

Form 7B-3

START.
OF
REEL
Roll

61-CC

EASTMAN KODAK

Form PB-4

Name of Target: Physikalische - Technische Reichsanstalt Berlin.

Type of Organisation: Physikalische - Technische Reichsanstalt.

Land: Germany

Kreis:

City: Berlin

Street:

Roll Number:

61

Team:

CC

Date:

6/1/46

Screeners :

Mr. Coetz

Mr. Liebergall

Mr. Kahn

Miss Gave.

Mrs. Wiebeck

DOCUMENTS OF THE PRESIDENT OF THE UNITED STATES

Executive Order

Mr. Coak
Mr. Graham
Mr. Harbo

Mr. [unclear]
Mr. [unclear]

Source of documents: Document, [unclear]

34

W 00001 W
Jahn & Kunkel
II W

Aufgaben und Tätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

Von Oberregierungsrat Dr. Alfred Schuler, Physikalisch-Technische Reichsanstalt, Berlin.

Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt in Berlin-Charlottenburg, die die größte staatliche Anstalt des Deutschen Reiches auf dem Gebiete der Physik und der auf diese sich gründenden Technik ist, wurde im Jahre 1887 unter der Leitung von Hermann von Helmholtz als erste deutsche Forschungsstelle zur Förderung physikalischer Wissenschaft und Technik gegründet. Etwa 15 Jahre hat es gedauert, bis der von Werner v. Siemens tatkräftig geförderte Gedanke der Gründung eines obersten wissenschaftlich-technischen Staatsinstituts, wie es die Reichsanstalt schließlich geworden ist, verwirklicht wurde. Werner von Siemens stellte hierfür dem Deutschen Reiche ein Gelände von nahezu 20 000 qm im Werte von ½ Million Mark zur Verfügung, und so entstand auf dem Gelände in Charlottenburg in der Nähe des Kanals zwischen March-, Gericke-, Werner-Siemens- und Fraunhoferstraße die Physikalisch-Technische Reichsanstalt.

Entsprechend der von Siemens gegebenen Anregungen besteht die allgemeine Aufgabe der Reichsanstalt in der wissenschaftlichen Bearbeitung aller Fragen des physikalisch-technischen Meßwesens, und zwar vornehmlich in der Festlegung und Sicherung aller Maßeinheiten und in der Förderung der physikalischen Forschung.

In den 55 Jahren ihres Bestehens ist die Reichsanstalt niemals von dieser gestellten Aufgabe abgewichen, vielmehr hat sie wertvolle Arbeit für die deutsche Wissenschaft und für die deutsche Wirtschaft geleistet.

Die Reichsanstalt hatte bisher sechs Präsidenten: H. v. Helmholtz (1887–1894), F. Kohlrausch (1895–1905), E. Warburg (1905–1922), W. Nernst (1922–1924), Fr. Paschen (1924–1933) und J. Stark (1933–1939). Seitdem wird die Anstalt von Staatsrat Prof. Dr. A. Esau

geleitet. Sie besteht zur Zeit aus mehr als 80 Laboratorien, die auf dem alten Gelände sowie in der Franklinstraße, im Hochhaus am Knie und im Baumschulenweg untergebracht sind. In der Reichsanstalt arbeiten etwa 150 Wissenschaftler mit den erforderlichen Technikern, Handwerkern und anderen Hilfskräften. In ihrer heutigen Gestalt gliedert sich die Physikalisch-Technische Reichsanstalt in sechs große Abteilungen, von denen jede einem Direktor untersteht und in eine Anzahl von Laboratorien geteilt ist. Es sind dies die Abteilung I für Maß und Gewicht, die frühere Reichsanstalt für Maß und Gewicht (Normalgleichungskommission), die im Jahre 1923 mit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vereinigt worden ist, ferner die Abteilung II für Elektrizität und Magnetismus, die Abteilung III für Wärme und Druck, die Abteilung IV für Optik, die Abteilung V für Atomphysik und physikalische Chemie und die Abteilung VI für Mechanik und Akustik. Außer diesen sechs Abteilungen ist noch eine Reihe präsidialer Dienststellen vorhanden, wie die Hauptwerkstatt, die Hauptbibliothek, die Verwaltungsleitung und einige Sonderreferate, die dem Präsidenten unmittelbar unterstellt sind.

Der Aufgabenkreis der Anstalt erstreckt sich auf die Forschungsarbeit, auf die Prüftätigkeit und auf die hier nicht näher behandelten Aufgaben, die ihr als technischer Oberbehörde über die Eichbehörden und über die elektrischen Prüfämter im Rahmen des Maß- und Gewichtswesens gesetzlich übertragen sind. Dieser Aufgabe gemäß hat die Reichsanstalt, unter dem 24. Januar 1942 die neue, für das Großdeutsche Reich gültige Eichordnung erlassen.

Die Forschungsarbeit dient der Förderung der physikalischen Wissenschaft sowie der Technik durch Forschungsarbeiten in der Grundlagenforschung. Es handelt sich hierbei um „die Ausführung physikalischer Untersuchungen und Messungen, welche in erster Linie die Lösung wissenschaftlicher Probleme von großer Tragweite und Wichtigkeit in theoretischer oder technischer Richtung bezwecken und einen größeren Aufwand an instrumenteller Ausrüstung, Materialverbrauch, Arbeitszeit der Beobachter und Rechner erfordern, als der Regel nach von Privatleuten oder Unterrichtsanstalten aufgeboden werden kann“^[1]. Zum andern ist ein besonderes Erfordernis die Entwicklung einer leistungsfähigen Meßtechnik zur Förderung der Industrie, besonders der Feinmechanik. Diese

[1] Aus der ersten vom Reichsminister des Innern erlassenen Geschäftsordnung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vom 26. Juli 1888.

suchte gerade in der Zeit der Gründung der Reichsanstalt den Weg zum Weltmarkt, der im Wettbewerb mit älteren Industrieländern nur durch ausgezeichnete Güte der Erzeugnisse gewonnen werden konnte. Dem gehörte aber strengste Überwachung der Fertigung und der erzeugten Güter, und hier hat die Reichsanstalt durch Schaffung der Grundlagen für eine genau und zuverlässige Meßtechnik an einem entscheidenden Punkt beifend eingegriffen.

Aus der Aufgabe, eine Meßtechnik auf allen Gebieten zur Förderung der Industrie zu entwickeln, ergibt sich auch die Stellung der Reichsanstalt als Beraterin der Reichsregierung in allen den Fällen, wo physikalische oder technische Gesichtspunkte mit dem Erlaß oder der Ausführung von Gesetzen zusammenhängen, wie z. B. die internationale Vereinbarung der Maßeinheiten.

Aufs engste mit der Entwicklung der Meßtechnik verbunden ist die Prüftätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Durch diese Tätigkeit ist sie aufs engste mit der Technik verknüpft und lernt so die Bedürfnisse des praktischen Lebens kennen, die zu befriedigen das letzte Ende das Ziel jeder Forschung ist. Die Prüftätigkeit der Reichsanstalt ist außerordentlich vielseitig und erstreckt sich auf alle Gebiete der Physik. Sie wird in der Weise ausgeübt, daß die Reichsanstalt alle ihr von der Industrie und Technik oder auch von Einzelpersonen übergebenen Apparate und Instrumente, soweit das nach physikalischen Methoden geschehen kann, einer Untersuchung unterzieht und das Resultat dieser Untersuchung bescheinigt oder die mit Erfolg vollzogene Prüfung an dem Instrument kenntlich macht, das Instrument „beglaubigt“. Hierbei kann es sich, wie z. B. bei Normalwiderständen, entweder nur um die Untersuchung handeln, ob ein Instrument innerhalb gewisser ein für allemal festgesetzter Fehlergrenzen richtig ist, oder aber das Ergebnis der Untersuchung kann in einem Prüfungsschein zahlenmäßig mitgeteilt werden; man erfährt dann, um wieviel ein Meßgerät in seinen Angaben von der Wahrheit abweicht und kann danach die Abweichungen an dem Instrument korrigieren. Die Beglaubigung von Meßgeräten bietet, nachdem einmal die Art der Prüfung ausgearbeitet ist, der wissenschaftlichen Forschung kaum noch einen Anreiz und wird, wenn es sich um Massenprüfungen handelt, gern in besondere Prüfanstalten verlegt; anders ist es mit Einzeluntersuchungen, welche vielfach den Anlaß zu umfangreichen Arbeiten geben und auch dem Forscher weitgehende Befriedigung bieten können. Zur Prüftätigkeit gehören weiterhin die Untersuchungen der physikalischen

Eigenschaften von Werkstoffen, soweit diese sich zahlenmäßig wiedergeben lassen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Prüftätigkeit ist die Schaffung und Verkörperung von physikalischen Einheiten. Diese Forschungsarbeit, auf die nachher noch eingegangen wird, entspricht der historischen Aufgabenstellung der damaligen wissenschaftlichen Abteilung der Reichsanstalt und ist noch heute eine ihrer wesentlichsten Aufgaben.

