

Nur für den Dienstgebrauch ^{Teil}



Q. 11.

Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, E.V.

Berlin-Adlershof

Abteilung für Betriebsstoffforschung

Beitrag zur ausserhydrodynamischen Schlierung.

Margner

Deutsche Luftfahrtforschung

Untersuchungen und Mitteilungen Nr.

1364

ZwB

Zentrale für wissenschaftliches Berichtswesen der Luftfahrtforschung
des Generalluftzeugmeisters (ZwB)

26868 57

Beitrag zur außerhydrodynamischen Schmierung.

I. Mitteilung

Übersicht: Nach Definition der außerhydrodynamischen Schmierung werden die theoretischen Grundlagen der für dieses Gebiet in Frage kommenden Erscheinungen berührt. Ein Gerät, welches ein großes Auflösungsvermögen und eine sehr große Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Bestimmung von Reibungswerten gestattet, wird beschrieben. Die wichtigsten Einflüsse, die bei Untersuchungen dieser Art zu beachten sind, werden mit Hilfe dieses Gerätes vorgeklärt.

- Gliederung:
- I. Definition der außerhydrodynamischen Schmierung.
Allgemeine Betrachtungen zum Schmiervorgang
 - II. Gerät für Untersuchungen im außerhydrodynamischen Gebiet
 - III. Meßergebnisse
 - IV. Zusammenfassung und Folgerungen

Der Beitrag umfaßt:

- 29 Seiten Text
- 1 Zahlentafel
- 2 Abb.
- 1 Kurvenblatt

Institut für Betriebstofforschung
der
Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, E.W.

Der Bearbeiter:


I. Morghen

Berlin-Adlershof, den 1. September 1944

BSf 230/5

UN 1364 (55) 0610

Verteiler siehe letzte Seite

Nachbestellungen sind zu richten an:

Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, E. V.
Berlin-Adlershof
Brieffach 2

] Dies ist ein geheimer Gegenstand im Sinne des § 88 des
] Reichsstrafgesetzbuchs (Fassung vom 24. April 1934). Miß-
] brauch wird nach den Bestimmungen dieses Gesetzes bestraft,
] sofern nicht andere Strafbestimmungen in Frage kommen.
] Der Bericht darf innerhalb des Dienstbereichs des Empfängers
] jeder Person nach dem hierfür vorliegenden dienstlichen
] Bedürfnis zugänglich gemacht werden.
] Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise)
] sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des
] Dienstbereichs des Empfängers ist ausgeschlossen.
] Aufbewahrung unter Verantwortung des Empfängers unter
] gesichertem Verschluss.

0790

Beitrag zur außerhydrodynamischen Schmierung.

I. Mitteilung

Übersicht: Nach Definition der außerhydrodynamischen Schmierung werden die theoretischen Grundlagen der für dieses Gebiet in Frage kommenden Erscheinungen berührt. Ein Gerät, welches ein großes Auflösungsvermögen und eine sehr große Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Bestimmung von Reibungswerten gestattet, wird beschrieben. Die wichtigsten Einflüsse, die bei Untersuchungen dieser Art zu beachten sind, werden mit Hilfe dieses Gerätes vorgeklärt.

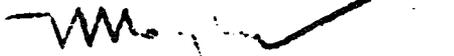
- Gliederung
- I. Definition der außerhydrodynamischen Schmierung. Allgemeine Betrachtungen zum Schmiervorgang
 - II. Gerät für Untersuchungen im außerhydrodynamischen Gebiet
 - III. Messergebnisse
 - IV. Zusammenfassung und Folgerungen

Der Beitrag umfaßt:

29 Seiten Text
1 Zahlentafel
2 Abb.
1 Kurvenblatt

Institut für Betriebstofforschung
der
Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, E.W.

Der Bearbeiter:


I. Morghen

Berlin-Adlershof, den 1. September 1944

BSf 230/1

UN 1364 (55) 0610

1. Definition der außerhydrodynamischen Schmierung. Allgemeine Betrachtungen zum Schmiervorgang.

Die Bezeichnung "außerhydrodynamische Schmierung" ist für das Gebiet gewählt worden, dessen Gesetzmäßigkeiten noch nicht bekannt sind. Hydrodynamische Einflüsse unzugänglicher bzw. nicht fassbarer Art, Eigenschaften von Filmen in molekularen Dicken an Grenzflächen, chemische Umsetzungen in der Schmiergrenzschicht usw. gehören hierner. Die vorgeschlagenen Begriffe¹⁾ "Grenz- oder Epilamenschmierung" und streng genommen auch "Misch- oder Teilschmierung"⁺), wobei noch weitgehendere Unterteilungen denkbar wären, haben, solange ihre Gesetzmäßigkeiten nicht eindeutig bekannt sind, nur theoretisches Interesse, da sie experimentell nicht exakt realisierbar bzw. erkennbar sind. Grenzschmierung im definierten Sinne wäre z.B. an zwei aufeinanderliegenden, gegenseitig parallel verschiebbaren, vollkommen (atomar) ebenen Flächen, die mit Moleküllagen Schmiermittel be- kannter Zahl belegt sind, denkbar. Es bleibt dann allerdings die Frage offen, wie lange diese Flächen beim Aufeinandergleiten atomar eben bleiben würden.

Es wurde versucht, mit Hilfe einer geeigneten einfachen und sehr empfindlichen Anordnung die Schmiervorgänge in Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen zu beobachten. Die gewählte Art der Schmierstelle - drei Kugeln als Führungslager, eine Kugel als Gleitkörper - ergibt insbesondere bei noch unverletzten Kugeln zwangsläufig ein gleichzeitiges Arbeiten im Gebiete aller möglichen Schmierphasen (z.T. auch der bekannten hydrodynamischen).⁺⁺ Praktisch und vorherrschend zur Auswirkung treten jedoch nur jene Schmiervorgänge, die einen hohen Gleitwiderstand ergeben; es ist dann nur die jeweilige effektive Lastaufnahme eine andere. Dies trifft mehr oder weniger auch für andere Prüfeinrichtungen schon durch die Rauigkeit der Oberfläche zu. Die gewonnenen Integralwerte beinhalten also

- 1) A.v. Philippovich, "Abgrenzung häufig verwendeter Begriffe der Schmierung". Zeitschrift des VDI, Bd. 86, S. 408 (1942)
- +) Der Ausdruck "Teilschmierung" sollte sinnvoller für wirkliche Teilschmierung verwendet werden, also überall dort, wo Trockenreibung mit auftritt.
- ++) Wie später gezeigt wird, sind bei Schmierstoffen mit Viskositäten zwischen 150 und 4000 cSt bei 20°C hydrodynamische Einflüsse praktisch nicht feststellbar.

im verschiedenen Ausmaß einzelne diskrete Reibungszustände hoher Reibungswiderstandes.

Der Zweck dieser Mitteilung ist also nicht, zu den bereits in großer Zahl vorliegenden Geräten ein neues hinzuzufügen und entsprechend seiner spezifischen Eigenart diskrete Schmier- bzw. Reibungszustände, Verformungswiderstände usw. mehr oder weniger reproduzierbar zu züchten und daraus allgemeine und mittlere Beziehungen zwischen Gerät und praktischem Schmierverhalten aufzustellen, wie dies so oft gehandhabt wird.

Vor der Diskussion der einzelnen Ergebnisse werden die allgemeinen Grundlagen einer Betrachtung der hier interessierenden Fragen und Versuchsergebnisse gebracht.

Bei allen mit dem Gerät durchgeführten Messungen wurde sofort Verschleiß beobachtet. Es ist nun anzunehmen, daß dieser Verschleiß bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen zu einem Zustand führt, in welchem die Oberflächen je nach Art des Schmiermittels eine ganz bestimmte Grundstruktur erhalten. Dies geht aus folgendem hervor: Jede Oberfläche eines festen oder flüssigen Stoffes besitzt bekanntlich eine bestimmte Oberflächenspannung, dadurch bedingt, daß die Oberflächenmoleküle oder -atome die Kräfte, die ihren Zusammenhalt bewirken, nur zum Teil absättigen können. Bringt man einen zweiten Stoff an diese Oberfläche, so werden die Restkräfte mehr oder weniger gebunden, die Oberflächenspannung bzw. -energie sinkt.

Die gesamte Oberflächen- bzw. Grenzflächenenergie eines Stoffes ist gegeben durch:

$$D = \sigma \cdot F - T \frac{d\sigma}{dT} \cdot \omega \quad \dots \dots \dots 1),$$

wobei σ die Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung, ω die Grenzfläche, $T \frac{d\sigma}{dT}$ die freie Grenzflächenenergie, $T \frac{d\sigma}{dT} \cdot \omega$ die gebundene Energie (latente Oberflächen- bzw. Grenzflächenenergie) bedeutet. Die Oberflächen- bzw. Grenzflächenenergie muß experimentell bestimmt werden.

Dupré²⁾ stellte für die beim Aneinanderbringen zweier Flüssigkeiten pro cm^2 gewinnbare Arbeit die Beziehung auf:

$$A = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_{12} \quad \dots \dots \dots 2),$$

2) Dupré. Théorie mécanique de la chaleur, Paris 1869

wobei σ_1 = σ_2 die Oberflächenspannungen der Flüssigkeiten, σ_{12} die Grenzflächenspannung an der Berührungsstelle derselben sind. Versucht man diese Beziehung unmittelbar für den Verschleiß⁺⁾ anzuwenden, so bedeutet jetzt σ_1 und σ_2 ($\sigma_1 - \sigma_2$) die Grenzflächenspannung des Materials gegen den Schmierstoff und σ_{12} die Grenzflächenspannung im Schmierstellenmaterial selbst, die gleich Null ist. Daraus folgt:

$$A = 2 \cdot \dots \dots \dots 3).$$

Die mechanische Arbeit pro cm^2 , die aufzuwenden ist, um aus der Schmierstelle Teilchen herauszulösen, wäre demnach gleich der doppelten Grenzflächenspannung der Schmierstelle gegen den Schmierstoff, beziehungsweise eine Funktion derselben.

Die Kraft, mit der eine Oberfläche sich zu verkleinern sucht, entspricht der Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung. Diese ist bei (kristallisierten) Festkörpern im Gegensatz zu Flüssigkeiten an der Grenzfläche je nach der Verteilung der Flächen, Kanten und Ecken in der (mikrokristallinen) Oberflächenstruktur mikroörtlich verschieden. Die Oberflächenmoleküle bzw. -atome stehen unter einseitigem Zug; je nach der Herabsetzung der Grenzflächenspannung durch ein angrenzendes Medium verändert sich dieser Zug, insbesondere an den Kanten und Ecken. Das Molekül, Atom oder kleinste Teilchen wird je nach der angrenzenden Phase besonders an diesen Stellen verschieden leicht aus dem ursprünglichen Verband in den angrenzenden überführbar sein.

