Das Schmierungsproblem vom Standpunkt der Luftfahrt.
Von Dr. A. v. Philippovich, DVL, Institut BS.

1. Einleitung
2. Schmierungsprobleme der Luftfahrt
 - a) Anforderung der Luftfahrt an die Schmiermittel
 - b) Unterteilung des Schmierproblems der Luftfahrt
3. Allgemeine Verhältnisse bei der Maschinenschmierung
 - a) Versorgung der Schmierstelle mit Schmierstoff
 - b) Reinheit
 - c) Schmierfähigkeit
4. Erfassung der Schmierfähigkeit
 - a) Definition der Schmierfähigkeit
 - b) Messung der Schmierfähigkeit
 - c) Praktische Auswertung der Schmierfähigkeitsmessungen

1. Einleitung.
=====

Wenn unter den erschwerten Verhältnissen dieser Zeit eine Zusammenkunft größeren Ausmaßes veranstaltet wird, so müssen dafür dringende Gründe vorliegen. Diese sind die verringerte Möglichkeit, neue Fragen auf Tagungen zu besprechen, die vielfache Neuentwicklung von Schmierstoffen und Maschinen, sowie ihre Verwendung unter ungewohnten Bedingungen. Dadurch werden immer wieder Probleme aufgeworfen, zu deren Lösung die nötigen Unterlagen fehlen, weil es sowohl an den theoretischen, wie den praktischen Untersuchungsverfahren mangelt. Insbesondere fehlen zahlenmäßige Werte über die Schmierung und die Auswertungsmöglichkeit der physikalischen Messungen auf die Verhältnisse der Praxis hin.

2. Schmierungsprobleme der Luftfahrt.

=====

a) Anforderung der Luftfahrt an die Schmiermittel:

Die Grundforderung der Luftfahrt an die Schmiermittel ist dem Wortlaut nach nicht wesentlich verschieden von jener anderer Gebiete der Technik: Die Schmiermittel sollen unter allen Betriebsbedingungen die Schmierstellen auf die Dauer ohne Korrosion oder übermäßigen Verbrauch schmieren und dabei unter Umständen Wärme abführen. Aber inhaltlich bedeutet diese allgemeine Forderung wegen der sehr krassen Temperaturunterschiede, denen Flugzeuge ausgesetzt sind, sowie wegen der hohen thermischen oder mechanischen Belastung eine wesentliche Erschwerung gegenüber sonstigen Anforderungen an die Schmiermittel. Dazu kommt noch die zusätzliche Forderung der Luftfahrt nach Einheitlichkeit und nach Beschaffbarkeit im Inlande.

b) Unterteilung des Schmierproblems der Luftfahrt:

Einen Überblick über die allgemeinen Schmierverhältnisse in der Luftfahrt gibt die folgende Zusammenstellung:

Ungefähre Bedeutung der Schmieröleigenschaften in der Luftfahrt.

Maschine	Schmierfähigkeit 1)	Kälteverhalten	Alterung	Korrosion
Triebwerk 2)	+ S _v	+++	+++	+
Fahrwerk u. Steuerung	+ S _r	+++	+	+
Instrumente	+++ S _{rv}	+++	+++	+++
Waffen	+++ S _{rv}	+++	++	+++

1) Schmierfähigkeit als verschleißverringemde Eigenschaft=S_v, als reibungsverhindernde Eigenschaft = S_r

2) Zum Triebwerk gehören Motor u. Verstellerschrauben, zum Fahrwerk u. Steuerung die Hydraulik

Eine solche Bewertung ist zwar sehr subjektiv und es läßt sich viel dagegen einwenden. Es erscheint aber wünschenswert, allgemein zu einer Übereinstimmung über die Bedeutung der Schmieröleigenschaften im Gebiet der Luftfahrt zu kommen, wozu die vorstehende Tabelle eine Anregung darstellen soll. Erst wenn die Bedeutung der einzelnen Eigenschaften so erhärtet wäre, könnte aus der Zahl der Kreuze Folgerungen mehr quantitativer Art gezogen werden.