Durch die Arbeiten aller Abteilungen zieht sich, wie bereits erwähnt, von Anfang an wie ein roter Faden die Aufgabe der Schaffung und Sicherung der Maßeinheiten in allen Zweigen der Physik. Dieser Teil der Tätigkeit der Reichsanstalt ist durch die gesetzlichen Vorschriften bedingt. Bekanntlich läßt sich jede physikalische Größe auf eine oder mehrere der drei Grundgrößen: Länge, Masse und Zeit zurückführen, welche die Grundlage des sogenannten absoluten Maßsystems bilden. Aus den Erfordernissen des öffentlichen Verkehrs heraus waren zur Beseitigung der Uneinheitlichkeit des Maß- und Gewichtswesens auf wirtschaftlichem Gebiet durch die Maß- und Gewichtsgesetzgebung vom Jahre 1868 (jetzt: Maß- und Gewichtsgesetz vom 13. Dezember 1935) als Einheit für die Länge das Meter und als Einheit für die Masse das Kilogramm festgesetzt. Das Meter ist festgelegt durch den Abstand zweier auf einem Stabe aus Platiniridium angebrachter Striche, der in der Reichsanstalt aufbewahrt wird. Dieser Meterstab ist durch Vergleichung mit dem im Bureau international des poids et mesures in Sèvres bei Paris befindlichen Urmeter an die internationale Längeneinheit angeschlossen (Genauigkeit: 2×10^{-4} mm auf 1 m). Da jedoch einerseits die Länge eines solchen Stabes nicht mit Sicherheit als zeitlich unveränderlich anzusehen ist, andererseits die Genauigkeit der Messung des Abstandes der auf dem Stabe angebrachten Striche den höchsten Ansprüchen an Genauigkeit nicht genügt, wird die Verwirklichung dieser Maßeinheit jetzt auf einem neuen Wege, der die Unveränderlichkeit des Wertes verbürgt und der eine wesentlich größere Maßgenauigkeit ermöglicht, erstrebt. Diese neue Darstellung des Meters, die durch die Länge eines Wellenzuges einer bestimmten Anzahl von Wellen einer optischen Spektrallinie von genügender Helligkeit und Schärfe definiert ist (Genauigkeit: 2×10^{-4} mm auf 1 m), besitzt außer den erwähnten Vorteilen noch den Vorzug, die deutsche von der internationalen Längeneinheit unabhängig zu machen, da sie stets mit aller wünschenswerten Genauigkeit wiedergegeben werden kann. Als Einheit der Masse gilt ein gleichfalls im Besitz der Reichsanstalt be-

findliches Kilogrammstück aus Platiniridium, dessen Gewicht mit dem des im Bureau international aufbewahrten Urkilogramms verglichen ist. Die Gefahr einer Änderung dieses Gewichtes wesentlich geringer ist als die der Längenänderung des Meterstabes, liegt hier keine Voraussetzung von nach einer anderen unabhängigen Darstellung des Kilogramms vor. Die dritte Einheit des absoluten Maßsystems, die Einheit der Zeit, ist bisher noch nicht gesetzlich festgelegt worden. Als solche wird allgemein die Sekunde, deren Wert bisher ausschließlich durch astronomische Messungen der Rotationsdauer der Erde ermittelt wurde. Die Sekunde ist der 86 400. Teil der Umlaufzeit der Erde. Bei dieser Definition wird vorausgesetzt, daß die Erde sich mit stets gleichbleibender Geschwindigkeit um ihre Achse dreht, was bisher mit Hilfe der Pendeltakzeit mit Sicherheit festgestellt werden konnte. Da die Physik allerdings in den mechanischen Schwingungen eines elektrisch erzeugten Quarzkristalls ein genaueres Mittel zur Kontrolle der Unveränderlichkeit der Sekunde besitzt, hat die Reichsanstalt auf diesem Wege Uhren (Quarzuhren) geschaffen, mit deren Hilfe eine Zeitmessung ermöglicht wird, die von der Rotation der Erde unabhängig ist (Genauigkeit eine Milliardstel Tageslänge = 1×10^{-4} Sekunden). In der Reichsanstalt werden jetzt tausend Messungen und Uhren Gebrauche durchgeführt.

Die elektrischen Größen: Widerstand, Stromstärke und Spannung lassen sich auf die Grundeinheiten der Länge, der Masse und der Zeit zurückführen. Da es jedoch zur Zeit der gesetzlichen Festlegung der elektrischen Einheiten nicht möglich war, die Werte der elektrischen Größen in den Grundeinheiten mit der erforderlichen Genauigkeit zu ermitteln, wurden durch das Gesetz über die elektrischen Einheiten vom Jahre 1898 empirische Einheiten vorgeschrieben, deren Werte so bemessen sind, daß sie den wahrscheinlichsten Werten in absoluten Maße möglichst nahe kommen. Als Einheit des elektrischen Widerstandes, des Ohm, wurde der Widerstand einer Quecksilbersäule von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt bei 0°C , als Einheit des Stromes, des Amperes, ein ununterbrochener Gleichstrom von solcher Stärke festgesetzt, daß er in einer Sekunde aus einer Lösung von Silbernitrat eine bestimmte Menge Silber elektrolytisch niederschlägt. Die Einheit der Spannung, das Volt, ist mit den beiden anderen Einheiten durch das Ohmsche Gesetz verknüpft und wird durch das Produkt von Ohm und Ampere definiert. Die internationalen Vereinbarungen über die elektrischen Einheiten entsprechen den Bestimmungen des deutschen Gesetzes. Infolge der großen Fortschritte, welche die

Meßtechnik im Laufe der Zeit gemacht hat, sollen die erwähnten empirischen Einheiten durch solche ersetzt werden, die auf dem absoluten Maßsystem beruhen, sobald diese sich mit der gleichen Genauigkeit darstellen lassen wie die empirischen Einheiten. Die hierfür erforderlichen umfangreichen Arbeiten und Untersuchungen sind in der Reichsanstalt durch den Krieg unterbrochen worden.

Die letzte der durch Reichsgesetz festgelegten physikalischen Größen ist die Temperaturskala. Als Ausgang hierfür diente das Ausdehnungsvolumen des Quecksilbers zwischen der Temperatur des schmelzenden Eises und der des siedenden Wassers unter normalem Druck, das in 100 gleiche Teile geteilt wurde, deren jedes einem Grade Celsius entspricht. Das seit langem sich steigernde Bedürfnis nach genauen Messungen im gesamten Temperaturgebiet von den tiefsten bis zu den höchsten Temperaturen löste eine umfangreiche wissenschaftliche Forschungsarbeit aus, die ihren Niederschlag in dem im Jahre 1924 erlassenen Reichsgesetz über die Temperaturskala und die Wärmeinheit fand. In diesem wurde die sogenannte thermodynamische Skala als Grundlage angenommen und ihre Verwirklichung der Reichsanstalt übertragen. Auf die infolgedessen von der Reichsanstalt erlassenen Bestimmungen kann hier nicht näher eingegangen werden. Erwähnt sei nur, daß für das Temperaturgebiet von -190 bis 660° die Änderung des elektrischen Widerstandes des reinen Platins, von 660 bis 1063° die Änderung der Thermokraft des Platin-Platinrhodium-Thermoelementes zur Temperaturmessung benutzt wird, während oberhalb 1063° Strahlungsmessungen zur Temperaturbestimmung dienen. Auch die Festsetzungen dieses Gesetzes haben nicht nur für Deutschland Gültigkeit, sondern befinden sich in Übereinstimmung mit den in anderen Ländern getroffenen Festsetzungen.

In der Röntgenheilkunde wird das in der Reichsanstalt ausgeathetete Meßverfahren zur Bestimmung der Strahlungsmenge international anerkannt, womit auch zugleich die Einführung des Namens „Röntgen“ für die Einheit der Strahlungsmenge verknüpft war. Durch Überwachungsverträge mit den namhaftesten Erzeugern von Röntgenröhren wird die Güte der deutschen Erzeugnisse gewährleistet, und darüber hinaus sind die Meßverfahren so weit vervollkommen, daß bereits auf ihnen fußende Unfallverhütungsvorschriften erlassen werden konnten. Überwachungsverträge bestehen auch noch auf anderen Gebieten, so z. B. für Kunst- und Preßstoffe.

