

Energetische Untersuchungen zum zeitabhängigen Fließverhalten von Schmierfetten

Energetics of the Time Dependent Flow Behaviour of Greases

Erik Kuhn,
Hamburg, Germany



Das zeitabhängige Verhalten von Schmierfetten bei tribologischer Beanspruchung ist für die praktische Anwendung in Reibpaarungen von großer Bedeutung. Dabei muß den sich ändernden viskoelastischen Eigenschaften und der sich ändernden Struktur des Schmierstoffes Aufmerksamkeit geschenkt werden. Zur Abschätzung des Energieniveaus bei ertragbarem rheologischen Verschleiß aus experimentellen Arbeiten wird eine Möglichkeit zur Quantifizierung gegeben und damit eine vergleichende Einschätzung der untersuchten Schmierstoffe möglich, wie aus Gleichung (3) ersichtlich ist. Zur Beschreibung der scheinbaren rheologischen Reibungsenergiedichte soll die Energieaufwendung pro Zeiteinheit für den beginnenden rheologischen Verschleiß herangezogen werden.

1 Einleitung

Der Einsatz von Schmierfetten in Kontaktbereichen mit Relativbewegung ist in Baugruppen und Elementen des Maschinenbaus außerordentlich vielseitig und erfolgreich. Problematisch hingegen ist die Erfassung des Prozeßgeschehens bei der Dimensionierung, Optimierung oder Schadensbegutachtung. Hier zeigt sich, daß das besondere rheologische Verhalten und darin begründet auch das tribologische Prozeßverhalten, zu einem überwiegenden Teil empirisch beschrieben wird.

Dabei ist das Verhalten des Zwischenstoffes oder besser, dessen zeitliche Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit von besonderem Interesse. Die Schwierigkeiten bei der Erfassung dieser Problematik resultieren zum einen in den nur unzureichend bekannten, aber extremen Beanspruchungen im tribologischen Spalt; zum anderen aus der großen Anzahl von Einflußgrößen (Betriebsbedingungen und Werkstoffeigenschaften).



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 Schmieringstechnik 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.

The time dependent properties of grease during frictional loading is of great practical significance. Changes in the lubricant's viscoelastic properties and structural characteristics must both be considered. To estimate the energy level for a given rheological loading applied experimentally, Equation (3) can be used both to quantify the value and to compare the behaviour of various greases. To describe the apparent rheological frictional energy density, the energy dissipation per unit time from the beginning of the fatigue period is also considered in the analysis.

1 Introduction

Grease is widely and effectively used as a lubricant in subassemblies and mechanical equipment. A major problem is detecting process behaviour of the lubricant when sizing or optimizing equipment and/or evaluating wear and fatigue. One finds that the rheological behaviour and corresponding tribological process characteristics of various greases is in large part described empirically.

The time dependent behaviour of the lubricant's material properties is of particular interest. The difficulties associated with characterizing such behaviour include the extreme, and in most cases uncertain, stresses that exist in the tribological region, and the large number of influential parameters (both operational and material parameters).

For a frictional interaction, the lubricant's properties at the outset of the process are extremely important. However, even more crucial is the behaviour of the lubricant after a long period of loading. The frictional conditions of mixed friction and fluid friction are largely determined by the lubricant's properties.

2 Tribological and Rheological Behaviour of Grease

2.1 General Considerations

Most greases consist of a base oil (~90 %) fortified with a thickener (in many cases a metal surfactant). The resulting network structure causes non-Newtonian flow behaviour that is different depending on the type and concentration of thickener.

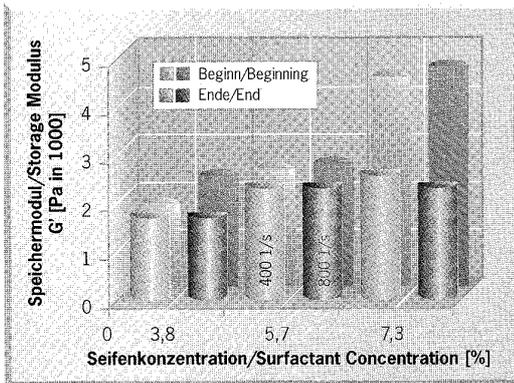


Abb. 4:
Veränderung des
Speichermodulus durch
eintretenden Strukturabbau

Fig. 4:
Change in the storage modulus
due to structural degradation

Dabei ist e_{Rrheo}^* das für den vorliegenden rheologischen Verschleiß ertragbare Energieniveau. Dieses Energieniveau kann zur Vergleichbarkeit und Charakterisierung des Verhaltens von Schmierfetten herangezogen werden. Hohe Werte für die scheinbare rheologische Reibungsenergie e_{Rrheo}^* kennzeichnen eine mögliche hohe Energiebeaufschlagung bei vergleichbarem Strukturabbau und umgekehrt.

