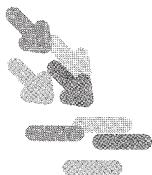


# Energieaufwendungen zum Erreichen einer minimalen Strukturviskosität

## Energy Input to Attain a Minimum Viscosity

Erik Kuhn,  
Hamburg,  
Germany



### 1 Einleitung

Viele in der Technik eingesetzten Betriebs- bzw. Schmierstoffe verhalten sich wie eine Nicht-Newtonscche Flüssigkeit. Ihre Aufgaben sind in einem überwiegenden Maße mit der Reduzierung von Reibung und Verschleiß zu beschreiben. Die Einbeziehung in die Dimensionierung von Baugruppen oder in die Beurteilung von Schadensfällen, ist dabei von außerordentlicher Wichtigkeit. Ein wiederkehrendes Problem ist die Abschätzung des Betriebsverhaltens und eine vergleichende Beurteilung der eingesetzten Schmierstoffe.

Bei der Mischreibung auftretende Energieverluste sind begründet in der Festkörperdeformation und der Schmierstoffdeformation. Für den Zustand der Flüssigkeitsreibung bestimmt allein der Schmierstoff die Reibungsverluste. Die Untersuchung der Fließeigenschaften führt z.B. bei Schmierfetten zur Beschreibung eines rheologischen Verschleißes [1], der Grundlage für vergleichende Aussagen sein kann.

Bei beiden, den Reibungs- und den Verschleißuntersuchungen, wird eine energetische Betrachtungsweise vorgeschlagen. Für die Abschätzung des energetischen Niveaus, d.h. der Frage, inwieweit der Schmierstoff mit Energie beaufschlagt werden kann bis ein kritischer Zustand erreicht wird, soll die in [1] angegebene scheinbare Reibungsenergiedichte  $e^*_{\text{Rheo}}$  dienen.

Die hier vorgestellten Untersuchungen führen zu einer neu definierten Werkstoffkenngroße für strukturviskose Flüssigkeiten mit dem beschriebenen Verhalten, der Restenergiedichte  $e_{\text{lim}}$ .

### 2 Zum Kriterium der Beanspruchungszeit

Nach [2] sind Schmierfette im allgemeinen thixotrop. Dabei ist der Umstand des Strukturabbaus bei Scherbeanspruchung im Fett in den Mittelpunkt der Untersuchungen gerückt. Über einen längeren Beanspruchungszeitraum führt dies zu einer Abnahme der Schubspannung  $\tau$  bzw. der scheinbaren Viskosität  $\eta^*$ .

Bei niedrigem Geschwindigkeitsgefälle ist nach Palacios/Palacios [z.B. 3] das rheologische Verhalten sehr komplex beeinflußt (Herstellungsprozeß usw.).

Reibpaarungen sollen ein möglichst hohes energetisches Niveau besitzen. Dies bedeutet, daß sie mit möglichst viel Energie beaufschlagt werden können, bevor ein kritischer Zustand eintritt. Für strukturviskose Flüssigkeiten kann dieses Energieniveau mittels einer neu definierten Werkstoffkenngroße, der Restenergiedichte  $e_{\text{lim}}$ , beschrieben werden.

Friction pairings possess the highest energy level possible. This means they can be subjected to a very high energy, before reaching a critical state. For shear thinning fluids, this energy level can be described using a newly defined material property, the limiting energy density,  $e_{\text{lim}}$ .

### 1 Introduction

Many lubricants and other industrial fluids exhibit non-Newtonian behavior. In the majority of cases, the purpose of these fluids is to reduce friction and fatigue of moving parts. It is thus extremely important to consider these fluids when designing structural components or making failure predictions. Estimating the operational performance and comparatively evaluating various

lubricants is a recurring problem.

In the case of mixed friction, the energy losses are a result of deformation of both the solid body and the lubricant. For the case of fluid friction, the characteristics of the lubricant alone determine the frictional losses. Investigation of flow properties (e.g., in the case of lubricants) provides a measure of rheological structure breakdown [1]; the degree of structure breakdown can be used to compare various fluids.

In both friction and fatigue studies, an energetic approach is proposed. The apparent frictional energy density  $e^*_{\text{Rheo}}$ , defined in [1], is the parameter used for estimating the maximum energy that can be applied to the lubricant before it reaches a critical state.

The investigations presented in this paper have resulted in the definition of a new material parameter for describing shear thinning fluids, the limiting energy density,  $e_{\text{lim}}$ .

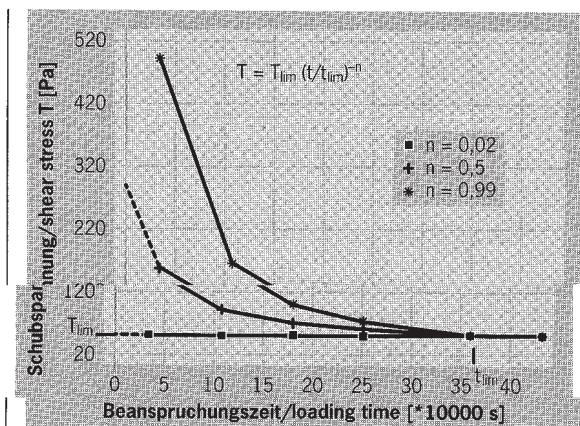
### 2 Criterion for the Loading Time

According to reference [2], lubricants tend to exhibit thixotropic behavior. As a result, breakup of their structure during shear flow is a key issue. When shearing is applied for relatively long times, the shear stress  $\tau$  and, correspondingly, the apparent viscosity  $\eta^*$ , decrease as a function of time.

