

Metall benetzt. Wenn dann der Zapfen ruht und den Schmierfilm durchbricht, so muß Metall mit Metall in Berührung kommen, d.h. der Kontakt wäre rein metallisch, so wie bei den Messungen von Holm und Kirschstein ¹⁾. Außerdem, wenn der Schmierfilm wirklich durchbrochen wird, so dürfte wohl eine nicht allzu kleine metallische Berührungsfläche entstehen, sondern vermutlich eine so große, daß sie wesentlich die Kontaktlast trägt. Dann ist die Bedingung für eine große Reibungszahl vorhanden, und man müßte Ruhereibungszahlen $\mu > 1$ vielleicht $\mu > 2$ messen.

Bleibt aber der monomolekulare Schmierfilm unverletzt, behält also der Kontakt den Charakter des Bildes (2), so müßte etwa $\mu = 0,2$ bis höchstens 0,4 herauskommen. Derartige Ruhereibungsmessungen können also darüber Auskunft geben, ob die einmolekulare Schmierschicht fest genug haftet, um den Kontaktdruck bei Ruhe zu tragen. Ein Aber ist, daß wohl bei jeder Messung der gute Einschleifzustand verlorengeht, und daß derartige Messungen eine ziemliche Strapase für das Lager bedeuten können.

Zum Schluß eine kleine Bemerkung zu einer Mitteilung des Hrn. Prof. Heidebroek während der Diskussion. Hr. Heidebroek erwähnte, daß man bei Schmierfilmmessungen es als

1) R. Holm und B. Kirschstein, Wiss. Veröff. a.d. Siemenswerken 15, H.1, 122 (1936). Eine Ergänzung hierzu erscheint im Frühjahr 1939.

ein Anzeichen der metallischen Berührung betrachtet, wenn der Kontakt elektrisch leitend wird. Diese Vorstellung kann sehr trügerisch sein; teils können leitende Körnchen vorhanden sein oder durch Durchschläge erzeugt werden, teils kann aber auch die Elektrizitätsleitung wirken, auf die ich jetzt aufmerksam machen möchte. Ich meine einen Elektronenstrom durch den Film infolge des sogenannten Tunneleffektes. Dieser Tunneleffekt besteht kurz gesagt in folgendem: Wir wissen, daß die Elektrizitätsströme in Metallen Elektronenströme sind. Daß die Elektronen sozusagen nicht aus dem Metall herausfallen, beruht darauf, daß gegen ein solches Herausfallen elektrische Kräfte wirken. Befinden sich nun zwei Metallstücke sehr nahe beieinander, doch ohne sich zu berühren, so sind diese Kräfte nur wenig geschwächt und wären also an und für sich noch fähig, die Elektronen fest zu halten. Da aber die Elektronen (nach de Broglie-Schrödinger) Wellennatur haben, so haben sie ebenso wie das Licht die Fähigkeit, über die Grenzen der Materie um kleine Strecken hinauszuschließen, die die Größenordnung der Elektronenwelle haben. Die Elektronen können deswegen von Metall zu Metall überspringen, wenn die Metalle nahe genug beieinander sind. Genauere Berechnungen hierüber haben Holm und Kirschstein ¹⁾ ausgeführt. Unter Voraussetzung einer Austrittsarbeit in der Größenordnung von 4 bis 5 Vol kann der Tunneleffekt mächtige Ströme befördern bei Metallentfernungen von

¹⁾R. Holm und B. Kirschstein, Z. techn. Phys. 16, 488, (1935).

weniger als etwa 6 \AA ($= 6 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$). Nun ist es allerdings wahrscheinlich, daß die Austrittsarbeit vom Metall in das Öl bedeutend kleiner ist. Wenn sie die Größenordnung 1 Volt hätte, so würde sich der überbrückbare Abstand auf etwa 15 \AA vergrößern. Hiermit ist angedeutet, daß es sehr wohl möglich ist, daß der Tunneleffekt eine Elektrizitätsleitung durch den Schmierfilm besorgt, ohne daß der Schmierfilm in Wirklichkeit verletzt ist.

Es sieht vielleicht eigentlich aus, daß ich alle diese Bemerkungen mache, ohne das Interesse dafür zu zeigen, die betreffenden Messungen selbst auszuführen. Das Interesse wäre schon vorhanden, aber meine sonstigen Aufgaben bei Siemens müssen vorangehen. Ich kann mich selbst solchen Messungen wie den erwähnten garnicht widmen.

oooooooo

205

Vertrauliche Mitteilung Nr 9

*für die Mitglieder der Arbeitsgruppe „Schmiertechnik“
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI*

B e r i c h t

über die Sitzung der Arbeitsgruppe "Schmierstoffe"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 4. März 1945 in Berlin, Ingenieurhaus

Vertrauliche Mitteilung Nr. 9

für die Mitglieder der Arbeitsgruppe "Schmierstoffe"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI

Zu beachten: Eine Veröffentlichung auch von Auszügen
oder Teilen des Berichtes, sowie Weiterleitung an Perso-
nlichkeiten ausserhalb des Dienstbereiches des Empfän-
gers bedarf der Genehmigung der Geschäftstelle des
Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

Verein Deutscher Ingenieure

Berlin NW, 7, 18
Ingenieurhaus

Sitzungsbericht

Fachausschuss für Maschinenelemente

Arbeitsgruppe: Schmiertechnik

Sitzung am 4. März 1943, 9 Uhr

Ort: Berlin NW. 7, Ingenieurhaus

Verhandlungsleiter: Hr. Prof. Dr. Ing. E. Heidbrook

Anwesend die Herren:

Bartel, Dr.

KWI, Bln-Dahlem, Faradayweg 4-6

Fritz, Reg. Rat Dipl.-Ing. (Gast)

PTR, Bln-Charlbg., Werner-Siemens-Strasse

Halder, Dipl.-Ing. (Gast)

Leunawerke, Mannheim, Otto-Becker-Str. 12

Holm, Dr.

SSW, Bln-Siemensstadt

Klemencic, Dozent, Dr. Ing. habil. (Gast)

T.H., Graz, Kopernikusgasse

Kluge, Reg. Rat Dr.

PTR, Bln-Charlottenburg

Kobitzsch, Dr.-Ing. (Gast)

StMPA, Bln-Dahlem, Unt. d. Eichen

Kramer, Reg. Rat Dr. (Gast)

PTR, Bln-Charlottenburg

Morghen, J., Dr. techn. Dipl.-Ing. (Gast)

DVL, Bln-Adlershof

Philippovich, A. von, Dr.

DVL, Bln-Adlershof

Prandtl, Dir. Prof. Dr.-Ing.

KWI, für Strömungsforschung, Göttingen, Böttinger-Str. 6-8

Siebel, Präsident, Prof.

StMPA, Bln-Dahlem, Unt. d. Eichen 87

Vogelpohl, Dr.-Ing. (Gast)

KWI, f. Strömungsforschung, Abt. Reibungsforschung, Berlin NW. 87, Franklinstr. 27-29

Wolf, Dir. Prof. Dr.

Institut f. physik. Chemie d. Univ. Halle, Mühlpforte 1

Zorn, Dr.

Ammoniakwerk Merseburg, Leunawerke

Verhindert:

Pfender, Dr.

AEG, Forschungsinstitut, Berlin-Oberschöneweide, Wilhelmshof-Strasse 76-77

Stuart, Prof. Dr.

Technische Hochschule, Dresden, Bismarckplatz

Thiessen, Prof. Dr.

KWI, f. physik. Chemie u. Elektrochemie, Bln-Dahlem, Faradayweg 4-6

MULTIFILM

Hr. Heidebroek begrüsst als Obmann der Arbeitsgruppe die Mitglieder und heisst die anwesenden Gäste willkommen. Dann gibt er einen kurzen Überblick über die Aufgaben der Arbeitsgruppe Schmierertechnik des Fachausschusses für Maschinenelemente. Ursprünglich wurde die Arbeitsgruppe gegründet um den an der Forschung unmittelbar beteiligten Herren Gelegenheit zu geben, ihre Arbeitserfahrungen und Ergebnisse auszutauschen, zu sichten und zusammengefasst zu veröffentlichen. Die Arbeitsberichte, die dazu dienten, anzuregen und die Arbeiten zu klären und zu fördern, wurden bis zum Kriege in Sonderdrucken des Fachausschusses niedergelegt. Es sind 8 - 9 dieser Hefte erschienen. Der Krieg mit seinen verschärften Geheimhaltungsvorschriften liess den Gedankenaustausch und die Veröffentlichungen zurückgehen. Hr. Prof. Heidebroek gibt der Hoffnung Ausdruck, dass als Ergebnis der heutigen Sitzung das eine oder andere Referat veröffentlicht werden könne. Im vorigen Jahr wurde keine Sitzung abgehalten, da die DVL eine grosse Sitzung durchgeführt hatte. Die Ergebnisse dieser Sitzung liegen nun in einem Bericht vor.

Herr Kluge, PTR, Berlin, berichtet über
Schmiermittel- und Werkstoffuntersuchungen
im Zustand der Grenzschmierung.

Die schmieretechnischen Forschungsarbeiten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt erstreckten sich vorwiegend auf die Untersuchung von Schmiermitteln und Werkstoffen im Zustand der Grenzschmierung. Gemäss der bei früherer Gelegenheit getroffenen Vereinbarung 1) wird als Grenzschmierung ein Zustand verstanden, wo der Schmiervorgang hinsichtlich Reibung und Verschleiss durch hydrodynamische Wirkungen nicht beeinflusst wird. Es handelt sich vielmehr bei der Grenzschmierung um einen reinen Grenzflächenvorgang, bei dem die Schmierung durch Grenzflächenwirkungen zwischen dem Schmiermittel und den Lagerwerkstoffen bestimmt ist. Untersuchungen im Grenzschmierungszustand sind eine notwendige Ergänzung zur Bestimmung der Schmiermittelzähigkeit, die als einzige Stoffeigenschaft für den hydrodynamischen Schmiervorgang massgebend ist. Durch eine Auswahl von Versuchsergebnissen der genannten Arbeiten soll gezeigt werden, welche Folgerungen aus Grenzschmierungsmessungen für den technischen Schmiervorgang gezogen werden können. Eine besondere Bedeutung haben diese Folgerungen für die bekannten Massnahmen, die bisher zur Verminderung des Verschleisses im technischen Betrieb angewandt wurden. Weiterhin wird gezeigt, welche Rolle hierbei das Schmiermittel bzw. der Werkstoff spielt.

Die Untersuchungen wurden sämtlich an einer in der Reichsanstalt entwickelten Prüfeinrichtung durchgeführt, bei der ein stiftförmiger Probekörper auf einer umlaufenden ebenen Scheibe gleitet, und bei der die Werkstoffabtragung des Probekörpers (Stiftverkürzung) und die Reibungskraft zwischen Probekörper und Scheibe bestimmt wird. Einzelheiten über die

1) Tagung über Betriebsstoff-Fragen in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt am 11./12. Dezember 1941.

Prüfeinrichtung wurden bei früherer Gelegenheit
 Vergleichende Reibungs- und Abnutungsversuche
 reinen Metallen auf einer Stahlscheibe durchgeführt.
 Feststellung, dass sich die untersuchten Metalle
 untereinander hinsichtlich der Reibungs-
 schmierungsbedingungen hinsichtlich der Reibungs-
 untereinander wesentlich mehr unterscheiden als
 der Reibungszahl (vgl. Bild 1 und Bild 2).

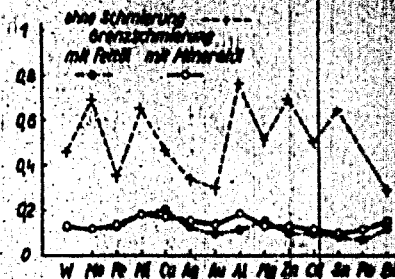


Bild 1: Reibungszahlen beim Gleiten auf Stahlfläche.
 Versuchsfläche: Stahl Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
 Rauigkeit d. Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm Last: 0,58 kp
 Temperatur: 20°C Druck: 70 kp/cm²
 Gleitgeschwindigkeit: 7 cm/s

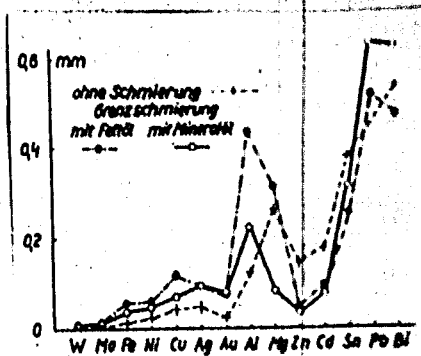


Bild 2: Werkstoffabtragung beim Gleiten auf Stahlfläche.
 Versuchsfläche: Stahl Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
 Rauigkeit d. Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm Last: 0,58 kp
 Temperatur: 20°C Druck: 70 kp/cm²
 Gleitgeschwindigkeit: 4,7 cm/s
 Gleitweg: 25 m

2) Vortrag Kluge bei DVL-Tagung am 11./12. Dezember 1941.

Auch die unterschiedliche Wirkung eines Schmiermittels kommt bei der Messung der Werkstoffabtragung weit mehr zum Ausdruck als bei der Reibungsmessung. Die sich hieraus ergebende Folgerung, dass die bei Grenzschmierung ermittelte Werkstoffabtragung auch für den technischen Schmiervorgang von grösserer Bedeutung ist als die ebenfalls unter Grenzschmierungsbedingungen bestimmte Reibungszahl, konnte durch weitere Untersuchungen der Reichsanstalt bestätigt werden. Die Messungen der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung ergeben ferner die neuartige Beobachtung, dass die Werkstoffabtragung bei Fettschmierung nahezu für alle Metalle grösser als bei Mineralölschmierung und diese teilweise grösser als bei technisch trockener Gleitfläche ist. Auf die seit langem bekannte Erscheinung, dass die Grenzreibungszahl einer geschmierten Gleitfläche wesentlich kleiner ist als bei trockener Gleitfläche (s. Bild 1), soll im Rahmen der vorliegenden Ausführungen nicht näher eingegangen werden. Sie ist für die erkenntnismässige Durchdringung des Gleitvorganges sicher wichtig, aber bei der technischen Schmierung wahrscheinlich von untergeordneter Bedeutung. Die Frage der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung soll daher im Folgenden bevorzugt behandelt werden.

Es wird zunächst gezeigt, wie die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung durch das Schmiermittel beeinflusst wird und welche Folgerungen daraus auf das Verhalten des jeweiligen Schmiermittels bei dem technischen Schmiervorgang gezogen werden können. Dabei ist zu beachten, dass sich der technische Schmiervorgang, soweit er mit Verschleiss verbunden ist, überwiegend unter Teilschmierungsbedingungen abspielt. Gemäss der oben erwähnten Vereinbarung wird als Teilschmierung dabei ein Zustand verstanden, bei dem Bereiche mit Grenzschmierungsbedingungen und solche mit hydrodynamischen Schmierungsbedingungen nebeneinander bestehen, d.h. die Belastung steht z.T. mit hydrodynamischen Teildrücken im Gleichgewicht und zum Teil wird sie in fester Berührung aufgenommen. Die Beanspruchung des Werkstoffes und damit auch sein Verschleiss wird somit umso kleiner sein, je grösser der hydrodynamische Schmierungsanteil ist. Dieser hydrodynamische Schmierungsanteil kann aber unter gegebenen Betriebsbedingungen (Konstruktion, Werkstoff, Druck, Geschwindigkeit usw.) wesentlich beeinflusst werden, und zwar ist der hydrodynamische Schmierungsanteil umso grösser, je grösser die Zähigkeit des Schmiermittels ist.

Dieser Zusammenhang konnte durch Vergleichsuntersuchungen an reinen zusatzfreien Kohlenwasserstoffölen verschiedener Zähigkeit unter Teilschmierungsbedingungen bzw. unter Grenzschmierungsbedingungen bestätigt werden. Bei den Teilschmierungsuntersuchungen handelt es sich hierbei um Verschleissmessungen, die im Technischen Prüfstand Oppau, I.G.Ludwigshafen³⁾ an einer dort entwickelten Prüfeinrichtung durchge-

3) Bericht des Techn.Prüfstandes Oppau Nr.478 v.10.10.1941:
"Ein Gerät zur Prüfung der Schmierfähigkeit von Ölen durch Bestimmung des Verschleisses" von Halder.

führt wurden. Die Grenzschmierungsversuchungen der Reichsanstalt durchgeführt. Sie erstreckte sich auf die Bestimmung der Werkstoffabtragung, und zwar bei dem Werkstoffpaar, den gleichen Schmiermitteln und der Temperatur wie bei den Versuchen der I.O. Ausserdem ein Ester in die Vergleichsuntersuchungen einbezogen. Zähigkeitwerte der untersuchten Öle sind in der Tabelle des Bildes 3 zusammengestellt.

Z a h l e n t a f e l l e

Bezeichnung des Öles	Zähigkeit in cSt bei			
	0°C	20°C	50°C	100°C
H 8	587	154	36	9
H 16	1476	325	68	16
H 32	4080	775	158	33
H 88	16850	2365	325	48
H 140	31300	4349	518	56
E 426	742	147	29	6

Bild 3: Zähigkeitwerte der für die vergleichenden Verschleissmessungen verwendeten Öle.

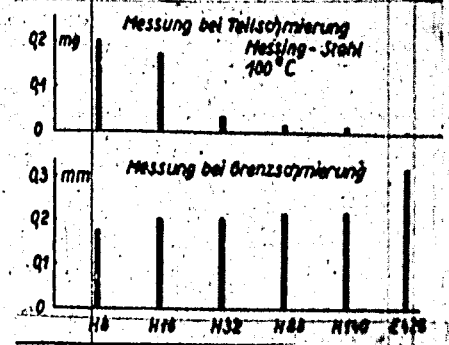


Bild 4: Werkstoffabtragung bei Grenz- und Teilschmierung

Probekörper: Messingstift Stiftdurchmesser: 0,6 mm
 Versuchsscheibe: Stahl Last: 0,78 kp
 Rauigkeit der Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm Druck: 276 kp/cm²
 Temperatur: 100°C Gleitgeschwindigkeit: 3,9 cm/s
 Gleitweg: 40 m

Aus den in Bild 4 dargestellten Versuchsergebnissen erkennt man, dass der Verschleiss unter Teilschmierungsbedingungen bei dem Oel H 140 mit der grösseren Zähigkeit wesentlich kleiner ist als bei dem Oel H 8. Im Gegensatz dazu nimmt die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung mit der Zähigkeit eher etwas zu. Bemerkenswert ist ferner das Ergebnis, dass der Ester E 426 einen wesentlich kleineren Verschleiss bei Teilschmierung ergibt als das Oel H 8, obwohl beide Oele nahezu die gleiche Zähigkeit haben. Die entsprechenden Grenzschmierungsuntersuchungen dagegen ergeben für den Ester E 426 eine wesentlich grössere Werkstoffabtragung als für das Oel H 8.

Die Vergleichsmessungen mit den Oelen H 8 bis H 140 beweisen somit, dass das Verschleissverhalten dieser Oele durch den der Zähigkeit entsprechenden hydrodynamischen Schmierungsanteil bedingt ist, denn das Grenzflächenverhalten dieser Oele ist auf Grund der Grenzschmierungsuntersuchungen praktisch als gleichwertig anzusehen. Das unterschiedliche Verschleissverhalten des Esters E 426 und des Oeles H 8 dagegen muss in Uebereinstimmung mit den bereits früher mitgeteilten Anschauungen 4) allein auf das unterschiedliche Grenzflächenverhalten dieser beiden Stoffe zurückgeführt werden. Hiernach wird bei der unter Grenzschmierungsbedingungen ermittelten Werkstoffabtragung eine zusätzliche chemisch-mechanische Wirkung des Schmiermittels auf den Gleitflächenwerkstoff mitgemessen. Es ist anzunehmen, dass der untersuchte Ester bei den unmittelbar an der Gleitfläche herrschenden Temperaturen und Drucken z.T. in seine Säure- und Alkoholkomponente zerfällt. Es bilden sich dann die entsprechenden Oleate oder Alkoholate, die sich leichter abtragen lassen als der chemisch unveränderte Werkstoff, so dass eine erhöhte Werkstoffabtragung entsteht. Diese zusätzliche chemisch-mechanische Werkstoffabtragung beeinflusst selbstverständlich auch den Teilschmierungsvorgang, indem sie an den Stellen fester Berührung für eine mehr oder weniger schnelle Werkstoffabtragung sorgt. Das führt zu einer Glättung der Gleitfläche und damit bei gegebener Zähigkeit des Schmiermittels zu einem grösseren hydrodynamischen Schmierungsanteil und zu einem kleineren Verschleiss. Auf diese Weise lässt sich jedenfalls das günstige Verschleissverhalten des genannten Esters zwanglos erklären. Durch entsprechende Untersuchung der Reichsanstalt an zahlreichen anderen Schmiermitteln konnte gezeigt werden, dass der vorstehend beschriebene Zusammenhang zwischen der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung und zwischen dem Verhalten bei Teilschmierung offenbar allgemeingültig ist. Die bei Grenzschmierung beobachtete Werkstoffabtragung stellt daher ein ausgezeichnetes Hilfsmittel dar, um das schmiertechnische Verhalten eines Schmiermittels für den Zustand der Teilschmierung vorausszusagen. Es ist in diesem Zusammenhang bemerkenswert, dass durch die erwähnte Glättungswirkung nicht nur der Verschleiss, sondern auch die Reibung

4) Kluge: Neue Erkenntnisse über die Schmierfähigkeit und ihre Messung, Heft 6 der Mitteilungen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung.

57
58
59
60
61
62

EASTMAN KODAK SAFETY FILM

im Teilschmierungszustand wesentlich verändert, was zugleich der Betriebssicherheit und ebenso für den Bedarf der Gleitstelle von Bedeutung ist.

Die vorstehenden Überlegungen haben sich besonders bei der Entwicklung von synthetischen Schmierstoffen für die verschiedensten Anwendungsgebiete (Walzenöle, Schneidöle, Uhrenöle usw.) bestens bewährt. Ihre Bedeutung haben sie für die Ablösung der natürlichen Öle als Schmiermittel durch solche synthetischen Öle gewonnen. In diesem Zusammenhang ist es besonders wichtig, dass sich Ester mit dem verschiedensten Aufbau als Bestandteil von synthetischen Schmiermitteln gut bewährt. Es wird allerdings bei einem Ester möglichst sein, die gewünschte Grenzflächenaktivität und die gewünschte Zähigkeit (Kaltverhalten) miteinander in Einklang zu bringen. Man verwendet daher in den meisten Fällen ein Öl mit einem grenzflächenaktiven Zusatz. Das Grundöl hat hierbei keine Grenzflächenwirkung im obigen Sinne. Es bestimmt vielmehr die Zähigkeit des Schmiermittels und somit Träger der hydrodynamischen Schmiermittelleistung. Der Zusatzstoff dagegen bestimmt das Grenzflächenverhalten.

Ein seit langem bekannter und bewährter Zusatzstoff ist die sogen. Schwefelfaktis, wie sie besonders bei Schmiermitteln für höchste Betriebsbeanspruchungen verwendet wird. In Bild 5 ist gezeigt, wie die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung mit einem reinen Mineralöl durch einen Zusatz von Schwefelfaktis beeinflusst wird.

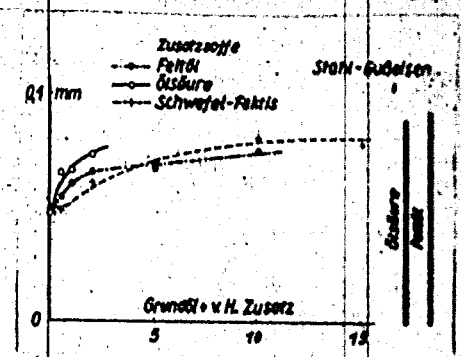


Bild 5: Wirkung von Zusatzstoffen auf Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung.

Probekörper: Stahltift
 Versuchsscheibe: Gusseisen
 Rauigkeit d. Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Temperatur: 200°C

Durchmesser des Stahltiftes: 0,6 mm
 Last: 1,3 kp
 Druck: 144 kp/cm²
 Gleitgeschwindigkeit: 4,1 cm/s
 Gleitweg: 25 m

Ausserdem sind zum Vergleich Versuche über die Zusatzwirkung von Fettöl (Spermöl) und von Oelsäure angegeben. Alle drei Zusätze verbessern das Grenzflächenverhalten des Grundöles wesentlich. Der Zusatz von Oelsäure scheidet jedoch für die meisten praktischen Aufgaben wegen der Korrosionsgefahr aus. Es ist in diesem Zusammenhang bemerkenswert, dass bei dem verwendeten Fettöl nur ein Säuregehalt von weniger als 0,1 festgestellt wurde. Dieser Säuregehalt kann somit nicht für die erhöhte Werkstoffabtragung verantwortlich gemacht werden. Es muss sich vielmehr bei dem Fettöl ähnlich wie bei dem Ester um einen mikrochemischen Vorgang handeln, der durch die Gleitbeanspruchung eingeleitet wird und der zu einer Veränderung der Gleitoberfläche führt. Auch die Schwefelreaktion wird in dieser Weise die Oberfläche verändern. Die entstehenden Oberflächenschichten wirken sich jedoch nicht nur in der erwähnten erhöhten Werkstoffabtragung aus, sondern sie verhindern gleichzeitig ein Verschweissen der aufeinander gleitenden Werkstoffe und beseitigen damit gleichzeitig die sogen. Fressgefahr.

Es ist nun auf Grund der vorstehenden Überlegungen zu vermuten, dass die bei Grenzschnierung ermittelte Werkstoffabtragung sinngemäss auch zur Erklärung des unterschiedlichen Verhaltens der Lagerwerkstoffe unter Teilschnierungsbedingungen herangezogen werden kann. Ähnlich wie nach den Erfahrungen der Reichsanstalt jeweils das Schmiermittel zu bevorzugen ist, das bei Grenzschnierung an den fraglichen Werkstoffen die grössere Werkstoffabtragung ergibt, wird sich jeweils der Werkstoff für die Verwendung als Lagerwerkstoff bezüglich seines Gleitverhaltens am besten eignen, der unter Grenzschnierungsbedingungen am meisten abgetragen wird. Mit dem Begriff des Gleitverhaltens ist damit die Fähigkeit des Werkstoffes gekennzeichnet, unter gegebenen Bedingungen eine glatte Lauffläche zu bilden, wodurch das Zustandekommen einer wenn auch nur teilweisen hydrodynamischen Schmierung gefördert wird. Hierzu kommt noch die Empfindlichkeit des Werkstoffes gegen Kantenpressung, die aber z.B. nach Buske auch durch konstruktive Massnahmen ausgeglichen werden kann. Grundsätzlich ist überhaupt festzuhalten, dass der beste Lagerwerkstoff grobe konstruktive Fehler der Gleitstelle gar nicht oder nur z.T. ausgleichen kann, ebenso kann das beste Schmiermittel Mängel des Lagerwerkstoffes nie ganz wettmachen. Konstruktion, Werkstoff- und Oelfachmann müssen jedenfalls bei schwierigen Fragen eng zusammenarbeiten.

Für die Klärung der insbesondere mit dem Werkstoff zusammenhängenden Fragen sind als technische Ergänzung zu den Grenzschnierungsuntersuchungen an anderer Stelle noch Lagerversuche vorgesehen. Vorerst soll der Grundvorgang der Werkstoffabtragung, an Hand der in Bild 2 mitgeteilten Versuchsergebnisse noch genauer untersucht werden. Zu diesem Zweck werden die in Bild 2 eingetragenen Werte für die Werkstoffabtragung mit anderen physikalischen Eigenschaften des untersuchten Metalles in Zusammenhang gebracht. Dabei interessiert besonders die Härte und der Schmelzpunkt dieser Metalle.

DEET
BND

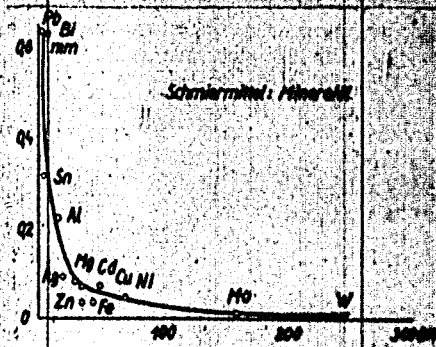


Bild 6: Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung in Abhängigkeit von der Brinellhärte.

Versuchsscheibe: Stahl
 Rauigkeit d. Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Temperatur: 20°C
 Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
 Last: 0,58 kp
 Druck: 70 kp/cm²
 Gleitgeschwindigkeit: 4,7 cm/s
 Gleitweg: 25 m

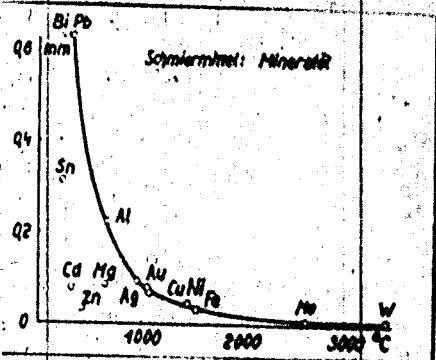


Bild 7: Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung in Abhängigkeit vom Schmelzpunkt.

Versuchsscheibe: Stahl
 Rauigkeit d. Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Temperatur: 20°C
 Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
 Last: 0,58 kp
 Druck: 70 kp/cm²
 Gleitgeschwindigkeit: 4,7 cm/s
 Gleitweg: 25 m

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen, dass eine gewisse Abhängigkeit von der Härte und vom Schmelzpunkt besteht, ohne dass von einer wirklichen Gesetzmässigkeit gesprochen werden kann. Auffallend ist die Beobachtung, dass sich die nicht kubisch kristallisierenden Metalle am wenigsten in die dargestellte Schmelzpunktabhängigkeit einfügen. Aus der Abhängigkeit der Werkstoffabtragung von der Härte und von dem Schmelzpunkt ergeben sich nun für die Beanspruchung des Lagerwerkstoffes oder Schmiermittels bei dem Schmiervorgang bzgl. des wirklichen Druckes und der Temperatur wichtige Folgerungen. Nach den Anschauungen von R. Holm ist die wirkliche Druckbeanspruchung einer Gleitfläche wesentlich grösser als die über die geometrische Abmessung der Druckfläche gemittelte Druckbeanspruchung, und zwar erhält man als oberen Grenzwert für die wirkliche Druckbeanspruchung die Härte des jeweils weicheren Werkstoffes des in Frage kommenden Werkstoffpaares, d.h. aber dass man bei dem Schmiervorgang im äussersten Falle mit wirklichen Druckbeanspruchungen von einigen 10 000 kp/cm² rechnen muss. Diese wirkliche Druckbeanspruchung wird selbstverständlich durch einen hydrodynamischen Schmierungsanteil mehr oder weniger herabgesetzt, was aber wiederum die besondere Bedeutung der oben beschriebenen Glättungswirkung bei dem Teilschmierungsprozess erkennen lässt. Aus dem Zusammenhang zwischen der wirklichen Druckbeanspruchung und der Härte folgt andererseits, dass die wirkliche Berührungsfläche bei Grenzschmierung um so kleiner ist, je grösser die Härte ist oder -anders ausgedrückt- härtere Gleitflächen werden sich mit weniger Rauigkeitsspitzen berühren als weichere Gleitflächen. Dabei erscheint es aber verständlich, dass der härtere Gleitkörper eine geringere Werkstoffabtragung ergibt als der weichere Gleitkörper.

Bezüglich der wirklichen Erwärmung in der Gleitfläche kann man eine ähnliche Grenzwertbetrachtung anstellen wie bzgl. des wirklichen Druckes, u.zw. ist auf Grund des Zusammenhanges zwischen der Werkstoffabtragung und dem Schmelzpunkt zu vermuten, dass die Erwärmung unmittelbar in der Gleitfläche im äussersten Falle gleich dem Schmelzpunkt desjenigen Metalles werden kann, das von den beiden Gleitflächen-Werkstoffen den niedrigeren Schmelzpunkt besitzt. Hierbei spielt jedoch im Gegensatz zu den Betrachtungen über den wirklichen Druck zusätzlich noch die Gleitgeschwindigkeit eine ausschlaggebende Rolle. So kann man durch thermoelektrische Messungen nachweisen, dass die Erwärmung unmittelbar in der Gleitfläche eines niedrig schmelzenden Metalles zunächst linear mit der Gleitgeschwindigkeit zunimmt, um schliesslich bei Erreichung des Schmelzpunktes trotz weiterer Steigerung der Gleitgeschwindigkeit nicht weiter zuzunehmen. Diese Beobachtung hat sicher auch eine allgemeinere Gültigkeit, wenn sie auch bisher für hochschmelzende Metalle nicht nachgewiesen werden konnte. Jedenfalls wird der Werkstoff und auch das Schmiermittel bei Lagerwerkstoffen mit höheren Schmelzpunkt in thermischer Hinsicht wesentlich mehr beansprucht als bei Werkstoffen mit niedrigerem Schmelzpunkt.

5) Bowden u. Ridler: Proc. Roy. Soc. (Lond.) A. 54 (1936), S. 640/656.

814

Es ist daher einzusehen, dass diese durch den Gleitvorgang bedingten Temperaturen und Drucke chemische Reaktionen zur Folge haben. Einen interessanten Beitrag zu dieser Frage gibt noch das Bild 8. Es wird dort gezeigt, dass die unterschiedliche Werkstoffabtragung beim Fettöl und beim Mineralöl in einer gewissen Abhängigkeit von dem Normalpotential der jeweiligen Metalle steht. Hiernach ist bei den edleren Metallen eine chemische Oberflächenbeeinflussung im obigen Sinne kaum zu beobachten, d.h. die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung mit dem Mineralöl oder mit einem Fettöl ist nahezu gleich.

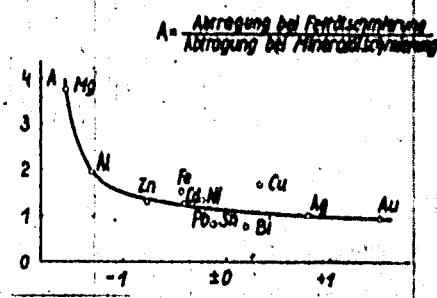


Bild 8: Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung und Normalpotential der Metalle.

Versuchsscheibe: Stahl Durchmesser der Stiftprobe: 1mm
 Rauigkeit d. Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm Last: 0,58 kp
 Temperatur: 20°C Druck: 70 kp/cm²
 Gleitgeschwindigkeit: 4,7 cm/s
 Gleitweg: 25 m

Die vorstehenden Versuche haben deutlich gezeigt, dass es sich bei der technischen Schmierung, soweit sie nicht rein hydrodynamisch bedingt ist, mehr oder weniger um einen Grenzflächenvorgang handelt. Dementsprechend ist auch der Oberflächenzustand der Gleitfläche von grosser Bedeutung. Es wurde schon bei früherer Gelegenheit ⁶⁾ über Reibungsmessungen im Zustand der Grenzschmierung bei verschiedener Rauigkeit der Gleitfläche berichtet. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Reibung im Zustand der Grenzschmierung ausser von der auf den Gleitflächen ruhenden Last auch von der Rauigkeit praktisch nicht beeinflusst wird. Diese Tatsache steht im Einklang mit dem Coulombschen Gesetz, denn dieses macht über

6) Vortrag Bochmann bei DVL-Tagung am 11./12. Dezember 1941.

die Abhängigkeit der Reibungszahl von der Belastung und von der Rauigkeit keine besondere Annahme. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei der Werkstoffabtragung unter Grenzschmierungsbedingungen. Hierbei ist ebenso wie bei der technischen Schmierung ein Einfluss der Belastung und auch ein Einfluss der Rauigkeit vorhanden, wenn auch auf Grund der bisherigen Messergebnisse noch kein genaues Bild über diese Einflüsse vorliegt. Dieses gegensätzliche Verhalten der Reibung und Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung spricht zusätzlich dafür, dass die Werkstoffabtragung für den technischen Schmierungsvorgang, soweit er nicht rein hydrodynamisch bedingt ist, eine weit grössere Bedeutung hat als die bei Grenzschmierung ermittelte Reibung. In diesem Zusammenhang ist ferner die Frage nach dem kristallinen Zustand der Gleitoberfläche von Wichtigkeit. So muss z.B. die Existenz der sogen. Beilbyechicht einmal genauer überprüft werden. Neuere Untersuchungen, die von Kramer nach völlig neuartigen Verfahren in der Reichsanstalt durchgeführt werden, versprechen in dieser Richtung eine endgültige Klarstellung.

Der Oberflächenzustand von Gleitflächen wird nun vielfach praktisch durch galvanische Vorbehandlung verändert. Es sei nur auf die verschiedenen Beizverfahren, wie phosphatieren usw. verwiesen. Eine grosse Rolle spielt ferner das Verfahren der Hartverchromung. Die Versuche der Reichsanstalt erbrachten hierzu einen interessanten Beitrag. Bei vergleichenden Gleituntersuchungen von Stahl- und Gusseisenproben an unverchromten oder hartverchromten Stahlflächen konnte gezeigt werden, dass die Werkstoffabtragung unter Grenzschmierungsbedingungen bei der Gusseisenprobe im Zusammenwirken mit einer hartverchromten Stahlfläche am grössten ist (Zahlentafel in Bild 9). Offenbar ist die Anpassung einer Gusseisenprobe an eine hartverchromte Stahlfläche besonders gut. Damit lassen sich die guten Erfahrungen mit hartverchromten Zylinderbuchsen in Flugmotoren im Zusammenwirken mit gusseisernen Kolbenringen zwanglos erklären. Es kommt hierbei praktisch darauf an eine möglichst grosse Lebensdauer der Zylinderbuchsen zu erreichen, wobei man allerdings eine grössere Abnutzung des Kolbenringes in Kauf nehmen muss. Das aussergewöhnliche Gleitverhalten von Gusseisen auf einer hartverchromten Stahlfläche lässt es zweckmässig erscheinen, auch die Verwendung dieser Werkstoffpaarung für Gleitlager erneut zu überprüfen. Die vielfach sich widersprechenden Erfahrungen mit gusseisernen Lagerschalen dürften z.T. darauf zurückzuführen sein, dass bei diesen Versuchen mehr oder weniger Kantenpressung vorgelegen hat, die naturgemäss von einer gusseisernen Lagerschale nicht ausgeglichen werden kann.-

Zusammenfassung:

Es wird über Grenzschmierungsuntersuchungen an Schmiermitteln und metallischen Werkstoffen berichtet. Dabei wird gezeigt, dass die bei Grenzschmierung ermittelte Werkstoffabtragung für den technischen Schmierungsvorgang von besonderer Bedeutung ist. Auf Grund solcher Messungen kann z.B. das schmiertechnische Verhalten eines Schmiermittels für den Zu-

stand der Teilschmierung sowohl hinsichtlich der Reibung (Leistungsbedarf) als auch hinsichtlich des Verschleisses (Lebensdauer und Betriebssicherheit) vorausgesagt werden. In jedem Falle ist das Schmiermittel vorzuziehen, das unter Grenzschmierungsbedingungen die grössere Werkstoffabtragung ergibt. In ähnlicher Weise kann voraussichtlich die unterschiedliche Werkstoffabtragung für die Bewertung von Lagerwerkstoffen hinsichtlich ihres Gleitverhaltens herangezogen werden. Hierzu kommen selbstverständlich noch andere Eigenschaften, wie z.B. die Empfindlichkeit des jeweiligen Lagerwerkstoffes gegen Kantenpressung, die Wechselfestigkeit usw. Die genauere Untersuchung der Werkstoffabtragung ergibt einen gewissen Zusammenhang mit der Härte und dem Schmelzpunkt des jeweiligen Metalles. Hieraus folgt, dass der wirkliche Druck und die wirkliche Temperatur unmittelbar in der Berührungsfläche sehr hohe Werte annehmen kann. Es kann daher mit grosser Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass zwischen dem Schmiermittel und dem Lagerwerkstoff chemische Reaktionen eintreten, die zu einer erhöhten Werkstoffabtragung führen. Es erscheint ferner verständlich, wenn ein Fettöl oder ein Ester unter Grenzschmierungsbedingungen eine grössere Werkstoffabtragung ergibt als ein Mineralöl bzw. wenn ein solcher chemischer Schmiermitteleinfluss bei unedlen Metallen besonders gross ist. Über die weiteren sich hieraus ergebenden Folgerungen soll später berichtet werden. Sie werden z.Zt. durch Untersuchungen an Schmiermitteln mit chemisch definierter Zusammensetzung und an Legierungen überprüft.-

Z a h l e n t a f e l

Probekörper	Stiftverkürzung des Probekörpers in 10^{-3} mm		
	bei Mineralölschmierung	bei Fettölschmierung	ohne Schmierung
Versuche mit unverchromter Stahlscheibe Härte $H_m = 220 \text{ kp/mm}^2$; Rauigkeit $3 \cdot 10^{-3}$ mm			
Stahlstift	20	22	24
Gusseisenstift	23	25	23
Versuche mit hartverchromter Stahlscheibe Härte $H_m = 1200 \text{ kp/mm}^2$; Rauigkeit $2 \cdot 10^{-3}$ mm			
Stahlstift	15	16	21
Gusseisenstift	800	800	800

B i l d 9:

Stiftdurchmesser: 0,6 mm Temperatur: 20°C
 Last: 0,7 kp Gleitgeschwindigkeit: 3,7 cm/s
 Druck: 250 kp/cm^2 Gleitweg: 25 m

Hr. Heidebroek dankt Hrn. Kluge für seine Ausführungen und bittet die Firmen, die Öle zur Verfügung zu stellen, auch die Zusammensetzung anzugeben, da es für Analysen den Instituten an Zeit fehlt.

Dr. Holm, SSW, Berlin, spricht über

"Reibung und Verschleiss, besonders über den Einfluss von Rauigkeiten in der Grenzreibung."

Gehalten im Fachausschuss für Maschinenelemente der Arbeitsgruppe Schmiertechnik im Ingenieurhaus Berlin, den 4. März 1943.

Herr Vogelpohl hat gewissen Forschern vorgeworfen, dass sie bei Überlegungen über die Epilamenreibung zu wenig darauf eingehen, was die Unebenheiten der Oberfläche bewirken. Diese Frage ist tatsächlich unvollständig diskutiert worden. Was ich jetzt vorzutragen habe, zeigt allerdings, dass die Unebenheiten häufig erstaunlich wenig ins Gewicht fallen. Wir fangen mit einigen grundlegenden Begriffen und Tatsachen an.

I. Die Grösse der tragenden Kontaktfläche.

Durch eine grosse Anzahl von Messungen habe ich eindeutig folgendes bestätigt erhalten. Wenn praktisch (nicht ideal) glatte Körper mit der Druckkraft P (Kontaktlast) in Kontakt gebracht werden, so wird unabhängig von der Grösse der scheinbaren Berührungsfläche (gleich Überlappungsfläche) die wirkliche tragende Kontaktfläche F so klein, dass der Druck in die Grössenordnung der Härte H fällt, nämlich:

$$P = F \frac{H}{n}, \quad (1)$$

wobei $n = 1$ für stark gekrümmte, $n = 2$ für jungfräuliche praktisch ebene, sowie $2 < n < 4$ für einigermaßen eingeschlifene ebene Kontakte ist.

II. Reibungsarbeit ist nicht Abbröckelarbeit.

Ein Schleifkontakt mit rein metallischen Oberflächen sei charakterisiert durch: $P = 1000 \text{ g}$, $\mu = 1$, $n = 2$, $H = 10^7 \text{ g/cm}^2$ (gleich 100 Brinell). Dann ist die momentane Kontaktfläche:

$$F = \frac{10^3}{5 \cdot 10^6} \text{ cm}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2.$$

Die gesamte Breite der Schleifspur ist, wenn F aus ν Teilflächen besteht, etwa $\sqrt{\nu F}$. ν hat die Grössenordnung einige bis 20. Wenn wir $\nu = 4$ setzen, so entspricht das den Umständen der PTR-Messungen¹⁾. Die Breite wird also $3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$. Mit dem Gleitweg 1 cm wird die Fläche $3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ überstrichen. Würde nun die Reibungsarbeit A_r nur dadurch entstehen, dass von dieser Fläche eine gewisse Deckschicht abgehoben wird, so wäre A_r so gross wie die Verdampfungsenergie A_d einer einmolekularen Schicht, also im Falle von Eisen:

1) Kluge, Bochmann und Eicke.

$$A_r = A_d = 0,03 \cdot 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot 7,8 \cdot 2100 = 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ cal,}$$

wo $1,4 \cdot 10^{-8}$ die Schichtdicke, 7,8 die Dichte und 2100 cal die Verdampfungswärme ausmachen.

Aus den Reibungsmessungen ergibt sich aber:

$$A_r = \mu P s = 1000 \text{ gcm} = 0,024 \text{ cal,}$$

d.h. 3500 mal grösser als A_d . Wenn die Abbröckelung nur an Teilflächen von F stattfindet, so wird die Diskrepanz noch schärfer, also:

Eine eventuelle Abbröckelungsarbeit spielt für die Reibung eine zu vernachlässigende Rolle.

Hiermit ist gewissermassen das Urteil über die Bedeutung der Unebenheiten schon gefällt. Immerhin ist einiges hinzuzufügen. Zuerst müssen wir erklären, wie denn die Reibung fester Körper wirklich zu denken ist. Die Antwort muss wesentlich so lauten, wie ich die betr. Reibung in § 37 D meines Buches über elektr. Kontakte geschildert habe.

Bild (1)

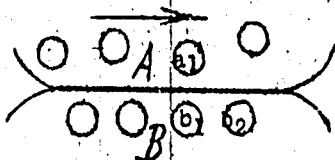


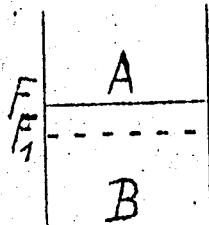
Bild (1) zeigt die Kontaktglieder A und B mit Oberflächenatomen a...bzw.b... a_1 und b_1 stehen im Augenblick einander gegenüber. a_1 schiebt beim Weitergleiten b_1 ein Stück mit sich, bis plötzlich ihre Verbindung bricht und a_1 für kurze Zeit mit b_2 eine neue Verbindung eingeht. b_1 (später ebenso b_2 usw.) pendelt in seine Gleichgewichtslage zurück, wobei seine Versorgungsenergie in Wärme umgesetzt wird. Diese Wärme ist die Reibungsarbeit.

Zwar ist die von b_1 so umgesetzte Energie kleiner als die Verdampfungsenergie von b_1 , kleiner also als die beim Abbröckeln einmal an der Verbindung $a_1 b_1$ auszuführende Arbeit (aber kaum um Grössenordnungen kleiner); aber auf 1 cm Gleitweg fallen grössenordnungsgemäss 10^8 Schritte von Atom zu Atom. Derart oft wiederholt b_1 die Energieumsetzung; darum wird die Reibungsarbeit soviel grösser als die Verdampfungswärme. Es ist leicht einzusehen, dass die Reibungsarbeit nach dieser Erklärung proportional zum Weg s , proportional zur Grösse der wirklichen Kontaktfläche F und unabhängig von der Geschwindigkeit v wird.

In Flüssigkeiten sind die Atome nicht an Gleichgewichtslagen gebunden. Bei laminarer Bewegung ist die eigentliche Reibung verschwindend klein. Nur weil Impulse an die angrenzenden Schichten durch Atomstösse übertragen werden, entsteht eine Art Reibung, die hier infolge der Abhängigkeit von Impuls proportional zur Geschwindigkeitsdifferenz der sich treffenden Moleküle wird.

III. Reibung und Verschleiss.

Bild (2)



Wir kehren zurück zur Reibung & festen Körper und suchen ihre Beziehung zum Verschleiss. Wir betrachten das folgende Beispiel. Zwei Körper A und B mit rein metallischen Oberflächen gleiten gegeneinander. Ihre Form und gegenseitige Lage sei die des Bildes (2). Die ganze Fläche F sei eine metallische Kontaktfläche, d.h. die Körper haften in ihr, als ob sie fest zusammenhängen. Dann ist es gemäss der obigen Erklärung offenbar gleichgültig für die Reibung, ob das Gleiten in der ursprünglichen Kontaktfläche F oder z.B. in F_1 stattfindet, sogar gleichgültig, ob das Gleiten z.T. in F und z.T. in F_1 geschieht. Die Arbeit je cm Gleitung ist in F und F_1 dieselbe, und das Gleiten des A gegen B verteilt sich auf z. addierende Strecken in F und F_1 . Sind beide Flächen wirksam so tritt das neue hinzu, dass aus B das Stück zwischen F u. F_1 verschliffen wird. Die Scherkraft in F (bzw. F_1) ist gleich F mal der Scherfestigkeit des Metalles, welche rund halb so gross wie die Härte ist.

Nun liegt der Einwand nahe, warum eine Fläche wie F_1 überhaupt als Gleitfläche in Frage kommt. Besonders Smekal hat klargestellt, dass die Körper der Natur nicht ideal homogen sind, sondern sogen. Fehlstellen enthalten. Es ist nun durchaus möglich, dass eine Fläche F_1 durch Fehlstellen schwächer als die ursprüngliche Kontaktfläche F wird und deswegen die Rolle der Gleitfläche übernimmt.

In Wirklichkeit wird der Verschleiss durch Brechmomente befördert. Sie können sich allerdings nur dann auswirken, wenn sich A gelegentlich von B etwas hebt, wenn also der Kontakt zittert. Ein grosser Verschleiss ist fast immer mit Unregelmässigkeiten in der Bewegung und in der Reibungskraft verbunden.

IV. Schleiffläche mit Höckern.

Wir denken uns eine Schleifbahn, die bis zu einem gewissen Einschleifen tätig gewesen ist. Die schönen Messungen der PTR von Kluge und seinen Mitarbeitern haben gezeigt, dass der Verschleiss in Luft bald ganz winzig werden kann, auch wenn kein Schmiermittel vorliegt. Er bleibt z.B. bei der Grössenordnung einer halben Atomschicht je Passage des Läufers. In diesem Zustand muss die Form der Oberfläche einer Tafelberglandschaft ähnlich sein. Alle Höcker enden in einem ebenen Plateau, welches durch Canons zerschnitten ist. Dieses Plateau ist die Gleitfläche. Nur anfangs werden Höcker abgebrochen; das bedeutet dann einen grossen anfänglichen

Verschleiss. Das Plateau wird zur Gleitfläche verbessert, weil es durch eine Oxyd- oder Sauerstoffhaut seine Härte abgeschwächt bekommen hat. Das schwache Haften bedingt natürlich eine Verkleinerung der Reibungszahl, nämlich auf $1/3$ bis $1/5$ des Betrages bei reinen Metalloberflächen.

V. Die Epilamenreibung.

Jetzt möge der eben beschriebene abgeschliffene Kontakt geschmiert sein. Eine Epilamenschicht haften an jedem Kontaktglied. Wie ändert sich hierdurch Reibung und Verschleiss? Da die Höcker nicht mehr durcheinander greifen, können wir vom Abbröckeln absehen. Die Reibung sinkt gegenüber rein metallischen Oberflächen um eine reichliche Zehnerpotenz. Der Verschleiss braucht sich aber nicht viel zu ändern, er wird nicht unendlich klein. Nun kommt aber etwas merkwürdiges. Die Reibungskraft sinkt gegenüber dem rein metallischen Kontakt um etwa denselben Faktor, unabhängig von der Härte des Metalles. Dies bedeutet, dass die spezifische Reibungskraft mit Epilamen an harten Stahl eine Zehnerpotenz grösser wird als die spezifische Reibungskraft an weichen Aluminium. Das Epilamen definiert also nicht eine eigene spezifische Reibungskraft, sondern nur einen Faktor, mit dem diese verkleinert wird.

In meinem Buche § 37 B habe ich versucht, diese Eigentümlichkeit durch die Annahme zu erklären, dass die Epilamenmoleküle je nach dem Druck mehr oder weniger tief zwischen einander einsinken. In selben Masse sollte sich die spezifische Reibungskraft ändern. Diese Hypothese sieht leider ziemlich "ad hoc" aus.

Darum habe ich kürzlich eine andere Erklärungsmöglichkeit durchgerechnet. Ich nahm an, dass das Epilamen an gewissen Höckern der Kontaktoberfläche verletzt wird, so dass dort metallischer Kontakt entsteht. Wenn nun die Reibung des Epilamens selbst sehr klein ist und die metallischen Berührungsfächen etwa 10 % von der ganzen Kontaktfläche ausmachen, dann wäre die Verminderung des μ zu $\mu/10$ erklärlich, und man würde auch begreifen, warum die Festigkeit des Metalles massgebend wird, denn die Reibungsarbeit wäre ja eine Scherarbeit an Höckern dieses Metalles. Die Annahme einer so streng definierten Fläche der Verletzungen des Epilamens unter sehr verschiedenen Umständen, z.B. einmal in Plattenkontakten, einmal in Kreuzdrahtkontakten, dann an verschieden harten Metall, diese Annahme ist aber so reichlich "ad hoc", dass sie kaum überzeugender wird als die vorige. Die ältere Annahme ist mir heute wieder sympathischer. Ich stelle beide Hypothesen zur Diskussion.

VI. Der Verschleiss während der Epilamenreibung.

In der PTR sind schon eine grosse Anzahl Messungen des Verschleisses an etwas eingeschliffenen Kontakten mit Epilamenreibung ausgeführt worden. Meine ältere Messung passt durchaus in diese Reihe hinein. Es handelt sich um einen Verschleiss von 0,3 bis 1,0 Atomschichten je Läuferpassage. Dies ist so wenig, dass ein Abbrechen von Höckern gar nicht in Frage kommt. Die Unebenheiten spielen also hier keine

Rolle mehr. Ein Verschieben der Schleiffläche in die Kontaktglieder hinein kommt auch nicht in Frage, sondern man muss sich wohl denken, dass Atome der Oberfläche locker werden und ab und zu in Häufchen mitgerissen werden. Ob dieses Lockern chemisch durch das Epilamen vorbereitet wird, lasse ich dahin.

VII. Zusammenstellung von Verschleissmessungen.

Zum Schluss zeige ich eine Tabelle mit Verschleissmessungen, nur um an die Grössenordnungen zu erinnern. Als Einheit dient die Atomschicht je Läuferpassage.

Tabelle:

Kontaktart	Verschlossene Atomschichten je Läuferpassage	Bemerkungen
Fe gegen Fe	800	in trockener Luft
Pt " Pt	100	" " "
St 60 " St 60	2400	" " "
St 60 gegen Cu	3 11	" " "
Fe gegen WM	3 35	" " "
Ni St gegen St 60	14 28	" " "
PTR - Kontakte	0,4	trocken
Kontakt mit Epilamen	0,3...1,0	geschmiert

Die Tabelle demonstriert, wie stark verschieden der Verschleiss werden kann. Wenn er viele Atomschichten beträgt, so besteht er sicherlich im Abbröckeln von Körnern. Liegt er in der Grössenordnung einer Atomschicht oder weniger, so dürfte der Vorgang wesentlich andersartig sein; vermutlich besteht er dann -wie gesagt- in einer Abtragung von Lockeratomen. Man vergleiche die Tabelle (39,04) in meinem Buche.

SAFETY FILM

222

Hr. Heidebrook dankt Hrn. Holm und schlägt vor, nach Vorliegen schriftlicher Unterlagen über den Bericht zu diskutieren. Er bedauert, dass noch keine genauen Messmethoden für das Ausmessen sehr kleiner Rauigkeiten vorhanden ist. Hr. Bartel weist darauf hin, dass die im KWI für physikalische Chemie und Elektrochemie entwickelte Elektronenstrahl-Messmethode in etwa einem halben Jahr ausgearbeitet sein wird.

Prof. Dr.-Ing. E. H e i d e b r o c k VDI, I.H., Dresden, spricht über:

- a) Reibungsmessungen bei kleinsten Geschwindigkeiten,
- b) Tragfähigkeit von Sinterlagern mit und ohne Ölspur.

Beitrag zur Diskussion über die hydrodynamische Schmierung.

Als Beitrag zu der Aussprache in der Fachgruppe "Schmier-technik" und zu dem von Herrn Prof. P r a n d t l vorgelegten Schriftsatz möchte ich zunächst folgendes bemerken:

- 1) Es trifft nicht zu, dass die Messungen an solchen Lagerprüfmaschinen "praktisch wertlos" sind, bei denen das Reibungsmoment an der Lagerschale und nicht an der Welle gemessen wird. Wie die hydrodynamische Theorie beweist, verschwindet der Unterschied zwischen der an der Welle und der Lagerschale gemessenen Reibungszahl, wenn bei kleinen Geschwindigkeiten bzw. grossen Lasten, d.h. im Gebiet der Mischreibung gemessen wird, d.h. der Zapfenmittelpunkt annähernd unter der Senkrechten durch die Schalenmitte liegt. Bekanntlich ist der Unterschied zwischen dem Reibungsmoment an der Welle und dem an der Lagerschale gleich dem Produkt aus der äusseren Last mal der Verlagerung der Zapfenmitte senkrecht zur Lastebene. Bei grösserer Belastung und kleinen Zapfengeschwindigkeiten ist der Verlagerungswinkel α_0 (siehe Anlage) sehr klein; der Zapfen liegt praktisch unter der Lastriechtung und die seitliche Verlagerung quer dazu wird praktisch = Null. Es ist also gleichgültig, wo man misst. Die Messungen im Gebiet der Grenzreibung sind aber gerade für die Grenze der Tragfähigkeit massgebend, da dieser Betriebszustand der kritische ist und nicht der einer starken Verlagerung, der einer schlechten Ausnutzung der Lagertragfähigkeit gleichkommt.
- 2) Das Reibungsmoment bzw. die daraus errechnete Reibungszahl an der Lagerschale zu messen, ist auch dann immer zweckmässig und notwendig, wenn es sich darum handelt, die Einwirkungen des Reibungsvorganges auf die Lagerschale, d.h. den Lagerwerkstoff zu untersuchen bzw. den Einfluss des jeweiligen Schmierstoffs in der Grenzzone. Hier ist also die bequemere Art des Messens an der Lagerschale ohne weiteres vorzuziehen.
- 3) Die rechnerische Erfassung der Druckfähigkeit neben der Temperatur-Abhängigkeit ist von Herrn Dr. V o g e l p o h l nicht zuerst durchgeführt, sondern u.a. vorher in einer grundlegenden Arbeit meines früheren Mitarbeiters, jetzigen Prof. an der T.H.München W. P o p p l e r bereits klarge-

114

legt. Die Arbeit konnte wegen ihres Umfangs bisher nicht gedruckt werden; es ist in Aussicht genommen, sie baldmöglichst wenigstens auszugsweise zu veröffentlichen.

Im übrigen spielt in der angelsächsischen Literatur die Bedeutung der Druckfähigkeit als ein Versuch, die sogenannten "oiliness" zu erklären, schon seit Jahren eine grosse Rolle (vgl. die Berichte der Inst. of Mech. Eng. "Lubrication and Lubricants" von 1937).

- 4) Über den wirklichen Sinn der sogenannten "Reibungszahl" im hydrodynamischen Gebiet bestehen noch vielfach Unklarheiten. Die Reibungskraft (daher auch die Reibungszahl) ist das Integral der über den Zapfenumfang hin stark wechselnden Schubspannungen, und zwar

- a) an der Welle
- b) an der Lagerschale

gerechnet. Der Verlauf der τ -Werte ist an beiden verschieden (siehe Anlage), demnach auch das Integral, also das Reibungsmoment.

Dadurch ergibt sich aber, dass die Reibungszahl einmal eine Funktion der geometrischen Form ist, d.h. des Zapfenradius, der Geschwindigkeit, des Lagerspiels (Schiefungszahl), sodann der physikalischen Grösse der Zähigkeit. Diese Verhältnisse sind in der Forschungsarbeit R u m p (VDI-Forschungsheft 393) völlig klargestellt und durch viele Versuche belegt.

Für die Praxis ist die Ermittlung der Wellenreibung, d.h. des Energie-Aufwandes an der Welle völlig bedeutungslos.

Dagegen spielt sie eine Rolle für die Wärmebilanz eines Lagers. Der geringe Unterschied der beiden Drehmomente (siehe oben) wird aber völlig überdeckt von den Einwirkungen der Oberflächen-Rauhigkeit, der Affinität zwischen Öl und Lagerwerkstoff, der chemischen Struktur des Schmierstoffes und seinem thermischen Verhalten, Einflüsse, die von einer viel höheren Grössenordnung sind als jener. Das gilt besonders für die kritischen Zustände hoch belasteter Lager.

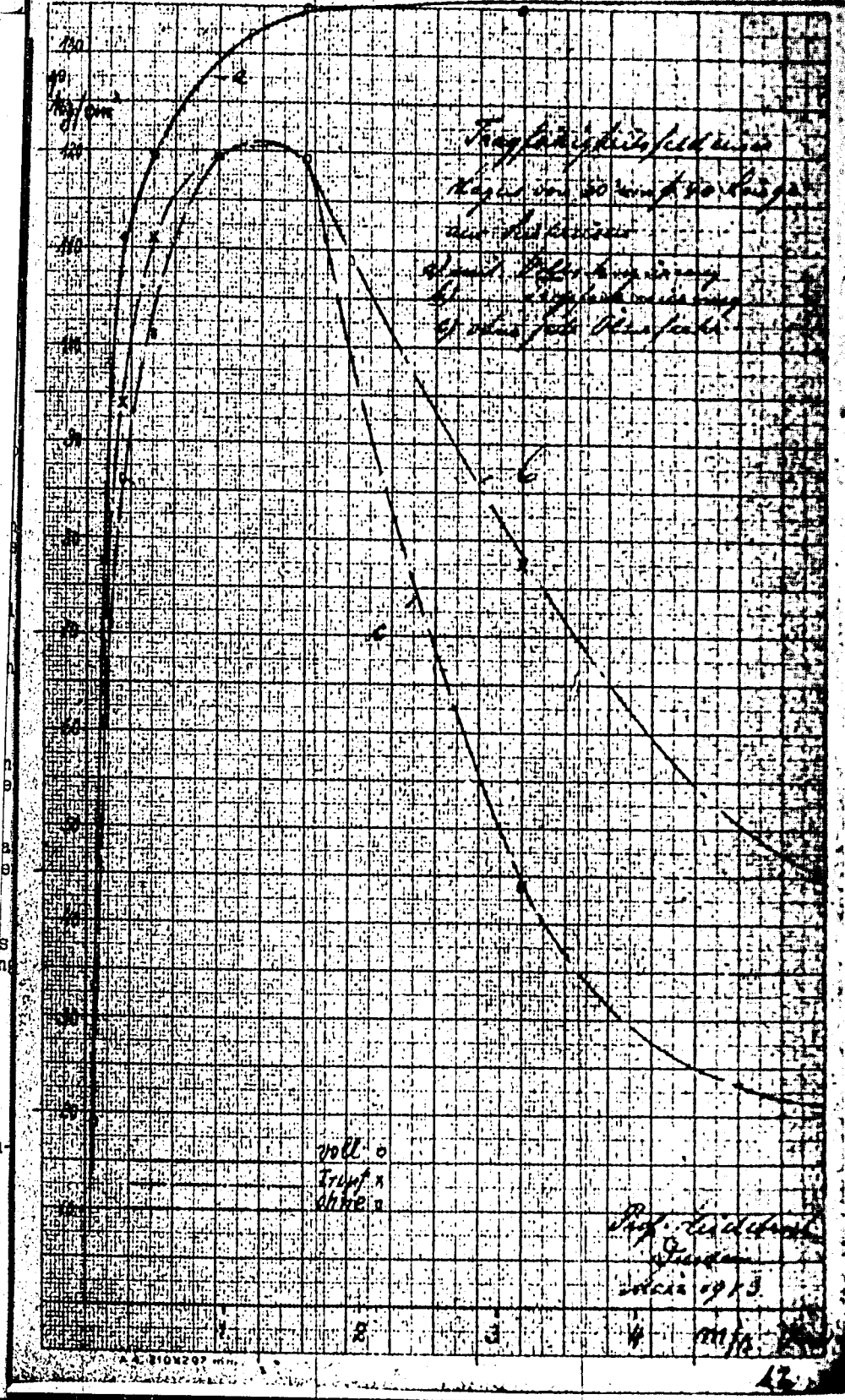
Gemessene Reibungszahlen sind daher immer an die geometrisch-konstruktive Form gebunden und nicht ohne weiteres vergleichsfähig, sofern nicht der Form-Faktor durch geringste Grössen-Abmessungen in den Hintergrund gerückt wird (Apparat der P.T.R.; Versuche von Dr. Holz etc.). Hier ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten und dazu ist auch die hydrodynamische Theorie noch weiter zu entwickeln. Es liegt hier aber ausgesprochene Verschleissreibung vor.