Eine Verknüpfung des Strukturabbaues mit e_{Rrheo}^* liefert:

$$\Phi = \frac{V_V}{V_R} \cdot \dot{e}_\Delta \quad (3)$$

Dabei sind V_V und V_R das Verschleiß- bzw. das Reibungsvolumen. Die Geschwindigkeit der Änderung von e_{Rrheo}^* wird mit \dot{e}_Δ [J/m^3s] beschrieben. Kleine Werte von \dot{e}_Δ können als Fähigkeit des Schmierfettes, viel Energie aufzunehmen, interpretiert werden.

Ein signifikanter Prozeßpunkt ist der beginnende Strukturabbau. Er kann zur Beschreibung des im Gleichgewicht befindlichen Verschleißes benutzt werden. Zunächst soll aus Sicht einer Energiedichtebestimmung der Prozeßbeginn Gegenstand der Untersuchung sein. Schmierfette sind Substanzen mit einer Fließgrenze. Die bis zum Zeitpunkt des Fließbeginns aufgebrauchte Energie pro Zeit [J/m^3s] beträgt

$$\dot{e} = \frac{e}{t} = \frac{\tau_y \cdot \dot{\gamma}_y}{2} \quad (4)$$

Einen ähnlichen Ansatz, wenngleich mit anderer Ausrichtung, findet man in [5]. Für das Energieniveau bei Erreichen eines annähernd linearen Prozeßgeschehens wird Gleichung (5) vorgeschlagen:

$$e_{Rrheo}^* = \frac{\tau \cdot \dot{\gamma} \cdot e_{lim}}{\dot{e}} \quad (5)$$

2.3 Experimentelle Untersuchungen

Das viskoelastische Verhalten ist stark durch die sich ausbildende Netzstruktur geprägt. Abb. 2 zeigt gemessene Module in Abhängigkeit von der Konzentration der beigefügten Seife. Auch die Auswertung der Rück-

V_V und V_R are wear and friction volume. The speed of change of e_{Rrheo}^* is described with \dot{e}_Δ [J/m^3s]. Small values of \dot{e}_Δ can be interpreted as the capacity of the lubricating grease to absorb lots of energy.

A crucial point of the process is the onset of structural breakdown. This time can be used to describe the magnitude of the degradation at equilibrium. One must first describe the beginning of the process in terms of an energy density determination. Greases exhibit a yield stress. The energy per unit time [J/m^3s] applied until flow begins is given by:

$$\dot{e} = \frac{e}{t} = \frac{\tau_y \cdot \dot{\gamma}_y}{2} \quad (4)$$

A similar formulation is found in reference [5]. Equation (5) defines the energy level at which the process approaches linear behaviour:

$$e_{Rrheo}^* = \frac{\tau \cdot \dot{\gamma} \cdot e_{lim}}{\dot{e}} \quad (5)$$

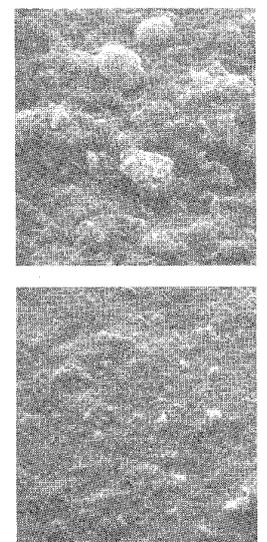
2.3 Experimental Investigation

The viscoelastic response is strongly influenced by the lubricant's network structure. Fig. 2 shows experimental values of the moduli as a function of surfactant concentration. The recovery values from the creep experiments shown in Fig. 3 also show the influence (dependent of ϑ_0) of network structure. These experiments were conducted at a shear stress of 10 MPa for different surfactant concentrations. The elasticity of the grease arises due to the surfactant fibrils. The elastic component changes sharply at the beginning of loading, but remains at a significant level even at long times (Fig. 4). This behaviour is particularly relevant for the formation of an effective lubricating film (with an elasto-hydrodynamic contact smaller than 1 μm), especially for extreme, sensitive systems.

Fig. 6 shows the flow energy density per unit time \dot{e} , calculated from the experimentally determined yield stress for greases with lithium surfactant concentrations of 3.8%, 5.7%, and 7.3%, respectively. As expected, \dot{e} increases with increasing surfactant concentration. If the yield stress is a significant

Abb. 5:
Optische Untersuchung
einer Schmierfettprobe
(7,3% Seifengehalt) vor und
nach der Beanspruchung
(REM-Aufnahme, 100fach)

Fig. 5:
Optical examination
of a grease sample
(7.3% surfactant concentration)
before and after tribological
loading (Scanning electron
micrograph, magnification
= 1000)





erholung bei durchgeführten Kriechversuchen zeigt den Einfluß hier auch in Abhängigkeit von ϑ_B , einer mehr oder weniger ausgeprägten Netzstruktur (Scherung bei 10 MPa), siehe Abb. 3. Die durch die Seifenfibrillen verursachten elastischen Anteile erfahren eine starke Veränderung durch die tribologische Beanspruchung, sind aber auch nach längerer Scherung noch signifikant (Abb. 4). Für die Ausbildung eines wirksamen Schmierfilmes (im elastohydrodynamischen Kontakt unter $1 \mu\text{m}$) ist dieses Verhalten von besonderer Bedeutung und wird sich gerade bei extremen und damit sehr empfindlichen Systemen auswirken.