According to Palacios and Palacios (reference [3]), at low shear rates, such as in production processes, the lubricant's rheological properties are influenced in a complex way. At high shear rates, the flow curve

**Abb. 2:**  
Modelliertes Verhalten  
der Schubspannung  
(Beispiel)

**Fig. 2:**  
Modeled behavior  
of the shear stress  
(example)



Vorgeschlagen wird hier eine Zeitabhängigkeit, um dem Verhalten einer strukturviskosen Flüssigkeit über der Beanspruchungszeit gerecht zu werden. (Mit der Beanspruchungszeit ist natürlich ein zugehöriger „Reibungsweg“ verbunden.) Auf eine Anwendung von Potenzansätzen, wie sie z.B. Wilson und Smith [6] nutzen oder wie sie in der klassischen Darstellung bekannt sind, wurde aufgrund der schon bei Reiner [7] erwähnten Dimensionseinwände verzichtet.

Wird nun aus dem Rheometerexperiment und dem modellierten Ansatz (Gl. 2) die Energieaufwendung  $e_{lim}$  bestimmt (Abb. 2), so folgt

$$e_{lim} = \tau_{lim} \frac{1}{(-n+1)} \left( \frac{t}{t_{lim}} \right)^{(-n+1)} \quad [\text{J/mm}^3] \quad (3)$$

Diese Energiedichte beschreibt für konstante Betriebsbedingungen ( $D=\text{const.}$ ) die Energieaufwendungen zum Erreichen einer minimalen Strukturviskosität.

#### 4 Darstellung der Restenergiedichte

Um eine Vorstellung über die Größenordnung einer Restenergiedichte zu erhalten, wurde der gemessene Verlauf von  $\tau(t)$  einer Schmierfettprobe herangezogen

##### Formelzeichen/Symbols used

$e^*_{Rrheo}$	scheinbare rheologische Reibungsenergiedichte apparent rheological frictional energy density [J/mm]
$e_{lim}$	Restenergiedichte limiting energy density [J/mm]
$n$	Intensität des Strukturabbaus degree of structural breakdown
$t$	Beanspruchungszeit/loading time [s]
$t_{lim}$	Restbeanspruchungszeit/limiting loading time [s]
$\tau$	Schubspannung/shear stress [Mpa]
$\tau_{lim}$	Restschubspannung/limiting shear stress [Mpa]

#### 3.1 Energy input to attain a minimal viscosity

In Equation (1), the limiting energy density  $e_{lim}$  is a material parameter, i.e., it is a property of a shear thinning fluid. This parameter can be determined via rheometrical experiments.

We begin by assuming that the typical curve for the shear stress as a function of time shown in Fig. 1 can be described by

$$\tau = \tau_{lim} \cdot \left( \frac{t}{t_{lim}} \right)^{(-n+1)} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Here, the parameters  $\tau_{lim}$  and  $t_{lim}$  are obtained at the conditions of maximal structure breakdown corresponding to the limiting viscosity. The exponent  $n$  has a value between 0 and 1, and is a measure of the degree of structural breakdown. Quantification of  $n$  is accomplished experimentally, as described below.

We propose here a time dependency to describe the behavior of shear thinning fluids during application of a load. There is naturally a certain frictional deformation that corresponds to loading time. A power law model, such as applied by Wilson und Smith [6], or used in well-known classical representations, was not applied in this case due to the dimensional arguments set forth by Reiner [7].

To determine the limiting energy density from rheometer experiments, one uses equation (2) to obtain the following relationship (see Fig. 2):

$$e_{lim} = \tau_{lim} \frac{1}{(-n+1)} \left( \frac{t}{t_{lim}} \right)^{(-n+1)} \quad [\text{J/mm}^3] \quad (3)$$

This energy density represents the energy necessary under given operating conditions ( $D = \text{constant}$ ) to reach a minimal intrinsic viscosity.

#### 4 The Limiting Energy Density

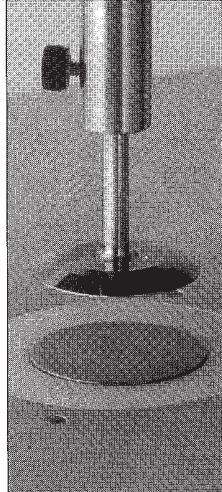
To show the magnitude of the limiting energy density, shear stress  $\tau(t)$  measurements on a sample lubricant were reduced according to Equation (3), [8]. The limiting energy density  $e_{lim}$ , which is a material property describing the energy of a sheared non-Newtonian fluid, can be compared to the breaking energy density used to characterize solids. The breaking energy density is a material property related to the critical energy that causes fatigue degradation of a solid. The mean breaking energy  $\bar{e}_B$  of iron [9] is given in Fig. 3 for comparative purposes.

