

Neue Erkenntnisse über die Schmierfähigkeit und ihre Messung

Von Johannes Kluge, Berlin

(vorgelesen von A. Esau)

Die Aufgaben der Schmierung bestehen so lange, wie überhaupt technische Einrichtungen bekannt sind. In jedem Fall sollen durch die Schmierung Reibungsverluste und Materialverluste herabgesetzt werden. Hierbei bedeutet Reibungsverlust Energieverlust, er ist von besonderer Bedeutung bei der Instrumentenschmierung. Der Materialverlust (Verschleiß) dagegen ist vor allem für die Maschinenschmierung wichtig. Er führt zur Zerstörung der Lauffläche und damit zur Gefährdung der Maschine.

Es ist nun grundsätzlich festzuhalten, daß die Schmierung nicht allein vom Schmiermittel, sondern auch vom Lagerwerkstoff und den Eigenschaften der Schmierstelle (Konstruktion und Betriebsbedingungen des Lagers) abhängig ist. Dementsprechend müssen bei der Lösung einschlägiger Fragen Ölechemiker, Werkstoffachmann und Konstrukteur in engster Weise zusammenarbeiten. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt ist stets bemüht gewesen, sich bei einer solchen Zusammenarbeit als Mittler und Helfer einzuschalten. Es sei nur in diesem Zusammenhang auf die in der Reichsanstalt durchgeführten hydrodynamischen Arbeiten über die Filmbildung an Gleit- und Wälzlageru verwiesen. Aus diesen Arbeiten konnten unter anderem wichtige Erkenntnisse über die Konstruktion von Gleitlagern gewonnen werden. Andererseits fanden die Vorstellungen und Folgerungen der hydrodynamischen Lagerschmierung durch diese Arbeiten eine wesentliche Bestätigung. Die hydrodynamische Lagertheorie hatte insofern eine große Bedeutung, als damit die Schmiermittelbewertung für Vorgänge der reinen Flüssigkeitsreibung auf eine Zähigkeitsmessung zurückgeführt werden konnte.

Für die Schmierung von hochbeanspruchten Gleitflächen ist jedoch die Auswahl eines Schmiermittels allein auf Grund seiner Zähigkeit nicht ausreichend. Es sei nur auf das grundsätzlich verschiedene Verhalten eines

Fettöls und eines reinen Mineralöls bei der Motoren- und Getriebe-schmierung verwiesen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Lager-flächen bei hoher Belastung oder bei Mangelschmierung (z. B. Kolben-ringschmierung) ganz bzw. teilweise in fester Berührung aufeinander gleiten. Es wirken hierbei molekulare Grenzflächenkräfte zwischen Schmiermittel und Lagerwerkstoff, die in der Zähigkeit nicht mit zum Ausdruck kommen. Die moderne Schmiermittelforschung faßt die Wir-kung dieser Grenzflächenkräfte in dem Begriff der Schmier-fähigkeit zusammen, ohne daß damit zunächst eine Lösung der in Frage kommenden Aufgaben möglich war. In den meisten Fällen konnte die richtige Auswahl eines Schmiermittels nach wie vor nur auf Grund eines kostspieligen Betriebsversuchs getroffen werden. Es lag daher ein dringendes Bedürfnis vor, für die Auswahl eines Schmiermittels hin-sichtlich des erwähnten Grenzflächenverhaltens und damit hinsichtlich der Schmierfähigkeit zuverlässige Meßverfahren und Bewertungsgrund-lagen zu schaffen. Die neueren Arbeiten der Reichsanstalt, die mit Rück-sicht auf die besondere Bedeutung der Kolbenringschmierung zunächst nur an dem Werkstoffpaar Stahl-Guß Eisen durchgeführt wurden, geben hierfür einen entscheidenden Beitrag.

Bevor hierüber Näheres berichtet wird, sei zur grundsätzlichen Klar-stellung festgehalten, daß man bei geschmierten Gleitflächen mehrere Be-triebszustände unterscheiden muß. Wenn beispielsweise die Gleitflächen durch einen hydrodynamisch gebildeten Film getrennt sind, spricht man von der bereits erwähnten hydrodynamischen Schmierung oder Voll-schmierung. Die Belastung steht mit hydrodynamisch gebildeten Drücken im Gleichgewicht, und die Zähigkeit ist die einzig ausschlag-gebende Kenngröße des Schmiermittels. Ist die Belastung zu hoch oder die Drehzahl zu klein, so daß sich ein hydrodynamischer Film nicht bilden kann, so wirkt das Schmiermittel nur in dünnen, an den Grenz-flächen haftenden Schichten, dementsprechend bezeichnet man diesen Zustand als Grenzschmierung. Die Schmierung wird hierbei von der Zähigkeit nicht beeinflußt. An technischen Gleitflächen bestehen nun häufig Grenzschmierung und Vollschmierung nebeneinander, man spricht dann von Teilschmierung. Abbildung 1 zeigt zur weiteren Klar-stellung dieser Begriffe die Reibungszahl eines Gleitlagers in Abhängig-keit von der Geschwindigkeit v bzw. von der dimensionslosen Größe rv/η . Wie man aus der Abbildung 1 beispielsweise erkennt, ist die Reibungszahl in der Teilschmierung im Gegensatz zur Vollschmierung um

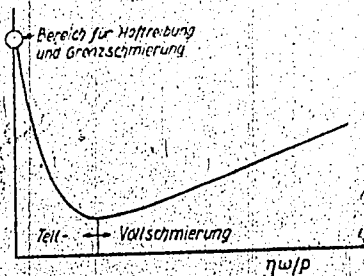


Abb. 1

Reibungskurve nach Striebeck

so kleiner, je größer die Zähigkeit ist; ebenso ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit in der Teilschmierung und Vollschrnierung grundsätzlich verschieden. Es ist also unzulässig, Meßwerte und Erfahrungen ohne weiteres von einem Schmierzustand auf einen anderen Schmierzustand zu übertragen. Man sollte daher in Zukunft z. B. von einer Schmiereignung der Vollschrnierung, Schmiereignung der Grenzschmierung, sprechen, wobei für die Schmiereignung der Vollschrnierung die Zähigkeit als Bewertungsgröße dient, während in der Schmiereignung der Grenzschmierung die Grenzflächenkräfte zwischen Schmiermittel und Lagerwerkstoff erfaßt werden. Die Schmiereignung der Grenzschmierung ist somit am ehesten mit dem bisher als Schmierfähigkeit bezeichneten Begriff identisch. In diesem Sinn können die bisher bekanntgewordenen Ölprüfmaschinen nicht zur Schmierfähigkeitsbewertung herangezogen werden, da sie mehr oder weniger mit Teilschmierung arbeiten, d. h. die mit solchen Maschinen ermittelten Meßwerte für die Reibung und Abnutzung sind noch zähigkeitsbedingt und nur teilweise von den für die Schmierfähigkeit verantwortlichen Grenzflächenkräften beeinflusst. Hierbei ist noch zu beachten, daß der hydrodynamische Anteil der Schmierung bei diesen Prüfmaschinen nicht angegeben werden kann. Er wird vielmehr bei einzelnen Wiederholungs- und Vergleichversuchen sehr verschieden sein, so daß Messungen im Zustand der Teilschmierung außerdem mangelhaft reproduzierbar sind, was ebenfalls eine Schmierfähigkeitsbewertung auf Grund von Untersuchungen im Zustand der Teilschmierung ausschließt.

