

ZUR BEURTEILUNG DER REIBSENKENDEN UND VERSCHLEISSMINDERNDEN EIGENSCHAFTEN VON SCHMIERÖLEN UNTER LABORBEDINGUNGEN*

D. K. W. SCHULZE, D. CHRISTAKUDIS und G. DRECHSLER

Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden
Sektion Mathematik, Rechentechnik und Naturwissenschaften, Wissenschaftsbereich Chemie

Eingegangen am 30. Juni 1983
Vorgelegt von Prof. Dr. I. Szebényi

Summary

In order to decrease the energy consumed at friction spots the working mechanism of friction modifiers has been examined. Authors suggest to use this term only for such additives which even in very small amounts can reduce the friction resistance and abrasion. Laboratory equipments used for examining friction modifiers should be suitable to measure these characteristics, too. In this paper such an equipment is reported on.

Reibung und Verschleiß verursachen an Maschinen und technischen Anlagen erhebliche Verluste. Durch die Reibung geht mechanische Energie verloren, und aus diesem Grunde hat man den reibsenkenden Eigenschaften von Schmierölen schon immer besondere Bedeutung beigemessen. Der Verschleiß erfordert Instandhaltung und Ersatzteile und führt zu Produktionsausfällen.

Um Energie und Rohstoffe zu sparen ist es deshalb gegenwärtig in der Technik eine wichtige Aufgabe, unerwünschte Reibung und den Verschleiß zu vermindern. Im Schmierstofflabor bedeutet diese Aufgabe im allgemeinen die Ermittlung der reibsenkenden und verschleißmindernden Eigenschaften von Schmierölen durch die Modellierung der Schmierungspraxis auf Schmierölprüfmaschinen. Die richtige Beurteilung der unter bestimmten Laborbedingungen erhaltenen Ergebnisse im Hinblick auf den industriellen Einsatz der Schmieröle ist bereits entscheidend für den Erfolg.

Bei Flüssigkeitsschmierung hängen die Reibungsverluste ausschließlich von der Viskosität der Schmieröle und ihrer betriebsbedingten Veränderung ab. Bei hoher mechanischer Belastung, bei hohen Temperaturen oder auch unterhalb einer kritischen Gleitgeschwindigkeit wird dieser verschleißfreie Idealzustand in der Regel nicht erreicht. Zusätzlich zur Flüssigkeitsreibung

* Vortrag gehalten an der zweihundertjahrfeier Wissenschaftliche Tagung der Chemie-Ingenieur Fakultät der Technischen Universität Budapest, am 9. März 1983.

tritt Festkörperreibung auf, die mit Verschleiß verbunden ist. Das gleichzeitige Wirken der Flüssigkeitsreibung und der Festkörperreibung in einer Reibstelle wird folgerichtig als Mischreibung bezeichnet. Die Laborprüfung von Schmierölen für Mischreibung muß deshalb in der Regel sowohl die reibsenkenden Eigenschaften als auch das Verschleißverhalten erfassen und beurteilen.

Überwiegt die Festkörperreibung bei geschmierten metallischen Reibpartnern, so ist eine schnelle Temperaturerhöhung zu beobachten, die zum Ausfall des Schmieröles und zur Zerstörung der Reibstelle durch „Fressen“ führen kann. Deshalb konzentrierte sich die Entwicklung z. B. bei den Getriebeölen in vergangenen Jahrzehnten auf diesen kritischen Reibungszustand. Es wurden die Extreme-pressure-Zusätze eingeführt, die das Lasttragevermögen der Schmieröle durch Bildung schützender Reaktionsschichten auf den Metalloberflächen der Reibpaarung erhöhen. Das ausschlaggebende Beurteilungskriterium dieser legierten Öle war weniger eine minimale Reibungszahl als vielmehr die Eigenschaft, hohe mechanische Belastungen der Reibpaarung bei geringem Verschleiß ohne Fressen zu ermöglichen. Die Forderung nach hohem Lasttragevermögen bei niedrigem Verschleiß konnte durch die Kombination der freißverhindernden Zusätze (EP-Additives) mit verschleißmindernden Zusätzen (Anti-wear-Additives) erfüllt werden. Manche Zusätze vereinigen beide Wirkungen, wie es im Abb. 1 dargestellt ist. Das Disulfid reagiert in zwei Reaktionsstufen mit der Metalloberfläche. Die Mercaptidstruktur wirkt verschleißmindernd. Bei höherer Belastung entsteht daraus eine Sulfidstruktur, die das Fressen verhindert.

