplungen, Dämpfern, Motorlagern und Hydraulikventilen [1–5]. Seit der Entdeckung des ER-Effektes von Winslow 1947 [6], wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um den ER-Effekt zu verstehen.

In dieser Studie wird das Geschwindigkeitsprofil eines transparenten ER-Fluids (ERF) im elektrischen Feld in einem Flachkanal untersucht. Als optisches Meßverfahren wird die Laser-Doppler-Anemometrie benutzt. Die Messungen sollen Aufschluß über die lokalen Strömungen des ER-Fluids unter dem Einfluß des elektrischen Feldes geben. Der Einfluß der angelegten Wechselspannung und deren Frequenz bzw. Gleichspannung auf das Fließverhalten des ER-Fluids wurden überprüft.

The possibilities for employing the ER phenomenon in practical applications have long been recognized, e. g., in clutches, shock absorbers, motor bearings and hydraulic valves [1–5]. Since Winslow discovered the ER effect in 1947 [6], there have been countless investigations to try to better understand it.

In this study, the velocity profile of a transparent ER fluid subjected to an electric field in a rectangular conduit is measured. Measurements are obtained optically using laser-Doppler anemometry (LDA) and provide the local flow field of the ER-fluid as a function of an applied electric field. The influence of an applied alternating current at various frequencies as well as the influence of direct current on the flow behavior of the ER-fluid are examined.

1 Experimental Setup

1.1 ER-Fluid

A transparent ER-fluid designated as P 1723 supplied by Robert Bosch GmbH was used in this investigation. The fluid consists of paraffin oil as the suspending liquid filled with approximately 30 volume percent silica gel with a particle diameter between 5 and 30 nm. The fluid exhibits Newtonian behavior in the absence of an electric field. The viscosity at 25 °C is 100 mPa s.

1.2 Rectangular Conduit Flow

The velocity of the ER-fluid was measured using a forward scattering LDA system at a temperature of 25 °C. The measurements were conducted in a Plexiglas rectangular conduit with transparent walls. In the upper and in the lower plate a 20 cm long slot was fashioned, in which two 5 x 30 x 200 mm stainless steel plates, functioning as electrodes, were affixed.

The rectangular conduit had a length of 80 cm, height of 3 mm, and width of 30 mm. The volumetric flow of the ER-fluid was controlled by a gear pump and bypass valve. With this arrangement, the flow rate could be varied between 0.25 and 100 cm³/s. Pressure drop was determined at intervals of 160 mm by fashioning ports through the top electrode and using a pressure transducer from Rousemount, with a Δ -pressure range from 0 to 5000 Pa. The temperature was measured at the outlet and was controlled with a heat exchanger. The experimental setup is shown in Fig. 1 and additional details are provided in reference [7].

1 Versuchsaufbau

1.1 Verwendetes ER-Fluid

In dieser Arbeit wurde ein transparentes ER-Fluid, das den Autoren unter der Bezeichnung P 1723 von der Robert Bosch GmbH zur Verfügung gestellt wurde, benutzt. Es handelt sich um ein Fluid auf Paraffinölbasis. Diesem sind ca. 30 Vol% Silicagel (Durchmesser der Teilchen zwischen 5 und 30 nm) beigemischt. Ohne Feldeinfluß verhält sich das ER-Fluid wie eine Newtonsche Flüssigkeit. Bei 25 °C besitzt es eine Viskosität von 100 mPa s.

1.2 Flachkanalströmung

Die Geschwindigkeiten des ER-Fluids wurden mit Hilfe eines vorwärtsstreuenden LDA-Systems bei einer Temperatur von 25 °C aufgenommen. Die Messungen wurden in einem Plexiglasflachkanal mit transparenten Wänden durchgeführt. In der unteren Platte bzw. der