W.v.Engelhardt³⁾ zeigte, daß die mechanische Arbeit, welche zur gleichen Abschleiß verschiedener Stoffe (z.B. Quarz mit Karborundumpulver) notwendig ist, bei Verwendung verschiedener Flüssigkeiten, aber gleichbleibenden Schleifpulvers, verschieden ist. Er setzt das Abschleißvolumen in Beziehung zur Grenzflächenenergie des Schleifkörpers gegen die betreffende Flüssigkeit, wobei die Zerkleinerung auf einen "gleichbleibenden Feinheitegrad" angenommen wird. Die Oberflächenvergrößerung (Abschleiß) wäre (in Übereinstimmung mit hypothetischen Gleichung (3)) umgekehrt

2687?

+) Hier wäre die Voraussetzung, daß die Loslösung der Teilchen aus der Schmierstelle auswirkungsmäßig unter gleichzeitiger Benetzung durch den Schmierstoff erfolgt, was vorstellbar ist.
 3) W.v.Engelhardt, Nachrichten der Akademie der Wissenschaften Göttingen, 1942, Heft 2.
 ++) Siens jedoch auch S.7 ober., u.a.m.

proportional der Grenzflächenenergie. Diese Arbeit gibt erstmalig quantitative Angaben über Schleifhärte in Abhängigkeit von verschiedenen Flüssigkeiten. Fraglich ist jedoch der gleichbleibende Feinheitsgrad des Abschliffes; es ist nach dem vorstehend Gesagten naheliegend, daß die resultierende "Härte" des Schleifkörpers auch auf eine verschiedene Abtragsleistung zurückzuführen sein kann.⁴⁾ Dies ergäbe dann die früher erwähnte vom Schmierstoff abhängige Oberflächenstruktur der Gleitbahn. Der entstehende Abrieb, der qualitativ und quantitativ verschieden ist, kann mit dem im Öl gelösten Sauerstoff oder anderen chemisch wirksamen Stoffen reagieren und zu neuen Stoffen führen. Reibung und Verschleiß werden durch diese Vorgänge mitbestimmt.

Zu den hier interessierenden Eigenschaften dünnster Filme sei an folgendes erinnert: Bringt man Endmaße (feinstpolierte ebene Flächen), auf welche eine Spur Flüssigkeit aufgebracht ist, fest zusammen, so sind sie nurmehr mit Gewalt zu trennen. Die Ursache dieses Phänomens ist noch nicht klargestellt; zur Diskussion steht als primärer Einflußfaktor dies: Die Schmiermittelmoleküle bedecken die beiden Flächen und ordnen sich an ihnen entsprechend den Fixpunkten der Atomgitter der beiden Metalle. Die mechanische Arbeit, gerechnet auf ein cm^2 , die aufzuwenden ist, um sie von der Grenzfläche zu trennen, ist wieder gegeben durch die Gleichung (2), wobei jetzt σ die Oberflächenspannung der Schmierstelle, σ_s des Schmierstoffes, σ_{cs} der Grenzflächenspannung Schmierstelle;Schmierstoff bedeutet.⁶⁾

Die Gleichung (2) (und (3)) ist nur von bedingter praktischer Bedeutung, da die Grenzflächenspannung fester Körper derzeit nur schätzbar ist, ebenso wie die Grenzflächenspannung gegen dünnste (molekulare) Filme zwischen zwei festen Grenzflächen. Aus Grenzflächenspannungsmessungen gegen Quecksilber und Randwinkelmessungen erhält man Werte, aus denen zu ersehen ist, daß die Haftfestigkeit adsorbierter Moleküle an festen Grenzflächen ähnlich den Festigkeitseigenschaften eines festen Stoffes sein dürfte. Etwa ebenso fest haften die Schmiermittelmoleküle

4) Diskussionsbemerkung des Verfassers zum Vortrag von W. v. Engelhardt; in KWI am 14.7.1943

5) S. a. Bradgett: Proc. Roy. Soc. A 86, 25, 1911

6) Neuerdings stellt K. L. Wolf in Öl u. Kohle 39, 404 (1943) die Begriffe Haftfestigkeit (Kraft ist = Arbeit/Weg) und Viskosität als Hauptfaktoren der Schmierung dar.

untereinander, die Zerreifestigkeit⁷⁾ von Flüssigkeiten entspricht also größenordnungsmäßig derjenigen der Festkörper. Sie kommt dann zur Auswirkung, wenn sich die einzelnen Flüssigkeitsmoleküle gegenseitig nicht verschieben können, sondern unmittelbar voneinander getrennt werden, wie dies mehr oder weniger bei raschesten Zugbeanspruchungen oder dann der Fall ist, wenn die Beweglichkeit der Flüssigkeitsmoleküle gehemmt ist, wie dies an festen Grenzflächen über wenige Moleküllagen Flüssigkeit der Fall ist. Die Zerreißfestigkeit läßt sich z.B. ebenfalls aus der Dupré'schen Gleichung berechnen. Man kommt wieder zur Gleichung 3), wobei jedoch σ die Oberflächenspannung bedeutet.

Daraus ist auch die zum Zerreißen benötigte maximale Kraft angenähert berechenbar.

Zerreißfestigkeit, Viskosität, atmosphärischer Druck sind Faktoren, die den "Endmaß-Effekt" bedingen.⁸⁾ Die genannten Tatsachen sind mit zu berücksichtigen, wenn ein Körper aus dem Zustand der Ruhe in den Zustand der Bewegung versetzt werden soll ("Ruhreibung"), oder bei Vorhandensein von wenigen Schmiermittelmolekllagen bei gleitender Reibung.⁺

Die bei Schub sich ergebenden Kräfte können bekanntlich aus dem Newton'schen Ansatz entnommen werden:

$$K = \eta \frac{v}{z} \dots \dots \dots (4)$$

der nur für laminare Strömung gilt. Da das Geschwindigkeitsgefälle bei wenigen Moleküllagen schon bei geringen Geschwindigkeiten sehr schroff ist, können - wobei allerdings die Größe des hier einzusetzenden η nicht bekannt ist - große Schubspannungen auftreten, die durch Wirbelbildungen geschwächt sein können.

Eine andere Frage ist die nach dem Zustand, in welchem sich die adsorbierten Schichten an der Grenzfläche befinden, d.h. ob die Flüssigkeitseigenschaften oder die Eigenschaften fester Stoffe vorherrschen. Eine konkrete Antwort ist darauf nicht zu geben. Es sei nur daran erinnert, daß ein Grenzflchenbelag durch

26875

7) J.Meyer, Abhandlungen der Deutschen Bunsengesellschaft Nr.6, 1911. K.L.Wolf, Chemie 55, 295 (1942)

8) s.Plattengert von Heidebroek u.Petsch, Forschg.Ing.Wes.Bd.12, Nr.2, S.74/87

+) Bei monomolekularer Schicht zwischen 2 gleichen festen Flächen ist zu bedenken, daß diese an beiden Grenzflächen - im Falle eines symmetrischen Kohlenwasserstoffes sogar gleich fest -haftet. Für Scherbeanspruchung folgt aus den oben angefuhrten Verhältnissen das Auftreten einer Verzerrungsarbeit. (Verz.Ar.b.trockener Reibung s.z.B. Holm: "Die techn.Physik d.elekt.Kontakte")

einen aktiveren verdrängt werden kann, sodas eine gewisse Beweglichkeit der adsorbierten Schicht, solange sie an eine Flüssigkeit grenzt, anzunehmen ist. Betrachtet man wieder die Dupré'sche Gleichung für die maximal gewinnbare Arbeit (s. Gleichung (2)), so sieht man, daß diese zwangsläufig umso größer wird, je kleiner σ ist. Am größten ist die maximale Arbeit, die zugleich ein Maß für die Benetzungsneigung ist, bei $\sigma = 0$ (mischbare Stoffe). Daraus folgt zwangsweise, daß bei starker Annäherung zweier (legierbarer) Schmierstellen eine Konkurrenz zwischen Schmierstoffmolekülen und Grenzflächenatomen der Schmierstelle erfolgt. Bestimmend ist da die begrenzte Beweglichkeit der Festatome (Moleküle) und die Verdrängbarkeit und Größe der Schmierstoffmoleküle.

Enthalten die Schmiermittel chemisch stark aktive Stoffe, welche mit der Schmierstelle unmittelbar in chemische Reaktion treten können, so werden sie die Atome der Schmierstellenoberfläche aus dem festen Verband unter Bildung neuer Stoffe - meist amorpher oder hochviskoser Natur - herauslösen. Die chemische Einwirkung ist stark temperaturabhängig. Die meßbare Temperatur an der Schmierstelle ist nicht maßgebend, da an den wenigen möglichen Berührungs- bzw. Annäherungspunkten der Gleitflächen wesentlich höhere Temperaturen auftreten können, die rascher abgeleitet werden, je tiefer die Temperatur des Lagers, die Wärmeleitfähigkeit desselben und des Schmierstoffes ist. Die Reaktions-

+*) Zu bedenken ist, daß bei atomarebenen Flächen ein mechanisches Ausfließen eines monomolekularen benetzenden Filmes nicht mehr möglich ist, auch wenn die Haftfestigkeit desselben minimal wäre (Bildlich vergleichbar mit einer Lage Kugeln zwischen zwei Flächen). Im Gegensatz dazu steht die chaotische Oberfläche einer realen Schmierstelle. Hier ist ein Verschieben oder Aufstauen der molekularen Schicht unter geringstem Arbeitsaufwand - ja unter Arbeitsgewinn - denkbar. (s. Gleichung 2).

In diesem Zusammenhang sei noch der Platzbedarf - Raumbeanspruchung - der Schmierstoffmoleküle (oder Übermoleküle) erwähnt. Dieser ist, ausgehend von der Gibbs'schen Gleichung, (unter Voraussetzung der Giltigkeit des van't Hoff'schen Gesetzes) angenähert für Flüssigkeiten berechenbar (Langmuir, J. Amer. Chem. Soc. 39, 1883 (1917). Seelich, Zt. physik. Chemie ++)

oder mit der Spreitungswaage bestimmbar. Die Ergebnisse, die an sich schon Annahmen bedingen, sind jedoch auf feste (metallische) Oberflächen kaum ohne weiteres übertragbar.

++) erscheint demnächst

Geschwindigkeit ist maßgeblich, inwieweit ein Temperaturblitz überhaupt zur Auswirkung kommt. Dies gilt auch für die thermische und oxydative Stabilität eines Schmierfilmes überhaupt. Die Folgen der chemischen Schmierung sind Abkorrosion der vorstehenden mikroskopischen und makroskopischen Unebenheiten, Vermischung des Schmierfilmes mit flüssigen oder amorphen Verbindungen.

Der auftretende Verschleiß kann, wie anfangs erwähnt, in Abhängigkeit vom Schmierstoff entweder dadurch erfolgen, daß die mit oder ohne Schmierstoff bedeckten Erhebungen aus dem Verband durch gegenseitiges Aufeinanderprallen herausgebrochen werden, wobei sich neue Vertiefungen und dadurch zwangsläufige Erhebungen bilden oder daß durch Auftreten hoher Schub- und Zugspannungen beim Gleiten bzw. "Übereinanderholpern" zweier Schmierstellen Atome oder Teilchen herausgerissen werden. Die beim normalen Verschleiß auftretenden kleinsten Teilchen oder Atome sind ungemein reaktionsfähig und dürften schon durch den im Öl gelösten Luftsauerstoff oxydiert werden.