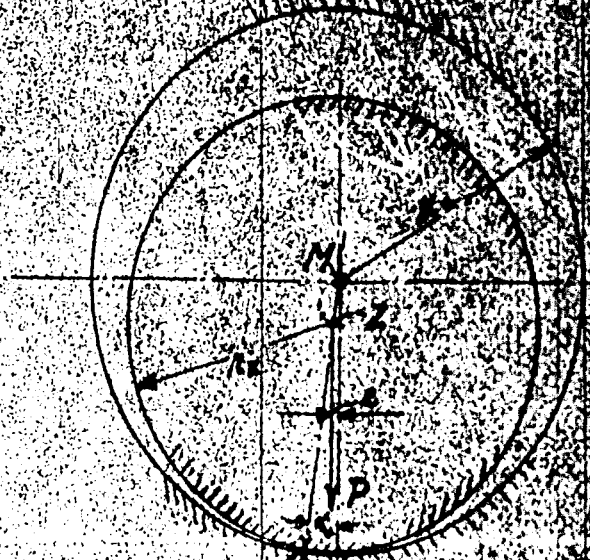
Die Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden sind aber als Vergleichswerte unter sich wertvoll, wenn jedesmal unter genau gleichen Bedingungen gearbeitet wird.

- 5) Für die Praxis ist die Frage der Betriebsicherheit die allein ausschlaggebende. In vielen hochbeanspruchten Lagern muss das Lager über die hydrodynamisch errechenbare Ölmenge hinaus mit Kühlöl unter hohem Eintrittsdruck

294

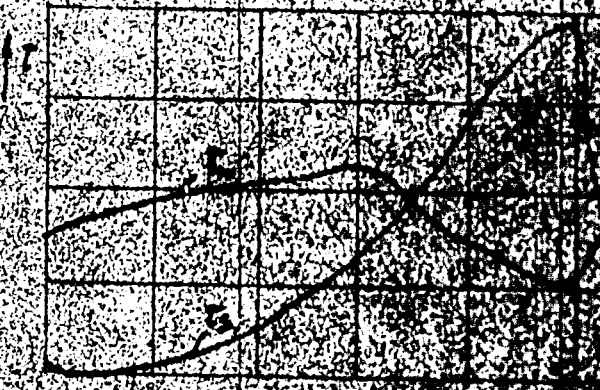
295





Kontinentaler Staat

Verlauf der Schubkräfte an Hölzer und Metall



Experimentelle Ergebnisse

überspült werden, da das Öl der allein wirksame Wärmeträger ist und die Ölmenge danach bemessen werden muss, um bei seiner gegebenen spezifischen Wärme die erzeugte Menge koal. abführen zu können. Diese Wärmebilanz wird häufig vernachlässigt.

Die Wärmebilanz eines Lagers bzw. die Vorausbestimmung der Temperatur wird aber immer dann unsicher, wenn die durch Leitung und Strahlung abgegebene Wärmemenge nicht sicher zu erfassen ist. Das ist aber immer dann der Fall, wenn nicht die Ölkühlung der allein wirksame Wärmeträger ist. Aber auch in diesem Falle geht ein beachtlicher Teil der an der Welle aufgebrauchten Energie in der kinetischen Energie des herausgepressten Öles verloren, tritt also nicht als fühlbare Wärme der Schmierstelle in Erscheinung.

Verein Deutscher Ingenieure
Ausschuss für Maschinenelemente
Fachgruppe Schmiertechnik

- 1) Bericht über die Messungen an Lagerschalen aus Hartmetallen (Sinterlager) mit geringer oder fehlender Ölzufuhr von E. H e i d e b r o e k - Dresden.

Über sogen. öllöse Lager aus Sintermetallen liegen bisher noch wenige systematische Versuche vor. Aus einer grösseren Versuchsreihe mit Lagerschalen aus Sinterstein verschiedener Körnung und Porosität wurde festgestellt, dass die Tragfähigkeit je nach der Zusammensetzung von Körnung und Porosität stark verschieden ausfällt, dass aber gewisse Kombinationen ohne jede Ölzufuhr bei vollkommen stationärem Zustand stundenlang laufen können und dabei ohne Ölzufuhr oder Strömung Tragfähigkeiten bis 120 kg/cm^2 im Bereich kleinerer Geschwindigkeiten bis etwa $2,5 \text{ m/sec}$ dauernd aufnehmen können. Bei höheren Geschwindigkeiten fällt die Tragfähigkeit nach einer hyperbolischen Kurve asymptotisch gegen einen Endwert $p_{\text{max}} = 20 \text{ kg/cm}^2$ ab (siehe Anl.).

Im beigefügten Diagramm sind die erreichten maximalen Lagerbelastungen p über den zugeordneten Zapfengeschwindigkeiten aufgetragen. Andere Metallkombinationen ergeben ein weit begrenzteres Tragfähigkeitsfeld. Die Temperaturen liegen dabei durchweg sehr niedrig.

Die Versuche werden fortgesetzt, um die günstigsten Kombinationen von Körnung und Porosität festzustellen. Der Fachgruppe wird vorgeschlagen, in eine Diskussion darüber einzutreten, wie man sich den Mechanismus eines solchen Schmiervorganges, bei dem praktisch in unbegrenzt langer Zeit kein Öl dem Lager zugeführt wird, physikalisch oder mechanisch erklären kann.

- 2) Bericht über Reibungsmessungen bei kleinsten Zapfengeschwindigkeiten.

Über die von Herrn Dr.-Ing. T r ä n k n o r bei der Fa. Fried. Krupp A.G., Essen, durchgeführten Versuche wird kurz berichtet. Ein ausführlicher Bericht erscheint in Kürze im nächsten Heft der "Forschung" im VDI-Verlag.-

Hr. Kluge schlägt vor, in die Versuche H-Öle und Ester einzubeziehen und bittet um Ueberlassung einer kleinen Probe der Sintermetalle, um zu erkennen, ob Zusammenhänge vorhanden sind. Obwohl Hr. Heidebrück Bedenken hat, dass die Stifte sehr verschieden ausfallen werden, je nachdem sie quer oder längs herausgeschnitten werden können, wird er der PIR eine Probe überlassen.

Prof. Dr. Siebel, StMPA, Berlin-Dahlem, berichtet über:

I. Der Temperaturverlauf bei Verschleissversuchen mit grosser Flächenpressung.

Bei der Prüfung des Verschleissverhaltens von Werkstoffpaaren unter gleitender Reibung wird die auftretende Reibungsarbeit an der Gleitfläche in Reibungswärme umgesetzt, die vor allem in das Innere der Prüfkörper abströmt. Die Prüfkörper erwärmen sich dabei in umso höherer Masse, je grösser die an den Gleitflächen erzeugte Reibungsarbeit ist. Die auftretenden Temperaturen vermögen dementsprechend insbesondere bei Trockenlauf-Versuchen mit grossen Flächenpressungen und Gleitgeschwindigkeiten beachtliche Werte anzunehmen, die nicht ohne Rückwirkungen auf das Verschleissverhalten der der Prüfung unterworfenen Werkstoffpaarung bleiben. Zur richtigen Deutung der Verschleisserscheinungen ist daher eine eingehende Untersuchung der Temperaturverhältnisse bei der Verschleissprüfung erforderlich. Es besteht dabei einmal die Möglichkeit, den Temperaturverlauf an den Gleitflächen messend zu verfolgen oder durch eine entsprechende Berechnung der jeweiligen Temperaturverteilung in den Prüfkörpern die gewünschten Aufschlüsse zu gewinnen.

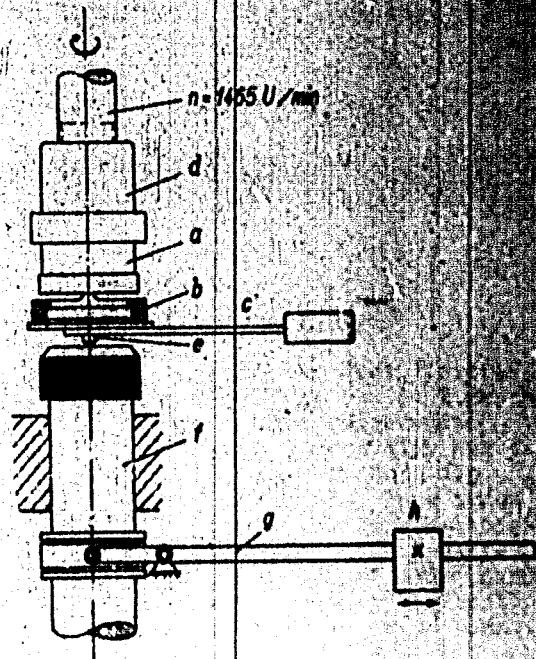
Bei den im folgenden behandelten Trockenlauf-Verschleiss-Versuchen wurde eine Prüfanordnung gem. Abb. 1

benutzt. Die Abmessungen der Probekörper sind in Abb. 2 dargestellt.

Anordnung der Verschleißproben

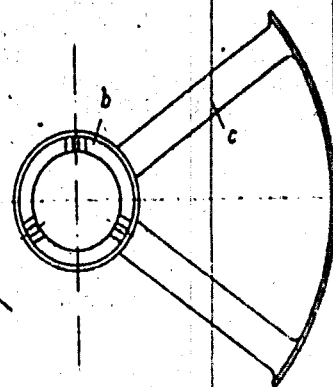
25x

- a Gegenprobe
- b Stahlprobe
- c unterer Probenhalter mit Vorrichtung zur Messung des Drehmomentes
- d oberer Probenhalter
- e Spitzenlagerung
- f verschiebbare Spindel
- g Belastungshebel
- h Längsgewicht



Draufsicht auf die untere Probe mit der Vorrichtung zur Messung des Drehmomentes

Drehrichtung der oberen Probe



zum Pendel

Kraftmessung

230

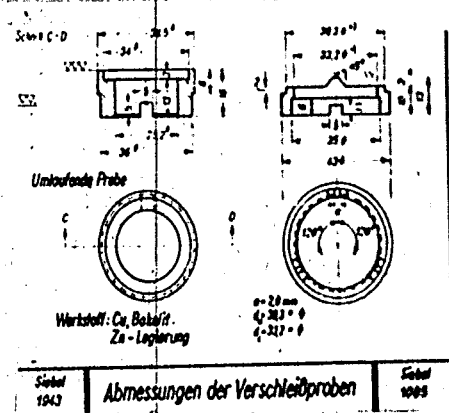
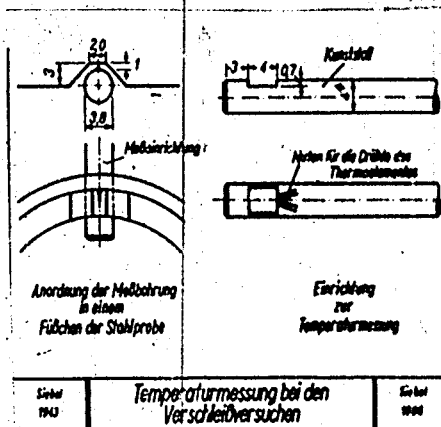


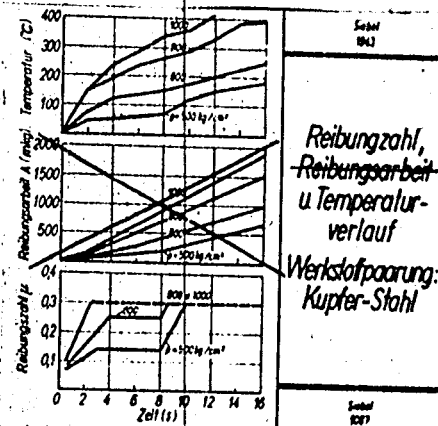
Abb. 2

Wie die Abbildung erkennen lässt, besitzen die drei Gleitflächen der unteren ruhenden Probe nur eine Länge von je 2 mm. Bei einer Breite der ringförmig ausgebildeten umlaufenden Probe von 2,25 mm berühren sich die beiden Proben also nur auf einer Fläche von $3 \times 2 \times 2,25 = 13,5 \text{ mm}^2$, so dass die Möglichkeit bestand, die Flächenpressung auf über 1000 kg/cm^2 zu steigern. Die Versuche wurden mit einer Gleitgeschwindigkeit von 3,12 m/s durchgeführt und erstreckten sich jeweils über etwa 16 s. Die Prüfkörper waren dabei an den Enden durch eine Pappschicht gegenüber der Einspannvorrichtung isoliert. Der stillstehende untere Probekörper bestand bei allen Versuchen aus einem schwachlegierten Cr-Mo-Stahl, der auf eine Härte von 300 kg/mm^2 vergütet worden war. Bei Versuchsreihe I wurden umlaufende Probekörper mit Kupfer, bei Versuchsreihe II aber Gegenkörper aus der Zinklegierung Z 410 mit einem Al-Gehalt von 4 % und einem Cu-Gehalt von 1 % verwendet. Eine weitere Versuchsreihe III wurde mit Gegenkörpern aus Kunstharz (Bakelit) durchgeführt.

Bei den Versuchen wurden die auftretenden Reibungskräfte und der Temperaturverlauf in der Nähe der Gleitfläche an dem stillstehenden unteren Prüfkörper gemessen. Die Bestimmung der Reibungskräfte erfolgte mit einer Drehmomentenwaage. Die untere Probe war hierzu gem. Abb. 1 drehbar auf einer Spitze gelagert, wobei das Drehmoment über einen Segmenthebel auf ein Pendel übertragen wurde, dessen Auslenkung alsdann dem auftretenden Drehmoment entsprach. Störende Schwingungen in der Messeinrichtung wurden durch eine geeignete Dämpfung ausgeschaltet. Der Verlauf des Drehmoments wurde bei dem Versuch fortlaufend registriert. Die Temperaturmessung erfolgte mittels eines Thermo-Elements, das in der in Abb. 3 dargestellten Weise in einer in radialer Richtung verlaufenden Bohrung in 1 mm Abstand von der Gleitfläche angebracht war.

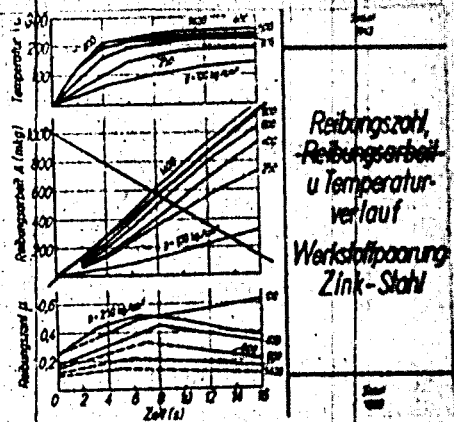


Die Ergebnisse der Messungen sind in den Abb. 4 - 6 dargestellt. Wie Abb. 4



erkennen lässt, ergeben sich für die Reibungszahl bei dem Werkstoffpaar Kupfer-Stahl nach kurzem Lauf Werte, die über $\mu = 0,3$ liegen. Die auftretenden Reibungskräfte wurden dabei so gross, dass die Messeinrichtung nicht mehr ausreichte. Die Temperatur an den Gleitflächen stieg im Laufe des ganzen Versuchs stetig an und erreichte umso höhere Werte, je grösser die Flächenpressung gewählt wurde. Bei einer Flächenpressung von 1000 kg/cm^2 überschritt die Temperatur an der Messstelle dabei bereits nach 12 s Laufzeit 400° . An den Gleitflächen muss noch mit wesentlich höheren Temperaturen gerechnet werden. Bei diesen Temperaturen ist bereits mit einer starken Erweichung des Kupfers und damit auch mit einer Verminderung des Verschleisswiderstandes zu rechnen, während die Eigenschaften der Stahlprobe in viel geringerem Masse beeinflusst wurden. Der Härteunterschied zwischen den beiden Werkstoffen dürfte jedenfalls bei den vorliegenden Prüfbedingungen noch wesentlich grösser sein als bei Raumtemperatur. Entsprechend trat bei den Versuchen ein Verschleiss ausschliesslich an der Kupferprobe in Erscheinung, während die Stahlseite nicht angegriffen wurde, sondern sich mit einer Cu-Schicht bedeckte.

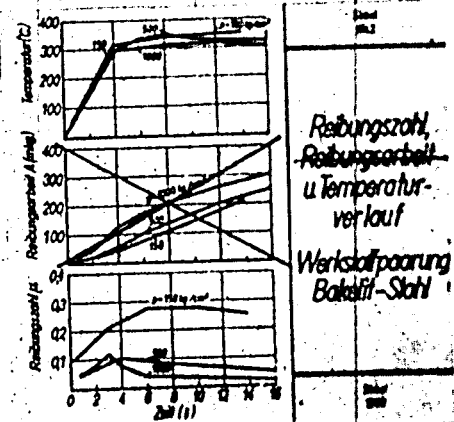
Bei der Werkstoffpaarung Zink-Stahl wurden gem. Abb. 5



Reibungszahl,
Reibungsarbeit
u Temperatur-
verlauf
Werkstoffpaarung
Zink-Stahl

bei niedrigen Flächenpressungen ebenfalls Reibungszahlen $> 0,3$ beobachtet. Mit steigender Flächenpressung tritt jedoch eine starke Verminderung der Reibungszahl μ ein. Bei $p = 1400 \text{ kg/cm}^2$ besitzt die Reibungszahl nur noch einen Wert von $0,1$ bis $0,2$. Besonders kennzeichnend ist es, dass die Reibungszahl hier im Laufe des Versuchs deutlich abfällt. Bei kleinen Flächenpressungen ($p = 100$ und 250 kg/cm^2) steigt die gemessene Temperatur in der Stahlprobe auch hier stetig an. Bei Flächenpressungen oberhalb 400 kg/cm^2 zeigen sämtliche Temperaturkurven nahezu den gleichen Verlauf. Die Temperatur an den Gleitflächen erreicht hier schnell einen oberen Grenzwert, der im weiteren Verlauf des Versuchs nicht überschritten wird. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Temperatur in 1 mm Abstand von der Gleitfläche gemessen wurde, so dass die wirkliche Gleitflächentemperatur noch beträchtlich über den gemessenen Werten liegt. Die Veranlassung ist daher naheliegend, dass die gemessene Grenztemperatur der Schmelztemperatur der Zinklegierung entspricht, die bei etwa 380° liegt. Die Herabsetzung der Reibungszahl mit steigender Flächenpressung dürfte alsdann auf das Auftreten der flüssigen Phase an den Gleitflächen zurückzuführen sein. Auch in vorliegenden Falle wurde die Stahlseite bei den Verschleißversuchen nicht angegriffen. Die Zinkprobe zeigte nach einem Verlauf mit $p = 900 \text{ kg/cm}^2$ eine Höhenabnahme von etwa $0,2 \text{ mm}$.

Die Reibpaarung Kunststoff-Stahl zeigte gem. Abb. 6



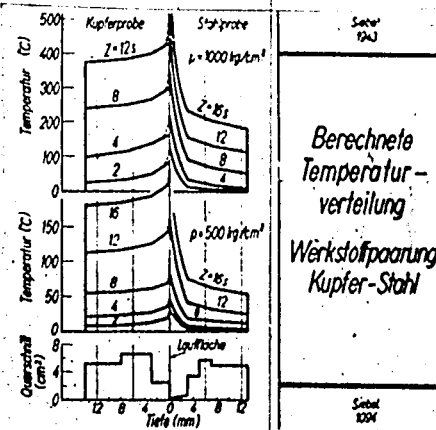
Reibungszahl,
Reibungsarbeit
u Temperatur-
verlauf
Werkstoffpaarung
Bakelit-Stahl

insbesondere bei hohen Flächenpressungen ausserordentlich niedrige Reibungszahlen. Auch hier wurde ein Absinken der Reibung im Verlauf der einzelnen Versuche beobachtet. Bei allen Versuchen wurde bereits nach 4 s ein Höchstwert der gemessenen Temperatur bei etwa 300° erreicht, wobei wiederum zu beachten ist, dass die wirkliche Gleitflächentemperatur um mindestens 100° über den gemessenen Werten liegt. Bei diesen Temperaturen dürfte an der Gleitfläche bereits eine Zersetzung des organischen Werkstoffs auftreten, wobei die gebildeten Zersetzungsprodukte die Reibungszahl herabsetzen. Naturgemäss ist hiermit eine starke Abnutzung der Bakelitprobe verbunden, die während eines Versuchs mehr als 2 mm abgetragen wird, während auf der Stahlseite auch bei Flächenpressungen von 1000 kg/cm² und darüber noch kein Verschleiss beobachtet wurde.

Das Verständnis für das Verschleissverhalten der untersuchten Reibpaarungen lässt sich noch verbessern, wenn nicht nur der Temperaturverlauf an den Gleitflächen bestimmt, sondern die gesamte Temperaturverteilung in den Probekörpern ermittelt wird. Bei Kenntnis der an den Gleitflächen in Wärme umgesetzten Reibungsleistung ist die Berechnung der Temperaturverteilung möglich. Zur Vereinfachung des Ganges der Berechnung wird dabei zweckmässig auf eine genaue Verfolgung des Temperaturverlaufs an den Querschnittsübergängen verzichtet und angenommen, dass der Wärmefluss senkrecht zur Gleitfläche erfolgt, und dass sich das Temperaturgefälle überall proportional zur durchfliessenden Wärmemenge und umgekehrt proportional zu dem zur Verfügung stehenden Querschnitt ausbildet.

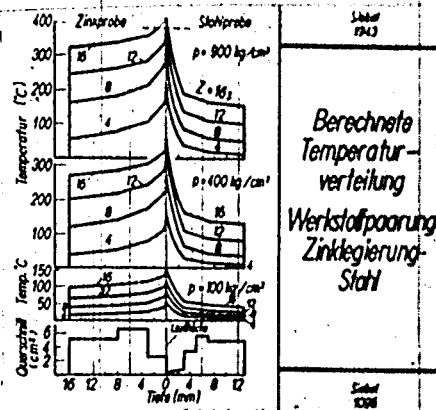
In den Abb. 7 - 9 ist die Temperaturverteilung in den Prüfkörpern in der vorstehend angedeuteten Weise ermittelt. Wie ein Vergleich mit Abb. 4 - 6 zeigt, steht der berechnete Temperaturanstieg an den Gleitflächen in befriedigender Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die letzteren in einem Abstand von 1 mm unter der Lauffläche gemessen wurden.

Für die Werkstoffpaarung Kupfer-Stahl ist gem. Abb. 7



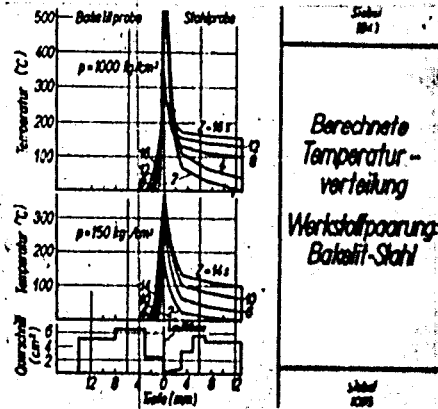
der verhältnismässig geringe Temperaturabfall innerhalb der Kupferprobe kennzeichnend, der auf die gute Leitfähigkeit dieses Werkstoffes zurückzuführen ist. Der Temperaturunterschied innerhalb der Probe beträgt auch bei den grössten untersuchten Flächenpressungen höchstens 50°. Die Temperaturspitze an der Gleitfläche liegt je nach der Flächenpressung um 20 - 50° über der Ausgleichtemperatur. Der starke Temperaturabfall in der Stahlprobe ist vorwiegend durch die Form der Probe und den geringen Querschnitt, der an den Gleitflächen zur Abführung der Reibungswärme zur Verfügung steht, bedingt. Trotz des grossen Temperaturgefälles fliesst zu Beginn des Versuchs nur etwa 5 % der an den Gleitflächen erzeugten Wärme in die Stahlprobe ab. Gegen Ende des Versuchs steigt dieser Anteil auf etwa 20 %. Die Hauptwärmemenge wird also von der Kupfersseite der Verschleisspaarung aufgenommen. Auf die Folgen, welche die starke Erwärmung der Kupferprobe auf das Verschleissverhalten ausüben muss, wurde bereits hingewiesen.

Bei der Werkstoffpaarung Zink-Stahl (Abb. 8)



übernimmt wiederum die Zinkprobe den grösseren Teil der Reibungswärme, während auf die Stahlprobe nur ein Anteil von 15 - 30 % entfällt. Die obere Grenz-Temperatur entspricht hier der Schmelztemperatur der Zinklegierung. Zu beachten bleibt, dass diese hohe Temperatur an der Gleitfläche nur an den Stellen auftritt, an welchen die schmalen Gleitflächen der Gegenprobe angreifen. Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass durch die Schmelzwärme ein beträchtlicher Teil der Reibungswärme gebunden wird, da diese mit etwa 25 kcal/kg im Vergleich zur spez. Wärme mit etwa 0,1 kcal/kg°C verhältnismässig hoch liegt. Die Bedeutung, welche das Auftreten der flüssigen Phase hinsichtlich der Reibungsverhältnisse besitzt, wurde bei der Erörterung der Messergebnisse bereits besprochen.

Die Werkstoffpaarung Bakelit-Stahl (Abb. 9)



zeigt eine Temperaturverteilung, welche sich weitgehend von derjenigen der Werkstoffpaarung Kupfer-Stahl unterscheidet. Die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes beträgt mit

$0,56 \times 10^{-6} \text{ kcal/cm s}^\circ\text{C}$ nur etwa $1/200$ der Wärmeleitfähigkeit des Stahls ($1,25 \times 10^{-3} \text{ kcal/cm s}^\circ\text{C}$). Entsprechend stellt sich in der Kunststoffprobe ein ausserordentlich starkes Temperaturgefälle ein, trotzdem nur 6 - 16 % der Reibungswärme nach dieser Seite abfliesen. Die Wärme vermag dabei in der Versuchszeit von 16 s nur wenige Millimeter tief in die Probe einzudringen. Infolge des starken Temperaturabfalls wird die durch die hohe Gleitflächentemperatur bedingte Zersetzung des Kunststoffes sich nur auf die äusserste Oberflächenschicht beschränken. Es besteht dabei die Möglichkeit, dass die starke Verminderung der Gleitreibung, die bei höheren Flächendrücken beobachtet wurde, auf die Bildung von gasförmigen Zersetzungsprodukten zurückzuführen ist.-

II. Die Erwärmung des Ziehgutes beim Drahtziehen.

Beim Ziehen von Stangen und Drähten wird eine Erwärmung des Ziehgutes und der Ziehdüse beobachtet, die bei Anwendung grosser Ziehgeschwindigkeiten dazu zwingt, besondere Kühlrichtungen für die Ziehdüse vorzusehen¹⁾. Bei einer Ziehgeschwindigkeit von mehr als 2m/s erwärmt sich die Ziehdüse beim Ziehen von Stahldraht ohne Kühlvorrichtung auf $200 - 300^\circ$, während der auslaufende Draht an der Haspel nur eine Temperatur von etwa 100° besitzt. Da im Ziehhol die miteinander in Berührung stehenden Teile der Drahtoberfläche und der Ziehdüse bei der geringen Dicke des zwischenliegenden Schmier-

1) Pomp, A.: Stahldraht, seine Herstellung und Eigenschaften. Stahleisen-Bücher Bd.1, Düsseldorf 1941.

S
B

films praktisch die gleiche Temperatur haben müssen²⁾, weist diese Beobachtung darauf hin, dass in der Oberflächenschicht des Drahtes während des Ziehvorganges ein ausserordentlich grosses Temperaturgefälle auftritt, das sich hinter der Zieh-düse schnell ausgleicht. Die Ursache dieser Erscheinung ist darin zu suchen, dass für das Abfliessen der in der Zieh-düse entwickelten Reibungswärme bei grossen Ziehgeschwindigkeiten nur Bruchteile einer Sekunde zur Verfügung stehen, so dass die Aufnahme dieser Wärmemenge durch die Aussenschicht des Zieh-gutes nur unter Ausbildung des hohen Temperaturgefälles möglich ist.

Die Temperaturverteilung, die sich im Ziehgut während des Durchgangs durch die Zieh-düse einstellt, lässt sich mit guter Näherung berechnen. Dabei ist davon auszugehen, dass sich sowohl die eigentliche Formänderungsarbeit als auch die äussere Reibungsarbeit in Wärme umsetzt³⁾. Die Formänderungsarbeit führt zu einer Temperatursteigerung

$$t_1 = \frac{\varphi_h \cdot k_f}{A \cdot c \cdot \gamma} \quad (1)$$

wobei mit $A = 427$ mkg/kcal das mechanische Wärmeäquivalent, mit c die spezifische Wärme und mit γ das spezifische Gewicht des Zieh-gutes bezeichnet ist und wenn k_f die mittlere Formänderungs-festigkeit des Zieh-gutes und $\varphi_h = 1_n \cdot \frac{F_0}{V}$ die Formänderung des betrachteten Körperteilchens beim Durchgang durch die Düse bedeutet.

Die äussere Verlustarbeit, die durch die Reibung des Zieh-gutes in der Düsenwand entsteht, erzeugt in der Grenz-schicht zwischen Draht und Zieh-düse eine entsprechende Wärme-menge, die z.T. in den Draht, zum anderen Teil aber in die Zieh-düse abfliesst. Setzt man die je Flächeneinheit wirksame Reibungskraft gleich $\mu \cdot k_f$, so wird in der Grenzschicht bei der Ziehgeschwindigkeit v in der Zeiteinheit eine spezifi-sche Reibungsarbeit $\mu \cdot k_f \cdot v$ in Wärme umgesetzt. Falls die ganze Reibungswärme in den Draht abfliesst, muss sie an der Oberfläche des Zieh-gutes ein Temperaturgefälle erzeugen.

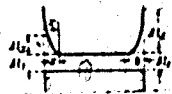
2) Eichinger, A. und W. Lueg: Mitt.K.-Wilh.-Inst. Eisen-forschung 23 (1941) S. 21/30; vgl. Stahl u. Eisen 61 (1941) S. 275.

3) Wie die Untersuchungen von A. Eichinger und W. Lueg (siehe Fussnote 2: aaO.) gezeigt haben, erfolgt die Umsetzung der Formänderungsarbeit bei Stahl zu 90 - 100 % in Wärme, wäh-rend höchstens 10 % der bei der Verformung verbrauchten Arbeit im Ziehgut als latente Energie gespeichert wird. Für die vorliegende Berechnung kann dieser Anteil vernach-lässigt werden.

49

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\mu \cdot k_{fM} \cdot v}{A \cdot \lambda} \quad (2)$$

wobei mit λ die Wärmeleitfähigkeit des Ziehgetes bezeichnet ist. Entsprechend wird sich die Oberflächenschicht um den Betrag t_a erwärmen. Nimmt man an, dass die erwärmte Zone i Abstand ℓ vom Düsen Eintritt eine Dicke b besitzt und dass i ihr eine parabolische Temperaturverteilung gemäss Bild 1



herrscht, so ergibt sich der Wärmehalt dieser Schicht je Flächeneinheit zu

$$q = \int_0^b t_x \cdot dx \cdot c \cdot \gamma = \frac{\mu \cdot k_{fM} \cdot v}{A \cdot \lambda} \cdot c \cdot \gamma \cdot \frac{b^2}{6} \quad (3)$$

Er muss der Wärmemenge

$$q = \frac{\mu \cdot k_{fM} \cdot \ell}{A} \quad (4)$$

entsprechen, die beim Durchlaufen der Ziehölse auf der Länge je Flächeneinheit in den Draht abströmt. Die Schichtdicke b ergibt sich damit zu

$$b = \sqrt{6 \cdot \frac{\ell}{v} \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}} = 2,44 \sqrt{\frac{\ell}{v} \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}} \quad (5)$$

und man erhält für die von der Reibungswärme herrührende Temperaturerhöhung an der Oberfläche des Drahtes den Wert

$$t_a = \frac{\mu \cdot k_{fM} \cdot v}{A \cdot \lambda} \cdot \frac{b}{2} = 1,22 \cdot \frac{\mu \cdot k_{fM}}{A} \cdot \sqrt{\frac{\ell \cdot v}{\lambda \cdot c \cdot \gamma}} \quad (6)$$

Bei Verwendung einer wärmeleitenden Ziehöse wird die der Reibungsarbeit entsprechende Wärmemenge q zu einem Teil durch das Ziehgut, zu einem anderen Teil durch die Ziehöse abgeleitet. Wird der erste Anteil mit $q' = m \cdot q$ und der zweite Anteil mit $q'' = n \cdot q$ bezeichnet, so ergibt sich

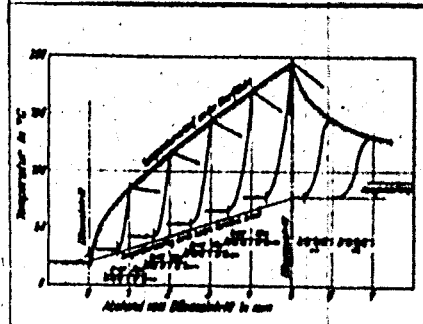
$$q = q' + q'' = m \cdot q + n \cdot q \quad (7)$$

m wird sich umso mehr dem Wert 1 nähern, je grösser die Ziehgeschwindigkeit und damit das Temperaturgefälle in der Aussenschicht des Ziehgutes wird und je geringer die Wärmeleitung durch die Ziehöse ist. Bei Ziehgeschwindigkeiten von 1 m/s und darüber dürfte m auch bei Kühlung der Ziehöse den Wert 0,8 nicht unterschreiten.

Für die Temperaturerhöhung an der Oberfläche des Ziehgutes erhält man alsdann die Beziehung

$$t = t_1 + t_2 = \frac{\varphi_h \cdot k_{r_m}}{\lambda \cdot 0,7} + 1,22 m \cdot \frac{\mu \cdot k_{r_n}}{\lambda \cdot 0,7} \cdot \sqrt{\frac{l \cdot v}{\lambda \cdot 0,7}} \quad (8)$$

In Bild 2



(Stahldraht von 1,8 mm ϕ auf ϕ mit $v = 100$ cm/s).
 Siehe 7992 Temperaturverteilung im Ziehgut beim Durchgang durch die Ziehöse. R.A. 129

ist die Temperaturverteilung dargestellt, die sich nach den vorstehend geschilderten Überlegungen beim Durchgang durch die Ziehöse in einem Stahldraht ausbildet, der mit einer Geschwindigkeit $v = 100$ cm/s von $d_0 = 0,5$ cm an $d_1 = 0,4$ cm, entsprechend $d_m = 0,45$ cm und einer Formänderung $\varphi_h = 0,44$ bei einer Düsenneigung $\alpha = 0,1$ und entsprechend $l = 5$ mm gezogen wird.

- Der Werkstoff sei durch folgende Werte gekennzeichnet:
- Mittlere Formänderungsfestigkeit. . . $k_{r_n} = 5000$ kg/cm²,
 - Spezifisches Gewicht. $\gamma = 7,8 \cdot 10^{-3}$ kg/cm³,
 - Spezifische Wärme $c = 0,115$ kcal/kg °C,

C
B

M
T
Y
F
I
L
M

Wärmeleitfähigkeit. $\lambda = 45 \text{ kcal/m}^\circ\text{C}$
 $= 0,125 \times 10^{-3} \text{ kcal/cm}$
 $\text{s}^\circ\text{C}.$

Setzt man diese Werkstoffwerte und weiterhin $\mu = 0,05$ sowie $m = 0,8$ in Gleichung (8) ein, so erhält man unter Vernachlässigung der zusätzlichen Schiebungen an den Aussenschicht des Drahtes am Ende der Ziehöse eine Temperaturerhöhung infolge der inneren Formänderungsarbeit von

$$t_1 = 2,35 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,44 \cdot 5000}{0,115 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}} = 58^\circ$$

und einen Temperaturanstieg infolge der Ziehösenreibung von

$$t_a = 2,35 \times 10^{-5} \times 5000 \times 1,22 \times 0,8 \times 0,05 \times \sqrt{\frac{0,5 \cdot 100}{0,125 \cdot 7,8 \cdot 0,115 \cdot 10^{-6}}} = 118^\circ.$$

Die gesamte Temperatursteigerung an der Oberfläche ergibt sich demnach zu

$$t = t_1 + t_a = 58 + 118 = 176^\circ.$$

Die Temperatur an der Innenseite der Ziehöse muss der Temperatur an der Oberfläche des Drahtes entsprechen. Die Dicke der durch die Reibungswärme beeinflussten Schicht lässt sich am Düsenaustritt mit Hilfe von Gleichung (5) zu

$$b = 2,44 \times \sqrt{\frac{0,5}{100} \cdot \frac{0,125}{7,8 \cdot 0,115}} = 0,65 \text{ mm}$$

errechnen.

Sobald der Draht das Ziehhol verlassen hat, hört jegliche Wärmezufuhr von aussen auf. Entsprechend wird sich an der Oberfläche des Ziehgutes das Temperaturgefälle 0 einstellen. Die in der Aussenschicht gespeicherte Reibungswärme fließt dabei in das Drahtinnere ab, bis der Temperaturengleich hergestellt ist. Die ungleichförmige Erwärmung des Ziehquerschnittes muss beim Temperaturengleich zu hohen Zugeigenspannungen in der erwärmten Aussenschicht führen, denen eine entsprechende Druckeigenspannung im weniger erwärmten Kern des Ziehgutes gegenübersteht.

Die hohen Temperaturen, die bei grossen Ziehgeschwindigkeiten an der Oberfläche des Ziehgutes auftreten, wirken sich insofern ungünstig auf die Schmierverhältnisse in der Ziehöse aus, als die Zähflüssigkeit der Schmiermittel mit steigender Temperatur in starkem Masse absinkt. Auf der anderen Seite verbessert eine hohe Ziehgeschwindigkeit das Haftvermögen des Schmiermittels am Düsenaustritt und erleichtert damit die Bildung eines geschlossenen Schmierfilms⁴⁾. Dabei wirkt es

4) Pomp, A., E. Siebel und E. Houdremont: Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. 11 (1929) S. 53/72; siehe auch Stahl u. Eisen 49 (1929) S. 561/67 (Walzw.-Aussch. 67).

50

SAFE

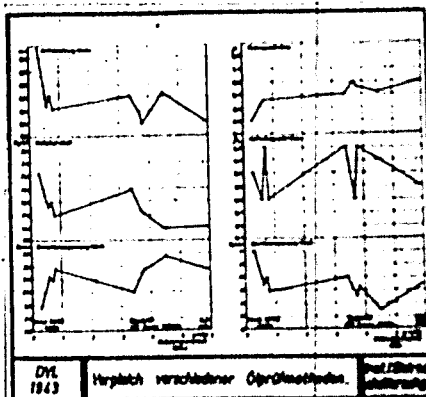
sich günstig aus, dass der Temperaturanstieg an der Deckschichtoberfläche erst in der Ziehöse einsetzt, so dass das Öl im Dülseneintritt noch eine grosse Zähflüssigkeit besitzt. Bei kleinen Querschnitten des Ziehgutes werden daher in allgemeinen trotz der Steigerung der Oberflächentemperatur in der Ziehöse bei einer Vergrößerung der Ziehgeschwindigkeit keine Anzeichen für eine Verschlechterung der Ziehverhältnisse beobachtet, obgleich der Schmierfilm alsdann gleichzeitig einer Flächenpressung von einigen tausend kg/cm² und der hohen Temperatur standhalten muss. Die Herabsetzung der Ziehgeschwindigkeit bei der Verarbeitung von grossen Querschnitten dürfte zu einem Teil deshalb erforderlich sein, weil hier infolge der absolut grösseren Länge des Ziehspaltes bei Verwendung von grossen Ziehgeschwindigkeiten sehr hohe Oberflächentemperaturen zu erwarten stehen. Im übrigen dürfte hier die im Verhältnis zum Umfang geringe Breite der geschmierten Fläche sich ungünstig auswirken, da der Schmierfilm nicht gleichmässig zum Tragen kommt.

Da die Höhe des Temperaturanstieges an der Aussenschicht und damit die Eigenspannungen proportional zur Wurzel aus der Ziehgeschwindigkeit ansteigen, besteht die Möglichkeit, bei einer Zugfolge die Eigenspannung des Enderzeugnisses dadurch zu vermindern, dass der letzte Zug mit entsprechend geringerer Ziehgeschwindigkeit durchgeführt wird.-

Hr. v. Philippovich, DVL, Berlin, sprach über:
Verschleissmessung an Kolbenringen.

In der DVL wurden im 132-Binzylinder-Prüfator eine Reihe von Flugmotorenölen auf ihre verschleissverringende Wirkung geprüft (vgl. Krienke, Ber.üb.Schmierst. Tagung d. DVL 1941, S.203), indem der Antrieb von Kolbenringen innerhalb von 6 h gemessen wurde. Damit war eine zahlenmässige Bewertung der Schmieröle bezgl. der Kolbensmierung gegeben, so dass es interessant erschien, die Werte anderer Ölprüfverfahren dazu in Beziehung zu setzen, um zu sehen, ob man nicht auch durch einfache Messungen schon genügend Unterlagen zur praktischen Beurteilung der Öle bekommt.

Die Beziehung zwischen dem praktischen Verhalten (Verschleissverringung) und verschiedenen Prüfergabnissen der Frischöle zeigt die Abb.1.



In dem Bild sind gegenübergestellt: Kolbenringverschleiss als Abszisse; dazu die Stiftabnutzung in der PTR-Maschine (Messung der PTR), die Reibungszahl in der PTR-Maschine (Messung DVL), die Haftreibungszahl in der Maschine von Wolf (Messung Wolf), die Haftarbeit (gemessen durch Adsorptionswärmen), die Grenzflächenspannung gegenüber Quecksilber und die Oberflächenspannung, alle gemessen von Wolf. Leider ordnen sich die untersuchten Oele so an, dass sie in zwei Gruppen gedrängt sind, während eines einen extremen Verschleisswert aufweist, so dass die Verbindungslinie auf längere Strecke keinen Bezugswert enthält. Eine gleichmässige Beziehung zum Verschleiss ist eigentlich nur bei den Reibungszahlen (Stahlstift auf Gusseisen) der PTR-Maschine (DVL-Messung) zu sehen, deren Genauigkeit mit etwa $+ 0,02$ anzusetzen ist. Eine Beurteilung nach diesen Messungen erscheint schwierig. Haftarbeit und Oberflächenspannung zeigen ebenso, wie die Stiftabnutzung (PTR) mit steigendem Verschleiss abnehmende Tendenz, während die Grenzflächenspannung eher zunimmt. Die Haftreibung (Wolf) ist in keine Beziehung zu dem Verschleiss zu bringen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Genauigkeit der Reibungsmessungen nicht genügt, um eine brauchbare Zuordnung von Reibungszahlen und anderen Prüfworten zu sichern; Abweichungen und Übereinstimmungen sind wohl mehr zufälliger Art. Anders ist es mit der Stiftabnutzung und den physikalischen Messungen. Man sollte annehmen, dass zum mindesten die erste eine gesetzmässige Beziehung zum Verschleiss aufwies; dies ist aber nicht der Fall. Haftarbeit, Oberflächen- und Grenzflächenspannungen sind als exakte physikalische Messungen der Praxis des Schmiervorganges soweit entfernt, dass eine eindeutige Beziehung vornehmlich nicht zu erwarten war; immerhin ist auch mit dies Vorbehalt die Streuung so gross, dass man Ursachen dafür suchen muss.

Ungenügende Beziehungen zwischen dem praktischen Kolbenringverschleiss und Prüfverfahren können - falls überhaupt ein Zusammenhang besteht - dann auftreten, wenn entweder die Prüfbedingungen von den Bedingungen der Praxis abweichen (andere Temperaturen, Geschwindigkeiten, Drücke) oder wenn während des praktischen Vorganges chemische Veränderungen eintreten, die z.B. am Kolbenring ein anderes Produkt ergeben als das Frischöl darstellt. Im vorliegenden Fall sind beide Ursachen beteiligt. Ungenügende Übereinstimmung der Versuchsbedingungen ist wohl mit ein Grund für die Abweichung der Abnutzungsversuche der PTR, während bei den physikalischen Verfahren die chemische Veränderung des Oeles im Betrieb verantwortlich sein wird. Diese chemische Veränderung ist ja vielfach beobachtet worden und spielt allgemein beim Schmiervorgang eine grosse Rolle. Hier sei nur auf zwei Erscheinungen hingewiesen: bei Höchstdruckschmiermitteln ergaben im Betrieb auf den Oberflächen unter Umständen Überzüge von Eisenoxyd oder von Bleisulfat, die beide nur unter Mitwirkung des Luftsaauerstoffes entstanden sein können, der also in dem Schmier-

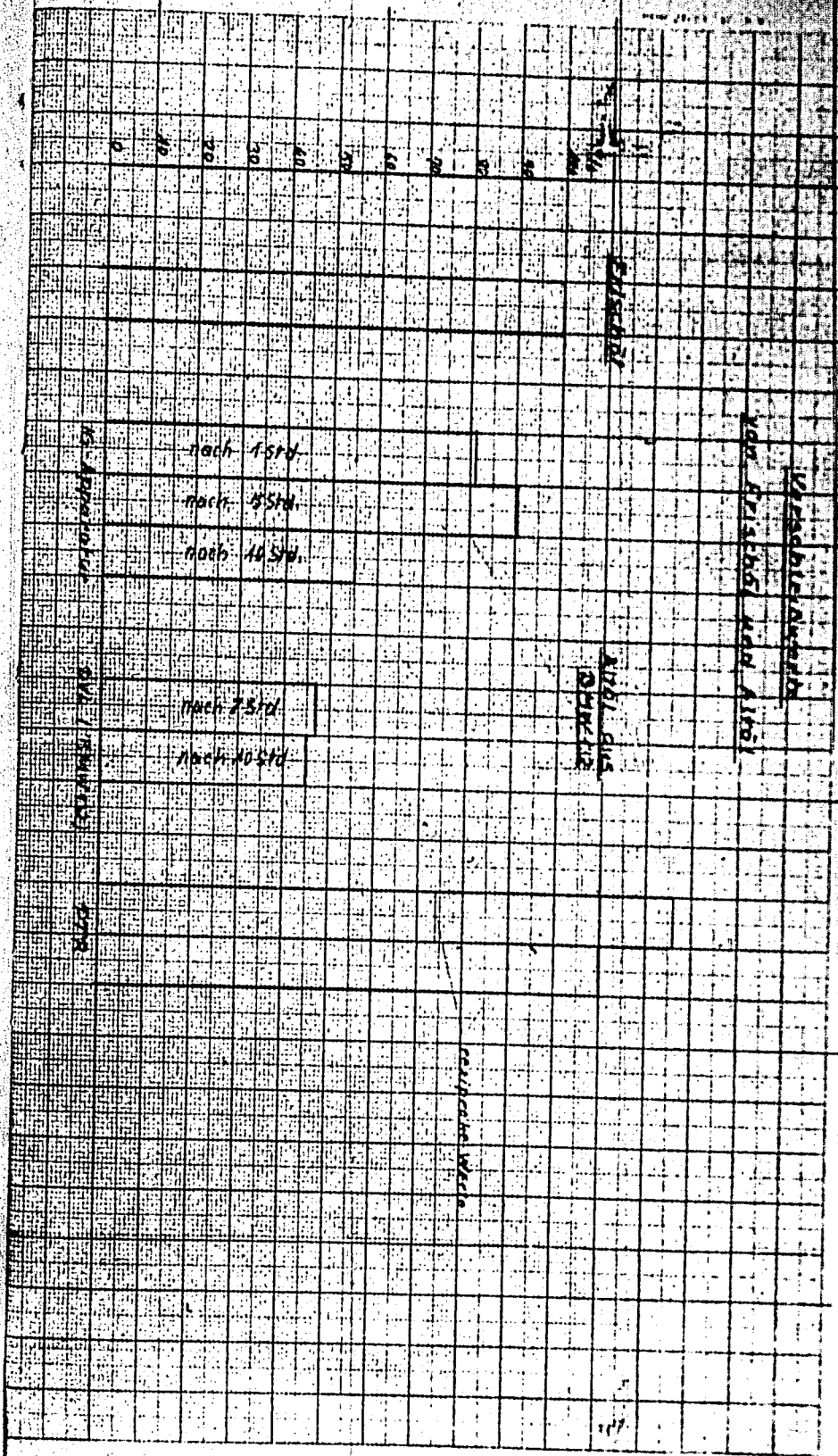
vorgang eingreift (vgl. G.L.Simard, H.W.Russell, H.R.Nelson, Ind.Eng.Chem. 33, 1352 /1941/). Ebenso stellen R.Mailänder und K.Dies fest, dass die chemischen Einflüsse die mechanischen weit überwiegen können (Techn.Mitteilungen v. Krupp, Beitrag zur Erforschung der Fragen beim Verschleiss (1943), Heft 14, S.258).

Bedenken gegen die einfache Anwendung der Frischölwerte zur praktischen Beurteilung der Schmieröle sind schon oft geäußert worden. In der Abb.2 ist zu sehen, dass tatsächlich auch in den Schmiereigenschaften schon ein merklicher Unterschied zwischen Frischöl und gebrauchtem Öl auftreten kann, allerdings verhält sich das gebrauchte Öl erwartungsgemäss stets etwas günstiger, gibt also einen geringeren Verschleiss.

Die angeführten Tatsachen sprechen für die folgende Behandlung der Schmieruntersuchungen

- 1) Genauere Anpassung der Prüfbedingungen an die genau analysierten praktischen Betriebsbedingungen.
- 2) Berücksichtigung der chemischen Veränderungen von Schmiermittel und Gleitfläche in höherem Ausmass als bisher.

Die Chemie muss also bei der Bearbeitung der Schmierfragen grundsätzlich neben der Hydrodynamik und der physikalischen Chemie als Grundwissenschaft vertreten sein; und zwar sowohl was das Schmiermittel, als was den Werkstoff anbelangt.-



Pa.

0

10

Prof. Dr. K. L. Wolf, Universität Halle, erklärte kurz die Ergebnisse der Reibungsmessungen an Glas.-

Dr. Zorn gab einen Überblick über die Versuche, die bei der I.G. mit Emulsionen durchgeführt wurden, ferner über Untersuchungen an Estern.-

Hr. Heidebroek dankte den Vortragenden für die interessanten Ausführungen.-

Hr. Wolf erklärte, unter Bezugnahme auf den Bericht von Herrn Dr. Zorn, dass der Optimalwert gesucht werden muss. Nur für den Einlauf einer Maschine interessiert die Verschleissfähigkeit des Oeles. Im Betrieb der Maschine soll die Oberfläche keine Veränderung erfahren. Technische Angriffe sollen auf der Metalloberfläche nicht zu stark werden. Hr. Zorn stellt fest, dass die Maschinenbauer an die Chemiker herangetreten sind und Oel mit Zusätzen gefordert haben, die gewisse Fehler in der Konstruktion der Maschine verdecken.-

Hr. Heidebroek macht darauf aufmerksam, dass trotz der guten Zusätze, die die Chemiker den Maschinenbauern gegeben haben, die Frage der Schmierung mit Verschleiss und ohne Verschleiss auseinander gehalten werden muss.-

Hr. Prandtl hatte seine Stellungnahme über die Grundbegriffe der Reibung und Schmierung an die Mitglieder der Arbeitsgruppe durch den VDI zusenden lassen und erläutert diese mündlich.-

Punkt 2 der Tagesordnung:

Dr. Vogelpohl hält ein Referat über hydrodynamische Schmiertheorie und über die Aufgaben der von ihm aufzubauenden neuen Abteilung "Reibung" am K.W. Institut für Strömungsforschung in Göttingen. (Bericht folgt.)

Anschliessend entwickelte sich eine lebhafte Diskussion über die hydrodynamische und die molekular-physikalische Richtung der Forschung. Hr. Bartel gab einige Erklärungen über Versuche mit Glimmerpäckchen, die im KWI bei Prof. Thiessen durchgeführt wurden.-

Hr. Heidebroek schlägt vor, später den Bericht von Dr. Vogelpohl zu diskutieren und stellt als die Ansicht der Arbeitsgruppe fest, dass die Forschung sowohl von der hydrodynamischen wie der physikalisch-chemischen Richtung her weiterbetrieben werden muß und beide sich ergänzen müssen.-

845

Punkt 3 der Tagesordnung:

Ergänzung der Begriffsbestimmungen und Festsetzung geeigneter Prüfgeräte für die verschiedenen technischen Schmiervorgänge.

Hr. Heidebroek teilt mit, dass es erforderlich ist, in Richtlinien oder Merkblättern die geeigneten Prüfgeräte für die verschiedenen technischen Schmiervorgänge festzulegen und den verschiedenen Aufgaben zuzuordnen. Dies soll in einem kleinen Ausschuss geschehen, zu dem

- Dr. von Philippovich, DVL
- Dr. Klemencic, TH, Graz,
- Dr. Kluge, PTR,
- Dr. Vogelpohl, TH, Berlin,
- Dr. Halder, I.G., Oppau,

von Herrn Heidebroek berufen werden.

Die grossen Industriefirmen sollen angeregt werden, sich für Massenprüfungen die erforderlichen Prüfapparate selbst zu beschaffen.-

Hr. von Philippovich gab einige Erläuterungen, wie er sich die Ordnung der Prüfmaschinen denke:

Zweck dieser Zuordnung soll sein, in der Richtung einer Vereinheitlichung der Prüfweisen für Schmiermittel weiterzukommen, ohne dass damit eine endgültige Festlegung auf die Blok'sche Einteilung beabsichtigt ist. Deren Vorteil beruht auf der Anwendung von Druck und Temperatur zur Charakteristik, ihr Nachteil auf der Überschneidung der Grenzschmierungsarten, die in ein und derselben Maschine bei verschiedenen Betriebsbedingungen vorkommen. Lehnt man die Einteilung nach physikalischen Werten, wie sie Blok vornimmt, ab, so bleibt zur Vereinfachung der Prüfungen bzw. zur Verringerung der Zahl der Prüfmaschinen eigentlich nur der Übergang auf Prüfmaschinen der Art, dass man für typische Fälle, wie Gleitreibung, rollende Reibung, Zahnflankenreibung usw., Maschinenbeiteile verwendet.

Eine allgemeine Lösung, sofern sie überhaupt möglich ist, würde eher in der Richtung der Blok'schen Einteilung liegen. Sie erfordert genauere Analyse der in den verschiedenen Maschinen wirklich vorkommenden Verhältnisse und ihre Verfolgung ist schon aus diesem einzigen Grunde anregend. Das beigefügte Lichtbild stellt eine Anregung in diesem Sinne dar.

Schmierart	Maschinenteile	Prüfmaschinen	Schmiermittel	Bemerkung
Milde Grenzschmierung	Wälzlager, Pleuellager, Pleuellager, Pleuellager	210, 200, 200, 200	Öl, Fett, Fett, Öl	geringer Druck
Nach-Temperatur-Grenzschmierung	Wälzlager, Pleuellager, Pleuellager, Pleuellager	210, 200, 200, 200	Öl, Fett, Fett, Öl	hohe Temperatur
Nachdruck-Grenzschmierung	Wälzlager, Pleuellager, Pleuellager, Pleuellager	210, 200, 200, 200	Öl, Fett, Fett, Öl	hoher Druck
Extreme Grenzschmierung	Wälzlager, Pleuellager, Pleuellager, Pleuellager	210, 200, 200, 200	Öl, Fett, Fett, Öl	hoher Druck, hohe Temperatur

DVL 1943. Versuch der Zuordnung von Prüfmaschinen zu den Blok'schen Grenzschmierungsarten. Inhalt/Be-triebsstoff

Punkt 4 der Tagesordnung:

Einführung von Bezugsölen (H-Öle) für Vergleichsmessungen.

Hr. Heidebrook weist darauf hin, dass der Wunsch besteht, geeignete Öle für Vergleichsmessungen einzuführen. Herr Zorn wird mit Herrn v. Philippovich klären, welche Öle, Zusätze und Ester (etwa 5 Öle) geliefert werden sollen, damit Versuche in verschiedenen Prüfmaschinen durchgeführt werden können. Herr v. Philippovich schlägt vor, auch Richtlinien für die Untersuchung von Ölen auszuarbeiten.

Herr Heidebrook bildet auch hierfür einen Unterausschuss, bestehend aus den Herren:

Dr. Zorn, I.G.,
Dr. v. Philippovich, DVL,
Dr. Kluge, PTR,
Prof. Thiessen, KWI,
Dr. Klemencic, Graz.

Weitere Vorgehen:

- 1) Die Arbeitsgruppe wird kurz nach Ostern wieder zusammentreten.
- 2) Herr Dr. Kramer wird bei der nächsten Sitzung über die Beilby-Schicht vortragen.
- 3) Herr Halder vom Techn. Prüfstand der I.G., Oppau, wird über neue Reibungsmessungen berichten.-

gez.: Heidebrook. gez.: Würges.

K. 19/10

Vertrauliche Mitteilung Nr. 10

*für die Mitglieder der Arbeitsgruppe „Schmiertechnik“
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI*

B e r i c h t

über die Sitzung der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 29. Juni 1943 in H a l l e

Vertrauliche Mitteilung Nr.10
für die Mitglieder der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI

Zu beachten: Eine Veröffentlichung auch von Auszügen
oder Teilen des Berichtes, sowie Weiterleitung an Per-
sönlichkeiten ausserhalb des Dienstbereiches des Emp-
fängers bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des
Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

Verein Deutscher Ingenieure

Berlin NW 7, im Oktober
Ingenieurhaus

Sitzungsbericht

Fachausschuss für Maschinenelemente

Arbeitsgruppe: Schmiertechnik

Sitzung am 29. Juni 1948

Ort: Halle

Verhandlungsleiter: Hr. Prof. Dr. Ing. E. Halderbrook
VDI, Dresden

Anwesend die Herren:

Bartel, Dr.

Kaiser-Wilhelm-Institut f. physikal.
Chemie und Elektrochemie, Berlin-
Dahlem, Faradayweg 4/6

Bochmann, Dr.

Physikal.-Techn.Reichsanstalt, Berlin-
Charlottenburg, Werner-Siemens-Str. 8/12
Institut für physikal. Chemie der Univ.
Halle, Halle/Saale, Mühlpforte 1

Dunken, Dr.

VDI, Berlin NW 7, Ingenieurhaus

Elsner, Dr.

Techn.Prüfstand I.G. Oppau, Kambitz,
Otto-Becker-Str. 12

Halder, Dipl.-Ing.

Techn.Hochschule, Gras, Kopernikus-Gasse

Klemencic, Dr.-Ing., Dozent

Physikal.-Techn.Reichsanstalt, Berlin-
Charlottenburg, Werner-Siemens-Str. 8/12

Kluge, Dr., Reg.-Rat

Physikal.-Techn.Reichsanstalt, Berlin-
Charlottenburg, Werner-Siemens-Str. 8/12

Kramer, Dr., Reg.-Rat (Gast)

Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt,
Berlin-Adlershof, Rudower Chaussee 16/23

Morghen, J., Dr. techn.,
Dipl.-Ing.

Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt,
Berlin-Adlershof, Rudower Chaussee 16/23

Philippovich, A. von, Dr.

Kaiser-Wilhelm-Institut für physikal.
Chemie und Elektrochemie, Berlin-Dahlem,
Faradayweg 4/6

Seelich, Dr., Dozent

Staatl. Materialprüfungsamt, Berlin-Dah-
lem, Unter den Eichen 86/87

Siebel, Präsident, Profes-
sor, Dr.-Ing.

Technische Hochschule, Dresden

Stuart, Professor, Dr.

Wolf, Direktor, Professor
Dr.

Institut f. physikal. Chemie der Univer-
sität Halle, Halle/Saale, Mühlpforte 1

Zorn, Dr.

Ammoniakwerk Morseburg GmbH., Leuna
Krs. Merseburg

Verhindert:

Holm, Dr.

Siemens-Schuckertwerke AG., Berlin-
Siemensstadt

Pfender, Dr.

AEG-Forschungsinstitut, Berlin-Oberschö-
noweide

Thiessen, Professor Dr.

Kaiser-Wilhelm-Institut für physikal.
Chemie und Elektrochemie, Berlin-Dah-
lem, Faradayweg 4/6

Brandtl, Dir., Prof. Dr. -Ing.

Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungs-
forschung, Göttingen

Vogelpohl, Dr.-Ing.

Kaiser-Wilhelm-Institut, Berlin NW 87,
Franklin-Str. 27/29

Hr. Heidebroek begrüßt die anwesenden Herren und dankt Hrn. Wolf dafür, daß er es ermöglicht hat, die Tagung in Halle durchzuführen. Dadurch hätten die Teilnehmer Gelegenheit, sein Institut kennenzulernen.

Hr. Halder berichtet über

"Verschleißmessungen",

die im technischen Prüfstand der I.G. gemacht wurden. Seine Ausführungen sind in dem anliegenden Sonderheft enthalten.

Hr. Wolf, Halle, spricht über

"Über die zwischen festen Körpern bestehende Reibung der Ruhe und der Bewegung"

I

Das Problem

Überall wo feste Körper aufeinander reiben oder bei (mittelbarem oder unmittelbarem) stofflichem Kontakt gegeneinander bewegt werden, spielt, wenn die Bewegung derselben gegeneinander eingeleitet oder aufrechterhalten werden soll, neben dem Widerstand des Mediums oder der "inneren" die zwischen diesen Körpern unmittelbar wirksame "Äußere Reibung" eine entscheidende Rolle. Im umgekehrten Verhältnis zu dieser ihrer Bedeutung steht die geringe Beachtung, welche der Äusseren Reibung in der auf Galileischem und Newtonschem Gedankengut beruhenden "modernen" Physik geschenkt wird. So tut z.B. ein so verbreitetes Buch wie das "Lehrbuch der Physik" von Westphal ihrer kaum Erwähnung, das dreibändige Lehrbuch von Grimsehl-Tomaschek handelt sie auf knappen drei, Pohl im ersten Band seines Lehrbuches auf e i n e r Seite ab. In A. Sommerfelds sieben erschienenen "Mechanik" tritt die periphere Beachtung, welche man der Äusseren Reibung schenkt, schon in der Einteilung hervor, indem der einzige, von der mechanischen Reibung handelnde Paragraph den Titel "Anhang über Reibungsgesetze" trägt, gebracht wird auch hier - neben einem Paradastück formaler Eleganz - in physikalischer Hinsicht nur Primitives.

Sowohl die grundsätzliche Frage, was Reibung überhaupt und welches die Konsequenzen ihrer Vernachlässigung in der modernen Physik seien, wie die eminent praktische Frage nach den Möglichkeiten der Verminderung der Äusseren Reibung, d.h. nach den Möglichkeiten der Schmierung veranlaßten uns, die Frage der Äusseren Reibung und ihrer Verminderung systematisch zu untersuchen. Über erste Ergebnisse dieser Untersuchungen, die sich auf die Reibung der Bewegung (Reibungszahl μ) bei Verwendung von Messing als Werkstoff und Fettsäuren (bzw. deren Lösungen in unpolaren Flüssigkeiten) als Schmiermittel bezogen, wurde bereits früher (H. Dunken, I. Fredenhagen und K.L. Wolf, Koll. Z. S. 101, 21, 1942) berichtet. Seitdem sind die Untersuchungen auf eine grosse Reihe von Schmiermittelflüssigkeiten bzw. Flüssigkeitsgemischen sowie auf die Werkstoffkombinationen Messing-Glas und Glas-Glas ausgedehnt worden. Über die Ergebnisse dieser vor allem von I. Gauditz und I. Fredenhagen ausge-

fürten Messungen sowie ihre Beziehungen zu gleichzeitigen Messungen von H. Dunken mit einer a.a.O. beschriebenen Apparatur zur Messung der Reibung der Ruhe (Reibungszahl μ) erhaltenen Resultate. Die Ergebnisse sollen im folgenden kurz berichtet werden. Daß diese Ergebnisse im gegenwärtigen Stadium noch mehr Probleme aufwerfen als lösen, mag die Dringlichkeit ihrer Erweiterung und Vertiefung hinreichend dartun.

II

Arten der Reibung zwischen festen Körpern

Mechanische Reibung wird gemessen als diejenige Kraft, welche aufgewandt werden muß, wenn es gilt, in unmittelbarem oder mittelbarem stofflichem Kontakt befindliche Körper gegeneinander in Bewegung zu setzen oder, falls sie bereits relativ zueinander bewegt sind, den Zustand dieser Bewegung aufrechtzuerhalten. Art und Größe der Reibung hängen dabei sowohl von der stofflichen Kombination wie von der Art der Bewegung ab.

Nach der stofflichen Kombination unterscheiden wir, wenn von der Reibung zwischen festen Körpern gehandelt wird, drei einander wesensfremde Arten der Reibung:

die Trockenreibung

die Grenzreibung (oder besser Grenzflächenreibung)

die Flüssigkeitsreibung.

Diese umschreiben wir wie folgt:

a) Trockenreibung:

Stehen feste Körper miteinander unmittelbar in Berührung, so tritt Trockenreibung auf. Da bereits die Zwischenlagerung einer monomolekularen Schicht eines Fremdstoffes, ja nach Untersuchungen von Devosaux einer die Grenzfläche noch nicht einmal zusammenhängend bedeckende Fremdschicht ausreicht, die Reibung größenordnungsmäßig herabzusetzen, und da adsorptiv an feste Oberflächen gebundene Fremdstoffe nur schwer vollständig zu entfernen sind, ist der Zustand der Trockenreibung nur selten realisiert. Die Schwierigkeit, ihn im betrachtenden Versuch herzustellen, und die verhältnismäßig geringe praktische Bedeutung der Trockenreibung sind wohl auch die Ursache dafür, daß unser Wissen von der Trockenreibung nur recht spärlich ist.