Da es immer dringender wird, jede mögliche Energieeinsparung zu nutzen, haben sich in den letzten Jahren auch bei der Schmierung die Schwerpunkte der Entwicklung verlagert. Neben einer hohen Grenzbelastbarkeit und einer langen Lebensdauer der zu schmierenden Reibpartner sind die Reibungsverluste zu minimieren.

nach Forbes, E.S.: Wear 1970

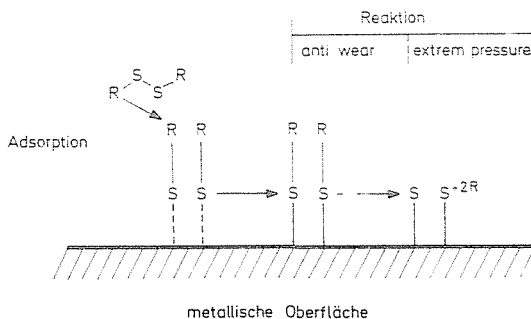


Abb. 1. Reaktion eines Disulfids mit einer Metalloberfläche

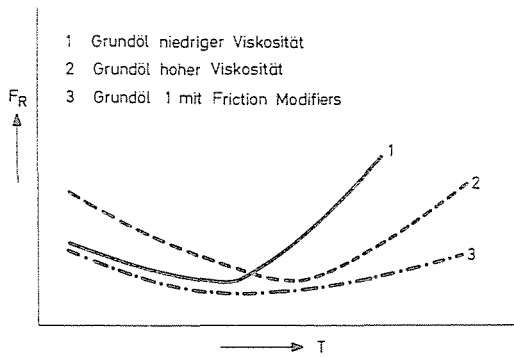


Abb. 2. Abhängigkeit der Reibkraft von der Temperatur T bei Übergang von Flüssigkeits- zur Mischreibung

Bei Flüssigkeitsschmierung bedeutet das den Übergang zu niedrigviskosen Schmierölen mit verbessertem Viskositäts-Temperatur-Verhalten. Für die Bildung eines hydrodynamisch tragenden Schmierfilms ist jedoch erfahrungsgemäß eine Mindestviskosität notwendig. Wird diese unterschritten, z. B. durch Temperaturerhöhung, dann tritt Mischreibung auf und die Reibungsverluste nehmen wieder zu. Eine neue Gruppe von Zusätzen, die Friction modifiers (FM) sollen diese mischreibungsbedingten Reibverluste vermindern. Abb. 2 zeigt ihre generelle Wirkung an dem Verlauf der Reibkraft F_R mit steigender Temperatur T beim Übergang von der Flüssigkeits- zur Mischreibung.

Die reibsenkenden „Friction modifiers“ „Reibmodifikatoren“ oder „Reibminderer“ sind von den bisher genannten EP- und AW-Zusätzen zu unterscheiden. Die reibmindernde Wirkung schlechthin berechtigt noch nicht, von einer neuen Zusatzklasse zu sprechen. Auch die freßverhindernde Wirkung der EP-Zusätze kommt schließlich zustande, weil die gebildeten Reaktionsschichten einen geringeren Scherwiderstand, also niedrigere Reibung aufweisen als die ungeschützten Metalloberflächen der Reibpartner. Der wesentliche Unterschied besteht in den ausgeprägten reibsenkenden Eigenschaften der Reibminderer bei beginnender Mischreibung, die bei den EP-Zusätzen in diesem Belastungsbereich nicht vorhanden sind.

Die Abgrenzung der Reibminderer von den EP- und AW-Zusätzen ist wichtig, nicht nur wegen einer klaren Begriffsbildung, sondern weil es die Beurteilung der unterschiedlichen Zusatzwirkung unter Laborbedingungen dringend erfordert.