Auf dem Gebiete der Optik handelte es sich in erster Linie um die Schaf-

fung und Verkörperung einer unveränderlichen Lichteinheit. Eine solche wurde seinerzeit durch die von v. Helfer-Altenroch konstruierte Amylacetatlampe gebildet, deren Brauchbarkeit durch langwierige Untersuchungen in der Reichsanstalt, die sich vor allem auf den Einfluß von äußeren Umständen, wie z. B. der Feuchtigkeit und des Druckes der umgebenden Atmosphäre erstreckten, erwiesen ist. Allerdings hat die Amylacetatlampe trotz ihrer vielseitigen Verwendbarkeit nur den Charakter eines konventionellen Maßes und kann deshalb den Naturmaßen wie der Lichtwellenlänge, den elektrischen Einheiten und der Temperatur nicht gleichwertig an die Seite gestellt werden. Es sind darum in der Reichsanstalt schon mit langem Versuche im Gange, auch für die Lichteinheit ein Naturmaß zu schaffen, eine Aufgabe, die sehr schwierig ist, aber in Zusammenarbeit mit den gleichartigen Staatseinrichtungen anderer Länder zu einem befriedigenden Abschluß gebracht worden ist. Als Lichteinheit wird künftighin die Leuchtdichte des schwarzen Körpers bei der Temperatur des erstarrenden Platins benutzt. Neben diesen Arbeiten, denen die moderne Physik u. a. die Ausbildung neuer photometrischer Methoden verdankt, ist die Polarimetrie weitgehend gefördert worden, welche für die exakte Bewertung der Grundstoffe für die Zuckerbereitung von außerordentlicher Wichtigkeit ist. Außer der Prüfung optischer Gläser und Linsen ist auf der Untersuchung von Scheinwellern und Rückstrahlern hingewirten, die gerade neuerdings für die Entwicklung des Kraftwagenverkehrs und durch die Reichskraftfahrbahnen große Bedeutung erlangt haben.

Teils in engem Zusammenhang mit den Untersuchungen über physikalische Einheiten, teils unabhängig von diesen ist im Laufe der Zeit in der Reichsanstalt eine sehr große Zahl von Problemen bearbeitet worden, deren Aufzählung allein schon den hier verfügbaren Rahmen weit überschreiten würde. Nur einige wenige dieser Probleme seien hier noch genannt: Zunächst die für die gesamte Feinmechanik wichtige Einführung einheitlicher Schraubengewinde wie überhaupt die auf dem Gebiete der industriellen Meßwesens liegenden Arbeiten (Lehren, Gewinde- und Zahnradmessung), die für den Austausch von besonders hochwertiger Arbeit ferner die Ausarbeitung von Methoden zur Messung großer und kleiner Drücke. Die Untersuchung der thermischen Eigenschaften (Ausdehnung, Wärmeleitung, spezifische Wärme, Sättigungsdampfe) wahllos überflüssiger, flüssiger und gasförmiger Stoffe hat die Reichsanstalt seit ihrer Gründung bis auf den heutigen Tag beschäftigt, entsprechend der die neben von Helmholtz gestellten Aufgabe, die von Regnault in großartigiger Weise be-

gonnenen und durchgeführten Messungen mit den modernsten Hilfsmitteln zu wiederholen und zu ergänzen. Der größte Teil aller dieser Arbeiten ist dem Wasser, dem Wärmeträger der Dampfmaschine, gewidmet, dessen Eigenschaften jetzt mit der zur Zeit überhaupt erreichbaren Genauigkeit erforscht sind. Auf dem Gebiete der Elektrizität sah sich die Reichsanstalt vor immer neue Aufgaben gestellt, die sie vielfach in engem Zusammenarbeiten mit Industrie und Technik lösen half; in dieser Hinsicht an das Studium der elektrischen Schwingungen erinnert. Hier steht die Entwicklung von Meßmethoden für Wellenlängen und Frequenzen elektrischer Schwingungen im Vordergrund. Durch Aufnahme dieser Arbeiten ist die absolute Genauigkeit der Frequenzmessung in damals ungeahntem Maße gesteigert worden, die einem Bedürfnis des Gleichwellenrundfunks entspricht. Hiermit in Zusammenhang stehen die Empfänger- und Röhrenuntersuchungen, Messungen an Quarzresonatoren und Quarzszillatoren u. a. Einen breiten Raum nehmen auch die Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften der Stoffe ein, die u. a. zur Darstellung der für den Transformatorenbau wichtigen siliziumhaltigen Eisenlegierungen geführt haben. Unter den Arbeiten der neueren Zeit nehmen auch die Forschungen über den Atomkern sowie die hiermit in Zusammenhang stehenden Untersuchungen in den tiefen und tiefsten Temperaturen (Supraleitung usw.) den ihr gebührenden breiten Raum ein. Spektralanalyse, Radioaktivität, Photochemie und andere Wissenszweige suchen hier gemeinsam die letzten Geheimnisse der Natur zu erschleiern. Die Wiederaufnahme der akustischen Forschung als wichtiges Arbeitsgebiet, nachdem diese viele Jahre im Hintergrund stand, knüpft an die Tradition der klassischen Physik aus der Gründerzeit der Reichsanstalt an.

Nicht unerwähnt soll zum Schluß die in letzter Zeit immer mehr um sich greifende Werkstoff-Forschung bleiben. Hier sind es einmal die magnetischen Werkstoffe, die auf Grund besonderer thermischer Behandlung hervorragende Eigenschaften erlangen, ferner die elektrotechnischen metallischen Werkstoffe, wie Kontaktwerkstoffe, Widerstandswerkstoffe, Leitungswerkstoffe, die vor allem im Laufe des letzten Jahrzehnts eine nicht unwesentliche Förderung durch die Reichsanstalt erhalten haben. Auch auf dem Gebiete der Schmierstoffe sucht die Reichsanstalt in einem besonderen Laboratorium die physikalischen Grundlagen des Schmiervorganges zu klären.

In derselben Weise wird die Physikalisch-Technische Reichsanstalt es auch

künftighin als ihre Hauptaufgabe neben, auf allen Gebieten der Physik an entscheidender Stelle an der Förderung der deutschen Wissenschaft und Technik mitzuarbeiten.

Die Veröffentlichungen der Reichsanstalt auf dem Gebiete der Forschung erscheinen in den „wissenschaftlichen Abhandlungen des Physikalisch-Technischen Reichsanstalt“, Verlag S. Hirzel, Leipzig, und die Vorträge und Anweisungen auf dem Gebiete des Licht- und Fernstudiums im „Amtsblatt der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt“, Verlag „Deutsches Reichsgesetzbuch für Industrie, Handel und Gewerbe“ in Berlin.

00010

Aufgaben und Tätigkeit der Physikalisch Technischen Reichsanstalt.

Short summary on the Institute. Their tasks, experiments and results
in various fields. By Dr. Alfred Schulse.

33

00011

LUBRICANTS:

00012

N. Vitzweg

Vertrauliche Mitteilung № 1

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

Aufgaben und Probleme der Schmierforschung
vom Standpunkt der praktischen Schmierertechnik aus gesehen.

Von Prof. Dr.-Ing. E. H e i d e b r o e k VDI
Technische Hochschule Dresden

Vorgelegt in der Sitzung
der Arbeitsgruppe "Schmierertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 17. Dezember 1938 in Berlin

Vertrauliche Mitteilung Nr. 1
für die Mitglieder der Arbeitsgruppe "Schmierertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI

Zu beachten: Eine Veröffentlichung auch, von Auszügen
oder Teilen des Berichtes sowie Weiterleitung an Persön-
lichkeiten außerhalb des Dienstbereiches des Empfängers
bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des Fachauss-
schusses für Maschinenelemente des VDI.

Fl.

In der Technik der Schmierung gleitender und wälzender Flächen liegt eine Reihe dringlicher Aufgaben vor, die bedingt sind durch

- 1) erhöhte Beanspruchung an die Tragfähigkeit und Geschwindigkeit
- 2) die Verwendung devisionsparender Werkstoffe für die Lagerschalen, usw.
- 3) das Aufkommen neuartiger Schmierstoffe (synthetische Öle, Emulsionen usw.)

Sie erstrecken sich auf alle Arten von geschmierten Gleit- und Wälzflächen, d.h. also Gleitlager, Wälzlager, Zahnflanken, Reibräder usw.. Ihre Lösung erfordert Arbeiten auf verschiedenen Gebieten der wissenschaftlichen Forschung, von denen die wichtigsten nachstehend aufgeführt sind:

I. Hydrodynamische Untersuchungen.

Für normale Belastungen ($p \leq 100 \text{ kg/cm}^2$, $v \leq 30 \text{ m/sec}$) gibt die hydrodynamische Lagertheorie genügend zuverlässige Unterlagen für den Konstrukteur. Unerforscht sind bisher die Grenzgebiete engster Lagerspalte, die auftreten können:

- a) bei geringen Geschwindigkeiten, hoher Last (Grenzreibung)
- b) bei hohen Geschwindigkeiten und gleichzeitig hoher Belastung, d.h. Öldrücken $p \approx 500 \text{ at}$.

Die hydrodynamische Berechnung ergibt für diese Fälle z.B. bei üblichen Gleitlagern engste Spaltweiten von $h \approx 1$ bis 2μ .

Aufg. 1) Bis zu welchen Spaltweiten herab gelten die Ansätze der Theorie (Newton'scher Ansatz $\tau = \eta \frac{dv}{dy}$).

Aufg. 2) Wie wird dieser Ansatz durch die Abhängigkeit der Zähigkeit vom Druck beeinflusst?

EASTMAN KODAK

Aufg. 3) Welche Grenze der Ölviskosität ist anzunehmen, ohne daß sie von der rechnermäßigen Rand Schubspannung $\tau = 2 \frac{dv}{dy}$ bei sehr großem Schergefälle überschritten wird? Gibt es eine unendlich große Haftfähigkeit?