# High Shear, Cone & Plate Digital Viscometer

**NEW**

Budget priced Brookfield CAP 2000 combines high shear rate and variable speed in a cone and plate viscometer that provides:

- Shear rate is variable from 166 to 26,600 sec<sup>-1</sup>
- Viscosity range 0.1 to 1,500 Poise
- Sample temperature control
- Digital settings and display in CGS or SI units
- PC programmable via RS232
- Tests mini-samples (<1 ml)
- Fast and easy to set up and clean



ISO 9002 Certified



Call or send for brochure

**BROOKFIELD ENGINEERING LABS, INC.**  
Dept. CAP-2 240 Cushing Street,  
Stoughton, MA 02072-2398 USA

617-344-4310 • FAX 617-344-7141 • 800-628-8139 (US ex MA)

[8]. Für die hier angestellten Überlegungen wurden  $\tau_{lim}$  und  $t_{lim}$  definiert. Die als Werkstoffeigenschaft interpretierte Restenergiedichte  $e_{lim}$  ist in ihrer Bedeutung für Untersuchungen zum energetischen Niveau beanspruchter strukturviskoser Stoffe der Bruchenergiedichte fester Körper vergleichbar. Diese stellt bei der Bestimmung kritischer Energieniveaus für den Abtragverschleiß fester Körper eine Werkstoffeigenschaft dar. In Abb. 3 ist die mittlere Bruchenergiedichte  $\bar{e}_B$  von Fe [9] zum Vergleich mit aufgeführt.

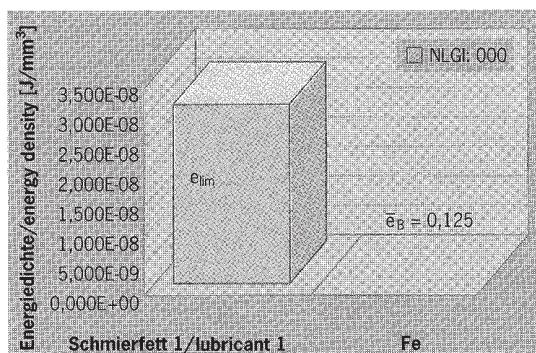
## 5 Zusammenfassung

Für eine entsprechend Abb. 1 sich verhaltende strukturviskose Flüssigkeit kann die Energieaufwendung bis zum Erreichen einer minimalen Strukturviskosität durch die Restenergiedichte  $e_{lim}$  beschrieben werden (Modellversuch). Diese Energiedichte stellt eine Kenngröße des Werkstoffes dar. Mit ihrer Hilfe können bei gleichen Betriebsbedingungen die genannten Stoffe klassifiziert und das sich einstellende Energieniveau  $e^*_{Rheo}$  nach einem Beanspruchungsprozeß (gemeint ist z.B. die Beanspruchung eines Schmierfettes in einem Wälzlager) abgeschätzt werden.

■ Rh



- [1] Kuhn, E.: Rheology 2 (1992), p. 252-257
- [2] Cann, P.M.; Spikes, H.A.: Journal of the STLE, 48 (1992), 4, p. 335-343
- [3] Palacios, J.M.; Palacios, M.P.: Tribology Intern. 17 (1984), p. 167-171
- [4] Loges, J.: Schmierungstechnik, Berlin 16 (1985), 3, p. 68-70
- [5] Kuhn, E.: ÖTG-Symposium, Wien 1994
- [6] Wilson, J.W.; Smith, G.H.: Industrial and Engineering Chemistry, 41 (1949), p. 770
- [7] Reiner, M.: Rheologie in elementarer Darstellung, Carl Hanser Verlag München 1968
- [8] Kück, TH.: Experimentelle Untersuchung zum rheologischen Verschleiß ausgewählter Schmierfette. Stud.arbeit 1994 FH Hamburg
- [9] Winkelmann, U.: Grundlagen zur energetischen Bestimmung von Reibungskenngrößen bei Festkörperreibung metallischer Gleitpaarungen. Diss. 1982, Universität Magdeburg



**Abb. 3:**  
Restenergiedichte für ein 000-Schmierfett und Vergleich mit der Bruchenergiedichte von Fe ( $D = 5.01 \text{ s}^{-1}$ ;  $n \approx 0.02$ )

**Fig. 3:**  
Limiting energy density for a 000-lubricant compared with the breaking energy density of iron ( $D = 5.01 \text{ s}^{-1}$ ;  $n = 0.02$ )

## 5 Conclusion

For a shear thinning fluid that exhibits behavior as shown in Fig. 1, the energy input necessary to reach a minimal viscosity can be described using the limiting energy density  $e_{lim}$ . This parameter is a material property that can be used to estimate the energy level  $e^*_{Rheo}$  corresponding to a given load (such as shearing of a lubricant between roller bearings). It can also be used to evaluate different materials tested under identical operating conditions.

■ Rh