Das folgende Beispiel soll das erklären. Völtz und Rulfs (1) stellten die Wirkung der Reibminderer in den sog. „Leichtlaufölen“ in einem Stribeck-Diagramm dar (Abb. 3). Während die bekannten EP- und AW-Zusätze erst

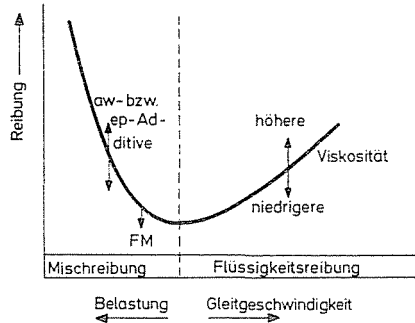


Abb. 3. Wirkung der Friction Modifier, dargestellt im Stribeckdiagramm nach (1)

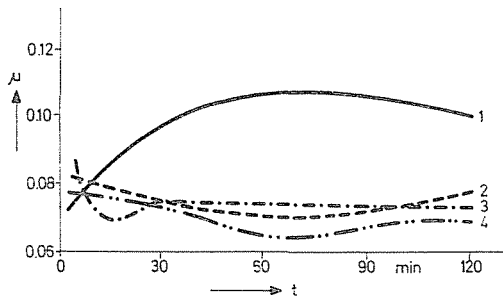


Abb. 4. Einfluß von Zusätzen auf die reibungsmindernden Eigenschaften eines Schmieröles nach Vipper (3)
1 Zinkdialkyldithiophosphat, 2 Optimol VP 357 (BRD), 3 CRC (Belgien), 4 Molyvan L (USA)

bei hoher Belastung reagieren und somit vor allem bei kritischen Reibungszuständen vor dem Fressen nützlich sind, zeigen die Reibminderer bei milder Belastung einen maximalen reibmindernden Effekt. Es ist deshalb notwendig, die Zusätze auf den Schmierölprüfmaschinen im Belastungsbereich ihrer Wirkung zu prüfen. Gute Reibminderer versagen bei hoher, bewährte EP-Zusätze bei niedriger Belastung und werden, so geprüft, völlig falsch beurteilt.

Aus dem Stribeck-Diagramm geht weiter hervor, daß manche EP- und AW-Zusätze neben ihrer typischen Wirkung die Reibung auch erhöhen können. Diese Tatsache blieb lange Zeit unbeachtet; verschleißmindernd wurde oft mit reibmindernd gleichgesetzt. So zählen z. B. Olszewski und Mitarb. (2) auch die Zink-dialkyldithiophosphate zu den Reibminderern. Diese verschleißmindernde, für Motorenöle seit Jahren weltweit bewährte Zusatzklasse zeigt aber keine guten reibsenkenden Eigenschaften, wie z. B. Vipper (3) unter Laborbedingungen nachgewiesen hat (Abb. 4). Aus gleichem Grund fordert Bartz (4), die Zink-dialkyldithiophosphate gegen Zusätze mit besseren reibmindernden und damit kraftstoffsparenden Eigenschaften in den Schmierölen der Kraftfahrzeuge auszutauschen.

Die Entwicklung der Reibminderer erfolgte vor allem zur Kraftstoffersparung in Verbrennungsmotoren, da z. B. die Kolben-Zylinderpaarung 50% der gesamten inneren Reibungsverluste verursacht. Es ist deshalb richtig, die reibmindernden Effekte abschließend auf Motorenprüfständen und in Kraftfahrzeugen nachzuweisen. Für die Vorauswahl und für das Studium der Wirkungsmechanismen potentieller Reibminderer sind leistungsfähige Meßgeräte und Meßmethoden im Schmierstofflabor eine zeit- und kostensparende Prüf- etappe.

Es sei hier nochmals betont: diese Prüfeinrichtungen für Mischreibung müssen bei einer breiten Variation der Versuchsbedingungen die Reibung und den Verschleiß und möglichst Schichtveränderungen der reibenden Oberflächen messen.

In einer kurzen Übersicht stellen wir Ihnen eine Verschleiß- und Reibprüfmaschine ZA-2 vor, die diesen Forderungen entspricht und in unserem Wissenschaftsbereich entwickelt wurde. Als Reibpaarung läuft ein Metallzylinder in einer ölgefüllten heizbaren Prüfmulde gegen eine Kugel bzw. gegen einen Stift (Abb. 5+6). Die folgende Aufstellung zeigt Ihnen die unabhängig voneinander wählbaren Versuchsbedingungen und die Meßgrößen:

Mechanische Belastung $F_N = 0$ bis 110 N

Gleitgeschwindigkeit $V = 25$ bis 1050 mm/s

Prüftemperatur $T = 20$ bis 150 °C

Reibkraft F_R , Verschleißhöhe h_v und elektrischer Kontaktwiderstand R_K kontinuierlich während des Prüflaufes.

Verschleißdurchmesser der Kugel d_v nach dem Prüflauf.