Aufg. 4) Welche thermodynamischen Vorgänge spielen sich im Ölfilm ab? Welcher Zusammenhang besteht zwischen Schubspannung und Wärmeentwicklung? (siehe III)

Aufg. 5) Bilden sich hinter dem engsten Spalt in dem durch Versuche festgestellten Unterdruckgebiet Gas-Ausscheidungen (Kavitation) und beeinflussen diese die Tragfähigkeit?

Aufg. 6) Welcher Eintrittsdruck des Schmierstoffs ist notwendig, um die richtige Füllung des Lagerspaltes nach der theoretisch erforderlichen Ölmenge zu gewährleisten?

Aufg. 7) Welche Wirkungen treten ein, wenn nicht die für volle Flüssigkeitsreibung erforderliche Ölmenge zugeführt wird? (Mangelschmierung!)

Aufg. 8) Welchen Einfluß hat die Lagerbreite auf die Druckentwicklung bzw. Ölmenge? (Zweidimensionale Strömungsberechnung).

Aufg. 9) Welches ist das günstigste Verhältnis von Lagerdurchmesser zu Lagerbreite, um bei gegebenen Temperaturgrenzen ein Maximum an Tragfähigkeit zu erreichen?

Aufg. 10) Ergibt sich aus der Temperaturzunahme nach der Zeit $\frac{dT}{dt}$ eine Notwendigkeit der Begrenzung der Längenausdehnung des Ölfilms (Begrenzte Laufsplegel, Michell-Lager)?

Aufg. 11) Welches sind die Gesetze der Drucksteigerung bei ausgesprochener Mangelschmierung und gleichzeitig engsten Spalten (Eisenbahn-Lager)?

Aufg. 12) Welche Formgebung der Lagerschalen ist für eine günstige Wärmeströmung und Temperatur-Ausgleich die günstigste? (Dicke Wandstärken oder dünne Wandstärken mit äußerer Kühlung bei genügender Formsteifigkeit der Lager?)

Aufg. 13) Wie überlagern sich bei Wälzlagern Gleit- und Wälzgeschwindigkeiten aus hydrodynamischen Gründen bei käfiggeführten Kugeln bzw. Rollen und bis zu welchen Belastungen ist diese gegenseitige Beeinflussung gültig?

Aufg. 14) Inwieweit verändern die unter dem Einfluß der Hertzischen Spannungen auftretenden Formänderungen der Oberfläche bei Wälzlagern die Bildung des Druckfilms gegenüber der ideellen Zylinderform? (Spaltweite 0 bei $p = \infty$).

II. Lagerschalen - Werkstoffe bzw. Paarung der Werkstoffe.

Von den Eigenschaften der Werkstoffe, die hier in Frage kommen, sind folgende besonders wichtig:

- a) die Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärme
- b) der Elastizitäts-Modul
- c) die "Schmiegeunfähigkeit", d.h. die auf der Grenze zwischen Elastizität und Plastizität liegende Eigenschaft der Anpassung mikrogeometrischer Unebenheiten an die auftretenden Belastungen (Laufspiegelbildung)
- d) Zerreißfestigkeit, d.h. Festigkeit gegen Belastung durch hohe innere Öldrücke (z.B. bei textilgefüllten Kunstharz-Preßstoffen)
- e) Oberflächenstruktur, insbesondere die Möglichkeit der Herstellung einer optisch glatten Oberfläche
- f) Oberflächen-Festigkeit gegenüber der auftretenden maximalen Randschubspannung
- g) Wärmebeständigkeit, d.h. Grenze der Erweichung

Die Fragen, die hier einer Klärung bedürfen, sind

u.a. folgende:

- Aufg. 1) Genaue Meßverfahren für den Rauheitszustand der Oberfläche und deren Abbildung bei Unebenheiten von 2μ und darunter (möglichst innerhalb unzerstörter Buchsen) durch Lichtschnittverfahren, Reflexions-Messung, Tastverfahren,
- 2) Mittel zur fabrikmäßigen Herstellung einer denkbar glatten Oberfläche.
 - 3) Möglichkeit einer sog. Beilby-Schicht und deren Beständigkeit.
 - 4) Ist eine möglichst amorphe oder diffuse oder kristalline Oberfläche für die Haftung der Ölmoleküle am günstigsten?
 - 5) Ist die Haftwirkung bzw. Adsorptionsfähigkeit am stärksten bei einem Minimum der wirklichen mikrogeometrischen Oberflächen-Größe oder bei einer durch Bildung unendlich vieler kleinster Kristallgebilde vergrößerten Oberfläche?
 - 6) Welche Meßverfahren sind zur Prüfung der Schmiegeunfähigkeit geeignet (Brinell-Probe, Vickers-Methode oder noch andere)?
 - 7) Wie kann man die sog. "Oberflächenfestigkeit" bestimmen? (Oberflächenzermürbung unabhängig von den Hertz'schen Pressungen.)
 - 8) Desgl. die Festigkeit der Oberfläche gegen Rand-Schubspannungen?
 - 9) Messung der wirklich auftretenden Temperaturen bei engsten Spalten und Kontakt - Berührung an kleinsten Berührungsflehen.
 - 10) Worin beruht physikalisch die bekannte Tatsache, daß beim Wälzen oder Gleiten geschmierter Flächen unter hoher spez. Belastung meistens nur zwei Werkstoffe verschiedener Härte gut miteinander laufen?
 - 11) Hat die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe auf die Größe der freien Oberflächen-Valenzen einen nennenswer-

ten Einfluß bei der Paarung der Werkstoffe mit den Schmierstoffen oder überwiegt der Einfluß der Oberflächen-Struktur?

- 12) Gibt es unter den neuerdings immer zahlreicher auftretenden Metall-Legierungen Zinn - Zink - Blei - Antimon - Aluminium - Magnesium - Kadmium - Silber - Kupfer etc. oder deren Grundmetallen eine Art von molekular-elektrischer Spannungsreihe, nach der sich ihre Benetzungsfähigkeit ordnen läßt?
- 13) Hat insbesondere die chemische Struktur der bisher gebräuchlichen Kunstharze (gepreßt oder füllstofffrei) besondere Eigenschaften hinsichtlich ihrer Affinität zu den Kohlenwasserstoffgruppen der Schmieröle (Porosität, Quellfähigkeit usw.) gegenüber Metallen?
- 14) Ist eine möglichst dichte Oberfläche oder eine mehr zerklüftete bei den Lagermetallen günstiger und wie verhalten sich die verschiedenen Legierungen in dieser Hinsicht?
- 15) Wie steht es mit der Empfindlichkeit gegen Reiboxydation (Sauerstoff-Angriff) der verschiedenen Metalle?
- 16) Worauf beruht und inwieweit wirksam kann eine chemische Vorbehandlung der fertig bearbeiteten Oberflächen hinsichtlich der Schmierwirkung sein? (Auskochen in heißen Lösungen, Ölen etc. bestimmter Art).

III. Eigenschaften der Schmierstoffe.

Auf die eigentliche Ölchemie soll hier nicht näher eingegangen werden. Den Schmierungstechniker interessieren aber dringend folgende Fragen:

- 1) Die Abhängigkeit der Zähigkeit von Druck und Temperatur bzw. der innere Zusammenhang dieser beiden Funktionen und die Möglichkeit ihrer Beeinflussung.
- 2) Bei der reinen Flüssigkeitsreibung "trägt" der Ölfilm den Zapfen etc. durch die in ihm auf Grund der Schmelzung

entstehenden hydraulischen Drucksteigerungen. Diese sind nach dem Ansatz von Newton bedingt durch τ , da τ bei gegebenem Schergefälle $\frac{dv}{dy}$ proportional ist. Für eine ausreichende Tragfähigkeit ist also ein großes τ günstig; für die Reibungsarbeit und daher Wärme-Entwicklung aber ungünstig. Der Energie-Verbrauch spielt an sich eine sekundäre Rolle; wichtiger ist der Temperatur-Anstieg bzw. seine obere Grenze (Verdampfung).

Über den physikalischen Zusammenhang zwischen inneren Schubspannungen und Wärme-Entwicklung besteht noch keine Klarheit bei den Ingenieuren. Ist es richtig, daß die meßbare, im Metall bzw. Öl abgeführte Gesamtwärme der in den treibenden Teil (Welle) eingeleiteten Energiemenge genau äquivalent ist (fühlbare Wärme) oder wird ein Teil der Energie zur Änderung des Aggregatzustandes des Schmierstoffs verbraucht? (latente Wärme infolge Änderung der Zähigkeit).

- 3) Gibt es Möglichkeiten, die Veränderlichkeit der Zähigkeit in den üblichen Temperatur-Grenzen zwischen 40 - 100° zu beschränken?
- 4) Da das Öl der hauptsächlichste Wärmeträger ist, ist eine möglichst hohe spezifische Wärme des Schmierstoffs erwünscht, um möglichst viel Wärme mit der Einheit des Schmierstoffs abführen zu können. Läßt sich die spez. Wärme beeinflussen und wie hängt sie mit der Zähigkeit zusammen?
- 5) In sehr engen Spalten treten rechnergemäß sehr hohe Drücke auf ($p = 1000 \div 5000 \text{ at}$). Gilt für diese engen Spalten von 1μ und darunter noch der Newtonsche Ansatz oder gibt es dafür einen anderen? (Mit Rücksicht auf den Druck etc.)
- 6) Von welcher Größenordnung der Spalte ab hört die mechanische Wirkung des Ölfilms (Druckströmung) auf und beginnt der Verschleiß? Gibt es eine Möglichkeit, den Beginn dieses Zustandes zu messen?