II. Gerät für Untersuchungen im außerhydrodynamischen Gebiet.

Ein Gerät, welches mit Aussicht zur Klärung von Schmierungsfragen vom Standpunkt der Reibung herangezogen werden kann, muß bei verschiedenen Temperaturen schnell und genau reproduzierbar geringste Reibungsänderungen durch praktisch interessierende Schmierstoffe aufzeigen. Da die vorliegenden Geräte aus verschiedenen Gründen keinen besonderen Anreiz für Untersuchungen der beabsichtigten Art gaben, wurde das im Prinzip aus der Abb. 1 im Schema ersichtliche Gerät gebaut, welches zu den genannten Eigenschaften den Vorteil der Einfachheit der Konstruktion und Bedienung und der leichten Beschaffbarkeit und Auswechselbarkeit gleichmäßiger Schmierstellen besitzt. Es besteht aus drei in einer Ebene fest angeordneten Kugeln, (deren dritte in der Abbildung nicht sichtbar ist), die das Führungslager vorstellen. Eine vierte Kugel dient als Gleitkörper. Es handelt sich hier um eine "Dreipunktberührung"⁹, die hohe spezifische Drücke und eine gute Reproduzierbarkeit der Schmierstellen bei großer Glätte erlaubt. Die Druckverteilung in der Schmierstelle bei unverletzten Kugeln ist sehr verschieden, (bedingt durch die Hertz'sche Abplattung) - entsprechend einem Schmierpalt in der Praxis bzw.

9) G.L.Boerlage (four-ball-testing) Engineering 136, 46 (1933)
144, 1 (1937)

jeder realen Oberfläche. Die drei unteren Kugeln sind symmetrisch in einem Napf angeordnet, der sich innerhalb eines Thermostaten befindet. Die vierte Kugel, welche mit einem Windrad versehen ist, läuft frei durch das Gegenlager lose geführt im erwähnten Dreikugellager. Das Windrad ist radial symmetrisch gefräst, durch zentrisch aufbringbare Gewichtsscheiben beliebig belastbar und wird durch zwei tangential symmetrisch angeordnete Düsen mit Luft angetrieben. Mittels eines Strömungsmessers (oder eines Manometers) kann der Luftstrahl so geregelt werden, daß entsprechend dem zu überwindenden Widerstand das Laufrad einschließlich der Kugel beispielsweise gerade in einer gleichmäßig langsamen Bewegung gehalten werden kann. Die Reibung im Gegenlager ist dabei vollkommen vernachlässigbar. Um das Rad in Bewegung zu setzen, ist zusätzlich eine von Hand aus mit einem Gummibäll zu bedienende (in der Zeichnung nicht dargestellte Düse) vorgesehen. Die Messung wird im allgemeinen praktisch so durchgeführt, daß durch Änderung der Strömungsgeschwindigkeit um 0,2 ltr./min der gerade noch nicht gleichmäßig laufende Rotor (er soll etwa nach einer langsamen Umdrehung stehen bleiben) in gleichmäßige Bewegung versetzt wird (verfolgt werden 2 bis 3 volle Umdrehungen). Die für die Messung benötigte Temperaturkonstanz wird mittels eines Höppler-Ultra-Thermostaten, Ausführung H⁺), bewirkt. Für die Messung der durchströmenden Luft ist ein Rotameter⁺⁺) mit einem Meßbereich zwischen 5 und 60 l/min vorgesehen.

III. Meßergebnisse.

Die auf den Gleitkörper über das Windrad übertragene Kraft ist aus dem Düsenquerschnitt, der Luftmenge usw. nicht (ohne weiteres) errechenbar. Da es sich bei den folgenden Versuchen im wesentlichen um Vergleichsmessungen handelt, wird die einwirkende Kraft nicht in Kräfteinheiten, sondern in gemessenen l/min Luft angegeben. Um jedoch den ungefähren Wert der Reibungszahlen bestimmen zu können, insbesondere um die Druckabhängigkeit der Reibung festzustellen, wurde die einwirkende Kraft angenähert bestimmt. Zu diesem Zweck wurden zwei dünne Fäden auf die Welle des Rotors entgegengesetzt aufgewickelt und

+) Gebr. Haake, Medingen bei Dresden

++) Rota Apparate und Maschinenbau Dr. Hennig K.G., Aachen

waagrecht parallel entgegengesetzt über zwei Rollen geführt. Die Fäden enden in zwei gewogenen Aluminiumscheiben, die mit der benötigten Gewichtsmenge belastet werden können. Braucht der Rotor eine bestimmte Menge Luft/min, um gerade in gleichförmiger langsamer Bewegung zu verbleiben, so wird die Luftzufuhr stufenweise abgedrosselt oder erhöht und die Scheiben mit soviel Masse belegt, daß der Rotor wieder gerade eine gleichförmige langsame Bewegung durchführt. Unter Berücksichtigung des Reibungswiderstandes der zwei Rollen, in Abhängigkeit von der Belastung, wurde die aus Abb.2 ersichtliche Kurve erhalten. Der Durchmesser der Laufspur der Laufkugel wurde zu 5,77 mm ⁺), der Durchmesser der Achse des Rotors zu 6,05 mm angenommen (1:1,05) und berücksichtigt.

Zur Berechnung des Reibungskoeffizienten ist noch die normal zu den Tangentialebenen der Berührungspunkte (Schmierstellen) der Kugeln resultierende Normalkraft N zu kennen.

$$F = 3 N \sin \alpha = \frac{3 N \cdot r}{\frac{r}{2} \cdot \sqrt{6}} = \frac{6}{\sqrt{6}} \cdot N$$

$$N = \frac{F}{\frac{6}{\sqrt{6}}} = 0,4082 F; 3 N = 1,225 F$$

Es sind also die Gewichte des Rotors mit 1,225 zu multiplizieren, um die Summe der Lastkräfte zu erhalten.

Die ersten informierenden Versuche bezüglich des Einflusses der wie üblich gemessenen Zähigkeit und der Last ergaben, daß z.B. ein hochviskoses Kohlenwasserstofföl H 140 (H-Öle der I.G.) mit 3863 cSt⁺⁺ bei 20°C folgende Werte bzw. Reibungskoeffizienten ($\mu = \frac{F}{N}$) an denselben Kugeln ergab:

Gewicht des Rotors:	resultierende Last	l Luft/min	μ
in g	in g		
(50 ⁺⁺⁺	61,2		0,103
(150	180		0,100
25	306	26,0	0,101
50	612	36,3	0,106
75	920	42,7	0,104
100	1225	48,2	0,105

- +) Berechnet ohne Berücksichtigung der Hertz'schen Abplattung; gemessen wurde 5,8 + 5,9
- ++) Die Viskosität ist, falls nicht ausdrücklich bemerkt, immer für die Temperatur von 20°C angegeben. Die Angabe wurde in cSt gemacht, da dies in der Schmieröltechnik allgemein üblich ist. Eine Umrechnung in cP kann aus der Zahlentafel am Schluß des Berichtes erfolgen.
- +++) Mit einem besonderen leichten Rotor gemessen u. die Werte bei 250 g mit denen des ab hier verwendeten schweren Rotors von 250g gleichgesetzt:

Ein niedrig viskoses Kohlenwasserstofföl H 16 mit 324 cSt benötigt bei 20°C und 250g Rotorgewicht auf gleiche Kugeln bezogen ebenfalls 26.0 l/min. Ein "aktives" Synthesöl der DVL mit 1970 cSt gab bei 20°C folgende Werte:

Gewicht des Rotors in .	l Luft/min	μ
25	20,1	0,060
50	28,3	0,061
75	35,1	0,066
100	39,7	0,065

Die Messungen wurden bei 100 l/min genau^{*)} durchgeführt.

Daraus ist zu entnehmen, daß 10-fache Viskositätsherabsetzung in angeführtem Beispiel praktisch keine Änderung des Reibungskoeffizienten bewirkt. Eine konstitutionsmäßige Änderung des Schmierstoffes ergibt eine Herabsetzung des μ -Wertes von 0.101 auf 0.060. Eine Druckabhängigkeit scheint ebenfalls nicht vorhanden zu sein. Verschleiß ist schon nach kürzester Laufzeit des Rotors als Laufspur - durch Anhauchen der kalten Kugel - sichtbar zu machen und an Verschleißflächen bei den unteren Kugeln festzustellen. Die angeführten Beispiele zeigen, daß das Gerät tatsächlich in dem gewünschten Gebiet arbeitet. Die Genauigkeit und das Auflösungsvermögen des Gerätes sind groß. es erscheint also vorerst einmal geeignet, das hier interessierende Schmiergebiet zu untersuchen.

Folgende Fragen bzw. Einflüsse sind an Beispielen zu untersuchen. bevor durch Messungen an verschiedensten Stoffen Zusammenhänge geklärt werden sollen :

- 1) Reinigung der Schmierstellen
- 2) Gleichmäßigkeit der Kugeloberflächen
- 3) Änderung der geometrischen Form der Schmierstellen während der Messung (Verschleiß)
- 4) Schmierfilmstärke
- 5) Gasatmosphäre
- 6) Änderung der Oberflächenstruktur der Schmierstelle durch den Schmierstoff
- 7) Gleitart des Rotors
- 8) Oberflächenrauigkeit des Werkstoffes

Dazu kommen die unmittelbar gesuchten Einflüsse von:

- 9) Schmierstoff
- 10) Belastung
- 11) Temperatur
- 12) Werkstoff

26880

*) Die Reproduzierbarkeit ist bei gleichbleibender Last gleich groß, während sie bei wechselnder Belastung nur etwa $\pm 0,2$ l/min beträgt.

Diese Fragen erlahren in vorliegender Mitteilung eine Vorklärung, um eine spätere eingehende systematische Untersuchung zu ermöglichen.

1) Reinigung der Schmierstellen:

Die im Handel erhältlichen Kugellager-Kugeln^{†)} sind eingefettet und mechanisch durch Staub usw. verunreinigt. Sie werden mit einem mit Alkohol-Äther benetzten Tuch sorgfältig abgewischt, in den Tiegel samt Klemmring und Einspannmutter des Rotors gelegt, die Klemmringschraube gerade so angeschraubt, daß sie nicht abfällt, dann ein kleiner Trichter, dessen scharfe Kanten abgeschmolzen wurden, bis auf den Boden des Tiegels gesetzt und letzterer mittels einer Drahtschlinge unter einem Rückfluskühler, der auf einem Lang-Weithalskolben eingeschliffen ist, befestigt. Extrahiert wird unter starkem Rückfluß mit einem Gemisch von 2 Teilen Äther und 1 Teil Methylalkohol. Zur Bindung saurer Schmierstoffbestandteile werden einige Plätzchen Kaliumhydroyd in den Siedekolben getan. So werden auch die im Tiegel fest eingespannten Kugeln ohne Lageänderung derselben gereinigt. Die Kugel des Rotors muß dann nach oberflächlicher Säuberung durch Eintauchen in ein frisches Äther-Alkohol-Gemisch und längerem Abspülen mittels einer Tropfflasche gereinigt werden. Die so behandelten Teile werden 5 min bei 50°C im Trockenschrank erwärmt und noch warm in einem Vakuumexsikkator (ohne CaCl₂) durch 3maliges Evakuieren und Lüften getrocknet.