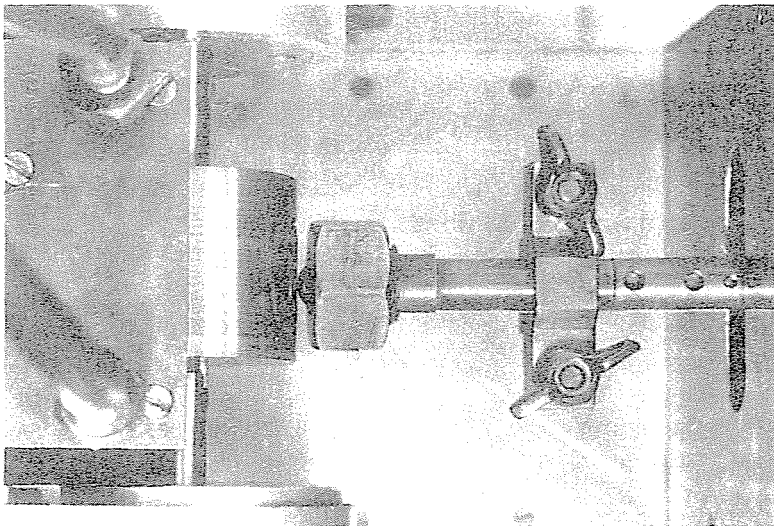


Abb. 5. Prüfpaarung Kugel-Zylinder

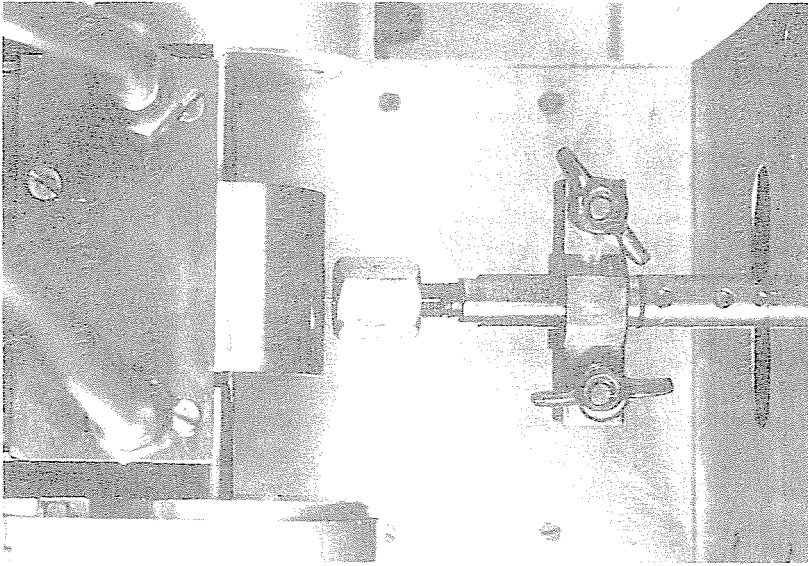


Abb. 6. Prüfpaarung Stift-Zylinder

Abb. 7 zeigt die Wirkung von 0,001 Ma-% Hexadecansäure $C_{15}H_{31}COOH$ gelöst in n-Undecan auf die Paarung Stift-Zylinder dieser Prüfmaschine bei 3 Belastungen als Funktion der Zeit bzw. des Gleitweges. Deutlich ist der Aufbau („positiver Verschleiß“) einer Schutzschicht zu erkennen. Mit der Zeit wird der Zusatz verbraucht, die verschleißschützende Schicht kann sich nicht neu bilden und der Abrieb nimmt schnell zu. Dagegen kommt in den Reibungszahlen der gleichen Reibpaarung das wechselnde Verschleißgeschehen überhaupt nicht zum Ausdruck. Das ist ein weiterer Hinweis dafür, Reibung und Verschleiß als in erster Linie voneinander unabhängige Erscheinungen des jeweiligen tribologischen Systems sorgfältig zu messen und zu beurteilen. Im vorliegenden Fall ist Hexadecansäure mit Reibungszahlen zwischen 0,1 und 0,2 nicht als Reibminderer einzuordnen.

In der gleichen Prüfmaschine wurden 3 Motorenöle bei folgenden konstanten Prüfbedingungen untersucht:

Mechanische Belastung F_N	= 80 N
Gleitgeschwindigkeit V	= 525 mm/s
Prüftemperatur T	= 30 °C
Verschleißfläche A	= 0,48 mm ²

In Abb. 8 werden die linearen Verschleißintensitäten und die Reibungszahlen als Funktion der Zeit dieser Laborprüfung dargestellt.