Theoretisch soll für die Trockenreibung das Coulombsche Reibungsgesetz gelten, nach dem die zur Überwindung des Reibungswiderstandes erforderliche Kraft R unabhängig von der Größe der einander berührenden Flächen der Kraft P , mit welcher die beiden Körper aneinander gedrückt werden, proportional sein soll; die als Reibungskoeffizient, Reibungsbewert oder Reibungszahl durch die Beziehung

$$(1) \mu = R/P$$

definierte Zahl μ soll also eine für eine bestimmte stoffliche Kombination charakteristische, von P unabhängige Größe sein.

Anlaß zum Auftreten von Trockenreibung geben sowohl grobe oberflächliche Rauigkeiten wie die unmittelbare Wirkung

zwischenmolekularer bzw. zwischenatomarer Kräfte. Die zur Überwindung des durch die Rauigkeit hervorgerufenen Reibungswiderstandes erforderliche Arbeit ist dadurch bedingt, daß bei der gegenseitigen Verschiebung von einander berührenden, oberflächlich rauhen Festkörpern diese - ähnlich wie ein über schlechtes Pflaster fahrender Wagen von der Straße - periodisch voneinander abgehoben werden und daß - vor allem bei stärkerer Rauigkeit und verschiedener Härte der miteinander in mechanischer Wechselwirkung stehenden Festkörper - aus den Oberflächen herausragende Teilchen verbogen oder abgerissen werden. Da auch bei bestpolierten Oberflächen die Rauigkeiten das Ausmaß vieler Molekülkriegen haben, ist diese Art der Reibung, in deren Gefolge grobe mechanische Verformungen und Zerstörungen der Oberflächen auftreten, praktisch nie auszumachen.

Im Extremfall geringster Oberflächenrauigkeit, die etwa an vollkommenen Einkristallen beobachtet werden könnte, bleibt die grundsätzlich nicht unterschreitbare molekulare Rauigkeit bestehen; deshalb ist auch die selbst bei höchster Oberflächenglätte beobachtbare Reibung letztlich immer noch unter dem oben angeführten Bild des polternden Wagens zu verstehen. Dabei bleibt indes zu beachten, daß mit abnehmender Rauigkeit der Bruchteil der Moleküle bzw. Atome beider Körper, welche einander bis zu Entfernungen von der Größenordnung der Gitterabstände genähert werden und somit stärkere Anziehungskraft aufeinander ausüben können, immer größer wird. Da diese Kräfte mit abnehmendem Abstand sehr schnell steigen, wird bei zunehmender Oberflächenglättung schließlich die unmittelbare Wirkung der zwischenmolekularen bzw. zwischenatomaren Kräfte entscheidend. Wenn noch, wie das insbesondere bei der Wechselwirkung gleichartiger Stoffe der Fall ist, die metrischen Abmessungen der Gitter beider Festkörper kommensurabel sind (s. Bild 33), tritt schließlich unter der Wirkung der molekularen Kräfte Kaltschweißen und Fressen ein. So ist es zu verstehen, daß die Reibung oft gerade dann, wenn bestpolierte und von adsorbierten Schichten befreite gleichartige Stoffe gegeneinander reiben, besonders groß wird und zwar nicht nur, wenn der Vorgang sich im stoffleeren Raum abspielt, sondern auch wenn er in einer Atmosphäre solcher Gase vorläuft, welche wie etwa Edelgase oder Stickstoff an den Oberflächen der aneinander reibenden Festkörper nicht oder nur sehr schwach adsorbiert werden.

b) Flüssigkeitsreibung:

Befindet sich zwischen zwei aneinander reibenden Festkörpern eine Flüssigkeit, so wird die Reibung grundsätzlich vermindert. Im Extremfall, in dem die flüssige Zwischenschicht so dick ist, daß sich in ihr der für die betreffende Flüssigkeit charakteristische molekulare bzw. übermolekulare Ordnungszustand voll entwickeln kann, wird die Reibung stets vollständig in das Innere der Zwischenschicht als den Ort kleinsten Widerstandes verlagert. Die zur Überwindung des Reibungswiderstandes zu leistende Arbeit ist dann ausschließlich Arbeit gegen die durch die Zähigkeit oder innere Reibung der Flüssigkeit bedingten Widerstände. In ihrer Größe (und Temperaturab-

hängigkeit) wird die Reibung dementsprechend entschieden durch die Koeffizienten der inneren Reibung der Schmierflüssigkeit bestimmt.

Seiner Art nach wird das durch die Reibung hervorgerufene Verhalten der Schmierflüssigkeit hervorgehoben. Man sieht von der für dieses Geschehen unrichtigen, den Festkörpern höchstbenscharter Flüssigkeitsreibung - auch die Kontinuumshydrodynamik beschriebenen - ab, auch die im bekannten Stribeck-Diagramm dargestellte Abhängigkeit der Reibungszahl von der Relativgeschwindigkeit v der reibenden Flächen zueinander, von der anwirkenden Kraft F und von der Viskosität η im Gebiet der Flüssigkeitsreibung. Bei kleiner Geschwindigkeit, großen Lasten und kleinen Viskositäten treten indes systematische Abweichungen von dem bei reiner Flüssigkeitsreibung zu erwartenden Vorgang ein, die über einen Bereich, in welchem die Vorgänge im Inneren der Flüssigkeit noch mitbestimmend sind (Gebiet der gemischten Reibung), schließlich in das von der inneren Reibung der Flüssigkeit unabhängige und der systematischen theoretischen Bearbeitung noch harrende Gebiet der Grenzreibung führen.

Der bei Flüssigkeitsreibung auftretende **E p i l a m e n t v e r s c h l e i ß** kann durch die hydrodynamische Theorie erfaßt werden. Dagegen tritt der wichtigere **E p i l a m e n t v e r s c h l e i ß** in ihr überhaupt nicht auf. Er dürfte ebenso wie die gesamte Grenzreibung nur auf Grund molekularer Vorstellungen zu verstehen sein.

c) Die Grenzreibung

Grenzreibung besteht dann, wenn der Ordnungszustand der Moleküle auch im Innern der Schmiermittelschicht ganz durch die bei der Theorie der Flüssigkeitsreibung vernachlässigte, den festen Grenzflächen unmittelbar anliegende und an diesen mehr oder weniger fest und in bestimmter Ordnung der Moleküle haftende Grenzschicht bestimmt wird; besteht bei einer Dicke der Schmiermittelschicht von nur einer oder zwei Moleküllagen die ganze Schmiermittelschicht aus den Festkörpern unmittelbar anliegenden Molekülen, so spricht man auch von **E p i l a m e n t r e i b u n g**.

Grenzreibung liegt u.a. vor, wenn Mangel an Schmiermittelflüssigkeit besteht, sowie stets dann, wenn die Geschwindigkeit v klein oder die anpressende Kraft F groß ist. Sie ist dementsprechend bei vielen Bewegungsvorgängen stets und bei solchen, die sich überwiegend bei hohen Geschwindigkeiten abspielen, immer dann verwirklicht, wenn etwa - wie beim An- und Auslaufen - die Geschwindigkeit v klein ist. Der Materialverschleiß ist offenbar überwiegend durch sie bedingt.

Über Art und Größe der z.B. für alle Fragen der technischen Schmierung und insbesondere für den Materialverschleiß wichtigen Grenzreibung lassen sich im allgemeinen Aussagen noch nicht machen. Es ist der Sinn der in folgenden noch zu bringenden Untersuchungen, gerade zur Klärung dieser Fragen einen ersten Beitrag zu geben.

Das durch Gl. (1) definierte Reibungszahl, die im Fall der Trockenreibung unabhängig von P ist und im Gebiet der Flüssigkeitsreibung mit wachsendem P abnimmt, steigt im Bereich der Grenzreibung mit P zunächst an. Ob sie bei großen Drucken oder kleinen Geschwindigkeiten schließlich, wie im Falle der Trockenreibung konstant wird, ist noch nicht entschieden. Messungen von Herrn Kluge sprechen dafür, Messungen von Herrn Klemenovic, wenn ich diesen recht verstanden habe, dagegen. Damit bleibt auch in vollem Umfang die Frage offen, ob und wie der aus Messungen der Abhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit auf die Geschwindigkeit Null extrapolierte Werte der Reibungszahl mit dem gleich noch einzuführenden Beiwert für die Reibung der Ruhe zusammenhängt. Die Vermutung von Fräulein Jakob, daß die Reibungszahl beim Durchgang durch die Geschwindigkeit Null gleich Null sein soll, träfe indes wohl nur dann zu, wenn bis herab zur Geschwindigkeit Null der Zustand der reinen Flüssigkeitsreibung aufrechterhalten werden könnte.

d) Reibung der Bewegung und Reibung der Ruhe (oder Gleitreibung und Haftreibung)

Außer von der stofflichen Kombination hängt die Reibung von der Art und Stärke der Bewegung ab. So unterscheidet man, wenn man die Art der Bewegung ins Auge faßt, je nachdem ob die reibenden Körper aufeinander gleiten oder rollen, zwischen gleitender und wälzender Reibung. Faßt man andererseits die Größe der Bewegung ins Auge, so unterscheidet man, je nachdem ob von der Kraft die Rede ist, welche die reibenden Körper aus der Ruhe gegeneinander in Bewegung setzt, oder welche sie im Zustand vorhandener Bewegung erhalten soll, zwischen der Reibung der Ruhe und der Reibung der Bewegung. Die dabei auftauchende Frage, ob die Reibung der Bewegung beim Übergang zur Geschwindigkeit Null stetig in die Reibung der Ruhe übergeht, ist - wie bereits gesagt - noch nicht entschieden. Ich möchte indes vermuten, daß auch Reibung der Bewegung und Reibung der Ruhe wesensverschiedene Erscheinungen sind.

e) Zur Nomenklatur

Nomenklatorisch bestehen einige Gebräuche, welche - wie sich gerade in letzter Zeit wiederholt gezeigt hat - geeignet sind, Verwirrung zu schaffen:

1) Die Reibung der Ruhe wird auch als Haftreibung bezeichnet. Man dachte dabei wohl an das grobe Betrachtung in die Augen springende Haften zweier aufeinander lastender Körper vor dem Übergang von der Reibung der Ruhe in die Reibung der Bewegung. Da indes auch die Grenzreibung im Zustand der Bewegung durch ein Haften, nämlich das Haften der Schmiermittelflüssigkeit am Festkörper, bedingt ist, sollte man die Bezeichnung Haftreibung für Reibung der Ruhe nicht mehr benutzen.

2) Der Name Grenzreibung gibt leicht Anlaß zu dem Mißverständnis, als handele es sich um einen Grenzwert im Sinne

854

- 7 -

855

einer Extrapolation. Man sollte deshalb entweder den Namen der Epilamenreibung auf das gesamte Gebiet der heute noch mit dem Wort Grenzreibung bezeichneten Reibungsvorgänge ausdehnen oder aber das Wort Grenzreibung durch Grenzflächenreibung ersetzen.

III

Experimentelle Untersuchungen zur gleitenden
Grenzflächenreibung

Unter den Arten der Reibung ist die Grenzflächenreibung, wie bereits betont wurde, die bisher undurchsichtigste. Sie aufzuklären, wurden experimentelle Untersuchungen in Angriff genommen, über deren erste Ergebnisse im folgenden berichtet werden soll.

a) Gleitreibung der Bewegung

Als einfachster mechanischer Vorgang zur Messung der gleitenden Reibung der Bewegung wurde die Reibung eines Zylinders an einer ebenen Platte gewählt. Das Schema der Meßanordnung wurde bereits a.a.O. (I. Fredenhagen, Diss. Halle 1942; H. Danksen, I. Fredenhagen und K. L. Wolf, Koll. Z. S. 101, 21, 1942) bekanntgegeben. Die lastende Kraft P kann durch Auflegen von Gewichten variiert werden; die zur Überwindung der Reibungskraft erforderliche Kraft R wird nach einer Nullmethode durch direkte Wägung bestimmt.

Auf die Fülle der experimentellen Schwierigkeiten sei nicht im einzelnen eingegangen. Es genüge der Hinweis, daß sie in erster Linie durch die laufende Zerstörung und das dadurch geforderte Neueinschleifen der reibenden Oberflächen bedingt sind sowie durch die Schwierigkeiten der Entfernung der letzten Reste einmal verwandter, gut haftender Schmiermittelflüssigkeiten, welche besonders bei der Messung von Konzentrationsabhängigkeiten systematische Fehler verursachen können. Es wird Aufgabe einer besonderen Untersuchung sein müssen, den Einfluß dieser zunächst vernachlässigten Fehlerquelle (etwa dadurch, daß die Konzentrationsabhängigkeiten sowohl im Sinne steigender wie fallender Konzentration an grenzflächenaktivem Stoff gemessen werden) aufzuklären, wobei die eine oder andere der im folgenden getrachteten Kurven noch eine Präzisierung erfahren möge. Weiter macht sich störend der Zustand bemerkbar, daß die Reibung oft und in zunächst unkontrollierbarer Weise von einem Zustand in einen anderen, offenbar von der Reibung der Bewegung in diejenige der Ruhe überspringt. Dadurch tritt Blocken der Apparatur ein, mit dem, wie Beobachtungen durch Glasplatten als Werkstoff ergaben, offenbar ein Reißen des Schmiermittelfilms verbunden ist. Dieses Blocken, das bei gewissen Schmierstoffen bzw. bei gewissen Konzentrationen von Flüssigkeitsgemischen bisweilen so stark wird, daß eine reproduzierbare Messung kaum mehr durchführbar ist, konnte schließlich nach einem Vorschlag Klemencic durch Anbringen einer zusätzlichen Dämpfung weitgehend ausgeschaltet werden. Trotz allem blieb ein verhält-

SAFETY FILM

nismäßig starkes, von Schmiermittel zu Schmiermittel variierendes Streuen der Meßpunkte bestehen. Erreicht wurde vorläufig eine relativ große Genauigkeit innerhalb der meisten Meßreihen; die Absolutwerte streuen dagegen, wie stetig eingeschobene Messungen mit dem als Bezugsstoff gewählten Cyclohexan zeigten, stärker.

Die Messungen wurden ausgeführt an den Werkstoffkombinationen Messing-Messing, Glas-Messing und Glas-Glas.

b) Gleitreibung der Ruhe

Die Reibung der Ruhe wurde mit einer von H. Dunken auf den derzeitigen Stand entwickelten, äußerst einfachen Apparatur durch Bestimmung des Neigungswinkels gemessen, bei welchem unter dem Einfluß des Eigengewichts eines auf einer Messingschiene liegenden Messingzylinders Gleiten eintritt. Auf die bereits a.a.O. behandelte Verwendbarkeit des gleichen Apparats zum Nachweis selektiver Adsorption aus Lösungen braucht im folgenden nicht eingegangen zu werden.

c) Ergebnisse

Den Gang der Reibungszahl μ (Reibung der Bewegung) mit der Kettenlänge in homologen Reihen zeigen für die Werkstoffkombinationen Messing-Messing, Glas-Messing und Glas-Glas die Bilder 1 bis 3, denjenigen der Reibungszahl μ_0 (Reibung der Ruhe) für die homologe Reihe der Alkohole am Werkstoffpaar Messing-Messing Bild 4.

Die Abhängigkeit der Reibungszahl μ von Mischungsverhältnis (Molenbruch ϵ des jeweils erstgenannten Stoffes) lassen für Gemische unpolarer Flüssigkeiten die Bilder 5, 6 und 7 erkennen. Die Reibung ändert sich hier entsprechend der Tatsache, daß ausgesprochene selektive Adsorption nicht vorliegen dürfte, praktisch linear mit der Konzentration. Ähnlich liegen die Verhältnisse für das Gemisch Chlorbenzol-Cyclohexan an Messing-Messing g , während bei Brombenzol entsprechend der vermutlich bestehenden Grenzflächenaktivität (s. I. Fredenhagen, Diss. Halle 1942) bereits geringe Mengen des Halogenbenzols eine verhältnismäßig starke Erniedrigung der Reibungszahl zu bedingen scheinen. Systematische Messungen der Grenzflächenaktivität und der Haftreibung sollen im Hinblick auf eine weitere theoretische Ausdeutung dieses Befundes sobald wie möglich folgen.

Komplexere Formen der Konzentrationsabhängigkeit der Reibungszahl liegen bei den Lösungen von Estern, Aminen, Alkoholen und Fettsäuren in unpolaren Flüssigkeiten vor (Bild 9-17). Das scharfe Maximum, das die Reibungszahl μ bei kleinen Fettsäurekonzentrationen durchläuft, konnte bereits früher durch Heranziehen von Messungen der Grenzflächenaktivität an Hand eines ausgedehnteren Meßmaterials auf die Verschiebung des Gleichgewichtes zwischen stark grenzflächenaktiven Säure-einer- und weniger aktiven-Doppelmolekülen zurückgeführt werden (Dunken, Fredenhagen-Wolf, Koll. Z. S. 95, 186, 1941; zusammenfassend s. K.L. Wolf, Theoretische Chemie, Teil 3, Leipzig 1943, S. 651). Bei den Alkoholen, bei denen eine nach

Größe und Art wesentlich mannigfaltigere Obermolekülbildung besteht (s. E.L. Wolf, Theoretische Chemie, Teil 3, Leipzig 1943, S. 495 ff.), dürfte die Konzentrationsabhängigkeit der Reibungszahl ähnlich bedingt sein. Ob bei Aminen und Estern Analoges vorliegt, müssen die hier noch ausstehenden Untersuchungen über Obermolekülbildung zeigen. Vor allem aber bedürfen alle in Bild 9-16 dargestellten Verhältnisse noch der Ergänzung durch die Beobachtung der Konzentrationsabhängigkeit der Grenzflächenspannung. Diesbezügliche Untersuchungen, welche genaue Messungen der "Randwinkel", die sich an der Grenzfläche zwischen Festkörper, Flüssigkeit und Dampfraum einstellen, voraussetzen, werden von Dr. v. Eichborn seit einigen Monaten vorbereitet; bis wann brauchbare Ergebnisse vorliegen werden, ist bei der Schwierigkeit der Ausführung solcher Messungen und bei den hohen Anforderungen an die Reinheit der Stoffe noch nicht abzusehen.

Der Beachtung wert erscheint, daß die (an der Werkstoffpaarung Messing-Messing beobachtete) Konzentrationsabhängigkeit der Reibungszahl μ für die Alkohole, wie ein Vergleich der Bilder 15 und 16 mit den Bildern 30 und 31 zeigt, derjenigen der Reibungszahl μ weitgehend entspricht. Von Bedeutung mag ferner die Tatsache sein, daß Schmiermittel auf die Werkstoffkombination Glas-Messing offenbar ebenso wirken wie auf Messing-Messing; man möchte vermuten, daß die Größe der Reibung durch die Besetzung bereits einer, nämlich der grenzflächenaktivsten Grenzfläche, wesentlich bestimmt wird.

Weiter ins einzelne untersucht wurde die Abhängigkeit der Reibungszahl μ an Glas-Glas. Die Bilder 19-23 geben die Resultate der diesbezüglichen Messungen wieder. Man erkennt eine starke, offenbar durch die ausgesprochene Grenzflächenaktivität bedingte, mit wachsender Kettenlänge des polaren Stoffes zunehmende Beeinflussung der Reibungszahl durch äußerst geringe Mengen von Fettsäuren oder Alkoholen. Auch die Reibungszahl μ wird, wie Beobachtungen am Werkstoffpaar Messing-Messing zeigen, durch Zusatz gerinster Mengen von Fettsäuren zu Kohlenwasserstoffen erheblich (fast um eine um (ir.) Größenordnung!) herabgesetzt; aus diesen Beobachtungen muß, wie H. Dünken bereits a. a. O. mitteilte, gefolgert werden, daß die durch grenzflächenaktiven Stoff stattfindende Erniedrigung der Reibungszahl bereits dann ihren endgültigen Wert erreicht, wenn gerade soviel Fettsäure zugegeben ist, daß sich an den reibenden Flächen eine monomolekulare Schicht davon ausbilden kann. Es ist zu vermuten, daß das Werkstoffpaar Glas-Glas sich gegenüber Fettsäuren und Alkoholen entsprechend verhält. Kettenverzweigung übt auf diese Erscheinung, wie Bild 24 und 29 zeigen, einen entscheidenden Einfluß aus.

IV

Verknüpfung mit anderen Erscheinungen

Die voranstehenden Messungen bedürfen, soll das Wesen der Grenzreibung und ihre Abhängigkeit von Schmiermittel und Werkstoff aufgeklärt werden, abgesehen von der noch zu fordernden Verbreiterung des Meßmaterials, der - in den Anfängen bereits bestehenden - Verknüpfung mit einer Reihe von anderen, dem exakten theoretischen Zugriff und damit dem grundsätzlichen Verständnis geneigteren Erscheinungen. Auf die Bedeutung der

Grenzflächenspannung bzw. Grenzflächenaktivität und der Haftfestigkeit wurde bereits des Öfteren (u.a. K.L. Wolf, Die Chemie Jg. 5 (1942) S. 295) hingewiesen; speziell am Beispiel der Fettsäuren konnten Zusammenhänge aufgewiesen werden (H. Dunken, I. Fredenhagen und K.L. Wolf, Koll. Z. S. 95, 186 (1941)). Für eine entsprechende Diskussion des Verhaltens der Alkohole, Ester u. dgl. bedarf das bisher benutzte Verfahren zur Messung der Grenzflächenspannung gegen Quecksilber der Verfeinerung; vorbereitende Untersuchungen dieser Art sind im Gange (Dr. v. Eichborn). Darüber hinaus müssen die Beobachtungen über Grenzflächenspannung und selektive Adsorption auf Grenzflächen gegen feste metallische und nichtmetallische Stoffe ausgedehnt werden. Entsprechende Untersuchungen, unter denen diejenigen von v. Eichborn über Randwinkel und über die Leistungsfähigkeit der Gleichungen von Dupree und Young sowie diejenigen von H. Harms und E. Baschant (s. Koll. Z. (1943) S. 103, 202) über die Rangfolge der selektiven Adsorption und die Dichte der Belegung einer Grenzschicht mit Fremdmolekülen ("Besetzungszahlen") einen breiteren Raum einnehmen, sind im Gange. Sie dürften, da metrische Beziehungen zwischen Gitterabständen und Molekülabmessungen, wie besonders neuere Untersuchungen von A. Neuhaus über orientierte Aufwachsung (s. Bild 33) zeigen, eine entscheidende Bedeutung für die Ausbildung von Grenzflächenschichten und für deren Haftfestigkeit zukommen dürfte, wesentliche Gesichtspunkte für das Verständnis des unterschiedlichen Verhaltens der gleichen Schmiermittel an verschiedenen Werkstoffen erbringen. Die Verbindung mit Herrn Neuhaus ist seit längerer Zeit bereits aufgenommen. Daß neben dieser Abstimmung der Metrik der innermolekularen und interkristallinen Abstände auch Größe und Art des Polymomentes der zu adsorbierenden Moleküle auf Zustandekommen und Eigenschaften der Grenzflächenschichten Einfluß haben, konnte in einer theoretischen Untersuchung kürzlich (H. Dunken, Z. S. phys. Chem. im Erscheinen) gezeigt werden.

Die Messungen der Reibungszahlen bedürfen ferner ^{der} Ergänzung durch qualitative und quantitative Untersuchungen über die Abhängigkeit des Werkstoffverschleißes vom Schmiermittel. Orientierende Untersuchungen (I. Gauditz, im Erscheinen begriffene Hallesche Diss.) ergaben, daß zwischen beiden Größen kein unmittelbarer Zusammenhang besteht. Durch Verknüpfung dieser Befunde mit Messungen von v. Engelhard über Schleifhärte (Göttinger Nachrichten 1942), welche ebenfalls einen deutlichen Zusammenhang mit Grenzflächenspannung und Übermolekülbildung erkennen lassen, dürfte hier, vor allem durch Ausdehnung des v. Engelhardschen Verfahrens auf Metalle, weitere Klarheit gewonnen werden. Die Arbeitsverbindung mit Herrn v. Engelhard ist bereits aufgenommen. Zugehörige Untersuchungen über Übermolekülbildung werden in Fortsetzung früherer Arbeiten (zusammenfassende Darstellung s. K.L. Wolf, Theor. Chemie, Teil 3, Stück I, § 4) durchgeführt, über ihre Ergebnisse wird a. a. O. (s. auch G. Metzgers im Erscheinen begriffene Hallesche Diss.) zusammenhängend berichtet werden.

158

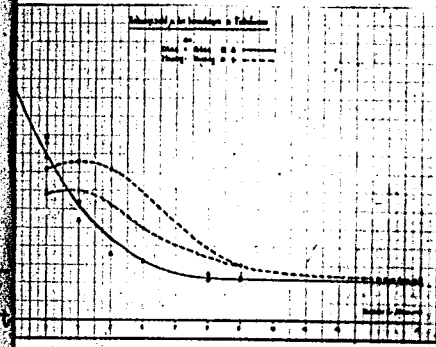


Bild 1

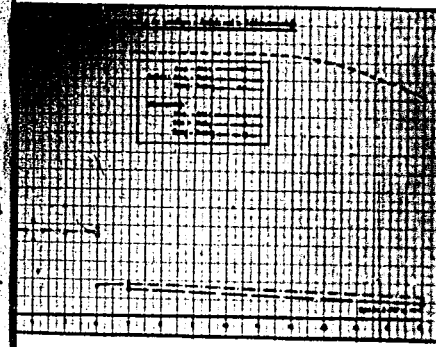


Bild 3

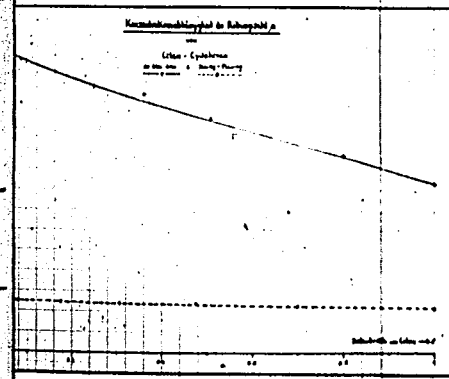


Bild 7

257

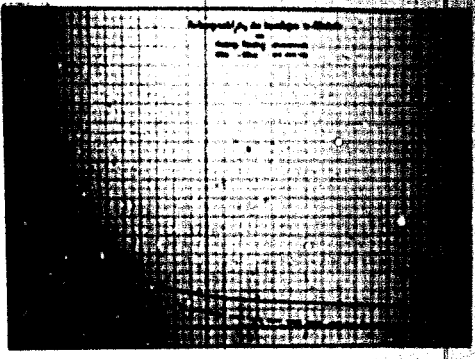


Bild 2

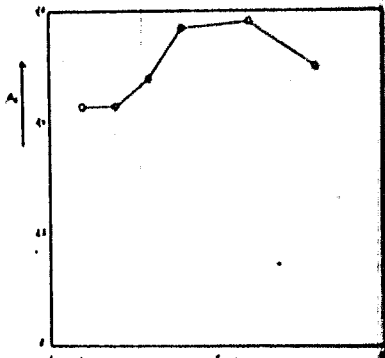


Bild 4

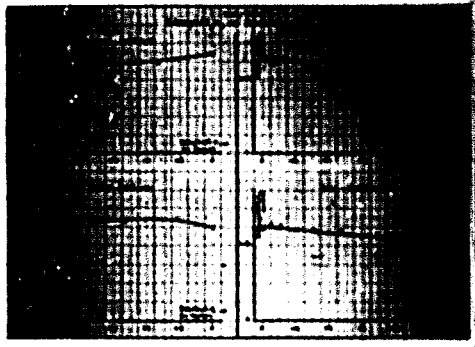
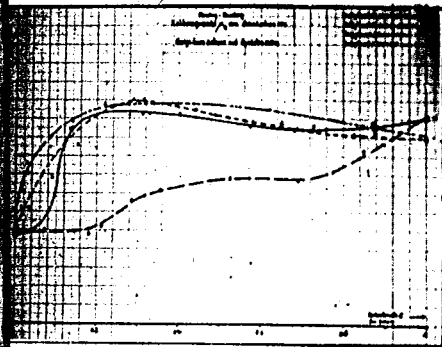
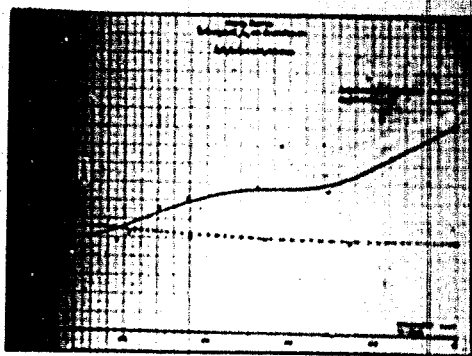


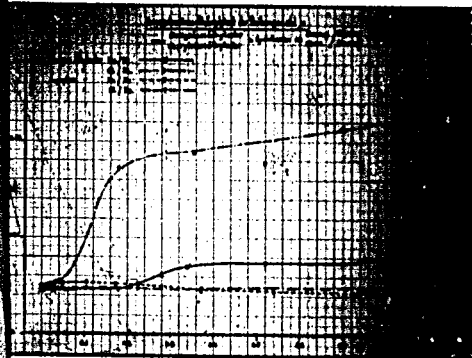
Bild 6



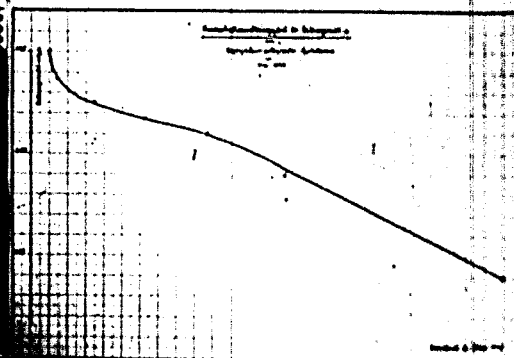
B114 8



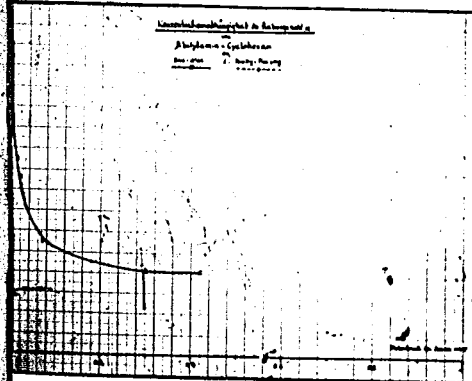
B114 9



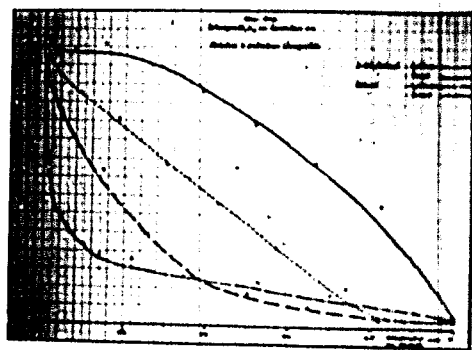
B114 10



B114 11

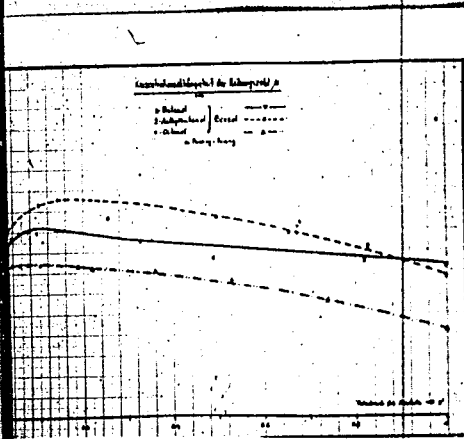


B114 12

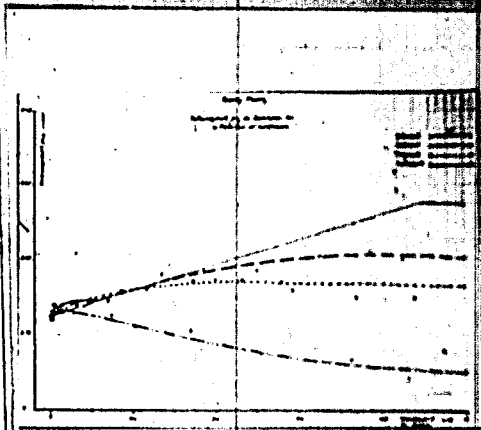


B114 13

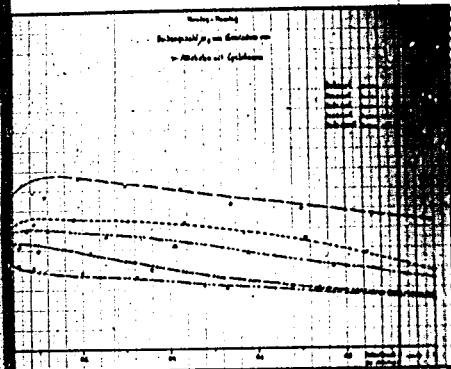
EASTMAN



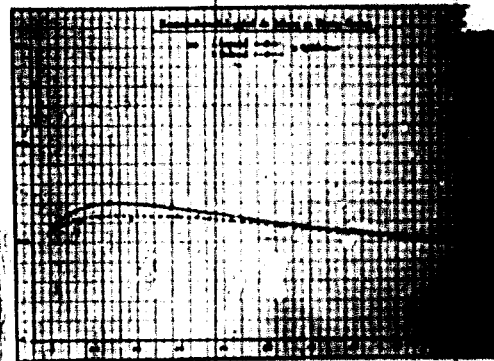
0113 14



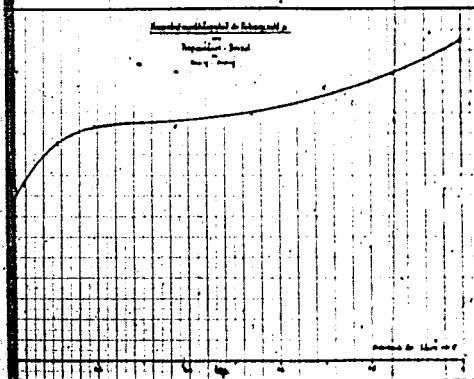
0114 100



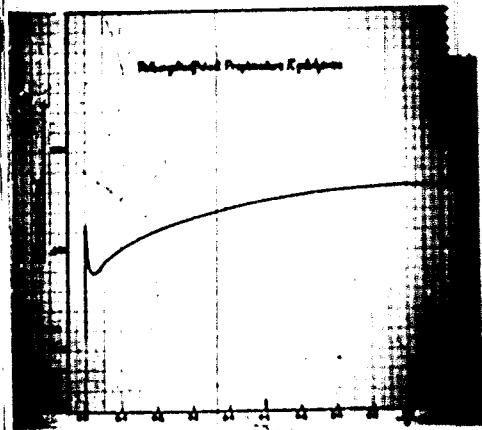
0115 120



0116 15



0117 17



0118 20

5 -

•u

018

08u

18T

e

-un-

ten

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

Sum

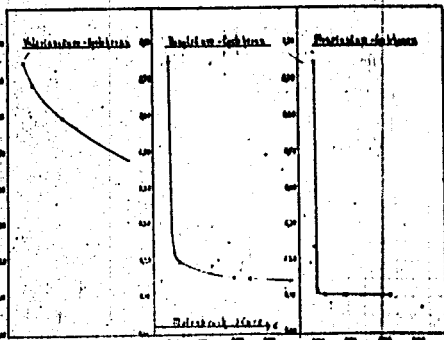


Bild 19



Bild 20

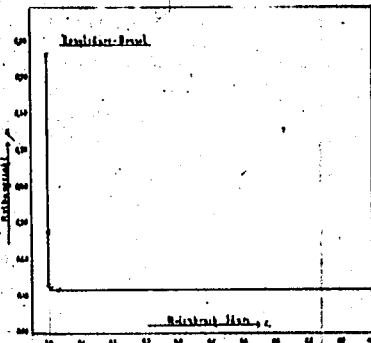


Bild 21

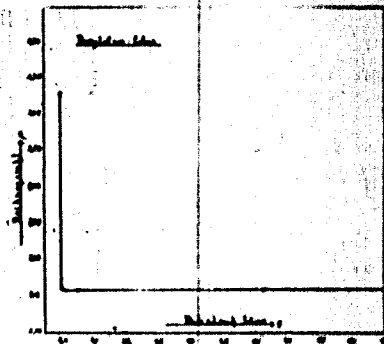


Bild 22

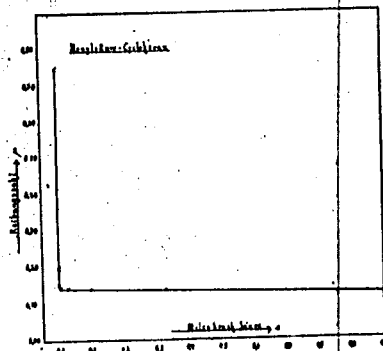


Bild 23

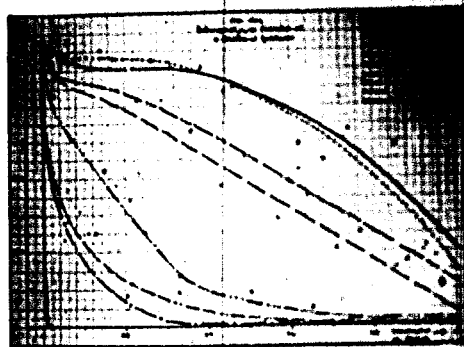


Bild 24

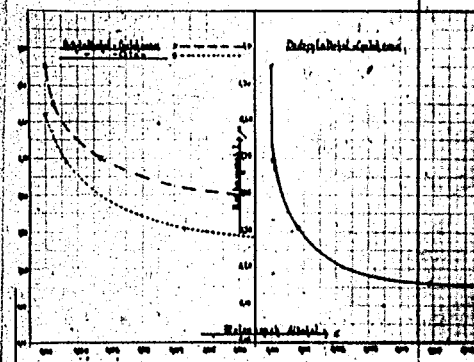


Bild 25

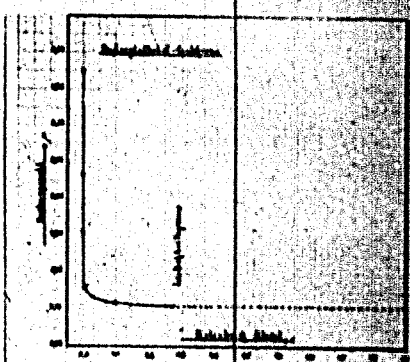


Bild 26

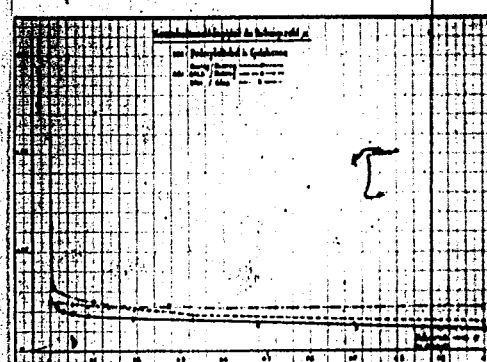


Bild 27

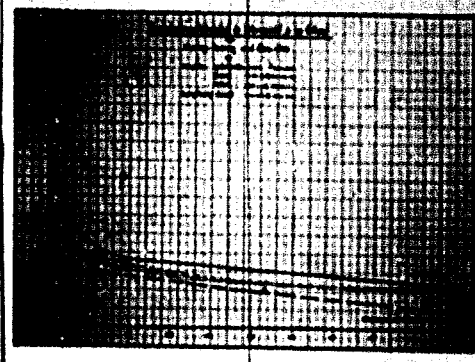


Bild 28

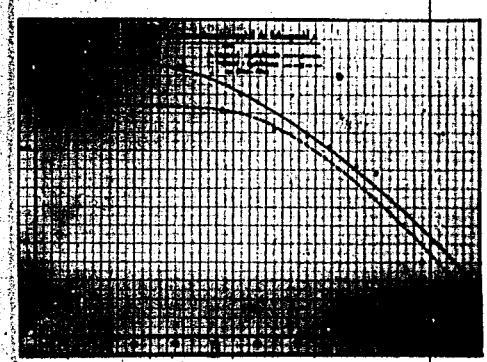
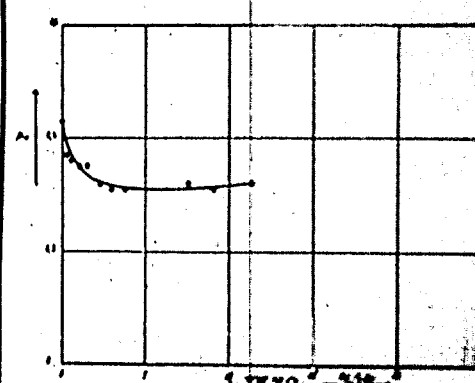


Bild 29



Konzentrationsabhängigkeit der
Haffreiungszahl von n-Propyl-
Cyclohexan

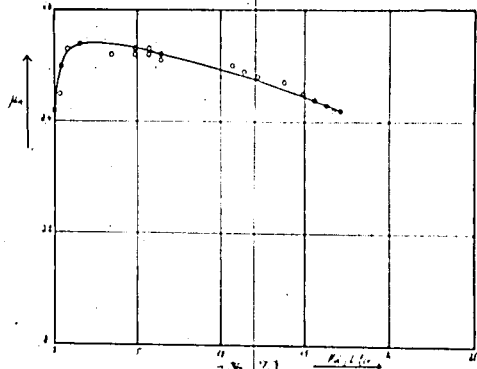


Abb. 21
Konzentrationsabhängigkeit der Brechzahl n_D von Methyl-
alkohol in Benzol

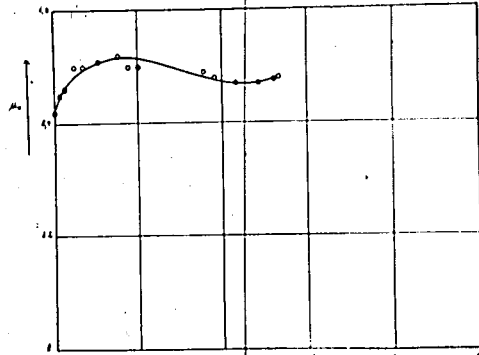


Abb. 22
Konzentrationsabhängigkeit der Brechzahl n_D von Methyl-
alkohol in Benzol

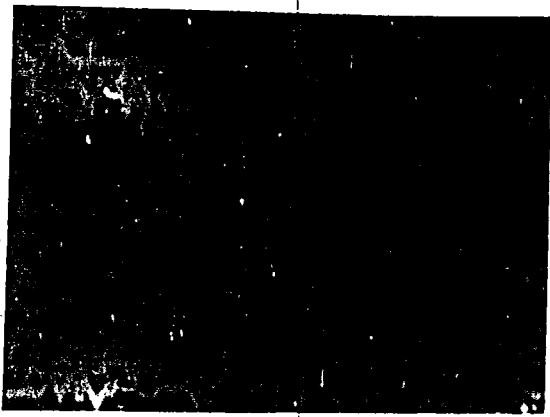


Abb. 23
Orientierte Aufwachsung von Kaliumjodid
auf Glimmer

265

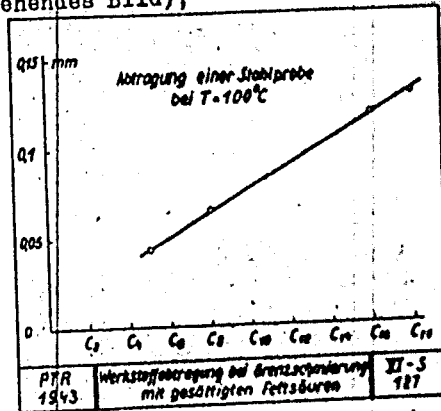
Hr. Heidebroek dankt den Herren für die Berichte und gibt der Hoffnung Ausdruck, daß die Untersuchungen von Hrn. Wolf manche Aufklärung über die noch ungeklärten Vorgänge der Grenzreibung bringen werden.

Zum Problem der "Haftreibung" gibt Hr. Barvel, Berlin, einen kurzen Bericht. Nähere Einzelheiten können erst Ende des Jahres gemacht werden, wenn die laufenden Untersuchungen weiter fortgeschritten sind.

Hr. Kluge, Berlin, gibt zu den Ausführungen des Hrn. Halder folgenden Beitrag:

Die von Hrn. Halder mitgeteilten Versuche an seiner Verschleiß-Prüfmaschine ergaben bei Verwendung aufgerauter Stahl-Gleitflächen in Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen der Reichsanstalt für ein Pottöl (Rüböl) eine wesentlich größere Werkstoffabtragung als für ein reines Zusatzfreies Mineralöl. Darüber hinaus ordnen sich die von Halder untersuchten Ester zwischen dem Rüböl und dem Mineralöl ein. Diese Einordnung ist nach den Untersuchungen der Reichsanstalt ein besonderes Kennzeichen für den Zustand der Grenzschmierung, der offenbar durch die Aufrauung der Stahlgleitfläche bei der genannten Verschleißprüfmaschine nahezu vollkommen erreicht ist.

Neuere Untersuchungen der Reichsanstalt an chemisch einheitlichen Stoffen zeigen nun, daß die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung sehr stark von der polaren Natur des jeweiligen Schmiermittels abhängt. So ergaben die gesättigten Fettsäuren eine größere Werkstoffabtragung als die entsprechenden Alkohole, und diese wiederum führen zu größeren Werten als die Kohlenwasserstoffe. Außerdem wurde ein deutlicher Einfluß der Kettenlänge festgestellt. Messungen an dem Werkstoffpaar Stahl-Stahl ergaben z.B., daß die Werkstoffabtragung bei den homologen gesättigten Fettsäuren mit der Kettenlänge zunimmt (vgl. nebenstehendes Bild),



während bekanntlich die Reibungszahl mit der Kettenlänge zunimmt. Die Beobachtungen über die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung stehen nun offenbar in einem gewissen Zusammenhang.

menhang mit den Untersuchungen, wie sie von Engelhard über Schleifhärte von Quarz bei verschiedenen Schleifflüssigkeiten durchgeführt hat. Wahrscheinlich kann unter gewissen Voraussetzungen die Abtragung metallischer Werkstoffe bei Grenzschmierung ebenso als ein Vorgang aufgefaßt werden, wo fortgesetzt Benetzungsarbeit an den neu gebildeten Abriebsstellen aufgebracht werden muß, die aber umso kleiner ist, je kleiner die Grenzflächenspannung des Systems Flüssig - Fest ist. Somit ist verständlich, daß polare Schmiermittel bzw. Schmiermittelzusätze eine größere Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung ergeben als unpolare. Andererseits scheint der Einfluß der Kettenlänge innerhalb einer homologen Reihe für die Wirkung der unterschiedlichen Grenzflächenaktivität zu sprechen. Die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung ist somit nicht nur technisch von großer Bedeutung, sondern ist wird auch geeignet sein, den physikalisch-chemischen Grundvorgang der Schmierung wesentlich aufzuklären. Wieweit die vorstehenden Überlegungen eine allgemeinere Gültigkeit haben, wird zur Zeit in der Reichsanstalt durch entsprechende Versuche an anderen Werkstoffen überprüft. Außerdem muß noch beachtet werden, daß bei dem technischen Schmiervorgang auch mikrochemische Wirkungen zwischen dem Schmiermittel bzw. Zusatz und dem Lagerwerkstoff eine Rolle spielen.

Um die verschiedenen Schmiermittel-Prüfvorrichtungen genauer in ihrer Wirkung zu erfassen, wurde bereits auf der letzten Ausschusssitzung am 4.3.1943 vorgeschlagen, Vergleichsvorgänge mit den sogenannten H-Ölen durchzuführen. Mit Rücksicht auf die vorstehend kurz beschriebenen Versuche wäre zu erwägen, ob man die genannten Vergleichsöle noch durch bestimmte chemisch-einheitliche Stoffe ergänzen soll.

Hr. Seelich, Berlin, weist auf die Arbeit von Engelhard in der Kolloid-Zeitschrift Heft 101/1943 hin und glaubt, daß der Teilchenabstand abhängig ist vom molekularen Kraftfeld im Sinne der Engelhard'schen Ausführungen. Versuche über das Sedimentvolumen von Eisenpulver in verschiedenen Suspensionsmitteln haben gezeigt, daß das Sedimentvolumen eines Pulvers in Hexan oder Heptan durch Zusatz von gewissen Stoffen beeinflusst werden kann und zwar im Sinne einer Verminderung des Volumens. So vermindern 4 Spuren von Stearinsäure das Volumen um bis zu 25%. Alkohol hat einen geringen Effekt in der Größenordnung von 3%.

Hr. Heidebrock dankt den Herren für ihre Ausführungen und stellt die Aufgabe, zu überlegen, ob an eine Gesetzlosigkeit für gewisse verwandte Stoffe ohne weiteres geglaubt werden kann. Die Reibungsschwierigkeiten wären zu klären, ebenso die Veränderlichkeit der Metalle. Hr. Heidebrock stellt dann fest, daß die Gedanken sich immer mehr von dem Problem der Schmierung auf das Problem des Verschleißes hinüberschieben und u.U. eine Kollision mit dem von Hrn. Siebel getätigten Verschleiß-Ausschuß entstehen könne.

Hr. Siebel möchte auf alle Fälle Doppelarbeit vermieden wissen. Die Arbeiten sollen möglichst zusammengefaßt werden. Es könnte für die beiden Ausschüsse eine Trennung gemacht werden zwischen der Trockenreibung, die sehr stark in Ver-

schleißausschuß verfolgt wird, und dem Verschleißproblem bei der reinen Ölschmierung.

Hr. Philippovich verweist auf die Ausführungen von Hrn. Halder und ist der Meinung, daß die Trennung nicht ohne weiteres einzuhalten sei und es notwendig ist, auf die Erfassung der Prüfmaschinen die Aufmerksamkeit zu richten, diese zu vergleichen und einheitliche Prüfmethoden aufzustellen.

Am Nachmittag hielt Herr. Kramer folgendes Referat:

"Die nichtmetallische Phase bei den Metallen und die Beilby-Schicht"

Inhaltsangabe:

1. Einleitung: Die Oberfläche der Metalle.
2. Die nichtmetallische Phase und die Beilby-Schicht.
3. Die nichtmetallische Phase in den Gleitebenen.
4. Nachweis der nichtmetallischen Phase durch die Umwandlungsenergie.
5. Die nichtmetallische Phase im Gleitlager.
6. Schluß: Der metallische Zustand.

1. Einleitung: Die Oberfläche der Metalle. Die Ansichten über den Zustand der Oberfläche der Metalle und seine Veränderung durch die Bearbeitung sind immer noch geteilt, obwohl in den letzten Jahren mit den modernsten Hilfsmitteln intensiv an diesem Problem gearbeitet worden ist. In Deutschland vor allem neigt man dazu, die Besonderheiten an der Oberfläche der Metalle durch Oxydation, Gasadsorption oder andere chemische Vorgänge, im wesentlichen also durch Fremdatome zu erklären, während in England und Amerika anscheinend überwiegend die Ansicht vertreten ist, der Aufbau der Oberfläche des Metalle unterscheide sich von dem im Innern. Beilby hat die Behauptung aufgestellt, daß sich beim Bearbeiten der Metalloberfläche, besonders also beim Polieren eine amorphe Oberflächenschicht bildet, die etwa als fest-flüssig anzusehen sei.

2. Die nichtmetallische Phase der Metalle und die Beilby-Schicht. Ich bin von einer andern Seite an dieses Problem herangeführt worden, und zwar von den dünnen Metallschichten her, an denen besonders der Hall-Effekt untersucht werden sollte. Es stellte sich bei diesen Untersuchungen heraus, daß sich jedes Metall unter geeigneten Bedingungen in eine nichtmetallische Phase abbauen läßt, die den elektrischen Strom nicht leitet. Weiter stellte sich heraus, daß diese anomale Phase - genügend dicke Schichten vorausgesetzt - bei einer für jedes Metall charakteristischen Temperatur, der Umwandlungstemperatur, in das normale Metall übergeht. Die dabei auftretenden Leitfähigkeits sprünge können bis 8 Größenordnungen betragen und müssen im Idealfalle noch weit größer sein. Das Verhalten des Selen oder des Antimons oder anderer Halbmetalle, bei denen solche

Umwandlungen schon bekannt waren, ist also keine Besonderheit, sondern eine allgemeine Eigenschaft des metallischen Zustandes. Die nichtmetallische Phase des Silbers und die des Tellurs beispielsweise unterscheiden sich nur durch die verschiedenen Schwierigkeiten bei der Herstellung. Je besser der metallische Charakter eines Elements ausgebildet ist, desto schwieriger ist die Herstellung der nichtmetallischen Phase, und die Umwandlungstemperatur liegt um so tiefer, je besser das Metall den elektrischen Strom leitet.

Bei meinen ersten Untersuchungen habe ich die anomale Phase "amorph" genannt, erstens, weil die schon bekannten anomalen Phasen der Halbmetalle unter dieser Bezeichnung angegeben wurden, zweitens, weil Röntgenaufnahmen an den durch Kathodenzerstäubung hergestellten Schichten keine Linien zeigten. Ich hoffe aber, daß in dieser Angelegenheit noch nicht das letzte Wort gesprochen ist, vielmehr ist anzunehmen, daß auch in dieser Phase die doch vorhandenen Kräfte bei entsprechender Behandlung zu einem geordneten Aufbau ausreichen. Vorläufig ist diese Frage noch unwesentlich, das Wesentliche ist, daß diese Phase nichtmetallisch ist und sich grundsätzlich im Aufbau und in den Eigenschaften vom normalen Metall unterscheidet.

Weiter habe ich dann die Behauptung aufgestellt, daß der Abbau des normalen Metalls zur nichtmetallischen Phase auch durch mechanische Bearbeitung möglich ist, und daß daher die Beilby-Schicht mit dieser Phase identisch ist. Meine Aufgabe bei diesem Problem war also, zu zeigen, daß die Beilby-Schicht die Eigenschaften besitzt, wie ich sie an meinen nichtmetallischen Schichten, die hauptsächlich durch Kathodenzerstäubung gewonnen waren, gefunden hatte, und besonders, daß auch die Beilby-Schicht durch Erwärmen auf eine für jedes Metall charakteristische Umwandlungstemperatur in das normale Metall übergeführt werden kann.

Untersuchungen dieser Art, die sich auf Leitfähigkeitsmessungen bezogen, wurden an polierten Platinfolien und Platinstiften ausgeführt. Ein langer polierter Platinstift kann durch diese Bearbeitung oberflächlich so weitgehend in den nichtmetallischen Zustand übergeführt werden, daß er bis zu beträchtlichen Voltzahlen technisch isoliert. Beim Erwärmen über die Umwandlungstemperatur, die bei Platin bei 230°C liegt, hört das hohe Isolationsvermögen irreversibel auf. Es sei erwähnt, daß auch das gefürchtete Kontaktrauschen sicher zu einem Teil auf die Bildung der nichtmetallischen Phase im Betrieb selbst durch die gegenseitige Bearbeitung der Kontaktflächen zurückzuführen ist. Die am Kontakt liegende Spannung schwankt zwischen der Durchschlagsspannung der nichtmetallischen Schicht und dem Spannungsabfall in der sich beim Durchschlag bildenden Brücke hin und her, da diese Brücke immer wieder durch Bewegungen in atomaren Dimensionen zerstört wird. Diese Verhältnisse lassen sich auch makroskopisch in einer nichtmetallischen Kohleplatte, die übrigens isoliert wie Glas, reproduzieren. Eine technische Anwendung hat die nichtmetallische Oberflächenschicht schon vor Jahren

im Fritter gefunden, bei dem das Isolationsvermögen bis zu einer bestimmten Spannung zum Nachweis elektrischer Wellen benutzt wurde. Ein kleiner Versuch möge die Wirksamkeit der nichtmetallischen Phase im Fritter näher dartun, (Abb. 1) In einer ausgepumpten und abgeschmolzenen Apparatur aus Janssen Glas können Nickelspäne im Rohr links erhitzt werden, in der Kugel in der Mitte nach Art der Kugelmühle mit Nickelkugeln bearbeitet und im Fritter rechts auf Leitfähigkeit untersucht werden. Die erhitzten Nickelspäne zeigen keine Fritterwirkung, schon bei den kleinsten Spannungen fließt ein Strom, Kurve a. Wird jetzt das Gut in der Kugelmühle eine Stunde bearbeitet, ist die Fritterwirkung ausgezeichnet: bis 6,5 Volt fließt kein Strom, oberhalb dieser Spannung kommt es zum Durchschlag der nichtmetallischen Oberflächenschicht, so daß dann auch bei kleinen Spannungen ein Strom fließt, bis durch Erschütterungen die Strombahn unterbrochen wird. Durch Erwärmen kann diese nichtmetallische Schicht wieder zum Verschwinden gebracht werden, wodurch auch die Fritterwirkung verschwindet, Kurve c. Auch durch Stehenlassen kommt eine Fritterwirkung nicht wieder zustande, Kurve d, es ist nur eine Verschiebung zu beobachten, die auf Adsorption der Gasreste zu schieben sein wird, aber der Strom setzt schon bei kleinen Spannungen ein. Man kann übrigens die geschilderten Verhältnisse auch makroskopisch reproduzieren, indem man an eine mehrere Millimeter dicke Platte aus nichtleitendem Kohlenstoff, der mit der nichtmetallischen Phase der Metalle identisch ist, eine entsprechend hohe Spannung legt. Auch dann bilden sich beim Durchschlag leitende Brücken, die durch Erschütterungen unterbrochen werden. Die nichtmetallische Phase des Kohlenstoffs leitet den elektrischen Strom nicht besser als Glas, die Umwandlungstemperatur, bei der die metallische Phase, das ist der Graphit, auftritt, liegt bei 600°C. Es bestehen keine prinzipiellen Unterschiede etwa in der nichtmetallischen Oberflächenschicht des Nickels oder der nichtmetallischen Phase des Kohlenstoffs.

3. Die nichtmetallische Phase in den Gleitebenen. Die hier geschilderten Versuche und weitere Ergebnisse an dünnen Schichten und an der Oberfläche der Metalle zeigen, daß die Beilby-Schicht existiert, aber sie ist ganz etwas anderes, als das was sich Beilby und andere darunter vorgestellt haben. Wenn man sich dabei nur auf Versuche an der Oberfläche der Metalle berufen könnte, bestände immer noch die Möglichkeit, alle Anomalitäten auf Gasbeladung, Oxydation oder andere Erscheinungen zurückzuführen, die Oberfläche ist immer noch ein sehr unerforschtes Gebiet. Nun hat man aber gerade bei den Metallen die Möglichkeit, sich von diesen Schwierigkeiten weitgehend frei zu machen. Man kann die Bearbeitung eines Metalles nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Innern in den Gleitebenen vornehmen. Zwar ist die nichtmetallische Phase in engem Kontakt mit dem normalen Metall immer instabil, so daß auch unterhalb der Umwandlungstemperatur ein allmählicher Übergang in den normalen Zustand stattfindet, da aber diese Umwandlung bei genügendem Abstand von der Umwandlungstemperatur nur langsam vor sich geht, müßte bei

intensiver Bearbeitung der Metalle in den Gleitbahnen die nichtmetallische Phase an einer Unstetigkeit bei der Umwandlungstemperatur nachgewiesen werden können.

Versuche zu diesem Punkt wurden mit Nickel vorgenommen, das bis zum Zerrreißen des Materials gewalzt wurde. Anschließend wurde das gewalzte Blech bei verschiedenen Temperaturen in Paraffinöl angelassen und jedesmal der Widerstand in Eis bestimmt. Das Ergebnis dieser Versuche ist in Abbildung 2 wiedergegeben. Die früher an dünnen Schichten bestimmte Umwandlungstemperatur tritt auch hier in einem Knick in die Erscheinung. Es ist auch der instabile Anteil an einer kleinen Leitfähigkeitsverbesserung unterhalb der Umwandlungstemperatur zu erkennen.

Weit intensiver müßte sich in den Gleitbahnen der Metalle die nichtmetallische Phase dann bilden, wenn die Bearbeitung nicht durch plastische Verformung, sondern durch Wechselbeanspruchung vorgenommen wird. Wir kommen damit zu dem technisch außerordentlich wichtigen Gebiet der Wechselfestigkeit, also der Tatsache, daß ein Metall bei wechselnder Belastung nur einen Bruchteil der Belastung beim statischen Zerrversuch aushält. Dieses Gebiet, auf dem bisher nur sehr wenig physikalisches Material vorliegt, gehört zu den wichtigsten der Technik überhaupt, da fast alle Brüche in der Praxis Ermüdungsbrüche infolge Werkstoffzerrüttung durch Wechselbeanspruchung sind. Unsere Folgerungen bezüglich der nichtmetallischen Phase bei Wechselbelastung wurden an wechselorderten Eisenproben geprüft, und zwar in gleicher Weise wie an der plastisch verformten Nickelprobe. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 zu sehen, die sowohl den instabilen Anteil als auch die Umwandlungstemperatur und damit das Bestehen der nichtmetallischen Phase erkennen läßt.

Mit diesen Versuchen ist aber noch nicht erwiesen, daß die nichtmetallische Phase auch für die technisch allein interessierende Wechselfestigkeit verantwortlich ist, sie könnte eine belanglose Nebenerscheinung sein. Wenn sie auch für die Werkstoffzerrüttung, also den Ermüdungsbruch verantwortlich ist, müßte die Umwandlungstemperatur auch in der Temperaturabhängigkeit der Wechselfestigkeit in die Erscheinung treten. Auf diesem Gebiete liegen schon genügend Messungen für Eisen und Stahl vor, um diese Folgerung zu prüfen. In der Abbildung 4 ist die Temperaturabhängigkeit der Wechselfestigkeit für zwei Stahlsorten nach einer Tabelle aus dem Handbuch der Werkstoffprüfung Bd. 2, herausgegeben von Siebel, angegeben. Das Minimum kommt mit einer Deutlichkeit zum Ausdruck, die nichts zu wünschen übrig läßt, auch wenn der scharfe Knick experimentell nicht faßbar sein sollte. Nachgeprüft wurde dieser Befund - allerdings nach einem abgekürzten Verfahren - an Nickel, und auch dort zeigt die Wechselfestigkeit bei der Umwandlungstemperatur ein sehr ausgeprägtes Minimum bei der Umwandlungstemperatur, wie Abbildung 5 zeigt. In noch stärkerem Maße kommt die überragende Bedeutung der Umwandlungstemperatur und damit der nichtmetallischen Phase auch für die technischen Eigenschaften des Stahls dann zum Ausdruck, wenn das Verhältnis von Wechselfestigkeit

zu statischer Festigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen wird, wie es ebenfalls nach einer Tabelle des Handbuchs der Werkstoffprüfung in Abbildung 6 geschehen ist. Nach derselben Quelle ist in Abbildung 7 die Dehnung bei einer Schwellbelastung in Abhängigkeit von der Temperatur wiedergegeben. In der Nähe der Umwandlungstemperatur verhält sich der Stahl unter den angegebenen Verhältnissen beinahe wie ein spröder Körper.

4. Nachweis der nichtmetallischen Phase durch die Umwandlungsenergie. Nach diesen Versuchen kann man wohl sicher schließen, daß die nichtmetallische Phase der Metalle - man stoße sich nicht an dem im Wortgebrauch liegenden Widerspruch - existiert und daß sie sowohl an der Oberfläche als auch im Innern in den Gleitebenen von größter technischer Bedeutung ist. Alle diese Untersuchungen, die sich auf die nichtmetallische Phase in engster Nachbarschaft zum normalen Metall beziehen, sind ausserordentlich dadurch erschwert, daß die Eigenschaften des normalen Metalls die des kleinen Anteils an nichtmetallischer Phase sehr leicht überdecken. Das ist der Fall bei Leitfähigkeitsmessungen, bei Röntgenaufnahmen und auch bei Elektrodenbeugungsversuchen. Es gibt unter diesen Umständen keine genügend empfindliche Methode zum Nachweis der nichtmetallischen Phase. Das ist auch der Grund dafür, daß sich diese Phase so lange der Auffindung entziehen konnte. Durch Zufall bin ich auf eine Methode gestoßen, deren Empfindlichkeit nicht mehr zu überbieten ist, da sie kleinste Bereiche an nichtmetallischer Phase nachweisen kann, ohne daß das normale Metall stört. Der Übergang vom nichtmetallischen zum normalen Zustand ist ein stark exothermer Vorgang, wie schon die Bezeichnung "explosibles" Antimon besagt. Es hat sich nun herausgestellt, daß ein Geiger-Spitzenzähler und das Zählrohr auf die bei der Umwandlung freiwerdende Energie ansprechen, und zwar durch Abgabe von Elektronen und Quanten. Wenn auch die genaue physikalischen Vorgänge dabei noch nicht geklärt sind, so läßt sich auf Grund dieser Beobachtung ein ideales Gerät zum Nachweis der nichtmetallischen Phase herstellen.

