

## Tribological Interpretation of Rheological Parameters

### 1 Einleitung

Die Untersuchungen dienen der quantitativen Abschätzung des tribologischen Prozesses bei Flüssigkeits- und Mischreibung. Dabei zeigt sich der Reibungsprozeß als ein irreversibler Vorgang der Umwandlung von äußerer Energie in innere Energie und Wärme, aus energetischer Sicht als eine vielversprechende Möglichkeit [1], [2], [3].

Ist die Beurteilung des tribologischen Prozesses bei Festkörperreibung immer noch problematisch und mit vielen a-priori-Annahmen behaftet, so sind die Untersuchungen bei geschmierten Kontaktten mit weit aus größeren Schwierigkeiten versehen.

Die dargestellten Überlegungen haben die auftretenden Energieverluste bei der tribologischen Beanspruchung von konsistenten Schmierstoffen (Fetten) zum Gegenstand. Dabei werden Größen aus der Oszillationsmessung tribologisch interpretiert und eine rheologische Reibungsenergiedichte neu definiert.

### 2 Reibungsbetrachtungen bei Fettschmierung

Reibungsuntersuchungen münden meist in der Abschätzung der auftretenden Energieverluste, in der Bestimmung der Reibungskraft oder der Darstellung von Reibungszahlen und deren Verläufen.

Entsprechend des zu untersuchenden Reibungszustandes dienen diese Ergebnisse bei Variation der Betriebsbedingungen auch zur Beurteilung von Werkstoffpaarungen und eingesetzten Schmierstoffen.

Dabei nehmen Schmierfette eine besondere Rolle unter den Schmierstoffen ein. Bei einer geschmierten Paarung im Zustand der Mischreibung treten gemäß Abb. 1 unterschiedlich bedingte Energieverluste auf.

Die Energieaufwendungen bei der tribologischen Beanspruchung eines Schmierfettes besitzen subtilen Charakter. Auch in kleinen Schmierspalten ist das Fett als kolloid-disperses System wirksam [4], [5] und reduziert sich nicht etwa auf einzelne Anteile. Die Größenordnung auftretender Schmierfettkomponenten (Agglomerate, Fibrillen, Mizellen) begründet deren Wirksamkeit im Spalt [6] und führt zu Eigenschaften, die nicht vom Grundöl herrühren.

Reibung ist der Verlust an mechanischer Energie. Die Energieverluste beim Zustand der Flüssigkeitsreibung (und damit anteilig bei der Mischreibung) sind unzureichend untersucht. Für die Energieaufwendung beim Scheren von Schmierfetten wird ein Modell unter Verwendung von rheologischen Kenngrößen aus der Oszillationsmessung vorgeschlagen. Eine neue Größe – die komplexe rheologische Energiedichte – wird definiert.

Friction is the loss of mechanical energy. Energy losses for the case of liquid friction (including friction during mixing) have not been adequately investigated. A model based on rheological properties that can be determined from oscillatory measurements is proposed to account for energy losses that occur when lubricants are sheared. A new rheological parameter called the complex energy density is defined.

### 1 Introduction

The investigations presented here provide a quantitative estimate of tribological effects associated with the friction of liquids and mixtures. The frictional process is shown to involve an irreversible change whereby energy put into the system is transformed to heat and internal energy. From an energetic point of view there are many possibilities [1]–[3].

The analysis and assessment of tribological processes involved in the friction of solids has always been difficult, and a priori assumptions are most often applied. The analysis of lubricated contacts is expected to be an even more difficult problem.

The ideas presented here are based on energy losses occurring in tribological processes of firm lubricants (grease). Parameters measured under dynamic conditions are used to describe tribological effects and a new rheological quantity called the friction energy density is defined.