Es bedeuten:

- 1 unlegiertes Motorengrundöl
- 2 handelsübliches Motorenöl (Zink-Dialkyldithiophosphate als Legierungsbestandteil)
- 3 Motorenöl mit Reibminderer

Nachdem wir wissen, daß Zusätze die Reibung auch erhöhen können, überrascht es uns hier nicht, daß die Reibungsverluste beim handelsüblichen Motorenöl 2 größer sind als beim unlegierten Grundöl 1. Dagegen benötigt das Öl 1 der fehlenden Zusätze wegen eine sehr lange Zeit zum Einlaufen der Reibpaarung, das auch nach 60 Stunden noch nicht beendet ist. Am besten wird das Motorenöl 3 beurteilt. Die Reibminderer bewirken sehr niedrige Reibungszahlen zwischen 0,07 und 0,08 und eine niedrige lineare Verschleißintensität.

Abb. 8 weist auf ein weiteres Problem der Laborprüfung hin. Vielen Laborprüfmethoden ist gemeinsam, daß sie gegenüber der Praxis die Beanspruchungsdauer drastisch verkürzen. Das gilt auch für Schmierölprüfmaschinen allgemein. Die Prüfzeit ist aber besonders für diejenigen Schmierölprüfmaschinen ein wichtiges Beurteilungskriterium, die jeden Prüflauf mit einer

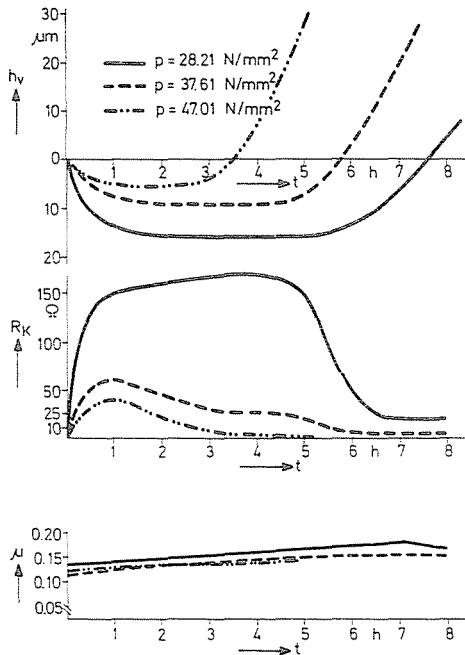


Abb. 7. Veränderung der Verschleißhöhe h_v , des Kontaktwiderstandes R_k und der Reibungszahl μ in der Reibprüfmaschine ZA-2 bei Zusatz von 0,001% Hexadecansäure in n-Undecan in Abhängigkeit von der Zeit

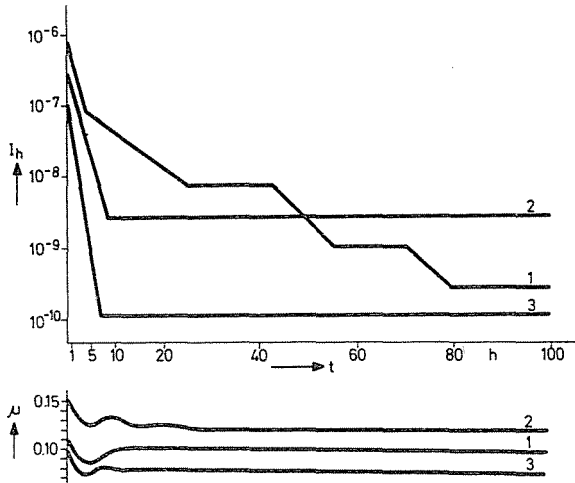


Abb. 8. Langzeitverschleiß- und reibverhalten von Motorenölen auf der Prüfmaschine ZA-2

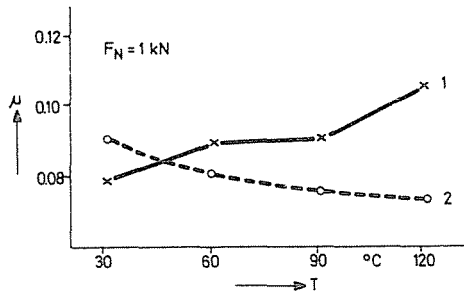


Abb. 9. Temperaturabhängigkeit der Reibungszahl μ auf der Almen-Wieland-Ölprüfmaschine
1 handelsübliches Motorenöl, 2 Motorenöl mit Reibminderer