Aus der Ermittlung der Fließgrenze für ein Schmierfett mit einem Lithiumseifengehalt von 3,8 %, 5,7 %, und 7,3 % ergaben sich für die Fließenergiedichte pro Zeiteinheit $\dot{\epsilon}$ die in Abb. 6 dargestellten Werte. Hier zeigt sich ein zu erwartender Anstieg von $\dot{\epsilon}$ mit zunehmendem Seifengehalt. Wenn man die Verwendung der Fließgrenze als einen signifikanten Parameter auf die Beschreibung des Strukturabbaues projiziert, so ergibt sich die Untersuchung des rheologischen Verschleißes bei Fließbeginn als eine weitere Möglichkeit der Prozeßanalyse.

Für den rheologischen Verschleiß bei Fließbeginn ($\dot{\gamma}$) kann aus Abb. 7 das Energieniveau bei ertragbarem Strukturabbau e_{Rrheo}^* ermittelt werden. Um vergleichende Aussagen treffen zu können, müssen die Energiedichten bei gleichen Betriebsbedingungen bestimmt werden ($\vartheta \cdot \dot{\gamma} = \text{const.}$).

Die experimentellen Untersuchungen wurden auf dem UM MC100 der Firma Physica Meßtechnik durchgeführt. Für die Anfertigung der REM-Aufnahmen dankt der Autor Herrn Dipl.-Ing. Daeglin von der Deutschen Shell AG Hamburg.



- [1] Holweger et al., Tribologie und Schmierungstechnik 37 (1990)
- [2] Spiegel, K.; Fricke, J.; Meis, K.-R.: „Die Fließigenschaften von Schmierfetten in Abhängigkeit von Beanspruchung, Beanspruchungsdauer und Temperatur“, Proceed. 8th Intern. Coll. Tribology, Esslingen 1992
- [3] Kuhn, E.; Balan, C.; Wear (to be published 1997)
- [4] Kuhn, E.; Wear 188 (1995)
- [5] Loges, J.; Wiss. Zeitschr. der Uni Magdeburg, 14 (1970)

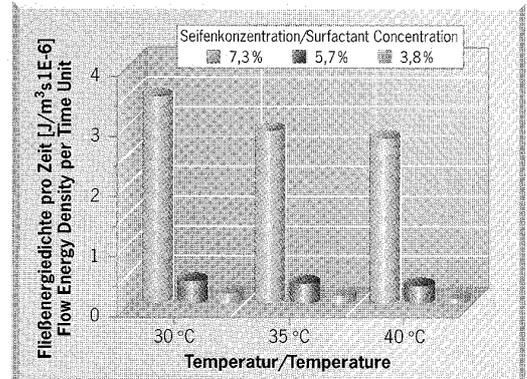


Abb. 6: Fließenergiedichte pro Zeit bei verschiedenen Seifenkonzentrationen und Temperaturen

Fig. 6: Flow energy density per unit time at different surfactant concentrations and temperatures

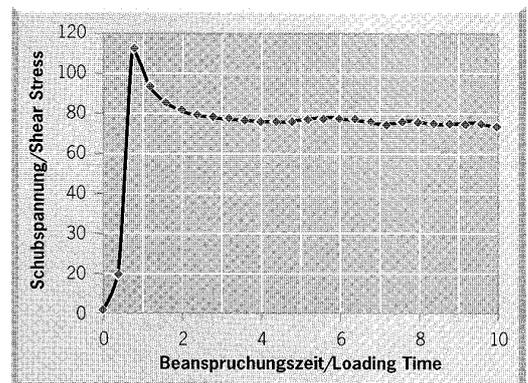


Abb. 7: Rheologischer Verschleiß bei Fließbeginn für ein Schmierfett mit 7,3% Seifengehalt

Fig. 7: Rheological degradation at the onset of flow for a grease with 7.3% surfactant

parameter to describe structural degradation, then examining rheological degradation during the onset of flow is a possible method for process analysis.

For rheological degradation at the onset of flow ($\dot{\gamma}$), one can determine from Fig. 7 the energy level for a given structural degradation e_{Rrheo}^* . To obtain comparable data, one must determine the energy density under the same operational conditions ($\vartheta \cdot \dot{\gamma} = \text{constant}$).

The experimental work was conducted using the UM MC100 rheometer from Physica, Meßtechnik. For preparation of Scanning electron micrographs I would like to thank Mr. Daeglin from the Deutschen Shell AG in Hamburg.