Bekanntlich besteht der Spitzenzähler aus einem Gehäuse, in das isoliert eine "Spitze" eingeführt ist, die gewöhnlich aus einem dünnen Platin-Draht mit angeschmolzener Kugel besteht. Es wird dann an das Gehäuse und die Spitze eine je nach Gasfüllung und Druck verschieden hohe Spannung angelegt, so daß ein Überschlag gerade nicht eintritt. Wird nun ein Elektron, ein Quant oder ein anderes ionisierend wirkendes Teilchen hereingeschossen, entsteht ein Stromstoß, der im Elektrometer direkt nachgewiesen werden kann, oder der über einen Verstärker einem Lautsprecher oder einem Registriergerät zugeleitet wird. Beim Zählrohr liegt die Spannung zwischen einem Rohr und einem axial ausgespannten Draht. Wird die Umwandlung der nichtmetallischen Phase in diesen Geräten vorgenommen, so kann man aus der Zahl der Stromstöße, die bei unsern Versuchen als Ausschläge im Elektrometer und als Knacke im Lautsprecher nachgewiesen wurden, auf den Zustand der Schicht oder der Oberfläche schließen.

M T I E
Y A FILM

In einigen Beispielen soll jetzt gezeigt werden, in welcher Weise die neue Methode für Metalluntersuchungen eingesetzt werden kann und welche Ergebnisse die ersten Versuche damit gezeitigt haben. Für die hier beschriebenen Versuche wurde der Spitzenzähler benutzt. Die Gasfüllung bestand aus Wasserstoff von etwa 10 cm Hg, die Spitze war positiv. Ihr gegenüber befand sich die zu untersuchende Platte, die mit einem kleinen elektrischen Ofen erwärmt werden konnte. Die Temperatur wurde mit einem Thermoelement gemessen.

In der Abbildung 8 ist für Eisen und Nickel die Zahl der Ausschläge in Abhängigkeit von der Temperatur der Platte angegeben. Die Oberfläche dieser Metalle war durch Schmiegeln und Polieren mit dem Polierachatschiff bearbeitet worden. Man erkennt, daß mit dem Überschreiten der Umwandlungstemperaturen ein starker Anstieg der Ausschlagszahlen verbunden ist, ein Zeichen für das Bestehen einer nichtmetallischen Oberflächenschicht. Beim Nickel erkennt man weiter noch einen kleinen Anteil an instabiler Mischung mit normalem Metall, wie aus dem kleinen Anstieg schon unterhalb der Umwandlungstemperatur zu entnehmen ist. In der Abbildung 9 ist dieselbe Messung für bearbeitetes Antimon wiedergegeben. Auch hier ist der Anstieg sehr deutlich, aber die Unterschiede vor und nach der Umwandlungstemperatur sind nicht so groß wie beim Eisen und Nickel. Obwohl gerade Antimon in dünnen Schichten besonders leicht in den nichtmetallischen Zustand übergeführt werden kann, läßt es sich durch mechanische Bearbeitung an der Oberfläche des massiven Metalls nur schwer in diesen Zustand bringen, da das spröde Metall bei der Bearbeitung wegsplittert. Diese Messungen bestätigen also die früheren Ergebnisse, die sich auf dünne Schichten und die Oberfläche des normalen Metalls bezogen und im allgemeinen durch Leitfähigkeitsbestimmungen ausgeführt wurden, auf das Beste.

Die Methode wurde weiter benutzt, den Einfluß einer technischen Bearbeitung der Oberfläche auf das Metall zu untersuchen, ein Gebiet, dem in dieser Beziehung bisher überhaupt nicht beizukommen war. In der Abbildung 10 ist zum Beispiel eine gedrehte Eisenplatte untersucht, die besagt, daß durch diese Bearbeitung sowohl eine instabile Mischung von normalem Metall mit der nichtmetallischen Phase entsteht, als auch eine nichtmetallische Phase, die beim Erreichen der Umwandlungstemperatur in das normale Metall übergeht. Der instabile Anteil würde auch ohne Erwärmen verschwinden, wenn lange genug gewartet würde, die Kurve würde dann etwa die Form der gestrichelten annehmen. Die Abbildung 11 zeigt Beispiele dafür, daß einmal der instabile Anteil überwiegen kann, das andere Mal die bis zur Umwandlungstemperatur stabile nichtmetallische Phase. Der Unterschied zwischen geschmiegelten, sandgestrahlten und gelappten Platten ist bei diesen Versuchen nicht sehr groß.

Die nächste Abbildung 12 deutet eine weitere Möglichkeit für Anwendung des Spitzenzählers für Metalluntersuchungen an, wobei sich ebenfalls ganz neue und überraschende Effekte ergaben. Bei diesem Versuch ist eine Kupferplatte geschmiegelt

und dann möglichst schnell in den Spitzenzähler eingesetzt. Die Zahl der Ausschläge ist ohne Temperaturerhöhung zunächst sehr groß, sie nimmt aber zunächst schnell, später mit einer "Halbwertszeit" von etwa 35 Stunden ab. Ein Metall, das in irgend einer Weise bearbeitet wird, "lebt" also noch nach Tagen. Wird eine so bearbeitete und "abgeklungene" Kupferplatte in Spitzenzähler erwärmt, steigt die Zahl der Ausschläge mit steigender Temperatur wieder an, wie in der Abbildung 13 angegeben ist.

Bei den bisher beschriebenen Versuchen findet die Untersuchung im Spitzenzähler nach der Bearbeitung statt. Es besteht natürlich auch die Möglichkeit, während der Bearbeitung ein Metall im Spitzenzähler oder im Zählrohr zu untersuchen. Die Effekte müßten dann noch größer sein, oder es lassen sich noch kleinere Bearbeitungen nachweisen. Wie schon oben gesagt wurde, soll sich auch bei plastischer Verformung die nichtmetallische Phase bilden, die in Gegenwart des normalen Metalls weitgehend instabil ist. Es liegt nahe, diese Behauptung auch im Spitzenzähler zu prüfen. Zu dem Zwecke wurde eine Kupferfolie im Spitzenzähler durch eine Schraubspindel zerrissen. Wie die Abbildung 14 zeigt, ist tatsächlich bei einer bestimmten Belastung ein starkes Ansteigen der Ausschlagszahlen zu beobachten. Unerwarteter Weise fällt aber der Effekt schon weit vor dem Bruch wieder ab. Es ist anzunehmen, daß das Maximum mit der Hauptverformung im untersuchten Gebiet vor der Spitze im Spitzenzähler zusammenfällt. Um zu zeigen, daß der Effekt auch bei der technisch weit wichtigeren Wechselbelastung auftritt, wurde ein Spitzenzähler in eine kleine Torsions-Wechselbelastungsmaschine eingebaut und die Zahl der Ausschläge in Abhängigkeit von der Belastung an einem Kupfer-Probestab bestimmt. Auch hier stellte sich heraus, daß die Zahl der Ausschläge beim Überschreiten einer bestimmten Belastung ansteigt, wie Abbildung 15 wiedergibt. Die beiden letzten Versuche lassen erkennen, daß der Effekt vielleicht geeignet ist, auch im Betrieb zur Überwachung der metallischen Werkstoffe eingesetzt zu werden.

5. Die nichtmetallische Phase im Gleitlager. Die Oberfläche der Metalle ist in der Praxis den verschiedensten Einflüssen ausgesetzt. Es liegt jetzt nahe, für alle diese Fälle den Spitzenzähler oder das Zählrohr einzusetzen, um über die Vorgänge an der Oberfläche Klarheit zu bekommen. Für die Arbeitsgruppe "Schmiertechnik" ist vor allem die Frage wichtig, wie verändert sich die metallische Oberfläche im Gleitlager unter den verschiedensten Bedingungen. Schon auf diesem einzelnen Gebiet gibt es eine unübersehbare Fülle von Fragen, für die die neue Methode eingesetzt werden könnte. Aus zeitbedingten Umständen heraus konnte bisher auch diesem Gebiete nicht näher getreten werden, so daß nur in einigen Beispielen die Möglichkeiten bei diesen Untersuchungen angedeutet werden können.

Zunächst wurde eine Mercedes-Benz-Lagerschale untersucht, die nach 40000 km aus dem Pleuellager eines Lastwagens ausgebaut war und schon einige Zeit gelegen hatte. Die Zahl der Ausschläge im Spitzenzähler in Abhängigkeit von der Temperatur

der Platte ist in Kurve 1 der Abbildung 16 wiedergegeben. Bis zu einer bestimmten Temperatur - etwa 190°C - ist die Zahl der Ausschläge unabhängig von der Temperatur, beim Überschreiten dieser Temperatur setzt aber ein steiler Anstieg ein, ein Zeichen dafür, daß sich auf dem Gleitlager eine stabile nichtmetallische Oberflächenschicht gebildet hat. Wird die Lauffläche abgeschliffen, verschwindet der steile Anstieg bei 190°C, eine Temperatur, die man als die Umwandlungstemperatur der nichtmetallischen Phase anzusehen hat. Es bleibt nur ein kleiner Anstieg, der auf die Bearbeitung der Oberfläche durch das Abschleifen zu schieben sein wird.

Herr Professor Schmid hatte die Freundlichkeit, weitere Lager in seiner Prüfmaschine zu belasten und zur Untersuchung im Spitzenzähler einzuschicken. Aus dem ersten Lager wurden zwei Stücke herausgearbeitet, das erste mit, das andere ohne Laufspiegel. Das Ergebnis der Untersuchung im Spitzenzähler ist in Abbildung 17 angegeben. Die Stelle mit Laufspiegel zeigte wieder bei 190°C einen steilen Anstieg, während die Stelle ohne sichtbare Einwirkung der Lagerbelastung nur eine Andeutung für einen solchen Anstieg zeigt. Bei einem zweiten Lager, das aus demselben Material bestand, aber anders vorbehandelt war, hatte die Belastung in der Prüfmaschine keinen Laufspiegel, sondern Laufspuren erzeugt, die vielleicht auf ein Fressen zurückzuführen sind. Die Untersuchung im Spitzenzähler ergab für eine Stelle mit diesen Laufspuren keinen Anstieg bei 190°C, während eine Stelle aus demselben Lager ohne Laufspuren wieder bei derselben Temperatur einen steilen Anstieg zeigte. Bei diesen wenigen Beispielen hat also ein einwandfrei arbeitendes Lager immer ein Verhalten im Spitzenzähler gezeigt, das auf eine stabile nichtmetallische Oberflächenschicht schließen läßt. Wenn auch zu einer Verallgemeinerung noch sehr viele Messungen nötig sind, so ist doch denkbar, daß eine nichtmetallische Oberflächenschicht für das einwandfreie Arbeiten eines Lagers günstig ist. Sicher nicht zufällig verwendet man zu Lagermetallen besonders solche Metalle, die einen hohen Umwandlungspunkt haben, oder solche, die leicht in den nichtmetallischen Zustand übergeführt werden können. Die sogenannte Kaltverschweißung und sicher auch das Fressen eines Lagers ist auf die Umwandlung einer nichtmetallischen Oberflächenschicht zurückzuführen. Diese ist aber nur dann möglich, wenn die Betriebstemperatur die Umwandlungstemperatur überschreitet, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß durch Druck die Umwandlungstemperatur herabgesetzt wird.

Aus den angeführten Beispielen für das Verhalten eines Lagers im Spitzenzähler darf noch nicht geschlossen werden, daß der Zustand der Oberfläche, wie er in diesen Versuchen festgestellt wird, auch tatsächlich während des Betriebes vorhanden ist. Die angeführten Beispiele bezogen sich auf Untersuchungen, bei denen zwischen der Bearbeitung im Betrieb oder der Prüfmaschine und der Messung im Spitzenzähler eine längere Zeit verstrichen war. Wenn während des Betriebes neben der stabilen nichtmetallischen Phase eine instabile Mischung beider Metallphasen vorhanden wäre, würde dieser Anteil

874

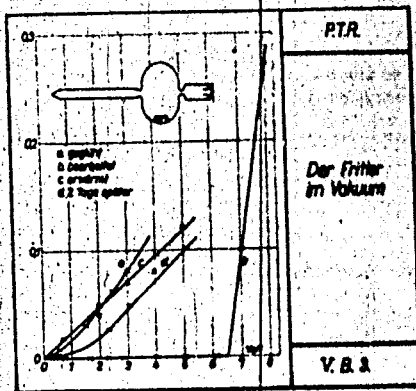


Bild 1

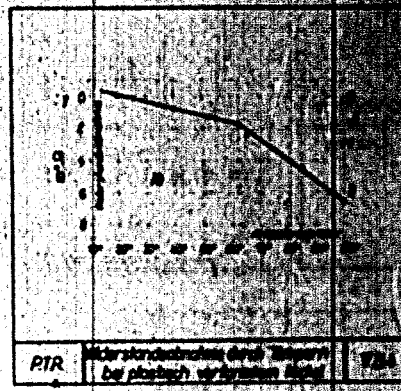


Bild 2

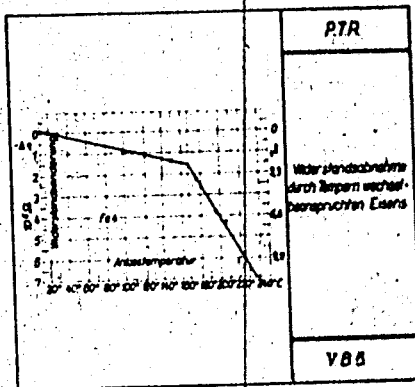


Bild 3

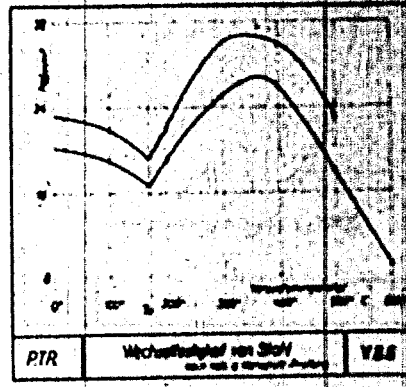


Bild 4

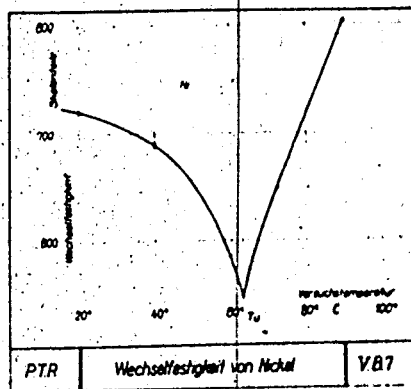


Bild 5

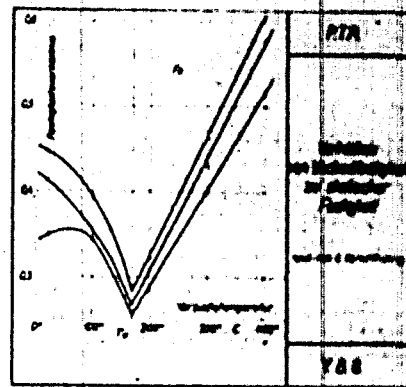


Bild 6

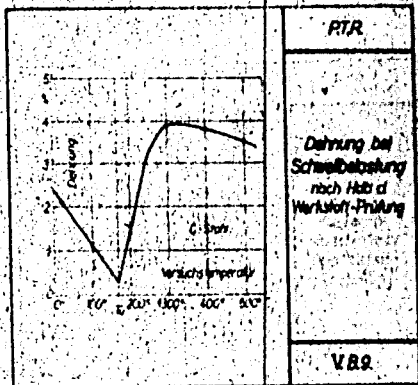
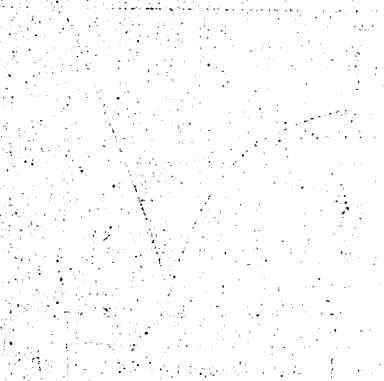
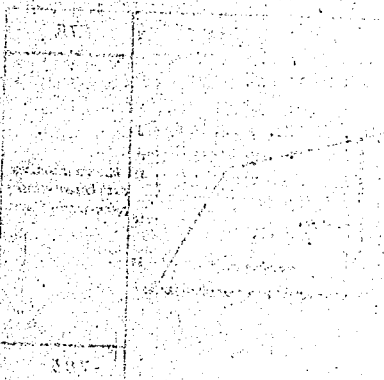
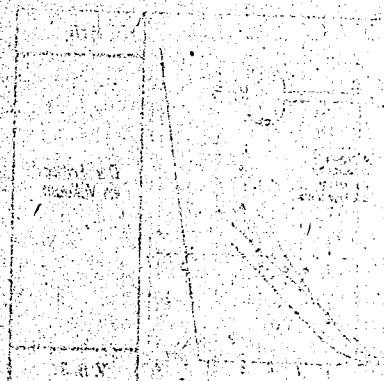


Bild 7

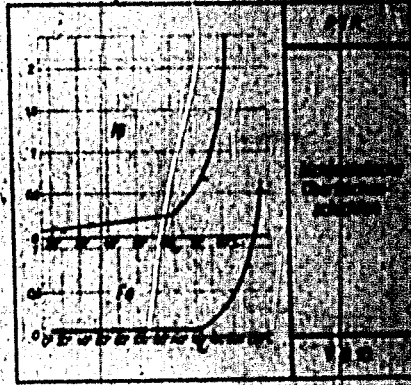


Bild 8

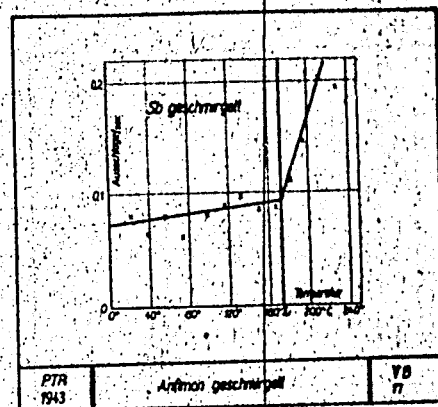


Bild 9

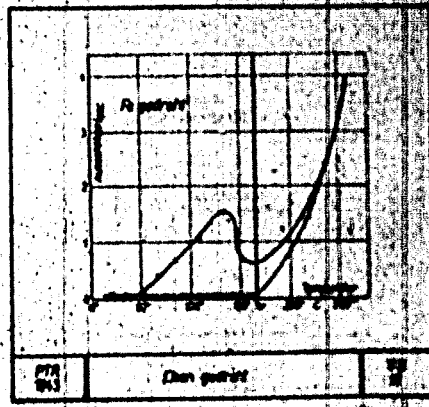


Bild 10

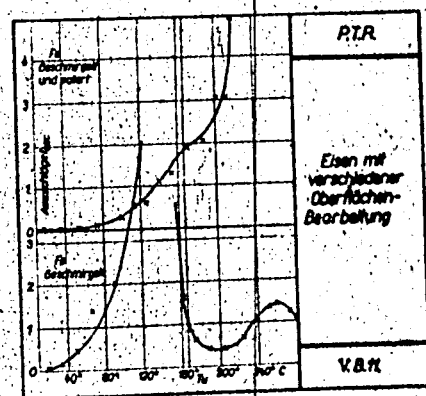


Bild 11

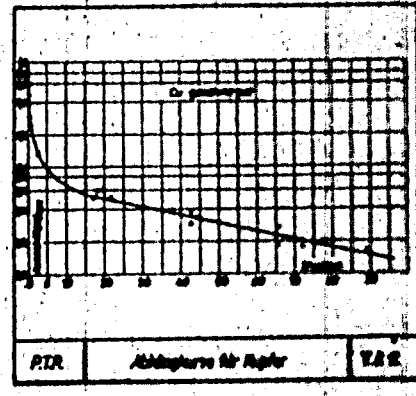


Bild 12

EASTMAN KODAK

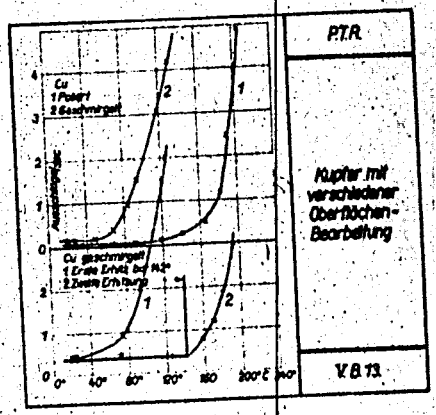
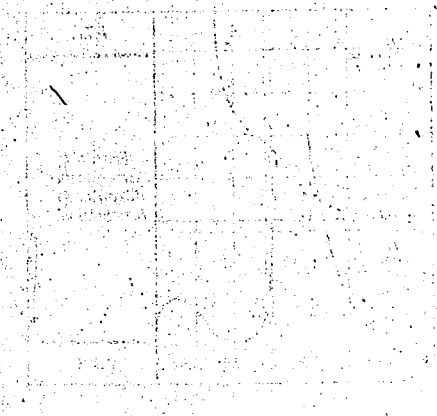
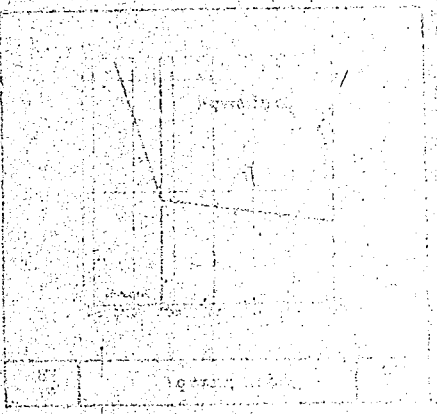
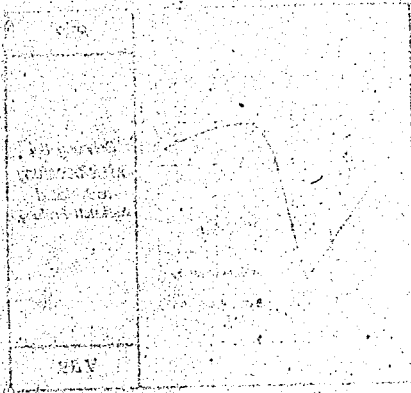


Bild 13

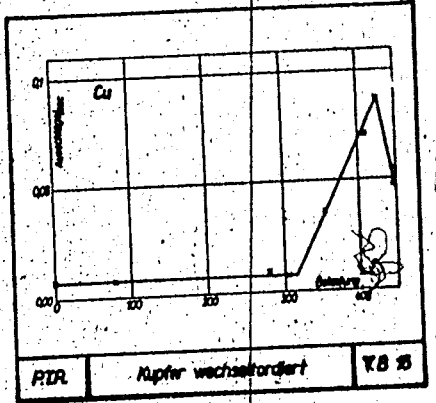


Bild 15

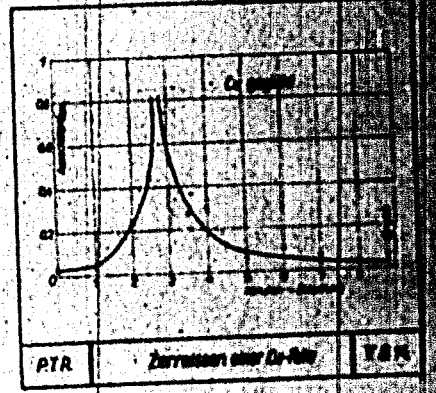


Bild 14

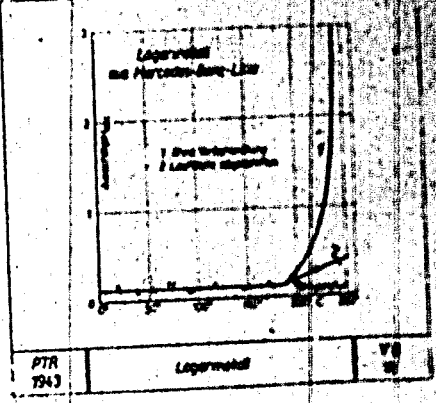


Bild 16

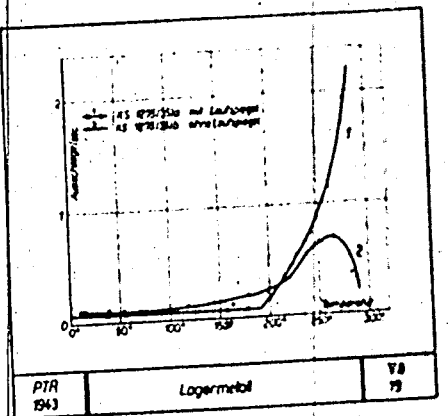


Bild 17

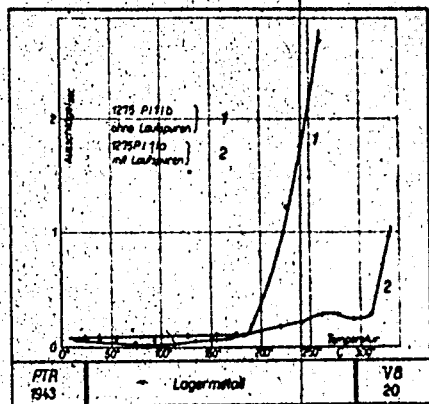
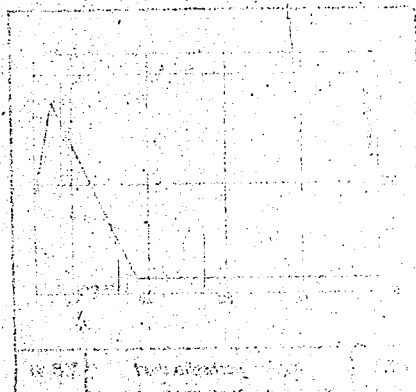
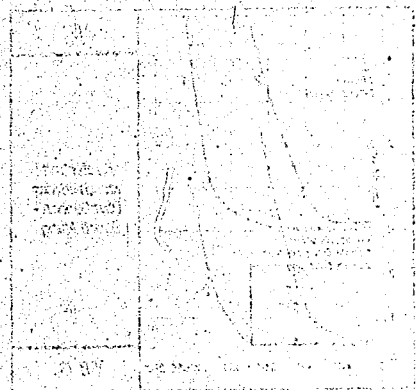


Bild 18

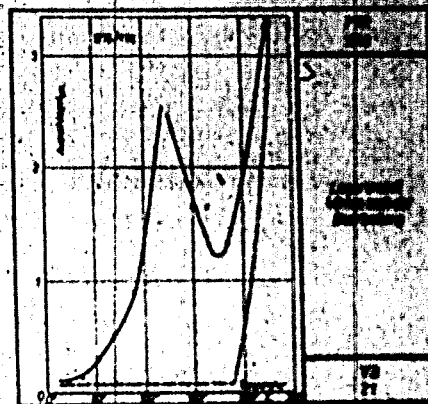


Bild 19

in der Zwischenzeit abgeklingen sein. Um festzustellen, ob bei der Bearbeitung im Lager auch die instabile Mischung entsteht, wurde ein Stück der zuletzt untersuchten Lager gegen eine rotierende Welle gedrückt und dann sofort nach der Belastung in Spitzenzähler untersucht. Das Ergebnis dieses Versuches ist in Abbildung 19 angegeben, die zeigt, daß schon unterhalb der Umwandlungstemperatur von 19000 ein starker Anstieg der Ausschlagszahlen wahrzunehmen ist. Es ist daraus zu schließen, daß schon während der Bearbeitung im Lager eine dauernde Bildung und Rückbildung beider Phasen stattfindet. Würde man nach der Belastung genügend Zeit verstreichen lassen, würde auch in diesem Falle die Kurve die Form der in Abbildung 19 gestrichelt wiedergegebenen Linie annehmen. Auch in diesem Falle erkennt man, daß das Metall auf jede Bearbeitung mit einem äußerst intensiven "Leben" reagiert und daß dieses "Leben" noch recht lange nach der Bearbeitung anhält.

6. Schluß: Der metallische Zustand. In dem vorliegenden Bericht sind die Erkenntnisse über die nichtmetallische Phase im wesentlichen dafür angewandt, um das Verhalten der Metalle in Besonderen an der Oberfläche während des Betriebes und bei der Bearbeitung zu studieren. Es ist natürlich selbstverständlich, daß unsere ganze Auffassung vom metallischen Zustand durch die Existenz der nichtmetallischen Phase grundlegend verändert wird. Ebenso nahe liegt es, daraufhin eine neues Bild vom metallischen Zustand aufzubauen. Es sei nur erwähnt, daß auch auf diesem Gebiete die neuen Erkenntnisse durchaus erfolgreich eingesetzt werden können. Zum Beispiel wurde auf Grund dieses Bildes der Supraleiter mit dem derzeit höchsten Sprungpunkt vorausgesagt und dann auch gefunden. Es dürfte damit die Hoffnung berechtigt sein, daß bei der Anwendung dieses Bildes für Theorie und Praxis noch weitere Erfolge erzielt werden können.

Hr. Heidebroek erinnert an die Hypothesen von Dr. Holm über das Wesen der Epilamenschicht. Die Mitglieder werden gebeten, einen schriftlichen Vorschlag über Begriffsbestimmungen, Reibung, Gleitreibung: Bewegung, Grenzreibung, Schwingreibung, gemischte Reibung, Grenzflächenreibung, Haftreibung bei Grenzreibung einzureichen.

Ferner wird noch auf die Arbeit von Lüpfer über Verschleißreibung hingewiesen.

Zum Schluß wurde von Hr. Dunken der Inhalt zweier Arbeiten über "Ordnungszustand in Flüssigkeiten"

vorgetragen, deren eine inzwischen veröffentlicht 1) und deren andere im Druck ist 2). Deshalb soll hier nur ein orientierendes Referat gegeben werden.

Werden zwei Flüssigkeiten gemischt, so ist das Volumen der Mischung im allgemeinen nicht gleich der Summe der

1) H. Dunken, Z. Phys. Chem. (B) 53 (1943) 264-279
2) In der gleichen Zeitschrift

280

Volumina der Bestandteile vor der Vermischung. Insbesondere beanspruchten Flüssigkeiten, deren Moleküle miteinander und untereinander in keine engere energetische Wechselwirkung treten (Assoziation und Solvataion) in Mischungen mehr Raum als unvermischt. Die Abweichungen des Molvolumens der Mischungen von der Summe der Volumina der unvermischten Bestandteile der Mischung hängen in typischer Weise von der Zusammensetzung der Mischung, als deren Maß der Molenbruch dient, ab. Abbildung 1 zeigt einige Beispiele. Über den Molenbruch c_1 sind die Differenzen $\Delta V = V_{M 12 \text{ exp}} - V_{M 12 \text{ add}}$ aufgetragen. $V_{M 12 \text{ exp}}$ ist das experimentell gefundene, $V_{M 12 \text{ add}}$ das aus den Anteilen der beiden Stoffe zusammengesetzte additive Molvolumen. Dieser Kurvenverlauf konnte nun auf Grund von Vorstellungen über die Struktur von Flüssigkeiten, die sich schon in anderem Zusammenhang bewährten³⁾, theoretisch abgeleitet werden. Die in Flüssigkeiten herrschende Ordnung besteht darin, daß jedes Molekül im Mittel von Raum und Zeit von einer bestimmten Anzahl von Nachbarn umgeben ist (Koordinationszahl), daß diese Ordnung sich aber nicht wie in Kristall streng periodisch in endlichen Bereichen fortsetzt. In flüssigen Mischungen der eingangs gekennzeichneten Art muß nun die Zusammensetzung der Nachbarschaft eines Moleküls der Zusammensetzung der Mischung gleich sein. Wenn man nun die Volumenaufweitung zwischen zwei verschiedenen Molekülen stattfinden läßt, so ist damit die Konzentrationsabhängigkeit der Aufweitung ΔX festgelegt und hat die Form

$$\Delta V = (c_1 - c_1^2) \cdot Z \cdot \delta V \quad (1)$$

wenn Z die Koordinationszahl und δV die je Mol in der Mischung vorhandener Berührungen von verschiedenartigen Molekülen auftretende Volumenzunahme bedeuten. Die ausgezogenen Kurven der Abb. 1 sind nach Gleichung 1 berechnet und verbinden die als Kreise eingetragenen Meßpunkte innerhalb der Fehlergrenze. Das Verhalten, das Flüssigkeitsmischungen hinsichtlich ihrer Raumbeanspruchung zeigen, konnte nun auch an Mischungen von Metallstücken verschiedener, aber einfacher Gestalt aufgefunden werden.

Die Abbildung 2 zeigt eine ^{solche} Mischung. Anhand solcher Bilderreihen konnte der Aufweitemechanismus studiert werden, der wahrscheinlich nur geringe Ähnlichkeit mit dem in Flüssigkeiten besitzt, trotzdem aber eine Aufweitung - Konzentrationsabhängigkeit ergibt, die dem gleichen Gesetz folgt. Das kommt daher, daß dieses Gesetz (Gleichung 1) von allgemeiner Bedeutung ist und in weniger spezialisierter Form aus einem morphologischen Ähnlichkeitsprinzip folgt, wie in der angeführten Arbeit eingehender gezeigt wurde.

3) H. Dunken, H. Klapproth u. K.L. Wolf, Kolloid - 2.91 (1940)232
K.L. Wolf, Theoretische Chemie; Teil 3 Leipzig 1943

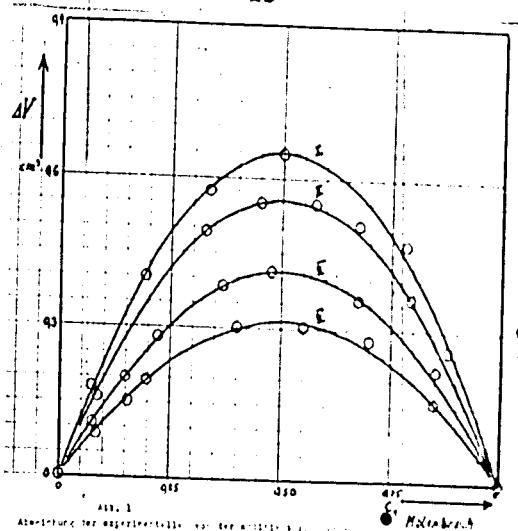


Abb. 1
Abhängigkeit von ΔV von der Molebruch x für die Mischungen:
Benzol - Benzol (I), Benzol - Benzol (II), Benzol - Benzol (III),
Benzol - Benzol (IV).

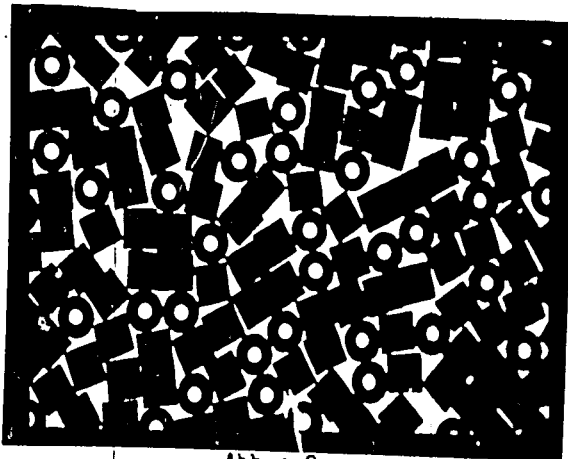


Abb.: 2
Mischung von Vierecken und Kreisen

Weiteres Vorgehen:

1. Die Mitglieder überlegen sich, ob aus den Halderschen Versuchen eine Gesetzmäßigkeit für gewisse verwandte Stoffe aufgestellt werden kann.
2. Die Mitglieder reichen einen schriftlichen Vorschlag über Begriffsbestimmungen ein.
3. Die nächste Sitzung wird voraussichtlich im Kaiser-Wilhelm-Institut, Berlin-Dahlem, stattfinden.

gez.: Heinebrock

gez.: Kraft

1000
200

Vertrauliche Mitteilung Nr. 11

*für die Mitglieder der Arbeitsgruppe „Schmiertechnik“
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI*



4
5

223

B e r i c h t

Über die Sitzung der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 29. Februar 1944 in Halle

Vorläufige Mitteilung Nr. 11
für die Mitglieder der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI

Zu beachten! Eine Veröffentlichung auch von Auszügen
oder Teilen des Berichtes, sowie Weiterleitung an Per-
sönlichkeiten ausserhalb des Dienstbereiches des Emp-
fängers bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des
Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

Inhaltsübersicht

	Seite
Zusammenfassung	3
1. Dr. Bartel	4
Aussprache	14
2. Dr. v. Philippovich	19
Aussprache	20
3. Dr. v. Philippovich u. Dr. Krienke	21
Aussprache	24
4. Dr. v. Philippovich	25
5. Dr. Seelich	27
Aussprache	30
6. Aussprache über Begriffsbestimmungen der Schmiertechnik	31

Verein deutscher Ingenieure im NSBET Berlin NW 7, im Juni 1944
FE Kr/Kl

Sitzungsbericht

Fachausschuss für Maschinenelemente

Arbeitsgruppe Schmiertechnik

Sitzung am 29. Februar 1944

Ort: Halle

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI, Dresden
zeitweise Prof. Wolf, Halle

Schriftführung: Dipl.-Ing. G. Kraft VDI, Berlin

Anwesend die Herren:

Bartel, Dr.	Kaiser-Wilhelm-Institut f. physikal. Chemie und Elektrochemie, Berlin-Dahlem, Faradayweg 4/6
Bussmann, Prof.	St.MPA, Berlin-Dahlem, Unter den Eichen 87
Dunken, Dr.	Institut f. physikal. Chemie d. Univ. Halle, Halle/Saale, Mühlpforte 1
v. Eiehorn, Dr.	Universität Göttingen
v. Engelhardt, Dr. phil.	Universität Göttingen
Farkert, Frl., Lab.	Kaiser-Wilhelm-Institut f. physikal. Chemie u. Elektrochemie, Berlin-Dahlem
Finger, Dipl.-Chem.	I.G. Farbenindustrie, Ludwigshafen
Gauditz, Frl.	Universität Halle
Glaser, Dipl.-Ing.	Deutsche Versuchsanstalt f. Luftfahrt, Berlin-Adlershof, Rudower Chaussee 16/25
Halder, Dipl.-Ing.	I.G. Farbenindustrie, Ludwigshafen
Holm, Dr.	Siemens-Schuckertwerke A.G., Berlin-Siemensstadt
Heidebroek, Prof. Dr.-Ing.	Technische Hochschule Dresden
Klemencic, Doz. Dr.-Ing. habil.	Technische Hochschule Graz
Kluge, Reg.-Rat Dr.	Physikalisch-Technische Reichsanstalt, Berlin-Charlottenburg, Werner-Siemens-Str. 8-12
Kraft, Dipl.-Ing.	VDI, Berlin
Krienke, Dr.-Ing.	Deutsche Versuchsanstalt f. Luftfahrt, Berlin-Adlershof
Metzger, Dipl.-Chem., Frl.	Universität Halle
Pfender, Dr.	AEG-Forschungsinstitut, Berlin-Oberschöneweide
v. Philippovich, Dr.	Deutsche Versuchsanstalt f. Luftfahrt, Berlin-Adlershof
Seelich, Dozent Dr.	Kaiser-Wilhelm-Institut f. physikal. Chemie u. Elektrochemie, Berlin-Dahlem
Vogelpohl, Dr.-Ing.	Kaiser-Wilhelm-Institut f. Stromungsforschung, Berlin NW 87; Franklinstr. 27/29
Weber, Dipl.-Ing.	Physikalisch-Techn. Reichsanstalt, Berl.-Charl., Werner-Siemens-Str. 8
Wolf, Direktor, Prof. Dr.	Institut f. physikal. Chemie der Universität Halle, Halle/Saale
Zorn, Dr.-Ing.	Ammoniakwerk Merseburg, Leuna/Krausmerseburg

Verhindert:

Fritz, Reg. Rat, Dipl.-Ing.	Physikalisch-Techn. Reichsanstalt, Berl.-Charl., Werner-Strasse 11
Brandt, Dr. Prof. Dr.-Ing.	KWI f. Strömungsforachung, Göttingen
Siebel, Präsident, Prof. Dr.-Ing.	St.MPA, Berlin-Dahlem
Stuart, Prof. Dr.	T.H. Dresden
Thiessen, Prof. Dr.	KWI f. physik. Chemis u. Elektrochemie, Berlin-Dahlem, Faradayweg 47c
Fewerka, Prof. Dr.-Ing.	T.H. Stuttgart

Zusammenfassung.

In Vertretung von Hrn. Prof. Heidebrock, der wegen Erkrankung erst später eintraf, eröffnete Hr. Prof. Wolf die Sitzung. Er wies darauf hin, dass die in Angriff genommene Arbeit der vergangenen Zeit und Mühe wert sei und dass sich insbesondere hinsichtlich des chemischen Anteils des Schmierproblems schon wertvolle Ergebnisse abzeichnen. Die Sitzung wurde durch Fliegeralarm unterbrochen, konnte jedoch in einem Luftschutzbunker fortgeführt werden, so dass kein allzu grosser Zeitverlust entstand. Innerhalb dieser die Schlusssprache wegen der fortgeschrittenen Zeit in einem besonders interessanten Stadium abgebrochen werden. Hr. Prof. Heidebrock brachte zum Ausdruck, dass die Schmierfrage gerade in Hinblick auf die jetzige Umstellung von Wälzlagern auf Gleitlager eine besondere Bedeutung angenommen hat und dass deshalb bald einmal eine gründliche Befreiung der bei den Mitarbeitern offerstehenden Fragen herbeigeführt werden muss. Das lässt sich erfahrungsgemäss nur ermöglichen, wenn eine ausreichende Zeit für die drängendsten Vorträge und deren Aussprache vorgesehen wird. Er stellt deshalb eine 2- bis 3tägige Veranstaltung in Aussicht. Hr. Dr. Klemencic wird gebeten, einen Rahmen für die Abhaltung eines solchen Treffens in oder bei Graz vorzuschlagen.

Weiterarbeit. Von Hrn. Dr. v. Philippovich wird eine Liste der gemeldeten, für Schmierstoffprüfung geeigneten Prüfeinrichtungen und ein Vorschlag für ein Versuchsprogramm sowie ein Entwurf "Richtlinien für die Schmierstoffprüfung" eingereicht. Hr. Dr. Zorn erklärt, dass es möglich sein wird, von den zu prüfenden Schmierstoffen je etwa 50 kg zur Verfügung zu stellen. Es wird besonders hervorgehoben, dass wegen der Empfindlichkeit der fraglichen Schmierstoffe gegen Verunreinigungen sowie gegen Luft und Licht die Proben in verschlossenen und lichtundurchlässigen Behältern angeliefert werden müssen. Der Entwurf des Hrn. Dr. v. Philippovich zu "Richtlinien für die Durchführung von Schmierversuchen" wird weiter bearbeitet und möglichst bald in Form von VDI-Richtlinien gedruckt herausgegeben.

a) Die gemeldeten Lagerprüfeinrichtungen werden einem näheren Studium unterzogen. Hierzu wird es nötig sein, diese Einrichtungen am Ort und Stelle zu besichtigen und die beabsichtigten Versuche dort durchzusprechen. Hierzu gehört auch ein Programm für die Auswahl und für den Anlieferzeitpunkt der von Hrn. Dr. Zorn in Aussicht gestellten Prüfungsöle.

b) Die in Angriff genommenen Begriffsbestimmungen der Schmier-technik werden beschleunigt zu Ende geführt. Hr. Dr. Pfender wird gebeten, gelegentlich über die von ihm erwähnte Erfassung der Spitzentemperatur durch die rechnerische Energieumsetzung auf das betrachtete Stoffvolumen zu berichten.

Dr.-Ing. A. Bärtel:

Zur Physik der Reibung

Im Bericht wurde über die Fortführung der 1938 an der F.R.G. begonnenen Arbeit über die unmittelbare Aussagen über die Tragfähigkeit von Grenzflächen, im Zusammenhang mit dem Einflüsse der Stoffpaarung auch auf (z.B. auf die Tragfähigkeit) von Grenzflächen metallischen Verschleiss unter Schutzfilmen wie auf die Alterung dieser adsorbierten

Die genannten Fragestellungen ordnen sich in den Rahmen der Interessen des KWI ein, die Aufgabe die physikalisch-chemische Erkundung der Vorgänge gestellt hat. Darüber hinaus sind in den letzten Jahren Forschungsarbeit neue, Vorschläge für Werkstoffe entwickelt, experimentell bestätigt und durchgeführt worden. Die Vorgänge der Reibung und Verschleiss, insbesondere der Reibverschleiss, bilden einen wesentlichen Teil des KWI. Die Gruppe "Reibung und Verschleiss"

Die Untersuchungen sind in der ersten Beobachtung der Reibung 1937 an einer großen Reibungswaage durchgeführt worden. 3 strukturell verschiedene (a) verschleißempfindliche Paraffin-

Einige Ergebnisse der Untersuchungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Reibungswerte sind in der Richtung der Pfeile konstant. Eine eigene Methode zur Messung der Reibungswerte ist im Anhang dargestellt. Es soll nur erwähnt werden, dass bei Erreichung einer günstigen Reibungswert die Apparatur zunächst stillgesetzt wird. Nach 10 Minuten ruht und eine erste Bewegung erfolgt. Der Reibungsbeiwert im Augenblick der Stillsetzung wird: $\mu_0 = \lim_{v \rightarrow 0} \mu$

Der Reibungsbeiwert im Augenblick des Anlaufes aber ist um einen Betrag "A" grösser:

$$\mu_0 = \lim_{v \rightarrow 0} \mu + A$$

Auf die Deutung des zusätzlichen Wertes "A" wird anschliessend näher eingegangen.

Dr.-Ing. A. Bartel:

Zum Prüfen der Reibung

Ich berichte heute über die Fortführung der Arbeit, die 1938 an der T.H. Göttingen begonnen wurde. Die unmittelbare Aufgabe war die Tragfähigkeit von Schutzfilmen zu messen, gestützt durch die Aussagen über die Tragfähigkeit von Schutzfilmen (z.B. auf die Tragfähigkeit von Grenzfilmen) unter metallischen Verschleiss unter Schutzfilmen, wie auf die Alterung dieser adsorbierten Filme.

Die genannten Fragestellungen ordnen sich in den Rahmen der Interessen des KWI ein, das sich als Hauptaufgabe die physikalisch-chemische Erkundung der Grenzflächenvorgänge gestellt hat. Darüber hinaus sind von hier durch viele Jahre Forschungsarbeit neue Vorschläge zur Prüfung organischer Werkstoffe entwickelt, experimentell erkundet und der Praxis zugeführt worden. Die Vorgänge bei Reibung, Schmierung und Verschleiss, insbesondere der Mechanismus der Reibung bilden daher einen wesentlichen Teil des Forschungsgebietes der KWI-Arbeitsgruppe "Reibung und Schmierung".

Die Untersuchungen über Reibung begannen auf Grund einer Beobachtung des Herrn Dr. Ing. A. Klomencio, der 1937 an einem grossen Reibungsversuch mit Duffing'scher Reibungswaage festgestellt hat, dass die Reibung bei Anlaufreibung bei 3 strukturell verschiedenen Paraffinbl., Glycerin) verschiedenen Werten der Reibung beizwert μ Paraffinbl. Es kam nun zu-

in möglich sei, hinaus trat 3 Öle in ein könnte.

nein einer starken Erniedrigung der Reibung, von hieru gebau- ten Kleinen Anordnung für Langsamlauf, zu einer Konstanz im Falle Paraffinbl., eine eigene Methodik einzuführen, der eingegangen wird. Es soll nur gesagt werden, dass bei Erreichung einer günstigen Reibung die Apparatur zunächst stillgesetzt wird. Fast 10 Minuten ruht und eine erste Bewegungsrichtung anschließend erfolgt. Der Reibungsbeiwert im Augenblick der Stillsetzung wird: $\mu_0 = \lim_{v \rightarrow 0} \mu$

Der Reibungsbeiwert im Augenblick des Anlaufes aber ist um einen Betrag "A" grösser:

$$\mu_0 = \lim_{v \rightarrow 0} \mu + A$$

Auf die Deutung des zusätzlichen Wertes "A" wird anschliessend näher eingegangen.

Dr.-Ing. A. Bartel:

Zum Problem der Reibung

Ich berichte heute über die Fortführung einer im Jahre 1938 an der T.H. Graz begonnenen Arbeit über Anlaufreibung, die unmittelbare Aussagen über die Tragfähigkeit von Grenzfilmen zu machen gestattet, im Zusammenhang mit Fragen des Einflusses der Werkstoffpaarung auch auf Notlauferscheinungen (z.B. auf die Tragfähigkeit) von Grenzfilmen, ferner auf den metallischen Verschleiss unter Schutzfilmen (Monofilmen), sowie auf die Alterung dieser adsorbierten Filme.

Die genannten Fragestellungen ordnen sich sachgemäss in den Rahmen der Interessen des KWI ein, das sich als eine Hauptaufgabe die physikalisch-chemische Erkundung der Grenzflächenvorgänge gestellt hat. Darüber hinaus sind von hier durch viele Jahre Forschungsarbeit neue Vorschläge zur Prüfung organischer Werkstoffe entwickelt, experimentell erkundet und der Praxis zugeführt worden. Die Vorgänge bei Reibung, Schmierung und Verschleiss, insbesondere der Mechanismus der Reibung bilden daher einen wesentlichen Teil des Forschungsgebietes der KWI-Arbeitsgruppe "Reibung und Schmierung".

Die Untersuchungen über Anlaufreibung begannen auf Grund einer Beobachtung des Herrn Doz. Dr.-Ing. A. Klomencic, der 1937 an einem grossen Traglagerversuchsstand mit Duffing'scher Reibungswaage feststellte, dass die Werte der Anlaufreibung bei 3 strukturell verschiedenen Ölen (Rizinöl, Paraffinöl, Glycerin) verschieden hoch lagen (Bild 1). Wohl straute der Wert Paraffinöl über mehrere Messungen beträchtlich. Es kam nun zunächst darauf an, zu erkunden, ob es für Paraffin möglich sei, eine Konstanz der Werte zu erreichen. Darüber hinaus trat die Frage auf, ob man die gefundenen Werte der 3 Öle in ein System von Kennzahlen für Schmierstoff einordnen könnte.

Meine Untersuchungen führten zunächst (nach einer starken Erniedrigung der Auslaufgeschwindigkeit) auf einen hierzu gebauten kleinen Traglagerversuchsstand mit Sondereinrichtung für Langsamlauf, zu der Feststellung, dass es wohl eine Konstanz im Falle Paraffinöl gibt, es aber notwendig sei, eine eigene Methodik einzuhalten, auf die später genauer eingegangen wird. Es soll nur soviel vorweg genommen werden, dass bei Erreichung einer günstigen Auslaufgeschwindigkeit die Apparatur zunächst stillgesetzt wird, dann unter Last 10 Minuten ruht und eine erste Bewegungseinführung anschliessend erfolgt. Der Reibungsbeiwert im Augenblick der Stillsetzung wird: $\mu_{\text{st}} \text{ bzw. } \mu_{\text{v} \rightarrow 0}$

Der Reibungsbeiwert im Augenblick des Anlaufens aber ist um einen Betrag "A" grösser:

$$\mu_{\text{an}} = \lim_{v \rightarrow 0} \mu + A$$

Auf die Deutung des zusätzlichen Wertes "A" wird anschliessend näher eingegangen.

Wenn man die Anlaufreibung nicht nach 10 Minuten Ruhezeit misst, sondern unmittelbar nach Stillsetzung der Apparatur, so streuten die Werte ausserordentlich stark (Bild 2). Das Streuband wurde beträchtlich kleiner nach einer 5 Minuten langen Ruhezeit unter Last. (Bild 3) Bei 10 Min. Ruhezeit und mehr (1/2 Std., 1 Std., 10 Tage) ergaben sich keine weiteren Änderungen (Bild 4). Diese Konstanz der Anlaufreibung (derzeit 2,3%) wurde nun für die oben genannten Öle nochmals geprüft, wobei sich herausstellte, dass die Werte :

a) gegenüber den Werten am grossen Traglagerversuchsstand um etwa 30% höher lagen. Ich führe dies auf die wesentlich geringere Endgleitgeschwindigkeit des kleinen Versuchsstandes zurück,

b) individuell hoch lagen, je nach der Art des Schmierstoffes,

c) konstant waren über den Wellenumfang bei gleichbleibender Raumtemperatur (d.h. der Temperatur der Berührungsstelle Welle - Lagerschale) bei 50 kg/cm² Flächenpressung.

Diese Tatsache vor allem war es, die mir nun endlich gestattet, gut reproduzierbare "Auslaufcharakteristiken" für die genannten Öle festzulegen, so dass neben dem Wert μ_0 noch ein Teil der Reibungskurve im Auslaufgebiet mit in den Bereich der Betrachtungen eingehen kann (Bild 5 zeigt die Auslaufcharakteristik für Paraffinöl).

Nach längerer Unterbrechung durch Industrietätigkeit wurden die Untersuchungen in Graz nun am Kaiser-Wilhelm-Institut Berlin bei Herrn Professor P.A. Thiessen fortgesetzt. Nach Neukonstruktion der Anlage, Erweiterung des Messbereiches und Vollautomatisierung des Antriebsmechanismus konnten die in Graz gefundenen Werte bestätigt werden. Durch neue Messungen an einer Vielzahl technischer Industrieöle sowie auch an reinen Stoffen wird eine Art Übersicht geschaffen werden, die in Bild 6 zum Teil wiedergegeben ist. Es wurden dabei nicht nur die Werte bei Raumtemperatur gemessen, sondern bei verschiedenen Temperaturen, indem die Welle hohlgebohrt und elektrisch geheizt wurde. Die Werte der Anlaufreibung bei steigender Temperatur gemessen lassen sich gut in Form einheitlicher, stetiger Kurven darstellen.

Im allgemeinen kann gesagt werden, dass "gut" schmierende Öle, d.h. in der Praxis bewährte Öle, einen niedrigen μ_0 -Wert haben, was für den Fall gleichviskoser Öle in Bild 6 dargestellt wurde. Bisher arbeiteten alle Reibungsgeräte fact ausschließlich bei Raumtemperatur; diese Methodik kann aber insofern zu Fehlschlüssen führen, weil es vorliegt, dass sich - auch bei gleichviskosen Stoffen - die "Temperaturkurven" der Reibung überschneiden. (Bild 7,8)

Diese wichtige Tatsache besagt, dass es auch für die anderen Reibungsmessvorrichtungen erforderlich wird, Anordnungen zu treffen, die Gleitverhältnisse auch bei höheren Temperaturen messtechnisch zu verfolgen.

Diesbezüglich kann kurz gesagt werden:

- 1) Die Temperaturkurven geben durch ihre Lage im μ_0 -t Diagramm Auskunft über die Tragfähigkeit im Notlaufgebiet,

- 2) sie geben spezielle Unterschiede im Gleitverhalten von Ölen gleicher Viskosität an und führen
- 3) dadurch zu einer Beseitigung der Unklarheiten in den Messergebnissen bei Geräten ähnlicher Art, die bisher lediglich bei Raumtemperatur gearbeitet haben.

Deutung der Messpunkte

Den Versuchen liegt, wie bereits erwähnt, der Plan zugrunde, die gewonnenen μ -Werte messtechnisch als zusätzliche Kennzahlen für Öle auszuwerten. Wenn man messen will, muss man in erster Linie die inneren Fehlerquellen und Störungen von aussen kennen. Vergleicht man die Messergebnisse, die namentlich mit der KWI-Apparatur gewonnen wurden, mit denen anderer Reibungsmessvorrichtungen, so stellt sich heraus, dass eine ausserordentlich hohe Reproduzierbarkeit der Werte vorliegt, die mich ermutigt haben, die Versuche fortzusetzen.

Für das Verständnis des Mechanismus des Messvorganges ist der Umstand von Bedeutung, dass die Welle im Gebiete der Grenzreibung die Lagerschale, welche eine stetig gekrümmte Fläche darstellt, gleichsam "erklettert". Dies hat zur Folge, dass eine Verschlebung der Resultierenden der Angriffskräfte eintritt und daher ein nicht messbares Fehlmoment entsteht. Doch steht diesem Bedenken die aus mehreren tausend Versuchen immer wieder bestätigte Reproduzierbarkeit von μ in Höhe von derzeit 2,3% gegenüber, eine Fehlerbreite, die als bisher beste Leistung bei der Vermessung der Grenzreibung gelten kann.

Aus der späteren Darlegung geht weiter hervor, dass, bedingt durch meine apparative Anordnung, Reibungskurven erhalten werden, die im Auslaufgebiet grundsätzlich nur ansteigen (Bild 23). Dieser Umstand ist insofern von Vorteil, weil sich der Fehler in Richtung eines ansteigenden μ auswirkt und nicht etwa die Werte kompensiert. Die Verlagerung der Welle ist messtechnisch trotz allem noch günstig.

Einem geküßerten Einwand, die statische Reibung habe schlechthin "nichts" zu tun mit Schmierfähigkeit, kann entgegengehalten werden, dass die Ruhreibung neuerdings bereits in den Begriff "oiliness" einbezogen ist, (Rogg und Hunwicks in J.Inst.Petrol 26 (1940) 195) eine Forderung, die von uns bereits 1938 auf Grund der Grazer Messergebnisse gestellt wurde.

Weiter ist zu beachten, dass wir in der Anordnung der Duffing'schen Reibungswaage ausgesprochen "betriebstreu" messen, d.h. die mechanisch-technologischen Verhältnisse (Werkstoffpaarung, Druck und Temperatur) und auch die kinematischen Verhältnisse (freie Verlagerung des Wellenmittels im Auslaufgebiet) wie beim Industrielager vollauf berücksichtigen.

An dieser Stelle braucht nur unsere Anschauung wiederholt werden, dass die Grösse des μ -Wertes über den Zustand der Grenzschicht im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit Auskunft gibt.

Im Anschluss an das eben Gesagte kann zu den Bildern 6, 7 und 8 weiter ausgeführt werden:

- 1) Je grösser die Kohäsion zwischen Lager und Welle bei Vorhandensein des Grenzschichtfilms ist, umso höher rollt die Welle die Lagerschale anpor.
- 2) Lagerschale und Welle werden im Experiment steigender Temperatur ausgesetzt. In der obigen apparativen Anordnung zeigt sich, dass jedes Öl zusätzlich zu 1) einen individuellen M_0 -Wert hat.

Misst man die Werte der Anlaufreibung eines Oles mit steigender Temperatur, so ergibt sich eine stetige Kurve (Bild 6), aus deren Verlauf wichtige Rückschlüsse gezogen werden können:

- a) In Richtung steigender Temperatur werden die Werte von M_0 grösser. Temperaturzunahme wirkt sich auf die Adsorption des Grenzfilms derart aus, dass das Haftvermögen desselben verringert wird, die Reibung also ansteigt.
- b) Der Anstieg der Werte M_0 steht nicht in streng linearem Zusammenhang mit dem Anstieg der Temperatur der Berührungsstelle Welle - Lager, sondern gibt individuelle Struktureigenschaften der Grenzschicht wieder.

Bei Mineralölen ist die Kurve konvex nach oben, bei Fettölen konkav nach oben gekrümmt.

Kurz gesagt: Die M_0 -Werte steigen in Richtung höherer Temperatur an. Die Temperaturkurven sind nach der Natur des Schmierstoffes verschiedenartig gekrümmt. Das Haftvermögen des Grenzfilms erfährt dabei Veränderungen, weil durch die wankende Beanspruchungsart die metallischen Oberflächen weitgehend beeinflusst werden. Da wir im Gebiete ausserordentlich dünner Grenzfilme arbeiten, tritt die Frage auf, ob wir nicht einen Vorgang messen mit ähnlicher Charakteristik wie diejenige der Haftfestigkeit von Öl an Metall. Dazu ist zu sagen, dass Haftfestigkeit von Öl an Metall sehr schwer zu definieren ist, und dass für eine praktische Anwendung dieses Begriffes derzeit noch keinesfalls ausreichende Angaben vorliegen. Die Haftfestigkeit stellt nämlich das Integral aller freien Bindekräfte der Oberfläche dar, ist also abhängig vom Grad der Kohäsionszerrüttung der Oberflächenpartien. Im Gebiet der gemischten Reibung werden dabei unregelmässig Störstellen und Fehlbaustellen erzeugt; die Ecken- und Kantenvirkung der freigelegten Oberflächenkraftfelder wird erhöht und dadurch die Bindung der Flüssigkeitspartikel in unkontrollierbarer Weise beeinflusst; dazu kommen noch Wirkungen in Form von Kapillarkräften in feinsten Rissen der metallischen Oberflächen u.a. Diese grösstenteils messtechnisch nicht erfassbaren Einflüsse sind es, die eine technische Bestimmung der Grösse und Art der Haftfestigkeit überaus erschweren, wenn nicht gar unmöglich machen.

Wenn man sich kurz die Bestimmungsmethoden der Haftfestigkeit von Öl an Metall vor Augen führt, so sieht man, dass es vornehmlich 3 sind, die das Problem einer Messung zugänglich machen:

- 290
- 17 -
- 1) Methoden thermischer Art, durch Bestimmung der Benetzungswärme,
 - 2) durch Messung der Grenzflächen- und Oberflächenspannung,
 - 3) durch Messung der Dipolmomente polarer Öle. (DK-Werte);

zu 2) ist zu sagen, dass die Haftarbeit durch die Gleichung von Dupré gut für einheitliche Stoffe wiedergegeben werden kann, dass aber die Grenzflächenspannungen an der Grenzfläche Öl-Lagermetall noch nicht mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden können.

Es ist nun fraglich, ob man mit dem Ausdruck "Haftfestigkeit" zunächst weiter operieren kann und d"U, da eine Kennzeichnung des Schmierverhaltens von Ölen heute auf technisch erfassbare Werte bezogen werden kann. Fasst man das Reibungs- und Verschleissverhalten (sowie einen Teil des dazugehörigen Temperaturgebietes) eines Schmieröles zusammen, so kann man eine

" G l e i t g ü t e z a h l "

angeben, die den kritischen Zustand charakterisiert, wenn in einem Lager abnormal lange Grenzreibung, insbesondere Notlauf herrscht. Die Gleitgütezahl stellt eine folgerichtige technologische Ergänzung der rein hydrodynamischen (in sich abgeschlossenen) Betrachtung über die Lagerkennlinien K l o m m e n o i o - B a u e r dar. Hier tritt neben den rein mechanischen Grössen, wie z.B. Spaltweite, Lagerbreite ... als Schmiermittelcharakteristik allein die Viskosität auf und führte u.a. zu sehr anschaulichen Begriffen wie "Belastungskennzahl", "Reibungskennzahl", "Durchflussgrösse" und "Erwärmungskennzahl". Es gibt nun eine grosse Gruppe von Traglager verwendenden Maschinen und Apparaten, die neben rein hydrodynamischer Schmierung durch oftmaliges Aus- und Einschalten oder im Langsamlauf ihr Arbeitsgebiet im Grenzreibungsgebiet haben (Werkzeugmaschinen, Strassenbahnwagen, Filzpressmaschinen). Es wäre für die praktische Anwendung der Lagerkennlinien vielleicht von Vorteil, wenn durch einen knappen, prägnanten Ausdruck der kritische Zustand, d.h. Hauptverschleisszustand, in einer ähnlichen Form wie oben, durch eine Zahl, wiedergegeben werden könnte. (Bild 9)

Soweit die bisherigen Versuche es erlauben, im obigen Sinne eine Formulierung zu machen, soll die erste Fassung lauten:

$$\text{G l e i t g ü t e z a h l} \dots G = \text{const.} \cdot f \cdot \frac{\mu_0}{t_0}$$

wobei f = Reibfestigkeit = $\frac{10000 \text{ mm Wegstrecke}}{\text{mm Abrieb der Metallprobe (Stift)}}$

bei konstantem v gemessen bei Beginn der gemischten Reibung,

μ_0 = Reibungskoeffizient der Ruhe (Anlaufreibung),

$\frac{t}{t_0}$ = Reibungstemperaturverhältnis bei const. v gemessen zu Beginn der gemischten Reibung.

Die Gleitgütezahl stellt eine vorwiegend aus den mechanischen Grössen definierte Ergänzungszahl der bisherigen rein chemischen Schmierstoffdaten dar. Tabellen sind in Ausarbeitung.

291

Was den Einsatz der μ_0 -Werte hierbei betrifft, kann gesagt werden, dass sie derzeit für die Messung von Gleitunterschieden von Ölen gleicher Zähigkeit, in einiger Zeit auch für Öle verschiedener Zähigkeit, eingesetzt wird. Die Verschleissmessung geschieht in der Anordnung der Skizze Bild 10 rechts oben, an derselben Prüfzelle, an der auch μ_0 gemessen wird.