Reibungsverhalten ohne Schmierstoffauftragung bei 20°C:

Meßart: Der Rotor hat nur 1/3 einer Umdrehung eine unberührte Bahn auf seiner Kugel (6,05 mm). Die Messung erfolgt daher nicht wie sonst. Das Windrad wird mit der Hand ganz kurze Wegstücke bewegt und beobachtet, ob eine Tendenz zur Weiterbewegung besteht. Die bei den Versuchen ohne Schmierstoff erhaltenen Werte sind auf etwa ± 1 Ltr. Luft/min genau zu messen. Die Reproduzierbarkeit ist schlecht. Über die Relation der so erhaltenen Werte zu den auf normale Weise erhaltenen siehe 4) (Blatt 17, 18).

^{†)} Vereinigte Kugellagerfabriken A.-G., Schweinfurt

Die Versuche wurden unter Stickstoff mit einem Rotorgewicht von 250g bei 20°C durchgeführt. Eine 10 min-Reinigung ergab ähnliche Werte, wie die 20 min Reinigung, nämlich im ersten Wegdrittel etwa 43 l/min (0,3 μ); der Wert steigt bis zum dritten Wegdrittel auf etwa 46 l/min (0,4 μ), um innerhalb von 2 bis 3 Umdrehungen auf über 60 l/min (0,7 μ) zu steigen. Andere Messungen gaben schon beim ersten Wegdrittel 50 l/min (0,45 μ). Bereits eingespannte Kugeln mit einem fetten Öl (Speedwell) benetzt und 15 min gereinigt ergaben ebenfalls im ersten Wegdrittel einen Wert von 50 l/min, der sofort auf 60 l/min (0,7 μ) steigt.

Daraus ist zu entnehmen, daß eine 20 min-Reinigung praktisch ausreichend ist, da der vorhandene Oberflächenbelag, dessen Natur noch untersucht wird, in kürzester Zeit (2 bis 3 Umdrehungen des Rotors) vernichtet wird.+) Daß auf diese Weise unbeeinflusste Messungen durchgeführt werden können, zeigt das folgende Beispiel. Zwei Flugmotorenöle gleicher Bezeichnung, aber verschiedener Lieferung, gaben, immer mit denselben Kugeln gemessen, bei einem Rotorgewicht von 250g, bei 20°C in Gegenwart von Luft bei gut mit Öl benetzten Kugeln ++):

<u>Schmierstoff:</u>	<u>l/min:</u>
83/ε	24,3
133/ε	23,7
83/ε	24,3
133/ε	23,7

Die Messungen wurden möglichst kurz ausgeführt, um einen Einlaufvorgang zu vermeiden. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,1$ l/min ($\pm 0,001$ μ).

Messungen an gleichen Öl, wie oben durchgeführt, ergaben in l/min folgende Werte: 25,3; 25,3; 25,1; 25,1; 25,1.

2) Gleichmäßigkeit der Kugeloberflächen einer Lieferung.

Die Kugeloberflächen zeigen nach Reinigung bei 100-facher Vergrößerung und günstiger schräger Beleuchtung eine gerade sichtbare gleichmäßige Körnung. Pehlstellen durch Kratzer, Lunker usw. sind gering.

Mit ein und demselben Schmierstoff (423/40 mit 892 cSt) wurden innerhalb von 4 Tagen mit immer neuen Kugeln, Reibungswerte

+) wie später gezeigt wird, wird die Oberfläche der Kugeln schon nach den ersten Umdrehungen des Rotors sichtbar zerstört.

++) Bei späteren Angaben wird die Atmosphäre, bei der gearbeitet wurde, immer einfach als "Luft", "Stickstoff" usw. hinter der entsprechenden Temperaturangabe gesetzt. Ebenso wird statt "Kugeln mit Öl gut benetzt" einfach "Kugeln benetzt" oder in anderen Fällen "Tiegel voll" geschrieben.

in 1/min erhalten: Rotorgewicht 250 g, 20°C, Luft, Kugeln benutzt: 25,3; 25,3; 25,1; 26,1; 24,9; 24,9; 25,3; 25,7; 25,3.

Dies ergibt eine maximale Streuung von ± 0,6 1, min (± 0,005/u), die auf Oberflächenunregelmäßigkeiten zurückzuführen wäre. +)

Daraus folgt, daß im allgemeinen vor einer Messung neue Kugeln (mit einem möglichst indifferenten lagerbeständigen Kohlenwasserstofföl) geeicht werden müssen. Die so erhaltenen Reibungswerte, bezogen auf den Eichwert, sind mit genügender Näherung unmittelbar miteinander vergleichbar.

3) Änderung der geometrischen Form der Schmierstelle während der Messung.

Beim Ruhen des Rotors auf den drei festen unteren Kugeln verformen sich die Berührungsstellen unter dem Gewicht des Rotors zu ebenen kreisförmigen Flächen. Die Verformung ist von der Härte der Kugeln, ihrem Durchmesser und der Last, angenähert nach Hertz berechenbar

$$r = 0,31 \cdot (C \cdot 4082 \cdot P)^{1/3} \cdot \frac{d}{S} \quad (\text{wobei } E \text{ mit } 2,2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{ angenommen wurde})$$

$$c = 0,007958 \cdot \sqrt{P} \quad (\text{cm})$$

Bei den hauptsächlich verwendeten Rotorgewichten ergeben sich folgende Durchmesser der Berührungsflächen und durchschnittliche spezifische Belastungen (die Werte liegen in der Mitte der Hertz'schen Fläche naturgemäß höher, um am Rande auf Null abzusinken)

Rotorgewicht	ungef. Durchmesser der Schmierstellen mm	ungef. durchschn. spez. Drückg kg/cm ²
25	0,03	2900
25	0,05	5200
50	0,06 ₃	6500
100	0,08	8100

Bei der Bewegung des Rotors erfolgt also, soweit nicht z.B. plastische Verformung eintritt, eine periodische elastische Abplattung und Rückbildung der Gleitkugeloberfläche an der

+) Der Durchmesser der Kugeln soll auf ± 0,0005 mm übereinstimmen.

Schmierstelle bei bester Schmierleistung. Die Gleitfläche der Gleitkugeln ist etwa 250 mal^{*)} so groß wie die der festen Kugeln, was beim Verschleiß zu berücksichtigen ist. Die Gleitgeschwindigkeit ist bei der Normalmessung etwa 5 mm/sek.

Die Abhängigkeit der sichtbaren (100-fache Vergrößerung) Verschleißerscheinungen von der Zahl der Umdrehungen des Rotors ist aus folgenden Beispielen zu entnehmen: Rotorgewicht 250g, 20°C. Luft, Kugeln benetzt.

Umdrehungen des Rotors etc.	Schmierstoff	l/min	Sichtbare Verschleißerscheinungen
1	423/40 (Kw - 01) (892 cSt)	25,3	ganz schwache gleichförmige Riefen in elliptischer Abgrenzung; $\varnothing : 0,08.0,09$ mm
1	Speedwell (1044 cSt)	23,5	starke Riefen, elliptische Abgrenzung fast zu einem Rechteck verzerrt; $\varnothing : 0,08.0,09$ mm
10	423/40	25,7 n.100 U. 25,5	Gleichmäßige Riefen mit fast elliptischer Abgrenzung; $\varnothing : 0,08.0,09$ mm mit kreisförmiger ($\varnothing : 0,06$ mm) leicht braun verfärbter stärkerer Abtragungsstelle in der Mitte
10	Speedwell	22,7 n.100 U. 23,7	Gleichmäßige Riefen etwas stärker ausgeprägt wie bei 423/40; $\varnothing : 0,08.0,09$ mm
10	Synthese-Öl SS 17 DVL (1970 cSt)	19,3 n.100 U. 19,3	sehr gleichmäßige, sehr schwache Riefen, elliptische Abgrenzung; $\varnothing : 0,08.0,085$ mm
60	423/40	25,9 n.600 U. 25,1	fast keine Riefen, scharf elliptische Abgrenzung; $\varnothing : 0,08.0,095$ mm
60	Speedwell	23,5 n.600 U. 23,7	Gleichmäßige starke Riefen scharfe (gezackte) elliptische Abgrenzung; $\varnothing : 0,095.0,10$ mm
60	E 16 (324 cSt)	25,3 n.600 U. 25±0,3	schwache Riefen, elliptische Abgrenzung; $\varnothing : 0,12.0,14$ mm
60	keiner	60	$\varnothing : 0,28.0,30$ mm

*) Bei einem Rotorgewicht von 250g (d = 0,05 mm)

Bei den letzten vier Versuchen sehen die Schmierstellen im Gegensatz zu den vorhergehenden Versuchen bereits konkav aus. Die Laufspuren der Laufkugeln sind bei den letzten drei Versuchen ohne weiteres sichtbar, bei den vorhergehenden erst nach Anhauch.

Der Durchmesser der Verschleißstellen der ruhenden Kugeln ist schon nach wenigen Umdrehungen des Rotors größer als die berechnete Hertz'sche Abplattung, was neben der Ungenauigkeit der Berechnung hauptsächlich auf die Rauigkeit der Kugeloberflächen zurückzuführen sein wird. Der Durchmesser der Verschleißstellen nimmt erst nach Ausbildung der konkaven Form merklich zu, sodaß die Druckverteilung in der Schmierstelle bis zu etwa 600 Umdrehungen (30 min-Lauf) sich bei etwa gleichbleibender spezifischer Durchschnittsbelastung fortschreitend ohne wesentliche Änderung des Reibungskoeffizienten ändert. Der Ab-schliff ist beim dünnen Öl (H 16) deutlich größer als bei den vorangehenden, obwohl die Reibungswerte keinen Unterschied zeigen.

Hier näher auf diese Verhältnisse einzugehen, ist bei dem geringen zur Zeit vorliegenden Material - insbesondere von niedrigmolekularen Schmierstoffen - noch verfrüht. ^{*)}

4) Schmierfilmstärke

Messungen wurden in vollen Tiegel und mit gut benetzten Kugeln durchgeführt. Darüber hinaus wurde das Verhalten dünner Filme verfolgt.

Meßwerte, die bei Versuchen mit vollem Tiegel erhalten wurden, sind in folgender Zusammenstellung mit Ergebnissen bei benetzten Kugeln (etwa 3 Tropfen Schmierstoff) in Relation gebracht: Rotorgewicht: 250 g 20°C, Luft.