Die Schmierfähigkeit als reibungs- und verschleißverringende Eigenschaft (im Teil- und Grenzschmierungsgebiet) ist von Bedeutung bei den Motoren, weil sie die Zeiten beeinflusst, nach denen Ventilstößel, Kolbenringe, Kolben und Zylinder ausgebaut oder ersetzt werden müssen. Wenn dieses Problem für den Motor auch nicht lebenswichtig ist, erhält es durch die Zahl und den Wert der Motoren eine erhebliche Bedeutung. In Instrumenten treten sehr hohe Flächenpressungen bei kleinen Verstellkräften auf; Konstruktionen, wie Kreiselkompass sind in ihrer Entwicklungsmöglichkeit ganz durch die Schmierung bedingt, die sich auf diese speziellen Verhältnisse abstimmen muß. In Waffen kann ungenügende Schmierfähigkeit (als reibungsverhindernde Eigenschaft) momentan zum Versagen führen, ebenso, wie z.B. ungenügende Kältebeständigkeit, während ungenügende Schmierfähigkeit (als verschleißverringende Eigenschaft) erst im Laufe längerer Betriebszeiten einen Ausfall ergibt; sie kann selber die Betriebszeit bestimmen. Da die auftretenden Flächenpressungen je nach der Konstruktion außerordentlich hoch sind, müssen die Schmiermittel für diese Zwecke ganz ausgesuchte Eigenschaften besitzen.

3. Allgemeine Verhältnisse bei der Maschinenschmierung.

=====

a) Die Schmierung ist ein sehr komplexer Vorgang, der sich aus einer ganzen Reihe von Einzelvorgängen zusammensetzt. Sieht man von den später noch besprochenen Verhältnissen an der Schmierstelle ab, die die eigentliche Schmierung umfassen, so ist die Versorgung der Schmierstelle mit Schmier-

stoff die wichtigste Bedingung. Stofflich wird sie durch das Kälteverhalten, die Zähigkeit, die Alterung und das Haftvermögen des Schmierstoffes an der Schmierstelle bedingt. Das Kälteverhalten, das sich infolge Veränderung des Fließverhaltens auch unmittelbar schmiertechnisch auswirkt, spielt, wie die Alterung (Ölkohle), vor allem bei Umlaufschmierung eine Rolle, während das Haftvermögen bei der Schmierung mit Fett, sowie bei der Schmierung von Instrumenten eine große Bedeutung besitzt. Im Gebiet der Teil- oder Grenzschmierung muß man berücksichtigen, daß die Neubildung zerstörter Grenzfilme ausreichende Zufuhr aktiver Moleküle zur Voraussetzung hat.

b) Ist die Versorgung der Schmierstelle mit dem Schmierstoff gesichert, so ist die Reinheit des Schmierstoffes von grundlegender Bedeutung. Sie ist mit allen Mitteln anzustreben, da sie vielfach einen wesentlich größeren Einfluß ausübt als die Schmiereignung der Schmierstoffe. Selbst der beste Schmierstoff kann ja durch Verunreinigungen unbrauchbar werden, während andererseits die Notwendigkeit, Schmierstoffe mit hoher Schmierfähigkeit zu verwenden, oft durch ungenügende Reinheit mitbegründet ist. Dabei ist es vor allem erforderlich, die schädlichen Verunreinigungen zu entfernen, die unter Umständen nur ein Teil der gesamten Verunreinigungen sind, wie z.B. metallischer Abrieb (magnetische Filter!!) oder kieselensäurehaltiger Staub.

c) Wie schon in den Begriffsbestimmungen erwähnt, kommt die Schmierfähigkeit als Schmiereignung im Gebiete der Grenzreibung in technischen Maschinen beim Einlaufen und Anfahren, im Zustande des Notlaufes und in jenen Fällen in Frage, wo höchste Pressungen und schlechte Schmiegung zusammentreffen.

4. Erfassung der Schmierfähigkeit.

=====

(Schmiereignung im Gebiet der Grenzschmierung)

a) Definition der Schmierfähigkeit:

Schmierfähigkeit als Schmiereignung im Gebiet der

Grenzschnierung soll praktisch sowohl Reibung als auch Verschleiß verringern. Nach der von Herschel stammenden Definition ist sie jene Eigenschaft, die bewirkt, daß Öle gleicher Zähigkeit bei der Untersuchung unter gleichen Bedingungen Unterschiede der Reibung ergeben. Viele Arbeiten der letzten Zeit haben aber diese Definition dahin erweitert, daß auch der Verschleiß einbezogen wird; andere machen keine scharfen Unterschiede zwischen beiden Eigenschaften. Der Grund für diese Meinungsverschiedenheiten ist wohl zum Teil dadurch verursacht, daß Schmierstoff, Schmierstelle und Werkstoff zusammen erst den Schmiervorgang ergeben und daß je nach der Betrachtungsweise der eine oder der andere Gesichtspunkt mehr in den Vordergrund geschoben wird. Man kann sich die Zusammenwirkung durch die einfache Formel veranschaulichen:

$$Sch_{\text{Öl}} + Sch_{\text{W}} + Sch_{\text{Schmierstelle}} = 100 \text{ (vollkommene Schmierung!)}$$