### 2 Friction Considerations for Lubrication Processes

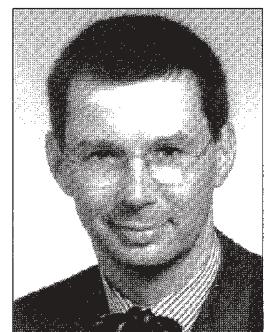
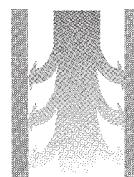
Frictional investigations most often involve an estimate of energy losses, determination of the frictional force or the frictional coefficients and their behavior during the process. Results of such studies provide a means to evaluate mating of materials and the performance of the lubricant in a process as well as the effect of a variation in the process operating conditions.

#### Prof. Dr.-Ing. Erik Kuhn,

geb. 1955, war nach einem Maschinenbau-Studium mehrere Jahre in der Industrie tätig. 1987 promovierte er an der TU Magdeburg und war dort anschließend für das Lehrgebiet Schmierungstechnik verantwortlich. Seit 1991 lehrt er an der FH Hamburg als Professor für Maschinenelemente.

was born in 1955 and, after studying mechanical engineering, worked in industry for a number of years. In 1987 he obtained his doctorate at Magdeburg University where he was subsequently responsible for lubrication technology. Since 1991 he has been teaching at FH Hamburg as professor for machine elements.

Erik Kuhn,  
Hamburg,  
Germany



## Gleichungen/equations

$$W_R = e_R \cdot V_R \quad (1)$$

$$\bar{e}_{rheo} = \eta_p \cdot D^2 t_R \quad (2)$$

$$\bar{e}_{rheo} = \eta_p \cdot D \cdot \left\{ \frac{d_e}{h_0} \right\} \quad (3)$$

$$e_{el} = \frac{\epsilon^2 \cdot E}{2} \quad (4)$$

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (5)$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (6)$$

$$\bar{e}_{rheo} = \frac{\sigma^2}{2G'} \quad (7)$$

$$\bar{e}_{rheo} = e_{rheo,el} + i e_{rheo,pl} \quad (8)$$

$$e_{rheo,el} = \frac{\sigma_0^2}{2G} \quad (9)$$

$$i e_{rheo,pl} = \frac{\sigma^2}{2G''} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{e}{p_r} \cdot l_R \quad (11)$$

Bei strukturviskosen Stoffen können nach [11] unter bestimmten Bedingungen der materialabhängige Amplitudenquotient ( $\sigma_0 \gamma_0^{-1}$ ) und die Phasenverschiebung  $\delta$  (aus der Oszillationsmessung) als reale Materialeigenschaften angesehen werden.

Analysiert man die beiden Module (5) und (6), so führt dies zu Energiedissipations- und Energieakkumulationsvorgängen. Beides sind aus Sicht des Reibungsprozesses Energieaufwendungen. Eine energetische Interpretation und Nutzung dieser rheologischen Größen zur Beschreibung der tribologischen Beanspruchung, führt zur komplexen rheologischen Energiedichte, wie aus Gleichung (7) ersichtlich ist.

Die Aufteilung dieser Energiedichte gemäß Gleichung (8) ergibt die beiden Anteile (9) und (10).

Die komplexe Energie  $\bar{e}_{rheo}$  wird im Bereich des konstanten Verhältnisses zwischen Spannung und Deformation als eine Energieaufwendung je Volumeneinheit verstanden. Dabei werden Adhäsionsvorgänge zunächst vernachlässigt.

### 3.3 Abschätzung der Energieaufwendungen bei experimentellen Arbeiten

Experimentelle Untersuchungen zum rheologischen Verhalten von Schmierfetten mittels Oszillations-Meßmethode sind selten. In [5] sind aus Sicht des unterschiedlichen Verhaltens von Fetten in dünnen Schmierspalten Speichermoduln in Abhängigkeit variierter Betriebsbedingungen angegeben. Um mit diesen Ergebnissen eine erste Abschätzung der Energieaufwendungen beim Scheren des Schmierfettes nach dem beschriebenen Modell vorzunehmen, müssen grobe Annahmen getroffen werden.

