

# Untersuchung des Fließverhaltens von ERF und deren Einsatz in passiven Dämpfungssystemen

## Study of the Flow Behavior of Electrorheological Fluids (ERFs) and their Use in Passive Absorbers

In diesem Aufsatz wird über Untersuchungen zur Messung der scheinbaren dynamischen Viskosität von elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERF) mittels Rotationsviskosimeter sowie deren approximierten mathematischen Beschreibung mit einem Potenzgesetz, das i. a. für strukturviskose Medien verwendet wird, berichtet. Weiterhin wird der Einsatz von ERF in passiven Dämpfungssystemen beschrieben. Die Dämpfung läßt sich bei Variation eines angelegten elektrischen Feldes reversibel einstellen.

### 1 Einleitung

Schwingungen an Werkzeugmaschinen für die Feinbearbeitung, z. B. beim Schleifen, können die Bearbeitungsgenauigkeit und Produktivität beeinträchtigen. Sie sind auf fremd- oder selbsterregte Entstehungsmechanismen zurückzuführen. Fremderregte Schwingungen werden z. B. durch äußere dynamische Kräfte wie Unwuchten des Arbeitsspindel systems oder über das Fundament eingebrachte Störungen angeregt.

Selbsterregte Schwingungen können bei nicht ausreichender dynamischer Steifigkeit einer Werkzeugmaschine am Wirkpunkt zwischen Werkzeug und Werkstück auftreten und innerhalb des Kraftflusses der Maschine entstehen. Die Schwingungsamplituden lassen sich durch den Einsatz von passiven Dämpfungssystemen reduzieren [5]. Bei passiven Dämpfungssystemen wird die Schwingungsenergie der Maschinenstruktur teilweise entzogen und in Wärme umgewandelt.

Diese Dämpfungssysteme (Absorber) müssen einstellbar sein, um auch bei geänderten Maschineneinstellungen optimal zu wirken. Das kann durch den Einsatz von flüssigkeitsgedämpften Absorbersystemen (Fluiddämpfer) erreicht werden, bei denen die Dämpfungswirkung durch hydraulische Verluste (Energiedissipation) in dem Dämpferfluid eintritt. Eine wesentliche Kenngröße für die erreichbare Dämpfung in einem Fluiddämpfer ist die dynamische Viskosität  $\eta$ , die bei Verwendung von ERF unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes variiert und damit den jeweiligen Erfordernissen angepaßt werden kann.

Electrorheologische Flüssigkeiten bestehen in den meisten Fällen aus einer elektrisch nicht leitenden Flüssigkeit und kleinen nichtmetallischen Teilchen, die durch ein Dispergiermittel in Suspension gehalten werden. Bei der hier untersuchten ERF lag eine Suspension aus Silikatteilchen in einem Silikonöl niedriger Viskosität vor. Die Festkörperteilchen weisen aufgrund ihrer

This paper reports results of an investigation in which the apparent dynamic viscosity of electrorheological fluids (ERFs) was measured using a rotational viscometer and a power law equation was applied to describe the data. In addition, the application of ERFs in passive absorbers is discussed. Degree of absorption can be controlled by variation of an applied electric field.

### 1 Introduction

Vibrations of machine tools can lead to significant impairment in the quality and productivity of finish machining operations, such as polishing. Vibrations may result from external or from self-starting mechanisms. Externally induced vibration could result, for example, from imposition of outside dynamic forces due to misalignment of the tooling's spindle system, or from disturbances to the foundation on which the tool stands.

When the dynamic stiffness of the machine tool is inadequate, self-starting oscillations may originate at the point of contact between the tool and the subject piece, or within the tool itself. The amplitude of oscillation can be reduced by use of passive absorbers [5]. The vibrational energy is partially absorbed by the passive system and is released in the form of heat.