- 7) Hat man sich den "Zusammenbruch" des Ölfilms (nach ausländischer Ausdrucksweise) als einen mechanischen Vorgang (Wegquetschen) oder richtiger als einen chemischen vorzustellen? Wenn letzteres, dann dürften die üblichen Ölprüfmethoden über die "Haftfähigkeit" und ähnliche Eigenschaften der Schmierstoffe falsche Aussagen liefern. Sind überhaupt schon zuverlässige Methoden über die Messung der Haftkräfte (Adsorptionskräfte) bekannt, wenn man die zwischen geschmierten Flächen unter Belastung herrschenden Zustände mit berücksichtigt?
- 8) Viele neuere Erfahrungen zeigen, daß der stärkste Verschleiß (Kontakt-Wirkung) gerade bei sehr kleiner Relativgeschwindigkeit der gleitenden geschmierten Flächen (nicht bei großer), und zwar auch bei geringen spezifischen Belastungen auftritt (Teilkreis-Pittings am Zahnrad, Kolben-Endstellungen), u.U. sogar bei Geschwindigkeiten, die annähernd gleich Null sind. Läßt diese Erscheinung nicht in erster Linie auf einen zeitabhängigen chemischen Angriff anstatt eines "mechanischen" schließen? Oder ist hier die Zeitabhängigkeit der Ausrichtung der Ölmoleküle die Ursache?
- 9) Auch bei zulässigen Belastungen kann die Tragfähigkeit der haftenden Molekül-Ketten (aktive Gruppen) nicht von unendlicher Dauer sein. Hat man sich ihre "Ermüdung" als einen Zerfall der Ketten (unter chemischer Umsetzung) vorzustellen und wie erfolgt ihre Regenerierung, d.h. Ersatz durch unverbrauchte? Wovon ist die Intensität dieses Vorganges abhängig? Sie ist, abgesehen von sonstigen Alterungseinflüssen, von großer Bedeutung für die erforderliche Schmierstoff-Menge. Spielt nicht auch hierbei die Temperatur (bezw. Kühlung) der kleinsten örtlichen Berührungstellen die ausschlaggebende Rolle oder etwa die Affinität der zusammenwirkenden Metalle?

oooooooooooooooo

4
Nr. 1 z. J. nicht vorhanden. 0 21

0 ~~21~~

Vertrauliche Mitteilung No 2

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

Erk

Temperatur u. Druckverteilung in Schmierfilm

Temperatur- und Druckverteilung im Schmierfilm und
ihre Bedeutung für die Erforschung der Schmierung.

Von Dr.-Ing. S. E r k VDI

Physikalisch-Technische Reichsanstalt Berlin.

Vorgetragen in der Sitzung
der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 11. April 1938 in Berlin

Vertrauliche Mitteilung Nr. 2
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 Empfän-
gers bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des
Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

- Pl. Begriff der Schmierfähigkeit - Fragestellung -
 Temperatur des Schmierfilmes - Druck im Schmier-
 film - Einfluß von Druck und Temperatur auf die
 Zähigkeit von Schmiermitteln - Verfestigungsdruck -
 Einfluß der Veränderlichkeit der Zähigkeit auf die
 Tragfähigkeit eines Lagers - Zusammenfassung.

I. Begriff der Schmierfähigkeit

Fragestellung

Im Schrifttum über Schmiermittelforschung spielt eine sehr große Rolle das Wort "Schmierfähigkeit" oder "Schmierwert" als Verdutschung des angelsächsischen Wortes "oiliness". Dieser Begriff umfaßt praktisch die geheimnisvolle Eigenschaft oder Summe aller Eigenschaften eines Schmiermittels, die man heute gesetzmäßig noch nicht erklären kann. Dem Grund dieser Eigenschaften sucht man im allgemeinen in der statischen Ordnung von Molekülen des Schmiermittels in einer Adsorptionsschicht durch Grenzflächenkräfte; man hat aber auch eine dynamische Ausrichtung (Strömungsorientierung ¹⁾) zur Erklärung herangezogen.

Es ist eine bekannte Erscheinung aus der Geschichte der Naturwissenschaften, daß man in einem gewissen Zustand der Erforschung eines Vorganges alle noch nicht gesetzmäßig erfassbaren Vorkommnisse in einen Stoffwert zusammenfaßt. Es sei in diesem Zusammenhange nur an die Rolle der "äußeren Wärmeleitfähigkeit" bei der Wärmeübertragung erinnert. Solange man diese Größe als Stoff-

- 2 -

1) S. Kyropoulos, Forsch. a.d. Geb. d. Ing.Wes. Bd. 3
 (1932) S.287

wert betrachtete, kam die Forschung nicht wesentlich
 voran. Erst als man im Verlauf der letzten Jahrzehnte
 daran ging, den Wärmeübergang als ein verwickeltes Ge-
 sammenwirken von hydrodynamischen und thermischen Vor-
 gängen zu betrachten, konnte die Forschung zu einem
 wirklichen Verständnis des Wärmeüberganges gelangen und
 auch praktisch große Fortschritte erzielen.

Ein ähnlicher Zustand scheint sich auch bei
 der Schmiermittelforschung vorzubereiten. Verschiedene
 Arbeiten der letzten Zeit, auf die wir später noch näher
 eingehen werden, zeigen, daß man zwar nicht alle, wohl
 aber einen Teil der Geheimnisse der Schmierfähigkeit wird
 aufklären können, wenn man verschiedene vereinfachende
 Annahmen der Theorie der Lagerreibung genauer auf ihre
 Zulässigkeit prüft und durch bessere Annäherungen an die
 Wirklichkeit ersetzt. In erster Linie gehört hierher die
 Untersuchung der für den Schmiervorgang wichtigsten
 physikalischen Eigenschaft des Schmiermittels, nämlich
 seiner Zähigkeit.

In die theoretischen Berechnungen der Lager-
 reibung wird die Zähigkeit des Schmiermittels als eine
 Konstante eingesetzt, und zwar für eine meist mehr oder
 weniger willkürlich angenommene "mittlere Temperatur
 des Schmierfilmes". Diese Temperatur wird irgendwie auf
 Temperaturmessungen in dem zu- oder abfließenden Öl oder
 in der Lagerhöhle aufgebaut. Der Einfluß des Druckes
 auf die Zähigkeit wird durchweg vernachlässigt. Die

erste Frage, die wir uns vorlegen müssen, ist also die:
"Was wissen wir über die wirkliche Temperatur und den
wirklichen Druck im Schmierfilm?" Die zweite Frage
lautet: "Was wissen wir über die Abhängigkeit der Zähig-
keit der Schmiermittel von Druck und Temperatur?" Bei
der Behandlung dieser beiden Fragen müssen wir zwischen
Gleitlagern, Wälzlagern, Getrieben und spanabhebender
Formgebung, sowie bei den Schmiermitteln zwischen
Schmierölen und Schmierfetten unterscheiden.

II. Temperatur des Schmierfilmes.

Die zuverlässigsten Temperaturmessungen
in Gleitlagern sind wohl von Nücker ¹⁾ ausgeführt wor-
den. Er führte die Thermolemente in einer Wärmeschutz-
hülse durch die Lagerschale hindurch und legte auch
noch die verschweißten Drahtenden in einer Schleife
an der Lauffläche entlang, um eine Wärmeableitung
durch die Thermolementdrähte möglichst zu verhindern.
Die mit diesen Thermolementen bestimmten Temperaturen
lagen bis zu 30° über der Schalentemperatur. Daraus
geht schon hervor, daß Messungen der Temperatur der
Lagerschale, wie sie häufig durchgeführt werden, nicht
ausreichen. ²⁾ Die höchsten Temperaturen, die Nücker

1) W. Nücker Forsch. Arb. a.d. Geb. d. Ingenieurwes.
Nr. 352; Berlin 1932.

2) So hat z.B. auch Kyropoulos (a.S.O.) bestimmt eine
zu niedrige Temperatur für den Ölfilm eingesetzt.
Der dadurch verursachte Fehler wirkt sich in der
gleichen Richtung aus, wie der von Kyropoulos ge-
suchte Effekt.

auf diese Weise erhielt, lagen bis zu 45° über der Zuflußtemperatur des Schmieröles (Abb.1). Die betreffende Versuchsgruppe ist durch folgende Angaben gekennzeichnet: vollzylindrisches Lager, Durchmesser $D = 220$ mm, Breite $B = 300$ mm, Lagerpiel $0,135$ mm, spezifische Lagerlast $k=P/B \cdot D=10,6$ kg/cm², Temperatur und Druck des zufließenden Schmieröles 46° bzw. $1,0$ kg/cm² Überdruck, Umfangsgeschwindigkeit der Welle $25,4$ m/s, entsprechend einer Umdrehungszahl von 2200 je Minute. Es handelt sich also um ein schnell laufendes leicht belastetes Lager mit verhältnismäßig großem Spiel.