Was den Einfluss der Werkstoffpaarung anbelangt, soll heute nur gesagt werden, dass auch sie massgebend die Höhe beeinflusst (Bild 11). Dies besagt, dass für die Schaffung einer Messbasis die Einflüsse dieser Komponenten berücksichtigt werden müssen.

Um zu einer hohen Reproduzierbarkeit (2,3%) zu kommen, wird nach einem "v-t Diagramm" gearbeitet (Bild 12), d.h. dass die einzelnen Phasen des Gleitens, Ruhens unter Last und der ersten Bewegungseinführung (Anlauf) für alle Versuche unter streng gleichbleibenden Bedingungen durchlaufen werden, was durch die voll automatische KWI-Apparatur erreicht wird. Die Messung beginnt damit, dass das Gebiet der hohen Gleitgeschwindigkeiten (Hydrodynamik) verhältnismässig rasch durchlaufen wird und lediglich der Austeriorung der Reibungswaage gilt. Von Ausklinkpunkt an über das Gebiet der gemischten Reibung wird die Geschwindigkeitsabnahme durch Automaten so geregelt, dass zuletzt ein Gleitzustand herrscht, der zwar nahe am Harten liegt, aber ein noch einwandfreies Gleiten darstellt, d.h. ein Gleiten ohne ruckartig einsetzendes Haften. Dieser Zustand wird 10 Minuten konstant gehalten, um nachzuprüfen, ob man bei der Reibungsmessung nicht gerade an einen Punkt der Welle misst, der zufällig "gut" eingelaufen ist. Bleibt die Reibung bei dieser sehr geringen gleitigen Gleitgeschwindigkeit ($v = 0,07 \text{ m/sec}$) konstant, so wird die Apparatur durch Kurzschlussbremse stillgelegt. Die Erfahrung lehrte, dass nunmehr eine Ruhezeit unter Last von 10 Minuten erforderlich ist, um gute Reproduzierbarkeit der μ_0 -Werte zu bekommen (Bild 7). Der Vorgang ist in seinen Feinheiten noch nicht ganz geklärt, doch gibt es aus der Fahrpraxis der Reichsbahn einen Vergleich. Der Anfahrwiderstand eines Zuges - gemessen am Dampfverbrauch - ist nach 10 Minuten Haltezeit am grössten, sinkt ab, wenn kürzer gehalten wird, bleibt aber gleich, gleichgültig ob 10, 20 oder mehr Minuten gehalten wird. Diese Erscheinung wurde am Traglagerversuchstisch bei der Messung der Anlaufreibung immer wieder beobachtet. Sie konnte sogar bei einem Versuch mit 10 Tagen Haltezeit bestätigt werden.

Um nun die Anlaufreibung selbst zu messen, wird in das ruhende System Lagerschale-Welle durch Drehung der Welle eine erste Bewegung eingeleitet, die nach etwa 3 Minuten (bei einer konstanten Gleitgeschwindigkeit von $0,00025 \text{ m/sec}$) ein ruckartiges Trennen der Flächen zur Folge hat. Dabei hört man einen dumpfen Laut. An der Messdose sinkt die Wasserschale in selben Augenblick um mehrere Centimeter ab. Der Reibungswert in Augenblick des ruckartigen Trennens ist μ_0 .

Im Laufe vieler Versuche mit Ölen verschiedenartiger Struktur (gefettet und nicht gefettet) konnte beobachtet werden,

dass bei der Bewegungseinleitung die Welle und Lagerschale verschieden fest aneinander haften. Bei der Bewegungseinführung trachtet nun die Welle, die Lagerschale mitszunehmen u.s. je nach der Art des Schmierstoffes länger oder nicht so lange (Bild 13), bis die ruckartige Trennung erfolgt. Dieser ruckartige Anstieg "A" der Reibungskraft ist individuell abhängig von der Art der Kohäsionskräfte Welle-Schmierstoff-Lagermetall und wirkt sich additiv, wie bereits erwähnt, zu den Reibungsverhältnissen im Auslauf aus. Er ist also im Wesentlichen eine Funktion der Struktur des Schmierstoffes: $\mu_0 = \mu_{01} + A$, wobei: A = f (Struktur)

Fasst man das bisher Gesagte kurz zusammen, so sieht man, dass es für jedes Öl und jede Werkstoffpaarung eine individuelle Gleitkennzahl gibt. Der dazugehörige Wert gibt über die Gleitverhältnisse im Anlaufgebiet Näheres an und hat eine bisher nicht erreichte Reproduzierbarkeit von 2,1% erreicht.

Um von unabhängiger Seite möglichst viel Zahlenmaterial zu sammeln, also möglichst rasch einen Überblick über die Anwendbarkeit des Gerätes zu haben, sind zwei Apparate hergestellt worden (Bild 14), die zunächst bei der DVL und dem Heereswaffenamt probeweise zum Einsatz kommen sollen.

Das Gerät am KWI soll dagegen der weiteren Erforschung der Verhältnisse des Anlaufvorganges dienen. Auf diesem Gebiet drängen sich zunächst zwei Fragen auf:

- a) Warum erfolgt die Trennung der vertrimaten Flächen am Traglagerversuchsstand ruckartig und nicht allmählich wie bei der Anordnung "schiefe Ebene-Gleitstück"?
- b) Kann man die hier festgestellten μ_0 -Beobachtungen unmittelbar auf die geometrisch ähnlichen Verhältnisse der Anordnung unter a) übertragen?

Zu diesem Zwecke werden am statischen Reibungsgerät nach Weg, welches eine zusätzliche Temperatureinrichtung erhalten hat, die Verhältnisse der Reibung studiert (Bild 15). Es soll u.a. geprüft werden, wie sich die von Bowden (Bild 16) aufgezogenen Reibungscharakteristiken verändern, wenn Langmuir-Blodgett-Schichten aufgetragen werden, die verlässige ihrer strukturellen Eigenart Aussagen über die Notlaufeigenschaften von Grenzfilmen machen.

Die Versuche von Holm, von Heidelberg und nicht zuletzt die unseren geben Anlass, einige Worte über die Grenzschichten und ihre Dicke zu sagen. "Jedem Lagerwerkstoff ist eine bestimmte Fähigkeit zugeordnet, im Kontakt mit dem vorliegenden Schmierstoff und Wellenwerkstoff im Gebiete der Grenzreibung einen bestimmten Zustand des tragenden Schmierfilms hervorzurufen, der in diesem Gebiet die Tragfähigkeit bestimmt. Diese bei zahlreichen Versuchen immer wieder beobachtete Tatsache ist rein hydrodynamisch nicht zu erklären." (Heidelberg)

Zwar gelten die hydrodynamischen Ansätze in ihrer strengen Fassung bis zum theoretischen Rand; aber es ist durch Induktion nachweisbar eine mehrmolekulare Grenzschicht vorhanden, die ihrerseits vorwiegend die Notlaufeigenschaft mit bestimmt. Sie

ist der Ort dichterem Teilchenpackung, man kann ruhig sagen, von quasi kristallinem Zustand (in der ersten Adsorptionsschicht) und hat vermöge dieser Eigenschaft gegenüber dem flüssigen Film z.B. andere Wärmeigenschaften und eine andere Stabilität gegen mechanische Kräfte. Somit haben die hydrodynamischen Ansätze nun ihre natürliche Grenze in der diffusen Adsorptionsschicht (Seeliger: "Angewandte Atomphysik" s. auch Bild 17). Die Dichte dieser Schichte nimmt gegen die Spaltmitte hin (Welle-Lager) stark ab. Die physikalischen Daten aber sind für die technische Schmierung von grösstem Interesse, so z.B. die Wärmeleitfähigkeit monomolekularer Schichten. (Bild 18: Messanordnung für die Wärmeleitfähigkeit monomolekularer Schichten) Erst ganz wenige experimentell brauchbare Ansätze geben einen Nachweis für die Ausbildung monomolekularer Grenzschichten auf kristallinen Unterlagen:

1. Beeinflussung der Randbesetzung von Goldteilchen an Glimmer der mehrmolekular von Seifenfilm umgeben ist.
2. ZerreiBversuche adhäsiver Bindungen (nach Eikerman).

Dabei wurden Bruchlasten von Prüflingen zwischen metallischen Oberflächen gemessen. Die höchsten Bruchlasten waren: bei einer Schichtdicke von 57 :

Al-Al	39 kg/cm ²
Cu-Cu	32
Sn-Sn	32
Pb-Pb	28
Mn-Mn	18

Mit zunehmender Schichtdicke tritt allgemein ein Absinken der Haftspannungen ein.

3. Bruchlasten von Schallackzwischenlagen zeigen ein ähnliches Verhalten bei einer Schichtdicke von 57 :

Ni-Ni	190 kg/cm ²
Al-Al	140 " "

hingegen bei 540 Schichtdicke für die gleichen Metalle

Ni-Ni	110 kg/cm
Al-Al	75 " "

Unabhängig davon kann aus den Heidebroeck'schen Versuchen über die "Öldurchlässigkeit" auch an die Wirkung mehrmolekularer Grenzschichten gedacht werden; Diese "Öldurchlässigkeit" erreichte zwischen Stahlwelle und VM 80 für 18 l Öl/Std. einen Pressdruck von 3,5 at, hingegen bei gleichem Lagerspiel, gleichem Öl und gleicher Temperatur bei der Werkstoffpaarung Kunstharz-Stahlwelle nur 1 at. Pressdruck für die gleiche Ölmenge (vgl. auch E.M. 19). Dieser Effekt wird an einem Staudruckmesser (Bild 20), bei welchem der Lagerspalt Heidebroecks in einer Ebene ausgebreitet ist, in ersten Ansätzen verfolgt. Eine exakte Fassung des Begriffes λ_0 - in seiner Verwendung als Kenngrösse für Öle im Grenzreibungsverhalten - wird noch durch einige Störungen erschwert (Bild 21). Der Einfluss dieser Störungen ist jedoch weitgehend bekannt, so dass es möglich ist, überblicksmässig die erforschten und eventuell noch offenen Gebiete der "betriebstremen" Reibungsforschung anzugeben (Bild 22).

Zuletzt soll noch die Frage diskutiert werden, was unter "betriebstreu" verstanden wird, um Messgeräte für betriebs-

treue Reibungsforschung anzugeben. Die Erfahrung lehrt, dass vor allem 2 Punkte als wesentlich für Lagerreibungsmessung erscheinen (Bild 23):

1) Die kinematischen Verhältnisse, d.h. freie Beweglichkeit der gelagerten Welle im Gebiete der reinen hydrodynamischen Schmierung, insbesondere aber das ungehinderte Aufrollen der Welle auf die Lagerschale im Gebiet der gemischten Reibung bis zum Zustand der Ruhe

$$\mu_a = \lim_{v \rightarrow 0} \mu$$

Diesen Forderungen entsprechen gut die Apparaturen von Detmar und Duffing, in geringerem Maße die von Olsen und Almen (Bild 24). Die Belastung erfolgt bei den beiden letzteren über 2 diametrale Backen. Diese kompensieren ein einseitiges Aufrollen der Welle und ergeben daher andere Reibungswerte für das Auslaufgebiet.

2) Die mechan. technolog. Verhältnisse (Werkstoffpaarung, Betriebstemperatur, Druck), die dem Industrielager voll- auf angepasst sein müssen. Messgeräte, die diesen zwei Bedingungen gemäÙ, werden stets Reibungskurven ergeben, die im Auslaufgebiet ansteigen (Bild 25, obere Kurve). Im Gegensatz dazu ergibt eine Anordnung "ebene Platte gegen ebene Platte" bzw. "ebene Platte - Stift" Kurven, die anders verlaufen (Bild 24). Die Untersuchungen von Charlotte J a o b ergaben Reibungskurven, die bei sehr geringer Gleitgeschwindigkeit einen Wendepunkt haben (Bild 25, mittlere Kurve). Dies konnte an unseren Geräten bisher nicht beobachtet werden. Vermutet kann werden, dass dieser Effekt bei relativ geringer Belastung eintreten kann, vor allem bei gefetteten Ölen. Die Auslaufgeschwindigkeit war bei diesen Messungen im Verhältnis zu unserem Gerät (mit $v = 0,000025$ mm/sec bei 50 kg/cm^2 Flächenpressung) noch relativ "hoch".

Als Ergebnis der Messung der statischen Reibung mittels einer Duffingwaage kann zusammenfassend festgestellt werden:

- a) Die stat. Reibung ist für jedes Öl und für jede Werkstoffpaarung individuell hoch,
- b) sie ist mit einer Genauigkeit von 2,3% reproduzierbar,
- c) es ergeben sich Temperaturkurven, die für den Fall gleichviskoser Öle vor allem eine eindeutige Trennung derselben bezüglich des Gleitverhaltens im Grenzreibungsgebiet ergeben;
- d) sie führt zu einer Gleitgütezahl, die den kritischen Zustand der Zerstörung des Lagers für jedes Öl abzuschätzen gestattet;
- e) die Werte sind mittels einer betriebstauglichen Messanordnung erhalten, die ein freies Aufrollen der Welle zulässt, d.h.

$$\mu_0 = \lim \mu + A$$

Die mitgeteilten Versuche sollen Anregung dazu geben, die in der Industrie vorhandenen Messapparaturen (Lagerprüfstände der Bauart Duffing-Kammerer) durch Anbau einfacher Zusatzre-

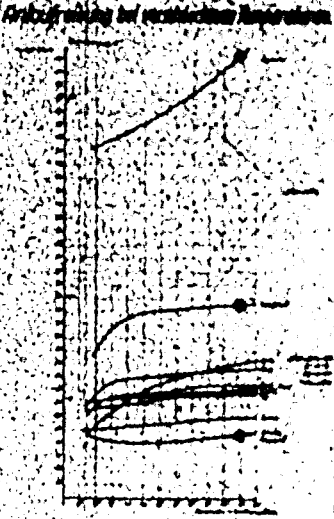
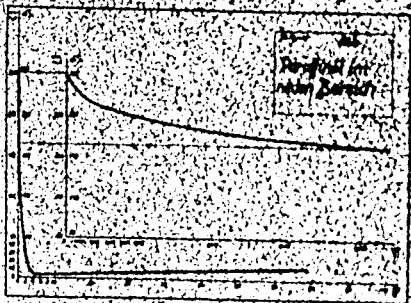
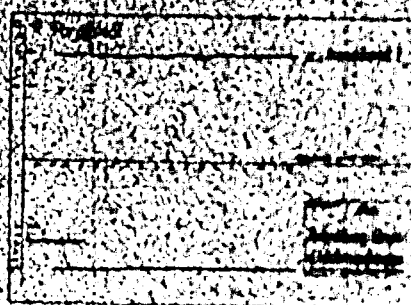
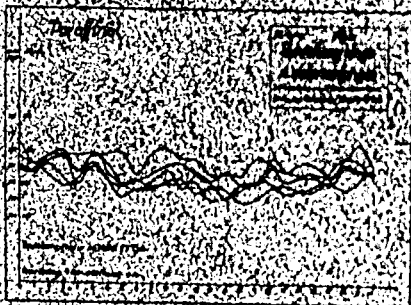
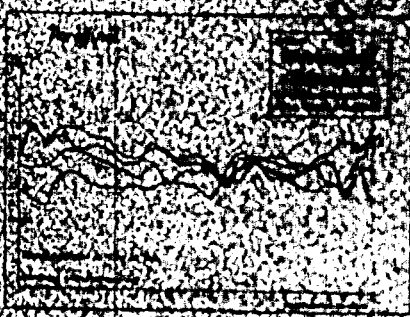
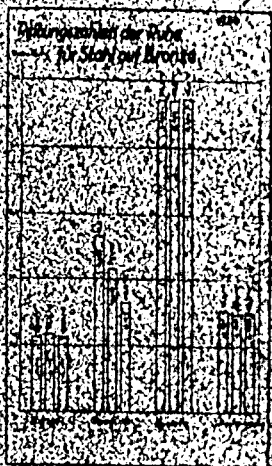


Bild 1

Bild 2

Bild 3

Bild 4

Bild 5

Bild 6

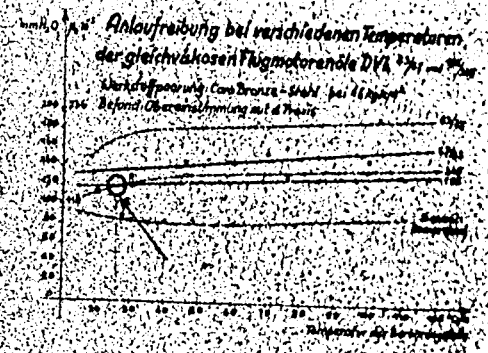


Bild 7

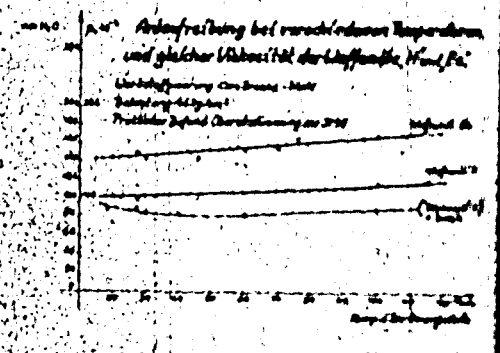
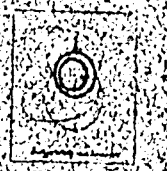
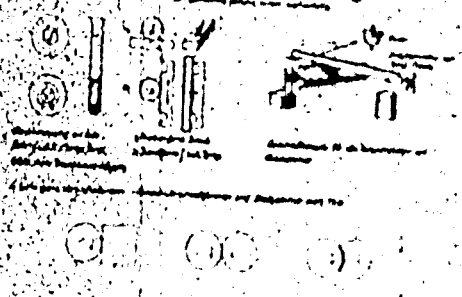


Bild 8

Hydrodynamik
 Viskosität steigt mit der Temp. stark an
 Reibungskennzahl
 Reibungsbeiwert
 Durchflussrate
 Einströmtemperatur



Verschleißmessung bei Grenzreibung
 Messung der Verschleißrate



Grenzreibung (Anlaufreibung)
 Gleitgeschwindigkeit
 Reibungsbeiwert
 Reibungsbeiwert

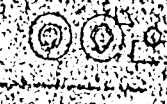


Bild 9

Bild 10

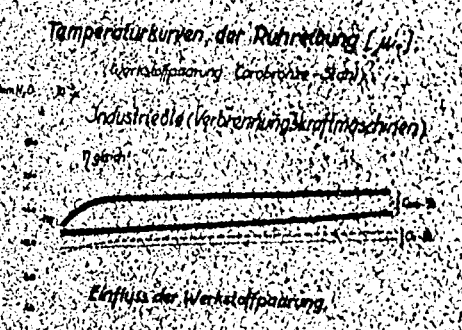


Bild 11

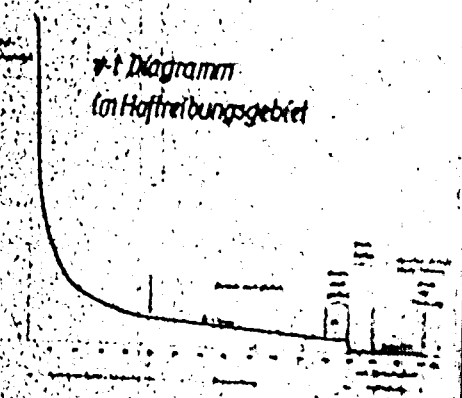


Bild 12

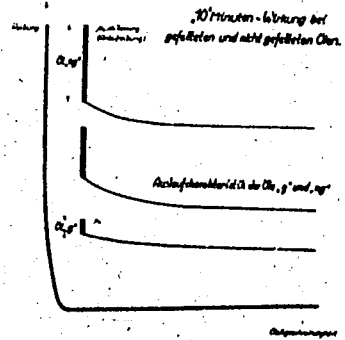


Bild 13

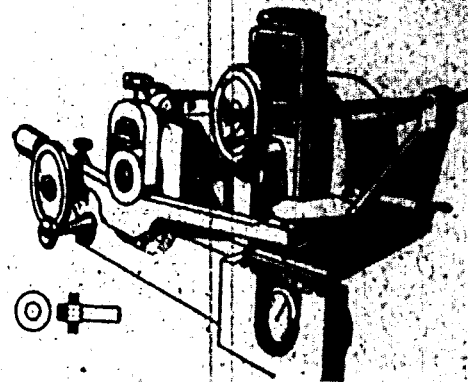


Bild 14

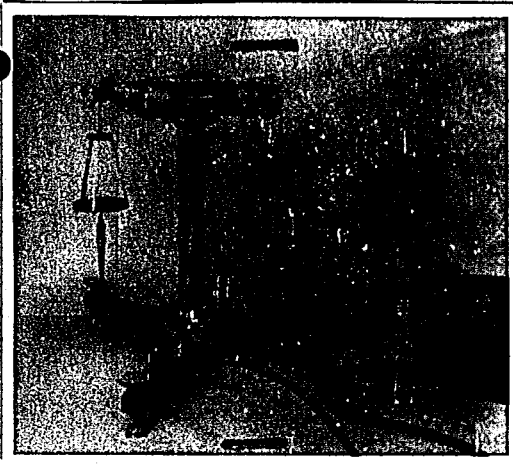


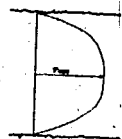
Bild 15



Bild 16

Schmierfilm: maßgebende Einflußgrößen bei

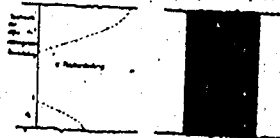
Hydromechanik:
viskositätsabhängig
druckabhängig (p, η)



Geschwindigkeitsverteilung
im Schmierpalt bei streng
homogener Filmdicke.

Grenzreibung:

abhängig von Werkstoffpaarung, Struktur,
Platz, Ölqualität, Raumfeuchte, Belastungsdichte,
Neigung zur Legierungsbildung, o.ä. Störungen,
Stärkenanreicherung durch Oberflächenveränderung



Orientierende Wirkung
des Oberflächeneffeldes

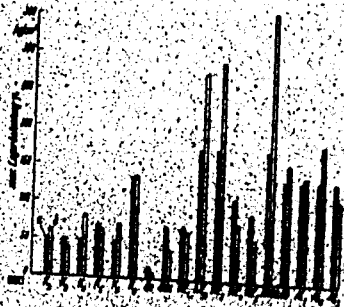
Veränderliche Dichte ergibt
„Diskontinuum“



Bild 17

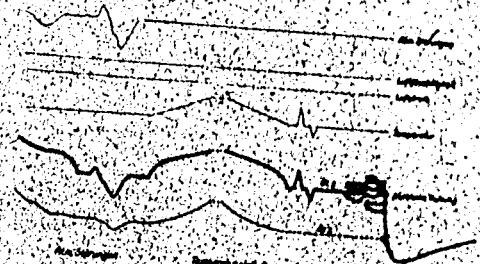
Bild 17

54



Grundsätzliche Darstellung der relativen Häufigkeiten der 18 unterschiedlichen Störungsarten. (Quelle: VDE 1910, 1911)

Bild 19



Anlaufzeit (μs): Bilanz der Störungen

Bild 21

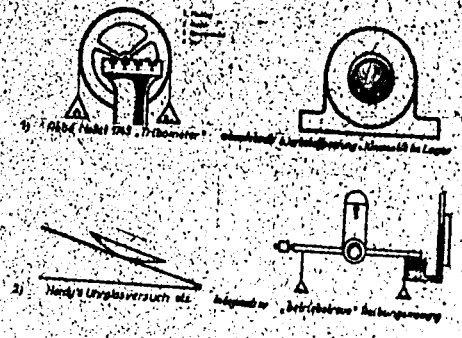


Bild 23

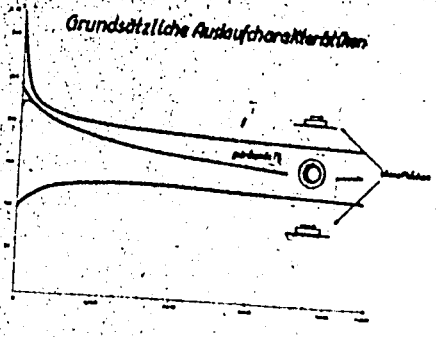
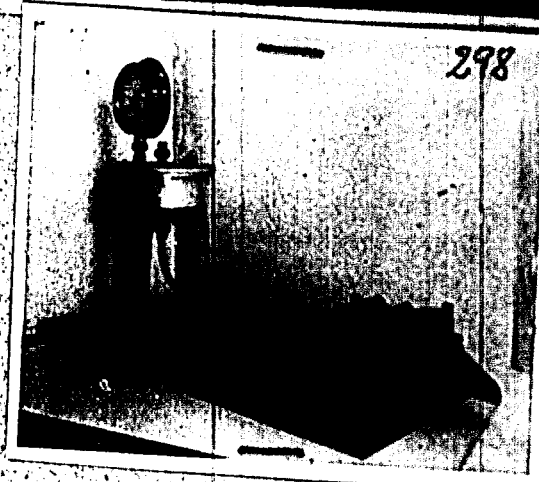


Bild 25



298

Bild 20

Erforschte und nach offene Gebiete der Betriebsstrom-
Belastungsforschung.

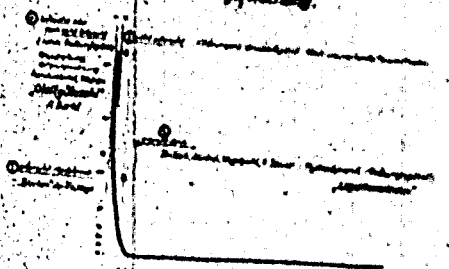


Bild 22

Reibungsapparate

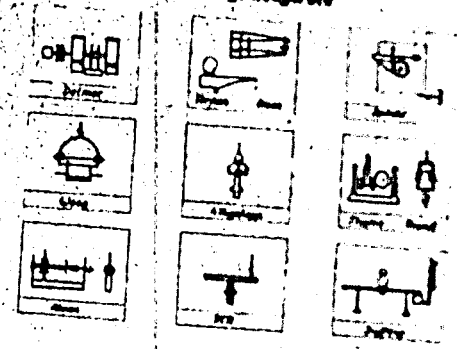


Bild 24

297

duziergetriebe so umzugestalten, dass μ nach den "v-t" Diagramm gemessen werden kann. Weiters soll durch Einbau geeigneter heizbarer Wellenzapfen auch Temperaturkurven aufgenommen werden. Dann kann jeder Besitzer eines Lagerprüfstandes die Gleitverhältnisse seiner Öle im Notlaufgebiet zusätzlich studieren, ohne hierzu einen neuen Apparat erwerben zu müssen.

Herrn Professor R.A. Th i e s s e n, Direktor des Kaiser-Wilhelm-Institutes für physikalische Chemie, Berlin, möchte ich für sein Interesse und die stete Förderung meinen ergebensten Dank aussprechen.

5
10

Ausdrache

Hr. Holm: Die Reibungswerte, gerade auch diejenigen der Ruhereibung, hängen stark von der Oberflächengüte der Gleitfläche (z.B. geschliffen, ungeschliffen) ab. Die wahren Gleitgeschwindigkeiten sind meistens höher als die gemessenen (Zittern, Rattern).

Hr. Klemencic: Die Ruhereibung hängt stark von der Temperatur an der Reibungsstelle ab, und zwar steigt sie mit der Temperatur. Es kommt aber bei Gleitlagern auch fallende Reibung vor. Die Schwierigkeit besteht darin, dass die Temperatur an eng begrenzten Punkten der Gleitflächen nicht genau festgestellt werden kann.

Hr. Heidebroek verweist auf die Arbeiten von Stuart und bemerkt, dass der Zustand vollkommener Haftung elastisch ist und vor dem Abreißen in einen plastischen Zustand übergeht.

Hr. Dunken weist auf Besonderheiten der Reibung an monomolekularen Schichten hin, insbesondere auf das Verschwinden endlicher Ruhereibung, das anscheinend in Maschinen der von Vortragenden verwendeten Art nicht beobachtet worden ist.

Die von Bartel hervorgehobene Betreibstreuung seiner Versuche ist s.E. nicht so wichtig. Man muss über die Eigenschaften der monomolekularen Schichten Genaueres erfahren. In den erwähnten Versuchen vermisst Dunken eine klare Trennung zwischen hydrodynamischer und Grenzschichtreibung. Er fragt, ob die Komplikation der Versuchsanordnung durch das langsame Auslaufen notwendig ist.

Hr. Bartel: Erst durch das langsame Auslaufen ergeben sich reproduzierbare Werte der Ruhereibung, weil erst hierdurch die definierte Grenzschicht entsteht.

Hr. v. Philippovich: Die Betreibstreuung darf nicht so sehr in den Vordergrund geschoben werden, weil man sonst für die vielen Fälle der Praxis zu viele verschiedene Prüfgeräte verlangen müsste.

Hr. Kluge:

Die Untersuchungen von Herrn Bartel (Kaiser-Wilhelm-Institut für physikalische Chemie) geben Veranlassung, auf einige neue Arbeiten der Reichsanstalt hinzuweisen. Es ist bemerkenswert, dass Hr. Bartel im Bereich kleinster Geschwindigkeiten stets eine mit der Gleitgeschwindigkeit abnehmende Reibungszahl findet, während die Versuchseinrichtung der Reichsanstalt unter gewissen Voraussetzungen, so für Schmiermittel besonders guter Schmiereignung (Schmierfähigkeit), auch eine mit der Gleitgeschwindigkeit zunehmende Reibungszahl ergeben kann. Es wurde im Zusammenhang mit diesbezüglichen Arbeiten der Reichsanstalt der Begriff der fallenden bzw. steigenden Grenzreibungscharakteristik geprägt. Eine fallende Grenzreibungscharakteristik ist z.B. bei Schmierung mit einem zusatzfreien Mineralöl an dem Werkstoffpaar Stahl-Stahl bzw. Stahl-Gusseisen und eine steigende Grenzreibungscharakteristik bei Schmierung mit einem Fettöl zu beobachten. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich im Verlauf der Reibungscharakteristik bei kleinsten Gleitgeschwindigkeiten die jeweiligen mehr oder weniger stark adsorptiven Bindungskräfte zwischen dem Schmierstoff und dem Lagerwerkstoff äussern. Einen interessanten Beitrag zu dieser Frage liefern nun die Untersuchungen der Reichsanstalt an den Homologen der gesättigten Fettsäuren (vgl. Bild 1 u. 2). Hochmolekulare Fettsäuren ergeben hiernach eine steigende und niedermolekulare eine fallende Reibungscharakteristik, wobei letztere mit zunehmender Kettenlänge allmählich in die Form der steigenden Charakteristik übergeht. Da andererseits aus Untersuchungen über die Benetzungswärme und über den Randwinkel bekannt ist, dass hochmolekulare Fettsäuren eine grössere Haftfestigkeit gegenüber metallischen Werkstoffen besitzen als niedermolekulare Fettsäuren, ist offenbar die steigende Reibungscharakteristik als ein besonderes Merkmal für eine grosse Haftfestigkeit des Schmiermittels gegenüber dem Metall anzusprechen.

Es ist nun mit Sicherheit anzunehmen, dass die Adsorption des Schmierstoffes am Lagerwerkstoff durch die Temperatur mehr oder weniger beeinflusst wird, und zwar in dem Sinne, dass die Haftfestigkeit des an dem Lagerwerkstoff adsorbierten Schmiermittelfilms mit der Temperatur abnimmt. In der Tat ergeben z.B. Untersuchungen mit Laurinsäure an dem Werkstoffpaar Stahl-Stahl bei höherer Temperatur ausgeprägt fallende Reibungscharakteristik, während bei niedrigen Temperaturen eine schwach steigende Reibungscharakteristik festgestellt wurde (Bild 3).

Bei Untersuchungen über den Einfluss der auf der Gleitfläche ruhenden Last gelangt man zu entsprechenden Feststellungen. Mit zunehmender Last geht die schwach steigende Reibungscharakteristik für Laurinsäure allmählich in eine schwach fallende über. Der Einfluss der Last ist jedoch bei weitem nicht so gross wie der der Temperatur (Bild 4). Dies erscheint auch verständlich, da sich der wirkliche Druck nach Hohn gar nicht oder sehr wenig mit der Last ändert. Es wird vielmehr mit zunehmender Last nur die wirkliche Berührungsfäche grösser.

Schon vor einiger Zeit konnte bei Untersuchungen der Reichsanstalt gezeigt werden, dass die unterschiedliche Schmiereignung (Schmierfähigkeit) technischer Schmiermittel bei der Werkstoffabtragung unter Grenzschmierungsbedingungen in kennzeich-

nender Weise zum Ausdruck kommt. Untersuchungen an dem Werkstoffpaar Stahl - Stahl und Stahl-Gussseisen z.B. ergeben für Fettöl eine wesentlich grössere Werkstoffabtragung als für ein zusatzfreies Mineralöl. Es wurde weiterhin bereits in Rahmen der letzten Sitzung unseres Ausschusses auf Untersuchungen der Reichsanstalt verwiesen, wonach die homologen gesättigten Fettsäuren eine umso grössere Werkstoffabtragung ergeben, je grösser die Kettenlänge ist. Ähnliche Beobachtungen, wenn auch nicht so deutlich, konnten an den entsprechenden Alkoholen bzw. Äthyldestern der Fettsäuren gefunden werden (Bild 5). Nach diesen Untersuchungen besteht in Übereinstimmung mit den Anschätzungen, die v. Engelhardt aus seinen Messungen über die Schleifhärte von Quarz gewonnen hat, kein Zweifel mehr darüber, dass auch bei der Werkstoffabtragung der Metalle unter Grenzschmierungsbedingungen die mehr oder weniger stark adsorptiven Bindungskräfte zum Ausdruck kommen. D.h., einer sehr grossen Adsorptionsfestigkeit zwischen dem Schmierstoff und dem metallischen Werkstoff ist eine entsprechend grosse Werkstoffabtragung zuzurechnen und umgekehrt. Diese Auffassung erhielt eine weitere Stütze durch Untersuchungen über den Temperatureinfluss auf die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung. In Bild 6 ist die bei Schmierung mit Laurinsäure beobachtete Werkstoffabtragung in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Sie nimmt entsprechend der kleineren Adsorptionsfestigkeit bei höherer Temperatur stark ab.

Die Abhängigkeit von der Last, wie sie in Bild 7 dargestellt ist, lässt sich dagegen nicht ohne weiteres mit der geschilderten Deutung in Einklang bringen. Es war zunächst zu erwarten, dass die adsorbierten Filme bei grösseren Drücken zum Teil zerstört werden, was bei sinngemässer Anwendung der oben angegebenen Deutung über die Wirkung der adsorptiven Bindungskräfte zu einer kleineren Werkstoffabtragung führen müsste. Es darf jedoch in Übereinstimmung mit Holz nicht ausser Acht gelassen werden, dass der wirkliche Druck nahezu unabhängig von der Last ist. Eine Änderung in der Druckbeanspruchung der adsorbierten Filme bei steigender Last tritt also nicht ein. Dagegen vergrössert sich mit der Last die wirkliche Berührungsfläche, wodurch aber zwanglos die beobachtete Zunahme der Werkstoffabtragung mit grösserer Last verständlich wird.

Durch Einbeziehung weiterer Schmierstoffe mit bestimmt ausgewählter Konstitution und durch Ausdehnung der Versuche auf verschiedene andere Werkstoffe sollen die vorstehend beschriebenen Gesetzmässigkeiten noch genauer überprüft werden.

Diskussionsbeitrag Kluge zum Vortrag Barler (1)

303

Bild 1 und 2 Gleitreibungszahl der gesättigten Fettsäuren bei Grenzschmierung
 umlaufende Scheibe: Stahl Last: 900 N
 Stiftprobe: Stahl Rauigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Stiftdurchmesser: 0,6 mm Temperatur: 100°C

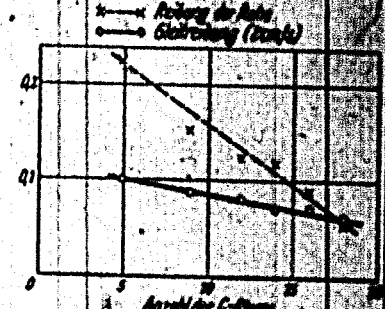
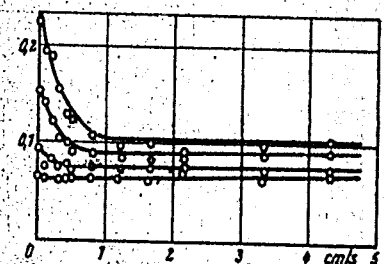


Bild 3 Reibungszahl der Laurinsäure bei Grenzschmierung in Abhängigkeit von der Temperatur
 umlaufende Scheibe: Stahl Last: 900 N
 Stiftprobe: Stahl Rauigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Stiftdurchmesser: 0,6 mm

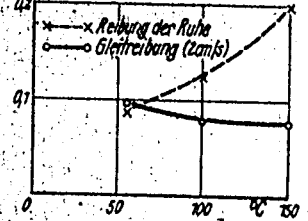


Bild 4 Reibungszahl der Laurinsäure bei Grenzschmierung in Abhängigkeit von der Last
 umlaufende Scheibe: Stahl Temperatur: 55°C
 Stiftprobe: Stahl Rauigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Stiftdurchmesser: 0,6 mm

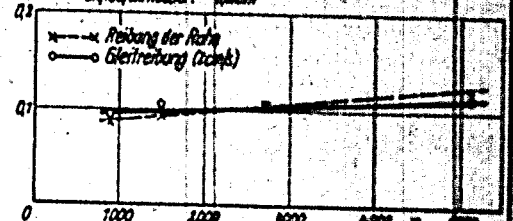


Bild 5 Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung in d. gesättigten Fettsäuren, deren Äthylester u. d. entsprechenden Alkoholen
 umlaufende Scheibe: Stahl Last: 900 N
 Stiftprobe: Stahl Rauigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Stiftdurchmesser: 0,6 mm Temperatur: 100°C
 Gleitgeschwindigkeit: 4 cm/s

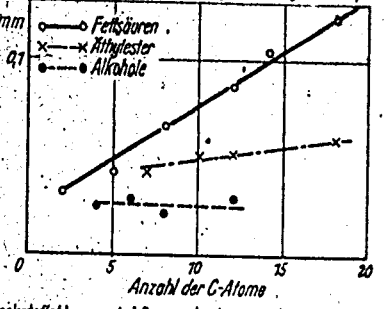


Bild 6 Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung mit Laurinsäure in Abhängigkeit von der Temperatur
 umlaufende Scheibe: Stahl Last: 900 N
 Stiftprobe: Stahl Rauigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Stiftdurchmesser: 0,6 mm Gleitgeschw.: 4 cm/s

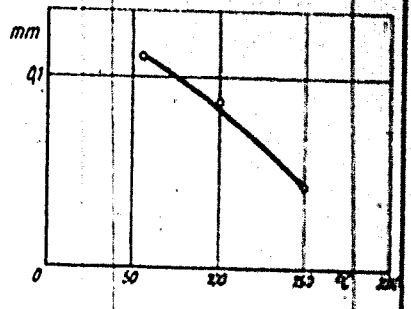
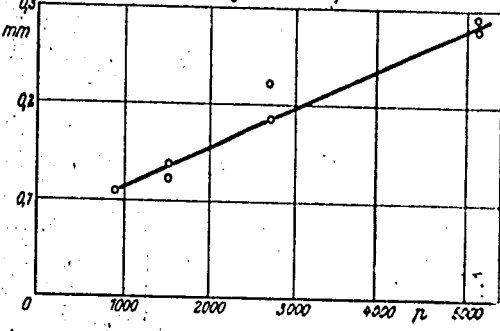


Bild 7 Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung mit Laurinsäure in Abhängigkeit von der Last
 umlaufende Scheibe: Stahl Temperatur: 55°C
 Stiftprobe: Stahl Rauigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
 Stiftdurchmesser: 0,6 mm Gleitgeschw.: 4 cm/s



CS
 00

Hr. v. Philippovich: Die Betriebsstrom darf nicht so sehr an den Vordergrund geschoben werden, weil man sonst für die vielen Fälle der Praxis zu viele verschiedene Prüfgeräte verlangen müsste.

Hr. Zorn gibt folgenden Beitrag:

Nachstehend möchte ich Ihnen einige Versuchsergebnisse vorführen, die Ihnen zeigen sollen, dass zwischen der Schmierfähigkeit und der chemischen Konstante der Schmierstoffe wichtige Beziehungen bestehen. Die Schmierfähigkeit wurde gemessen an der Ketten-Apparatur (Bild 1), die vom Technischen Prüfstand Oppau entwickelt worden ist.

Die Kurven 1, 2, 3 des Bildes 2 sind Messwerte von Estern der Adipinsäure und den geradkettigen Alkoholen Butanol, Octanol und Dodecanol. Man sieht, dass mit steigendem Molekulargewicht die Reibungszahlen absinken und die Abhängigkeit der Reibungszahlen von der Temperatur immer günstiger werden. Ersetzt man in diesen Estern die Adipinsäure durch die Methyl-Adipinsäure, das sind die Ester 4 und 5, so sieht man, dass die Reibungszahl der Methyl-Adipin-Säure-Ester stets höher liegt als die der entsprechenden Adipinsäure-Ester. Diesen Einfluss der Methyl-Gruppe finden wir auf Bild 3 wieder bestätigt beim Vergleich der Ester 2 und 6 sowie 6 und 7. Interessant ist hier nun die rechte Seite des Bildes, wo der Verschleiss der Ester gemessen wurde an einer Hartmetallscheibe, die gegen eine Stahlplatte gedrückt wurde. Man sieht hier, dass derjenige Ester, dessen Reibungszahl am grössten ist, den niedrigsten Verschleisswert aufweist.

Bild 4 zeigt noch einmal das starke Absinken der Reibungszahl mit steigendem Mol-Gewicht des Esters. Man vergleiche Nr. 25 mit 11, 12, 13 und 16. Desgleichen wird die Temperatur-Abhängigkeit immer günstiger. Beim Ester 16 ist sogar mit steigender Temperatur eine geringe Abnahme der Reibungszahl festzustellen. Bemerkenswert ist ferner der Vergleich von 11 und 12. Die verzweigte Säure hat wieder die höhere Reibungszahl und die stärkere Temperaturabhängigkeit der Reibungszahl. Weiter ist interessant, dass durch die unvollständige Veresterung die Reibungszahl nur wenig verschlechtert, die Temperaturabhängigkeit aber gar nicht beeinflusst wird; man vergleiche 17 mit 13. Bei den Verschleissversuchen ist wieder die Reihenfolge der Ester genau umgekehrt wie bei den Reibungszahlen. Auch bei den noch höher molekularen Estern des Bildes 5 wird wieder bestätigt das Abnehmen der Reibungszahl und die Verflachung der μ -Temperatur-Kurve mit steigendem Molekulargewicht.

Hr. Kluge wirft die Frage des Einflusses des Schwefels auf

Hr. Zorn weist darauf hin, dass man den Unterschied von freiem und gebundenem Schwefel beachten muss.

Hr. Heidebroek fragte, welche Reibung auf der Kettenmaschine der I.G. gemessen würde.

Hr. Zorn meinte, es müsse Grenzreibung sein, da Stoffe gleicher Viskosität, aber verschiedener Konstitution Unterschiede ergäben.

Hr. v. Philippovich weist auf von Zorn gezeigte Beispiele hin, bei denen der Verschleiss mit zunehmender Temperatur ausnahmsweise abnimmt, und fragt, ob nicht ein Verdacht auf chemische Veränderungen berechtigt sei.

Hr. Zorn verneint und erwidert, dass sich die Molekülgestalt mit der Temperatur ändern könne, etwa im Sinne einer Entknäuelung, dass sich die Orientierung ändern könne usw., was alles den beobachteten Effekt ergeben könne.

Hr. Wolf fragt, ob sich aus den Estern nicht Säure bilden konnte.

Hr. Zorn verneint. Säurebildung würde längere Zeit brauchen.

Hr. Klemencic möchte einen Unterschied zwischen rein mechanischer und chemischer Schmierung sehen.

Hr. Dunken erklärt, dass zwischen rein adsorptiver Bindung und chemischer Bindung nur gradweise Unterschiede bestehen, da in beiden Fällen die gleichen Kräfte wirksam sind.

Hr. Wolf betont, dass nach Messungen in seinem Institut die Haftfestigkeit nicht mit der Temperatur abzunehmen braucht.

Hr. Zorn meint, dass eine Entknäuelung der Moleküle bei höherer Temperatur eine Erhöhung der Haftfestigkeit bringen kann.

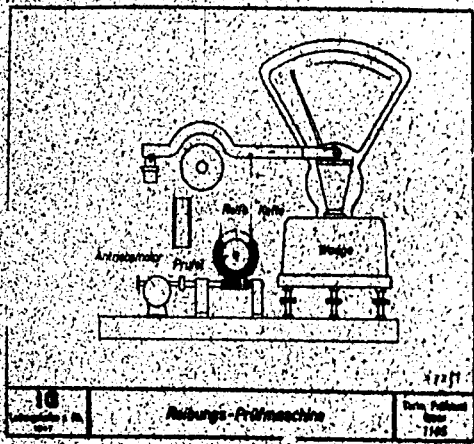


Bild 1

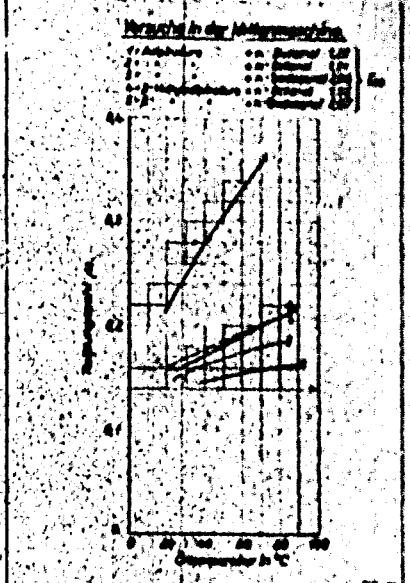


Bild 2

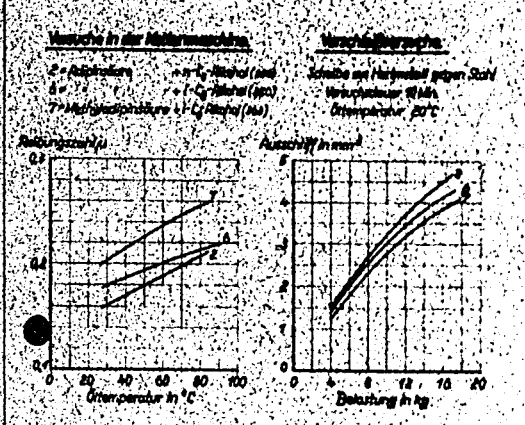


Bild 3

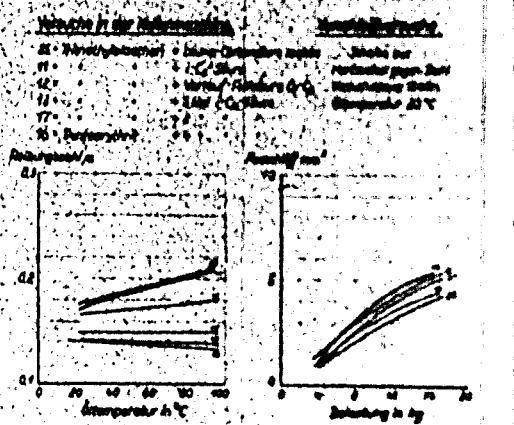


Bild 4

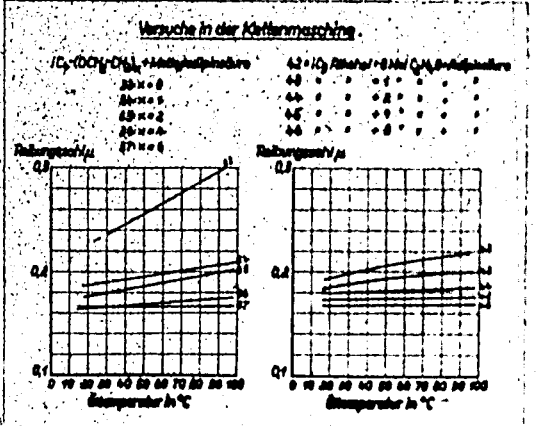


Bild 5

2. Dr. von Philippovich

Über die chemische Schmierung bei Flugmotoren

Die Versuchsergebnisse der DVL (siehe Krienke, Öl und Kohle 39 (1943) 840) über den Verschleiß von Kolbenringen im Flugmotoreneinzylinder wurden zu den Öleigenschaften in Beziehung gesetzt. Dabei zeigte sich wenig Zusammenhang zwischen Haftarbeit, Oberflächen- und Grenzflächenspannung und Verschleiß, während mit Ausnahme des fast nur aus Rizinusöl bestehenden Kompressols eine deutliche Beziehung zwischen Verschleiß und Schwefelgehalt bestand (Bild 1), indem mit steigendem Schwefelgehalt der Verschleißverringerungswert der Öle (Idealöl-Wert 100, Bezugsöl Rotring-Wert 50) ebenfalls anstieg (Bild 2). Nun war nicht zu erwarten, daß eine exakte Beziehung zwischen Schwefelgehalt und Verschleiß bzw. des Verschleißverhinderungswert bestände; Die Art der Schwefelverbindungen mußte sich wohl auch noch auswirken. So zeigen die drei Öle V₁, P₆ und Rotring bei ziemlich ähnlichen Schwefelgehalten

starke Unterschiede im Verschleißverhinderungswert. Deshalb wurde die Reaktionsfähigkeit der Schwefelverbindungen derart untersucht, daß die Öle in einem Reagenzglas auf von 10 zu 10° steigende Temperaturen erhitzt und die Zeiten bestimmt wurden, nach denen bei bestimmten Abmessungen der Apparatur beim Wasserdurchleiten in einer Bleiacetatlösung sichtbare Mengen Bleisulfid entstanden (Bild 3). Man erkennt; daß V₁ am raschesten, P₆ langsamer und

Rotring am allerlangsamsten Schwefelblei bildet; die Reihenfolge ist die gleiche wie jene des Verschleißverhinderungswertes. Je leichter also die Schwefelverbindungen reagieren, umso geringer wird der Verschleiß der Kolbenringe, wenn die Öle etwa den gleichen Schwefelgehalt besitzen. Damit erscheinen die chemischen Eigenschaften erstmalig auch für Schmieröle, die nicht unter den Bedingungen der Hochdruckschmiermittel arbeiten, ausschlaggebend für die Schmiereignung. Ursache wird wohl die hohe Arbeitstemperatur sein, die im Mittel zwischen 250-300° C, maximal aber wohl noch höher liegt. Die Beurteilung der Schmiereignung nach rein physikalischen Gesichtspunkten ist deshalb für solche Verhältnisse nicht brauchbar. In den Lagern der Flugmotoren treten Mitteltemperaturen bis 150° C auf; ob sich da die chemische Schmierung noch wesentlich auswirkt, müßte erst untersucht werden. In übrigen ist es klar, daß zwischen physikalischer und chemischer Schmierung nicht in allen Fällen klar unterschieden werden kann; so dürfte gerade das bereits erwähnte Kompressol (Rizinusölgemisch) bei niederen Temperaturen physikalisch, bei höheren aber chemisch schmieren, wenn man die Bindung mit Nebenvalenzen (van der Waal'schen Kräften) und mit Hauptvalenzen als Grenzfälle annimmt.

Aussprache

Hr. v. Philippovich empfiehlt eine Versuchsreihe in ähnlichem Sinne, wobei einheitliche Ölproben an verschiedenen Stellen verwendet werden müssten. Dadurch erhält man einen Überblick, ob und mit welchen verfügbaren Lagerprüfeinrichtungen reproduzierbare Ergebnisse zu erwarten sind.

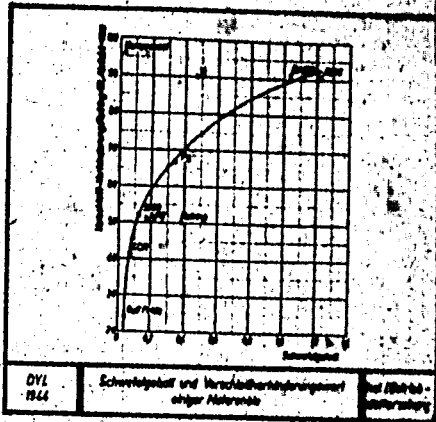
Hr. Heidebroek weist auf die Schwierigkeit und die Notwendigkeit hin, Verfahren zur genaueren Messung der Temperatur an eng begrenzten Stellen der Schmierschicht zu schaffen.

Die Hrn. Holm, Pfender und Vogelpohl weisen auf die praktische Möglichkeit hin, diese Temperaturen rechnerisch zu ermitteln. Hr. Holm hat solche Rechnungen schon mehrfach durchgeführt, und er erklärt sich bereit, neue Beispiele durchzurechnen.

Hr. Pfender: Der unmittelbaren Messung der an Stelle metallischer Berührung auftretenden Temperaturen bereitet nicht nur die Unzugänglichkeit, sondern auch der meist nicht stationäre und dauernd veränderliche Vorgang selbst wahrscheinlich unüberwindbare Schwierigkeiten, wenn man sich nicht wie Bowden auf kleinste Berührungsflächen und die Ausnutzung des thermoelektrischen Effektes beschränken will. Bei grösseren Gegenflächen werden wahrscheinlich nur mittelbare Rückschlüsse auf örtlich sich ausbildende Temperaturspitzen möglich sein, indem man aus der aufgenommenen Leistung, der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärme und der Wichte des Reibwerkstoffes einerseits und der Annahme halbkugelförmiger Temperaturausbreitung andererseits die zu erwartenden Temperaturen zu ermitteln sucht. Unter Umständen könnten dabei die Erfahrungen mit Nutzen angewandt werden, die bei der Bestimmung des Temperaturfeldes an Drehmeisseln gesammelt wurden (G. Pahlitzsch und H. Helmerdig, Z.VDI 87 (1943) 564; H. Schallbroch und J. Lang, Z.VDI 87 (1943) S.15). Die Hauptschwierigkeit bei diesen Ermittlungen dürfte darin liegen, dass man auf ein zutreffendes Schätzen der Grösse und Verteilung der wirklich tragenden Berührungs- und Reibflächen angewiesen ist, zumal die bei Raumtemperatur ermittelte Oberflächenhärte nicht mehr mit der bei der Reibtemperatur vorhandenen Härte übereinstimmt.

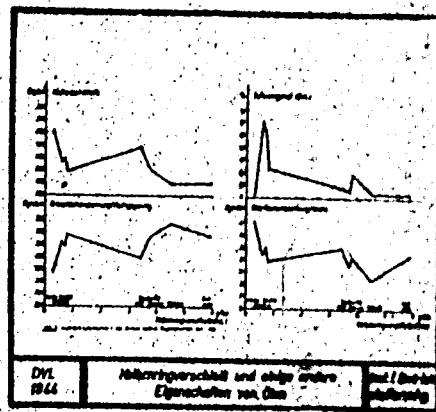
Hr. Glaser auf Frage von Hrn. Dunken: Gleitflächen als Thermoelemente zu benutzen, führt deshalb zu keinen brauchbaren Ergebnissen, weil diese Messung nur Mittelwerte über grössere Flächen ergibt.

Hr. v. Philippovich auf Frage des Hrn. Klenowic: Die Kenntnis der Beharrungstemperatur reicht nicht aus, da die Zersetzung der Schwefelverbindung gerade bei Temperaturspitzen erfolgt.



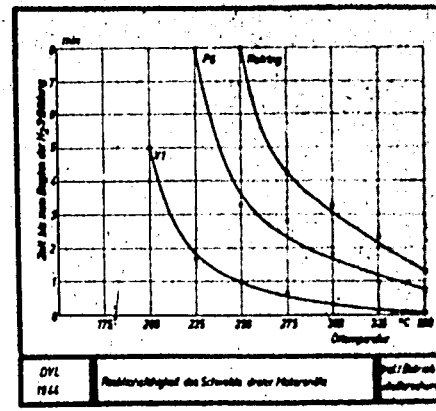
DVL 1944 Schwerepunkt und Verschleißbeständigkeit einiger Metalle bei Stoßbelastung

Bild 1



DVL 1944 Härteverhältnis und einige andere Eigenschaften von Stählen

Bild 2



DVL 1944 Härteverhältnis der Stähle einer Metalle

Bild 3

3. Dr. von Philippovich und Dr. Krienka

Bericht über die eingegangenen Meldungen zum Lagersauftrag

Entsprechend dem Wortlaut des Auftrages wurden Prüfeinrichtungen für Maschinen aller Art gemeldet. Will man Lager, Zahnräder oder allgemein gesprochen, Maschinenbauteile prüfen, so muß das wirklichkeitsgetreu erfolgen. Eine allgemein gültige Prüfapparatur und demgemäß auch eine ebensolche systematische Einteilung ist dann nicht möglich. Für den Zweck des Maschinenbauers kommt also eine systematische Einteilung nicht in Frage.

Anders ist es mit der Notwendigkeit einer Einteilung, wenn man sie von der Schmierstoffseite aus betrachtet. Es soll dieser Gesichtspunkt im folgenden zu Grunde gelegt werden. Man kann danach die Maschinen, welche auf Grund des Auftrages gemeldet wurden, in drei Gruppen einteilen:

Unterteilung der von 36 verschiedenen Stellen angemeldeten 70 Geräte bzw. eingegangenen Antworten in

a. Nicht auswertbare Antworten und für Schmierversuche nicht geeignete oder noch nicht fertige Geräte:

- 1. Keine Prüfeinrichtungen vorhanden 52^{*)} 1
- 2. Prüfeinrichtung noch nicht betriebsfertig
6 26 31 3
- 3. Gerät dient der Viskositätsmessung 15 29 40 3
- 4. Angaben reichen nicht aus 7 10 2

Insgesamt 9 Geräte bzw. Antworten, d.h. 13% der Anmeldungen

b. Geräte mit Maschinenbauteilen (größere Prüfmengen erforderlich)

- 1. Lager 8 9 11 12 13 14 15 17 18 22 24
33 35 36 46 50 53 55 59 63 65 66 69 70 24
- 2. Zahnräder 1 5 20 3
- 3. Motoren 27 56 2
- 4. Walzen und Prüfkörper von verhältnismäßig großen Abmessungen, wie z.B. Panzerketten, Bronzstromeln usw. 32 37 38 54 55 5

Insgesamt 34 Geräte, d.h. 48% der angemeldeten.

*) Die Nummern bedeuten Kennziffern, mit denen - in der Reihenfolge ihrer Eingänge - die Antworten bzw. die in ihnen angemeldeten Geräte 126. versehen worden sind.

c. Kleine Prüfgeräte (Prüfölmengen bis etwa 1kg)A. Geräte, die vorwiegend zur Messung von Fräßbe-
lastungen oder Reibungswerten dienen

I. 4-Kugelmaschinen	2	45	48	3	
II. Almen-Wielandmaschinen	41	46	60	64	4
III. Falex-Maschine	3			1	
IV. Ford-Tester	47			1	
V. Kettenmaschine	42			1	
VI. Thoma-Gerät	28			1	
				<u>1</u>	11

B. Geräte, welche vorwiegend Verschleiß-
größen messen

I. Siebel-Maschinen	34	57	2		
II. Skoda-Sarwin-Maschinen	44	48	2		
III. Sonstige Verschleißmaschinen	4	21	23		
	25	39	43	67	7
				<u>7</u>	11

C. Kleinlager, vorwiegend zur Messung von
Reibungswerten 19 30 51 61 625
27Insgesamt 27 Geräte, d.s. 39% der angemeldeten.

Bei dieser Auswertung der auf die Rundfrage eingegan-
genen Antworten mußten die Prüfgeräte z.T. auf Grund nicht
ganz ausreichender Unterlagen eingeteilt werden. Es ist
daher nicht ganz ausgeschlossen, daß besonders in der
Frage der Prüfmöglichkeit mit kleineren Schmiermittel-
mengen noch gewisse Korrekturen in der Aufstellung vorge-
nommen werden müssen.

c. Aufstellung der Stellen, welche kleine Prüfgeräte
anmeldeten:

A. 11 Geräte, die vorwiegend zur Messung von Pressbelastungen
oder Reibungswerten dienen

angemeldet von:

- | | |
|---------------------------|--|
| I. 3 Vierkugelmashinen | 2 MPA an der T.H. Stuttgart
46 Rhenania-Ossag
68 DVL, Institut 88 |
| II. 4 Almen-Wielandmasch. | 41 Steinkohlenbergwerk Rheinpreußen
46 Rhenania-Ossag
60 I.G. Farben Leverkusen
64 Junkers Dessau |
| III. 1 Falex-Maschine | 3 MPA an der T.H. Stuttgart |
| IV. 1 Ford-Tester | 47 Rhenania-Ossag |
| V. 1 Kettenmaschine | 42 I.G. Farben T.P. Oppau |
| VI. 1 Thoma-Gerät | 28 B'stelle Rechlin |

B. 11 Geräte, die vorwiegend Verschleißgrößen messen

- | | |
|--|--|
| I. 2 Siebel-Maschinen | 34 MPA Dahlen
57 FCS Stuttgart |
| II. 2 Skoda-Sawin-Maschinen | 44 I.G. Farben T.P. Oppau
48 Rhenania-Ossag |
| III. 7 sonstige Verschleiß-
Maschinen | 4 MPA an der T.H. Stuttgart
21 T.H. Dresden, Prof. Heidebrock
23 Metallges. Frankfurt/M.
25 KTI für Eisenforschung
39 Meier & Weicholt, Leipzig
43 I.G. Farben T.P. Oppau
67 DVL, Institut I |

C. 5 Kleinlager, an denen vor allem Reibungswerte gemessen werden

- | |
|-----------------------------------|
| 19 T.H. Dresden, Prof. Heidebrock |
| 30 T.H. München, Prof. Poppler |
| 51 T.H. Graz, Dr. Menencio |
| 61 T.H. Darmstadt, Prof. Vieweg |
| 62 Bosch Stuttgart |

Insgesamt 27 Geräte von 19 verschiedenen Stellen

Vorteil der Prüfgeräte mit Bauteilen von Maschinen: Wirklichkeitstreu; Nachteil: große Ölmenge erforderlich, Aussagen nur für verwendeten Bauteil gültig.

Folgerung: Systematische Einteilung für Zwecke der Ölbeurteilung wäre nur dann möglich, wenn die Reihenfolge der Bewertung in allen Maschinen mit Bauteilen gleicher Art die gleiche wäre. Das ist schon wegen der konstruktiven Verschiedenheiten unwahrscheinlich, so daß man für allgemeine Ölbeurteilung den Gültigkeitsbereich der Geräte beschränken müßte, daß sie alle vorkommenden Fälle überdeckt. Werkstoff bei Prüfung müßte festgelegt werden.

Kleine Prüfgeräte müßten nach Schmierzuständen und Temperaturen eingeteilt werden. Eine genaue Einteilung wäre erst möglich, wenn die Geräte nach ihren Ergebnissen untereinander verglichen worden sind. Nun sind die bisherigen Ergebnisse noch recht mangelhaft (Druck- und Temperaturbereich der Messungen, spezifische Last usw.). Eine bessere Einteilung wäre auf Grund von Vergleichsversuchen möglich, bei denen einheitliche Bezugsöle verwendet werden. Solche Bezugsöle wären: einwandfreie H-Öle (die jetzigen haben Verschleißzahlen, enthalten also Sauerstoffverbindungen)

	S.Z.	V.Z.
H 140	0,13	6,0
H 32	0,05	1,8

Rotring, Rizinusöl, H-Öl oder Rotring-Öl + Schwefelester bzw. -verbindung. Die Auswertung müßte erfolgen in der Angabe des Verhältnisses von Meßbereich zu Streuung (bei Messung eines und desselben Öles). Je größer der Wert ist, umso besser ist das Verfahren. Deckt sich Meßbereich mit Streubereich (Empfindlichkeit = 1), so ist das Verfahren unbreuchbar.

Um diese Vergleichsversuche in absehbarer Zeit durchführen zu können, würde es sich empfehlen, einen Bearbeiter einer neutralen Stelle zu den Prüfstellen hinzuschicken. Einzelheiten zu der Versuchsdurchführung werden gesondert in dem Abschnitt "Richtlinien zur Durchführung von Schmierversuchen" besprochen.

Erst nach Durchführung solcher vergleichenden Messungen wird eine Aussage über die Meßbereiche und Empfindlichkeit der einzelnen Geräte möglich sein.

A u s s a g e

Hr. Heidebreck: Die Schmierstoffprüfgeräte sollten von den eigentlichen Lagerprüfmessungen getrennt behandelt werden. Vorzuziehen ist wohl die Schmierstoffprüfung, da man mit den gegebenen Lagerwerkstoffen auskommen muss. Das Endziel wäre ein einfaches Prüfgerät für alle Zwecke. Die Verschleißfrage darf auch nicht außer Acht gelassen werden.