Schmierstoff	Vis. cSt(20°C)	Voller Tiegel l/min	Kugeln benetzt l/min	Unterschied l/min
423/4	89	25,5	25,5	0
Speedwel	104	23,1	22,9	- 0,2
SS IV DY	197	20,4	19,7	- 0,7
H 14	386	25,9	25,3	- 0,6
H 1	32	25,2	25,3	+ 0,1

*) Allgemeine Betrachtungen S. 3 unten, 4, 7 oben

Die höheren Reibungswerte im vollen Tiegel dürften auf die Viskosität und möglicherweise einer Thixotropie (an den Grenzflächen) zurückzuführen sein, da ja Schmierstoffmangel bei den kurz durchgeführten Messungen bei gut benetzten Kugeln nicht in größerem Ausmaße eintreten kann als im vollen Tiegel.

Um dünnste Filme verschiedener Stärke aufzubringen, wurden folgende zwei Wege beschritten:

a) Bintauchen in verdünnte Lösungen.

Lösungen von Schmierstoffen in Benzol werden auf die Kugeln in Tiegel gegossen und nach einer bestimmten Zeit (3 min) kurz abgeschleudert und wie üblich getrocknet. Ähnlich wurde die eingespannte Rotorkugel behandelt. Gemessen wurde wie auf Seite 12 (für ein Drittel Weglänge) angegeben. Nur wurde der Rotor nicht durch Anstoßen mit der Hand, sondern durch Erschütterung des Gerätes mittels Klopfers in Bewegung gesetzt. Die Genauigkeit ist hier etwa $\pm 0,5$ l/min, die Reproduzierbarkeit (abhängig von der Art des Klopfens und Abgießens der Lösung) etwa ± 1 l/min; Rotorgewicht 250 g, 20°C, Stickstoff (außer bei Versuch 3, 4, 9).

Schmierfilm aus 0,25%iger Lösung.

Zahl der Umdrehungen:	1/3	2/3	3/3	2	8	10	14	20	30	100
1/min \pm 423/4	28,5	28,5	28,5	28,5	27,3 ⁺		29,5	29,5		26,3 ⁺
1/min \pm Speedwell	25,5	25,5	25,5	25,5	26,5	29,5	36,5	39,5	45,5	

gemessen in Luft: (Versuch 3, 4)

Zahl der Umdrehungen:	1/3	2/3	3/3	2	8	10	14	20	80	100
1/min \pm 423/4	27,5	27,5	27,5	27,5	26,1 ⁺		27,5	27,5	25,5 ⁺	27,5
1/min \pm Speedwell	25,5	25,5	25,5	26,5	28,5	30,5	33,5	46,5		

Schmierfilm aus 0,10%iger Lösung.

Zahl der Umdrehungen:	1/3	2/3	3/3	8	10	25	35	40	45	50
1/min \pm 423/4	29	29	29	28,5	28,5	29,5	32,5	36,5	44	>50
1/min \pm Speedwell	25,5	26,5	27,5	41,5	>50					

Schmierfilm aus 0,05%iger Lösung.

Zahl der Umdrehungen:	1/3	2/3	3/3	2	4	8	14	20	30
1/min \pm 423/4	28,5	29,5	29,5	29,5	28,5	29,5	30,5	34,5	>52
1/min \pm Speedwell	26,5		30,5	31,5	35	>50			

26886

*) Normalmessung, durch die vorangehende Art der Messung ungenauer entspricht etwa dem mit normal benetzten Kugeln erhaltenen Wert

gemessen in Luft. (Versuch 9)

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	2	4	8	14
1/min bei 423/40	29,5	28,5	29,5	29,5	31,5	40,5	>52

Schmierfilm aus 0,01%iger Lösung.

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	2,5
1/min bei 423/40	34	39,5	42,5	>50
1/min bei Speedwell	35	30	43,5	>50

Bei der Rotorkugel ist der Schmierfilm noch als 0,05 ige Lösung bei 100-facher Vergrößerung feststellbar. *) Der Einfluss der Zeit, durch welche die Kugeln mit der Benzollösung in Berührung standen, wurde ebenfalls an einem Beispiel untersucht, ohne einen wesentlichen Einfluss zu finden. Bei den Messungen mit dünnen Schichten läßt sich der Rotor beim fetten Öl leichter in Bewegung setzen als beim Mineralöl und leichter als bei normaler Benetzung (Absinken der "Ruhreibung"). (Weitreichender Ordnungszustand d. Moleküle

Zu ersehen ist, daß dünne Schichten schnell verbraucht oder zerstört werden, und daß dies beim fetten Öl rascher erfolgt als beim Kohlenwasserstofföl **); verschiedener Verbrauch des Öles durch verschiedenartigen Abrieb, verschieden rasche Nachlieferung des Schmierstoffes zur Schmierstelle und Temperaturbeständigkeit können in verschiedenem Ausmaße die Ursache sein - diese Fragen werden noch eingehender untersucht. ***)

Folgende Werte wurden bei normaler Messmethode erhalten;
Rotorgewicht 26,2 g, 20°C, Stickstoff:

Zahl der Umdrehungen	30	15	50	80	
1/min bei 423/40 aus 0,3%iger Lsg.	27	28	28	28	(Eichwert d. Kugeln mit 423/40: 26,7 l/min)
	2688				

- *) Nach dem Aussehen der Ölfilme auf den Kugeln (beim Ritzen der Ölfilmhaut) bei 100-facher Vergrößerung dürften die Filmstärken ziemlich unabhängig von der Art des im Benzol gelösten Öles sein. Eine quantitative Erfassung der Dicke der einzelnen Filme ist beabsichtigt.
- ***) Die sprunghafte Änderung der Verschleißmenge bei Lasterhöhung für Kompressol in einem bestimmten Gebiet bzw. bei langen Läufen, wie sie C.F. Krienke findet, dürfte die gleichen Ursachen haben; siehe C.F. Krienke, Verschleißmessungen mit verschiedenen Schmierölen an einem Vierkugel-Ölprüfgerät; Öl u. Kohle, erscheint demnächst.
- ****) Insbesondere die wirkliche Schmierstoffmenge zwischen den Mikrogleitflächen in den beiden Schmierstellen u. in den dazwischenliegenden Vertiefungen - Schmierstoffvorratskammern. (Änderung d. Glätte d. Kugeln bei verschieden starken Schmierstofffilmen.)

Zahl d. Umdrehungen	25	30	32	35
1/min				
423/40 au	23,1	steigt rasch		
C, 15%iger Öl				
1/min				
Speedwell au	23,1	25,2	27	32
0,4%iger Öl		steigt rasch		
		Schwerk d. Kugeln m. Speedwell: 22,5 (min)		

Zahl d. Umdrehungen	2/3	3/3	2/5
1/min			
Speedwell au	Messmeth. wie S. 12		normale Messmethode
C, 0,05%iger Öl			
und mit 423/40 benetzt	26,1	26,5	26,5
			25,5!!!
		(Näherung d. Kugeln m. 423/40: <u>25,7</u> l/min)	
1/min			
423/40 au			
C, 0,05%iger Öl			
und mit Speedwell benetzt			24,6!!!

b. Eintauchen der Kugeln in Schmierstoff und Zentrifugieren
 Zentrifugiert wurde drei Stunden bei 3500 U/min. Die Kugeln zeigen nach dem Zentrifugieren eine farbtigschillernde Oberfläche. Die Ölhaut ist noch so dick, daß mit der Nadel erzeugte Spuren wieder langsam zerfließen. Die Ergebnisse sind gleichsinnig wie bei den mit Lösung hergestellten Filmen.⁺ Die Laufspur bei Speedwell ist ziemlich trocken und mit braunem Abrieb bedeckt, während die Laufspur bei 423/40 keinen nennenswerten Abrieb zeigt und ölbenetzt ist.

Die Zentrifugenmethode dürfte insbesondere zur Prüfung von Kugellagerfetten geeignet sein.

5 Gasatmosphäre

Der Einfluß des Luftsauerstoffes bei dünnsten Schmierfilmen wurde eben gezeigt; die Filme wurden in Gegenwart von Luft etwas rascher zerstört als unter Stickstoff. Untersucht wurde noch der Einfluß verschiedener Gase bei benetzten Kugeln und zwar wurden immer dieselben Kugeln mit Schmierstoff 423/40 versehen, je 15 min lang unter Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxidatmosphäre belassen und dann gemessen. Unterschiede konnten nur bei Einwirkung der Kohlensäure (Abnahme des Reibungswertes um 0,2 l/min festgestellt werden, aber nur innerhalb der Fehlergrenz.

423/40 gab nach 300 Umdrehungen des 250g-Rotors noch keinen Anstieg des Reibungswertes (26,1 l/min, nach 300 U 26,0 l/min); während Speedwell bei einem Anfangswert von 23,5 l/min nach 300 U 50 l/min zeigte.

6) Änderung der Oberflächenstruktur der Schmierstelle durch das Schmiermittel.

Sichtbarer Verschleiß (b. 100-facher Vergrößerung) tritt, wie bereits gezeigt wurde, beim Lauf des Rotors sofort ein, und zwar ist die Art desselben abhängig vom verwendeten Schmierstoff, wie an den Verschleißflächen der 3 festen Kugeln zu sehen ist. Ein fettes Öl vom mittleren Reibungswert zeigte tiefe Riefen, während ein Kohlenwasserstofföl mit höherem und ein Syntheseöl mit niedrigerem Reibungswert eine gleichmäßige relativ glatte Abschleißfläche zeigen. Diese sichtbaren Oberflächenunterschiede und die noch vorhandenen nicht sichtbaren mit dem sich bildenden verschiedenenartigen Abrieb und den Ölveränderungsprodukten können die Reibung maßgebend bestimmen, wie aus folgenden unter gleichen Bedingungen durchgeführten Beispielen zu entnehmen ist:

Die Öle 83/43 und 52/44 wurden in verschiedener Reihenfolge (unter Vermeidung eines besonderen Einlaufes) möglichst kurz (3 bis 5 Umdrehungen) gemessen. Für jede Reihenfolge (in der waagerechten) wurden ein und dieselben eingespannten Kugeln verwendet; Rotorgewicht 250 g, 20°C, Luft, Kugeln benetzt.

Schmierstoff	83/43	52/44	83/43	83/43	52/44
l/min	24,9	24,7	23,9	23,9	
l/min	25,0	24,9	24,1		24,6

Schmierstoff	83/43	H 42	83/43 +)
l/min	25,0	26,5 27,9	26,2 25,1

Ein Abwischen der Schmierstellen vor der üblichen Reinigung mit einem Baumwolltuch bringt hier keine Änderung. nach 2:2 min Einlauf ++)

Andere Öle - auch mit sehr "aktiven" Gruppen, wie SS IV DVL - zeigen wieder die eben gezeigten Eigenschaften nicht.