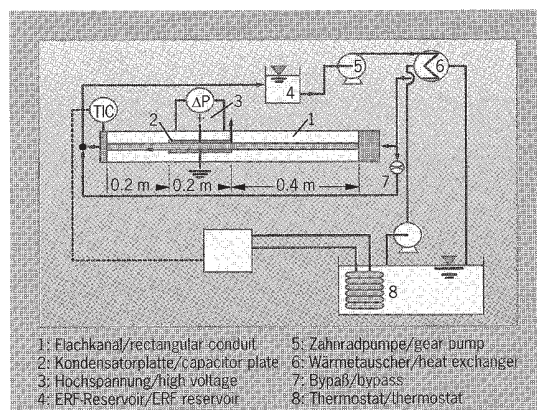
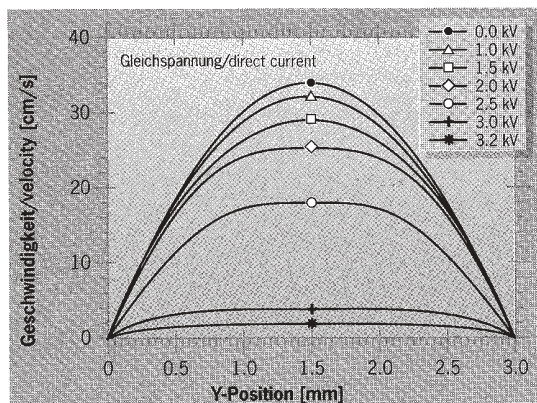


Abb. 1:
Schematische Darstellung
der Versuchsanlage

Fig. 1:
Schematic of the
experimental setup

Abb. 8:
Geschwindigkeitsprofile des
ERF im Gleichspannungsfeld

Fig. 8:
Velocity profile of the ERF
subjected to a direct current



Ein Vergleich der Abbildungen 3 und 8 zeigt, daß der mit Gleichspannung gemessene ER-Effekt bei gleicher Feldstärke größer ist als der mit Wechselspannung. Damit setzt sich das mit Wechselspannung gefundene Phänomen fort: Vergrößerung des ER-Effektes mit sinkender Frequenz (bei gleicher Feldstärke). Dies ließe sich durch folgende Überlegung von Klass und Martinek [9] erklären. Der ER-Effekt des ER-Fluids sinkt mit steigender Feldfrequenz bei konstanter Feldstärke, da die verfügbare Zeit für Ladungstransport im Polarisationsprozeß in eine Richtung pro Halbperiode mit steigender Frequenz abnimmt. Wenn die Feldfrequenz gegen Null geht (Gleichspannung), ist beliebig viel Zeit verfügbar für Ladungstransport, um den vollen Polarisationszustand zu erreichen. Also wird der ER-Effekt maximal. Dabei besteht die Vermutung [10], daß die Auswirkung zwischen Gleich- und Wechselspannung (ständige und induzierte Dipole) verschiedene Teilchenausrichtung erzeugt und deshalb Ketten mit unterschiedlicher Mikrostruktur.

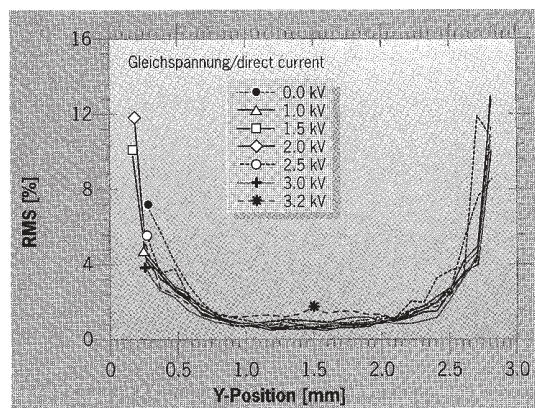
Obwohl der mit Gleichspannung gemessene ER-Effekt größer ist als der mit Wechselspannung gemessene, ist die Schwankung der Geschwindigkeit (RMS-Werte) in der Mitte des Kanals kleiner, vgl. Abb. 4 und 9. Es wurde früher im Wechselspannungsfall festgestellt, daß der Maximalwert der RMS-Profile in Kanalmitte mit abnehmender Frequenz und mit steigender Spannung zunimmt. Dies geht mit der Vorstellung einher, daß bei kleinen Frequenzen bzw. großen Spannungen dem ER-Fluid Zeit gelassen wird, die faserartigen Formen auf- bzw. abzubauen. Dem entgegen wirkt die Scherung, die eine Relativbewegung (Zerreißen) verschiedener „Faserenden“ zur Folge hätte. Es treten somit große Geschwindigkeitsänderungen (vgl. Abb. 5) und damit RMS-Werte auf.

Die RMS-Profile der Gleichspannungsmessungen passen nicht in dieses Bild. Damit liegt die Vermutung nahe, daß dem ER-Effekt im Wechselspannungsfeld und im Gleichspannungsfeld verschiedene Mechanismen (verschiedene Strukturen [10]) zugrunde liegen.