4. Dr. von Philippovich

Vorschlag zu Richtlinien für die Durchführung von
Schmierversuchen

Kennzeichen der Schmierung:

Reibungsverhinderung und Verschleißverringering sind die Kennzeichen der Schmierung; sie sind aber nicht gegenläufig! Man bezeichnet daher am besten genau, was man erzielen will: demgemäß wird die Prüfung sich gestalten.

Meßmöglichkeiten:

Zur Messung der Schmiereigenschaften gibt es verschiedene Möglichkeiten und zwar:

Reibungswert a) Ruhe, b) Bewegung
Verschleißgröße
Belastbarkeit a) kg/cm^2 , b) Diagramme
Temperatur (des Versagens, der Kontaktstellen, Mittelwerte)
Gleitgeschwindigkeit
Lebensdauer

Kennzeichen der Schmierarten:

Die Prüfmaschinen arbeiten in verschiedenen Gebieten der Schmierung:

1. Physikalisch: a) nicht hydrodynamisch (vorwiegend Grenzreibung)
b) Teilschmierung
c) hydrodynamisch
2. Chemisch (durch chemische Veränderung der Oberflächen)

Zur Erkennung des betreffenden Gebietes empfiehlt sich die Verwendung von Bezugsölen:

Drei Öle gleicher Zähigkeit, von denen eines rein paraffinisch, das andere physikalisch aktiv und das dritte chemisch aktiv ist, sowie ein viertes ebenfalls paraffinisches mit anderer Zähigkeit.

Faktoren und Einflüsse

- a) Schmiermittel: Freiheit von mechanischen Verunreinigungen, Ver- bedingung, Verdunstung, Oxydation und Polymerisation und Ent- mischung bei Aufbewahrung müssen vermieden werden. Gut ver- schlossene, dunkle Glasgefäße oder Blechbehälter zur Aufbewah- rung! Öle sollten nicht nur im frischen Zustand, sondern auch nach Alterung untersucht werden. Chemisch wirksame Elemente im Schmierstoff (S, P, Cl, usw.) müßten bekannt sein.

- b) Werkstoff: Natur des Werkstoffes, chemische Zusammensetzung, Gefüge des Metalls oder der Legierung, Rauigkeit, sowie allgemeine mechanische Eigenschaften müssen bekannt sein.
- c) Schmierstelle: Zur Erzielung reproduzierbarer Ergebnisse muß die Schmierstelle für jeden Versuch immer in möglichst gleicher Beschaffenheit hergestellt sein. Spiele sind sehr wichtig, vor allem bei Gleitlagern. Die dauernd richtige Zufuhr bzw. Versorgung mit Schmiermitteln ist zu beachten; bei Fetten muß dies besonders berücksichtigt werden.

Versuchsbedingungen:

Bei dem Versuch können sich Werkstoff und Schmiermittel in schwer kontrollierbarer Weise ändern - der zeitliche Ablauf des Versuches muß deshalb beachtet werden. Unter Umständen ist sogar die Zeit zwischen der Aufbringung des Schmiermittels und dem Versuch von Einfluß. Die spezifischen Belastungen, nicht nur projizierte Drucke, Mitteltemperaturen, nach Möglichkeit auch die Spitztemperaturen sollten bekannt sein. Die Menge des Öles ist dann von Bedeutung, wenn kleine Mengen aktiver Anteile darin enthalten sind, die entweder infolge von Adsorption oder durch chemische Reaktion verschwinden können (Dochtschmierung, Filter, S, P, Cl usw.). Zur Erzielung richtiger Ergebnisse erscheint ein Klimaraum wichtig; derselbe überwiegen allerdings Einflüsse anderer Art noch diejenigen der Atmosphäre. Immerhin muß darauf geachtet werden, daß außer Staub auch chemisch wirksame Gase ferngehalten werden, wie H_2 und Cl. Die Arbeitsbedingungen müssen den praktisch herrschenden entsprechen, so daß die in den Maschinen vorkommenden Grenzfälle mit erfaßt werden. Die Versuche sollten stets über einen größeren, praktisch in Frage kommenden Temperaturbereich gemacht werden.

Versuchsmethodik:

Ganz gleich, welches Maß man für die Erfassung der Schmierleistung anwendet, man muß sich auf alle Fälle über die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ein Bild verschaffen. Dazu ist es erforderlich, daß man einerseits den Meßbereich durch Prüfung zweier extremer Öle gleicher Zähigkeit festlegt (z.B. paraffinisches Öl-Rizinusöl), dann aber die Streuungen, die bei der Messung eines und desselben Öles auftreten. Das Verhältnis Streuung: Meßbereich ergibt dann den Wert der Empfindlichkeit der Messung. Vielleicht wird man hierbei noch zwischen gut und schlecht meßbaren Ölen unterscheiden müssen.

Dr. F. Seelich:

Über die Charakterisierung der Oxydation von Schmierölen durch Bestimmung des Peroxydgebietes.

Es ist eine alte Erfahrungstatsache, dass Schmieröle in Verbrennungsmotoren erst nach einiger Zeit ihre maximale Schmierwirkung zeigen. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, dass die Schmieröle im Motor anoxydiert werden und dass verschiedene der hierbei entstehenden Oxydationsprodukte infolge ihres polaren Charakters Adsorptionfilme von grosser Haftfestigkeit und Resistenz bilden, die für die Schmierwirkung im Gebiete der Grenzreibung von besonderer Bedeutung sind. Die Frischöle besitzen also eine "potentielle Schmierwirkung", die erst im arbeitenden Motor zur Geltung kommt. Dieser Zustand darf nicht ausser Acht gelassen werden, wenn man anstrebt, aus den Reibungs- und Verschleisswerten der diversen Prüfgeräte auf die praktische Schmierleistung zu schliessen.

Eine zu hohe Oxydationsbereitschaft wird sich andererseits in dem Maße ungünstig auswirken, als sie zur Bildung von schmiertechnisch unerwünschten niedermolekularen Spaltprodukten und von Harz- und Asphaltstoffen führt. Die üblichen Methoden der künstlichen Alterung von Ölen (Indianatest usw.) mit nachfolgender Bestimmung der Säurezahl und des Harz- und Asphaltgehaltes erfassen diese sekundären Vorgänge, ermöglichen aber keine Beurteilung des primären Oxydationsverlaufes. Dieser wird auch bei physikalisch sehr ähnlichen Ölen ganz verschiedenen Charakter haben, je nach der Gegenwart von Stoffen, die oft schon in geringsten Konzentrationen - als Oxydationskatalysatoren oder Inhibitoren wirken. Hierbei ist auch die Art der verwendeten Werkstoffe von Bedeutung, deren Abrieb oxydationsfördernden oder -hemmenden Einfluss haben kann.

Um die Wirkung dieser verschiedenen Faktoren und den jeweiligen Reaktionsverlauf kennenzulernen, benötigt man analytische Methoden zur Bestimmung der primären Reaktionsprodukte. Dies gilt vor allem für die bei der Oxydation von Kohlenwasserstoffen entstehenden Peroxyde. Wir stellten uns demnach zur Aufgabe, eine Mikro-Schnellmethode zur Bestimmung des Peroxydgebietes auszuarbeiten. Dieser Peroxydtest, an dessen erfolgreicher Ausarbeitung mein Mitarbeiter Dr. Erdmann besonderen Anteil hat, beruht auf der Oxydation von Ferrosalzen zu Ferrisalz in Gegenwart von Alkalirhodaniden und auf kolorimetrischer Bestimmung des Ferrirhodanids.

Die Nachweisreaktion erfolgt in dem Lösungsmittelgemisch Wasser/Benzol/Methanol, das Schmieröle in begrenztem Umfang vollkommen zu lösen vermag. Der Ausschluss aller Spuren von Fe³⁺ in der Reagenzlösung wurde durch Zwischenschalten eines kleinen Silberreduktors ermöglicht. Die Auskolorimetrierung erfolgt gegen eine Farbskala von Kobaltchlorürlösungen. Auf diese Weise lässt sich der Peroxydgebietes in Schmierölen innerhalb weniger Minuten mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ bestimmen. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Vermeidung eines unvollständigen Ausschüttelns getrennter Flüssigkeiten und in der Ausschaltung des Einflusses ungesättigter Verbindungen, welche bei jodometrischen Methoden durch Bindung des bei der Titration freiwerdenden Jodes die Peroxydwerte falschen können.

Um ein Bild von der Genauigkeit dieser Peroxydbestimmung in Schmierölen zu geben, wurden Vergleichsmessungen des Peroxydgehaltes (P), der Grenzflächenspannung gegen Wasser (σ) und der Sedimentationshöhen von Eisenpulvern (S) unter Verwendung von Paraffinölen verschiedener Bestrahlungszeit durchgeführt (Bild 1).

Über die Erniedrigung des Sedimentvolumens von Eisenpulvern in Kohlenwasserstoffen durch polare Verbindungen wurde bereits auf der Tagung vom 29.6.43 berichtet. Inzwischen wurden auch von K.L. Wolf analoge Effekte an anderen Suspensionen beobachtet, über die er hier noch sprechen wird. Unsere bisherigen Versuche haben ergeben, dass die Kurve der Erniedrigung des Sedimentvolumens ähnlich verläuft wie die Kurve der Erniedrigung der Grenzflächenspannung gegen Wasser. Beide besitzen den Charakter von Adsorptionskurven mit asymptotischer Annäherung an einen Sättigungswert, während die Kurve des Peroxydgehaltes annähernd linear mit der Belichtungszeit ansteigt. Die Bestimmung des Peroxydgehaltes bildet so eine wertvolle Ergänzung der physikalischen Charakterisierung der Schmieröle, der sie an Empfindlichkeit kaum nachsteht. Sie ermöglichte uns auch die Untersuchung des primären Reaktionsverlaufes bei der Oxydation von gereinigten Paraffinölen nach Durchleiten von Sauerstoff bei 100° bzw. 120° (Bild 2).

Man ersieht aus den Kurven, dass der Peroxydgehalt erst nach einer längeren Induktionsperiode stark ansteigt, ein Maximum durchläuft und sich dann mit weiterer Versuchsdauer wieder niedrigeren Werten nähert. Die Länge der Induktionsperiode ist abhängig vom Reinheitsgrad des Paraffinöls und von der Temperatur. Bei dem von uns verwendeten Paraffinöl betrug die Induktionsperiode bei 100° 30 Stunden, bei 120° 4 Stunden; bei 140° ist eine Induktionsperiode nicht mehr erkennbar. Der Kurvenabfall nach Überwindung des Maximums beruht auf Sekundärreaktionen, in deren Verlauf unter Aufspaltung der Peroxyde sowohl niedermolekulare Oxydationsprodukte als auch Polymerisate entstehen. Die an reinem Paraffinöl ermittelten Werte dienen bei der Untersuchung der positiv oder negativ katalytischen Wirkung von Zusätzen als Bezugskurven.

Zur Charakterisierung oxydationsauslösender Substanzen in Schmierölen wurden verschiedene ungesättigte, öl lösliche Stoffe dem Paraffinöl in 1/100 Molkonzentration zugesetzt und die Peroxydbildung mit der des reinen Paraffinöls verglichen (Bild 3). Aus den Kurven ist zu ersehen, dass Aromaten mit ungesättigter Seitenkette (Anethol, Zimtsäure, Styrol) die Induktionszeit wesentlich herabsetzen; ungesättigte Aliphaten, wie z.B. Ölsäure, zeigen besonders starken Einfluss: Die Induktionszeit verkürzt sich von 30 auf 4 Stunden. Am stärksten wirken Aliphaten mit konjugierten Doppelbindungen; es ist jedoch nicht anzunehmen, dass eine induzierende Wirkung lediglich ungesättigten Verbindungen zukommt. Die Oxydationskurven von U.V. vorbelichteten Ölen zeigen (Bild 4 u. Bild 5), dass durch die Bestrahlung innerhalb des Paraffinöls induzierende Substanzen gebildet werden, die so stark wirksam sind, dass bei nachfolgender O₂-Oxydation bei 100° eine Induktionszeit nicht mehr erkennbar ist.

Es wurde weiterhin die Wirksamkeit von Inhibitoren auf den Oxydationsverlauf von Paraffinölen untersucht. Zu diesem Zweck wurde reines Paraffinöl bis zu einem Peroxydgehalt von 0,1% mit U.V. Licht vorbestrahlt und anschließend die Sauerstoffoxydation unter 1/100 molarem Zusatz eines Inhibitors

Peroxygehalt, Grenzflächenspannungserniedrigung gegenüber Wasser und Sedimentationshöhenerniedrigung an Fe-Füher in Abhängigkeit von UV-Bestrahlungsdauer.

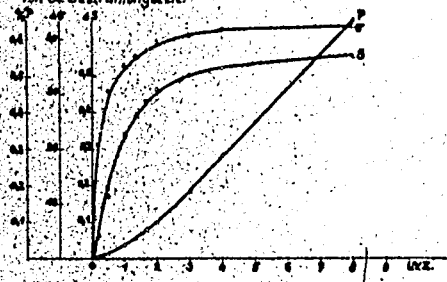


Abb. 1.

O₂-Oxidationsverlauf unbestrahlter Paraffinöl bei 100°C

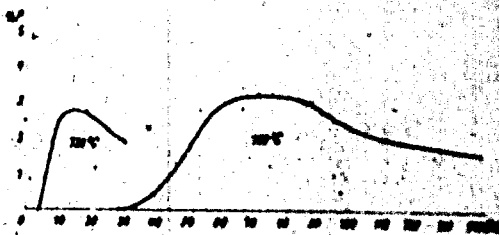


Abb. 2.

Einflusswirkung ungesättigter Verbindungen bei der O₂-Oxidation von Paraffinöl (1% in Zusatz)

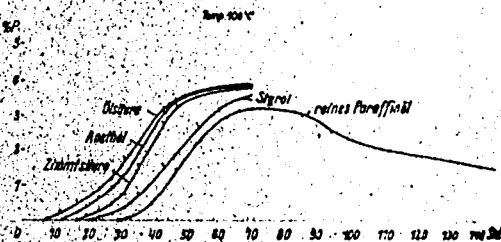


Abb. 3.

O₂-Oxidationsverlauf UV-bestrahlter Paraffinöl im Vergleich zu unbestrahltem Paraffinöl

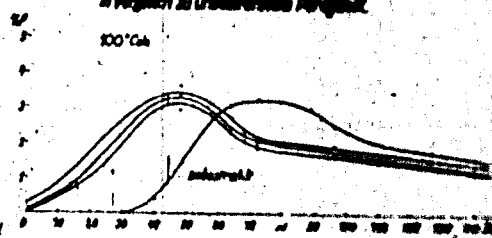


Abb. 4.

O₂-Oxidationsverlauf UV-bestrahlter Paraffinöl im Vergleich zu unbestrahltem Paraffinöl

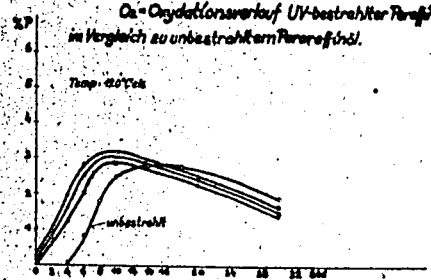


Abb. 5.

Pro- und antioxidative Wirkung von Zusatzstoffen (Phenole) bei der O₂-Oxidation UV-bestrahlten Paraffinöl mit Benzoylperoxid

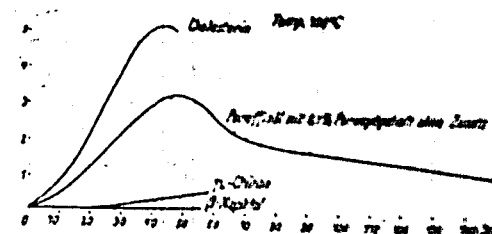


Abb. 6.

Antioxidative Wirkung von Zusatzstoffen (Phenole) bei der O₂-Oxidation UV-bestrahlten Paraffinöl (41% Peroxygehalt)

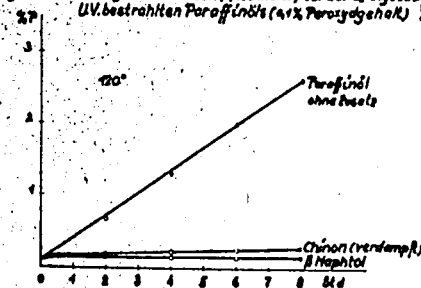


Abb. 7.

Abhängigkeit der antioxidativen Wirkung von der Konzentration des zugesetzten β-Naphthols

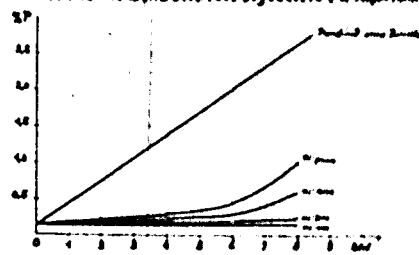


Abb. 8.

3
2

379

verfolgt. Die Oxydationskurven (Bild 6, 7 u.8) zeigen die starke antioxygene Wirkung von β -Naphthol und Chinon. Von den weiteren Substanzen führen wir nach dem Grade ihrer Wirksamkeit folgende Verbindungen an: α -Naphthol, Pyrogallol, Thymol, Resorcin, p- und m-Kresol und Phenol. Ohne antioxygenen Einfluss waren Hydrochinonmonoäthyläther, Furfurol, Cymol, m-Dinitrobenzol. Prooxydativ wirkte Cholesterin.

Was den Reaktionsmechanismus der Inhibitoren anbelangt, so wurde von Mourou und Dufraisse (Compt.rend. 186 (1928) 196 Journ.Soc.Chim.Ind. 47 (1928) 819, 849) die Ansicht vertreten, dass diese Stoffe dadurch die autokatalytische Oxydation hemmen, weil sie die primär entstandenen Peroxyde unter Bildung von inaktivem Sauerstoff zersetzen. Dieser Theorie, die bis heute ganz allgemein angenommen wurde, widerspricht unser Befund, wonach bei der Einwirkung von Inhibitoren auf die Oxydation von Schmierölen der anfängliche Peroxydgehalt unverändert bleibt. Die Inhibitoren greifen also nicht an den Peroxyden an. Es ist vielmehr wahrscheinlich, dass sie die Weitergabe der Aktivierungsenergie auf inaktive Kohlenwasserstoffmoleküle verhindern und so die "Energiekette" der autokatalytischen Oxydation unterbrechen. Für die Richtigkeit dieser Auffassung spricht der Befund, dass die Inhibitoren nicht nur die Oxydation beeinflussen, sondern ganz allgemein auf jene Reaktionen hemmend wirken, die als Folge der thermischen oder Photo-Aktivierung von Kohlenwasserstoffmolekülen auftreten, d.h. auf die Abspaltung von Wasserstoff (Bildung von ungesättigten Bindungen), auf die Peroxydbildung, auf Polymerisationsreaktionen und auf die Abspaltung von Kohlenstoffketten.

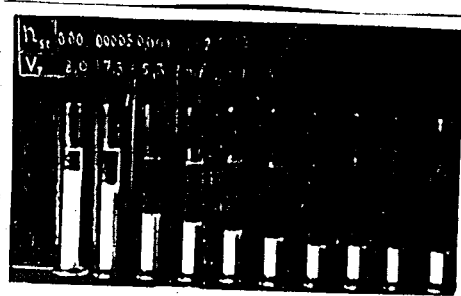
Es ist unsere Überzeugung, dass Untersuchungen, betreffend den Reaktionsmechanismus der autokatalytischen Oxydation von Kohlenwasserstoffen bei Gegenwart von Initiatoren und Inhibitoren, nicht nur für die präparative Chemie, sondern auch für die verschiedenen Fragen aus der Praxis der Schmiermittel und Treibstoffe von Bedeutung sein werden.

A u s s p r a c h e

Hr. W.M.F.:

Die Ausführung von Hrn. Seelich kann ich durch den Hinweis auf eine Reihe von Messungen von Sedimentvolumina ergänzen, die in unserem Laboratorium ausgeführt wurden. Es handelt sich um Messungen des Einflusses der Konzentration gelöster Stoffe auf die Sedimentation von Pulvern anorganischer Salze (z.B. CaCO_3) und von Metallpulvern. Der Einfluß der Konzentration ist außerordentlich stark ausgeprägt, derart daß zum Beispiel bereits ein Zusatz von äußerst geringen Mengen von Octanol oder Stearinsäure zu Petroläther (0,05 molare Lösungen) das Sedimentvolumen von Quarz um 60%, ein entsprechender von Stearinsäure zu Benzol dasjenige von Eisenoxalat um 70% herabsetzt, während weiterer Zusatz der aktiven Stoffe das Sedimentvolumen nicht mehr beeinflußt. Das Sedimentvolumen von CaCO_3 wird durch Zusatz von Stearinsäure zu Petroläther sogar um 80% erniedrigt. Ein Beispiel für die Abhängigkeit des Sedimentvolumens von Stearinsäurezusatz gibt für den Konzentrationsbereich einer Normalität von 0,0005 bis zu einer solchen von 0,1 das untenstehende Bild in dessen Kopf die Normalität an Stearinsäure N_{St} und das Sedimentvolumen des Pulvers V_p angegeben sind.

Die Sedimentvolumina erweisen sich somit als äußerst empfindlich zum Nachweis von Grenzflächen- und Reibungsaktivitäten und verdienen, da der Einfluß der Zusätze offenbar einer Schmierwirkung gleichkommt, im Zusammenhang mit den Untersuchungen über den Einfluß der Zeit bzw. Schütteldauer auf die Sedimentation versprechen darüber hinaus interessante Ergebnisse.



6. Aussprache über Begriffsbestimmungen der Schmiertechnik.

Hr. v. Philippovich schlägt vor, den Begriff der Grenzreibung abzuschaffen, da es reine Grenzreibung nicht gebe.

Hr. Klemenovic findet den Begriff gerade sehr anschaulich, da es zweifellos Reibung gebe, die ausschließlich von der Grenzfläche her bestimmt sei.

Hr. Vogelpohl weist darauf hin, dass der Grenzreibungsbegriff auf die Arbeiten von Hardy zurückginge, die er bereits früher kritisiert habe. Der Begriff Grenzreibung sei ausserdem ursprünglich im Hinblick auf die Randbedingungen von gewissen in der Hydromechanik vorkommenden Differentialgleichungen geprägt worden.

Hr. Dunken entgegnet, dass der Begriff auch in angelsächsischen Sprachgebrauch jedenfalls heute nicht die von Vogelpohl erwähnte Bedeutung habe. Um solchen Deutungen und anderen Missverständnissen aus dem Wege zu gehen, spreche man besser von Grenzflächenreibung. Wieweit die so bezeichnete Reibung, die man z.B. in Messgeräten allein wirksam werden lassen kann, wirklich eine Grenzflächenerscheinung ist, kann man z.B. durch Vergleich der Konzentrationsabhängigkeit der Reibung mit der Konzentrationsabhängigkeit der Grenzflächenarbeit von Quecksilber zeigen.

Hr. v. Philippovich fragt, wie man denn in einer Maschine feststellen wolle, wann, wo und wieweit man Grenzflächenreibung habe.

Hr. Wolf: Die Schwierigkeiten, die z.B. aus den Ausführungen von Hrn. Vogelpohl und Hrn. v. Philippovich im Hinblick auf den Begriff der Grenzflächenreibung zu entstehen scheinen, dürften im wesentlichen darauf beruhen, dass das urbildliche Denken in den letzten Jahrzehnten den Physikern ungewohnt geworden ist. Ich möchte deshalb mit Nachdruck darauf hinweisen, dass es sich bei den Begriffen der Vollschrüierung, der Grenzflächenschmierung und der Trockenreibung um urbildliche Vorstellungen handelt, die in der Natur nie vollständig realisiert sind, deren Erfassung uns jedoch erst eine geistige Durchdringung der Erscheinungen möglich macht. Ob auf solche typischen Fälle bezogen werden muss, steht nicht zur Erörterung; es bleibt also lediglich die Frage, ob der Begriff der Grenzflächenreibung eine wesentliche Erscheinung erfasst. Dass dies der Fall ist, dürfte auf Grund unserer heutigen Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Schmierwirkung und sonstigen Grenzflächeneigenschaften unbezweifelbar sein. In praktischen Fällen werden wir von Grenzflächenschmierung stets dann sprechen, wenn der Zustand der Grenzflächenreibung so weitgehend approximiert ist, dass der Vorgang in den Grenzflächen den Reibungsvorgang überwiegend oder entscheidend bestimmt.

Ich möchte noch in Anschluss an die Ausführungen von Hrn. Vogelpohl bemerken, dass es für die Frage des Einflusses der Grenzflächen auf die Reibungsercheinungen völlig belanglos ist, ob in früheren Untersuchungen von Hardy Fehler vor-

liegen oder nicht. Das, um was es sich handelt, ist völlig unabhängig von Hardy. Wegen präziser Definition verweise ich auf die im Erscheinen begriffene hallische Dissertation von I. Gauditz.

Hr. Heidebroek schlägt den Abbruch der Diskussion vor und gibt den Vorschlag von Klemencic bekannt, den aufgeworfenen Fragen eine Tagung in der Ostmark in förderlicher Abgeschlossenheit zu widmen. Dieser Vorschlag findet allgemeine Zustimmung.

ges. Heidebroek

ges. Kraft

-.-.-.-.-.-

Herbert Jausly:

Schmierölversuche

Die Wärme 62 (1939) Nr.3 Seite 43/44

daher ein Verdampfen des Wassers herbeigeführt wird. Der vordere, dem Betrachtenden zunächst gelegene Rohrtteil ist nur schwach beheizt. Hier findet nur eine weitere Vorwärmung des Wassers statt. Beläge in gelagerten Rohren festzustellen ist noch weiter erschwert. Derartige Rohre werden abgelastet. Doch ist dieses Verfahren ungenau und kann, wie das Beispiel zeigt, zu Fehlschlüssen führen. Der Taster muß nämlich stets etwas Spiel aufweisen, um sich auch durch Rohrkrümmungen bewegen zu lassen. Feine Beläge, wie die vorliegenden, werden hier-

durch gar nicht ermittelt. Es bleibt dabei nichts anderes übrig, als die Seiten- und Rückwandkühlrohre von Zeit zu Zeit zu bohren. An dem anfallenden Kesselschleim kann ermittelt werden, ob ein Bohren sinnvoller Arbeit erforderlich ist oder erspart bleiben kann. Die Zeiträume, während deren eine derartige Vorkehrungsmaßnahme zu ergreifen ist, werden durch das Speisewasser bestimmt. Bei gutem Wasser wird man mit einer Betriebszeit von 1500 Stunden zwischen zwei Reinigungen auskommen.

Schmierölversuche / Von HERBERT JAUSLY in Oberhausen (Rhd.)

Es werden über längere Zeit durchgeführte Versuche beschrieben, um das für zwei Kolbenverdichter geeignete Öl zu ermitteln.

An zwei Kolbenverbundverdichtern, die mit K I und K II bezeichnet werden, sind Schmierölversuche durchgeführt worden. Diese Versuche haben gezeigt, daß ein Saldampöl nicht das Idealschmiermittel für alle Kolbendampfmaschinen ist. Das verwandte Saldampöl wurde nach der Theorie „Leber das Verhalten von Schmierölen unter Druck“ von 18 Schmierölen als das geeignetste ermittelt. Nach der theoretischen Untersuchung war das Saldampöl für eine Heißdampfentemperatur von 430° geeignet.

Die bei den Schmierölversuchen verwandten Schmieröle seien wie folgt bezeichnet:

- A = Heißdampfzylinderöl bis 400° Öl, — M, je 100 kg
- B = Saldampzylinderöl bis 430° 31,50 M, je 100 kg
- C = Heißdampfzylinderöl bis 300° 61, — M, je 100 kg

Die Temperaturen zu A und C sind Zusagen der Ölfirmen, die Temperatur zu B ist, wie oben angeführt, ermittelt worden.

Schmierölversuch mit A bei K I. Der Versuch dauerte acht Wochen. Der Dampfdruck betrug im Mittel 11,1 atü und die Ueberhitzung 385°. Kolben und Kolbenringe sind nicht gewogen worden. An dem Kolben und den Kolbenringen konnte aber kein nennenswerter Verschleiß festgestellt werden. Diese waren hinreichend mit Öl benetzt und im besten Zustand. Im Mittel wurde ein Ölverbrauch von 2,26 kg bei 11 400 PS oder 0,198 g/PS^h festgestellt.

Schmierölversuch mit A bei K II. Der Versuch dauerte acht Wochen. Der Dampfdruck betrug im Mittel 10,8 atü und die Ueberhitzung 378°. Vor dem Versuch haben gewogen:

a) Kolben	371,100 kg
b) Kolbenringe:		
1. Ring	=	0,450 kg
2. Ring	=	0,500 kg
3. Ring	=	0,655 kg
4. Ring	=	0,350 kg = 20,155 kg
Zusammen:		397,255 kg

Die Maschine lief ruhig; Stampfen oder Schlagen wurde nicht festgestellt. Die Öelbilder zeigten anfangs einen Ueberschuß an Öl. Die Ölmenge konnte vermindert werden. Nach dem Versuch haben gewogen:

^{b)} Persönliche Mitteilung von Privatdozent Dr.-Ing. H. Hassenbach (Breslau) an den Verfasser.

a) Kolben	371,00 kg
b) Kolbenringe:		
1. Ring	=	0,555 kg
2. Ring	=	0,765 kg
3. Ring	=	0,565 kg
4. Ring	=	0,290 kg = 2,175 kg
Zusammen:		376,135 kg

Der Verdichter war etwa zehn Jahre in Betrieb, der Zylinder ziemlich ausgefahren und sollte schon vor dem Versuch ausgebohrt werden.

Mit diesem Öl wurden der Hochdruckdampfzylinder, die Stopfbuchsen sowie eine des Hochdruckluftzylinders, die Kolbenstange und die Traglager geschmiert. Der Niederdruckdampfzylinder sowie die Luftzylinder wurden mit zurückgewonnenem Öl geschmiert, das gerade noch ausreichte. Der Ölverbrauch betrug im Mittel 1,520 kg bei 11 200 PS oder 0,107 g/PS^h.

Schmierölversuch mit C bei K II. Zwischen dem vorhergehenden Versuch und diesem ist der Zylinder ausgebohrt worden. Es fanden vor diesem Versuch zwei Schmierölversuche mit B und C statt. Da die Versuche kurz nach dem Ausfahren vorgenommen wurden, werden sie nicht angeführt. Vor dem Versuch haben gewogen:

a) Kolben	376,200 kg
b) Kolbenringe:		
1. Ring	=	0,200 kg
2. Ring	=	0,200 kg
3. Ring	=	0,250 kg
4. Ring	=	0,250 kg = 7,500 kg
Zusammen:		383,900 kg

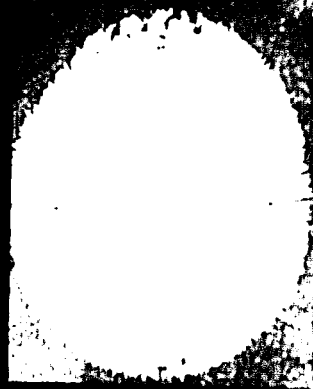


Abb. 1. Ölring mit Gußrostablagerung

Die Oelmenge zeigte anfangs einen Ueberschuß an Oel. Die Oelmenge konnte vermindert werden. Nach dem Versuch haben gewogen:

*) Persönliche Mitteilung von Privatdozent Dr. Ing. H. Hassenbach (Breslau) an den Verfasser.

Abb. 1. Oelbild mit Gußrückständen



Abb. 2. Oelbild mit starken Gußrückständen

Der Versuch dauerte elf Tage. Die Maschine lief ruhig. Die Temperatur betrug normal 285° und der Druck 11,6 atü. Bei einer Temperatur von über 300° wurde ein leichtes Stampfen der Maschine wahrgenommen. Die Oelbilder waren gut.

Nach dem Versuch haben gewogen:

- a) Kolben 370,250 kg
- b) Kolbenringe: 1. Ring = 0,650 kg
- 2. Ring = 0,705 kg
- 3. Ring = 0,805 kg
- 4. Ring = 0,800 kg = 27,140 kg
- Zusammen: 403,300 kg

Der Gesamtverlust an dem Kolben und den Kolbenringen betrug 0,150 kg. Der Ölverbrauch betrug 0,288 g lsh. Das Öl ist für eine Temperatur von etwa 275° geeignet.

Schmierölversuch mit B bei K 11. Vor dem Versuch haben gewogen:

- a) Kolben 370,250 kg
- b) Kolbenringe: 1. Ring = 0,650 kg
- 2. Ring = 0,705 kg
- 3. Ring = 0,805 kg
- 4. Ring = 0,800 kg = 27,140 kg
- Zusammen: 403,300 kg

Der Versuch dauerte acht Tage. Bei 270° verbrannte das Öl auf der hinteren Kolbenstange, und der Hochdruckzylinder

der war außen in einen Oelbel gehüllt. Wie die Oelbilder (Abb. 1 und 2) zeigen, sind bei einer Temperatur von 285° schon Gußrückstände festzulegen. Bei 300° war nur einmal anzulassen wurde, zeigt das Oelbild den hohen Verschleiß im Zylinder.

Die Hochdruckzylinder konnten nicht genügend überhitzt werden. Es mußten Schmierpressen angebracht werden, damit ein Festfahren des Kolbens vermieden wurde. Das an dem Oelabscheider zurückgekommene Öl war voll Gußschlamm und zur weiteren Verwendung ungeeignet. Die vollständige Überhitzung war dieser Verschmutzung nicht gewachsen. Ein Schlagen im Pleuelkopf sowie ein Stampfen der Maschine machte sich bei Temperaturen über 300° bemerkbar. Die Maschine wurde nicht stillgesetzt, da bei den vorhergehenden Versuchen die gleichen Erscheinungen auftraten und als Ursache nur die für das Öl zu hohe Temperatur ermittelt worden war. Nach dem Versuch haben gewogen:

- a) Kolben 371,991 kg
- b) Kolbenringe: 1. Ring = 0,715 kg
- 2. Ring = 0,675 kg
- 3. Ring = 0,675 kg
- 4. Ring = 0,670 kg = 26,735 kg
- Zusammen: 398,726 kg

Das Saltdampfzylinderöl ist für Hochdruckmaschinen vollkommen ungeeignet. Der Kolben und die Kolbenringe haben nach 10 Betriebsstunden einen Verschleißverlust von 2,225 kg gehabt. Der Verbrauch an Schmieröl betrug bei diesem Versuch 1,255 g lsh und würde noch höher gewesen sein, wenn es bei Verwendung dieses Öles, möglichst gewesen wäre, in den Hochdruckzylinderölen so weit hineinzupumpen, daß dieser nicht trocken lief.

Die Versuche fanden an ein und demselben Verdichter statt. Im Mittel leistet er 20000 lsh Tag. Mögen sind folgende Daten bei 10000 lsh ermittelt worden:

Schmieröl	A	B	C
Verlust an Kolben und Ringen	0,000 kg	1,151 kg	0,000 kg
Ölverbrauch	10,700 kg	12,520 kg	26,800 kg
Ölpreis	10,00 M	12,51 M	17,35 M

Nicht berücksichtigt wurde die Dampferparnis auf Grund der höheren Dampf-Temperatur bei A und C.

Vorstehende Schmierölversuche haben gezeigt, daß Saltdampfzylinderöl ungeeignet ist. Das geeignete Hochdruckzylinderöl muß durch Versuche für die jeweilige Maschine ermittelt werden.

Verbunddampfmaschinen mit zwei Kurbelwellen verschiedener Drehzahlen (für den Schiffsantrieb)

Nach dem Vorschlag von O. Hartmann werden jetzt Verbunddampfmaschinen mit zwei Kurbelwellen für den Antrieb von Schiffen gebaut, bei denen Hochdruckteil und Niederdruckteil mit verschiedenen Drehzahlen laufen. Der Niederdruckteil wird bei einer normalen Dampfmaschine wegen des großen spezifischen Dampfverbrauchens sehr groß und nimmt dann im Schiffbau viel von dem ohnehin nicht reichlich vorhandenen Platz weg. O. Hartmann schlägt daher vor, den Niederdruckteil mit einer höheren Drehzahl laufen zu lassen, als sie der Hochdruckteil besitzt. Beide Kurbelwellen sind dann über ein entsprechend übersetztes Zahnradpaar miteinander gekuppelt. Die Leistung kann dabei von jeder der beiden Kurbelwellen abgenommen

werden. Durch Einbau von Kupplungen ist es außerdem möglich, jeden der beiden Maschinenanteile getrennt die auch zu betreiben, wenn es erforderlich sein sollte.

Solche Maschinen sind auch für Hochdruckdampf gebaut worden. So wurde eine Maschine in Betrieb genommen, die mit vierfacher Dampfleistung und vierfacher Zylinderüberhitzung arbeitet und Frischdampf von 100 atü und 170° verwendet. Die Drehzahlen der beiden Maschinenanteile sind 200 bzw. 100 U/min. Einschalt-Blick des Dampfverbrauches der Zwischenbehälter soll diese Maschine bei nur 275 lsh Leistung nur 2,0 kg lsh Dampf verbrauchen. Das entspricht einem Kohlenverbrauch von etwa 0,6 kg lsh. Die eine kleine Dampfmaschine ohne nachschaltbare Abdampfmaschine ist das ein äußerst niedriger Dampfverbrauch.

Auch für einen Schiffsantrieb wurden zwei solcher Maschinen gebaut, die mit Hochdruckdampf betrieben werden. Für die engen Platzverhältnisse gerade auf einem Schiffe ist diese Maschinenart mit ihrem weit geringeren Platz- und Raumbedarf sehr willkommen.

*) Marine-Engineer 1914, S. 288.

366

4
4

die Wärme
bz. Jy. No. 3/ 1959

(Zerwerbamtlicher Vertrieb verboten)



Lab. f. Schmelzschiff

ÜBER DIE WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN
LAGERWERKSTOFF UND SCHMIERMITTEL

*Reciprocal effect between
bearing metal and lubrication*

DISSERTATION

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs

Der Technischen Hochschule Berlin
vorgelegt am 7. Dezember 1936 von

Theodor R a n o w Dipl.-Ing.
aus Campina

genehmigt am 22. März 1937

Druck Studentenwerk
Charlottenburg
1937

588

ÜBER DIE WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN
LAGERWERKSTOFF UND SCHMIERMITTEL

D I S S E R T A T I O N
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs

Der Technischen Hochschule Berlin
vorgelegt am 7. Dezember 1936 von
Theodor R a n o w Dipl.-Ing.
aus Campina

genehmigt am 22. März 1937

Druck Studentenwerk
Charlottenburg
1937

Berichter : Prof. Dipl.-Ing. Hanner
Mitberichter : Prof. Dr.-Ing. Cornelius

350

Inhalt.

	Seite
I. Einleitung	1
II. Zur Theorie der Schmierung	3
1. Allgemeines über Reibung	3
2. Über flüssige Reibung und hydrodynamische Lagerreibungstheorie	6
3. Über gemischte Reibung und chemisch-physikalische Theorie	8
4. Grenze zwischen flüssiger und gemischter Reibung. Stromdurchgangsmessung.	10
III. Übersicht der technisch gebräuchlichsten Lagerwerkstoffe und ihrer wichtigsten Eigenschaften	11
IV. Übersicht der Schmiermittel und ihrer wichtigsten Eigenschaften	15
V. Aufgabenstellung	17
VI. Arbeitsplan	18
VII. Die untersuchten Stoffe	19
1. Lagermetalle	19
2. Schmieröle	19
VIII. Beschreibung des Prüfverfahrens	20
1. Zweck, Grundgedanke	20
2. Konstruktives	21
3. Meßmethoden	22
4. Versuchsbedingungen	24
5. Versuchsgang	26
IX. Versuchsergebnisse	27
X. Auswertung, Beurteilung	28
XI. Zusammenfassung	38
Schrifttum	

I. Einleitung.

Das technische Problem der Schmierung, aufgefaßt als das Anstreben einer mit den jeweils zur Verfügung stehenden Mitteln erreichbaren allergünstigsten Reibungsverminderung und Betriebssicherheitserhöhung zwischen aufeinander gleitenden Maschinenteilen aller Art, läßt sich deutlich von zwei Gesichtspunkten aus betrachten. Erstens ist es die rein betriebsmäßige, praktische Seite der Schmierung, die für die Technik im Vordergrund des Interesses steht. Sie wird von der "Schmiertechnik" (im engen Sinne) behandelt und hat sich bereits zu einem für die gesamte Technik außerordentlich wichtigen Spezialgebiet entwickelt. Zweitens ist von wissenschaftlicher Bedeutung die theoretische Erforschung der grundlegenden Vorgänge, die bei der Lösung schmiertechnischer Probleme herangezogen werden müssen. Dieser zweite Teil der Schmierungsforschung - der mit "Theorie der Schmierung" bezeichnet wird - bleibt in seiner geschichtlichen Entwicklung, wie es bei einem großen Teil aller theoretischen Unterbauten technischer Probleme der Fall ist, nicht unerheblich hinter der praktischen Schmiertechnik zurück. Mit anderen Worten, es gelingt der Praxis in vielen Fällen eine verhältnismäßig günstige und befriedigende Lösung einer technischen Schwierigkeit auf Grund langjähriger Betriebserfahrungen herbeizuführen, ohne vorher eine ausreichende theoretische Begründung für diese Lösung gefunden oder gesucht zu haben. Daß diese Tatsache ein näheres Eingehen auf die theoretischen Grundgesetze der Vorgänge nicht nur nicht überflüssig macht, sondern geradezu zwingend herbeiführt, geht schon aus folgenden Überlegungen hervor. Erstens kann die betriebsmäßig und praktisch ermittelte Lösung der technischen Schwierigkeiten nur in den allerseltensten Fällen die wirklich befriedigendste und betriebssicherste sein. Sie mag wohl im Augenblick genügen, ist aber in ihrer Gültigkeit zeitlich begrenzt. Zweitens folgt aus dieser Zeitgebundenheit, daß ein gesetzmäßiger Unterbau rückstrahlend auf die Betriebsfragen einwirken und deren Lösung bedeutend erleichtern muß.

Endlich muß im Interesse der allgemeinen technischen Entwicklung die Ergründung gewisser Vorgänge als immer bessere Annäherung an die objektiven Gesetzmäßigkeiten der Natur die vornehmste Aufgabe des technischen Forschers darstellen.

Den Firmen : Th. Goldschmidt, Essen; Metallgesellschaft A.G., Frankfurt a.M.; Glyco - Metall - Werke, Wiesbaden; Braunschweiger Hüttenwerk, Braunschweig; Admos - Bleibronze G.m.b.H., Berlin; Eutektoid - Lagerbronze G.m.b.H., Mannheim; Deutsche Vakuum Öl A.G., Hamburg und Mineralölwerke Albrecht & Co., Hamburg wird für die unentgeltliche Überlassung des Versuchsmaterials Dank gesagt.

II. Zur Theorie der Schmierung

1. Allgemeines über Reibung.

Eine dauernde oder wechselnde unmittelbare Berührung zweier unter einem bestimmten Druck stehender und mit einer gewissen Geschwindigkeit gegeneinander bewegter, fester, flüssiger oder gasförmiger Körpergrenzflächen hat im allgemeinen eine direkte oder indirekte Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärme oder in Zerstörungsarbeit zur Folge. Diese Art unmittelbarer Berührung wird als trockene Reibung bezeichnet. Die Erfahrung hat gezeigt, daß die infolge der auftretenden Widerstände entstehenden Wärme- und Verschleißverluste durch Zwischenschalten eines dritten Stoffes in der Berührungsfläche wesentlich herabgesetzt werden können. Es ergeben sich im Gegensatz zur trockenen Reibung, neue, bedeutend günstigere Arten von Reibung, mit deren Hilfe es gelingt, die Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der in Frage kommenden Bewegungs- bzw. Belastungsvorgänge bis zu einem jeweiligen Maximum zu steigern.

Unter Beschränkung auf den für Maschinenteile aller Art wichtigsten Fall der Reibung fester Körperflächen, sei im folgenden kurz die Entwicklung der Reibungstheorie gestreift. Ungeschmierte, d.h. durch keinerlei Zwischenstoff getrennte Flächen, unterliegen den von C. A. C o u l o m b aufgestellten Gesetzen der trockenen Reibung. Sie werden aus dem Ansatz abgeleitet, daß die bei der reibenden Berührung auftretenden Widerstandskräfte - und damit die entsprechende Reibungszahl - stark von den physikalischen Eigenschaften der beteiligten Flächen, dagegen in weiten Grenzen nicht von der Belastung und der Geschwindigkeit abhängen. Ist H die senkrecht zur Fläche angreifende Belastungskraft, W der der Bewegung entgegengesetzte Reibungswiderstand und μ die oben erwähnte Reibungszahl, so lautet das Coulombsche Grundgesetz:

$$W = \mu \cdot H$$

Ein weiterer Schritt in der Reihe theoretischer und praktischer Untersuchungen über die Schmiermittelreibung war das Erkennen der Rolle, die die bereits bekannte physikalische Eigenschaft der Zähigkeit von Flüssigkeiten beim Schmiervorgang spielt. Mit diesen Forschungen sind die Namen Petroff, Reynolds, Michell, Tower, Sommerfeld, Stribeck u.a. verknüpft (1). Aus Beobachtungen, Experimenten und unter Zuhilfenahme von Hypothesen, die sich zum Teil später allerdings als unrichtig erwiesen haben, wurde im Laufe der Zeit die Erfahrungstatsache festgestellt, daß die Zähigkeit unter gewissen Voraussetzungen allein maßgebend für die auftretenden Reibungskräfte sein kann.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnis entstand die hydrodynamische Lagerreibungstheorie, die mathematisch besonders von Gumbel (2) und Duffing (3) grundlegend bearbeitet und von Falz (4) für die Praxis angepasst und vereinfacht wurde.

Ähnlich wie beim Übergang von den Begriffen der trockenen Reibung zu den Vorstellungen der Reibung geschmierter Körper, dauerte es ziemlich lange bis der nächste Schritt getan wurde. Die Erfahrung zeigte nämlich, daß die auf Grund der Zähigkeitsreibung abgeleiteten Gesetze keineswegs zur restlosen Erklärung sämtlicher Schmiervorgänge ausreichen. Vielmehr wurde allmählich klar, daß die Voraussetzungen dieser Theorie nur in den allerseltendsten Fällen der Praxis wirklich zutreffen, sodaß die sogenannte "flüssige" Reibung tatsächlich nur einen Idealfall darstellt, während in allgemeinen die Reibung der geschmierten Flächen wesentlich komplizierteren und zum Teil noch gänzlich unerforschten Gesetzmäßigkeiten unterliegt. Diese neue Schwierigkeit machte auch ein tieferes Eingehen auf die grundlegenden Begriffe der Reibung überhaupt notwendig und führte später insbesondere zu einer weitgehenden Forschungsarbeit auf dem Gebiete der Werkstoffprüfung der am Schmierprozeß beteiligten Stoffe. Es entstand die Theorie der "gemischten" Reibung, verknüpft mit molekular - physikalischen Untersuchungen und Hypothesen, deren Grundgedanke die Zurückführung des Reibungsvorganges auf die

334

- 5 -

335

zwischen den Molekülen der beteiligten Werkstoffe wirksamen Kräfte ist. Auf diesem Gebiet sind besonders die Arbeiten von Dallwitz - Wegner (5), Woog (6) sowie einer ganzen Reihe von amerikanischen Forschern (7, 8) bemerkenswert.

Die modernste Auffassung der Reibung läßt sich kurz folgendermaßen darstellen.

Der Bewegung eines Massenteilchens im Raume setzen sich entsprechend dem Naturgesetz von Wirkung und Gegenwirkung zwei Arten von Widerstand entgegen. Die Ursache des einen ist die eigene Masse des Teilchens (Trägheitswiderstand), die des zweiten - die Masse der Umgebung (Reibungswiderstand). Diese allgemeine Definition umfaßt sämtliche Bewegungsvorgänge aller Aggregatzustände. Je nach den Umständen überwiegt der eine oder der andere Anteil des Widerstandes.

Einen Sonderfall stellt die Gegeneinanderbewegung zweier aus gleichen oder verschiedenen Stoffen bestehenden Flächen dar. Hier nehmen die Oberflächenmoleküle als Träger elektrischer Ladungen eine Sonderstellung ein. Während die Moleküle bzw. deren Atome im Innern des Körpers nach allen Seiten hin im relativen Gleichgewicht nur noch Schwingungen um eine Gleichgewichtslage vollführen, ist bei den Randmolekülen dies infolge des Mangels allseitiger Begrenzung nicht der Fall. Sie besitzen vielmehr einen Rest unausgeglicher Ladungen, deren Integral über die gesamte Oberfläche ein elektrisches Oberflächenkraftfeld zur Folge hat.

Nähern sich nun zwei Oberflächen unter gleichzeitiger Längsbewegung einander, so werden nach Unterschreiten eines gewissen Abstandes diese Kraftfelder miteinander in Wechselwirkung treten. Handelt es sich um zwei Oberflächen absoluter Glattheit, so ist infolge der sich ausgleichenden positiven und negativen Wirkungen kein Energieverlust zu erwarten. Da jedoch jede praktische Oberfläche kleinere oder größere Unebenheiten aufweist, so erfolgt während des Aneinandergleitens ein unregelmäßiges Schneiden der Kraftlinien durch die vorbeibewegten Teilchen. Analog zur Bewegung eines elektrischen

SAFETY FILM

Leiters im magnetischen Felde ist auch hier zur Aufrechterhaltung der Bewegung ein gewisser Energieaufwand erforderlich, der in diesem Falle den Reibungswiderstand darstellt.

2. Über flüssige Reibung und hydrodynamische Lagerreibungstheorie.

Eine quantitative Änderung erfahren die oben geschilderten Vorgänge im Falle des Zwischenschaltens eines dritten Mediums, beispielsweise eines Schmiermittels. Unter der Voraussetzung, daß die äußeren Flächen durch das Schmiermittel vollständig voneinander getrennt sind, sowie unter der später noch zu erörternden Annahme, daß die Teilchen des Schmiermittels an den Wänden der Flächen fest haften, ergibt sich für diesen Fall die Möglichkeit, den Reibungsvorgang als flüssige Reibung zu betrachten, d.h. anzunehmen, daß die Reibung zwischen den festen Flächen einerseits und zwischen den festen und flüssigen Flächen andererseits, vollständig durch die innere Reibung des Schmiermittels ersetzt wird. Damit tritt die Bedeutung der Zähigkeit des Schmiermittels klar in Erscheinung, denn sie ist nichts anderes als ein Maß für die Größe der inneren Reibung, d.h. für die Größe des Widerstandes, der sich der Gegeneinanderbewegung zweier Flüssigkeitsschichten entgegensetzt.

Auf diese Annahme stützt sich die hydrodynamische Lagerreibungstheorie und zieht infolgedessen als Ausgangspunkt für die rechnerische Behandlung des Problems das Newtonsche Grundgesetz der Flüssigkeitsreibung heran. Bedeutet W den Reibungswiderstand, z die Zähigkeit der Flüssigkeit, F die Größe der Berührungsfläche und dV/dH den Differentialquotienten der Gleitgeschwindigkeit nach dem Abstände dieser Flächen voneinander, so lautet das Newtonsche Erfahrungsgesetz:

$$W = z \cdot F \cdot dV/dH$$

Die mathematische Anwendung dieser Beziehung auf schmiertechnische Aufgaben verfolgt den Zweck, für die Praxis

brauchbare Gleichungen abzuleiten, mit deren Hilfe Aussagen über die Größe des auftretenden Reibungswiderstandes - und damit der Reibungsleistung - sowie über die im Betrieb zu erwartenden Erwärmungen der Reibstellen getroffen werden sollen. Unter Zuhilfenahme einiger sehr wesentlicher Voraussetzungen über die Art der Bewegung der zwischen den Flächen strömenden Flüssigkeit, sowie nach einigen Vereinfachungen bezüglich der geometrischen Gestalten der beteiligten Oberflächen, gelingt die Integration der sich für die meisten praktischen Fälle ergebenden Differentialgleichungen und die Theorie gelangt zu brauchbaren Ergebnissen, allerdings stets unter Berücksichtigung der getroffenen Voraussetzungen. Gerade in diesen Punkte liegt jedoch der Nachteil der hydrodynamischen Theorie. Die gemachten Voraussetzungen - insbesondere die Annahme unbeschränkter Haftung des Schmiermittels an den Wandungen - befinden sich nach den Erfahrungen nur in den allerwenigsten Fällen im vollen Einklange mit der Wirklichkeit, ja die sich daraus ergebenden Widersprüche gehen in einer ganzen Reihe von Fällen sogar weit über den Rahmen zulässiger Fehler hinaus.

Die Schlußfolgerungen aus den Unstimmigkeiten zwischen hydrodynamischer Theorie und Praxis führen unmittelbar auf eine Analyse der Voraussetzungen dieser Theorie. Wird nämlich die Zähigkeit des Schmiermittels als für die Größe des Reibungswiderstandes allein als maßgebend angesehen, so schließt diese Annahme jeden Einfluß einer Wechselwirkung zwischen Wandung und Flüssigkeit vollkommen aus. Selbst bei tatsächlicher sicherer Trennung der Flächen durch das Schmiermittel, also ohne den Fall gemischter Reibung anzunehmen, ist aber der Einfluß verschiedener Lagerwerkstoffe und verschiedener Schmiermittel gleicher Zähigkeit festgestellt. (Saytzeff (9), Büche (10), Schneider (11)). Die chemisch - physikalischen Eigenschaften von Lagerwerkstoff und Schmiermittel scheinen demnach nicht nur für die Bildung der Schmierschicht allein und für die Reibungsvorgänge bei gemischter Reibung ausschlaggebend zu sein, vielmehr üben sie höchstwahrscheinlich in einer noch ungeklärten Form auf die Flüssigkeitsreibung einen gewissen

Einfluß aus.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll nun insofern versucht werden, einen Beitrag zu dieser Frage zu liefern, als unter vorläufiger Umgehung der chemisch - physikalischen Grundlagen an Hand von praktischen Lagerversuchen mit einigen verschiedenen Stoffen ein neuer Zusammenhang zwischen der durch die Temperaturerhöhung im Lager zum Ausdruck kommenden Reibung und irgendwelchen bekannten Werkstoffeigenschaften - unter Ausschluß der Zähigkeit - aufgesucht werden soll.

3. Über gemischte Reibung und chemisch - physikalische Theorie.

Ganz klar ist die Bedeutung der molekularen Eigenschaften von Lagerwerkstoffen und Schmiermitteln beim Fall der sogenannten gemischten Reibung. Diese tritt dann ein, wenn infolge Unterschreitung des zur Aufrechterhaltung flüssiger Reibung erforderlichen Abstandes zwischen den geschmierten Flächen eine einheitlich zusammenhängende Schmierschicht nicht mehr gewährleistet ist. Sie wird vielmehr - sei es ständig oder örtlich wechselnd - von den Unebenheiten der Oberflächen durchbrochen und die Reibung findet an diesen Stellen unmittelbar durch gegenseitige Beeinflussung der Wandkraftfelder statt. Da aber gleichzeitig stellenweise noch flüssige Reibung herrscht, spricht man von gemischter Reibung. Hierzu kommt aber noch die Tatsache, daß im Augenblick des Durchbrechens der Schmierschicht unvermeidlich ein Gleiten des Schmiermittels an den Unebenheiten stattfinden muß. Die gemischte Reibung setzt sich demnach im allgemeinen aus folgenden drei Bestandteilen zusammen:

- a. Flüssige Reibung,
- b. Reibung zwischen den Wänden,
- c. Reibung zwischen Flüssigkeit und Wänden.

Die zur Erforschung der gemischten Reibung bisher beschrittenen Wege lassen deutlich die Bestrebung erkennen, die für diesen Reibungsfall günstigen oder ungünstigen Eigenschaften der beteiligten Stoffe, (besonders gilt dies für die Schmier-

mittel) über den Umweg chemisch - physikalischer Kennzeichnung auf ihre chemische Zusammensetzung zurückzuführen. Andererseits aber gingen die angestellten Untersuchungen auch schon weitgehend in der Richtung der Erforschung von Eigenschaften jeweiliger Kombinationen Lagerwerkstoff - Schmiermittel. So gibt bereits einer der ersten Forscher auf diesem Gebiet - Dallwitz - Wegner - mit der Einführung des Randwinkels im Zusammenhang mit der Schmierergiebigkeit eine Kennzeichnung, die nur für die Betrachtung von Paaren Metall - Öl einen Sinn haben darf. Ähnlich verhält es sich mit der von thermodynamischen Gesichtspunkten ausgehenden Bestimmung der Benetzungswärme, die als Maß für die Adhäsionsfähigkeit eines Öls an ein Metall angesehen wird. (Büche (10), Bachmann und Brieger (12), u.a.).

Eine ganze Reihe anderer Forscher beschäftigen sich eingehend mit den verschiedenen, hier interessierenden Eigenschaften der Schmiermittel. (Woog (6), Vieweg (13, 15), Langmuir (7), Kyropoulos (14), Kieskalt (16) u.a.). Im besonderen werden dabei folgende Fragen behandelt: Kapillarität, Oberflächenspannung, Strömungs- und Grenzflächenorientierung, Ausbreitung dünner Schichten bzw. monomolekularer Filme, Veränderung der Schmieröle im Gebrauch (Oxydation) und unter Druck sowie Verhalten bei tiefen Temperaturen, Rückstandbildung, Aufbereitung, Regenerierung, Zusätze, (z.B. Grafit) usw. Damit im Zusammenhang wurden eine ganze Anzahl neuer Begriffe zur Kennzeichnung der Schmieröle im Bezug auf ihr Verhalten bei gemischter Reibung unter den verschiedensten Bezeichnungen (Schmierfähigkeit, Öligkeit, Schlupfrigkeit usw.) geschaffen, deren stark umstrittener Wert aber auch bis heute noch kein einheitliches Bild über das Wesen der Verhältnisse zu liefern vermag.

Neben diesen im wesentlichen laboratoriumsmäßigen Untersuchungen stellten aber auch manche Forscher betriebsmäßige Materialprüfungen an, die den Verhältnissen der Praxis weitgehend angepaßt wurden und für das wahre Verhalten dieser oder jener beteiligten Werkstoffe in hohem Maße aufschlußreich waren. Es wurden in geeigneten Prüfeinrichtungen künstlich Bedingungen

an

gemischter Reibung hergestellt und mit Hilfe entsprechender Messungen Erfahrungen und Rückschlüsse über die Güte der angewandten Stoffe gesammelt.

An diese Forschungen anknüpfend, soll durch die vorliegende Arbeit auch zur Frage der gemischten Reibung ein Beitrag geliefert werden, indem für die untersuchten Stoffe sowohl absolute als auch relative Werte der sich unter den verschiedenen Betriebsbedingungen ergebenden Resultate aufgestellt werden sollen. Weiterhin soll der Versuch gemacht werden, ähnlich wie bei der flüssigen Reibung, die Versuchsergebnisse mit Materialeigenschaften in Zusammenhang zu bringen.

4. Grenze zwischen flüssiger und gemischter Reibung.
Stromdurchgangsmessung.

Die Ermittlung derjenigen Bedingungen, die einen Übergang des Reibungszustandes vom flüssigen ins gemischte Gebiet bewirken, stellt eine der wesentlichsten Aufgaben der betriebsmäßigen Schmierungsuntersuchungen dar. Die Methoden, die bei diesen Untersuchungen zur Anwendung kommen, gehen grundsätzlich von zwei Gesichtspunkten aus. Der erste, direkte Weg stellt sich zur Aufgabe, durch Messung des Lagerspiels (mechanisch, optisch, elektrisch) die Bahn des Wellenmittels eines Zapfens festzustellen und daraus Rückschlüsse über die Möglichkeiten der Aufrechterhaltung flüssiger Reibung bei veränderlicher Last und Geschwindigkeit zu ziehen. Die zweite Methode ging von dem Grundgedanken aus, daß beim Einschalten eines Lagers in einen Stromkreis mit geeigneter Spannungsquelle der durch das Lager hindurchfließende Strom an der Stelle des Überganges von flüssiger zu gemischter Reibung eine entsprechende Vergrößerung erfahren muß. Während mit Hilfe der ersten Methode lediglich wertvolle Absolutergebnisse und Bestätigungen der Vorausberechnung der Wellenstellung gewonnen wurden, gelang es unter anderen Schenfer (17) und dem Verfasser (18) durch in weiten Grenzen einwandfreie Messungen diejenigen Betriebsbedingungen zu ermitteln, bei denen, in Übereinstimmung mit

EASTMAN KODAK

Temperaturmessungen, der Reibungszustand im Lager den erwähnten Übergang durchläuft. Denn die Messungen ergaben gleichzeitig, daß es sich keineswegs um einen plötzlichen Sprung handelt, sondern daß vielmehr ein mehr oder weniger stetiger, nur noch von der Belastungsgeschwindigkeit abhängiger, Übergang stattfindet.

Die Bedeutung der Ermittlung dieses Überganges für die Praxis besteht im wesentlichen darin, daß dadurch diejenigen Betriebsbedingungen festgelegt werden, denen bei gegebenem Lagerwerkstoff und Schmiermittel gerade noch der betriebsmäßig anzustrebende Zustand der flüssigen Reibung entspricht. Es sei an dieser Stelle jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, daß der Zustand der gemischten Reibung bis zu einer gewissen Höchstbelastungsgrenze nicht etwa unbedingt als ein betriebsunsicherer betrachtet werden muß, vielmehr liegt sein Nachteil hauptsächlich in der wesentlich höheren Leistungsaufnahme, in den damit verbundenen höheren Lagertemperaturen und endlich in dem unvermeidlich größeren Verschleiß.

Durch die vorliegende Arbeit soll für die untersuchten Stoffe eine Darstellung dieses Reibungsüberganges mit Hilfe der durchzuführenden Temperaturmessungen vorgenommen werden.

III. Übersicht der technisch gebräuchlichsten Lagerwerkstoffe und ihrer wichtigsten Eigenschaften.

Diese Bezeichnung umschließe als Sammelbegriff sämtliche bei Gleitlagern zur Verwendung kommenden festen Werkstoffe. Grundsätzlich lassen sich diese Lagerwerkstoffe - nach dem Gesichtspunkt ihrer Zusammenfassung - in metallische und nichtmetallische einteilen. Die weitere Klassifizierung ist aus folgender Zusammenstellung ersichtlich: (19, 20, 21, 22)

A. Metallegierungen.

1. Kupferlegierungen
 - a. Zinnbronzen
 - b. Messing
 - c. Rotguß
 - d. Sonderbronzen
 - e. Sondermessing
2. Weißmetalle
 - a. auf Zinnbasis
 - b. auf Bleibasis
3. Zinklegierungen
4. Kadmiumlegierungen
5. Aluminiumlegierungen
6. Gußeisen
7. Stahl
8. Sonderlegierungen

B. Nichtmetalle.

1. Weichgummi
2. Kunstharz
3. Grafit mit Faserstoff
4. sonstige Preßstoffe.

Über die Herstellung und Verarbeitung kann im Rahmen dieser Arbeit nur kurz folgendes gesagt werden. Da es sich, besonders für die Gruppe A, meistens um Legierungen mehrerer Grundstoffe handelt, sind für die Herstellung vor allen Dingen metallurgische Gesichtspunkte maßgebend. Abgesehen von der Verhüttung, Gießbarkeit usw. ist von entscheidender Bedeutung die Stabilität einer Legierung. So sind beispielsweise einige Bleibronzen und Sondermessinge sowie Kadmiumlegierungen in dieser Beziehung recht schwer zu verarbeiten. Immerhin gelingt es durch geeignete Zusätze und Sondermaßnahmen gießtechnischer Art die Stabilität wesentlich zu verbessern, sodaß, auch in Fällen wo es sich nicht mehr um Legierungen sondern nur um Gemische handelt, in weiten Temperaturgrenzen Betriebssicherheit erzielt werden kann.

A. Metallegierungen.

1. Kupferlegierungen
 - a. Zinnbronzen
 - b. Messing
 - c. Rotguß
 - d. Sonderbronzen
 - e. Sondermessing
2. Weißmetalle
 - a. auf Zinnbasis
 - b. auf Bleibasis
3. Zinklegierungen
4. Kadmiumlegierungen
5. Aluminiumlegierungen
6. Gußeisen
7. Stahl
8. Sonderlegierungen

B. Nichtmetalle.

1. Weichgummi
2. Kunstharz
3. Grafit mit Faserstoff
4. sonstige Preßstoffe.

Über die Herstellung und Verarbeitung kann im Rahmen dieser Arbeit nur kurz folgendes gesagt werden. Da es sich, besonders für die Gruppe A, meistens um Legierungen mehrerer Grundstoffe handelt, sind für die Herstellung vor allen Dingen metallurgische Gesichtspunkte maßgebend. Abgesehen von der Verhüttung, Gießbarkeit usw. ist von entscheidender Bedeutung die Stabilität einer Legierung. So sind beispielsweise einige Bleibronzen und Sondermessinge sowie Kadmiumlegierungen in dieser Beziehung recht schwer zu verarbeiten. Immerhin gelingt es durch geeignete Zusätze und Sondermaßnahmen gießtechnischer Art die Stabilität wesentlich zu verbessern, sodaß, auch in Fällen wo es sich nicht mehr um Legierungen sondern nur um Gemische handelt, in weiten Temperaturgrenzen Betriebssicherheit erzielt werden kann.