Schmierstoff	83/43	SS IV DVL	83/43
l/min	26,0	20,3	26,1

Einlaufverhalten eines stark gefetteten Öles (Speedwell):

Einlaufzeit in min. ++		2	3	4	5
l/min	22,7	23,4	23,3	23,7	23,7
l/min	23,5	23,9	23,9	24,3	24,1
l/min	26889 23,3	23,5	23,9	24,3	24,9
					23,5 25,1

Die Werte sind also sehr schlecht reproduzierbar;

- +) 83/43 selbst zeigt nur geringes Einlaufverhalten (der Wert steigt nach 60 Umdrehungen von 25,3 auf 25,5 l/min)
- ++) Eine Minute entspricht etwa 15 bis 20 Umdrehungen. Unter Einlauf bzw. Einlaufverhalten wird immer die Ausbildung einer dem Schmierstoff entspr. eigenen Gleitbahn verstanden, gekennzeichnet durch das Reibungsverhalten.

Günstiger diesbezüglich verhält sich z.B. H 426 (Ester):

Einlaufzeit in min:	1	2	3
1/min:	26,5	28,1	27,9
1/min:	26,4	28,1	27,9

Das Kohlenwasserstofföl 423/40:

Einlaufzeit in min:	1	2	3	4	5
1/min:	26,1	26,1	26,1	26,1	25,9
1/min:	25,7	25,3	25,5	25,5	25,5
1/min:	25,9	25,7	26,0	26,0	26,0
1/min:	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3

Der Schmierstoff SS IV DVL:

Einlaufzeit in min:	1	2	3	4	5
1/min:	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3

In der 2. und 3. Reihe beim Einlaufverhalten von 423/40 mussten anscheinend anfänglich Oberflächenunregelmäßigkeiten durch den Einlauf beseitigt werden.

Wie an einem Beispiel gezeigt wurde, ist die Reproduzierbarkeit des Einlaufverhaltens bei manchen Schmierstoffen schlecht. Nicht reproduzierbare Einflüsse, wie sie bei dünnsten Filmen für die Erklärung des Anstieges der Reibungswerte angegeben wurden, dürften als Ursachen hier vorliegen.

Als Eichöle sind deshalb solche zu wählen, welche die Schmierstelle nicht wesentlich beeinflussen. Auch diese Öle sollen kurz eingelaufen werden, um evtl. Unregelmäßigkeiten der Kugeloberflächen auszugleichen (maximal 1 bis 2 min Einlauf, falls Schwankungen bei Bestimmung des Eichwertes eintreten; s.obiges Beispiel mit 423/40).

Es wird noch ein Beispiel, welches gut reproduzierbares Einlaufverhalten und Auswirkung der Einlaufbahn zeigt, angeführt. Die hier angeführten Werte stellen die beim Einlaufen erhaltenen höchstwerte dar (Einlaufzeiten: 30 sek. bis 1 min).

Schmierstoff:	1/min:	Schmierstoff	1/min
83/4	25,1 (Eichwert)	H 8	26,3 (Eichwert)
H 42	<u>28,1</u>	H 426	<u>28,3</u>
	3,0 Differenz		2,0 Differenz
83/4	25,3 (Eichwert)	Der Differenzwert 3,0 entspricht	die Summe der Differenzwerte
H 42	<u>26,3</u>	2,0 und 1,0.	
	1,0 Differenz		

7 Gleitart des Kotor.

Der Kotor kommt bei schnellerem Lauf insbesondere bei dünner und dünster Ölen sehr leicht in eine mit singendem Geräusch¹⁰⁾ verbundene Bewegung, die wesentlich niedrigere Werte ergibt als wirkliches Gleiten. Diese Bewegungsart wurde bei allen Messungen vermieden, indem der Kotor z.B. bei Trockenläufen unter Verzicht auf Genauigkeit kurze Wegstrecken ganz langsam gleiten gelassen wurde; diese Messungen sind im vorliegenden Bericht besonders gekennzeichnet, da sie mit der Normalmessung nicht unmittelbar verglichen werden können.

8) Oberflächenrauigkeit des Werkstoffes.

Die Oberflächenrauigkeit wurde durch Ätzen der Kugeln mit Salzsäure erhalten.

Ätzen durch 3 min (der gereinigten Kugeln) mit 25%iger HCl; Rotorgewicht 250g, 20°C, Luft, Kugeln benetzt.

Schmierstoff:	l/ml:	μ	(μ b. glatten Kugeln etwa)
423/4	29,7	0,137 (Eichwert)	(0,101)
SS IV DV	27,0	$\frac{0,110}{0,02}$	(0,060)
		Differenz	(0,041 Differenz)

Einlaufverhalten von SS IV DV:

Einlaufzeit in min:	-	2	3	5	7
l/ml:	27,2	27,2	27,2	26,8	26,2 (Einebnung)

Ätzen durch 5 min mit 25%iger HCl; Rotorgewicht 250g, 20°C, Luft, Kugeln benetzt.

Schmierstoff:	423/40	Speedwell	423/40
l/ml:	29,9	27,5	29,9
l/ml:	30,0	27,5	29,9
nach 1 min Einlauf			

Versuche mit stark geätzten und sandgestrahlten Kugeln sind vorgesehen. Ein Versuch mit sandgestrahlten Kugeln (Rotorgew. 250g, 20°C, gab mit 423/40 (Eichöl) einen Reibungswert von 30,3 l/min, mit Speedwell 28,1 l/ml.

Das Auflösungsvermögen glatter Kugeln ist größer als bei rauhen.

2689:

10) Bowden beobachtet an seinem Gerät ein Gleit-Haftens; s. z. B. F. Morgan, M. Muskat, D. M. Reed; Studies in lubrication I J. appl. Physics. 12. 743 (1941)

9) Einfluß des Schmierstoffes.

Hier handelt es sich primär darum, das Auftriebsverhalten des Gerätes festzustellen und das Schmiergebiet, in dem es arbeitet, etwas zu charakterisieren. Es wurden daher vorläufig keine Beziehungen zwischen dem Reibungskoeffizienten, Konstitution des Schmierstoffes und physikalischen Eigenschaften - außer der Zähigkeit - gesucht. Die ausgeführten Messungen erfolgten alle mit 250 g Rotorgewicht bei 20°C in Gegenwart von Luft und mit benetzten Kugeln. Höher viskose Öle als die angeführten standen nicht zur Verfügung, während andererseits mit niedrig viskosen Ölen (unter 100 cSt bei 20°C) nur wenige Messungen gemacht wurden, sodaß für dieses Gebiet nicht genügend Erfahrung vorliegt und die wenigen Werte, die erhalten wurden, nur mit einem gewissen Vorbehalt mitgeteilt werden.

Es folgt eine Zusammenstellung von verschiedenen viskosen Schmierstoffen (150 bis 4000 cSt) in Abhängigkeit von Einlaufverhalten.

Schmierst. (KW-Basis)	H 8	H 16	H 32	H 80	H 140	83/43	423/40	133/43	224
cst b. 20°C	145	324	759	2355	3863	898	892	730	1281
Dichtwert m. 423/40 l/min	25,3	24,9	25,3	25,7	25,3	25,3	25,3	24,9	24,9
l/min b. Einlaufs: in min	26,3	25,1	25,3	25,3	25,1	25,3	25,3	24,0	24,1
	26,3	25,1	25,1	25,3	25,1	25,3	25,3		24,1
		25,3	25,1	25,3	25,1	25,3	25,3		24,1
		25,7	25,1	25,3	25,1	25,3	25,3		24,3
		25,7	25,3	25,3	25,1	25,5	25,3		

* Eine Laufzeit von 1 min entspricht immer etwa 15 bis 20 Umdrehungen des Rotors.

Schmierst. (aktive St.)	Speed- well	Kompr. 183/39	SS IV DVL	Ab.+++) Ester	ASM 18/39	Hypoid 358/42	HDL 357/42	
cSt b.20°C	13	1044	1096	1970	3600	1104	927	942
Eichwert n.423/4 l/min:	25,1	25,1	26,1	26,1	25,8	25,3	25,3	25,1
l/min in Einlaufzeit in min.	26,5	22,3	25,1	20,3	27,2	26,0	25,3	25,1
	28,1	22,9	25,1	20,3	27,2		25,1	25,1
	27,5	23,5	25,1	20,3	27,2		25,1	25,1
	27,1		25,5	20,3	27,2		25,1	25,1
			25,5	20,3	27,0	26,3	25,1	25,1

Zusammenstellung der aus obigen Meßwerten ohne Einlauf
ermittelten Reibungskoeffizienten:

Schmierst. (KW-Basis)	H 8	H 16	H 32	H 88	H 140	83/43*)	133/43*)	224/38
cSt b.20°C	145	324	759	2555	5863	898	750	1281
	0,110	0,103	0,101	0,098	0,100	0,101	0,094	0,095

Schmierst. (aktive St.)	H 426	Speed- well	Kompr. 183/43	SS IV DVL	Ab.+++) Ester	ASM 18/39	Hypoid 358/42	HDL 357/42
cSt b.20°C	13	1044	1096	1970	3600	1104	927	942
	0,114	0,079	0,094	0,060	0,114	0,106	0,101	0,101
n (Höchst- wert nach Einlauf)	0,129	0,09						

Reibungskoeffizienten einiger niedrig viskoser Stoffe (mit vollem
Tiegel gearbeitet):

Schmierst.	Spind.- 160/38	Perhydro- chryser	Eism.- 81 159a/38	Knochen- 81	Cetan	Ceten	Äthyl- alkohol
cSt b.20°C	14	85	30,8	30,2	4,47	4,55	1,52
	0,12	0,13	0,125	~0,17	~0,46	0,125	>0,7

- +) Beides Motorenöle gleicher Bezeichnung nacheinander geliefert.
(83/43 führte zu Schadensfällen, 133/43 bei gleichen Motoren nicht).
- ++) Alle Reibungskoeffizienten in diesem Bericht sind auf einen Kugel-
eichwert von 26,0 l/min für 423/40 bezogen.
- +++) Abietinsäuremethylester; bei 25°C gemessen, um die Viskosität ver-
gleichbar mit den anderen Ölen zu erhalten.

Zu erwähnen ist noch, daß manche Öle einige Tage an den Lagern belassen, eine Senkung von 0,2 bis 0,5 l/min des Reibungswertes ergeben. Aktive Zusätze wirken sich bei 20°C wenig aus, so zeigte ein ZW-Öl (3/43) mit 26,1 l/min nach Zusatz von 2% SS IV DVL eine Herabsetzung des Reibungswertes nur auf 25,4 l/min. 2% Säure, dem gleichen Öl zugesetzt, ergab eine Erniedrigung des Reibungswertes um 0,4 l/min.

Die Genauigkeit der Messungen betrug $\pm 0,1$ l/min. Die Reproduzierbarkeit der Werte ohne Einlaufen in den obigen Zusammenstellungen ist im allgemeinen $\pm 0,1$ l/min (bei Berücksichtigung der bisher angeführten Punkte). Bei Schmierstoffen mit starkem, gleich einsetzendem Einlaufverhalten ist die Reproduzierbarkeit nicht leicht so genau zu gestalten.