Im gleichen Maße, wie die eine Schmiereignung zunimmt, kann die der anderen Faktoren abnehmen. Man muß dabei allerdings berücksichtigen, daß diese Betrachtung immer nur für gegebene Betriebsbedingungen Gültigkeit hat, während bei anderen Bedingungen sich die anteilmäßige Bedeutung des einzelnen Faktors im Gesamtbild verschieben kann. Deshalb ist die vergleichbare Messung im Gebiet der Grenzschnierung von so großer Schwierigkeit: kann man doch bei Änderung eines einzigen Faktors die beiden anderen nur ungefähr vollkommen gleich halten. Für die Definition der Schmierfähigkeit scheint es aber einen gangbaren Weg zu geben, der auch die verschleißverringende Wirkung mitberücksichtigt, wie dies übrigens implizite schon in der Abgrenzung geschah, die sie als die Schmiereignung im Gebiet der Grenzreibung bezeichnet. Man kann sie nämlich so abgrenzen, daß man sagt: Schmierfähigkeit ist jene Eigenschaft, die bewirkt, daß bei gleicher Zähigkeit ein Öl bei Steigerung der Belastung später den Übergang von Vollschnierung zur Teilschnierung oder von der Teilschnierung zur Grenzschnierung ergibt

als ein zweites. Diese Definition hat den Vorteil, daß sie die komplexe Schmierung als Kennzeichen nimmt und nicht entweder Reibung oder Verschleiß allein. Für die Hochdruckschmiermittel ist ja bekannt, daß sie eine Erhöhung des Verschleißes bewirken, obwohl sie brauchbare Schmiermittel sind. Ebenso ist neuerdings durch die bisherigen Versuche der PTR gezeigt worden, daß im Gebiet der Grenzschmierung jene Schmierstoffe, die praktisch geringen Verschleiß aufweisen, starke Materialabtragung bewirken; während die Ursache für diese beiden Erscheinungen verschiedene sind, lassen sie sich beide durch die gegebene Definition erfassen.

b) Die Messung der Schmierfähigkeit kann auf verschiedene Weise versucht werden. Da sie ein empirischer Begriff ist, ist zuerst versucht worden, sie in Maschinen technischer Art zu erfassen. Aus den oben erwähnten Gründen ist dies außerordentlich schwierig und nur in Sonderfällen zahlenmäßig möglich, wie z.B. die Versuche der DVL an Motoren zeigen werden. Aber auch dann kann man fast nie so vorgehen, daß man durch Steigerung der Belastung den Punkt erhält, in dem die Vollschrnerung zur Teilschmierung übergeht oder die Teilschmierung in Grenzschrnerung, weil man teure Maschinen der Gefahr der Zerstörung aussetzen würde. Obwohl also das Verhalten in den Maschinen technischer Art ausschlaggebend ist, kann es nur gewissermaßen zur Kontrolle (Eichwert) für die Richtigkeit anderer Verfahren dienen. Solche Verfahren sind die Untersuchungen in eigenen Prüfmaschinen, die entweder den wesentlichen Bauteil der interessierenden technischen Maschine enthalten oder den Vorgang der Grenzschrnerung möglichst frei von anderen Faktoren in einer eigens darin gebauten Apparatur erfassen. Beide liefern wertvolle Unterlagen, die eine Charakterisierung der Schmierstoffe und des Werkstoffes, sowie der Schmierstelle gestatten. Die saubere Messung der Grenzreibung erfolgt allerdings meist unter Bedingungen, die vollkommen andere Verhältnisse schaffen als sie praktisch herrschen, sodaß die Übertragung der Ergeb-