Die in der Reichsanstalt entwickelten neuen Meßverfahren dagegen arbeiten streng im Zustand der Grenzschmierung, so daß der Gleitvorgang als reiner Grenzflächenvorgang untersucht werden kann. Die hierbei ermittelten Werte für die Reibungszahl, Erwärmung und Abnutzung können daher einwandfrei zu einer Schmierfähigkeitsbewertung herangezogen werden. Nachdem die Meßanordnung zum Teil schon an anderer Stelle ausführlich beschrieben ist, sollen hier nur ihre wichtigsten Merkmale zusammengestellt werden. Als Gleitanordnung dient eine umlaufende ebene Scheibe, gegen die ein stiftförmiger Prüfkörper gedrückt wird, wobei außerdem ein definiertes, wiederholbares Feinläppverfahren der Gleitflächen zur Anwendung kommt. Hierdurch lassen sich die geometrischen Verhältnisse der Gleitanordnung einwandfrei beherrschen, andererseits erzielt man eine gleichmäßige Druckverteilung. Reibungs- und Erwärmungsmessungen können unter diesen Bedingungen mit einer Meßgenauigkeit von etwa 2% durchgeführt werden. Die kleinen Abmessungen des stiftförmigen Prüfkörpers bedingen außerdem kleine Erwärmungen, die sich in wenigen Sekunden entsprechend dem jeweiligen Gleitzustand einstellen. Die Meßzeit ist daher kurz, und der ursprünglich vorhandene Bearbeitungszustand wird während der Messung kaum verändert. Im Gegensatz hierzu ergibt z. B. ein Lager eine große Erwärmung, d. h. die Versuchstemperatur wird bei den jeweiligen Messungen wesentlich verändert. Außerdem stellt sich ein stationärer Erwärmungszustand erst nach wesentlich längerer Zeit ein, was eine dauernde Veränderung des Bearbeitungszustands in der Gleitfläche bedingt.

Für die eigentliche Messung der den Gleitvorgang bestimmenden Reibungs-, Erwärmungs- und Abnutzungswerte werden bei den Versuchen der Reichsanstalt grundsätzlich neuartige elektrische und elektromechanische Meßverfahren verwendet. Hierbei ist besonders darauf geachtet, daß keine Rückwirkungen von der Meßanordnung auf die eigentliche Gleitanordnung erfolgen. So arbeitet die Kraftmeßeinrichtung nur mit einem Meßweg von wenigen μ , d. h. die gegenseitige Stellung der beiden Gleitkörper wird während der Messung kaum verändert. Entsprechend arbeitet die Meßeinrichtung für die Abnutzung (Wegmessung!) nur mit einem genau beherrschbaren Meßdruck von wenigen Gramm. Wesentlich ist ferner, daß keine Resonanzlage zwischen Gleitanordnung und Meßanordnung besteht. Es ist weiterhin ein großer Vor-

zug der neuen Meßverfahren, daß die verhältnismäßig kleinen Meßwerte für die Reibung, Erwärmung und Abnutzung unabhängig von den mechanischen Verhältnissen durch elektrische Verstärkung in beliebiger Weise vergrößert werden können. Die Ablesung der Meßwerte ist so mit einem handelsüblichen Galvanometer oder elektrischem Registriergerät möglich. Im folgenden seien zunächst einige Messungen an dem Werkstoffpaar Stahl-Guß Eisen beschrieben, die zeigen, in welcher Weise eine Schmiermittelbewertung durch Grenzreibungsmessungen möglich ist.

Schmiermittelbewertung durch Grenzreibungsmessungen

Aus den in Abbildung 2 dargestellten Messungen ist zunächst zu erkennen, welche Bedingungen bezüglich Druck, Rauigkeit usw. eingehalten werden müssen, damit die Reibung auch bei kleinsten Gleitgeschwindigkeiten nicht von der Zähigkeit beeinflusst wird, d. h. damit

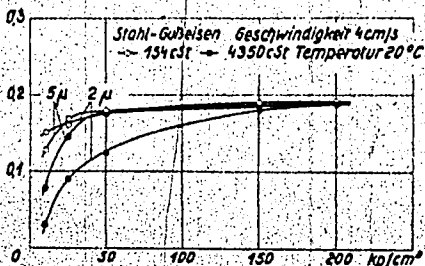


Abb. 2

Reibungszahl in Abhängigkeit von Druck und Rauigkeit

reine Grenzschmierung vorliegt. Es wurden zwei reine Kohlenwasserstofföle mit sehr großem Zähigkeitsunterschied untersucht. Man erkennt, daß sich die Reibungszahl mit zunehmendem Druck einem gleichbleibenden Endwert annähert. Dieser Endwert für die Reibungszahl ist im folgenden mit Grenzreibungszahl bezeichnet, sie ist bei den beiden Ölen infolge ihrer gleichen Grenzflächeneigenschaften gleich groß. Bei kleineren Drücken dagegen ist eine teilweise hydrodynamische Filmbildung vorhanden, die die Reibungszahl herabsetzt. Man erkennt weiterhin, daß sich dieser hydrodynamische Einfluß um so mehr auswirkt, je

größer die Zähigkeit und je kleiner die Rauigkeit ist. Bemerkenswert ist die Feststellung, daß die Grenzreibungszahl selbst weder von der Zähigkeit noch vom Druck und der Rauigkeit abhängt. Wie die Messungen in Abbildung 3 zeigen, ist die Grenzreibungszahl außerdem in weiten Grenzen von der Gleitgeschwindigkeit unabhängig. Die Grenzreibungszahl ist also auch insofern für die Bewertung eines Schmiermittels sehr geeignet, als sie für ein gegebenes Werkstoffpaar nur von der Temperatur beeinflusst wird. Daß sich diese Bewertung im übrigen mit

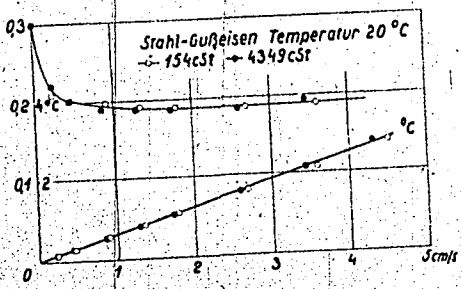


Abb. 3

Grenzreibungszahl und Erwärmung bei verschiedener Ölviskosität

der praktischen Erfahrung deckt, konnte durch vergleichende Reibungsmessungen an einem reinen Mineralöl und einem fetten Öl nachgewiesen werden. Man erkennt aus der Abbildung 4, daß die Grenzreibungszahl für das Fettöl wesentlich kleiner ist als für das Mineralöl. Besonders deutlich ist das unterschiedliche Reibungsverhalten bei kleinsten Gleitgeschwindigkeiten und bei Haftreibung. Und zwar ist bei dem Mineralöl die Haftreibung größer als die Gleitreibung, während sie bei dem fetten Öl kleiner als die Gleitreibung ist. Es wurde in diesem Zusammenhang der Begriff der fallenden Grenzreibungscharakteristik bzw. steigenden Grenzreibungscharakteristik geprägt, wobei nach den Erfahrungen der Reichsanstalt die steigende Charakteristik der Grenzreibungszahl bei Untersuchungen an dem Werkstoffpaar Stahl-Guß Eisen stets ein besonderes Kennzeichen für ein Schmiermittel guter Schmierfähigkeit ist.

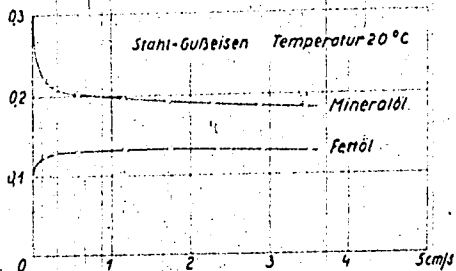


Abb. 4
Grenzreibungszahl von Mineralöl und Fettöl

Von den zahlreichen in diesem Zusammenhang durchgeführten Messungen seien noch Vergleichsmessungen an einer Vaseline und einem Wollfett (Lanolin) erwähnt. Die in Abbildung 5 dargestellten Meßwerte ergeben in Übereinstimmung mit den vorstehenden Überlegungen für die Vaseline, die bezüglich ihres Grenzflächenverhaltens und ihrer Schmierfähigkeit einem reinen Mineralöl entspricht, eine fallende Charakteristik der Grenzreibung, während das Wollfett als Schmiermittel tierischer Herkunft mit bekanntlich guter Schmierfähigkeit eine steigende Charakteristik ergibt. Außerdem hat das Wollfett eine im Mittel kleinere Reibungszahl als die Vaseline. Bemerkenswert ist ferner, daß somit an der

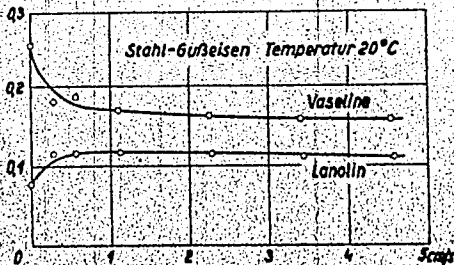


Abb. 5
Grenzreibungszahl von Vaseline und Lanolin

Versuchseinrichtung der Reichsanstalt auch Grenzreibungsmessungen an konsistenten Stoffen durchführbar sind. Um einen weiteren Einblick über den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der Grenzreibung und der Schmierfähigkeit bzw. der die Schmierfähigkeit bestimmenden Einflüsse zu gewinnen, wurden Grenzreibungsuntersuchungen an verschiedenen chemisch definierten Stoffen durchgeführt.