Eine der wesentlichsten Forderungen an einen für Lagerzwecke zu verwendenden Werkstoff ist eine günstige Beschaffenheit des Kristallgefüges. Der Grundsatz, daß eine weiche Grundmasse mit härteren eingebetteten Kristallen vorhanden sein muß, gilt insbesondere für Weißmetall - Lagergehäusen bei Gleitlagern. Außerdem muß aber in allen Fällen darauf geachtet werden, daß der in einer derartigen Schale laufende Zapfen härter ist, als die härtesten Kristalle des Schalenmaterials, d.h. es ergibt sich die Notwendigkeit, immer zwei verschieden harte Werkstoffe aufeinander laufen zu lassen, um im Falle eines Heißlaufes eine Zerstörung des unwirtschaftlicher austauschbaren Teiles zu vermeiden.

Diese mehr oder weniger empirisch gewonnenen Regeln stellen die bisher einzigen etwas allgemeineren Gesichtspunkte zur Auswahl und Beurteilung von Lagerbaustoffen dar. Da die Anforderungen der verschiedenen Verwendungszwecke in übrigen stark voneinander abweichen, ergibt sich die Notwendigkeit, die in Frage kommenden Baustoffe den mannigfachsten, jeweils charakteristischen Betriebsbedingungen zu unterwerfen und daraus versuchsmäßig Rückschlüsse über ihre Verwendbarkeit zu ziehen. In großen Zügen lassen sich die so gesammelten Erfahrungen dahin auswerten, daß in Abhängigkeit von Höhe und Art der Beanspruchung hauptsächlich zwei Gruppen von Lagergehäusenbaustoffen zu unterscheiden sind: harte und weiche, mit den entsprechenden Übergangsstadien. Zu den ersteren zählen in diesem Zusammenhang die Zinn- und Bleilagermetalle, die weichen Bleibronzen (binäre oder fast binäre Pb - Cu - Legierungen), sowie die Kadmium - Lagermetalle. Zur zweiten Gruppe gehören Zinnbronzen, Rotguß, Sonderbronzen, Leichtmetallelegierungen und Gußeisen. Es hat sich gezeigt, daß weder im einen noch im anderen Fall die Angabe der Härte für die Gleiteigenschaften allein maßgebend ist, ähnlich wie die Angabe der Zähigkeit für ein Schmieröl keineswegs eine Wertung seiner Schmiereigenschaften darstellt. Es treten vielmehr, abgesehen von einer Mindestwärmedruckfestigkeit, gekennzeichnet durch die Fließgrenze, die unter allen Umständen vorhanden

sein muß, eine ganze Reihe weiterer Materialeigenschaften entsprechend den jeweiligen Beanspruchungsarten in den Vordergrund. Es seien hier genannt :

1. Temperaturabhängigkeit aller Materialeigenschaften,
2. Korrosionsbeständigkeit und Neutralität gegen Zapfenwerkstoff,
3. Bearbeitbarkeit und Oberflächenbeschaffenheit,
4. Verschleißfestigkeit,
5. Dauerschlagdruckfestigkeit,
6. Thermische Eigenschaften z.B. Wärmeleitung,
7. Widerstand gegen Ermüdung bzw. Zermürbung in Verbindung mit (5). Rißbildung.

Zur Ermittlung zahlenmäßiger Angaben über das Verhalten anzuwendender Baustoffe entstanden Werkstoffprüfgeräte verschiedenster Art. Sonderprüfeinrichtungen für Lagermetalle waren u.a. zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit und der Dauerschlagdruckfestigkeit erforderlich. Grundsätzlich handelt es sich bei allen Lagerprüfungen entweder um Verschleiß- oder um Reibungsmessungen. Erstere messen die Menge der durch den Verschleiß aus der Oberfläche herausgerissenen Metallspäne, die zweite mißt in einem geeigneten Lagerprüfstand die Temperatur, die sich unter sonst konstanten Bedingungen bei veränderlicher Last für ein Material ergibt, wenn gerade noch flüssige bzw. gemischte Reibung ohne Pressen im Lager herrscht.

Es ist bisher nicht möglich, auf Grund einer oder mehrerer dieser Lagerwerkstoffprüfungen ein eindeutiges Urteil über die Güte des untersuchten Materials zu fällen. Insbesondere fehlt bis heute eine zuverlässige Möglichkeit, zahlenmäßige Angaben über das Verhalten eines Lagerbaustoffes im Zusammenwirken mit einem Schmiermittel zu machen. Die Bestimmung des Randwinkels als Maß für die Oberflächenhaftung gibt zwar grundsätzlich wertvolle Ergebnisse, praktisch jedoch sind die Resultate schlecht brauchbar, da die Werte für fast alle Kombinationen Öl - Metall nur wenig voneinander abweichen. Eine zweite Möglichkeit, die Wechselwirkung zwischen Öl und Metall auf chemisch - physikalischem Wege zu kennzeichnen, geht von

344

345

Grundgedanken aus, daß die bei der Adsorption von Öl durch Metall frei werdende Wärmemenge ein Maß für die Anziehungskräfte zwischen Metall- und Ölmolekülen liefert. Die Messung dieser, im übrigen sehr geringen und schwer erfassbaren Wärmemengen durch Bachmann und Brieger (12) u.a. ergab für einige Stoffe ein ähnliches Ergebnis, d.h. nur wenig voneinander verschiedene Werte.

IV. Übersicht der Schmiermittel und ihrer wichtigsten Eigenschaften.

Ein für Schmierzwecke zu verwendender Stoff muß erfahrungsgemäß folgenden Anforderungen genügen :

1. Ausreichende Benetzungsfähigkeit und Aktivität gegenüber dem Lagerwerkstoff,
2. Geeignete Zähigkeit und Zähigkeits - temperatur-Verlauf,
3. Chemisch - neutrales Verhalten gegenüber den Gleitflächen und Behältern,
4. Möglichst große Beständigkeit im Gebrauch, d.h. geringe Oxydation, Verschlammung usw.,
5. Freiheit von fremden Beimengungen, d.h. einwandfreie Herstellung, Lagerung und Transport,
6. Wirtschaftliche Anschaffung und Betriebsverwendung,
7. Regenerationsmöglichkeit,
8. Für Sonderzwecke : geringe Verdampfbarkeit, Emulsionsfestigkeit, Kältebeständigkeit usw.

Unter Berücksichtigung dieser Forderungen haben sich im Laufe der Zeit folgende Stoffarten als Schmiermittel verwenden lassen : (23, 24)

A. Mineralische Stoffe

1. Schmiermittel aus Erdöl
2. " " Schiefer
3. " " Braunkohle
4. " " Steinkohle

B. Pflanzliche Stoffe

C. Tierische Stoffe

D. Mischungen aus A, B und C

E. Verschiedene (Luft, Wasser).

Der Leitgedanke bei der Gewinnung, Herstellung und Verarbeitung ist die Erzielung von Erzeugnissen, die möglichst vielen der obigen Anforderungen gerecht werden. Allen Bedingungen restlos zu entsprechen, war bisher bei keinem Stoff erreichbar. Insbesondere konnte kein Stoff gefunden werden, bei dem der technische Widerspruch - gute Gleiteigenschaften, schlechte Beständigkeit und umgekehrt - beseitigt werden kann.

Bei Betrachtung der Mineralölschmiermittel hat sich für die Forschung außerdem gezeigt, daß gerade solche chemischen Bestandteile (Fettsäuren), die eine Verbesserung der Gleiteigenschaften bewirken, andererseits früher oder später die Gleitflächen korrodierend angreifen.

Die Mineralöle als Derivate des Erdöls stellen im destillierten und raffinierten Zustand ein Gemisch von gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen dar, und zwar im wesentlichen aus Paraffin - Ketten (C_nH_{2n+2} , Beispiel: Pennsylvanisches Öl mit flacher Zähigkeitstemperatur - Kennlinie) und Naphten - Ringen (C_nH_{2n} u. C_nH_{2n-2} , Beispiel: Texas Öl mit steiler Zähigkeitstemperatur - Kennlinie).

Die molekular - physikalischen Eigenschaften der Schmiermittel lassen sich kurz so zusammenfassen (14). Günstig im schmiertechnischen Sinne sind solche Flüssigkeiten, bei denen eine dem Zusammenwirken der drei Effekte intermolekularer Wechselwirkung, Induktion, Dipolbildung und Dispersion zu verdankende, möglichst große Polarität bzw. Polarisierbarkeit vorhanden ist, da diese die Haftung an den Wandungen begünstigt. Zwei Schwierigkeiten treten jedoch dabei auf. Erstens zeigen stark polare Flüssigkeiten erfahrungsgemäß ein chemisch aktives Verhalten gegenüber den Gleitflächen, d.h. sie zerstören sie und scheiden daher als Schmiermittel aus. Zweitens aber hat sich gezeigt, daß chemisch neutrale Kohlenwasserstoffe die Oberflächen zwar nicht angreifen, aber gleichzeitig auch eine

zu geringe Polarisierbarkeit aufweisen. Dieser bereits früher erwähnte Widerspruch läßt sich nun offenbar nicht allein auf das Schmiermittel zurückführen, vielmehr ist bei der Polarisierbarkeit auch die Stärke des polarisierenden elektrischen Feldes maßgebend. Die Konsequenz wäre demnach eine Lösung durch Aufsuchen derartiger Kombinationen Öl - Metall anzustreben, bei denen die Wechselwirkung zwischen Oberflächenkraftfeld und polarisierbaren Molekülen ein Maximum darstellt. Das bedeutet praktisch einerseits eine weitere Vervollkommenung in der Herstellung sogenannter compoundierender Öle, d.h. an sich unpolare Mineralöle mit mengenmäßig geringen, bezüglich Korrosion ungefährlichen, jedoch die Schmierwirkung stark erhöhenden polaren Zusätzen und andererseits eine Verbesserung der durch geeignete Beimengungen aktivierten Gleitflächen. (Beispiel: Gittermetall).

V. Aufgabenstellung.

In dem Bestreben, einen Beitrag zu den Fragen der flüssigen und gemischten Reibung zu liefern, wurde der Verfasser durch Erfahrungen und Anregungen unterstützt. Im wesentlichen waren es die Ergebnisse einer im Versuchsfeld für Maschinenelemente der T.H. Berlin durchgeführten Studienarbeit (18), die ein reiches Material für weitere Forschungen und Versuche darstellten. Folgende Fragen tauchten im Zusammenhang damit auf :

1. Worauf ist das stark voneinander abweichende Verhalten zweier Schmieröle gleicher Zähigkeit bei 50° C und ähnlichen Zähigkeitsverlaufes, die unter in weiten Grenzen gleichen Bedingungen im Lagerprüfstand untersucht wurden, zurückzuführen? Wie ist insbesondere der Unterschied der Ergebnisse im Gebiete der flüssigen Reibung zu erklären, welche Faktoren bedingen die verschiedenen, durch Stromdurchgangsmessungen einwandfrei bestätigten, Grenzen zwischen flüssiger und gemischter Reibung und durch welche Materialeigenschaften bzw.

Gesetzmäßigkeiten ist die Reibungserhöhung im zweiten Gebiet zu begründen ?

2. Welchen Einfluß übt die Beschaffenheit des Lagermetalls auf den Reibungsvorgang in diesen zwei Fällen aus ? Inwiefern und für welche Lagermetalle ist die Zusammensetzung und das Gefüge der Lauffläche für die Güte des Werkstoffes ausschlaggebend ? Welche anderen Materialeigenschaften wären zu berücksichtigen ?

3. Welches Verhalten zeigen bei der gleichen Prüfmethode andere Kombinationen von Lagerwerkstoffen und Schmiermitteln ?

4. Welchen Wert besitzen die Ergebnisse der Stromdurchgangsmessung im allgemeinen ? Handelt es sich hierbei um eine Erscheinung, die mit dem Reibungsvorgang zusammenhängt oder kann sie nur als meßtechnische Erscheinung behandelt werden ?

Die zu lösende Aufgabe wurde folgendermaßen gestellt :

An Hand von geeigneten Versuchen an einem Gleitlager im Lagerprüfstand soll eine Reihe von Schmiermitteln und Lagerwerkstoffen in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen Schmier-schicht und Gleitfläche untersucht werden. Die Auswahl der Lagerwerkstoffe soll sich auf die gebräuchlichsten Arten erstrecken. Bei den Schmiermitteln soll es sich um solche handeln, die paarweise ähnliche Eigenschaften haben, gruppenweise jedoch stark verschiedene. Besondere Aufmerksamkeit soll bei der Beurteilung der Ergebnisse den oben angeführten Punkten 1 - 4 geschenkt werden.

VI. Arbeitsplan.

1. Einlaufversuche mit den zu untersuchenden Lagerwerkstoffen und Schmiermitteln in einem für möglichst einwandfreie Messungen geeigneten Lagerprüfstand.

2. Stufenweise Erhöhung der Flächenpressung unter Konstanthalten der Drehzahl auf einem praktisch gebräuchlichen Wert.

348

349

3. Übernahme der Ergebnisse einer früheren Arbeit, bestehend in Lagerversuchen mit Gbz 14 und Ölen I und II, bei veränderlicher Drehzahl und Belastung. (18)

4. Messungen :

- a. Leerlaufversuche,
- b. Strom- und Spannungsmessung,
- c. Temperaturmessungen in Zapfen und Schale,
- d. Drehzahlmessungen und
- e. Belastungsmessungen.

5. Auswertung der Temperatur- und Reibungsmessungen bezüglich der Wechselwirkung zwischen Metall und Öl und Beitrag zur Frage der Eignung verschiedener Versuchspaare unter Berücksichtigung der gestellten Aufgabe.

VII. Die untersuchten Stoffe.

1. Lagermetalle.

Die Zusammensetzung und die dem Verfasser zugänglichen Eigenschaften der nach den eingangs erwähnten Gesichtspunkten ausgesuchten Lagerwerkstoffe gehen aus Tafeln I und II hervor. Sämtliche aus diesen Legierungen hergestellten Versuchslagerschalen wurden dem Verfasser von den entsprechenden Herstellerfirmen unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Die Zeichen HG bzw. SG für das Metall W1 bedeuten entsprechend Handguß und Schleuderguß.

2. Schmieröle.

Aus Tafel III und Abbildung 1 sind die Analysendaten und der Zähigkeits - Temperatur - Verlauf der untersuchten Öle ersichtlich. Die für die Versuche erforderlichen Mengen wurden gleichfalls unentgeltlich von den entsprechenden Firmen geliefert.

VIII. Beschreibung des Prüfverfahrens

1. Zweck, Grundgedanke.

Auf der Suche nach einem Prüfverfahren, das die Möglichkeit eines kritischen Vergleichs auf Grund von möglichst wenig Messgrößen geben sollte, entschloß sich der Verfasser für den Kammerer - Welter - Lagerprüfstand. (25, 26, 27, 28, 29, 30, 31).

Der Grundgedanke aller Lagerprüfmaschinen, die ursprünglich lediglich für die Untersuchung von Ersatzlagerbaustoffen entwickelt wurden, später aber auch als Lagerprüfmethoden allgemeiner Art erkannt wurden, besteht im wesentlichen darin, durch Temperatur-, Reibungs- bzw. Energieverbrauchs- und Ölfilmdickenmessungen an einem Versuchslager vergleichende Werturteile über die den veränderlichen, der Praxis nachgebildeten, Betriebsbedingungen unterworfenen Lagerwerkstoffe und Schmiermittel auszusprechen. Im Gegensatz zu den chemischen oder physikalischen Analysenmethoden, die die Werkstoffe einzeln, außerhalb ihrer Verwendung zu kennzeichnen versuchen, oder den eigentlichen Betriebsprüfungen, die Aussagen über das Verhalten von Werkstoffen für einen ganz konkreten Spezialfall treffen, stellt sich die Lagerprüfmethode die Aufgabe, unter Wahrung etwas allgemeinerer Gesichtspunkte Lagerwerkstoff und Schmiermittel zusammen, als Versuchspaar, unter veränderlichen Bedingungen, wie Last, Geschwindigkeit, Schmierungsart usw. zu beobachten und mit anderen Versuchsparen zu vergleichen.

Es muß ohne weiteres zugegeben werden, daß, abgesehen von der längst anerkannten unmittelbar praktischen Bedeutung derartiger Lagerprüfungen für Industrie, Wirtschaft usw., ihre Ergebnisse weit davon entfernt sind, einwandfreie theoretische Gesichtspunkte zu beobachten und keineswegs im Stande sind, eine endgültige, vollständige Kennzeichnung der in Frage stehenden Werkstoffe zu geben. Es muß aber an dieser Stelle betont werden, daß, solange keine wissenschaftlich allgemein anerkannte und unerschütterliche Methode zur zahlenmäßigen Erfassung

der Wechselwirkung Lagerwerkstoff - Schmiermittel besteht, die Anwendung von Lagerprüfstandsuntersuchungen für die Praxis eine zwingende Notwendigkeit bedeutet.

2. Konstruktives.

Der Versuchsstand besteht, wie aus Abbildung 2 und 3 ersichtlich ist, im wesentlichen aus dem in einem Trägerrahmen kugelig einstellbar eingesetzten Versuchslager, in dem ein durch einen Elektromotor angetriebener Zapfen läuft. Der Trägerrahmen hängt an einem Belastungshebel, an dessen anderem Ende mittels eines Spannschlusses die gewünschte Belastung aufgebracht werden kann. Die Versuchsschale (Abb. 4) war in ein Kugellagergehäuse unter Zuhilfenahme eines Einsatzes eingebaut. Der über eine elastische Kupplung mit dem Motorflansch verbundene Zapfen ist auf beiden Seiten des Versuchslagers durch zwei Hilfslager gestützt. Der Hebelfestpunkt und das untere Ende der Belastungsvorrichtung sind mit einem Trägergestell verbunden, auf dem auch der Motor und die Hilfslagergehäuse angeschraubt sind. Das Gestell ist am Werkstattfußboden befestigt.

Die weiteren Daten des Versuchsstandes waren :

1. Motor: 2,2 kW - Gleichstrommotor, 220 V, 12,8 A, maximal 1500 min^{-1} .
2. Hebelübersetzung 1 : 25.
3. Zapfendurchmesser: 39,92 mm.
4. Stützlagerdurchmesser: 75 mm.
5. Auflagerabstand: 300 mm.

Eine vorgenommene Nachrechnung der Durchbiegung der bisher für eine große Anzahl von Lagerversuchen üblichen Schalenform der Bamag lieferte insofern eine Bestätigung der Betriebserfahrungen, als sich ergab, daß ein außerordentlich ungünstiger Belastungsfall vorliegt, für den beträchtliche Durchbiegungen auch bei geringeren Lagerlängen zu erwarten sind, sodaß Kantenpressung praktisch kaum zu vermeiden ist. Diese Tatsache veranlasste die Verwendung einer neuen Schalenform, und zwar wurde ein in ein Kugellagergehäuse eingebauter Lager-

ring gewählt.

Die Vorteile des Kammerer - Standes bestehen in einfachen und robusten Aufbau, in seiner verhältnismäßig großen Anpassungsfähigkeit an die verschiedenen Betriebsverhältnisse, in der Austauschbarkeit von Lager und Zapfen, in der sicheren Veränderungsmöglichkeit und Meßbarkeit von Belastung und Drehzahl, sowie in der wirtschaftlichen und leichten Durchführung der Versuche.

Die Nachteile sind vor allen Dingen die relativ lange Dauer der Versuche, die Tatsache, daß einwandfreie Ergebnisse erst nach vorherigem gründlichen Einlaufen erzielt werden können, die Schwierigkeit, Versuchslager- und Hilflagerreibung zu trennen, die Beeinflussung der Versuchslagertemperatur durch die Hilflager, die Rolle der Raumtemperatur und endlich die Gefahr, bei ungeeignet konstruiertem Lagergehäuse oder Lagerschale durch Kantenpressung gefälschte Ergebnisse zu erhalten.

3. Meßmethoden.

a. Belastung. Das Aufbringen der Last erfolgte, wie oben erwähnt, über einen vorher durch Gewichte geeichten Hebel mit Übersetzung 1 : 25 mittels eines am hinteren Ende angebrachten Spanschlusses. Die jeweilige Hebellast wurde an einem in Reihe mit dem Spanschloß liegenden Stahlfeder - Dynamometer der Firma Schäffer & Budenberg mit einem Meßbereich von 0 - 250 kg abgelesen. Zur sofortigen Umrechnung auf Lagerbelastung diente die Eichkurve Abb. 5. Diese Methode erwies sich als zuverlässig nur für größere Belastungen, für ganz kleine Lasten ist das Anhängen von Gewichten vorteilhafter.

b. Geschwindigkeit. Die Umdrehungszahl des Antriebsmotors war durch seine Leistung und das Drehmoment begrenzt. Es konnte als höchste Drehzahl nur 1433 Umdr./min gewählt werden, was bei einem Zapfendurchmesser von 40 mm eine Umfangsgeschwindigkeit von 3,0 m/s ergibt. Die Drehzahl wurde mittels Tachometer am Wellenende gemessen und war infolge der Erwärmung der

Erregerwicklungen und Änderung des Drehmoments Schwankungen von $10 - 20 \text{ min}^{-1}$ ausgesetzt, die durch Feinregelung beseitigt werden mußten.

c. Einlaufzeit. Sie wurde an der Werkstattuhr abgelesen. Dabei wurde das Versuchslager bei einer bestimmten Belastung und konstanten Geschwindigkeit als eingelaufen betrachtet, wenn einige aufeinander folgende, im Abstände von 30 min erfolgende Ablesungen der Temperatur und Leistungsaufnahme gleich waren oder wenn der Charakter der gleichzeitig aufgezeichneten Einlaufkurve klar erkennen ließ, daß mit einer wesentlichen Änderung der Beharrungstemperatur nicht zu rechnen war.

d. Temperatur. Die Wärmeentwicklung wurde an zwei Stellen gemessen: durch Quecksilberthermometer in einer zentrischen, mittels durchbohrten Korken verschlossenen Zapfenbohrung (Temperatur bekanntlich sehr angenähert gleich der in der Schmierschicht) und mittels Thermoelement in einer Längsbohrung der Lagerschale, was noch bedeutend bessere Annäherung ergab. (Abb. 6) Das Thermometer hatte einen Meßbereich von -10 bis 120° C . Das Thermoelement bestand aus Eisen- und Konstantandrähten, deren Lötstelle sich im Abstände von rund 3 mm von der Schmierschicht befand. Es war an einem Millivoltmeter mit einem Meßbereich von 1 - 15 mV angeschlossen. Eichkurve s. Abb. 7. Die Werte sind Mittel von Messungen bei steigender und fallender Temperatur, aufgenommen für eine der Versuchskombinationen. Eichversuche in Wasser ergaben davon stark verschiedene Werte.

In der Nähe des Versuchsstandes wurde mittels eines Quecksilberthermometers die Raumtemperatur abgelesen, die zwecks Bildung der Übertemperatur von der jeweils gemessenen Lagertemperatur abgezogen wurde. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, daß bei plötzlich eintretenden Temperaturschwankungen die Lagertemperatur wesentlich langsamer der Raumtemperatur folgt, und daß infolgedessen die Ablesungen und Bildung der Übertemperatur ein vollkommen falsches Bild über das wirkliche Verhältnis der beiden Temperaturen ergibt.

Auch das Bilden der sogenannten reduzierten Temperatur (Lagertemperatur minus 20° , plus der Differenz zwischen Raumtemperatur und 20°) vermeidet diesen Fehler nicht. Glücklicherweise gelingt es aber durch geeignetes Verteilen der Messungen auf bestimmte Zeiträume derartige Ungenauigkeiten zum größten Teil zu umgehen.

e. Öldurchfluß. Die Menge des durch das Lager fließenden Öls wurde mittels Meßgefäß und Stoppuhr gemessen. Die Werte zeigten infolge der Verschiedenheit der untersuchten Lagerschalen in Bezug auf Lagerspiel und Bearbeitungsgenauigkeit nur in großen Zügen den zu erwartenden Charakter. Sie steigen demnach für größere Belastungen schnell an. Die Meßwerte sind in den Protokollen enthalten.

f. Leistung. Die Strom- und Spannungsmessung für den Antriebsmotor erfolgte am Versuchsstandschiebrett. Gemessen wurden Ankerspannung und Ankerstromstärke, aus deren Produkt sich der Gesamtwattverbrauch ergab. Zwecks Ermittlung der vom Versuchslager allein aufgenommenen Leistung - und damit der Lagerreibungszahl - mußte von diesem Betrag zunächst die Leerlaufleistung bei Raumtemperatur abgezogen werden, sowie außer dem die für höhere Belastung erhöhte Reibungsleistung der Hilfskugellager. Die hierzu erforderlichen Leerlaufversuche wurden vor und nach den eigentlichen Einlaufversuchen vorgenommen. Infolge der schlechten Eignung des Versuchsstandes für Reibungsmessungen war jedoch die Genauigkeit dieser Messungen ziemlich mangelhaft, so daß die Ermittlung der Reibungszahl nur der Größenordnung nach erfolgen konnte.

4. Versuchsbedingungen.

	Werkstoff	Bearbeitung u. Behandlung	Abmessungen
Zapfen	ECN 45	gehärtet und geschliffen	39,92 μ mm
Lagerschale	veränd.	gedreht	40 μ x 20 mm
Schmiermittel	veränderlich		
Schmierungsart	D u r c h l a u f		

Lagerfläche
Verhältnis
Lagerspiel

Das Lager war ...

Die ...

Die ...

Die ...

Der ...

354

355

der induzierten Temperatur (Lager-
as 20 Differenz zwischen Raumtempera-
rmeidet diesen Fehler nicht.
e gelingt es aber durch geeignetes Verteilen der
bestimmte Zeiträume derartige Ungenauigkeiten
l zu umgehen.

enfluß. Die Menge des durch das Lager fließen-
mittels Meßgefäß und Stoppuhr gemessen. Die Wer-
olge der Genauigkeit der untersuchten Lager-
ng an der Genauigkeit der Bearbeitungsgenauigkeit
Züge der verschiedenen Charaktere. Sie steigen
ößere schnell an. Die Meßwerte sind
llen enthalten.

tung. Die Strom- und Spannungsmessung für den
erfolgte am Versuchsstandsschaltbrett. Gemessen
annung und Ankerstromstärke, aus deren Produkt
twattverbrauch ergab. Zwecks Ermittlung der vom
allein entnommenen Leistung - und damit der
ahl dem Betrag zunächst die Leer-
ei R abgezogen werden, sowie außer-
here die Reibungsleistung der
r. Die erforderlichen Leerlaufversuche
nach den eigentlichen Einlaufversuchen vorge-
ge der schlechten Eignung des Versuchsstandes für
gen war jedoch die Genauigkeit dieser Messungen
lhaft, so daß die Ermittlung der Reibungszahl nur
ung nach erfolgen konnte.

4. Versuchsbedingungen.
Bearbeitung u. Bohrung
gehärtet und geschliffen
gedreht
verändert
veränderlich
Durchlauf

Abmessungen
39,92 Ø mm
40 Ø x 20 mm

Lagerfläche 8 cm²
Verhältnis l : d 0,5
Lagerspiel 0,08 mm

Das Lager war geschlossen, ungekühlt, die Ölzufuhr
senkrecht von oben, die Belastung senkrecht von unten. Schmier-
nuten waren nicht vorhanden, lediglich Öltaschen und gebroche-
ne Kanten.

Die Umfangsgeschwindigkeit war für alle Fälle konstant
gleich 3,0 m/s.

Die mittlere spezifische Flächenpressung wurde stufen-
weise, je nach den Möglichkeiten des untersuchten Schalenwerk-
stoffes erhöht. Als Vergleichswerte wurden die Beharrungstem-
peraturen der bei 50, 100, 150 und 200 kg/cm² eingelaufenen
Versuchslager gewählt, wobei der letzte Wert allerdings nicht
in allen Fällen erreicht werden konnte. Im Zusammenhang damit
sei an dieser Stelle die an sich bekannte Tatsache hervorge-
hoben, daß die Errechnung der mittleren Flächenpressung (La-
gerbelastung durch projizierte Lagerfläche) keineswegs ein
wahrheitsgetreues Bild der wirklichen Verhältnisse liefert.
Vielmehr dürfte es sich tatsächlich infolge der Bearbeitungs-
ungenauigkeiten, Durchbiegungen, Kantenpressungen und Schrag-
stellungen des Zapfens um bedeutend höhere örtliche Pressungen
handeln, was besonders für den Grenzzustand und für die ge-
mischte Reibung von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Die gewählte Durchlaufschmierung wurde folgendermaßen
durchgeführt. Die erforderliche Menge des Versuchöls wurde
in den Behälter I (s. Abb. 3) eingefüllt, durch eine mit
Quetschhahn versehene Leitung in das Lager geführt und von
hier aus durch ein feinsamochiges Ölrohr in den Behälter II.
Das durchgeflossene Öl wurde im Laufe eines Einlaufversuches
je nach Bedarf mehrere Male umgelenkt. Die sekundliche Öl-
menge war je nach der Ölzähigkeit und Belastungsstufe 0,05
bis 0,5 cm³/s.

Zur Wahl der Lagerlänge und, da der Durchmesser fest-
lag, damit des Lagerlängenverhältnisses sei folgendes bemerkt.

Infolge der schlechten Erfahrungen mit zu langen Versuchsschalen, abgesehen von der ungünstigen Form der Baugusschale, wurde eine Lagerlänge von 20 mm gewählt, die in Verbindung mit der neuen Unterstützungsart die Durchbiegung der Schale von vornherein unbedingt in vernachlässigbaren Grenzen halten sollte. Die Durchbiegung des Zapfens blieb aber immer noch wirksam und machte sich auch in einigen Fällen bemerkbar. Die betreffenden Versuche wurden aber vom Vergleich ausgeschlossen.

Das Lagerspiel war infolge der ungleichen Bearbeitungsgenauigkeit der verschiedenen Versuchsschalen etwas veränderlich, jedoch in nicht immer mit dem Meßdorn erkennbaren Grenzen. Dazu kam noch in manchen Fällen die Notwendigkeit eines Nacharbeitens der Lauffläche solcher Schalen, die beim Einlaufen Spuren örtlichen Fressens zeigten.

5. Versuchsgang.

Abgesehen von der einmaligen Eichung des Belastungshebels, wurde vor jeder Inbetriebnahme mittels Ausgleichsgewichts das System austariert, d.h. einerseits der Trägerrahmen mit dem darin liegenden Versuchslager und andererseits das Gewicht der Belastungsvorrichtung, gegeneinander derart ausgeglichen, daß sich für die horizontale Anfangslage des Hebels sicher keine Belastung des Lagers ergab. Im weiteren Verlauf wurde durch entsprechendes Anziehen bzw. Lösen der auf einem Langkugellager sitzenden Belastungsmutter des Trägerrahmens eine möglichst horizontale Stellung des Belastungshebels angestrebt.

Ein Einlaufversuch ging wie folgt vor sich. Nach Anbringen der oben aufgezählten Meßvorrichtungen, sowie nach Einbau der Versuchslagerschale und Einfüllen des zu prüfenden Schmiermittels wurde zunächst der Antriebsmotor im Leerlauf angelassen. Das Anlaufen geschah folgendermaßen. Zuerst wurde der Motorgenerator, der die Gleichspannung lieferte, erregt und an das Wechselstromnetz gelegt, sodann wurde die erzeugte Gleichspannung an den Antriebsmotor des Versuchstisches angeschlossen und dieser durch den Nebenschlußregler auf die gewünschte Drehzahl gebracht. Nach Ablegen der Leerlast wurde

die Stellung des Belastungshebels und die der entsprechenden Anfangslage des Hebels der ersten Belastungsschritte durch einen Schieberegler bzw. der Versuchsmutter wurde die Drehzahl durch Feinregulierung der drehenden Maschine wurde durch einen Schieberegler eingestellt. Die Instrumente abgelesen und protokolliert.

Die Versuche wurden in der Regel in zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe wurde die Drehzahl des Motors auf 1000 U/min eingestellt und die Drehzahl des Motors durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt. Die Drehzahl des Motors wurde durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt.

Die Drehzahl des Motors wurde durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt. Die Drehzahl des Motors wurde durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt. Die Drehzahl des Motors wurde durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt.

Die Drehzahl des Motors wurde durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt. Die Drehzahl des Motors wurde durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt. Die Drehzahl des Motors wurde durch einen Schieberegler auf 1000 U/min eingestellt.

(die Stützlager-, Elektromotorenlager- und Lufttreibung umfasst) sowie der entsprechenden Anfangstemperatur, erfolgte das Anbringen der ersten Belastungsstufe durch Anziehen der Spannschloßmutter bzw. der Trägerahmenmutter. Erforderlichenfalls wurde die Drehzahl durch Feinregulierung nachgestellt. Auf genügende Ölmenge wurde durch Öffnen des Quetschhahns geachtet. Jetzt wurden in Abständen von 15 - 30 min (je nach Bedarf auch öfter) die Instrumente abgelesen und die Werte in die Versuchsprotokolle eingetragen. Zeigte die Überwachung des Einlaufvorganges nach oben dargelegten Gesichtspunkten den Beharrungszustand an, so wurde zur zweiten Belastungsstufe geschritten, usf. Von Zeit zu Zeit, im allgemeinen am Ende eines Versuches, wurde entlastet und die entsprechend der Belastung erhöhte Leerlaufleistung abgelesen. Die Einlaufdauer war für die verschiedenen Fälle im allgemeinen verschieden, durchschnittlich konnte mit einer Mindestzeit von 1,5 Stunden gerechnet werden, sehr oft aber war das Lager auch in wesentlich kürzerer Zeit eingelaufen, besonders bei höherer Belastung. Auf die bekannte Regel, daß ein vollständiger Ausgleich der Temperaturen von Schale, Zapfen, Gehäuse usw. erst im Laufe von ca. 4 Stunden stattfinden kann, konnte wegen der großen Anzahl von Versuchen keine Rücksicht genommen werden. Da es sich lediglich um Vergleichswerte handelte, war es auch unwesentlich, den wirklichen Wert der Beharrungstemperatur, der vielleicht um 0,5 bis 1,0 Grad höher oder niedriger liegen konnte, zu ermitteln.

IX. Versuchsergebnisse.

Es wurden insgesamt ca. 65 Einlaufversuche im Laufe von rund 2 1/2 Monaten durchgeführt. Davon waren rund 45 für die weitere Auswertung geeignet.

Zu den Eintragungen der Protokolle ist noch folgendes zu bemerken. Die Ölmenge messung wurde nur für einen Teil der Versuche durchgeführt. Sie wurde nicht weiter ausgewertet, da sie ergaben, daß die verschiedenen Durchflußmengen zwar von

(die Stützlager-, Elektromotorenlager- und Luftreibung ~~unfest~~), sowie der entsprechenden Anfangstemperatur, erfolgte das Aufbringen der ersten Belastungsstufe durch Anziehen der Spannschloßmutter bzw. der Trägerrahmenmutter. Erforderlichenfalls wurde die Drehzahl durch Feinregulierung nachgestellt. Auf genügende Ölmenge wurde durch Öffnen des Quetschhahns gesichtet. Jetzt wurden in Abständen von 15 - 30 min (je nach Bedarf auch öfter) die Instrumente abgelesen und die Werte in die Versuchsprotokolle eingetragen. Zeigte die Überwachung des Einlaufvorganges nach oben dargelegten Gesichtspunkten den Beharrungszustand an, so wurde zur zweiten Belastungsstufe geschritten usf. Von Zeit zu Zeit, im allgemeinen am Ende eines Versuches, wurde entlastet und die entsprechend der Belastung erhöhte Leerlaufleistung abgelesen. Die Einlaufdauer war für die verschiedenen Fälle im allgemeinen verschieden, durchschnittlich konnte mit einer Mindestzeit von 1,5 Stunden gerechnet werden, sehr oft aber war das Lager auch in wesentlich kürzerer Zeit eingelaufen, besonders bei höherer Belastung. Auf die bekannte Regel, daß ein vollständiger Ausgleich der Temperaturen von Schale, Zapfen, Gehäuse usw. erst im Laufe von ca. 4 Stunden stattfinden kann, konnte wegen der großen Anzahl von Versuchen keine Rücksicht genommen werden. Da es sich lediglich um Vergleichswerte handelte, war es auch unwesentlich, den wirklichen Wert der Beharrungstemperatur, der vielleicht um 0,5 bis 1,0 Grad höher oder niedriger liegen konnte, zu ermitteln.

IX. Versuchsergebnisse.

Es wurden insgesamt ca. 65 Einlaufversuche im Laufe von rund 2 1/2 Monaten durchgeführt. Davon waren rund 45 für die weitere Auswertung geeignet.

Zu den Eintragungen der Protokolle ist noch folgendes zu bemerken. Die Ölmenge messung wurde nur für einen Teil der Versuche durchgeführt. Sie wurde nicht weiter ausgewertet, da sie ergaben, daß die verschiedenen Durchflußmengen zwar von

Ölzähigkeit und Bearbeitung der Schale abhängen, jedoch nicht als variable Versuchsbedingung zu betrachten sind. Ebenfalls nur für eine geringe Anzahl der Fälle war das Thermoelement an die Versuchsschale angeschlossen. Die Messungen hatten nur den Zweck, festzustellen, wie groß der Unterschied der Temperaturen zwischen Zapfen und Schale ist und andererseits, ob eine dauernde Temperaturkontrolle der Schale mittels eingebautem Thermoelement überhaupt einwandfrei möglich ist. Letzteres bestätigte sich, allerdings unter den Voraussetzungen hoher Thermokraft des Elements, sehr sorgfältigen Einbaus und sicherer Eichung. Der eigentlichen Auswertung zugrundegelegt wurden die Temperaturmessungen mittels Quecksilberthermometer in der Zapfenbohrung.

Neben den oben genannten Einlaufkurven wurden als Hauptkurven der Arbeit die Schaubilder Übertemperatur in Abhängigkeit von der mittleren Flächenpressung entworfen. (Abb. 8 - 15) Zum Vergleich und zur Unterstützung der Ergebnisse wurden noch die in gleicher Weise aufgetragenen Ergebnisse einer früheren Arbeit in Abb. 16 und 17 hinzugezogen. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Temperaturmessungen zeigt Tafel IV. Die Reibungszahlen sind in Tafel V zusammengestellt.

X. Auswertung. Beurteilung.

Die Einlaufkurven $t_u = f(T)$ zeigen den bekannten logarithmischen Anstieg mit allmählichem Abfall gegen Ende des Einlaufes infolge des Temperatúrausgleiches im gesamten Lager. Sie dienen im vorliegenden Falle zunächst zur Anschaulichmachung des Einlaufverlaufes und zur Ermittlung der Beharrungstemperatur bei einer bestimmten Belastungsstufe.

Die Hauptkurven t_u - Beharrung als Funktion der mittleren Flächenpressung p_m bildeten infolge ihres für jede Zusammenstellung Öl - Metall charakteristischen Verlaufes die Grundlage für die weitere Auswertung der Versuchsergebnisse und damit für die Lösung der in Angriff genommenen Aufgaben.

Die nähere Betrachtung der Hauptkurven bezüglich ihres Verlaufes liefert folgende neue Möglichkeit zur Beurteilung des Reibungsverlaufes. Zu Beginn, d.h. bei geringer Belastung, zeigt sich der nach den Gesetzen der flüssigen Reibung zu erwartende parabolische Anstieg der Linienzüge. Es sei aber bereits hier darauf hingewiesen, daß sich diese Übereinstimmung mit der Theorie nur auf den allgemeinen Charakter beschränkt, nicht aber für die zahlenmäßigen Ergebnisse zutrifft. Während nämlich nach der von Gumbel bzw. Palz empfohlenen Rechenmethode die Übertemperatur für flüssige Reibung, bei Konstanthalten von Umfangsgeschwindigkeit, Wärmeausstrahlungsfaktor und Lagerlängenverhältnis nur noch von der Belastung und dem Zähigkeitsverlauf abhängen dürfte, ergab sich für die untersuchten Fälle ohne Ausnahme starke Verschiedenheit der zahlenmäßigen Ergebnisse bei Schmiermitteln gleichen Zähigkeitsverlaufs, d.h. also eine offenbare Abhängigkeit vom Lagerwerkstoff bzw. von dessen Zusammenwirken mit den Schmiermitteln. Auf Grund dieser Tatsache ergab sich die Notwendigkeit, neue Möglichkeiten zur Erklärung der gefundenen Unterschiede für das Gebiet der flüssigen Reibung aufzusuchen.

Die weitere Betrachtung der Hauptkurven liefert nunmehr eine vom Verfasser erstmalig in dieser Form aufgestellte Möglichkeit zur Anschaulichmachung des Reibungsüberganges mit steigender Belastung. Beim Erreichen einer kritischen Belastungsgrenze zeigt sich nämlich in allen untersuchten Fällen ein Übergang des bis dahin parabolischen Temperatur - Belastungsverlaufes in einen bedeutend stärker ansteigenden Kurvenzweig. Die Erklärung dieser Tatsache ist folgende. Wird unter sonst unveränderten Betriebsbedingungen die Belastung des Lagers erhöht, so tritt eine Verringerung der Schmierschichtdicke an der engsten Spaltstelle ein. (Von einer Erhöhung der Zähigkeit infolge Drucksteigerung wird hier abgesehen, da sie für die Erklärung der beträchtlichen Unterschiede nicht ausreichen würde (32)). Beim Unterschreiten eines im allgemeinen rund 0,01 mm betragenden Wertes dieser Schmierschichtdicke tritt das Lager vom Gebiet der flüssigen Reibung in das Gebiet der Grenz-

schmierung über. Dieser im Übrigen stark schwankende, labile Zustand bringt das bereits eingangs erwähnte örtliche Durchbrechen der Schmierschicht durch die Bearbeitungsunebenheiten mit sich und damit eine starke Reibungsvergrößerung. Es kann jedoch mit ziemlicher Sicherheit angenommen werden, daß sich außerdem bereits in diesem Zustand die Spitzen gegenüberliegender Oberflächenunebenheiten kurzzeitig streifen und damit auch eine zusätzliche direkte metallische Reibung verursachen. Da aber diese Berührung örtlich begrenzt ist, lastet in diesem Augenblick auf den Berührungsstellen eine sehr beträchtliche Druckbeanspruchung. Infolgedessen tritt die aus den Kurven hervorgehende scharfe Zunahme der Wärmeentwicklung ein. Bleibt die Belastung genügend lange unverändert verhältnismäßig klein, so kann für diesen Fall sehr wohl ein Zurücksinken des Reibungszustandes in die flüssige Reibung erfolgen, da sich die wenigen metallischen Druckstellen sehr schnell abschleifen. Daraus ergibt sich die Erklärung für die Labilität des Grenszustandes und die Schwierigkeit, in diesem Gebiet einwandfreie Meßergebnisse zu erzielen. Wird jedoch die Belastung weiter erhöht, so nimmt die Zahl der Druckstellen zu, ein Zurückgehen in den Zustand der flüssigen Reibung ist nicht mehr möglich, aber der Belastungsdruck verteilt sich nunmehr auf eine größere Fläche, d.h. die örtlichen Drücke werden geringer. Die Wärmeentwicklung je Zunahme der Belastung wird geringer und der Anstieg der Kurve kleiner, wie aus den Hauptkurven hervorgeht. Dies bedeutet außerdem noch absolut genommen den endgültigen Übergang in das Gebiet der gemischten Reibung, da sich parallel mit der Zunahme der Temperatur eine starke Erhöhung der Leistungsaufnahme und damit des Reibungskoeffizienten zeigt. Das so gewonnene Bild des Reibungszustandes im Lager läßt sich also kurz zusammengefaßt wie folgt darstellen. Mit steigender Belastung werden bei sonst gleichen Bedingungen die Zustände der flüssigen Reibung, der Grenzreibung und der gemischten Reibung - letzterer bis zum Heißlauf - durchlaufen. Die Absolutwerte, der Anstieg und die Wendepunkte an den Übergangsstellen gehen aus den Schaubildern Übertemperatur - Flächenpressung hervor und sind für jede Kombination Öl - Metall verschieden.

An diese Feststellung anknüpfend, erfolgte nun die weitere Auswertung der Hauptkurven. Zunächst wurde folgende Überlegung angestellt. Gelingt es, die experimentell aufgenommenen Kurven $t_u = f(p_m)$ im Ganzen oder abschnittsweise in Gleichungsform darzustellen, ist es ferner möglich, aus den aufgestellten Gleichungen für jedes Versuchspaar Öl - Metall eine oder mehrere den Kurvenzug kennzeichnende Konstanten zu errechnen, so wäre damit bereits eine gute Vergleichsmöglichkeit gegeben. Um aber eine vollständige Erklärung der Zusammenhänge zu erreichen, ist es notwendig, weitergehend eine funktionelle Abhängigkeit der so ermittelten Konstanten von einer oder mehreren, für Öl und Metall gleich charakteristischen Materialkonstanten aufzusuchen. Gelingt auch dieser zweite Versuch, so wäre damit eine neue Möglichkeit zur Kennzeichnung einer Kombination Lagerwerkstoff - Schmiermittel auf Grund der beschriebenen Lagerversuche gegeben.

Der erste Schritt in dieser Richtung war die graphische Differentiation der Hauptkurven. Nach der bekannten "Spiegel"-Methode wurde für jeden Kurvenzug $t_u = f(p_m)$ die Differentialkurve $dt_u/dp_m = f(p_m)$ entworfen. (Beisp. Abb. 18) Sie dienen zur deutlichen Veranschaulichung der Wendepunkte bzw. Reibungsübergangsstellen sowie zur Entnahme der für die Aufstellung der Gleichungen erforderlichen Randbedingungen.

Nach zahlreichen Versuchen, den Kurvenzug durch eine einzige Gleichung darzustellen (Interpolation usw.), wurde infolge der dabei auftretenden zu großen Anzahl von Konstanten beschlossen, eine Teilung in zwei Kurvenzweige vorzunehmen. Der erste Abschnitt umfaßt die Parabel der flüssigen Reibung bis zum ersten Wendepunkt, d.h. bis zum Beginn der Grenzreibung. Der zweite Abschnitt erstreckt sich über die zwei folgenden Gebiete, Grenzreibung und gemischte Reibung, enthält in sich also den Übergangsanstieg, den zweiten Wendepunkt und einen weiteren, flacher ansteigenden Kurvenzweig.

Bei der Aufstellung der Gleichungen für diese zwei Kurventeile mussten folgende Gesichtspunkte beachtet werden.

Da es sich bei den Kurven $t_u = f(p_m)$ um einen Zusammenhang handelt, der sehr wohl theoretisch abgeleitet werden kann (Gabel und Falz erhalten für den Fall reiner Flüssigkeitsreibung die bekannte Abhängigkeit der Übertemperatur von der dritten bzw. 2,6 ten Wurzel der Belastung, wenn alle anderen Veränderlichen konstant gehalten werden) wurde zunächst von dieser Tatsache mit der Begründung abgesehen, daß es sich ja im vorliegenden Falle um eine vom Versuchsmäßigen ausgehende Arbeit handelt, die auf Grund eben dieser Versuchsergebnisse die Zusammenhänge entwickeln soll, also den logisch vorgeschriebenen Weg dieser Forschungsmethode gehen muß. Weiterhin mußte die Tatsache im Auge behalten werden, daß die zu errechnenden Konstanten, die für jeden Fall vorhandenen Versuchsbedingungen: Umfanggeschwindigkeit, Zähigkeitsverlauf, Ausstrahlungsfaktor und Lagerlängenverhältnis in sich enthalten werden. Daran knüpft sich die Forderung, eine möglichst geringe Anzahl von Konstanten zu erhalten, sowie für die Vergleichsbetrachtung solche auszuwählen, die eine für den Kurvenzug kennzeichnende Bedeutung haben. Die Wahl fiel auf den Anstieg der Kurven, und zwar wurde für den ersten Abschnitt die Steigung bei $p_m = 1 \text{ kg/cm}^2$ gewählt und für den zweiten die Steigung im zweiten Wendepunkt, unter Bevorzugung der errechneten gegenüber den graphisch ermittelten Werten.

Abschnitt I, ($p_m = 0$ bis $p_m = p_k$).

Die Gleichung wurde allgemein in folgender Form angesetzt :

$$t_u = C_0 + C_1 \cdot p_m^{0,2}$$

C_0 stellt die infolge der Kugellagererwärmung bei Leerlauf sich ergebende Übertemperatur (t_{u0}) in Mitte Zapfen dar und wurde im vorliegenden Fall, da für alle Versuche gleich, bewusst vernachlässigt, obgleich sich dadurch eine geringe Verzerrung der Kurve ergeben mag. Die Gleichung wurde also in der vereinfachten Form:

$$t_u = C_1 \cdot p_m^{0,2}$$

angesetzt und die Konstanten C_1 und C_2 durch Einsetzen zweier Versuchspunkte ermittelt. Die Kontrolle ergab sehr weitgehende Übereinstimmung mit der Versuchskurve. Das Produkt $C_1 \cdot C_2$ wurde mit K_1 bezeichnet und bedeutet die oben erwähnte Steigung des ersten Kurvenzweiges für $p_m = 1 \text{ kg/cm}^2$. Die ermittelten Werte sind in Tafel VI enthalten.

Abschnitt II, (p_m größer als p_k).

Bedeutend schwieriger gestaltete sich die Aufstellung einer Gleichung für den zweiten Kurventeil. Erst nach einer ganzen Reihe vergeblicher Versuche gelang die, auch nicht in allen Fällen befriedigende Annäherung der Versuchskurve durch folgende hyperbolische Funktion:

$$t_u = C_3 + C_4 \cdot \text{th}(p_m/C_5 - 1)$$

Die Konstanten C_3 und C_5 drücken hierbei die Transformation der Koordinaten aus und wurden direkt aus den entsprechenden Differentialkurven entnommen. Die Konstante C_4 wurde dann durch Einsetzen eines Versuchspunktes aus dem Abschnitt II errechnet. Die Kontrolle ergab genügend gute Übereinstimmung mit der Versuchskurve, allerdings, wie bereits angedeutet, nicht in allen Fällen und zeigte wegen der Eigentümlichkeit des Tangens hyperbolicus die größten Abweichungen an den Stellen größter Krümmung. Aus den so erhaltenen Konstanten wurde die neue Kennzahl $K_2 = C_4/C_5$ errechnet, mit der Bedeutung des Anstiegs bei $p_m = C_5$. Die Werte sind in Tafel VI enthalten.

Nach der Ermittlung der Konstanten, die, allein betrachtet, lediglich einen oberflächlichen Vergleich der Ergebnisse, ohne Zusammenhang mit irgendwelchen Materialeigenschaften liefern konnten, wurde der Versuch unternommen, zwei oder mehrere der bekannten Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe in Form einer gemeinsamen Konstante als Kriterium für die Güte der betreffenden Kombination mit den Gleichungskonstanten zu verbinden. Ausgegangen wurde vom Gedanken, daß es sich um Materialkonstanten handeln soll, die ähnliche physikalische Eigenschaften ausdrücken. Als solche wurden für das Lagermetall der untere Schmelzpunkt und für das Schmieröl der

Flammpunkt i.o.T. gewählt. Ihr Quotient wurde mit m_1 bezeichnet und als Kennzahl für das jeweilige Versuchspaar Metall - Öl betrachtet.

Das Auftragen der Gleichungskonstanten K_1 als Funktion von m_1 ergab das Schaubild Abb. 19. Es enthält ca. 15 Versuchspunkte, von denen nur vier stark streuen. Der Versuch, die erste Gleichungskonstante K_1 mit der Materialkonstante m_1 zu verbinden, muß demnach als gelungen bezeichnet werden. Umso mehr erscheint das Ergebnis überraschend günstig, wenn man folgende Unsicherheitsfaktoren berücksichtigt: Ungenauigkeiten in der Berechnung der Konstanten, nicht ganz zuverlässige Angaben über den unteren Schmelzpunkt für die Weißmetalle und die Annahme des Bleischmelzpunktes als unteren Schmelzpunkt für die Bleibronzen. Abb. 20 zeigt die Abhängigkeit der Konstanten K_1 und K_2 von der Gleitgeschwindigkeit für die Versuchsergebnisse mit Öl 14 und Öle I und II.

Das Auftragen der Konstante K_2 über die Kennzahl m_1 in Abb. 21 zeigt einen sehr unregelmäßigen und nur mit geringer Wahrscheinlichkeit festzulegenden Verlauf. Der daraus zu ziehende Schluß ist, daß entweder bei der Ermittlung der Konstante K_2 eine unzulässige Vereinigung der zwei Gebiete Grenzreibung und gemischte Reibung vorliegt oder daß die Kennzahl m_1 nicht dazu geeignet ist, Aufschluß über die Zusammenhänge für diese Reibungsgebiete zu geben.

Der Kern der Gesamtergebnisse liegt also im positiven Sinne hauptsächlich bei der Untersuchung des ersten Abschnittes, der dem Gebiet der flüssigen Reibung entspricht. Hier ist folgendes festgelegt worden. Der Verlauf der Übertemperatur in Abhängigkeit von der Flächenpressung, ausgedrückt durch die Konstante K_1 , läßt sich mit den Materialeigenschaften der beteiligten Stoffe, ihrerseits dargestellt durch die gemeinsame Kennzahl m_1 , in den funktionellen Zusammenhang der Abb. 19 bringen. Die sich daraus ergebende hyperbolische Abhängigkeit liefert die Regel, daß für große Verhältnisse $m_1 = s/f$ die Konstanten K_1 kleiner sind, d.h. die Steigung der $t_u = f(p_m)$ -

Kurven im Gebiet der flüssigen Reibung geringer, also die Zusammenstellung Öl - Metall günstiger ist. Zur Diskussion stehen die Grenzfälle: ganz große und ganz kleine Kennzahlen m_1 , sowie überhaupt die korrekte Erklärung dieses Zusammenhanges mit Hilfe weiterer Materialuntersuchungen und durch näheres Eindringen in das Wesen der in Frage stehenden Eigenschaften Schmelz- und Flammpunkt.

Die Tatsache, daß sich eine ähnliche Abhängigkeit für die Gebiete Grenzreibung und gemischte Reibung nicht einwandfrei aufstellen ließ, läßt, wie oben erwähnt, den Schluß zu, daß sich die Gleichungskonstante K_2 vielleicht mit einer anderen gemeinsamen Kennzahl der beteiligten Stoffe verbinden ließe, beispielsweise sei hier auf die Möglichkeit, den Randwinkel Öl - Metall heranzuziehen, hingewiesen.

Zurückgehend auf die im Kapitel V gestellte Aufgabe, sei nunmehr an dieser Stelle auf Grund der gewonnenen Ergebnisse die Beantwortung der dort gestellten Fragen 1 - 4 versucht.

Zu 1. Die Unterschiede im Verhalten zweier Schmiermittel gleichen Zähigkeitsverlaufes (aber verschiedener Zusammensetzung) unter gleichen Versuchsbedingungen, sind auf das Zusammenwirken ihrer Stoffeigenschaften mit denen des Lagerwerkstoffes zurückzuführen, bzw. auf die Unterschiede in der Wechselwirkung mit diesem Stoff. Es bestätigt sich insbesondere, daß auch für das Gebiet der flüssigen Reibung ein Einfluß anderer Eigenschaften als der Schmiermittelzähigkeit vorhanden ist. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind es nach den vorliegenden Untersuchungen innermolekulare Stoffeigenschaften, die für Öl und Metall entsprechend durch Flammpunkt und Schmelzpunkt ausgedrückt werden können. Für die Versuchspaare Öl - Metall kann das Verhältnis Schmelzpunkt zu Flammpunkt bis zu einem gewissen Grade als Kennzahl für das Verhalten der Zusammenstellung angesehen werden. Gleicher Zapfenwerkstoff ist Voraussetzung, wird dieser auch noch geändert, so müssen seine entsprechenden Eigenschaften ebenfalls berücksichtigt werden. Eine Gesetzmäßigkeit für den Grenzübergang und für das

Gebiet der gemischten Reibung konnte nicht mit Sicherheit aufgestellt werden. Grundsätzlich aber erscheint die Möglichkeit durchaus gegeben, einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Temperatur - Belastungsverlauf und irgendwelchen Werkstoff - Kennzahlen aufzustellen.

Zu 2. Welche Eigenschaften die Güte eines Lagermetalls allein, für den Fall gleicher Versuchsbedingungen und gleichen Schmiermittels bestimmen, kann wahrscheinlich überhaupt nie gesagt werden. Die richtige Fragestellung erscheint vielmehr, daß es auf die Wechselwirkung, d.h. auf die gegenseitige Beeinflussung der Lagerwerkstoff- und Schmiermittelmoleküle ankommt. Von diesem Gesichtspunkt wäre für den Lagerwerkstoff zu sagen, daß er Molekulareigenschaften besitzen muß, die den Bestreben des Schmiermittels, an seiner Oberfläche zu haften, entgegenkommen. Durch welche physikalisch meßbaren Größen diese Fähigkeit zum Ausdruck gebracht werden kann, steht noch nicht fest. Es erscheint nicht ausgeschlossen, daß Gefügeuntersuchungen, die ihrerseits in Bezug auf Kristall- und Molekulareigenschaften ausgewertet werden, dazu geeignet sind, zur Klärung dieser Frage beizutragen. Durch die vorliegende Untersuchung hat sich die Tatsache bestätigt, daß Metall - Gefüge feinstverteilt (z.B. Kadmiummetall; Bleibronzen fallen aus dem Rahmen) die günstigsten Ergebnisse aufweisen. In Zusammenhang mit den Ergebnissen der Auswertung der Hauptkurven hat sich für den unteren Schmelzpunkt der Lagermetallegerungen, als Ausdruck für die zwischenmolekularen Kräfte, die Möglichkeit ergeben, zur Kennzeichnung des Werkstoffes herangezogen zu werden.

Zu 3. Das Verhalten der verschiedenen untersuchten Kombinationen Öl - Metall bestätigte ganz besonders den erstmalig vom Verfasser für Gbz 14 und Öle I und II ermittelten charakteristischen Verlauf der Schaubilder $t_{II} = f(p_m)$. Fast ausnahmslos alle Versuchskurven zeigen den deutlichen Übergang vom Gebiet der flüssigen Reibung zur Grenzreibung und weiter zur gemischten Reibung. Für eine ganze Reihe von Fällen war auch der Absolutwert der kritischen Belastung (p_k) annähernd gleich, er bewegte sich, unter Berücksichtigung der Ungenauigkeits

366

- 37 -

367

seiner Ermittlung, mit einigen Ausnahmen in den Grenzen zwischen 115 und 150 kg/cm². Die Angabe von p_k allein ist also keine geeignete Aussage zur Kennzeichnung des Reibungsverhaltens.

Zu 4. Die gelegentlich einer früheren Untersuchung durchgeführte Stromdurchgangsmessung (18), die damals die Übergänge von flüssiger zu gemischter Reibung mit großer Genauigkeit bestätigte, wurde zum Gegenstand einer Diskussion, bezüglich des Wesens dieser Messung. Es wurde die Frage aufgeworfen, ob die Erhöhung des Stromdurchganges mit steigender Belastung tatsächlich einen Ausdruck für die Änderung des Reibungszustandes ist, oder ob es sich nur um eine messtechnische Erscheinung handelt, die z.B. auf eine Überschreitung der Durchschlagsspannung der Ölschicht zurückzuführen wäre. Nach Ansicht des Verfassers schließt die zweite Möglichkeit - deren Wahrscheinlichkeit zugegeben wird - keineswegs die erste aus. Mit anderen Worten, die Überschreitung der Durchschlagsspannung der Schmierschicht kann sehr wohl der Grund für die Erhöhung des Stromdurchganges sein, sie kann aber auch nur dann eintreten, wenn sich infolge der Verkleinerung des Spaltes an der engsten Stelle des Lagers der Reibungszustand geändert hat, d.h. wenn gleichzeitig ein Durchbrechen der Schmierschicht durch die Wandunebenheiten vor sich geht. Damit wäre der Wert der Stromdurchgangsmessung bestätigt, was im übrigen durch die gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse der erwähnten Arbeit bereits zum Teil geschehen war.

TYA FILM

XI. Zusammenfassung.

Auf einem zum Teil umkonstruierten, unter Mitarbeit des Verfassers vollkommen neu hergestellten Kammerer - Lagerprüfstand wurden Einlaufversuche mit 8 verschiedenen Lagermetallen und 4 verschiedenen Schmierölen durchgeführt. Die Ergebnisse - Beharrungstemperaturen und Reibungszahlen für verschiedene Belastungsstufen - ergaben unter sonst gleichen Versuchsbedingungen stark voneinander abweichende Werte für die verschiedenen Zusammenstellungen Öl - Metall. Mit Hilfe der Hauptkurven der Untersuchung ($t_u = f(p_m)$), die zunächst für alle untersuchten Fälle in deutlicher Weise den Grenzübergang von flüssiger zu gemischter Reibung sichtbar machten, wurde der Versuch unternommen, einen funktionellen Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Schaubilder (ausgedrückt durch deren Neigungskonstanten) und einer für Lagerwerkstoff und Schmiermittel gemeinsamen Stoffkennzahl (Verhältnis des unteren Schmelzpunktes der Legierung zum Flammpunkt des Schmiermittels) aufzusuchen. Der Versuch gelang mit genügender Wahrscheinlichkeit nur für das erste Reibungsgebiet, d.h. für den Zustand der flüssigen Reibung. Für die Grenzreibung und das Gebiet der gemischten Reibung ergab sich keine eindeutige Abhängigkeit. Es wurde angeregt, für diese Gebiete andere gemeinsame Werkstoffkonstanten, beispielsweise den Randwinkel Öl - Metall heranzusuchen.

Ein weiteres Ergebnis der Arbeit war die Feststellung, daß der Grenzübergang für den größten Teil aller Kombinationen Öl - Metall annähernd den gleichen Wert hat. Ferner wurde eine Erklärung über den Wert der Stromdurchgangsmessung gegeben und endlich eine erneute Bestätigung dafür geliefert, daß Lagermetalle, deren Gefüge im Schlibbild feinste Verteilung der Kristalle zeigt, besonders günstige Ergebnisse aufweisen.

Der Vergleich der untersuchten Werkstoffe ergab einerseits die Überlegenheit der Öle MI und MII gegenüber I und II, was angesichts der größeren Zähigkeit der letzteren nur den Schluß zuläßt, daß sie im Zusammenwirken mit den untersuchten Metallen weniger günstige Molekulareigenschaften besitzen.

Andererseits zeigte das Metall W2 überragend gute Gleiteigenschaften (es hielt bei einem Ergänzungsversuch kurzzeitig die überraschende Belastung von 560 kg/cm^2 aus), was auch durch seine Stellung im Schaubild Abb. 19 bestätigt wird. Eine Überlegenheit des Metalls W180 gegenüber W1HG konnte, wahrscheinlich infolge eines Fehlers in der Herstellung der Schalen aus dem ersteren, nicht festgestellt werden.

Die Reibungsmessungen konnten wegen der Unsicherheit bei ihrer Berechnung nicht weiter ausgewertet werden. An dieser Stelle sei die Anregung ausgesprochen, weitere Versuche ähnlicher Art für neue Kombinationen Öl - Metall unter noch einwandfreier zu überwachenden Versuchsbedingungen anzustellen, insbesondere gleichmäßiger Bearbeitung der Versuchsschalen, exakter Temperaturmessungen und sicherer Möglichkeit zur Berechnung der Reibungszahlen, mit dem Endziel der Aufstellung praktisch brauchbarer Zusammenhänge zwischen Temperatur- bzw. Reibungsverlauf und Werkstoffeigenschaften.

Abschließend sei als augenblicklich wesentlichste Aufgabe der Schmierforschung nochmals die Forderung aufgestellt, die beim Schmiervorgang eine Rolle spielenden Eigenschaften der Lagerwerkstoffe und Schmiermittel unter Zurückführung auf Molekularwirkungen bzw. auf die chemische Zusammensetzung in Form praktisch meßbarer physikalischer Konstanten, insbesondere solcher, die die Wechselwirkung zwischen den beteiligten Stoffen kennzeichnen, auszudrücken und damit die Entwicklung in der Herstellung und Prüfung von Lagern und ihren Betriebsstoffen zu fördern.