The absorbers must be controllable so that they work optimally even as the machine operating conditions are altered. This can be achieved through use of fluid absorbers that effect their absorption by dissipating energy within the fluid. An important parameter for assessing the energy absorbing potential of a fluid is its dynamic viscosity  $\eta$ , which, in the case of an ERF, can be varied by application of an electric field. The specific system demands can therefore be satisfied using a single fluid (ERF) with an adjustable dynamic viscosity  $\eta$ .

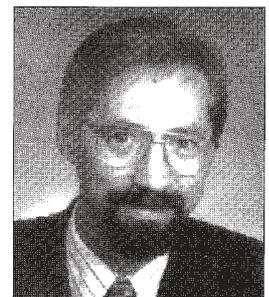
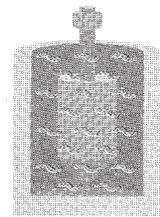
#### Engelbert Westkämper

ist Direktor des Institutes für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) und Professor an der Technischen Universität Braunschweig, Deutschland. Davor war er 12 Jahre in der deutschen Flugzeug- und Elektronikindustrie im Bereich Produktionstechnik verantwortlich tätig. Er ist Autor mehrerer Bücher über Qualitätssicherung.

is Director of the Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) and Professor at the Technische Universität Braunschweig, Germany. Before rejoining university, he had been working for 12 years in the German aircraft and electronics industry. He is editor of several books on quality assurance.

Beiträge  
Papers

E. Westkämper,  
J. Meschke,  
Braunschweig,  
Germany



This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website

<http://www.appliedrheology.org> Rheology 93  
Dezember/December 1993

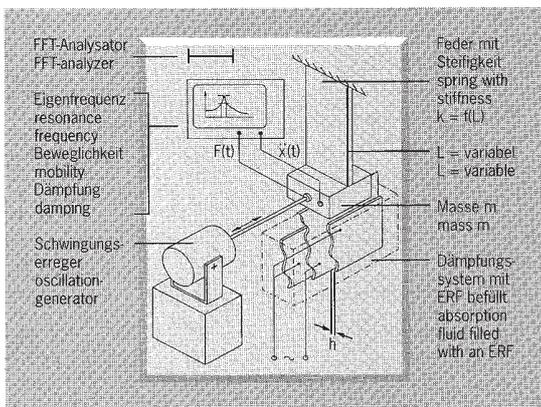
243

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website

<http://www.appliedrheology.org>

**Abb. 7:**  
Versuchsaufbau zur Bestimmung des Dämpfungsgrades  $D$  eines ERF-gedämpften Scherfluiddämpfers [5]

**Fig. 7:**  
Experimental setup for determining the degree of absorption  $D$  of an ERF-based shear damping system [5]



Für die Parameter der nach Gleichung (1) approximierten Fließkurve in Abb. 6 wurde  $k = 125 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  und  $n = 0,24$  gesetzt. Für sehr niedrige Schergeschwindigkeiten liegt die Abweichung im Bereich der Fließgrenze. Bei höheren Schergeschwindigkeiten ab  $D_s = 10 \text{ 1/s}$  ist jedoch eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Sind die Parameter  $k$  und  $n$  bestimmt worden, läßt sich demnach mit Gleichung (1) das Fließverhalten einer ERF für eine bestimmte elektrische Feldstärke näherungsweise berechnen.

#### 4 Einsatz von ERF in passiven Dämpfungssystemen

Die Untersuchungen zum Dämpfungsvermögen von ERF-gedämpften Fluiddämpfern wurden am Beispiel eines Schwingungssystems untersucht, das sich in sehr guter Näherung wie ein Einmassenschwinger verhält. Dieser Einmassenschwinger besteht aus einer variablen Masse, einer in der Länge einstellbaren Biegefeder und dem Dämpfungssystem. Das Schwingungssystem ist daher in seiner Eigenfrequenz variierbar ( $f_e = 20\text{--}200 \text{ Hz}$ ), s. Abb. 7.