Grenzreibung und Konstitution des Schmiermittels

Es ist seit langem bekannt, daß die Schmierfähigkeit eines rein mineralischen Schmiermittels durch Zusatz von grenzflächenaktiven Stoffen verbessert werden kann. Es sei auf das bei dem »Germ-Prozeß« übliche Verfahren verwiesen, als Zusatz Spuren von freier Ölsäure zu verwenden. In Abbildung 6 sind als Beispiel die Grenzreibungszahlen für reines

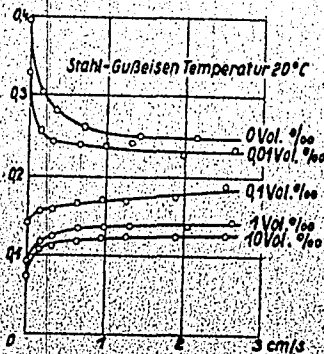


Abb. 6
Grenzreibungszahl von Cetan mit Zusatz von Ölsäure

Cetan und für Cetan mit verschieden großem Zusatz von Ölsäure dargestellt. In Übereinstimmung mit der praktischen Erfahrung (»Germ-Prozeß«) ergibt schon ein sehr kleiner Zusatz von Ölsäure eine wesentlich kleinere Reibungszahl als reines Cetan. Außerdem geht die Grenzreibungscharakteristik mit wachsendem Säurezusatz vom fallenden Verlauf in einen steigenden Verlauf über. Bemerkenswert ist die Tatsache,

daß schon außerordentlich kleine Mengen von Ölsäure, wie 1 Vol.-%, ein wesentlich anderes Grenzreibungsverhalten bedingen; wobei zu beachten ist, daß 1 Vol.-% freie Ölsäure einer Neutralisationszahl von nur 0,2 entspricht. Dieser große Einfluß der Ölsäure ist offenbar auf die starke Polarität der endständigen Gruppe zurückzuführen. Zum weiteren Beweis hierfür wurden vergleichende Untersuchungen an homologen Alkoholen und Säuren durchgeführt. In Abbildung 7 sind vergleichsweise

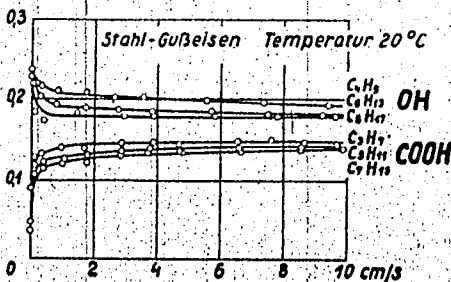


Abb. 7

Grenzreibungszahl homologer Alkohole und Säuren

die Grenzreibungszahlen homologer Alkohole und Säuren dargestellt. Die stärkere Polarität der endständigen Säuregruppe bedingt in jedem Fall im Vergleich zur entsprechenden Alkoholgruppe eine steigende Grenzreibungscharakteristik mit im Mittel kleinerer Reibungszahl. Außerdem ist die Reibungszahl innerhalb einer homologen Reihe um so kleiner, je größer die Kettenlänge ist. Im übrigen haben Alkohole nahezu das gleiche Grenzreibungsverhalten (fallende Charakteristik) wie die gesättigten Verbindungen.

Der Einfluß der endständigen Gruppe konnte auch durch Reibungsuntersuchungen an verschiedenen Butylderivaten nachgewiesen werden. In Abbildung 8 sind Grenzreibungswerte für die Halogenverbindungen der Buttersäure eingetragen. Das Jodid ergibt deutlich einen steigenden Verlauf der Grenzreibungscharakteristik, was offenbar auf seine größere Polarität zurückzuführen ist, während das Chlorid eine ausgesprochen fallende Charakteristik zeigt.

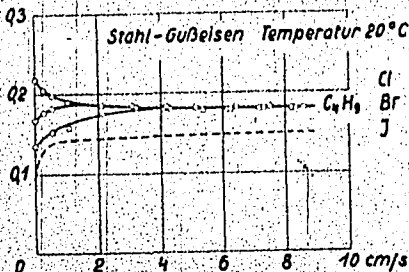


Abb. 8.
Grenzreibungszahl der Butylderivate

Zusammenfassend gelangt man zu der Feststellung, daß der an dem Werkstoffpaar Stahl-Guß Eisen beobachtete steigende oder fallende Verlauf der Grenzreibungscharakteristik eines Schmiermittels auf die mehr oder weniger starke Polarität seiner Bestandteile zurückzuführen ist. Die Grenzreibungszahl bei höheren Gleitgeschwindigkeiten dagegen ist sowohl von der Polarität dieser Bestandteile als auch von der Molekülgröße (Kettenlänge) abhängig. Da alle technisch üblichen Schmiermittel im Mittel nahezu das gleiche Molekulargewicht haben, wird der Einfluß polarer Gruppen auf die Grenzreibungszahl technischer Schmiermittel auch im Bereich größerer Gleitgeschwindigkeiten vorherrschen. Insbesondere wird das Grenzreibungsverhalten eines fetten Öls im Gegensatz zu einem reinen Mineralöl überwiegend durch die polaren Moleküle freier Fettsäure oder durch sonstige Bestandteile größerer Polarität bedingt.

Schmiermittelbewertung durch Abnutzungsmessungen im Zustand der Grenzschmierung

Wie eingangs bereits erwähnt wurde, ist das Verhalten eines Schmiermittels nicht nur für die Reibung, sondern auch für den Verschleiß an der Schmierstelle maßgebend. In den weitaus meisten Fällen dürfte jedoch der Verschleiß von größerer Bedeutung sein. Auf Grund der Reibungsmessungen war nun zu vermuten, daß der Verschleiß in den einzelnen Schmierzuständen ebenso wie die Reibung grundsätzlich ver-

schiedene Gesetzmäßigkeiten ergibt. So ist im Zustand der Vollschmierung keinerlei Verschleiß vorhanden, da die Lagerflächen durch einen Flüssigkeitsfilm getrennt sind. Für eine Verschleißbewertung verbleibt also nur der Zustand der Teilschmierung oder der Zustand der Grenzschmierung. Solange es nun aber nicht gelingt, den hydrodynamischen Anteil bei Untersuchungen in der Teilschmierung meßbar anzugeben, kommt für genaue Verschleißuntersuchungen ebenso wie bei den Reibungsuntersuchungen nur der Zustand der Grenzschmierung in Frage.

Wie die Untersuchungen der Reichsanstalt ergaben, ist die allgemein als Verschleiß bezeichnete Werkstoffabtragung in der Tat bei Grenzschmierung und bei Teilschmierung so grundsätzlich verschieden, daß der Begriff Verschleiß in Zukunft nur für eine Werkstoffabtragung im Zustand der Teilschmierung angewandt werden soll. Diese Forderung ergibt sich insbesondere aus Untersuchungen von Motorschmiermitteln mit bekanntem Verschleißverhalten. Abbildung 9 zeigt den zeitlichen

Stahl-Guß Eisen Temperatur 20°C

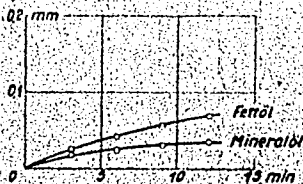


Abb. 9

Abnutzung der Grenzschmierung mit Mineralöl und Fettöl

Verlauf der Werkstoffabtragung für ein fettes Öl und für ein reines Mineralöl, wie sie aus der Abnutzung des stiftförmigen Prüfkörpers in der Versuchsanordnung der Reichsanstalt bei reiner Grenzschmierung ermittelt wurde.