Für den Fall einer Spaltweite von 250 µm und verwendetem Fett der NLGI-Klasse 2 werden mit Gleichung (11), siehe [12], Reibungszahlen im Bereich von  $\mu = 0,0003$  erhalten.

Energiedichte bei rheologischer Deformation energy density for rheological deformation ( $p_r = 6000$ mPa)	0.005 J/mm <sup>3</sup>
Energiedichte bei plastischer Deformation (z. B. Stahl/Stahl)/energy density for plastic deformation (e. g., steel against steel)	0.32 J/mm <sup>3</sup>
Bruchenergiedichte (z. B. für vergüteten Stahl) fracture energy (e. g., for quenched and drawn steel)	1.46 J/mm <sup>3</sup>

**Abb. 2:**  
**Beispiele nach [9]**  
**für Energiedichten bei unterschiedlichen Mechanismen**

**Fig. 2:**  
**Example from reference [9]**  
**of the energy density for different mechanisms**

The proportionality factor used here is an energy density. A mean value of the volume subject to load is used in the equation. The energy densities for fracture, plastic deformation and rheological deformation are listed in Figure 2 (taken from reference [9]).

### 3.2 Rheological frictional energy density

G. Fleischer [9] determined a rheological “shearing” energy density for a hydrodynamically lubricated bearing. The basis was the geometrical ratio shown in Equation (2).

Different energy losses are considered as a function of the changing viscosity within the process. Equation (3) (from reference [10]) relates the microstructural geometric quantities and  $\eta_p$  to the energy loss for a viscous lubricant:

It is reasonable to relate energy losses in a tribological process not only to operating conditions, but also to material properties. This is especially true when considering viscous lubricants because the viscosity is part of a cause and effect chain.

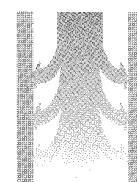
Tross [1] proposed the Equation (4) for deformation of solids in the Hookean region.

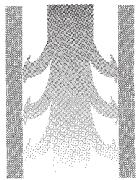
For shear thinning materials, according to reference [11] one can consider the amplitude quotient ( $\sigma_0 \gamma_0^{-1}$ ) (which is material dependent) and the phase shift  $\delta$  (from the dynamic measurements) to be real material properties.

The moduli can be determined from Equations (5) and (6), where  $G'$  corresponds to energy stored and  $G''$  to energy lost. Both are energy losses from the point of view of a frictional process. Interpreting these rheological quantities based on energy and using them to describe the tribological load results in a complex rheological energy density, as seen in equation (7).

Dividing this energy density into parts as shown in Equation (8) leads to the separate contributions given in Equations (9) and (10).

The complex energy density  $\bar{e}_{rheo}$  can be considered an energy loss proportional to unit volume for conditions in which the ratio between the stress and deformation is constant. In this case, adhesive processes are considered negligible.





Dabei wird vorausgesetzt, daß die Scherung im gesamten Spaltvolumen erfolgt und  $\bar{e}_{\text{rheo}}$  mit  $0,64 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^3$  abgeschätzt. Für die Reibungsintensität  $i_R$  wird die Spaltweite auf den mittleren Querschnitt eines Verdickers [13] bezogen. Die Reibungsenergie für eine Viertelperiode der schwingenden Beanspruchung beträgt für die beschriebene Spaltgeometrie  $W_R = W_{R\text{rheo}} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ J}$ .

#### 4 Zusammenfassung

Zur energetischen Beurteilung der Flüssigkeitsreibung bei Verwendung von strukturviskosen Schmierstoffen, wird eine komplexe rheologische Reibungsenergiendichte definiert. Die Beschreibung des Energieaufwandes beim Scheren des Zwischenstoffes erfolgt unter Applizierung rheologischer Kenngrößen der Oszillationsmessung. Dadurch können materialabhängige Reibungsenergieverluste für den Zustand der Flüssigkeitsreibung quantifiziert werden.