Aus den Beispielen ist zu entnehmen:

Die Viskosität bei 20°C, unter normalen Bedingungen gemessen, ist in bestimmten Grenzen ohne Einfluß auf die Reibung. Bei Herausstraten aus diesem Gebiet steigt die Reibung etwas an, um sich bei niedrigsten molekulären Stoffen Trockenreibungswerten zu nähern. Die konventionelle "Aktivität" eines Öles ist in keiner Weise maßgebend für die Reibungseigenschaften. Die Reibung auf vorgegebener Gleitfläche und auf bereits gefahrener ist zu beachten.

10) Einfluß der Belastung.

Über den Einfluß der Belastung wurden schon anfangs zwei Beispiele gebracht. Folgende werden hinzugefügt:

Schmierstoff	Belastung g	l/min	μ
E 1	250	25,1	0,097
	500	35,1	0,099
	1000	47,8	0,103
133/4	140	19,7	0,100
	250	25,7	0,100
	500	36,1	0,104
	1000	48,5	0,107
SS IV DV.	50	9,	0,055
	100	14,1	0,055
	200	19,5	0,054
	250	21,7	0,055

26894

Man sieht, wie auch an den früher gezeigten Beispielen einen leichten Anstieg des Reibungskoeffizienten mit der Belastung

*) Um einen gewöhnlichen Ordnungszustand kann es sich hier nicht handeln, da ja der Schmierfilm an den Schmierstellen bei Bewegung des Rotors sofort "verbraucht" wird, während der niedrigere Wert länger Zeit bleibt. (Eindringen d. Schmierstoffes in die Oberfläche der Gleitstelle?)

Ob dieser Anstieg reell ist, kann nicht mit absoluter Sicherheit gesagt werden, da, wie bereits erwähnt, die Messung der wirklich einwirkenden Kraft nicht so genau durchführbar ist, wie die der relativ-Werte 1/min. (Die stärkere plastische und elastische Verformung der Kugeln bei höheren Lasten ist hier zu berücksichtigen)

11) Einfluss der Temperatur.

Der Temperatureinfluss, der mit zu den wesentlichsten Fragen gehört, konnte leider noch nicht in gewünschtem Ausmaß untersucht werden.

Auf Seite 2 wurden die Reibungskoeffizienten verschiedener Schmierstoffe bei 20°C gezeigt. Aus folgendem ist zu ersehen, dass sich deren relative Höhe schon bei Temperaturen von 80°C ändern kann; Rotorgewicht 50 g. 80°C, Stickstoff, benetzte Kugeln.

Schmierstoff:	423/40	Hypoid 358/42	H 140	H 32	Compressol 183/39	Speed- well
bei 20°C	36,5	30,0	112	40,05	38,0	60,0
Nichtwert m. 423/40 1/mi:	14,1	14,7	14,1	14,3	14,5	13,9!
1/min n. Ein- laufzeit 1	14,1	14,5	13,9	14,9	13,9	13,9!
m:	14,3	14,1	13,9	14,5	13,7	13,9
	14,1	14,1	13,9	14,5	13,7	13,9
	14,1	14,1	13,9	14,5	13,5	13,9
	14,0	14,1	13,9	14,5	13,7	13,9

Rotorgewicht 38g. 80°C, Luft, Kugeln benetzt

Schmierstoff:	ASL	ASM	SS IV. DVL	SS IV DVL
Nichtwert m. 83/43 1/mi:	11,8	11,5	12,5	12,5
1/mi:	10,9	10,7	11,7	11,6

Der ASM-Wert liegt bei 20°C gemessen um 0,2-0,4 1/min höher als mit Schmierstoff 83/43; bei 80°C um 0,7 - 0,8 1/min niedriger.

Die Abhängigkeit der Reibungswerte von der Temperatur bei einigen Ölen zeigen folgende Beispiele; (Rotorgewicht 38g. Luft, Kugeln benetzt; senkrechte Spalten; gleiche Kugeln):

2689:

*) Der hier benötigte Hochtemperatur-Thermostat der Fa. Maake wurde nicht geliefert, sodaß bei höheren Temperaturen nur wenige Untersuchungen behelfsmäßig durchgeführt werden konnten.

Schmierstoff:	83/43	83/43	ASM 99b/42	153/43	SS IV DVL	SS IV DVL
1/min l.						
8	11,8	11,1	10,5	11,4		10,6
					9,3	
					8,1	
	8,1	8,9	9,1	10,2	7,3	7,9

Reproduzierbarkeit: Ist an gleichen (eingespannten) Kugeln bei 80°C an Schmierstoff 83/43 geprüft worden (die Kugeln wurden nach jeder Messung gereinigt). Rotorgewicht 50g, Luft, Kugeln benetzt: 14,3; 14,3; 14,3; 14,2; 14,3 1/min.

Bei hohen Temperaturen (100 bis 200°C) sind die Messungen mitbestimmt durch die Veränderung des Schmierstoffes. Es wurde deshalb das Verhalten unter Stickstoff und Luft geprüft. Werte werden nicht angegeben, da die Zahl der nur behelfsmäßig durchgeführten Versuche zu gering ist, um über die Reproduzierbarkeit klaren zu sein. Es sieht so aus, als ob die Reibung zwischen 80 und 120°C am höchsten wäre, um dann wieder abzunehmen. Die Werte sind davon abhängig, ob langsam unter Durchführung von Messungen auf die hohe Temperatur gegangen wurde (Ausbildung epistischer Gleitbahnen) oder die Messungen bei der betreffenden Temperatur unmittelbar durchgeführt wurden.

12 Einfluß des Werkstoffes.

Die Reibungsmessungen werden an Kugeln durchgeführt, die mit verschiedenen Metallen elektrolytisch übersogen wurden. Vorläufig liegen noch keine Ergebnisse vor.

IV. Zusammenfassung und Folgerungen.

Nach Definition der außerhydrodynamischen Schmierung und kurzer Darstellung der theoretischen Grundlagen derselben wird ein Gerät mit glatten Schmierstellen bei günstiger Meßanordnung und einfacher Konstruktion (Vierkugel-Windradgerät) beschrieben, welches bei den bisher untersuchten Beispielen von Schmierstoffen mit Viskositäten von 300 bis 4000 cSt, Reibungskoeffizienten zwischen 0,060 und 0,120 (bei 20°C), unabhängig von der bei 20°C unter normalen Bedingungen gemessenen Viskosität, gibt. Der Wechsel der Durchschnittsbelastung der Schmierstellen zwischen etwa 3000 und 8000 kg/cm² beeinflusst den Reibungskoeffizienten nur geringfügig. Diese Verhältnisse entsprechen also definitionsgemäß der "Grenzreibung". Ebenso praktisch ohne Einfluß ist die Änderung der Lastverteilung in der Hertz'schen Fläche beim Einlauf (Verschleiß) und der spezifischen Belastung durch die anschließende Vergrößerung der Schmierstelle. Das folgende Gebiet - bis etwa 5 cSt nur grob vorgeklärt - zeigt nur etwas höhere Reibungskoeffizienten, während niedrigst molekulare Stoffe der Trockenreibung ähnliche Verhältnisse aufweisen. Die Genauigkeit der Messungen beträgt nach bisherigen Erfahrungen für Stoffe mit einem Reibungskoeffizienten bis etwa 0,11 ± 0,001 (+ 0,1 l/min) bis zu einem μ von etwa 0,15 ± 0,001 bis ± 0,002 (+ 0,1 bis 0,2 l/min); entsprechend ist im allgemeinen die Reproduzierbarkeit bei Berücksichtigung der im Bericht besprochenen Einflüsse.

Folgende vorläufige Ergebnisse über die Schmiervorgänge im außerhydrodynamischen Gebiet sind unmittelbar aus den Vorversuchen zu entnehmen:

Schmierstoffe - darunter solche gleicher Herstellungsart - zeigen unter den gewählten Bedingungen eindeutige Unterschiede des Reibungskoeffizienten. Anwesenheit von "aktiven" (polaren) Gruppen gibt unmittelbar keinen Aufschluß über gutes oder schlechtes Reibungsverhalten.

Schmierstoffe können bei höheren Temperaturen eine Änderung, ja eine Umkehr ihres relativen Reibungsverhaltens zeigen.

Auf der Schmierstelle aufgetragene dünne Schmierfilme (mikrosk. erkennbar), die den gleichen Reibungskoeffizienten wie bei Überschuss von Schmierstoff geben, haben eine äußerst geringe Lebensdauer. Bei Kohlenwasserstoffen ist sie höher als bei den

bisher untersuchten "aktiven" Stoffen mit niedrigen Reibungskoeffizienten. Noch dünnere Schmierstofffilme geben unmittelbar einen höheren Reibungswert (Schmierstoffnachlieferungsverhältnisse aus der Umgebung der Gleitbahn und innerhalb derselben, Verschleißverhältnisse u.a.m. sind hier zu berücksichtigen).

Das Reibungsverhalten ist nicht nur auf der vorgebildeten, sondern auch auf der unter Einwirkung des Schmierstoffes (verschiedene Verschleißarbeit/cm²) beim Einlauf resultierenden Gleitbahn zu verfolgen.

Dünne Schmierstoffe (bis etwa 5 cSt bei 20°C) scheinen bei 20°C ähnliche, nur etwas höher liegende Reibungskoeffizienten zu geben als die eingehend untersuchten Schmierstoffe (300 bis 4000 cSt bei 20°C). Dünnste Stoffe zeigen jedoch Reibungswerte, die jenen der Trockenreibung nahekommen.