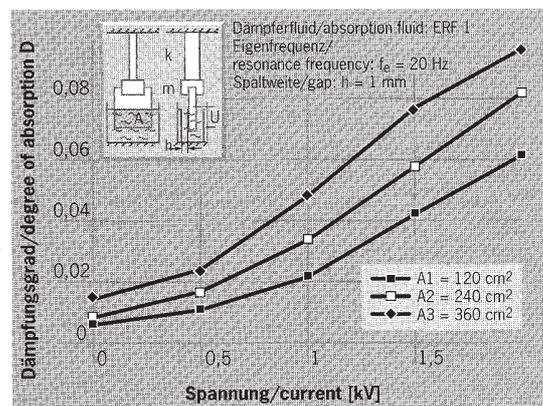
Der Dämpfungsgrad  $D$  wurde in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz des Schwingungssystems als Funktion der geometrischen Größen (Spaltweite  $h$ , benetzte Oberfläche), der Temperatur sowie der elektrischen Größen Feldstärke und Wechselspannungsfrequenz  $f_u$  bestimmt.

In Abb. 8 ist der Einfluß der an den Scherfluiddämpfer angelegten elektrischen Spannung bei einer Spaltweite von  $h = 1 \text{ mm}$  dargestellt. Der progressive Verlauf des Dämpfungsgrades über der Spannung bzw. elektrischen Feldstärke ähnelt dem bekannten Verlauf der scheinbaren dynamischen Viskosität über der elektrischen Feldstärke. Durch Variation eines angelegten elektrischen Feldes läßt sich die Dämpfung über einen relativ großen Bereich einstellen.

In Abb. 8 ist ebenfalls erkennbar, daß der Dämpfungsgrad von der Dämpferplattenfläche abhängig ist. Je größer die vom Dämpfungsfluid benetzte Oberfläche ist, um so größer ist die erreichbare Dämpfung.

**Abb. 8:**  
Dämpfungsgrad  $D$  in Abhängigkeit von der angelegten elektrischen Spannung bei einem ERF-gedämpften Scherfluiddämpfer

**Fig. 8:**  
Degree of absorption  $D$  of an ERF-based shear damping system as a function of applied current



is immersed in the ERF. As the immersed area increases, the degree of absorption also increases. The gap  $h$  between the plate and outer wall also influences the absorption. For larger gaps the degree of absorption increases.

The accelerability frequency response functions of the ERF-damped single mass oscillatory are shown in Fig. 9 for a resonance frequency  $f_e = 20 \text{ Hz}$ . The accelerability is a measure of the mechanical sensitivity of a system to dynamic disturbances, and is maximum in the range of the resonance frequency. The higher the system absorption, the lower the accelerability of the system.

As seen in Fig. 9 there is a clear decrease in the accelerability with increasing current  $U$ . Furthermore, one sees that as the current increases, the resonance frequency increases slightly. Obviously the ERF responds in part elastically in the presence of an electric field, i. e., the absorbing element also attains a spring stiffness component that augments the elasticity of the spiral spring and results in an increase in the resonant frequency of the system.

#### 5 Conclusion

The potential applicability of ERFs as absorbing media in a passive absorption system was examined in this research. The flow curves of an ERF subjected to various electric field strengths were measured and the apparent dynamic viscosities were calculated. Over a certain shear rate region the flow behavior could be described using a power law relationship. Using this relationship, the dependence of the shear stress (or alternatively, the apparent dynamic viscosity) on the shear rate was defined mathematically, allowing the calculation of the absorption coefficient of the fluid.

Eine weitere geometrische Größe, die die Dämpfung beeinflusst, ist die Spaltweite  $h$ . Mit abnehmender Spaltweite  $h$  wird der Dämpfungsgrad größer.

Abb. 9 zeigt die Beschleunigbarkeitsfrequenzgänge des ERF-gedämpften Einmassenschwingers bei einer Eigenfrequenz  $f_e = 20$  Hz. Die Beschleunigbarkeit ist ein Maß für die mechanische Empfindlichkeit eines Systems gegenüber dynamischen Störgrößen und ist im Bereich der Eigenfrequenz maximal. Je größer die Systemdämpfung, um so geringer ist die Beschleunigbarkeit.