Grundsätzlich neu ist die Beobachtung, daß das fette Öl mit bekannt guter Schmierfähigkeit und besonders günstigem Verschleißverhalten im Motor bei Untersuchungen im Zustand der Grenzschmierung eine nahezu doppelt so große Abnutzung ergibt als das reine Mineralöl. Diese Beobachtung könnte auch an zahlreichen anderen Schmiermitteln guter

Schmierfähigkeit gemacht werden. In jedem Fall ergab ein Schmiermittel guter Schmierfähigkeit im Zustand der Grenzschmierung eine größere Abnutzung als ein Schmiermittel schlechterer Schmierfähigkeit. Abbildung 10 zeigt als weiteres Beispiel entsprechende Vergleichsuntersuchungen an einer Vaseline und an dem bereits erwähnten Wollfett (Lanolin). Eine Deutung der vorstehenden Beobachtung über die Werkstoffabtragung im Zustand der Grenzschmierung und ihre Übertragung auf den im Motor vorherrschenden Zustand der Teilschmierung ergibt sich offenbar dadurch, daß es sich bei der Werkstoffabtragung im Zu-

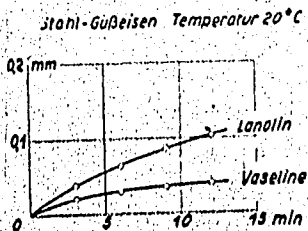


Abb. 10.
Abnutzung bei Grenzschmierung mit Vaseline und Lanolin

stand der Grenzschmierung um ein mehr oder weniger gutes Einlaufverhalten des Schmiermittels handelt, wie es für die Herstellung und Erhaltung einer guten Lauffläche und damit für den sicheren Betrieb z. B. eines Flugmotors von größter Bedeutung ist. Oder anders ausgedrückt, das Schmiermittel mit gutem Einlaufverhalten sorgt durch eine schnelle, aber gleichmäßige Werkstoffabtragung an den Lagerstellen hoher Druckbeanspruchung für eine Glättung dieser Stellen und für eine Abflachung der Druckspitzen, die sonst bei dauernder Einwirkung auf den Werkstoff zu einer Zerstörung der Laufflächen führen.

Grundsätzlich ist festzuhalten, daß die Werkstoffabtragung im Zustand der Teilschmierung überwiegend durch Überbeanspruchung des Lagerwerkstoffs an den Stellen mit hohen Druckspitzen bedingt ist. Hierfür allein ist die weitere Anwendung des Begriffs Verschleiß sinnvoll und zulässig. Im Zustand der reinen Grenzschmierung dagegen überwiegt

die dem Einlaufverhalten entsprechende Werkstoffabtragung. Sie bedingt eine zusätzliche selbsttätige Feinstbearbeitung der Lauffläche, während der Verschleiß zur Zerstörung der Laufflächen führt.

Beide Formen der Werkstoffabtragung treten nun im Zustand der Teilschmierung nebeneinander auf, wobei jedoch zahlenmäßig die Werkstoffabtragung durch Verschleiß größer ist als die dem Einlaufverhalten entsprechende Werkstoffabtragung. Letztgenannte beeinflusst jedoch den Verschleiß entscheidend, indem sie, wie bereits erwähnt, die verschleißgefährdeten Stellen glättet und damit die hohen Druckspitzen abflacht.

Die im Zustand der Grenzschmierung beobachtete Werkstoffabtragung dagegen läßt das erwähnte Einlaufverhalten des Schmiermittels in reiner Form erkennen, da die Belastung hierbei von allen Stellen der Gleitfläche gleichmäßig aufgenommen wird. Die tatsächliche Druckbeanspruchung ist in der Größenordnung des für die gesamte Gleitfläche errechneten mittleren Drucks. Verschleißgefährdete Druckstellen mit hohen Druckspitzen, wie sie besonders für die Teilschmierung kennzeichnend sind, treten bei reiner Grenzschmierung nicht auf bzw. lassen sich vermeiden.

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß es zweckmäßig ist, zwischen einer Schmiereignung der Vollschmierung, der Grenzschmierung oder Teilschmierung zu unterscheiden. Während die Schmiereignung der Vollschmierung allein durch die Zähigkeit bestimmt ist, hängt die Schmiereignung der Grenzschmierung von den Grenzflächenkräften zwischen der Schmierdecke und dem Lagerwerkstoff ab. Sie ist von der Zähigkeit unabhängig und im übrigen mit dem bisher üblichen Begriff der Schmierfähigkeit identisch. Entsprechend ist der Zustand der Grenzschmierung durch hydrodynamische Zähigkeitswirkungen nicht beeinflusst, es handelt sich hierbei vielmehr um einen reinen Grenzflächenvorgang. Bei der Teilschmierung sind Grenzflächenkräfte und Zähigkeit nebeneinander wirksam.

Die für Schmierfähigkeitsuntersuchungen entwickelte Meßeinrichtung der Reichsanstalt arbeitet streng im Zustand der Grenzschmierung. Die unterschiedliche Schmierfähigkeit eines technischen Schmiermittels äußert sich bei Gleituntersuchungen an dem Werkstoffpaar Stahl-Guß-eisen in dem Verlauf der sogenannten Grenzreibungscharakte-

ristik. Durch Untersuchungen an chemisch definierten Stoffen konnten gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen den die Schmierfähigkeit bestimmenden Schmiermitteleigenschaften und der Grenzreibungscharakteristik ermittelt werden. Die Meßgenauigkeit für Grenzreibungsmessungen ist mit etwa 2% verhältnismäßig groß.

Besonders deutlich kommt die Schmierfähigkeit bei Abnutzungsmessungen im Zustand der Grenzschmierung zum Ausdruck. In jedem Fall ergibt ein Schmiermittel besserer Schmierfähigkeit im Zustand der Grenzschmierung eine größere Abnutzung als ein Schmiermittel schlechterer Schmierfähigkeit. Es handelt sich hierbei um ein mehr oder weniger gutes Einlaufverhalten des Schmiermittels, das zu einer zusätzlichen chemisch-mechanischen Feinbearbeitung der Gleitfläche führt. Es wird gezeigt, daß die dem Einlaufverhalten entsprechende Werkstoffabtragung nicht mit dem Verschleiß zu verwechseln ist. Zwischen beiden besteht jedoch ein innerer Zusammenhang.

Auf Grund der neuen Erkenntnisse über die Schmierfähigkeit konnten wertvolle Richtlinien für die zweckmäßige Auswahl eines Schmiermittels und für den Aufbau eines synthetischen Schmiermittels gewonnen werden. So führten unter anderem die Versuche der Reichsanstalt zu einer Deutung für das Verhalten von hochwertigen Waffenölen synthetischer Herkunft. Auch Fragen des Kolbenringverschleißes konnten wesentlich geklärt werden. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen führt eine Vergleichsbewertung von Schmiermitteln nach den neuen Meßverfahren der Reichsanstalt zu einer Einordnung bezüglich der Schmierfähigkeit, die sich in jedem Falle mit der technischen Erfahrung deckt. Bezüglich genauerer Einzelheiten über die neuen Meßverfahren der Reichsanstalt wird auf die unter Schrifttum angegebenen Berichte und Vorträge verwiesen.

Schrifttum

1. Thermoelektrisches Meßverfahren zu vergleichenden Reibungsuntersuchungen von Schmiermitteln im Zustand der Grenzschmierung.
Vieweg, Kluge, Maske.
Deutsche Luftfahrtforschung, Forschungsbericht Nr. 1442.
2. Elektromechanisches Verfahren zur Messung der Reibungskraft im Zustand der Grenzschmierung.
Vieweg, Kluge.
Deutsche Luftfahrtforschung, Forschungsbericht Nr. 1478.
3. Erwärmung, Reihung und Abnutzung im Zustand der Grenzschmierung und ihre Beziehung zur Schmierfähigkeit.
Kluge. Vortrag bei der Tagung über Schmierstoffe und Schmierung bei der DVL am 11. und 12. 12. 1941.
4. Grenzreibung chemisch definierter Stoffe.
Eicke. Vortrag bei der DVL am 11. und 12. 12. 1941.
5. Grenzschmierung und Coulombsches Gesetz.
Buchmann. Vortrag bei der DVL am 11. und 12. 12. 1941.
6. Ein weiterer ausführlicher Bericht über das Verfahren zur Messung der Abnutzung im Zustand der Grenzschmierung ist in Vorbereitung.