Für die Auswertung des beschriebenen Modells sind zahlreiche experimentelle Untersuchungen geplant.

■ Rh



- [1] Tross, A.: „Über das Wesen und den Mechanismus der Festigkeit“, München und Zell am See, Eigenverlag 1966
- [2] Fleischer, G., Arb. Plenum Kl. AdW. Berlin 13 (1988), No. 1
- [3] Kuhn, E., Rheology 2 (1992), p. 252–257
- [4] Dresel, W.H., Tribologie und Schmierungstechnik 40 (1993), No. 3, p. 176–182
- [5] Riester, M.: „Rheologie von Schmierfetten in dünnen Schichten“, DA, FH Darmstadt, 1989
- [6] Münnich, H., Tribologie und Schmierungstechnik 15 (1968), p. 87–97
- [7] Cann, P.M.; Spikes, H.A., Lubrication Engineering 48 (1992), No. 4, p. 335–343
- [8] Liebl, X.; Vámos, E., Tribologie und Schmierungstechnik 15 (1968), p. 217–222
- [9] Fleischer, G., Schmierungstechnik, Berlin 16 (1985), No. 2, p. 358–363
- [10] Kuhn, E., Wear, 142 (1991), p. 203–205
- [11] Rohm, H., Rheology 3 (1993), p. 173–182
- [12] Winkelmann, U., Schmierungstechnik, Berlin 19 (1988), No. 5, p. 150–153
- [13] Czarny, R., Tribologie und Schmierungstechnik, 36 (1989), No. 3, p. 143–150

#### Lesen Sie in den nächsten Ausgaben:

P. O. Brunn:  
Optische Messungen  
des Geschwindigkeits-  
profils eines ER-Fluids  
im Flachkanal

D. V. Boger:  
Nutzung der Rheologie  
für besondere Fluide

H. O. Kassim,  
E. G. Killick:  
Untersuchung der  
rheologischen Eigen-  
schaften von  
Abwasserschlamm

K. Wikström, L. Bohlin,  
A.-Ch. Eliasson:  
Biaxiales Dehnfließen  
von Weizenkleig

#### See in the next issues:

P. O. Brunn:  
Optical Measurements  
of the Shear Rate  
Profile of an ER Fluid in  
a Flat Channel

D. V. Boger:  
Exploiting the Rheology  
for Particulate Fluids

H. O. Kassim,  
E. G. Killick:  
Investigation of the  
Rheological Behaviour  
of Digested Sewage  
Sludge

K. Wikström, L. Bohlin,  
A.-Ch. Eliasson:  
Biaxial Extensional Flow  
of Wheat Flour Doughs

#### 3.3 Estimate of energy losses from experiments

There have been very few investigations of the rheological behavior of lubricating grease using dynamic measurements. The behavior of greases in thin lubricating zones, was characterized in reference [5] by measuring the storage modulus as a function of variation in the operating conditions. In order to make an initial estimate of the energy losses for shearing of lubricating greases based on the described model, one must make simplifying assumptions.

For the case of a gap width of 250 µm filled with NLGI-class 2 grease one calculates a friction coefficient of approximately  $\mu = 0.0003$  using equation (11), see [12].

The calculation assumes that shearing occurs throughout the entire gap and uses an estimated value of  $\bar{e}_{\text{rheo}} = 0.64 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^3$ . For the friction intensity  $i_R$ , the gap width used is based on the average cross section of a thickener [13]. For this geometry, the frictional energy associated with a quarter period of oscillation is  $W_R = W_{R\text{rheo}} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ J}$ .

#### 4 Conclusion

A complex rheological friction energy density has been defined and used to calculate the energetics of lubricating friction using shear thinning lubricants. The description of energy losses from shearing the lubricant was accomplished by using rheological parameters determined from dynamic experiments. With these parameters the material dependent energy loss for the specific lubrication conditions was quantifiable.

In order to test the described model, future work will include conducting various experiments, a number of which are already planned.

■ Rh