nisse schwierig ist, weil die Messung die konstruktive Seite außer Acht läßt. Insofern kommt der exakten schmier-technischen Untersuchung von Maschinenbauteilen, wie sie z.B. von den Herren Prof. Heidebroek und Buske durchgeführt wurde, besondere Bedeutung zu. - Ganz anders liegt es bei den Versuchen, physikalisch oder chemisch-physikalisch exakte Werte bestimmter Eigenschaften zu bestimmen, die beim Schmiervorgang eine Rolle spielen. Der komplexe Vorgang der Schmierung verläuft nämlich in Abhängigkeit von z.B. der Temperatur nicht immer gleichsinnig, wie irgendeine dieser exakt meßbaren Eigenschaften, sodaß man mehrere solche Eigenschaften⁺⁾ in Abhängigkeit von - in diesem Falle - den Temperaturen messen müßte. - Außerdem aber müßten diese Eigenschaften noch in verschiedenen anderen Abhängigkeiten untersucht werden, sodaß eine große Zahl von Versuchen notwendig wäre. Daß die Zeit bei Schmiervorgängen und bei chemisch-physikalischen Messungen eine Rolle spielt und deshalb auch berücksichtigt werden muß, sei hier nur angedeutet.

c) Die praktische Auswertung der Schmierfähigkeitsmessungen ist ohne Problem bei jenen Messungen, die einwandfrei in der Maschine selbst oder in einem Bauteil der Maschine vorgenommen wurden. Schwieriger ist es schon, Meßergebnisse aus solchen Prüfmaschinen auszuwerten, die die Grenzreibung unter sauberen Bedingungen erfassen. Man kann ihnen gegenüber das Bedenken äußern, daß sie ja nur willkürlich einen bestimmten Teilvorgang messen, der zwar wichtig ist, aber praktisch nicht in dieser Form vorkommt. Dem ist entgegenzuhalten, daß das Einsetzen der Grenzreibung der kritische Vorgang ist, der gerade praktisch zum Verschleiß und zum Fressen führen kann, sodaß er auch dann eine wesentliche Rolle spielt, wenn er in der technischen Maschine nicht so kraß in Erscheinung tritt. Vollkommen schlüssig wird diese Ansicht allerdings erst dann, wenn sichergestellt ist, daß ein monomolekularer Schmierfilm stets erhalten bleibt, wie dies von Holm festgestellt wurde. Langmuir gibt demgegenüber an, daß ein solcher Film

+) ebenfalls komplex

schon bei einmaligem Darüberstreichen zerrissen wird. ¹⁾ Darüber werden die heutigen Ausführungen wohl noch einige Klärung bringen. Es ist nur notwendig, daß die Messungen der Grenzschnierung alle Verhältnisse berücksichtigen, die praktisch herrschen, d.h. die bei einem bestimmten Einzelfall ausschlaggebend sind.- Noch unbestimmter sind aber die chemisch-physikalischen Messungen auf die Praxis übertragbar. Denkt man sich die ideale wissenschaftliche Lösung einer chemisch-physikalischen Schmierstoffcharakteristik, so würde sie sämtliche interessierenden Eigenschaften unter allen Abhängigkeiten umfassen. Der Praktiker bekäme somit ein Buch mit einer Unzahl Kurven und müßte sich durch genaue Überlegung der praktisch herrschenden Bedingungen den jeweils passenden Wert heraussuchen! Daraus ergibt sich, daß für die jetzige Zeit die unmittelbare Anwendung solcher Messungen nicht möglich ist, aber auch in Zukunft ein Ausweg aus diesem Dilemma zwischen der Vielzahl der notwendigen Messungen und der Notwendigkeit, zu einem einfach auswertbaren Gesamtergebnis zu kommen, wird gesucht werden müssen. Dazu kommt noch ein Umstand, auf den hingewiesen werden muß. Die bereits besprochene Alterung des Öles erfolgt je nach den Betriebsbedingungen rascher oder langsamer, verändert aber die Eigenschaften des ursprünglichen Öles so sehr, daß die Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Ölen überdeckt werden können durch die Unterschiede, die das gleiche Öl im frischen und im gebrauchten Zustand aufweist. Bei der bekannten Wirkung kleinster Zusätze aktiver Stoffe auf die Schmierfähigkeit könnte die Frage gestellt werden, ob es überhaupt einen Sinn hat, Messungen mit chemisch oder physikalisch aufs Äußerste gereinigten Stoffen zu machen, wenn die praktischen Verhältnisse doch die ursprünglichen Eigenschaften der Schmierstoffe schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit so grundlegend än-

1) J. Franklin Inst. 218 (1934 II) 143; auch W.R. Adam bezweifelt nicht, daß Grenzschnichten rasch weggewischt werden, sodaß ihre Erneuerung vorgesehen werden muß. (The Physics & Chemistry of Surfaces; Oxford 1938, S.231.)

dem können. Ja, es erscheint vielleicht fraglich, ob es überhaupt einen Sinn hat, Öle so zu untersuchen, die bereits nach kurzer Zeit ganz andere Eigenschaften aufweisen werden. Dieser Einwand ist durchaus gerechtfertigt und muß deshalb besprochen werden.