Der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung
vorgelesen am 7. Mai 1942

Aussprache

Houdremont: Ich danke Herrn Esau für den interessanten Einblick, den er uns gegeben hat in die z. Z. bei der Reichsanstalt laufenden Untersuchungen auf diesem so schwierigen, aber auch so außerordentlich wichtigen Gebiet und stelle den Vortrag zur Erörterung.

Russow, Dessau (als Gast): Besonders an dem Vortrag interessiert mich, daß als Vergleichspaar die Werkstoffe Stahl und Gußeisen verwendet wurden. Wir sind ja gezwungen, von den früher verwendeten Werkstoffen abzugehen und Gußeisen im Motorenbau jetzt auch an Stellen einzusetzen, an denen es früher nicht verwendet wurde. Früher haben wir in erster Linie nur das Beispiel des Kollentings für die Verwendung Stahl gegenüber Gußeisen gehabt. Heute versuchen wir Gußeisen selbst als Kolbenholzenbüchsen. Bei allen diesen Werkstücken haben wir im Betrieb Umkehrpunkte der Geschwindigkeit, so daß also ähnliche Verhältnisse, wie hier untersucht, auftreten können. Das, was wir bisher praktisch festgestellt haben, ist, daß durchaus nicht jeder Stahl mit jedem Gußeisen geht, sondern daß die Änderung eines Stahls u. U. auch die Änderung des Gußeisens bedingt. Ich verweise auf die bekannte Tatsache, daß Kollentringe für einen weichen Zylinderstahl anders aufgebaut sind als für Laufbüchsen aus Nitrierstahl. Ebenso hat sich bei den Kolbenholzenbüchsen gezeigt, daß verschiedene Gußeisensorten durchaus verschiedenen Verhalten im Betrieb ergeben. Mich würde daher an diesen Untersuchungen besonders interessieren, welcher Stahl und welches Gußeisen wurden genommen, oder wurden verschiedene Sorten untersucht? Wenn die Untersuchung auf ein einziges Gußeisen beschränkt war, würde mich besonders interessieren, ob in Übereinstimmung mit unseren praktischen Erfahrungen ein perlitischer unlegierter Guß oder ein schwachlegierter Guß, bei dem der perlitische Zustand mit noch größerer Sicherheit erreicht werden kann, genommen wurde oder ob hierauf nicht besonders geachtet wurde.

Kluge, Berlin (als Gast): Bei dem verwendeten Gußeisen handelt es sich um einen Büchsen Guß der Firma Goetze. Wir haben auch andere Gußeisensorten verwendet und konnten da bei der Grenzreibung keinen großen Einfluß des Werkstoffes feststellen. Bei den Abnutzungsversuchen dagegen ist der Werkstoffeinfluß wesentlich größer. Der verwendete Stahl war ein Federstahldraht mit 0,9% Kohlenstoff, 0,15% Silicium und 0,50% Mangan. Der Büchsen Guß enthält 3,3% Kohlenstoff, 0,9% Mangan und 1,8% Silicium.

Heidebrock, Dresden (als Gast): Das von der PTR entwickelte Verfahren zur Messung der Reibungskräfte stellt durch die Exaktheit der Messungen und ihre zweifelslose Reproduzierbarkeit eine wesentliche Bereicherung der Methoden zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der Schmierstoffe dar. Um aber eine erfolgreiche Auswertung der Versuchsergebnisse zu erzielen, ist eine Diskussion über folgende Fragen erforderlich:

I. Welche Schmierungsphase liegt vor?

Grenzreibung oder Mischreibung? (nach den neu aufgestellten Definitionen der DVE). Bei der Abfassung der Berichte lagen diese Definitionen noch nicht vor und sind daher nicht berücksichtigt. Für die Beantwortung der Frage I ist es von Wichtigkeit, die Stärke der aufgetragenen Schmierschicht zu kennen, d. h. ob sie nur von der Dicke von 1 oder 2 Moleküllängen oder stärker ist.

Im ersteren Falle hätten wir es mit einer reinen Grenzreibung zu tun, d. h. einem Zustand, bei dem die Orientierung der Ölmoleküle überwiegend durch die Haftkräfte bzw. die freien Oberflächen-Valenzen der Metallflächen bestimmt wird.

Im zweiten Falle, d. h. bei größerer Stärke des Schmierfilms, sind hydrodynamische Einflüsse nicht ausgeschlossen, aber noch in dem Sinne, daß zwar nicht mehr die Oberflächenkräfte allein den Zustand der Moleküle bestimmen, von denen man bisher allgemein annimmt, daß sie nur auf etwa 1 bis 2 Moleküllängen in den Film hineinwirken, wohl aber Orientierungsvorgänge, die nach meinen Beobachtungen auf größere Entfernungen die Struktur des Schmierfilms beeinflussen, daher in diesem eine andere Art von Zähigkeit induzieren, als sie in dem üblichen Begriff festgelegt wird.

M. a. W.: Die Frage ist zu beantworten, ob es sich um eine echte Epilamenreibung (nach Holm) oder um eine Reibung in einem bereits verfestigten Ölfilm handelt.

Da der Schmierstoff in »dünner Schicht« aufgetragen und durch den Lederlappen der Film ständig erneuert wird, ist die Annahme eines Epilamens kaum möglich; der Film wird also, verglichen mit Moleküllängen, eine Stärke von einem Vielfachen derselben haben. Eine meßtechnische Aufklärung darüber wäre erwünscht.

II. Was ist »Reibungskraft«?

Rein meßtechnisch ist die gemessene Größe der tatsächliche Verschiebewiderstand zwischen Nadel und Scheibe, und zwar sehr exakt gemessen. Die Frage ist: Wirken sich darin nur die Oberflächenkräfte der Metallflächen aus, und zwar durch das Epilamen hindurch, oder steckt ein Anteil von »innerer« Flüssigkeitsreibung darin?

Die Größenordnung der gemessenen Reibungswerte liegt in der Regel zwischen $\mu = 0,1$ bis $0,2$, also gar nicht soviel höher als bei schlecht geschmierten, d. h. sicher mit Verschleiß verbundenen technischen Schmiervorgängen. Hieraus folgert zweierlei:

a) Werden Vorgänge der inneren Flüssigkeitsreibung mitgemessen, so ist der Vorgang in gewissem Sinne doch »hydrodynamisch«, nur mit der Maßgabe, daß die Berechnung nicht mit der üblichen, rein hydrodynamischen Zähigkeitszahl möglich ist, sondern eine andere, durch Orientierungswirkungen (Verfestigung u. dgl.), jedenfalls nicht werkstoffunabhängige Zähigkeitszahl eingeführt werden müßte, die aber leider bisher nicht genügend erforscht ist, jedoch durch die jeweilige Metallpaarung bestimmt wird.

Ist aber der Reibungsvorgang in diesem beschränkten Sinne »hydrodynamisch«, so ist er formabhängig. Der Nadeldurchmesser von $0,6 \text{ mm}$ ist — immer im Verhältnis zur Molekülgröße — eine »technische Fläche«, jedenfalls sehr viel größer als z. B. die Abplattungsfläche bei Kugellagern. Trifft dieses zu, so ist aber die gemessene Reibungskraft K eine komplexe Funktion von Geschwindigkeit,

Druck, Zähigkeit (im obigen Sinne) und der geometrischen Form der reibenden Fläche; m. a. W. durch eine Apparat-Konstante mitbestimmt, also auf andere apparative Anbauten u. U. nicht übertragbar, also mit diesen nicht ohne weiteres vergleichsfähig.

Durch die Exaktheit der Meßtechnik der PTR werden sicher die meisten Faktoren der erwähnten Funktion unter sich konstant gehalten, u. a. der Temperatureinfluß weitgehend ausgeschaltet; daher sind die Messungen unter sich sehr schön reproduzierbar; aber nur für die örtlichen Verhältnisse, unter denen sie durchgeführt werden.