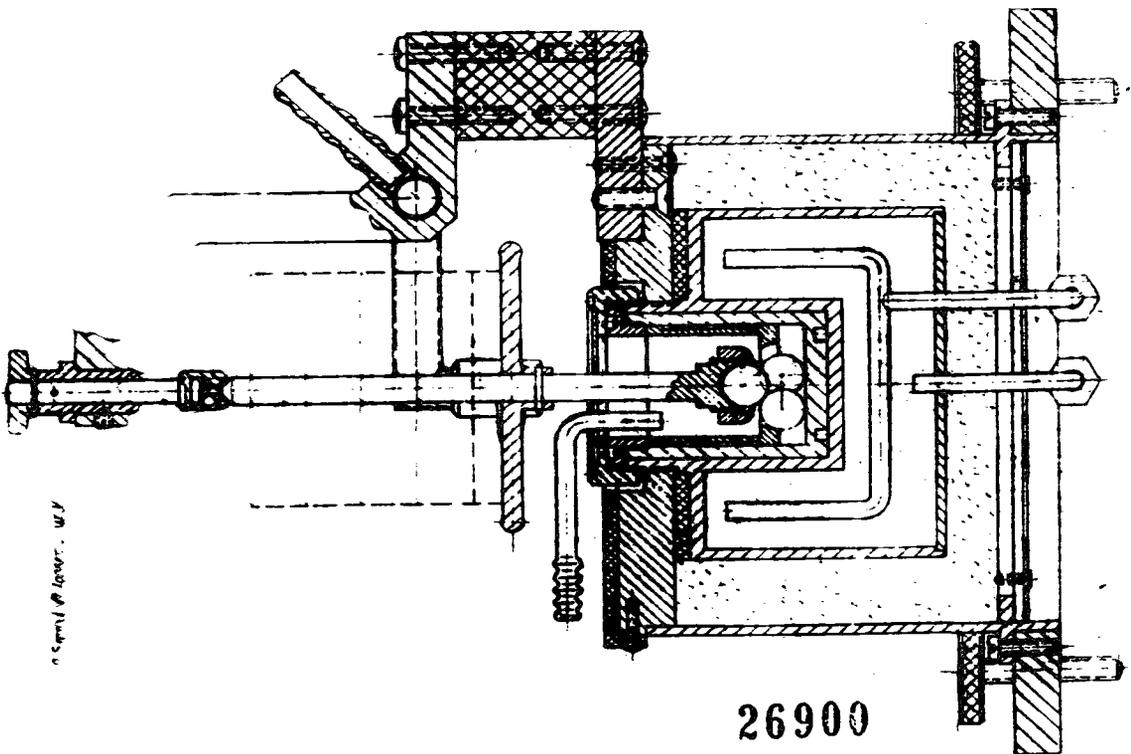
Zusätze in geringen Mengen wirken sich im allgemeinen bei 20°C reibungsmäßig nur gering aus, auch wenn sie an den Grenzflächen der Schmierstellen absorbiert werden, da sie rascher verbraucht als nachgeliefert werden und der Aufbau des tragenden Filmes anscheinend gestört wird.

Auf Grund der in der Arbeit gebrachten Vorklärung der die Schmierung beherrschenden Einflußfaktoren wird jetzt insbesondere eingehend untersucht: Schmierstoffe verschiedenster Viskosität und Art, um daraus Zusammenhänge zwischen Reibung und Verschleiß zu suchen - dahingehend, daß einerseits die Fähigkeit verschiedener Stoffe zwei Flächen im außerhydrodynamischen Gebiet zu trennen (Molgröße, zwischenmolekulare Kräfte im Schmierfilm an der Grenzfläche a.u.m.), andererseits die Verschleißarbeit/cm² (unmittelbar und mittelbar, unter dem Einfluß verschiedener Stoffe als zwei getrennte, aber gleichzeitig wirkende Faktoren betrachtet werden. *) Abhängigkeit dieser Faktoren von chemischen und physikalischen Eigenschaften der Schmierstoffe und Werkstoffe der Schmierstellen. Dann Temperaturverhalten und Verhalten dünnster Schmierstofffilme. Die in der Einleitung gebrachten allgemeinen Betrachtungen werden weiter als Arbeitshypothesen verwendet und - soweit zutreffend - zu belegen versucht.

Niedrigere Verschleißarbeit/cm² gibt unter gleichen Verhältnissen näheren Verschleiß. Gute Schmiereignung: niedrige Verschleißarbeit/cm², aber bei hoher außerhydrodynamischer Tragfähigkeit des Schmierstoffes.

Bezeichnung des Öles	Eingang Nr.	Dens. Gew. b. 20°C	Viskosität bei 20	Viskosität bei 50	VP
H 8	248/43	0,841	145,5	34,4	1,51
H 16	249/43	0,851	324	67,2	1,52
H 32	250/43	0,853	759	130,3	1,62
H 68	251/43	0,854	2555	310,7	1,66
H 140	252/43	0,861	4663	476,7	1,74
H 426	253/43	0,948	137,5	28,2	2,08
Ordüring	224/38	0,885	1281	177,6	1,74
Rotring	83/43	0,889	898	133,8	2,02
Rotring	133/43	0,874	815	127,6	1,83
Rotring	423/40	0,892	892	130,6	1,89
Speedwell	—	0,960	1044	193	2,82
Kompressor	183/39	0,959	1096	145,5	2,10
ASK	18/39	0,917	1104	160,1	1,87
ASM	99b/42	0,922	1051	147,2	2,00
Hypoidöl	358/42	0,927	927	116,3	2,41
HDL	357/42	0,932	942	116,3	2,50
Kompressoröl	52/44	0,912	828	111,7	2,24
SS IV DW-Synthesöl	—	0,942	1970	177,5	3,13
Adolinsäuremethylester	—	1,038	7349	201,4	
Russisches Spindelöl	160/38	0,898	142	22,7	
Eisenschinenöl	159a/38	0,886	30,8	9,1	
Perhydrochrysen	—	0,984	85,7	16,2	
Knochenöl	Shell P 31	0,860	30,2	9,08	
Ceten	—	0,770	4,47	2,36	
Ceten	—	0,793	4,55	2,39	
n-Äthylalkohol	—	0,789	1,52	0,89	

Die Viskositäten der H-Öle beziehen sich auf Angaben der I.C. und wurden nicht kontrolliert, da eine Änderung für vorliegende Arbeit wesentlich ist. Außerdem zeigen die H-Öle entsprechend alterungsabhängig bedingt - Verseifungsebenen Versuche mit reineren Stoffen sind beabsichtigt.



© Schmitt & Co. W.V.

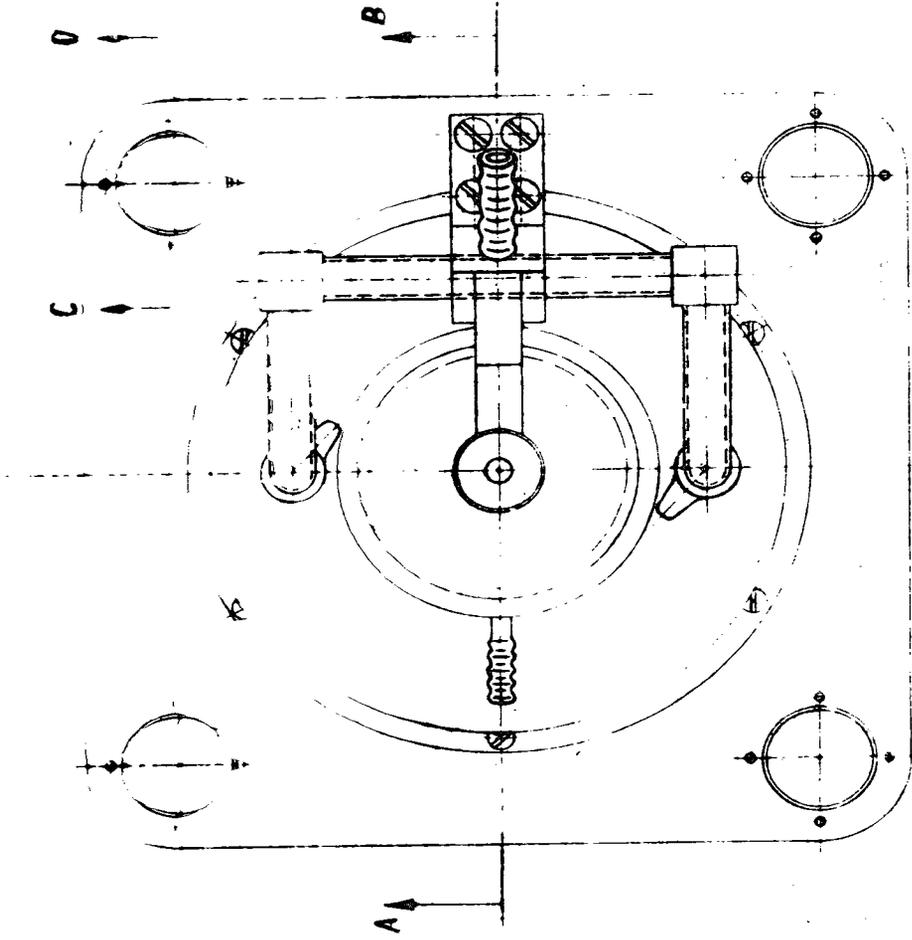


Abb. 1a Gerät Rmimrt 1

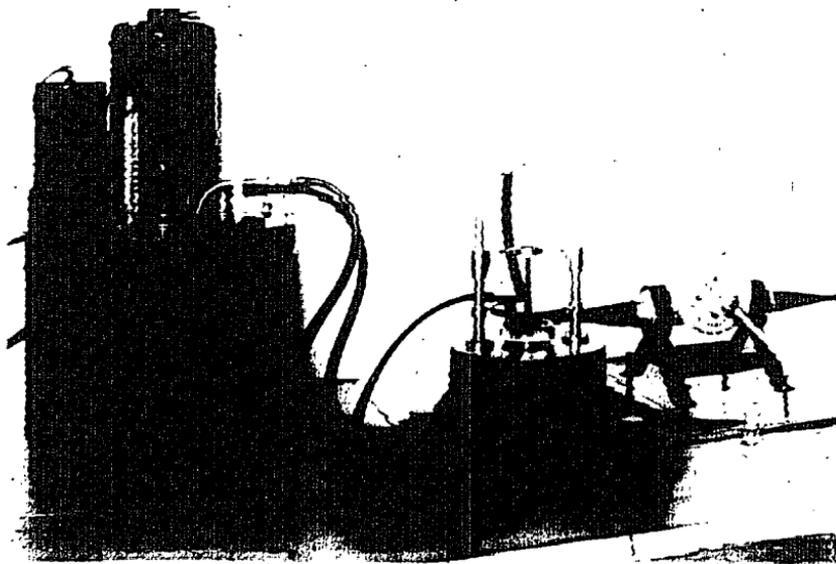
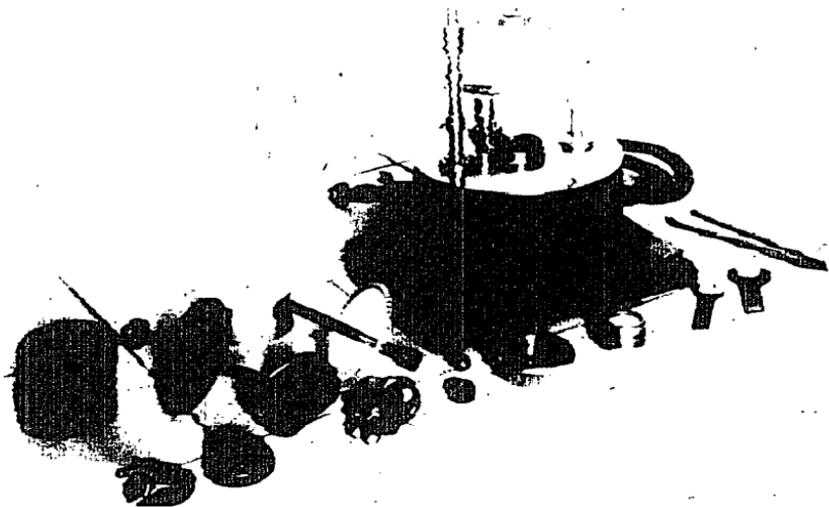


Abb. 10. Turbinen.

26901