Temperaturmessungen in Wälslagern, die auch nur angenähert die richtige Temperatur des Schmierfilmes erfassen, sind meines Wissens noch nicht durchgeführt worden.

Die Oberflächentemperatur von Zahnrädern unter hohem Druck hat H. Blok ¹⁾ gemessen, indem er um zwei feststehende Zahnräder aus Stahl A zwei aus einem Stück gearbeitete Zahnräder aus einem anderen Stahl B kreisen ließ und dieses Getriebe als Thermoelement verwendete.

Bei den Versuchen, bei denen die Temperatur des Öles im Behälter konstant auf 65° gehalten wurde,

1) H. Blok General Discussion on Lubrication and Lubricants London 1937.

wurde die Last stufenweise bis auf $p_g = 310 \text{ kg/cm}$ (Gesamtlast dividiert durch die Breite der Zahnräder) gesteigert. Dabei ergab sich ein linearer Zusammenhang zwischen $(p_g)^{3/4}$ und der mittleren Übertemperatur gegenüber der Temperatur im Ölbehälter, die mit einem Millivoltmeter gemessen wurde. Der Höchstwert der Übertemperatur bei einer Belastung von 310 kg/cm betrug etwa 75° . Auf Grund des im theoretischen Teil der Arbeit aus der Zahndrehreibung berechneten zeitlichen Verlaufes der Temperatur schätzte der Verf. den Scheitelwert der Temperatur auf etwa 250° . Dieser Wert kann aber nur für einen außerordentlich kurzen Zeitraum gelten, da die gesamte Eingriffszeit für einen Zahn nur rund $0,0014 \text{ sec}$ beträgt, und während dieser Zeit sich ja die ganze Fläche des Zahnes auf dem Gegenrad abwälzt.

Bei der spanabhebenden Formgebung wurden Temperaturen bis zu 800° beobachtet. Da über die Rolle des Schmiermittels beim Schneidvorgang aber überhaupt noch keine Klarheit besteht, soll dieser Gegenstand hier nicht weiter behandelt werden.

III. Druck im Schmierfilm.

Für Druckmessungen in Gleitlagern beziehen wir uns wieder auf die bereits erwähnte Arbeit von Mücker. Die höchsten Lagerdrücke wurden bei einem halbumschließenden Lager, im übrigen aber den gleichen Versuchsbedingungen beobachtet, die bei der Temperaturmessung erwähnt wurden.

Der Druckanstieg beschränkt sich, wie Abb. 2 zeigt, auf einen kleinen Teil des Lagerumfangs und erreichte in seinem scharf ausgeprägten Scheitel einen Wert von etwa 33 kg/cm². Der Scheitelpunkt lag in der Drehrichtung etwas hinter der Lastebene.

In Wälzlagern, Getrieben und beim Zerspanen gelang es bisher noch nicht, den Flüssigkeitsdruck im Schmiermittel zu messen. Eine Schätzung des Flüssigkeitsdruckes auf Grund der Messungen der gesamten Lager- bzw. Zahnbelastung ist außerordentlich schwierig, weil jede Unterlage darüber fehlt, in welcher Weise der Druckanstieg vor und der Druckabfall hinter dem engsten Querschnitt vor sich geht. Der Flüssigkeitsdruck im Schmiermittel hängt auch von der Dreh- bzw. Wälzgeschwindigkeit der laufenden Flächen ab. So treten bei den erwähnten Versuchen von Nücker (Abb.2) bei einer gleichbleibenden Lagerbelastung $k = 10,6 \text{ kg/cm}^2$ Höchstwerte des Schmiermitteldruckes zwischen 22 und 33 kg/cm² auf.

Die Flüssigkeitsdrücke können aber sicherlich sehr hohe Beträge erreichen. Dies beweist schon die Tatsache, daß Schering und Vieweg ¹⁾ auch bei der nicht unbeträchtlichen Belastung von 185 kg in einem zweireihigen Querlager (40 mm Bohrung, DIN 623) noch Vollschmierung

1) H. Schering u. R. Vieweg, ZS. f. angew. Chemie Bd.39 (1926) S. 1119 u. 1601.

(also reine Flüssigkeitsreibung!) feststellen konnten. Man wird wohl Blok¹⁾ beipflichten dürfen, wenn er die spezifischen Drücke bei seinen Versuchen auf über 10 000 kg/cm² schätzte²⁾.

IV. Einfluß von Druck und Temperatur auf die Zähigkeit von Schmiermitteln.

Über die Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit bei Atmosphärendruck liegt ein so umfangreiches Schrifttum vor, daß wir uns hier auf die gleichzeitige Abhängigkeit der Zähigkeit von Druck und Temperatur beschränken können.

In Deutschland hat Kießkalt³⁾ umfangreiche Untersuchungen an 12 mineralischen, tierischen und pflanzlichen Ölen bei Temperaturen von 20 bis 80° und Drücken von 1 bis 800 kg/cm² durchgeführt. Als Beispiel ist in Abb. 3 die relative Zähigkeit γ/γ_0 (wobei γ_0 die Zähigkeit bei 1 kg/cm² und γ die Zähigkeit bei gleicher Temperatur und dem Versuchsdruck) ist, für ein Mineralöl mit steiler Temperaturkurve (Gargoyle Mobilöl A) und für ein Öl mit flacher Temperaturkurve (Vollgleitöl II) wiedergegeben. In den verwendeten einseitig logarithmischen Koordinatensystem sind die

1) H. Blok a.a.O.

2) Die Folgerung Bloks, daß diese hohen spezifischen Drücke eine metallische Berührung der Zahnräder gewährleisten, ist dagegen nicht zwingend. Auch das Auftreten von Thermokräften an den Berührungsstellen schließt das Vorhandensein eines äußerst dünnen Schmierfilmes nicht aus.

3) S. Kießkalt Forsch.Arb. a.d.Geb. d. Ingenieurwes. Nr.291 Berlin 1927.

Kurven gleicher Temperatur Gerade, die Druckabhängigkeit läßt sich also durch ein einfaches Potenzgesetz darstellen. Das Öl mit der stärkeren Temperaturabhängigkeit zeigt auch eine stärkere Druckabhängigkeit der Zähigkeit.

Die in den Abb. 4 bis 6 dargestellten Ergebnisse der Untersuchung von Dow¹⁾ zeigen jedoch, daß bei Erfassung eines größeren Druckbereiches das einfache Potenzgesetz nicht mehr gilt. Die drei von Dow untersuchten Öle waren auf der Grundlage von Rohölen aus Pennsylvania, Oklahoma und Kalifornien durch Verschnitt mit Bright - stock - und Neutralölen so abgestimmt, daß sie bei 55° die gleiche Zähigkeit besaßen (Abb.7). Bei der gleichen Temperatur bewirkt aber eine Drucksteigerung auf 2 000 kg/cm² eine Erhöhung der Zähigkeit auf das 32-fache bei dem Pennsylvaniaöl, auf das 55-fache bei dem Oklahoma-Öl, auf das 150-fache bei dem Kalifornia-Öl. Der auffallend starke Druckeinfluß beim Kalifornia-Öl, das wohl unter den Versuchsölen die größte Zahl von Kohlenwasserstoffringen im Molekül besitzt, bestätigt die allgemeine Gesetzmäßigkeit, daß die Druckempfindlichkeit der Zähigkeit um so größer ist, je verwickelter der Bau des Moleküls ist. Die Unregelmäßigkeiten in dem Verlauf der Kurven unterhalb 1 000 kg/cm² sind möglicherweise auf Meßfehler zurückzuführen; es ist aber auch möglich, daß gerade die unein-

1) R.B. Dow, Journ. appl. Phys. Bd. 8 (1937) S. 367.

MAN N V M

heitliche Zusammensetzung der Öle sich in diesen Buckeln und Überschneidungen der einzelnen Kurven auswirkt.

Suge¹⁾ untersuchte außer der Druckabhängigkeit der Zähigkeit auch die Kompressibilität und die Wärmeleitfähigkeit (letztere allerdings nur bei Atmosphärendruck). Er fand allgemein bei den Mineralölen eine stärkere Druckabhängigkeit der Zähigkeit als bei den pflanzlichen und tierischen Ölen. Auch die Zusammendrückbarkeit ist bei den Mineralölen um etwa 10 % größer, während die Wärmeleitfähigkeit etwa um 15 % kleiner ist als die der fetten Öle. Um einen genaueren Einblick in die Bedeutung dieser Stoffwerte für die Lagerreibung zu gewinnen, müßte man natürlich auch ihre Druckabhängigkeit kennen.

Abb. 8 - 10 zeigen die Versuchsergebnisse für Rizinusöl nach der Zusammenstellung von Hersey und Hopkins²⁾. In Abb. 10 sind die Meßpunkte verschiedener Beobachter eingetragen, um einen Anhalt über die erreichte Meßgenauigkeit zu geben.