Frage: Ist man berechtigt, unter diesen Umständen von einer absoluten, d. h. der Reibungszahl zu sprechen?

Nach meiner Meinung gibt es eine solche überhaupt nicht; jedenfalls nicht in der technischen Praxis.

- b) Bei längerer Dauer des Versuchs wird zweifellos ein Verschleiß auftreten. Abgelöste Verschleißstäubchen erteilen aber dem Film offenbar eine stark veränderte Struktur (kolloidaler Zustand, strukturelle Zähigkeit). Der PTR ist es offenbar gelungen, diesen Einfluß für die Meßdauer auszuschalten. Bei praktischen Schmiervorgängen würde er bei der vorliegenden spezifischen Belastung sicher auftreten. Dadurch wird aber wiederum der Schmiervorgang in eine andere Phase verschoben. Schmierung mit und ohne Verschleiß sind nicht ohne weiteres vergleichsfähig, demgemäß auch nicht die sog. »Schmierfähigkeit«. Die »Verschleißfestigkeit« eines Schmierstoffs ist nicht identisch mit der Schmierfähigkeit, d. h. nicht eine bekannte Funktion der Reibungszahl.

Auch hier kann man nicht von einer absoluten Reibungszahl sprechen.

III. Der technische Schmiervorgang

Es gibt keinen technischen Schmiervorgang, der formunabhängig wäre, also nicht durch die geometrische Gestalt der Schmierstelle beeinflusst wäre; infolgedessen ist auch die Reibungszahl stets eine Funktion der geometrischen Anordnung der Schmierstelle. Dabei wirken, wenn Mischreibung vorliegt, stets drei bestimmende Faktoren mit, nämlich

- die geometrische Form der Schmierstelle, d. h. die strömungstechnische Situation,
- die Schmiereignung der angrenzenden Werkstoffe,
- die Schmiereigenschaften des Schmierstoffs.

Erst durch die Kombination wird die jeweilige Reibungszahl, d. h. das Verhältnis von Reibungskraft zu äußerer Belastung bestimmt; es gibt also auch hier stets nur eine relative, d. h. bezogene Reibungszahl; sie ist stets eine komplexe Funktion von σ , p , η , vom Spiel und der geometrischen Ausdehnung. Selbst in der vollen Schwimmreibung, wo die Grenzflächeneinflüsse ganz zurücktreten, ist die Funktion immer verwickelt, u. a. in dem Gleitlagervorgang, wo nur die Zähigkeit als einzige physikalische Größe erscheint. Da durch die Apparatur der PTR die Zähigkeitseinflüsse ausgeschaltet erscheinen — wenigstens soweit es sich um die hydrodynamische Zähigkeit handelt —, kann die damit gemessene Reibungszahl über die Schmierfähigkeit unter diesen Verhältnissen logischerweise nichts aussagen.

Der technische Schmiervorgang ist aber gekennzeichnet durch vielerlei Arten von Beanspruchungen des Schmierfilms. Die abreibende Beanspruchung beim fortschreitenden Walzen zylindrischer Körper (Zahnflanken, Wälzlager, usw.) ist ganz anders geartet als diejenige bei der Apparatur der PTR mit ihrer idealisierten Gleitbewegung; es werden dabei ganz andere Eigenschaften des Molekülverbandes im Schmierfilm beansprucht und ausgenutzt (Zug- und Druckfestigkeit, Scherfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit oder alle zusammen).

IV. Der Begriff der Schmierfähigkeit

So wenig, wie es eine exakte, d. h. absolute Größe der Reibungszahl gibt, durch die die Schmierfähigkeit eines Öls eindeutig bestimmt wird, gibt es die Möglichkeit, durch eine Messung nach Art der PTR die Schmierfähigkeit eindeutig zu bestimmen, oder anders ausgedrückt: Die Größe, die dort gemessen wird, ist nur eine von den notwendigen Kennziffern, eine sicher nützliche, vielleicht auch notwendige, aber keineswegs ausreichende Größe.

Es muß davor gewarnt werden, sie als eine für die Bestimmung der »Schmierfähigkeit« unter allen Umständen (*Kατ'εποχήν*) zureichende Größe anzusehen.

Welche Eigenschaften des Schmierstoffs damit tatsächlich gemessen werden, kann erst gedeutet werden, wenn die physikalisch-chemische Grundlagenforschung die funktionellen Zusammenhänge zwischen der dort gemessenen Größe und dem molekularen Aufbau des Schmierfilms, vor allem aber seiner Affinität zu den Grenzflächen klargestellt haben.

Auch dann wird sich erweisen, daß es keine »absolute« Schmierfähigkeit eines Schmierstoffs an sich, sondern nur eine »heterogene«, d. h. relative Schmierfähigkeit gibt. Schmierfähigkeit im technischen Sinne bedeutet nichts anderes, als die Beanspruchungsfähigkeit des Schmierstoffs unter den ihm jeweils auferlegten äußeren Beanspruchungen. Kein Werkstoff verhält sich unter allen verschiedenen Beanspruchungsarten gleichartig; auch nicht ein Schmierstoff. Die technische Forschung geht daher den richtigen Weg, wenn sie die Schmierfähigkeit unter den typischen, aus der Praxis geordneten Einsatzverhältnissen untersucht, von denen sie überhaupt nicht zu trennen ist. So wertvoll daher die Messungen der PTR im Rahmen der Gesamtforschung sein können: Die Schmierfähigkeit als solche ist damit nicht bestimmbar.

V. Erweiterung der Versuche der PTR

Sicherlich wird sich die Messung mit dem Apparat der PTR als förderlich für die weitere Erkenntnisforschung erweisen, wenn noch folgenden Fragen nachgegangen wird:

1. Ändern sich die Reibungszahlen, wenn statt der Paarung Stahl-Guß Eisen eine andere Werkstoffkombination gewählt wird?
2. Welche Rolle spielt dabei der Oberflächenzustand der Meßscheibe, der doch bestimmt von der kristallinen Struktur der Werkstoffe abhängig ist? Lassen sich überhaupt bei heterogenen verschiedenen Werkstoffen gleichartige, d. h. vergleichfähige Oberflächenzustände herstellen?

3. Wie verhalten sich die Reibungszahlen bei veränderlicher Belastung, insbesondere beim Übergang in die Verschleißphase und bei verschiedenen Temperaturen?

4. Welche Ursache liegt dem Ansteigen der Reibungszahlen bei sog. fetten, d. h. stark grenzflächenaktiven Ölen bzw. dem Absinken bei den Mineralölen zugrunde?

Die PFR scheint selbst der Ansicht zuzuneigen, daß dieses Steigen oder Fallen rein meßtechnisch bedingt sei (S. 17 Bericht 1478). Dann wäre aber diese Charakteristik apparatabhängig, also nicht absolut zu werten. Man könnte sich vorstellen, daß bei den Mineralölen mit ihren langen Ketten elastische Eigenschaften überwiegen (die ja bei hochmolekularen Ölen zweifellos vorhanden sind), bei den fetten dagegen mehr plastische bzw. amorphe. Das würde wiederum die chemische Struktur der Stoffe in den Vordergrund stellen.

Es ist auch eine hydrodynamische Deutung möglich: Sinkende Relativgeschwindigkeiten bewirken eine Verminderung der Filmstärke und damit eine Verkleinerung der Reibungszahl. Die fetten, d. h. grenzflächenaktiven Öle gestatten eine geringere Filmstärke, die hochmolekularen aber nicht, indem sie mit enger werdender Schicht verfestigt werden im Sinne einer quasi-kristallinen Strukturänderung. Sie widersetzen sich also einer zu weitgehenden Verminderung der Filmstärke und nehmen daher in der Reibungszahl zu.

Über die Schmierfähigkeit bzw. Verschleißfestigkeit ist damit zunächst noch nichts Genaues ausgesagt.

Holm, Berlin (als Gast): Die von Herrn Kluge aufgenommenen Verschleißkurven fangen für die gut schmierenden Fettöle steiler als für Mineralöle an. Soweit ich gesehen habe, werden aber mit der Zeit die Steilheiten ungefähr gleich, d. h. im eingeschlifften Kontakt ist der weitere Verschleiß in beiden Fällen derselbe. Dieser spätere Verschleiß ist technisch besonders bedeutsam. Wie verhält es sich nun mit ihm nach der Ansicht der Herren der Reichsanstalt?