Im Gleichspannungsfeld zeigen die RMS-Profile keinen deutlichen Maximalwert in der Mitte des Kanals wie im Wechselspannungsfeld. In Abb. 9 sieht man, daß das RMS-Profil bei einer Gleichspannung von 3,2 kV einen geringfügig erhöhten Wert in der Mitte des Kanals zeigt. Dieser Unterschied zwischen Wechsel- und

Abb. 9:
RMS-Profile des ERF im Gleichspannungsfeld

Fig. 9:
RMS profile of the ERF subjected to a direct current



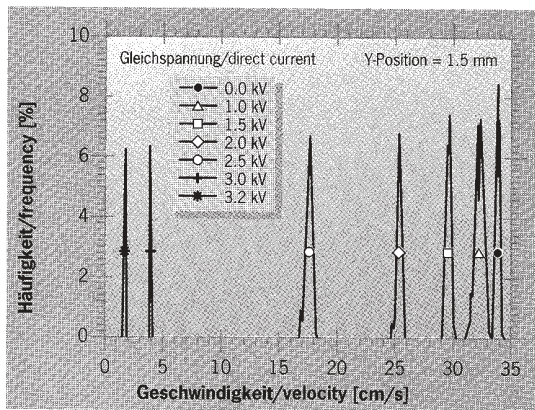
2.2.2 LDA Measurements in the Rectangular Conduit

Measurements could not be done for direct currents higher than 3.2 kV because the velocity was no longer detectable due to a low signal to noise ratio. Figure 8 shows the velocity profile for an ER-fluid subjected to a direct current. The ER-effect increases significantly with increasing electric field strength. This is evidenced by the increasing deviation from the parabolic velocity profile that is obtained for the ER-fluid in the absence of an electric field. Application of a direct current causes the fluid to exhibit a yield stress, as evidenced by the blunted velocity profile.

From Figures 3 and 8, one sees that the ER-effect is greater when a direct current is applied compared to an alternating current (at the same field strength). This is the natural consequence of the earlier finding that, when the fluid is subjected to an alternating current, the ER-effect increases with decreasing frequency (at constant field strength). An explanation for this finding can be proposed based on ideas of Klass and Martinek [9]. The ER-effect decreases with increasing field frequency because the time available for charge transport during polarization (in one direction per half cycle) decreases with increasing frequency. For the case of vanishing frequency (direct current), there is ample time for charge transport and complete polarization is obtained. As a result, the ER-effect is maximized. This reasoning is based on the assumption [10] that the interaction between the alternating current and direct current with permanent and induced dipoles bring out different particle alignments, and consequently result in inherently different microstructures.

Although the ER-effect is larger for direct current than for alternating current, the fluctuation of the velocity (RMS values) is smaller in the center of the conduit in the direct current experiment (compare Figures 4 and 9). It was previously found that for an alternating current the maximum value of the RMS in the conduit center increases with decreasing frequency or with increasing field strength. This is consistent with the hypothesis that at small frequencies or large field strengths the ER-fluid has adequate time for the formation or breakdown of fiber-like structures. Fiber formation is countered by the effect of shear, which leads to relative motion between fiber ends and a tendency toward breakdown of fiber-like structures. As a result, large velocity changes are observed (see Fig. 5) with corresponding large RMS values.

The RMS profile of the direct current measurements does not follow the same trend as that obtained with alternating current. This further supports the



Gleichspannung lässt sich durch folgende Überlegung erklären: Wenn man das vorgestellte Modell der faserartigen Struktur [8] betrachtet, findet man im Wechselspannungsfeld einen Auf-/Abbau der faserartigen Struktur, überlagert von einem Abbau durch Scherung. Sei λ eine charakteristische Zeit zum Aufbau der Struktur, so würde, bei konstanter Scherrate, ein Maximum der Fluktuation (RMS-Werte) durchaus denkbar sein für $\lambda f \approx 1$ (Resonanzphänomen), wobei f die Frequenz des elektrischen Feldes bedeutet. Gemäß dieser Überlegungen sollte für das Fluid P 1723 die charakteristische Zeit λ größer sein als 0,02 s.