V. Verfestigungsdruck.

In dem Schrifttum über Hochdruckuntersuchungen begegnet man dem Ausdruck "Verfestigungsdruck". Gemeint ist damit derjenige Druck, bei dem in der verwendeten Versuchs-

1) v. Suge General Discussion on Lubrication and Lubricants, London 1937.

2) M.D. Hersey u. R.F. Hopkins, Journ. appl. phys. Bd. 8 (1937) S. 560.

einrichtung das Öl sich nicht mehr wie eine Flüssigkeit verhält, also auch nicht mehr die Bestimmung der Zähigkeit gestattet. Wie sehr verschiedenartig sich in dieser Beziehung die verschiedenen Öle verhalten, geht besonders deutlich aus den in Abb. 11 dargestellten Versuchsergebnissen von Hyde ¹⁾ hervor. Während bei einem Druck von 1000 kg/cm² drei von den untersuchten Ölen noch durchaus linearen Anstieg der Zähigkeit zeigen, lassen die beiden Mobilöle A und BB ein unvermitteltes Abbiegen der Kurven nach oben erkennen, das auch bald bei geringer Drucksteigerung der Möglichkeit der Zähigkeitsmessung eine Grenze setzt. Die verhältnismäßig niedrigen "Verfestigungsdrücke" sind dadurch bedingt, daß die verwendeten Versuchseinrichtungen (rollende oder fallende Kugel oder Kapillare mit kleinem Druckgefälle) nicht die Anwendung größerer Schubspannungen erlaubten. Der Verfestigungsdruck ist der statische Druck, bei dem unter gegebenen Versuchsbedingungen (Schubspannung, Temperatur) das Öl nicht mehr fließt, bei dem die "Fließgrenze" erreicht ist. Das Öl zeigt nicht mehr flüssiges, sondern plastisches Verhalten. Daß der Verfestigungsdruck mit wachsender Temperatur ansteigt, ist leicht verständlich.

1) J.H. Hyde Proc. Roy. Soc. London (A)
Ed. 97 (1920) S. 240

Nun hängt aber das Verhalten eines Stoffes auch sehr stark von der Zeitfunktion der Beanspruchung ab. Ein typisches Beispiel dafür sind Stoffe wie Pech oder Asphalt, die sich gegen Schlagbeanspruchung bei Zimmertemperatur durchaus spröde verhalten, dagegen etwa aus einem umgeworfenen Faß im Laufe eines Tages wie eine Flüssigkeit von selbst herausfließen. Die Beanspruchung von Schmiermitteln in einem schnell laufenden Lager, vor allem aber in einem Getriebe, ist durchaus eine "schlagartige". Daher ist es auch wohl möglich, daß man das Schmiermittel unter diesen Umständen bei hohem Druck nicht mehr als eine Flüssigkeit, sondern als einen plastisch - festen Körper auffassen muß. Diese Überlegung könnte vielleicht einen neuen Weg zur Aufklärung von Schäden an schnell laufenden, großen Getrieben zeigen.

VI. Kompressionswärme.

Die üblichen Lagerreibungstheorien berücksichtigen als Wärmequelle nur die innere Reibung des Schmiermittels. Man muß sich aber doch einmal überlegen, ob nicht auch die durch Kompression im Schmiermittel entstehende Wärme eine Rolle spielen kann. Für eine überschlägige Abschätzung dieses Einflusses wollen wir folgende Stoffwerte als druck- und temperaturunabhängig einsetzen:

$$\text{Kompressibilitätskoeffizient } \beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{V_0 - V}{p - p_0} = 50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{kg}}$$

$$\text{Spezifische Wärme } c = 0,4 \frac{\text{cal}}{\text{Grad} \cdot \text{g}}$$

$$\text{Dichte } \rho = 1,0 \text{ g/cm}^3.$$

Damit erhalten wir für die Temperatursteigerung durch Kompressionsarbeit unter der Annahme adiabatischer Erwärmung (in Anbetracht des äußerst raschen Ablaufes des Vorganges) den Ausdruck

$$\Delta T = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{v_0}{v} (p - p_0)^2 = 3,3 \cdot (p - p_0)^2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Bis zu Drücken von 1 000 kg/cm² bleibt die Kompressionswärme also vernachlässigbar klein. Bei 10 000 kg/cm² könnte sie aber doch bereits Übertemperaturen in der Größenordnung von einigen hundert Grad ergeben. Wegen der sehr geringen Dicke des Ölfilmes ist jedoch die - dem Ölvolumen verhältnismäÙig - je Flächeneinheit des Ölfilmes erzeugte Wärmemenge so gering, daß sie die Temperatur des Öles und der Wandungen nicht nennenswert zu beeinflussen vermag, vielmehr ohne Verzögerung von der Wand aufgenommen und hinter dem engsten Querschnitt wieder an das entspannte Öl abgegeben wird.

Wenn man bedenkt, daß die Reibungswärme nach Blok (S.4) einige hundert Grad betragen kann, dann ist es wohl möglich, daß durch Zusammenwirken der schlagartigen Drucksteigerung mit einer Verdampfung infolge der Temperaturerhöhung und mit der "Verfestigung" des Schmiermittels Verhältnisse entstehen, denen die heute üblichen Anschauungen durchaus noch nicht gerecht werden. Man wird aber nicht zum Ziel kommen, wenn man etwa versucht, die voneinander abhängigen und sich gegenseitig steigernden Einflüsse der oben geschilderten

Vorgänge durch einen Begriff wie "oiliness" oder "Schmierfähigkeit" zu erfassen. Man muß vielmehr versuchen, erst einmal die wirklichen Temperaturen und Drücke zu messen, die an den wichtigen Stellen und in maßgebenden Augenblick vorhanden sind.

VII. Einfluß der Veränderlichkeit der Zähigkeit
auf die Tragfähigkeit eines Lagers.

Bradford und Vandegrift ¹⁾ haben gezeigt, wie sich die Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Zähigkeit auf die Druckverteilung in einem Lager auswirkt. Für einen ebenen Schmierkeil haben sie die Änderung der Zähigkeit und daraus mit Hilfe der Versuchsergebnisse von Dow (a.o.O.) die in Abb. 12a und b dargestellten Druckverteilungen berechnet. In Abb. 12a stellt Kurve b die Druckverteilung mit Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Zähigkeit dar, Kurve a die Druckverteilung, die man bei Annahme einer konstanten Zähigkeit erhält. Da die durch die Vergrößerung der Zähigkeit verursachte Vernehrung der Lagerreibung wieder eine Temperaturerhöhung verursacht, muß man auch die dadurch bedingte Verringerung der Zähigkeit berücksichtigen. Dies führt auf die Abb. 12b, in der Kurve c für eine gleichmäßige Temperatursteigerung des Öles auf der Lagerlänge von 60 bis 82°C, Kurve d für eine Tempera-

1)

L.C. Bradford u. C.G. Vandegrift General Discussion on
Lubrication and Lubricants,
London 1937.

tursteigerung von 60 bis 66°C und Kurve e für konstante Temperatur gilt. Abb. 13 endlich zeigt den Unterschied der Reibungskoeffizienten, den man unter Berücksichtigung des Druckeinflusses für ein Mineralöl (Pennsylvania-Öl von Dow) und ein fettes Öl (Specköl) unter sonst gleichen Bedingungen erhält.

Die von Bradfort und Vandegrift eingeführte Annahme einer linearen Temperaturzunahme ist zwar willkürlich, stimmt aber mit Berechnungen von Vogelpohl ¹⁾ gut überein. Abb. 14 zeigt die Druck- und Temperaturverteilung, die nach Vogelpohl in einem ebenen Schmierkeil herrscht, wenn man die Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit (dagegen nicht die Druckabhängigkeit) berücksichtigt. Die beiden der Rechnung zugrunde gelegten Öle haben bei der Temperatur, mit der sie dem Schmierkeil zugeführt werden, die gleiche Zähigkeit, aber verschieden starke Temperaturabhängigkeit. Vogelpohl gelangt zu dem Schluß, daß der Wert $B/\gamma \cdot c$ als neues Kennzeichen der Schmiereigenschaften eines Öles wichtig ist. Darin ist B ein Maß für die (in kleinem Temperaturbereich linear angenommene) "Steilheit" der Temperaturabhängigkeit, γ das Raumbgewicht und c die spezifische Wärme des Schmieröles. Öle mit kleinem Wert $\frac{B}{\gamma \cdot c}$ haben gute Schmiereigenschaften.

Wenn auch in den Rechnungen von Bradfort und Vandegrift und von Vogelpohl noch wesentliche Ver-

1) G. Vogelpohl

VDI-Forschungsheft Nr. 386
Berlin 1937.

einfachungen und Annahmen enthalten sind, so zeigen doch die Ergebnisse beider Untersuchungen, daß man heute in der Lage ist, Vorgänge im Lager zu verstehen und auch bereits rechnerisch zu erfassen, die man bis vor kurzer Zeit einer geheimnisvollen "Schmierfähigkeit" zuschieben zu müssen glaubte.