Herr Heidebrock stellt die Frage, wie dick der Schmierfilm der Grenzreibung (Epi-lamen) ist. Ich habe mit Hilfe von Leitfähigkeitsmessungen, die auf Grund des Tunnel-effekts verwertet wurden, die Dicke auf 1 bis 2 Moleküllagen (20 bis 40 Å) geschätzt. Eine interessante Bestätigung dieser Schätzung ergibt sich aus einer Arbeit des Herrn von Gillhausen¹⁾. Er bedeckt Kontaktglieder mit ein-, zwei- oder mehrlagigen Schmierfilmen gemäß dem Verfahren von Langmuir und Blodgett und findet die unversehrte Schicht dann isolierend, wenn sie dicker als etwa 2 Moleküllagen ist. Im Schmierlager sind die Filme natürlich mit Verschleißkörnern des Metalls verunreinigt. Diese kann meine Messungen gestört, aber nicht ganz gefälscht haben.

Kluge: Zu den von Herrn Heidebrock gestellten Fragen möchte ich folgendes bemerken. Die von uns auch in den bisherigen Berichten (ZWB-Bericht Nr. 1442 und Nr. 1478) angewandten Begriffe Schmierfähigkeit, Mischreibung, Grenzschmierung usw. decken sich mit der bei der DVL-Tagung am 11. und 12. Dezember 1941 getroffenen

¹⁾ H. v. Gillhausen: Elektrische Durchschlagsfestigkeit von Einfach- und Vielschichten organischer Stoffe. Diss. Berlin 1940.

Vereinbarung. Hierbei wird, um auf den wichtigsten von Herrn Heidebrock angezogenen Punkt einzugehen, kein Unterschied zwischen Grenzreibung und Epilamentreibung gemacht. Beide Begriffe sind vielmehr identisch. Weiterhin ist der Zustand der Grenzschmierung nach dieser Vereinbarung dadurch gekennzeichnet, daß die Reibung durch die Zähigkeit meßbar nicht beeinflußt wird. Bei unseren Versuchen ist ein solcher Einfluß nicht vorhanden, somit liegt hierbei einwandfrei der Zustand der Grenzschmierung vor. Wenn wir nun außerdem zeigen konnten, daß die Grenzreibungszahl eines Schmiermittels, d. h. die im Zustand der Grenzschmierung gemessene Reibungszahl, für ein gegebenes Werkstoffpaar vom Druck, von der Rauigkeit und in gewissen Grenzen von der Gleitgeschwindigkeit unabhängig ist, so ist es durchaus berechtigt, bei einer bestimmten Werkstoffpaarung von der Grenzreibungszahl eines Schmiermittels zu sprechen. Dies um so mehr, als in der Grenzreibung der für die Grenzflächenkräfte verantwortliche chemische Aufbau des Schmiermittels klar zum Ausdruck kommt. Es darf allerdings nicht außer acht gelassen werden, daß durch die gewählte Bearbeitung der Gleitfläche, wie Drehen, Schleifen, Polieren usw., starke Veränderungen im Gefügeaufbau der Gleitfläche mit entsprechender Beeinflussung des gesamten Gleitvorganges auftreten können, wie ja auch andere Grenzflächenerscheinungen (z. B. Benetzungsfähigkeit) durch die angewandte Bearbeitung stark beeinflußt werden. Aus diesem Grunde verwenden wir bei unseren Versuchen ein Feinstlappverfahren, wo derartige Gefügeänderungen durch kleinsten Arbeitsdruck ($0,02 \text{ kg/cm}^2$) und kleinste Arbeitsgeschwindigkeit (2 bis 3 cm/s) vermieden werden oder zum mindesten klein gehalten werden.

Zur weiteren Klarstellung möchte ich, wie dies bereits im heutigen Vortrag geschehen ist, darauf hinweisen, daß wir in Übereinstimmung mit der bei der DVI-Tagung getroffenen Vereinbarung als Schmierfähigkeit die Schmierleistung im Zustand der Grenzschmierung verstehen. Eben diese Schmierfähigkeit wird bei unseren Versuchen untersucht. Welche Folgerungen aus den im Zustand der Grenzschmierung ermittelten Reibungs- und Abnutzungswerten für den technischen Schmiervorgang gezogen werden können, ist in dem heutigen Vortrag und anläßlich der letzten Aussprache-Tagung bei der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt bereits dargelegt worden. Bei der hydrodynamischen Schmierleistung maß selbstverständlich neben der Grenzschmierung auch die hydrodynamische Schmierleistung mitbesetzt werden. Nachdem die hydrodynamische Schmierleistung im wesentlichen klar erforscht ist und diesbezügliche Gesetzmäßigkeiten seit langem bekannt sind, geben nunmehr die neuen Verfahren der Reichsanstalt auch die Möglichkeit, die Grenzschmierung in gleicher Weise, und zwar nicht nur bezüglich der Reibung, sondern auch bezüglich der Abnutzung, genau zu untersuchen. Hierbei konnte durch eine ganze Reihe von ergänzenden Versuchen der Beweis erbracht werden, daß die gefundenen Gesetzmäßigkeiten allgemeiner Natur sind und nicht durch die besondere Wahl der Versuchsordnung, also rein meßtechnisch, bedingt sind. Hierauf ist von uns wiederholt hingewiesen worden. Auch in der Irrtümlichkeit von Herrn Heidebrock angezogenen Stelle aus einer unterer ZWB-Berichte (Nr. 1478, S. 17) wird nichts Gegenteiliges von uns behauptet. Vielmehr wird an dieser Stelle eine in England durchgeführte Arbeit besprochen, wobei die in dieser Arbeit mitgeteilten Reibungsschwingungen zwanglos von uns durch die Grenzreibungskarakteristik erklärt werden.

Die von uns beobachteten Gesetzmäßigkeiten über die Grenzreibung sind so allgemeiner Natur, daß die Einstellung des Grenzschmierungs Zustandes auch bei anderen Messungen, z. B. bei Abnutzungsmessungen, allein auf Grund der jeweiligen Druckabhängigkeit der Reibungszahl erfolgt. Das heißt die Belastung wird so weit gesteigert, bis sich die Reibungszahl nicht mehr verändert. Dann wird die Belastung allein in fester Berührung aufgenommen, und ein hydrodynamischer Schmierungsanteil ist nicht mehr wirksam. Die Abnutzungsmessungen werden also unter den gleichen Bedingungen wie die Reibungsmessungen durchgeführt. Erforderlichenfalls können sogar Reibung und Abnutzung an der Versuchsanordnung der Reichsanstalt gleichzeitig gemessen werden. Die Annahme einer besonderen Verschleißphase, also eines weiteren Zustandes über die erwähnte Vereinbarung hinaus, ist völlig unnötig. Grundsätzlich ist festzuhalten, daß der von uns beobachtete Einfluß des Schmiermittels auf die Abnutzung im Zustand der Grenzschmierung allein auf die Wirkung der Grenzflächenkräfte zurückzuführen ist. Ein hydrodynamischer Schmierungsanteil wird hierbei nicht wirksam. Wir haben mehrfach darauf hingewiesen, daß die Abnutzung bei Grenzschmierung ein wesentliches Merkmal für das Einlaufverhalten eines Schmiermittels ist. Sie hat jedoch auch eine besondere Bedeutung für die Teilschmierung. Damit dürften die wichtigsten von Herrn Heidebroek gestellten Fragen beantwortet sein.

Zu den von Herrn Holm angeschnittenen Fragen möchte ich bemerken, daß der Übergangswiderstand bei unseren Gleitversuchen wesentlich kleiner als ein Ohm ist. Genauere Angaben hierzu kann ich z. Z. nicht machen.