Im Gleichspannungsfeld wird der Abbau der faserartigen Struktur nur von der Scherung erzeugt. Die Folge wäre eine kleine Schwankung der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsverteilungen unter dem Einfluß der Gleichspannung (Abb. 10) unterstützen diese Erklärung, denn die Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit stimmt gut mit einer Gaussverteilung überein. Die Verwendung von Gleichspannung mit diesem ER-Fluid hat zudem noch den Vorteil, daß die Stromstärke im Gleichspannungsfeld um mehr als zwei Größenordnungen kleiner ist als die Stromstärke im Wechselspannungsfeld, vgl. Abb. 11.

Rh



- [1] Block, H., Kelly, J.P.; J. Phys. D: Appl. Phys. 21 (1988), p. 1661-1677
- [2] Stevens, N.G., Sproston, J.L., Stanway, R.; J. of Electrostatics 15 (1984), p. 275-283
- [3] Brooks, D.A.; Proc. 2nd Int. Conf. on ER-fluids (eds. J.D. Carlson, A.F. Sprecher, H. Conrad), Raleigh USA (1989), p. 371-401
- [4] Colvin, D.P., Carlson, J.D.; Proc. 2nd Int. Conf. on ER-fluids (eds. J.D. Carlson, A.F. Sprecher, H. Conrad), Raleigh USA (1989), p. 426-436
- [5] Stangroom, J.E.; Proc. 2nd Int. Conf. on ER-fluids (eds. J.D. Carlson, A.F. Sprecher, H. Conrad), Raleigh USA (1989), p. 419-425
- [6] Winslow, W.M.; J. Appl. Phys. 20 (1949), p. 1137-1140
- [7] Schindler, U., Vorwerk, J., Steger, R., Brunn, P.O.; Rheol. Acta 34 (1995)
- [8] Huang, Z., Spurk, J.H.; Rheol. Acta 29 (1990), p. 475-481
- [9] Klass, D.L., Martinek, T.W.; J. Appl. Phys. 38 (1967), p. 67-74
- [10] Thurston, G.B., Gaertner, E.B.; J. Rheol. 35 (1991), p. 1327-1343

Abb. 10:
Geschwindigkeitsverteilung
des ERF im
Gleichspannungsfeld

Fig. 10:
Velocity distribution
of the ERF subjected
to a direct current

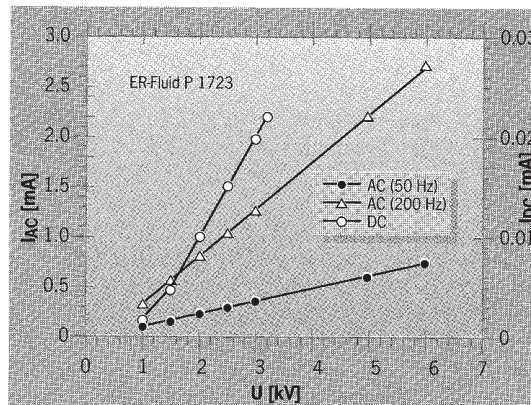


Abb. 11:
Abhängigkeit des
Stromflusses von der
Spannung in einem
3 mm Flachkanal

Fig. 11:
Dependence of the current
flow on the voltage
in a 3 mm rectangular
conduit

assumption that the ER-effect arises from a different mechanism (related to different structures [10]) depending on the type of voltage applied.

In the direct current case there is no clear maximum RMS value in the center of the conduit, as was the case for alternating currents. One sees in Figure 9 that the RMS profile for a direct current of 3.2 kV shows only a slight increase in the RMS value at the conduit center. The difference in the alternating versus direct currents can be accounted for by considering the following: for the proposed model whereby fiber-like structures are formed [8], an applied alternating current results in formation and breakdown of fiber-like structure, accompanied by additional breakdown of the fibers due to shear. If a characteristic time for breakdown of the structure is defined as λ , then, at constant shear rate a maximum in the fluctuations (i.e., the RMS value) will be obtained when $\lambda f \approx 1$ (resonance), where f is the frequency of the electric field. Based on this reasoning, the characteristic time λ for fluid P 1723 is larger than 0.02 s.

When a direct current is applied, breakdown of the fiber-like structure is solely the result of shearing. As a result, velocity fluctuations are smaller than in the case of alternating current. The velocity distribution for an applied direct current supports this explanation because the velocity distribution shown in Figure 10 is very close to Gaussian. Application of a direct current to this ER-fluid has the added advantage that the required current is two orders of magnitude lower than that required for the alternating current case, as seen in Figure 11.

Rh