Tafel I Weissmetalle

Lfd. Nr.	Hersteller-Firma	Benennung	Kurzzeichen	Zusammensetzung	Eigenschaften					Bemerkung
					Legierungsbestandteile	Sp.Gew. γ	Zugfestigk. σ_B kg/cm ²	Dehnung ϵ %	Brinellhärte H kg/cm ²	
1	Goldschmidt Essen	Thermit	W ₁ S ₆ und H ₆	Pb, Sn, Sb, Cu, Ni u. a.	9,8	17-19		28-30 500:21,5 1000:15,5 1500:13	Stauchung 35 - 38 % Schwindmaß 0,55 % U. Schmelzpunkt 4200° O. Schmelzpunkt 2850° Glasstemp. 480-520° C	H: 10/500/3 min
2	K Metallgesellsch. Frankfurt / M.	Cadmiummetall	H ₂	Cd, u. a.				36 1000:21 1200:12	Stauchung 25 - 30 % U. Schmelzpunkt 3200° Glasstemp. 470-600° C Druckfestigk. 17-20 kg/cm ² Biegefestigk. 23,2	H: 10/500/30/20
3	Glyco Metall Wiesbaden	Motorglyco	H ₃	Pb, Sn, u. a.		8,2-8,5	8,5	28,5 - 29,5	Glasstemp. 420-450° C Durchbiegung 7 - 7,5 Biegefestigk. 18,5-19 kg/cm ² U. Schmelzpunkt 2820°	
4	Braunsch. Hüttenw.	Gittermetall	H ₄	Pb, Sn, Grafit u. a.		6,9	0,2	31,0	U. Schmelzpunkt 2500° Stauchung 22,4 % Schwindmaß 0,4 % Schlagarbeit 105,3 kg Querschrenze 98 kg Glasstemp. 350-430° C	

Tafel II Bronzen

1	DIN 1705	Gussbronze 14	Gbz 14	Cu 88, Sn 14		20	3	90		
2	Admos Berlin	Admos Bleibronze	B 1	Cu, Pb				28-35	Glasstemp. 1200-1400°	H: 10/1000/30
3	Eutektoid Mannheim	Eutekt. Lagerbronze 14	B 2	Cu 62,5; Zn 30 Sn4; Pb2; Ni 1,5		16-20	4,5	95-100	U. Schmelzpunkt 850°	
4	Th. Goldschmidt Essen	Tego-Lagerbronze III	B 4	Cu; Pb; Sn; Ni	8,9-9,2	59,5		50	Glasstemp. 1050° C U. Schmelzpunkt 1000° O. Schmelzpunkt 1050°	H: 10/500/3 min

310

Tafel III Schmiermittel

311

Lfd. Nr.	Hersteller-Firma	Benennung	Kurzzeichen	Sp. Gew.	Fl.Pkt. i. a. T. °C	Zäh. b. 50° C °C	Stützpunkt °C
1	Vacuum Oil Co.	Masch. Öl I	M I	0,905 b. 15°	208	5,06	- 12
2	"	Masch. Öl II	M II	0,912 b. 15°	190	4,5	- 25
3	Albrecht & Co.	S.Gold 112	I	0,937 b. 20°	215	12	- 10
4	"	Cour.-Spez. A	II	0,915 b. 20°	220	12	- 0

Tafel IV Übertemperaturen in °C für Def.-Geech. 3 n/a

Lagerwerkstoff	Schmiermittel	Mittl. Flächenpressung kg/cm ²			
		50	100	150	200
M 1 H5	M I	25,5	31,0	37,0	43,0
	M II	22,5	29,0	36,5	43,0
	I	36,0	41,5	54,0	61,0
	II	36,5	44,0	52,0	61,5
M 1 S6	M I	29,5	35,5	41,0	46,0
	M II	26,5	33,5	42,5	46,5
	I	36,5	43,0	52,0	.
	II	35,0	47,0	60,0	.
M 2	M II	14,0	19,0	22,0	26,0
	II	21,0	26,0	35,0	42,0
M 3	M I	29,5	35,5	44,5	.
	M II	17,0	22,0	25,5	26,0
	II	22,0	29,5	36,5	.
M 4	M I	31,5	39,0	42,5	46,5
	M II	27,0	35,0	39,5	.
	I	31,0	41,5	52,5	.
	II	28,5	41,5	53,0	.
B 1	M II	23,5	29,0	36,0	.
	II	21,0	26,0	36,0	50,0
B 2	M II	19,0	24,5	30,0	.
	II	20,0	27,0	36,5	.
B 4	M I	19,0	25,0	32,5	43,5
	M II	19,5	26,0	37,5	.
	I	28,5	36,5	46,5	.
	II	27,5	36,5	47,5	57,0

Tafel V Reibungszahlen für Urf.-Geschw. 3 m/s

Lagerwerkstoff	Schmiermittel	Mittl. Flächenpressung in kg/cm ²											
		50			100			150			200		
Leert.-Leistg.-Wert		205			214			228			238		
		H_g	H_v	μ	H_g	H_v	μ	H_g	H_v	μ	H_g	H_v	μ
M 1 H6	M I	286	81	0,0041	327	113	0,0028	349	121	0,0020	368	132	0,0017
	M II	295	82	0,0041	305	91	0,0023	345	117	0,0020	365	129	0,0016
	I	324	119	0,0059	343	129	0,0032	384	158	0,0028	404	168	0,0021
	II	325	120	0,0060	355	141	0,0036	375	137	0,0025	426	190	0,0024
M 1 SG	M I	309	104	0,0062	308	94	0,0024	345	117	0,0020	384	148	0,0019
	M II	306	101	0,0051	345	131	0,0033	384	168	0,0028	424	188	0,0024
	I	316	111	0,0055	346	132	0,0033	366	138	0,0023	-	-	-
	II	325	120	0,0060	388	174	0,0043	400	172	0,0028	-	-	-
M 2	M II	265	60	0,0030	300	86	0,0021	316	88	0,0015	360	154	0,0019
	II	300	95	0,0028	325	111	0,0028	343	115	0,0019	370	134	0,0017
M 3	M I	277	72	0,0036	350	136	0,0034	370	142	0,0024	-	-	-
	M II	277	72	0,0036	316	96	0,0024	350	122	0,0020	380	144	0,0018
	II	319	114	0,0057	360	146	0,0036	380	152	0,0032	-	-	-
M 4	M I	287	82	0,0041	330	116	0,0029	348	120	0,0020	382	146	0,0018
	M II	287	82	0,0041	306	92	0,0023	343	115	0,0019	-	-	-
	I	306	101	0,0051	328	114	0,0028	367	139	0,0023	-	-	-
	II	295	90	0,0045	336	122	0,0031	378	150	0,0025	-	-	-
B 1	M II	365	180	0,0080	400	186	0,0047	450	222	0,0037	-	-	-
	II	260	55	0,0028	316	101	0,0025	350	120	0,0020	405	188	0,0021
B 2	M II	360	155	0,0078	400	186	0,0047	450	222	0,0037	-	-	-
	II	270	65	0,0033	305	91	0,0023	355	127	0,0021	-	-	-
B 4	M I	264	59	0,0030	290	78	0,0019	309	81	0,0014	387	131	0,0016
	M II	268	63	0,0032	309	95	0,0024	348	120	0,0020	-	-	-
	I	305	100	0,0050	326	112	0,0028	355	127	0,0021	-	-	-
	II	297	92	0,0046	319	105	0,0026	364	136	0,0023	422	186	0,0023

EASTMAN KODAK

Tafel VI Gleichungskonstanten und Werkstoffkennzahlen für Schweißblech $t_0 = 100$

Lfd. Nr.	Lagerwerkstoff	Schweißmittel	Umf. Geschw. n/s	Prot. Nr.	C_1 $\frac{C_1 \cdot 2}{kg}$	C_2	C_3	C_4	C_5 $\frac{C_5}{kg/cm^2}$	σ	f	η	λ $\frac{\lambda}{kg}$	μ $\frac{\mu}{kg}$
1	Gbz 14	I	0,63	-	6,74	0,213	23	24	150	650	215	3,95	1,44	0,180
2		I	1,05	-	13,4	0,161	33	18	150	"	"	"	2,10	0,150
3		I	2,10	-	19,7	0,133	44	33	130	"	"	"	2,82	0,254
4		I	2,72	-	27,3	0,098	54	39	138	"	"	"	2,80	0,282
5		II	0,63	-	4,91	0,228	17	23	135	"	220	3,88	1,12	0,120
6		II	1,05	-	9,58	0,188	28	27	135	"	220	"	1,80	0,202
7		II	2,10	-	10,9	0,250	42	30	138	"	"	"	2,73	0,278
8		II	2,72	-	14,0	0,232	52	44	145	"	"	"	3,25	0,294
9	W 1 H6	II I	3	36	8,31	0,287	37	78	147	265	208	1,178	2,38	0,122
10		II II	"	37	5,36	0,367	36	23	138	"	180	1,290	1,97	0,167
11		I	"	39	16,4	0,262	50	30	137	"	275	1,138	3,32	0,278
12		II	"	44	14,0	0,222	42	13	119	"	220	1,113	3,11	0,159
13	W 1 S6	II I	"	35	10,5	0,263	40	17	140	"	208	1,178	2,35	0,121
14		II II	"	38	4,16	0,454	40	26	140	"	180	1,250	1,88	0,188
15		II	"	41	9,68	0,333	51	31	115	"	220	1,113	3,23	0,278
16	W 2	II II	"	54	2,79	0,412	28	33	175	320	150	1,884	1,18	0,188
17		II	"	55	3,25	0,473	42	31	264	"	220	1,453	1,94	0,152
18	W 3	II I	"	3,5,9	4,60	0,461	-	-	-	242	278	1,184	2,12	-
19		II II	"	51-53	3,37	0,408	31	22	178	"	180	1,274	1,38	0,124
20		II	"	47-49	4,11	0,430	-	-	-	"	220	1,100	1,77	-
21	W 4	II I	"	20-24	10,83	0,273	50	28	200	250	208	1,211	2,88	0,140
22		II II	"	28	7,04	0,344	-	-	-	"	180	1,315	2,42	-
23		I	"	29	5,94	0,422	-	-	-	"	215	1,183	2,51	-
24		II	"	30	3,15	0,584	-	-	-	"	220	1,135	1,78	-
25	B 1	II II	"	63	7,76	0,291	-	-	-	327	180	1,220	2,26	-
26		II	"	57	6,10	0,315	39	51	158	"	220	1,485	1,92	0,223
27	B 2	II II	"	61	4,88	0,355	-	-	-	"	180	1,230	1,73	-
28		II	"	58	4,54	0,384	33	31	122	"	220	1,485	1,74	0,254
29	B 4	II I	"	10-14	3,97	0,400	34	28	158	"	208	1,572	1,58	0,177
30		II II	"	15,34	3,91	0,411	-	-	-	"	180	1,128	1,41	-
31		I	"	33	7,07	0,356	47	31	150	"	215	1,571	2,52	0,224
32		II	"	31	5,51	0,411	49	36	153	"	220	1,485	2,28	0,238

374

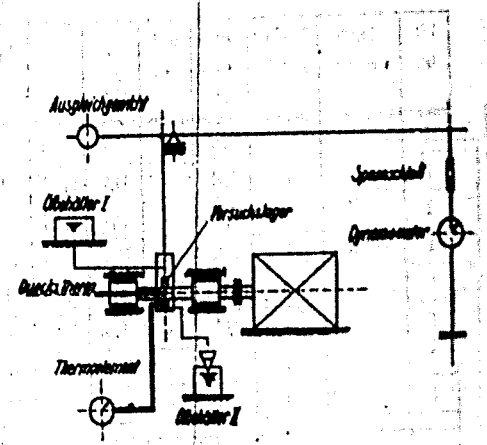
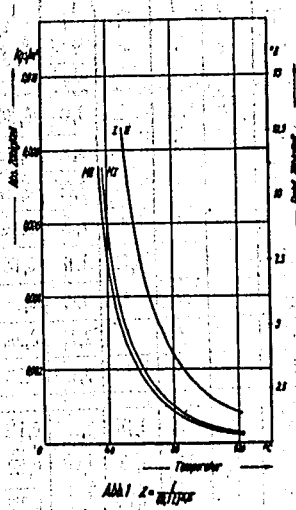


Abb. 3 Lagerversuchsstand
Schema

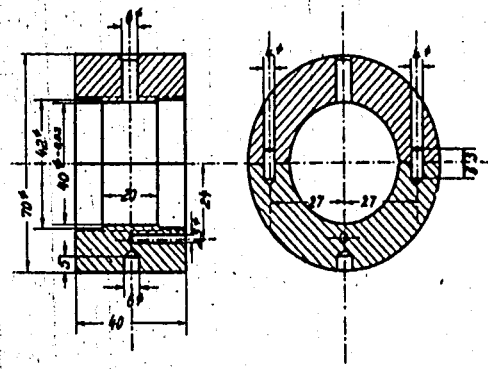


Abb. 4 Lagerbuchse

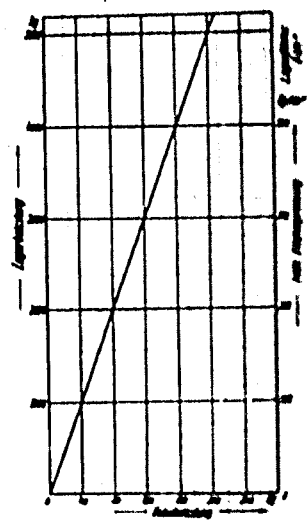


Abb. 5 Echtere Viskosität
Skizzenverlauf 1.21

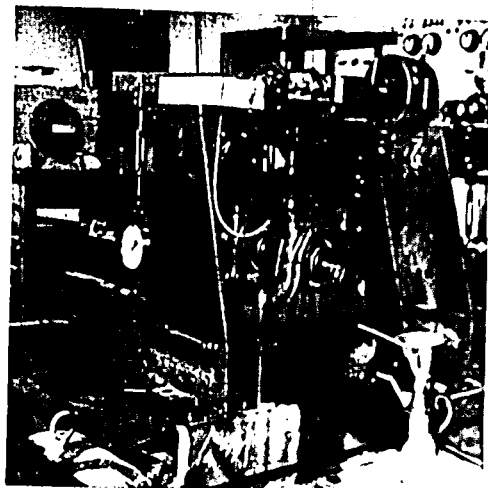


Abb. 2

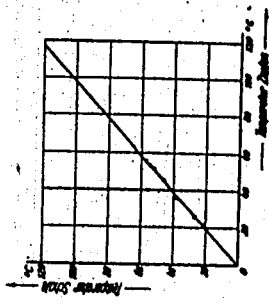


Abb. 6. Vergleich der Rechnerische Schicht
 der Zylinder mit Schicht
 Nummer 10.10. Nummer 20. Nummer 30.10.10

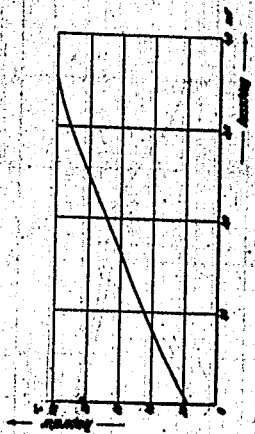


Abb. 7. Vergleich der Rechnerische
 Schicht mit Schicht
 Nummer 10.10. Nummer 20. Nummer 30.10.10

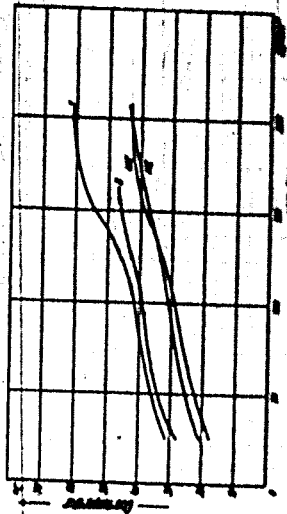


Abb. 8. Vergleich der Rechnerische Schicht
 der Zylinder mit Schicht
 Nummer 10.10. Nummer 20. Nummer 30.10.10

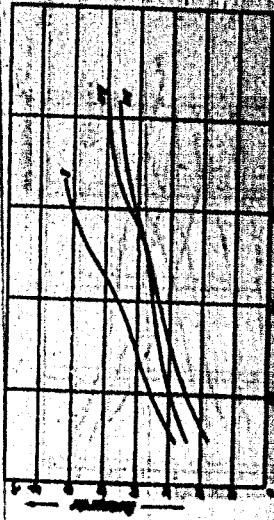


Abb. 9. Vergleich der Rechnerische Schicht
 der Zylinder mit Schicht
 Nummer 10.10. Nummer 20. Nummer 30.10.10

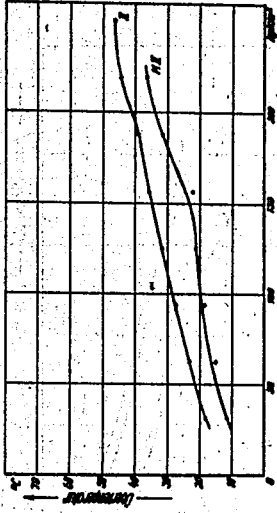


Abb. 10 $G-f(\text{cm})$ Imp.-Exakte JMS. Modell M.2. B. 2, 1, 1, 1
Problem Nr. 5101

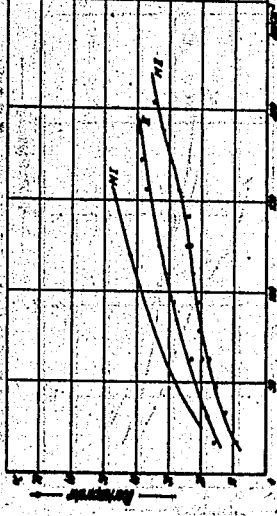


Abb. 11 $G-f(\text{cm})$ Imp.-Exakte JMS. Modell M.3. B. 1, 1, 1, 1, 1, 1
Problem Nr. 1, 1, 1, 1, 1, 1

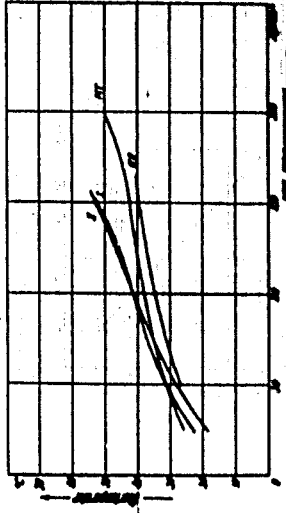


Abb. 12 $G-f(\text{cm})$ Imp.-Exakte JMS. Modell M.4. B. 1, 1, 1, 1, 1, 1
Problem Nr. 1, 1, 1, 1, 1, 1

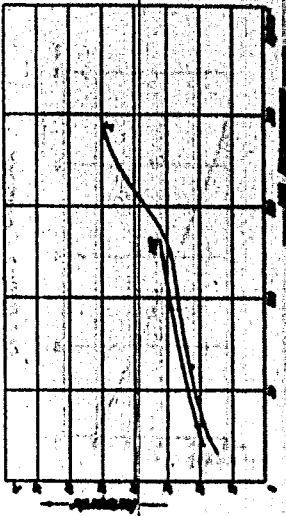


Abb. 13 $G-f(\text{cm})$ Imp.-Exakte JMS. Modell M.5. B. 1, 1, 1, 1, 1, 1
Problem Nr. 1, 1, 1, 1, 1, 1

377

3

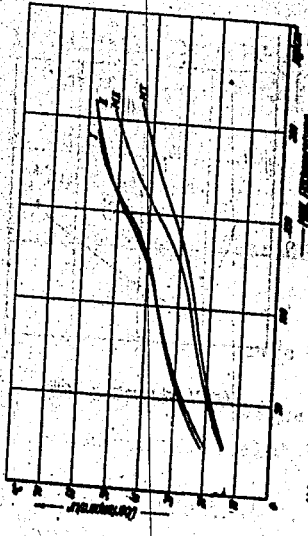


Fig. 13 $G = (D_{\infty})$ Inf. Curve 1. Inf. Curve 2. $\text{Refr. } 0.9$ $\text{Refr. } 1.1$
 Parameters: $\text{Refr. } 0.9, 1.1, 1.1, 1.1$



Fig. 17 $G = (D_{\infty})$ $\text{Refr. } 0.9, 1.1, 1.1, 1.1, 1.1$

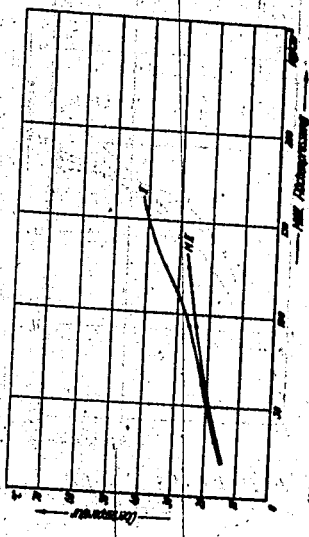


Fig. 14 $G = (D_{\infty})$ Inf. Curve 1. Inf. Curve 2. $\text{Refr. } 0.9$ $\text{Refr. } 1.1$
 Parameters: $\text{Refr. } 0.9, 1.1$

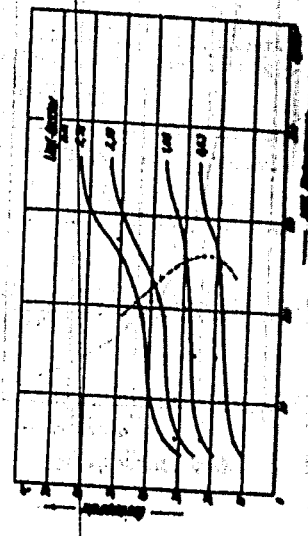


Fig. 18 $G = (D_{\infty})$ $\text{Refr. } 0.9, 1.1, 1.1, 1.1, 1.1$

370

379

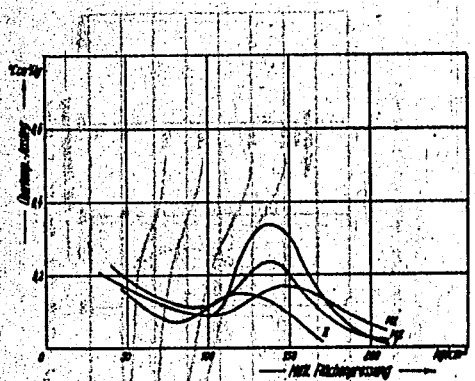


Abb. 18: $\frac{dL}{dt} = f(t)$ (Imp-Brech. 2ms. Punkt: M, N, G. H, I, J, K)

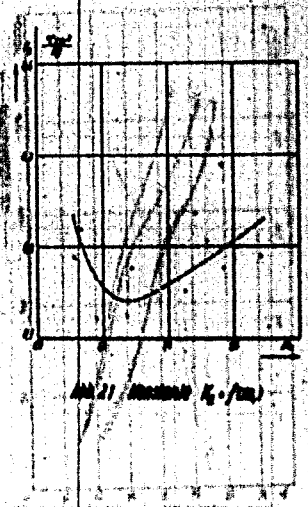


Abb. 21: Konstante $K_2 = f(m)$

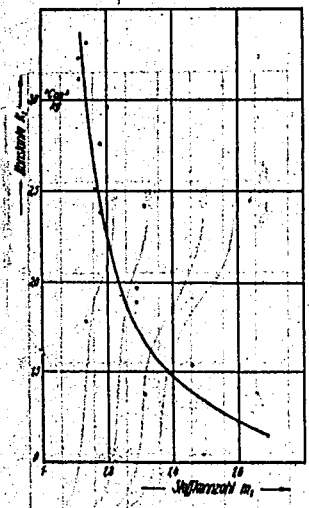


Abb. 19: Konstante $K_1 = f(m)$

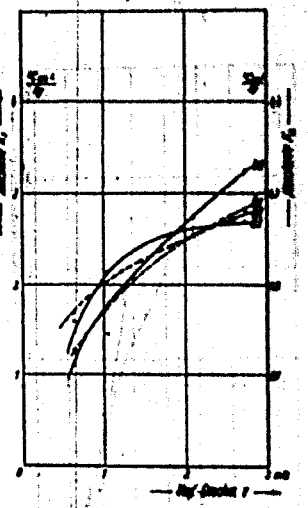


Abb. 20: 1. $K_1 = f(m)$ 2. $K_2 = f(m)$
Punkt: G, H, I

33

Schrifttum

1. Michell, Petrow, Reynolds, Sommerfeld, "Hydrodynamische Theorie der Schmiermittelreibung" Leipzig 1927
2. Gumbel - Everling, "Reibung und Schmierung in Maschinenbau" Berlin 1925
3. R. Duffing, "Über die Schmierschicht in Gleitlagern" ETZ 1928 H.51
4. E. Falz, "Grundzüge der Schmiertechnik" Berlin 1931
5. R.v.Dallwitz - Wegner, "Über neue Wege zur Untersuchung von Schmiermitteln" Berlin - München 1919
6. P. Woog, "Contribution à l'étude du graissage" Paris 1926
7. J. Langmuir, "The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids, J.Am.Chem.Soc. 38/39 1916/17 S. 221 und 1848
8. G.N. Antonoff, "Experimental Measurement of the Surface Tension of Solids" Nature 121, 1928 S. 93
9. A. Saytzeff, "Vergleichende Untersuchungen von Mineral-schmierölen mit 1,5 % Oildag-Zusatz" ZVdJ 1914 Nr.29 S. 192, 200
10. W. Büche, "Untersuchungen molekular-physikalischer Eigenschaften der Schmiermittel" Berlin 1931
11. Schneider, "Lagerreibungsversuche" Petr. 1930 S. 86, 177
12. W. Bachmann und C. Brieger, "Über die Benetzungswärme von Öl zu Metall usw." Koll.Z. 1925 S. 142

13. V. Vieweg, "Über die Trennung von Luft- und Lagerreibung" Masch. Bau (Der Betrieb) 1923/4 H. 5/6

14. Deutsch - Amerikanische Petroleum A.G. (E. Palz, S. Kyropoulos u.a.) "Schmierung" Hamburg 1935

15. Schering und Vieweg, "Beurteilung der Lagerschmierung nach elektrischen Messungen" Petr. 23 1927 Nr. 1 S. 9

16. R. Kiesskalt, "Grundlagen der halbflüssigen Reibung" Z. Techn. Phys. 1928 H. 6

17. O. Schenfer, "Stabilität der Ölschicht in Lagern" Arch. Elektrot. H. 3 1922 S. 86

18. Th. Rabinovitch, "Untersuchung über Druckfestigkeit von Schmierölen" Petr. 31 1922 H. 28 und 33

19. DIN, "Werkstoffnormen" Berlin 1935

20. J. Czochralski und G. Welter, "Lagermetalle und ihre technologische Bewertung" Berlin 1920

21. E.v.Ende und V. Vieweg, "Werkstoffhandbuch" (Nichteisenmetalle) Berlin 1927

22. Th. Rabinovitch, "Zur Bewertung der Lagerwerkstoffe" Petr. 31 1935 H. 41

23. G. Ehlers, "Die Schmiermittel und ihre richtige Verwendung" Leipzig 1928

24. L. Ubbelohde, "Zur Viskosimetrie" Berlin 1935

25. Kammerer - Welter - Weber, "Entstehung und Durchführung der Lagerversuche" Berlin 1920

26. ...

27. ...

28. ...

29. ...

30. ...

31. ...

32. ...

26. A. W. Nash and A. R. Bowen, "The Theory and Practice of Lubrication" London 1929
27. W. Nücker, "Über den Schmiervorgang in Gleitlagern" VdI-Forsch.-H. 352 Berlin 1932
28. Schlesinger und Kurrein, "Schmierprüfung für den Betrieb" Werkstatttechnik 1916 H. 1 - 3
29. W. Steinitz, "Richtige Maschinenschmierung" Berlin 1932
30. Th. Rabinovitch, "Die Schmiermitteluntersuchung mittels Ölprüfmaschinen" Petr. 31 1935 H. 36
31. H. Donandt, "Über den Stand unserer Kenntnisse in der Frage der Grenzschrnerung" ZVdI 80 1935 Nr. 27
32. S. Kiesskalt, "Untersuchungen über den Einfluß des Druckes auf die Zähigkeit usw." VdI-Forsch.-H. 291 Berlin 1927.

LEBENS LAUF

Der Verfasser wurde am 28. Oktober 1910 zu Campina (Rumänien) geboren. Seit Ende 1912 in Bulgarien ansässig, besuchte er dort zunächst die deutsche und später die bulgarische Volksschule. Im Jahre 1929 absolvierte er das Realgymnasium in Sofia und begann anschließend das Hochschulstudium an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Hochschule Berlin. Hier legte er im Februar 1935 in der Fachrichtung Allgemeiner Maschinenbau die Diplom-Hauptprüfung ab.

Maschinenlaboratorium

DEUTSCHES REICH



AUSGEGEBEN
AM 27. JULI 1922

384

REICHSPATENTAMT
PATENTSCHRIFT

— № 356735 —

KLASSE 47b GRUPPE 4
(R 44208 XII/47b)

Ewald Rasch in Berlin-Steglitz.

Reibungsarmes Lager.

Zusatz zum Patent 356734.

Patentiert im Deutschen Reich vom 10. Februar 1917 ab.

Längste Dauer: 6. Juli 1930.

Gegenstand der Erfindung ist eine besonders brauchbare Anordnung eines entsprechend den Vorschriften des Hauptpatents ausgebildeten Lagers. Nach dem Hauptpatent soll eine Anordnung an Maschinenlagern zur Entlastung der sich gegenseitig bewegenden Teile durch Vermehrung der unter Druck stehenden Schmierflüssigkeit geschaffen werden, bei welcher eine Stauung der Schmierflüssigkeit ohne Einführung eines zusätzlichen Flüssig-

keitsdrucks durch die relative Bewegung der bewegten Teile bewirkt wird. Eine solche Anordnung ist streng zu scheiden von einer gewöhnlichen Lagerschmierung, bei welcher es an sich bekannt ist, das Schmieröl durch die relative Bewegung der tragenden Teile anzusaugen. Im Gegensatz hierzu soll der eine Lagerteil vom andern vollständig abgehoben werden, indem durch die Stauung des Schmiermittels ein Flüssigkeitskissen zwischen die relativ beweglichen Teile eingeschaltet wird. Bei der Anordnung nach der Erfindung sind die die Last aufnehmenden Teile der Lagerflächen durch Absperrmittel, wie Stulpen, abgegrenzt, mit einem Schmiermittelbehälter durch Kanäle in Verbindung, durch die unter Wirkung des Wellenumlaufs ein Kreislauf des Schmiermittels stattfindet. Es kann zum Zweck der Anstauung des Schmiermittels in den Rückführungskanal ein Rückschlagventil eingebaut sein. Außer dem durch den Gegenstand des Hauptpatents erreichten Vorteil wird hier hauptsächlich erreicht, daß die Schmierflüssigkeit nach außen gasdicht so abgeschlossen wird, daß deren Verdampfung ganz oder zum Teil verhindert ist. Dies ist von besonderem Wert für Schmiermittel, die aus wässrigen Lösungen bestehen. Weiter wird durch die Anordnung der hydraulischen Sperrvorrichtungen in Verbindung mit den Verbindungskanälen ein zwangschlüssiger Umlauf und dementsprechend eine Kühlung der Schmierflüssigkeit bewirkt. Schließlich kann Druck und Dicke der Schmierflüssigkeit durch Einstellung eines Drosselventils zweckbewußt geregelt werden.

In der Zeichnung ist ein Ausführungsbeispiel des Erfindungsgegenstandes dargestellt; es zeigen das neue Lager im Schnitt Abb. 1 nach der Quere, Abb. 2 nach II-II in Abb. 1.

Der geschlossene Lagerkörper *B* belastet die Welle *D* auf Länge *L* mit Kraft *P* so, daß die Schalenhälfte *A* unter dem Flächendruck $p = P$ steht.

Die Schmierflüssigkeit *z* befindet sich in einem Behälter *e* über dem Lager und gelangt durch Kanäle *a*, *b* zur Welle *D*, die mit der Umfangsgeschwindigkeit *v* im Sinne des Uhrzeigers und der Pfeilrichtung bewegt werde. Es sind nun an den Stirnenden des Lagers zwei ringförmige hydraulische Sperrvorrich-

tungen *y*, wie Stulpen, Gummischüre, Zöpfe o. dgl., angeordnet, die den Austritt der Schmierflüssigkeit *z* an den Lagerenden verhindern.

Ferner sind in Längsnuten des Lagerkörpers zwei hydraulische Sperrorgane x^1 , x^2 mit ihrem Richtungssinn so angeordnet, daß die aus dem Behälter *e* durch den Kanal *a* der Welle *D* aus bestimmter Höhe bzw. unter bestimmtem Anfangsdruck p^0 zufließende Schmierflüssigkeit durch Rotation der Welle *D* mitgenommen und an der Manschette x^1 bis auf den Druck p gestaut wird. In dem Kanal *b*, der gegen den Behälter *e* durch ein Rückschlagventil *c* abgeschlossen wird, ist ein Hahn *d* eingebaut, durch den die lichte Weite des Kanals *b* gedrosselt werden kann.

Bei geöffnetem Hahn *d* wird somit die Schmierflüssigkeit *z* in den Ölbehälter *e* zurückgepreßt.

Durch passende Drosselung des Hahns *d* wird der unter der Lagerschale *A* herrschende Druck p ebenso die Schichtdicke *h* des Schmiermittels daselbst auf ein Optimum eingeregelt.

Eine exakte mathematische Betrachtung zeigt nämlich, daß für bestimmte Werte von *v*, p , *h* die dem Drehsinne entgegengerichtete hemmende Kraft *H* auf ein ausgeprägtes Minimum herabsinkt.

PATENT-ANSPRÜCHE:

1. Reibungsarmes Lager nach Patent 356734, dadurch gekennzeichnet, daß die die Last aufnehmenden Teile der Lagerflächen, durch Absperrmittel, wie Stulpen (x^1 , x^2), abgegrenzt mit einem Schmiermittelbehälter (*e*) durch Kanäle (*a*, *b*) in Verbindung stehen, durch die unter Wirkung des Wellenumlaufs ein Kreislauf des Schmiermittels stattfindet.

2. Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Zweck der Anstauung des Schmiermittels zwischen den Tragflächen in den Rückführungskanal (*b*) ein Rückschlagventil (*c*) eingebaut ist.

3. Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Regelung des Drucks des Schmiermittels in den Rückführungskanal (*b*) eine Drosselvorrichtung (*d*) eingebaut ist.

Hierzu 1 Blatt Zeichnungen

Abb. 1.

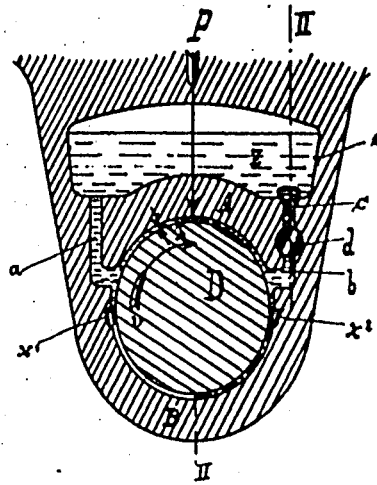
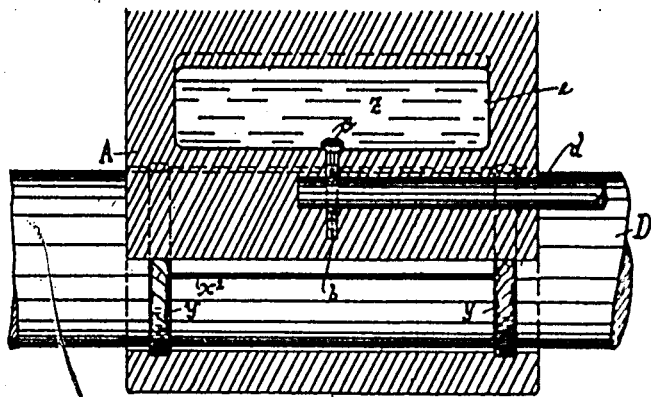


Abb. 2.



Maschinenlaboratorium

DEUTSCHES REICH

387



AUSGEGEBEN
AM 27. JULI 1922

REICHSPATENTAMT
PATENTSCHRIFT

— Nr 356734 —
KLASSE 47b GRUPPE 4
(R 42114 XII|47b)

Ewald Rasch in Berlin-Steglitz.

Verfahren zur Entlastung der sich gegenseitig bewegenden Teile in Maschinenlagern
durch Vermehrung der Schichtdicke der Schmierflüssigkeit.

Patentiert im Deutschen Reiche vom 7. Juli 1915 ab.

Es ist an sich bekannt, daß man die Reibungsarbeit gleitender Maschinenteile, wie beispielsweise die Tragflächen gelagerter drehender Zapfen o. dgl., dadurch vermindern kann, daß man eine Flüssigkeit irgendwelcher Art, die gleichzeitig auch als Schmiermittel dienen kann, unter einem solchen Überdruck zwischen

die relativ bewegten Tragflächen einführt, daß diese Tragflächen voneinander abgehoben werden. Es erfolgt dann eine Entlastung und entsprechende Verminderung der Reibungsarbeit durch die Einschaltung eines von der Druckflüssigkeit gebildeten Polsters oder Kissens.

44

Bei den bekannten Anordnungen dieser Art wurde es durchweg für notwendig gehalten, stets eine zusätzliche Vorrichtung anzuordnen, durch welche die Entlastungsflüssigkeit, beispielsweise durch Pumpen mit gesondertem Antrieb, auf einen gewissen erhöhten Druck gebracht wurde. Unter diesem Druck wurden sie zwischen die relativ bewegten Tragflächen eingeführt, um das Flüssigkeitspolster zu bilden. Man hat dieses Flüssigkeitspolster meist entweder auf die ganze Tragfläche oder auf einzelne Stellen davon wirken lassen, wobei unter Umständen Dichtungsmittel eingeschaltet worden sind.

Von all diesen Anordnungen unterscheidet sich der Erfindungsgegenstand grundsätzlich durch den neuen Gedanken, auf die Anordnung einer zusätzlichen Vorrichtung zur Erzeugung des Flüssigkeitsüberdrucks, wie Pumpen o. dgl., zu verzichten und die nötige Druckkraft zur Einführung der Flüssigkeit zwischen die Tragflächen und ihrer Anstauung zu einem Kissen von der relativen Bewegung der bewegten Teile selbst, beispielsweise von dem Drehmoment einer gelagerten Welle abzuleiten. Hierdurch wird zunächst der wesentliche Vorteil einer Vereinfachung der Anordnung und einer Ersparnis an Antriebskraft erreicht; man kann eine derartige Einrichtung zur Druckerhöhung in das Lager selbst verlegen, so daß also beispielsweise der umlaufende Drehzapfen einer Welle zusammen mit den ihn umgebenden Lagerschalen und an geeigneter Stelle angebrachten Staumitteln selbst als Flüssigkeitspumpe dient.

Demgemäß erweist sich also der Erfindungsgegenstand als eine Anordnung an Maschinenlagern oder ähnlichen Einrichtungen zur Entlastung der sich gegenseitig bewegenden Teile durch Vermehrung der Schichtdicke der unter Druck stehenden Schmierflüssigkeit, dessen wesentliches Merkmal darin besteht, daß eine Stauung der Entlastungs- oder Schmierflüssigkeit ohne Einführung eines zusätzlichen Flüssigkeitsdrucks durch die relative Bewegung der bewegten Teile bewirkt wird.

Es sei in der schematischen Darstellung nach Abb. 1, 2 der Zeichnung A, B beispielsweise ein Lager, dessen Welle D mit Kraft P der Hauptachse nach die eine Lagerschale A belastet. In dieser ist nach der Erfindung eine hydraulisch dichtende, etwa U-förmige Manschette x aus Leder, Metall o. dgl. eingelagert. Gelangt nun die Entlastungsflüssigkeit (Schmierflüssigkeit) durch einen Zuflußkanal Z zum Zapfen D, so wird sie angesaugt und im Sinne der Drehrichtung mit der Umfangsgeschwindigkeit v des Zapfens mitgenom-

men. Sie wird aber durch die hydraulische Dichtung x verhindert, von x nach y zu strömen. Durch Anordnung dieser Längsmanschette x wird somit unter dem mit P kg belasteten Zapfen D ein tragendes Flüssigkeitspolster bestimmter Dicke h und bestimmter Flüssigkeitspressung p kg/qcm erzeugt. Gleichwertige hydraulische Druckwirkungen p kann man konstruktiv natürlich auch dann erzielen, wenn man die hydraulische Manschette x in eine entsprechende Nut des bewegten Körpers D hineinverlegt. Die Entlastungsflüssigkeit (Schmiermittel) entweicht bei dieser Anordnung an den Stirnflächen xx der Lagerschalen, und zwar gemäß der schematischen Darstellung der Strömungslinien (Abb. 3) in paralleler Richtung der Drehachse der Welle D, übt somit auf diese kein hemmendes Drehmoment aus.

Man kann jedoch nach dem gleichen Grundsatz die ausschlaggebenden kennzeichnenden Größen h und p gemäß Abb. 2 dadurch erhöhen, daß man auch das seitliche Abströmen der Entlastungsflüssigkeit durch hydraulische Dichtungen (Ringmanschetten o. dgl.) x'x' hemmt, die den Zapfen D in ganzem oder teilweise Umfang umfassen.

Die abfließende Entlastungsflüssigkeit wird in Sammelgefäßen zugeleitet und hier auf geeignete Zähflüssigkeit neu eingestellt.

Das Prinzip der vorliegenden Erfindung beschränkt sich keineswegs auf die beispielshalber angeführten Sonderfälle drehender Maschinenelemente, ist vielmehr in allen Fällen allgemein anwendbar, wo durch die relative Bewegung der aufeinander gleitenden Maschinenteile eine Anstauung der zugeführten Entlastungs- oder Schmierflüssigkeit zum Zweck der Bildung eines Tragpolsters bewirkt werden kann.

Auch ist die Art der für die Stauung der Entlastungsflüssigkeit verwendeten Dichtungsmittel an sich gleichgültig; man wählt nach dem Sonderfall unter den bekannten Vorrichtungen, wie Stulpen, Dichtungsscheiben aus Metall, Gummi, Leder o. dgl. Labyrinthdichtung und ähnlichen, die geeignetste aus.

PATENT-ANSPRUCH:

Verfahren zur Entlastung der sich gegenseitig bewegenden Teile in Maschinenlagern oder ähnlichen Einrichtungen durch Vermehrung der Schichtdicke der unter Druck stehenden Schmierflüssigkeit, dadurch gekennzeichnet, daß eine Stauung der Schmierflüssigkeit ohne Einführung eines zusätzlichen Flüssigkeitsdrucks durch die relative Bewegung der bewegten Teile bewirkt wird.

Abb. 1.

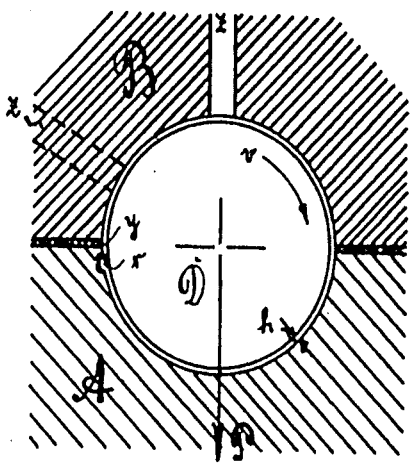


Abb. 2.

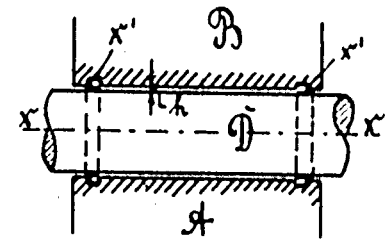
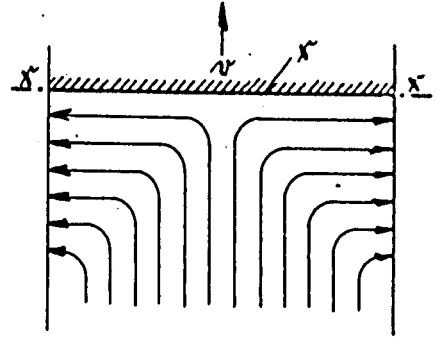


Abb. 3.



E. Eder

Zusatzmittel, für Hochdruckschmiermittel.

Öl & Kohle 40(1944) Nr. 5/6 S.102/105

E. Edler

Zusatzmittel für Hochdruckschmiermittel.

Öl & Kohle 40(1944) Nr. 5/6 S.102/105

Zusatzmittel für Hochdruckschmierung

Bei den heute zur Verfügung stehenden Zusatzmitteln zur Verbesserung der Druckbeständigkeit von Ölfilmen) handelt es sich meist um organische Körper, die vorwiegend Chlor oder Schwefel und Chlor oder Phosphor oder Chlor, Schwefel und Phosphor oder Stickstoff enthalten. Außerdem spielen bei manchen Verbindungen noch Hydroxyl-, Alkyl- und andere Gruppen z. T. eine wesentliche Rolle. Auf diesem Gebiet haben Evans u. Elliot¹⁾ vor zwei Jahren Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse hier zusammengefaßt seien. Sie bestimmten die Zerfallzeit des Ölfilms mit der *Almen*-Maschine²⁾. Da die spätere Schwierigkeit in der Ersatzbeschaffung einstellten und um gleichzeitig weitere Anhaltspunkte über die Wirkung verschiedener organischer Verbindungen als Zusatzmittel zu gewinnen, wurde z. T. in der *Brownson*-Maschine auch noch die Abnutzung bestimmt. Es wird im folgenden darauf hingewiesen, daß zwischen der Zerfallzeit des Ölfilms und der Abnutzung in der *Brownson*-Maschine keine unbedingte Parallelität besteht. Bei der Prüfung des Einflusses verschiedener Verbindungen wurde davon ausgegangen, daß die Grenze der Zerfallzeit des Films bei den meisten Schmierölen etwa bei einer Belastung von 210 bis 250 kg/cm² liegt. Das verwandte Öl zeigte in der *Almen*-Maschine eine Zerfallzeit von 280 kg/cm² und in der *Brownson*-Maschine eine Abnutzung von 0,430 mm.

Wenn Öle mit Mineralölen zugesetzt, so wird der Reibungsbeiwert bei niedrigen Temperaturen erniedrigt und bei hohen Temperaturen erhöht. Bei Zusatz anderer organischer Verbindungen wird der Reibungsbeiwert meist temperaturabhängig. Von den in dieser Hinsicht untersuchten zahlreichen vorwiegend organischen Verbindungen sind in *Zellwolle* 3) auswahlweise einige mit den Versuchsergebnissen verglichen.

In Konzentrationen von 1% haben Naphthalin, Diphenyl und Triphenylmethyl (1) keinen Einfluß auf das Schmieröl. Organische Verbindungen, die wenigstens aus drei substituierten Kohlenstoffatomen bestehen und vorzugsweise aromatische Radikale miteinander verknüpft sind, zeigen in der Regel eine gewisse Wirkung als Zusatzmittel für Hochdruckschmierung. Als Beispiel sei eine Mischung von 2% Triphenylmethyl (2) und 2% Methylcyclohexylmalat (als Lösungsvermittler) in einem Öl (2) angeführt. In Konzentrationen von 1% im Schmieröl zeigen aliphatische Ester nur eine geringe Wirkung. Ein Einfluß auf die Schmieröleigenschaften zeigen auch aliphatische Säuren mit aromatischen Alkoholen, wenn die Verhältnisse, wenn aromatische Säuren mit aromatischen Alkoholen verestert sind. Die direkte Wirkung von Estern, wenn der Alkoholrest niedrig- oder hochmolekulare aliphatische Radikale (3) und Diäthylphthalat (4) enthält, ist gering. Die Zerfallzeit ergibt der Zusatz eines Esters, in dem die Estergruppe als auch der Alkoholrest von der gleichen Art sind, eine hohe Zerfallzeit. Wird eine Estergruppe in den Ester eingeführt, so ist dies in der Regel ein Nachteil. Inorganische Säuren mit aromatischen Alkoholen, z. B. Triäthylphosphat (5) zeigen in bestimmten Konzentrationen einen beachtlichen Effekt. Einen günstigen Einfluß zeigen o- und m-Nitroacetophenone (6). Bei den Schwefelverbindungen ist es interessant, daß Thioäther bereits in Konzentrationen von 1,1% die Zerfallzeit stark erhöht. Bei den organischen Schwefelverbindungen kann man hinsichtlich der Wirksamkeit deutlich zwei Klassen von Verbindungen unterscheiden. Ist der Schwefel mit einem Molekül gebunden, z. B. im β -Naphthylmercaptan (7), so tritt eine geringe Aktivität. Eine erhöhte Wirksamkeit zeigen Schwefelverbindungen, in denen sich der Schwefel in einer Kette befindet, z. B. β -Naphthyltetramethan (8) und β -Naphthylhexamethan (9). Einführung eines aliphatischen Kohlenstoffatoms erhöht offenbar die Wirksamkeit von Schwefel. Wie die Beispiele des Dibenzylmalats (10) und des Dibenzylmalats (11) zeigen. Das unwirksame Diphenylmalat (12) wird durch Substitution hochwirksamer Verbindungen, hier durch besonders das Diäthyläther des 3-Carboxymethyl- β -Naphthylmalats (13) in Erscheinung. Dieses Beispiel zeigt die überaus große Bedeutung der Hydroxyl- und Carboxylgruppen bei Zusatzmitteln zur Steigerung der Druckbeständigkeit von Ölfilmen. Thioäther, z. B. p-Tolylthiocarbamid (13),

zeigen entgegen den Erwartungen nur geringe Effekte. Bei dieser Körperklasse kann man eine Steigerung der Aktivität durch Einführung eines Halogenatoms in den Kern erreichen. Hierbei zeigt die *para*- gegenüber der *ortho*-Substitution eine erhöhte Wirksamkeit. Dies zeigt sehr instruktiv das o- und p-Chlorphenylthiocarbamid (14). Entsprechend seiner karboxylgruppenverbindenden Wirkung in geringen Konzentrationen wirkt Mercaptoäthylmalat (15) erwartungsgemäß kaum einen Effekt.

Die aromatischen Chlorverbindungen zeigen bei weitem als drei Chloratome, wenn keine anderen Substituenten vorgegeben sind, keine Aktivität. Demgemäß beeinflussen o- und p-Dichlorbenzol (16) nicht die Zerfallzeit des Ölfilms, während 1:2:4:5-Tetrachlorbenzol (18) und besonders 2:4:5-Trichlor-toluol (17) eine beachtliche Aktivität aufweisen. Die beiden letzten Verbindungen zeigen auch besonders auffällig den Einfluß, den eine Methylgruppe, die an die Stelle eines Chloratoms tritt, hervorruft. Hervorstechend wirksam sind Naphthalin-tetrachlorid (19), Tetrahydrophthalin-tetrachlorid (20) sowie Anthracen-dichlorid (21), wobei zu bemerken ist, daß letzteres in Öl nur suspendierbar ist. Bei den als Zusatzmittel in Frage kommenden aromatischen Halogenverbindungen ist sowohl die Stellung des Halogens am Kern als auch die Art der Bindung von maßgeblichem Einfluß. Mit Ausnahme des Tetrachlor-tetrahydrophthalins ist in den erwähnten Verbindungen das Halogen additiv gebunden. Vom Standpunkt der Praxis aus verdient das Naphthalin-tetrachlorid wegen seiner leichten Zugänglichkeit und damit seiner Preiswürdigkeit besondere Interesse. Wider Erwarten zeigt das in seiner Konstitution bisher unbekannte Dichlorphenylthioacetat (22) keine Verbesserung der filmtreue Eigenschaften. Analog manchen Schwefelverbindungen ergibt die Anwesenheit von aliphatischen Kohlenstoffatomen bei vielen Halogenverbindungen einen beträchtlichen Effekt: Chlorbenzol (23), Benzylchlorid (24) und Benzalchlorid (24). Der technischen Verwendung des letzteren steht seine starke Reizwirkung entgegen.

Die Einführung einer Nitrogruppe in eine Halogenverbindung führt bei den Nitro-Halogenverbindungen zu einer Erhöhung der Aktivität: Chloranaphthalin (25) und 1-Chlor-4-Nitro-naphthalin (26). Eintritt einer zweiten Nitrogruppe verbessert die filmtreue Eigenschaften noch weiter, wie das 4:8-Dinitro-chloranaphthalin (27) zeigt. Ähnliche Verbindungen findet man beim Chlorbenzol. Eine Steigerung der filmtreuen Eigenschaften zeigt sich bis zum Eintritt einer zweiten Nitrogruppe, während eine dritte Gruppe einen Verlust an Aktivität bedingt. Im einzelnen sei hier auf die in *Zellwolle* 4) angeführten Verbindungen verwiesen: Chlorbenzol (28), o-Nitrochlorbenzol (29), 2:4-Dinitrochlorbenzol (30) und Äthylchlorid (31). Letztere sind auch die Chloranaphthalinverbindungen z. T. kräftige Reizmittel und scheiden deshalb für die Verwendung in der Praxis weitgehend aus. Dasselbe Ergebnis zeigen auch andere aromatische Verbindungen beim Einsetzen von Nitrogruppen, z. B. p-Dichlorbenzol. Keine allen gleich wirksamkeit zeigt auch das 2:4:5-Trichlor-3-nitrobenzol (32). Unsymmetrische Anordnung einer oder zweier Nitrogruppen in bezug auf das Halogen bedingt einen Nachteil, z. B. o-Dichlorbenzol (33), 1:2-Dichlor-4-nitrobenzol (34), 1:2-Dichlor-4:5-dinitrobenzol (35) sowie 1:2:4:5-Tetrachlorbenzol (18) und 1:2:4:5-Tetrachlor-3-nitrobenzol (36). Einen ähnlichen Effekt zeigen auch 2:4:5-Trichlorbenzol (17) und 2:4:5-Trichlor-3-nitrobenzol (37). Es ist mit Sicherheit anzunehmen, daß alle zwei Chloratome enthaltenden aromatischen Verbindungen durch Eintritt einer Nitrogruppe in das Molekül in ihrer Wirksamkeit wesentlich verbessert werden. In dieser

1) Vgl. auch die zusammenfassenden Darstellungen in *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* vom 16. Dez. 1936 sowie vom 6. März 1938.

2) E. A. Evans u. J. S. Elliot, *J. Inst. Petrol. Technologists* 27, 163 (1941).

3) Siehe E. H. Koster, *Schmierstoffe und Maschinenbeschleunigung*, 2. Aufl. Berlin 1941, S. 317/320. Dort findet sich auch eine Kritik über die mit der *Almen*-Maschine erhaltenen Versuchsergebnisse.

4) Die in runden Klammern angegebenen Zahlen beziehen sich auf *Zellwolle* 1.

Zahlentafel 1. Einfluß verschiedener Zusatzorganischer Verbindungen auf die Durchdringung eines Ölfilms

Nr.	Name	Formel	Konz. %	Zerfallsfähigkeit in der Almen- maschine kg/cm ²	Abnutzung i. d. Zentrifuge Maschine, mm	Bemerkungen
0	Ohne Zusatz					
1	Phenylphenyl	<chem>c1ccc(cc1)-c2ccccc2</chem>	2	240	0,130	
2	Triphenylcarbinol	<chem>c1ccc(cc1)(c2ccccc2)c3ccccc3</chem>	2	1050		Kein Durchdr.
3	Methylsalicylat	<chem>CC(=O)Oc1ccccc1</chem>	3	770		4% Methylsalicylat als Lösungsmittel verwendet.
4	Diäthylphthalat	<chem>CCOC(=O)c1ccc(cc1)C(=O)OCC</chem>	3	700		
5	Triäthylphosphat	<chem>CCOP(=O)(CC)CC</chem>	3	700		
6	o- und m-Nitroacetophenon	<chem>CC(=O)c1cccc(c1)[N+](=O)[O-]</chem>	3	400		Bei Anwendung weiche, Koll. auftreten.
7	β-Naphthylmercaptan	<chem>C1=CC=C2C=CC=CC2=C1S</chem>	1	240		
8	β-Naphthyltetrasulfid	<chem>C1=CC=C2C=CC=CC2=C1SSSS1</chem>	1	770		
9	Xanthogen tetrasulfid	<chem>C1=CC=C2C=CC=CC2=C1SSSS1</chem>	1	770		
10	Dibenzylsulfid	<chem>C1=CC=C(C=C1)SSC2=CC=CC=C2</chem>	1	560		Ähnlich wie a.
11	Dibenzoylsulfid	<chem>C1=CC=C(C=C1)SSC2=CC=CC=C2</chem>	2,5	1050		
12	Bis-(4-carbomethoxy-2-hydroxyphenyl)-thioether	<chem>COC(=O)c1ccc(O)cc1SSc2ccc(O)cc2C(=O)OC</chem>	1	630		
13	p-Tolylthiocarbimid	<chem>Cc1ccc(S=C(N)=N)cc1</chem>	4	1050		
14	o- und p-Chlorphenylthiocarbimid	<chem>Cc1ccc(S=C(N)=N)cc1</chem>	4	490		
15	Mercaptobenzothiazol	<chem>C1=NC(S)=NC=C1</chem>	5	o 630 p 1050		
16	o- und p-Dichlorbenzol	<chem>C1=CC=C(C=C1)Cl</chem>	1	350		
17	1,2,4-Trichlorbenzol	<chem>C1=CC=C(C=C1)Cl</chem>	o 1 p 2	280	0,350	
18	1,2,4-Trichlorbenzol	<chem>C1=CC=C(C=C1)Cl</chem>	2	280	0,410	
19	1,2,4-Trichlorbenzol	<chem>C1=CC=C(C=C1)Cl</chem>	1	630	0,215	
20	Tetrachlorbenzol	<chem>C1=CC=C(C=C1)Cl</chem>	1	420	0,280	
21	Sphthalintetrachlorid	<chem>C1=CC=C(C=C1)Cl</chem>	0,5	770	0,230	
22	Tetrachlortrihydronaphthalin	<chem>C1=CC=C(C=C1)Cl</chem>	0,5	>1050	0,305	Mischung abnutz. höherer Chlorierungsstadien.
			1	560	0,300	

Fortsetzung der Zahlenfolge 1

Nr.	Name	Formel	Konz. %	Zertrümpfbarkeit in der Almon- Maschine, kg/cm ³	Abnutzung i. d. Zwenoden- Maschine, mm	Bemerkungen
21	Anthracendichlorid		0,5 2	— —	0,245 0,150	Wasserdampfen best.
22	Dichlorphenanthrentetrachlorid		2		0,450	Korrosion unbekannt.
23	Benzylchlorid		1	490	0,265	
24	Benzalchlorid		1	505	0,215	
25	Chlornaphthalin		2		0,425	
26	1-Chlor-4-Nitronaphthalin		2		0,365	
27	4,5-Dinitro-1-chlornaphthalin		2		0,320	
28	Chlorbenzol		1		0,430	
29	o-Nitrochlorbenzol		1	420	0,210	
30	2,4-Dinitrochlorbenzol		1	490	0,210	
31	Phenylchlorid		1		0,330	
32	4,5-Trichlor-3-nitrotoluol		1	630	0,160	
33	Dichlorbenzol		1		0,390	
34	1,2-Dichlor-4-nitrobenzol		1		0,240	
35	1,2-Dichlor-4,5-dinitrobenzol		1		0,210	
36	1,2,4-Tetrachlor-3-nitrobenzol		1		0,240	
37	2,4,6-Trichlorphenylbenzol		0,5		0,130	
38	2,4,6-Trichlorphenyl-m-nitro- benzol		0,5		0,260	
39	Chlornaphthalin		0,5	560	0,230	

Oil and Grease in Chem. and Engin. Chem. Soc. A. 1929, 1141

Fortsetzung der Zahlenliste 1

Nr.	Name	Formel	Konz. %	Zerreibfestigkeit in der Almen-Maschine, kg/cm ²	Abnutzung in der Almen-Maschine, mm	Bemerkungen
40	Nitrochlor-o-kresol		0,5	540	0,230	
41	Nitrobenzol		1	350		
42	2,4,6-Trichlorphenol		0,5	560		
43	41 + 42		1% + 0,5%	630	0,210	
44	Phenylnitromethan		2		0,220	
45	44 + Hexachloräthan		2% + 1%		0,170	

Es sei noch erwähnt: 2:4:6-Trichlorphenylbenzoesäure (37), 2:4:6-Trichlorphenyl-m-nitrobenzoesäure (38) sowie Chlor-o-kresol (39) und Nitrochlor-o-kresol (40). Werden Mischungen, die aus einer Chlor- und einer Nitroverbindung bestehen, angewandt, so kann man auch in diesem Falle ähnliche Effekte erzielen, als wenn Chlor- und Nitrogruppen in einem Molekül zugegen sind. In diesen Mischungen enthält die Halogenverbindung vorteilhaft zwei Halogenatome. Als Beispiel seien zwei Mischungen angeführt, bestehend aus 1% Nitrobenzol und 0,5% 2:4:6-Trichlorphenol (43) (man

vergleiche den Wert der Komponenten in der entsprechenden Konzentration mit den Werten (41) und (42), sowie aus 2% Phenylnitromethan und 1% Hexachloräthan (45). Beim Phenylnitromethan (44) ist noch zu beachten, daß der Organwert eines aliphatischen Kohlenstoffatoms einen beachtlichen Effekt hervorbringen kann (vgl. Nitrobenzol (41)). Zum Schluß sei noch darauf hingewiesen, daß natürlich aus ein ganz kleiner Teil der in der Untersuchung erprobten Substanzen für eine Anwendung in der Praxis in Frage kommt. E. B. 1942

Entwicklung von Pumpen und Armaturen aus nichtmetallischen Werkstoffen

Von W. Kleis, Nürnberg

Die ersten Kreiselpumpen aus Hartporzellan entsprachen in der Gestaltung nicht den Eigenarten des spröden Werkstoffes, während die jetzt herauskommenden Pumpen vor Bruchgefahr besser geschützt sind. Die Erwärmung der mit Porzellan verklebten Welle in der Stopfbüchse wird vermindert durch eine Durchströmung, welche auch bei größeren Zulaufdrücken noch wirksam ist. Das Laufrad hat nur 2 Kanäle von 90° Nennwinkel, das auch breiige Massen, Klumpen etc. befördern können. Abmessungen aus Hartporzellan werden wie die Freilaufventile mit schräger Spindel gestaltet, weil diese Form für die Herstellung am einfachsten ist und vollständigen Ablauf der Flüssigkeit beim Entleeren der Leitung ermöglicht. Die Ventile aus Porzellan werden ebenso wie die Pumpen mit Gummilagerkappe, welche die Rohrkante aufschmenkt, versehen, um den Transport zu erleichtern. Die Verwendung von Kunststoffen für Pumpen und Armaturen ist zu empfehlen, da infolge der einseitigen Benetzung der Werkstoffe Risse und Brüche entstehen können, wenn der Kontakt durch Flüssigkeitsaufnahme quillt. Am besten geeignet sind (trotz der geringeren Temperaturbeständigkeit) die thermoplastischen PCU-Kunststoffe, welche keine Füllstoffe enthalten und am wenigsten quillen.

Statt des bisher üblichen Herstellungsverfahrens durch Schweißen und Kleben von Flößen und Rahmen wird das Spritzverfahren eingeführt und damit Prüfverfahren sehr einfacher Form erzeugt.

Beachtung verdient die bisher für Pumpen und Armaturen noch wenig angewendete Verklebung durch mehrlagige Anstrichen und Einbringen einer Kennschicht nach dem Mankalt-Verfahren.

Pumpen, Ventile und Schieber, namentlich großer Abmessungen, werden mit Gummi verklebt. Die Kammer der gummierten Pumpen können als Kanalräder beliebig geformt ausgeführt werden. Die früheren Kreiselpumpen mit Schweißnähten mußten wegen der Gummirichtung einseitig offen sein und erforderten ein sehr geringes Spiel zwischen Scheibel und Gehäusedeckel. Dies führte oft zu Zerstörungen der Gummischicht bei Wärmedehnungen und durch kleine feste Trübe, Kristalle u. dgl. in der Flüssigkeit. Die Kammer sind nun mit großen Abständen von den Wänden und Nuten auch diese Stoffe, ohne Schaden zu leiden.

¹⁾ Aus einem Vortrag gehalten auf der Arbeitstagung der Dechema in Frankfurt a. M., 16. bis 20. Mai 1942.

Die Berichtigung des Reid-Dampfdruckes von Kraftstoffen

Von Dr. W. Danneberg, Meers

Die Reid-Dampfdruckkurven (Arbeit¹⁾ sind in Abb. 1 und 2 durch die Reid-Dampfdruckkurven (Arbeit¹⁾ dargestellt. Die Reid-Dampfdruckkurven in der Reid-Arbeit die Reid-Dampfdruckkurven des Reid-Verfahrens (Arbeitswert) sind in der Reid-Arbeit (Arbeitswert) dargestellt. Die Reid-Dampfdruckkurven in der Reid-Arbeit die Reid-Dampfdruckkurven des Reid-Verfahrens (Arbeitswert) sind in der Reid-Arbeit (Arbeitswert) dargestellt.

Meßtemperaturen als 40° verwendet werden. Wenn man wissen will, wie sich die Reid-Dampfdruckkurven bei anderen Temperaturen verhalten, so muß zur Umrechnung von Torr in kg/cm² auf Seite 1007 der genannten Arbeit wiedergegebene Beziehung benutzt werden.

¹⁾ Oil u. Koble 36, 1005 (1942).