Zu der Frage über den Einfluß der Zeitdauer auf die Abnutzung ist folgendes zu sagen. Wir waren ja bestrebt, eine Kurzzeitmessung zu bekommen, die für das Einlaufverhalten der Schmiermittel kennzeichnend ist. Dementsprechend werden unsere Abnutzungsmessungen an neu bearbeiteten Gleitflächen durchgeführt. Hierbei ist außerdem für einen definierten Bearbeitungsstand Sorge getragen. Bei Messungen über längere Zeit wird die Abnutzung im Laufe der Zeit absolut genommen kleiner, aber das Fettöl liegt trotzdem mit seiner Abnutzung qualitativ höher als das Mineralöl.

Buske, Berlin (als Gast): Bei meinen Lagerversuchen und Ölfilmdruckmessungen hat sich gezeigt, daß an den Kanten von Gleitlagern bei hohen Lagerbelastungen und bestimmten Ölen Ölfilmdruckanstiege von über 1000 atü bei 1 mm Lagerbreite noch erreicht werden können. Das heißt also, daß der Ölfilmdruck in einem Gleitlager im belasteten Bereich schon 1 mm von der Lagerkante entfernt auf einen Wert von mehr als 1000 atü bei der entsprechenden Lagerbelastung ansteigen kann. Aus diesen Untersuchungen schließe ich, daß sich auch bei den Messungen von Herrn Kluge unter dem kleinen Prüfdraht noch nennenswerte Ölfilmdrucke ausbilden können. Herr Kluge gibt als ein Kennzeichen seiner Maschine an, daß z. B. bei Ölen mit verschiedenen Zähigkeiten die gleichen Reibungswerte erreicht wurden. Es ist vielleicht denkbar, daß bei dem zäheren Öl sich ein dickerer Film unter dem Stift bildet und damit die Reibungszahl beeinflußt und bei dem weniger zähen Öl die dünnere Schicht höhere Reibungswerte hervorruft.

Als Maschinenbauer frage ich mich nun, warum wird, um eine Schmierfähigkeit zu beurteilen, nicht das gemessen, was eigentlich die Tragfähigkeit eines Lagers wirklich bedingt?

Lager und Führungen sollen Kräfte übertragen. Die Lagerkräfte müssen im wesentlichen über das Schmiermittel von dem einen gleitenden Teil zum anderen übergeleitet werden und können nur ganz kurzzeitig als geringe Teillasten ohne Schmiermittel-trennung von den gleitenden Flächen direkt aufgenommen werden. Dasjenige Schmiermittel wird also die beste Schmierfähigkeit besitzen, das sich am längsten zwischen den Gleitflächen hält und auch bei kurzzeitigem Stillstand von Führungsteilen in Bewegungs-umkehrpunkten eine Kraftübertragung gewährleistet.

Wird nun die Ölfilmdruckverteilung an einer solchen Stelle gemessen, so kann hieraus der Anteil der Lastübertragung durch das Schmiermittel bestimmt werden. An der Steilheit der Ölfilmdruckanstiege kann dann vielleicht auch die Schmierfähigkeit beurteilt werden, da der Ölfilmdruckabfall in dem engen Schmierspalt vom Lagerkern nach außen abhängig ist von der Schmiermittellähigkeit und von den Bindungskräften des Schmiermittels an den Gleitflächen. Bei einem Öl mit guter Schmierfähigkeit müßten sich in dem engen Schmierspalt durch die großen Bindungskräfte des Öles an den Gleitflächen steilere Ölfilmdruckanstiege erreichen lassen als bei Ölen mit schlechter Schmierfähigkeit und kleineren Bindungskräften, bei denen ein leichteres Entspannen des Ölfilmdruckes und Abfließen des Öles nach außen zu erwarten wäre.

Aus diesen Gründen glaube ich, daß aus Ölfilmdruckmessungen und Bestimmung der Ölfilmdruckanstiege auf die Schmierfähigkeit der Öle und auf das Zusammenwirken der zu schmierenden Metalle und der Schmiermittel geschlossen werden kann.

Kluge: Ich wollte nur noch ganz kurz zur Frage Teilschmierung und Grenzschmierung ergänzend sagen, daß die Anschauungen über die Grenzschmierung, die wir uns auf Grund der erwähnten Grenzreibungsmessungen an Schmiermitteln mit großen Zähigkeitsunterschieden gemacht haben, noch sehr schön durch Abnutzungsmessungen ergänzt werden konnten. Öle, soweit sie sich bezüglich der grenzflächenaktiven Eigenschaften gleich verhalten, ergeben im Zustand der Grenzschmierung trotz der verschiedenen Zähigkeit gleiche Abnutzungswerte. Ich kann mir nun schlecht vorstellen, wie diese Tatsache durch einen hydrodynamischen Schmierungsanteil erklärt werden soll. Wenn die Vermutung zutreffen sollte, daß bei den Versuchen der Reichsanstalt trotz aller Vorsichtsmaßnahmen noch Mischreibung vorliegt, müßte das zähere Schmiermittel mit dem größeren hydrodynamischen Schmierungsanteil eine kleinere Abnutzung ergeben als das weniger zähe Öl.

Heidebrock: Der Strukturzustand des Ölfilms wird sehr wesentlich dadurch beeinflusst, ob abgerissene Teilchen aus der Oberfläche darin enthalten sind. Dadurch könnte man sich eine Art von kolloidalem Zustand des Schmierstoffes vorstellen, und durch diesen wird, wie die Arbeiten von Philippoff zeigen, eine abweichende Art von Zähigkeit, die sog. Strukturzähigkeit, hervorgerufen. Dabei kommt es natürlich auch auf die Größenordnung der aufgenommenen Teilchen an. Man mißt also nicht das Verhalten des reinen Schmierstoffes, sondern dasjenige eines solchen von stark veränderter molekularer Struktur.

Bogger: Mich, der ich das Gerät nicht kenne, würde noch interessieren, mit welchem Druck die Nadel, die ja nur 0,6 mm stark sein soll, gegen die Scheibe gedrückt wurde und ob immer mit demselben Druck und auch mit derselben Geschwindigkeit. Sollten nicht verschiedene Messungen Rückschlüsse zulassen, bei welchen Geschwindigkeiten und Drücken eine Ölkeilbildung und wann rein metallische Berührung auftritt?

Holm: Ich lasse aus Versuchen von Herrn Kluge berechnen, daß ein eingeschleiften Kontakt die im Mittel je Überführung einer Kontaktfläche von dieser abgeschliffenen Menge zu einer oder einigen oberflächlichen Metallschichten ausreicht. Der anfängliche Verschleiß liegt eine Zehnerpotenz höher.

Kluge: Zur Frage Druckabhängigkeit der Grenzreibung möchte ich noch sagen, daß wir Grenzreibungsuntersuchungen zum Teil bis zu 2000 kg/cm^2 durchgeführt haben und bis zu diesen hohen Drücken keinerlei Druckabhängigkeit beobachten konnten. Dies ist mit ein sehr entscheidender Beweis dafür, daß bei unseren Meßverfahren zur Untersuchung der Grenzschmierung kein hydrodynamischer Schmierungsanteil wirksam wird.

Prandtl: Ich wollte nur eine kleine Frage an Sie stellen. Wie ist es eigentlich mit der Abhängigkeit der Abnutzung von dem Druck?

Kluge: Abschließendes über die Druckabhängigkeit der Abnutzung bei Grenzschmierung können wir nicht sagen. Aber es kommen da offenbar auch recht interessante Sachen heraus. Jedenfalls nimmt die Abnutzung nicht in dem erwarteten Maße mit dem Druck zu. Wir haben z. B. in einem Fall den Druck verdoppelt, und da nahm die Abnutzung nur um einige Prozente zu. Die Ihnen mitgeteilten Abnutzungswerte sind bei einem über dem Querschnitt der Gleitfläche gemittelten Druck von 500 kg/cm^2 ermittelt.

Prandtl: Ist der Ölfilm nachher untersucht worden, in dem die wohl mikroskopischen Teilchen eine Emulsion bilden, die den Reibungs- und Abnutzungsvorgang selbst wieder beeinflusst?

Kluge: Eine mikroskopische Untersuchung des sich bei dem Abnutzungsversuch ergebenden Abriebs wurde bisher nicht durchgeführt. Wenn die Abtragung des Werkstoffes auch nicht in molekularer Schicht erfolgt, so sind die abgelösten Teilchen doch sicher sehr klein.

Körber: Mit dem Ultramikroskop würde es gehen.