Die Schwierigkeit, zu einer brauchbaren Lösung zu kommen, wird durch die Veränderung des Schmierzustandes erhöht, die durch Veränderung chemischer, physikalischer und mechanischer Art des Schmierstoffes und der Schmierstelle erfolgen kann. Voraussetzung jeder brauchbaren Messung der Schmiereignung von Schmierstoff, Schmierstelle und Werkstoff ist deshalb die sorgfältige Überlegung, wie solche Veränderungen vermieden, oder wenn sie unvermeidbar sind, wie sie berücksichtigt werden können.

Die Veränderung der Schmierfähigkeit bei der technischen Verwendung der Schmiermittel ist nach der schlechteren und nach der besseren Seite hin möglich. Der seltenere Fall, daß die Schmiermittel weniger schmierfähig werden, tritt ein, wenn sie an aktiven Stoffen verarmen. Dies kann vorkommen, wenn die verwendete Schmierölmenge gering ist im Verhältnis zur benetzten Oberfläche, wie z.B. bei Dochtschmierung. Meist wird aber eine Verbesserung eintreten, weil nämlich die Schmieröle infolge Oxydation aktive Stoffe bilden. Ist die Verbesserung in der Praxis in kurzer Zeit zu einem erheblichen Grade zu erwarten, so wird man dies bei der Auswertung chemisch physikalischer Messungen berücksichtigen müssen. Im allgemeinen tritt sie aber nicht in so ausgeprägtem Maße auf, daß die Eigenschaften des ursprünglichen Öles vernachlässigt werden dürfen. Es ist deshalb die Frage so zu stellen: Gibt die Untersuchung von Frischölen Auskunft über ihr praktisches Verhalten, auch wenn die Eigenschaften des Öles im Betrieb besser werden? Hat das Schmieröl ungenügende Schmierfähigkeit, so wird es eben zu Beginn der Verwendung versagen, sodaß man durch eine Schmierfähigkeitsgrenze die Risikozeit des Betriebes ausschalten und Sicherheit gewährleisten kann. Wird das Öl im Betrieb erheblich besser, so kann man es trotzdem wäh-

rend der Zeit, wo es den Ansprüchen noch nicht genügt, nicht verwenden.

Alle diese Wege zur Messung der Schmierfähigkeit haben demnach ihre Berechtigung und sind darüber hinaus notwendig: Die Messung in Bauteilen technischer Maschinen oder - wenn möglich - in den technischen Maschinen selbst ebenso, wie die genaue Erfassung der Grenzreibung und die chemisch-physikalische Untersuchung, die allein die wissenschaftlichen Grundlagen für den Aufbau bester Schmierstoffe liefern kann. (Vom Vorgang der Alterung soll in diesem Zusammenhang nicht gesprochen werden.) Derzeit dürften aber die beiden ersten Wege am weitesten gebahnt sein, so daß die Praxis sich ihrer zuerst bedienen wird. Was für die Verschleißmessung gilt, trifft aber auch hier zu: Ein universell auf alle praktischen Verhältnisse übertragbares Verfahren wird nicht möglich sein, sondern nur eine Art der Untersuchung, die sich jeweils den Betriebsbedingungen des speziellen Falles anpaßt. Diese Frage erhebt sich besonders bei Prüfgeräten, die das Wesen des technischen Vorganges komplex wiedergeben wollen (Vierkugelmachine, PTR-Maschine), aber auch bei den exakten Untersuchungen chemisch-physikalischer Art. Eine systematische Einteilung der technischen Schmiervorgänge und der Prüfmöglichkeit wurde schon von Block vorgenommen; dabei hat er vor allem auf die Notwendigkeit hingewiesen, die Druck- und Temperaturverhältnisse der Schmierstelle zugrunde zu legen, weil sie die erreichten Temperaturen ausschlaggebend beeinflussen. Dieser Vorschlag erscheint sehr beachtlich und dürfte eine brauchbare Grundlage für die Beurteilung der Schmierzustände der Praxis und der jeweils anzuwendenden Prüfverfahren geben.