In Abb. 9 ist eine deutliche Abnahme der Beschleunigbarkeit mit zunehmender Spannung  $U$  zu erkennen. Desweiteren zeigt sich, daß mit zunehmender Spannung auch die Eigenfrequenz geringfügig zunimmt. Offensichtlich verhält sich die ERF mit zunehmendem elektrischen Feld auch elastisch, d. h. es ergibt sich im Dämpferelement eine zur Biegefeder parallelgeschaltete Federsteifigkeit, die die Eigenfrequenz des Schwingungssystems erhöht.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde die Einsatzmöglichkeit von ERF als Dämpfungsmedium in einem passiven Dämpfungssystem untersucht. Hierzu wurden zunächst Fließkurven einer ERF bei unterschiedlichen elektrischen Feldstärken gemessen bzw. die scheinbare dynamische Viskosität berechnet. Das Fließverhalten läßt sich in einem bestimmten Bereich der Schergeschwindigkeit durch ein Potenzgesetz annähern. Damit erhält man einen mathematischen Zusammenhang zwischen Schubspannung bzw. scheinbarer dynamischer Viskosität und Schergeschwindigkeit, der zur Berechnung von Dämpfungskoeffizienten bei Fluiddämpfern erforderlich ist. Abschließend wurde die Einstellbarkeit der Dämpfung durch Variation einer angelegten elektrischen Feldstärke am Beispiel eines ERF-gedämpften Einmassenschwingers nachgewiesen. Weitere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung eines einstellbaren ERF-gedämpften passiven Dämpfungssystems für Werkzeugmaschinen. Ziel ist die Entwicklung eines Dämpfers, der sich in Abhängigkeit vom Phasengang der Maschine am Wirkpunkt automatisch einstellt, um die relevanten Schwingungsamplituden zu reduzieren.

Das hier beschriebene Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn, gefördert.

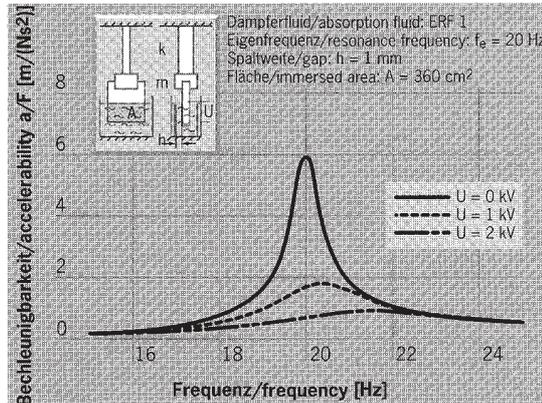
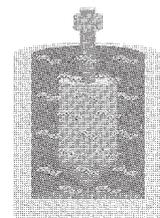


Abb. 9: Beschleunigbarkeitsfrequenzgänge eines ERF-gedämpften Einmassenschwingers bei unterschiedlichen Größen des angelegten elektrischen Feldes

Fig. 9: Accelerability frequency processes of an ERF-based single mass oscillator at various values of the imposed electric field

Finally, control of the absorption through variation of the applied current was demonstrated, using a single mass oscillator damped by an ERF as an example. Further research efforts are directed towards development of an ERF fluid-based adjustable passive absorption system for machine tools. The objective is the development of absorbers that reduce oscillation amplitudes by automatically switching-on and off in sequence with the engaging and disengaging of the machine tool.

The research project reported here was sponsored by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn.



- [1] Block, H.; Kelly, J.P.: J. Phys. D: Appl. Phys. 21 (1988), p. 1661-1677
- [2] DIN 1334: Nicht-newtonsche Flüssigkeiten, Begriffe, Stoffgesetze. Berlin: Beuth Verlag
- [3] Klass, D.L.; Martinek, T.W.: J. of applied physics 38 (1967), No. 1, p. 67-80
- [4] Huang, Z.; Spurk, J.H.: Rheologica Acta 29 (1990), No. 5, p. 475-481
- [5] Westkämper, E.; Meschke, J.: die maschine 4 (1993), No. 4, p. 52-55