neuen Reibpaarung beginnen, d. h. durch eine Einlaufphase gekennzeichnet sind. Eine einlaufende oder eine eingelaufene Reibpaarung sind zwei sehr verschiedene tribologische Zustände. Dementsprechend müssen wir sorgfältig zwischen dem Einlaufverhalten und dem Langzeitverhalten der Reibpaarung und des Schmieröles unterscheiden, um eine fehlerhafte Beurteilung zu vermeiden. Will man das Langzeitverhalten erfassen, dann ist die Prüfdauer soweit auszudehnen, bis die instationären Veränderungen der Einlaufphase stationär geworden sind, d. h. in gleichen Zeiten gleichgroße Veränderungen gemessen werden.

Für die praxisnahe Beurteilung der reibsenkenden und verschleißmindernden Eigenschaften von Schmierölen sind deshalb Prüfmaschinen wenig geeignet, die von der Prüfmethode her Kurzzeitprüfungen sind. Im Abb. 8 können Sie sehen, daß die Prüfmaschine ZA-2 sowohl die Einlaufphase (ca. 20 Stunden bei Öl 2 und 3) als auch das Langzeitverhalten erfaßt und beurteilt.

Die Wirkung der Reibminderer läßt sich selbstverständlich auch mit anderen Schmierölprüfmaschinen nachweisen. Wir untersuchten die Motorenöle 1 und 2 in der weit verbreiteten Almen-Wieland-Ölprüfmaschine. Die Reibpaarung besteht aus zwei Lagerschalen, die gegen eine rotierende Welle gepreßt werden, in unserem Fall mit einer konstanten Kraft von $F_N = 1$ kN. Das kleine Gleitlager läuft wie bei der Prüfmaschine ZA-2 in einer ölgefüllten, heizbaren Prüfmulde. In Abb. 9 ist vor allem die Tendenz des Kurvenverlaufes der Reibungszahlen über der Temperatur interessant. Mit steigender Temperatur nehmen die Reibungsverluste bei dem Motorenöl mit Reibminderer ab, während sie bei dem handelsüblichen Motorenöl ansteigen. Deshalb ist das Motorenöl 2 im Hinblick auf eine Kraftstoffeinsparung eindeutig höher zu bewerten. Wird bei einer Laborprüfung nur bei einer Temperatur geprüft, so ist dieser Sachverhalt nicht klar zu erkennen. Die beiden Motorenöle werden sogar falsch beurteilt, wenn in unserem konkreten Fall unter 50°C geprüft wird.

Zusammenfassung

Ausgehend von der Notwendigkeit, den Energieverbrauch an Reibstellen zu minimieren, wird die Wirkungsweise von Friction Modifiers erläutert. Es wird der Vorschlag unterbreitet, diesen Ausdruck nur für diejenige Additivklasse zu verwenden, deren Vertreter dem Schmieröl in geringster Konzentration zugesetzt eine reibungs- und gleichzeitig verschleißsenkende Wirkung hervorrufen. Deshalb müssen Laborapparaturen, mit deren Hilfe die Wirkung von Friction Modifiers beurteilt werden soll, auch Aussagen über diese Eigenschaften ermöglichen. Darüber hinaus sollten sie eine Prüfung nicht nur des Einlaufverschleißverhaltens, sondern auch die Beurteilung der Erreichung des stationären Zustandes zulassen. Eine Prüfmaschine, die den genannten Anforderungen genügt, wird vorgestellt.

Literatur

1. VÖLTZ, M., RULFS, H.: Leichtlauf durch Schmieröle — Ursachen und Wirkungen, Mineralöltechnik (Hamburg) 27, 2 (1982)
2. OLSZEWSKI, W. F., TAYLOR, D. J.: Fuel economy studies of gear lubricants, Eurotrib 81, Warschau, Vol. III, S. 214—224
3. VIPPER, A. B., LASCHI, V. L., MATVEVSKI, R. M.: Modifikatoren der Reibung — Antifrictionzusätze zu Motorenölen, Chim. Techn. Topl. i Masel (Moskau) 26, 56 (1981)
4. BARTZ, W. J.: Gedanken zur Kraftstoffeinsparung durch reibungsmindernde Motoren- und Getriebeöle, MTZ 41, 7 (1981)

Dr. rer. nat. D. K. W. SCHULZE	}	DDR
Doz. Dr. sc. nat. D. CHRISTAKUDIS		8072 Dresden
Dr.-Ing. G. DRECHSLER		PFS 103