Die Notwendigkeit und Bedeutung der physikalisch-chemischen Untersuchung der Grenzflächenvorgänge bei der Schmierung soll damit keineswegs bestritten werden. Aber es soll nur daneben auf die Bedeutung einer genaueren Erfassung der physikalischen Stoffwerte hingewiesen werden. Wenn Vogelpohl in diesem Zusammenhange auf die "vorbildlichen Bemühungen um die Einführung brauchbarer Mittelwerte bei der Wärmeübertragung" hinweist, so muß allerdings hierzu bemerkt werden, daß die Einführung eines Integral-Mittelwertes für den in Frage kommenden Temperaturbereich dort auch nicht zum Ziel geführt hat, sondern erst die Erkenntnis von der Bedeutung der Grenzschicht. Einen ähnlichen Weg wird vielleicht auch die Erforschung des Schmiervorganges künftig nehmen. Allerdings wird die Aufgabe - im Vergleich mit dem Problem des Wärmeüberganges - dann dadurch noch erschwert, daß man außer der Temperaturabhängigkeit auch die Druckabhängigkeit der Stoffwerte berücksichtigen muß, und daß in der Grenzschicht außer dem Temperatureinfluß auch noch der Einfluß von Grenzflächenkräften zur Wirkung gelangt.

VIII. Zusammenfassung.

Die Entwicklung der Forschung auf dem Gebiet der Lagerreibung hat in jüngster Zeit gezeigt, daß es gelingt, einen Teil der unter den geheimnisvollen Begriff der "Schmierfähigkeit" ("oiliness") zusammengefaßten Vorgänge aufzuklären, wenn man die vereinfachenden Annahmen der Theorie einer genaueren Nachprüfung unterzieht. Insbesondere ist es notwendig, den Zustand des Schmiermittels (Temperatur und Druck im Schmierfilm) genauer zu erfassen. Die bisher nur in sehr beschränktem Umfange durchgeführten Druck- und Temperaturmessungen lassen bereits darauf schließen, daß es nicht angängig ist, einen konstanten Mittelwert der Zähigkeit des Schmiermittels in die Rechnungen einzusetzen. Die in Schrifttum veröffentlichten Untersuchungen der Druck- und Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit von Ölen lassen zwar die Größenordnung der Zähigkeitsänderungen erkennen, müssen aber noch weitergeführt werden, wobei vor allem der "Verfestigungsdruck" und dessen Abhängigkeit vom Schergefälle sowie die Kompressionswärme eingehend untersucht werden müssen. An Hand zweier Beispiele wird gezeigt, wie die Ergebnisse der Berechnungen geändert werden, wenn man die Veränderlichkeit der Zähigkeit berücksichtigt. Daneben bleibt die Bedeutung der physikalisch-chemischen Erforschung der Grenzflächenvorgänge bestehen. Neben der durch Adsorptionskräfte veränderten Grenzschicht wird man auch eine durch hydrodynamische und thermische Vorgänge ausgezeichnete Grenzschicht berücksichtigen müssen.

oooooooo

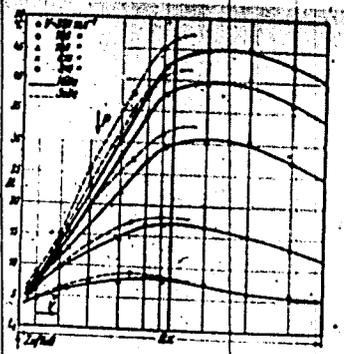


Abb. 17. Versuchgruppe II A
 $\lambda = 0.04 \text{ kg cm}^{-2}$
 $t_0 = 0.5 \text{ C}$
 $P_0 = 1.0 \text{ at Overdruck}$

Bild 1

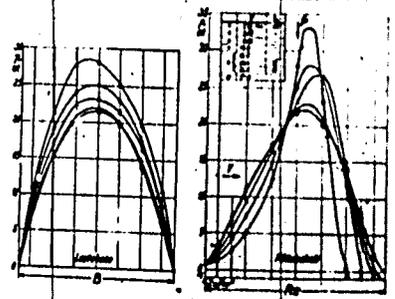


Abb. 26 und 27. Versuchgruppe II B
 $\lambda = 0.04 \text{ kg cm}^{-2}$
 $t_0 = 0.5 \text{ C}$
 $P_0 = 1.0 \text{ at Overdruck}$

Bild 2

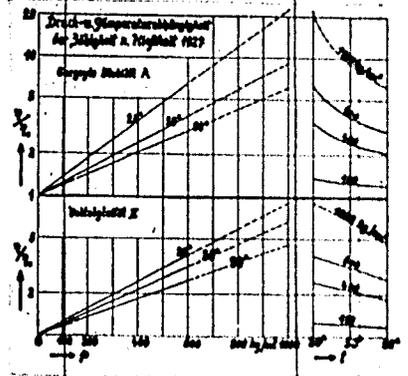


Bild 3

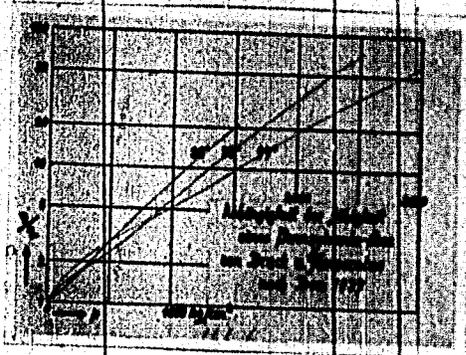


Bild 4

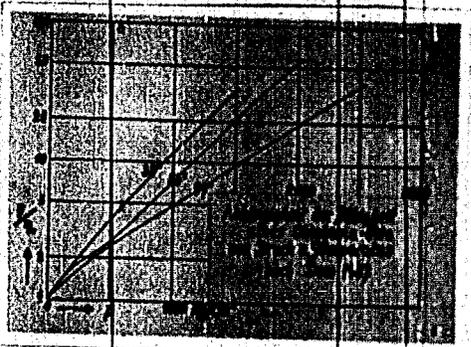


Bild 5

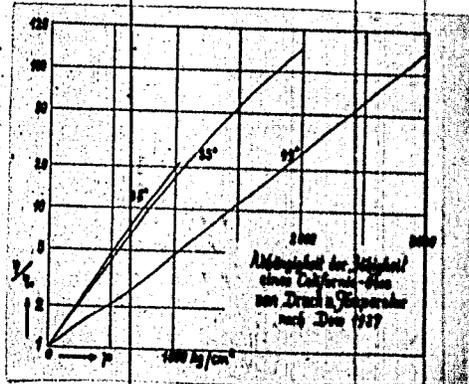


Bild 6

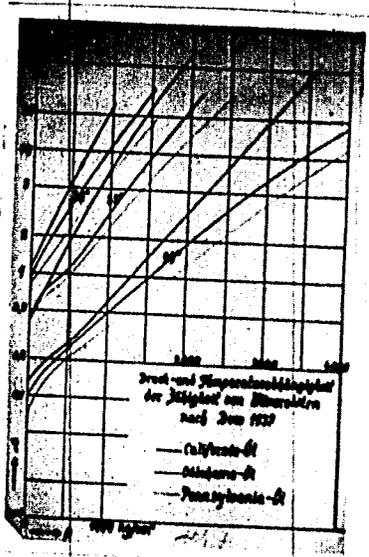


Bild 7

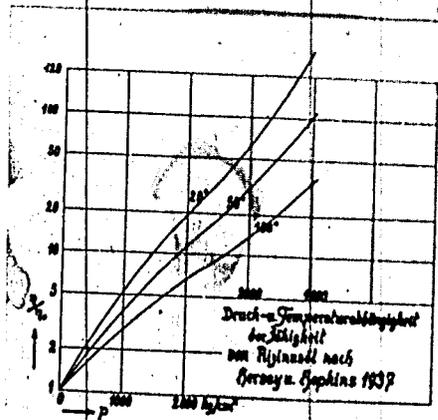


Bild 8

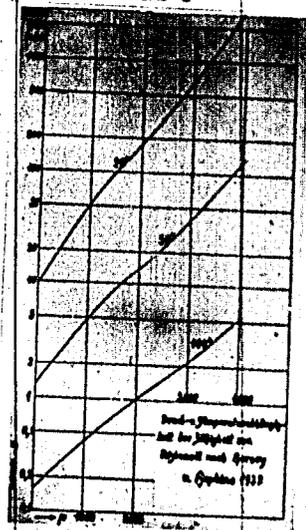


Bild 9

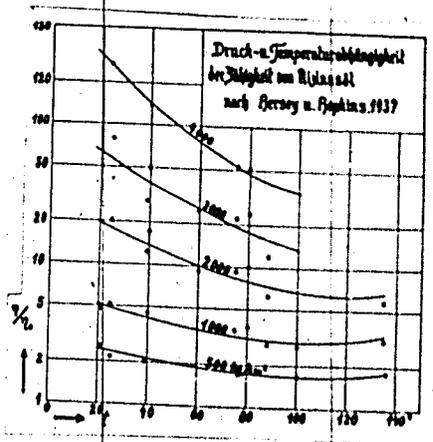


Bild 10

SAFETY FILM

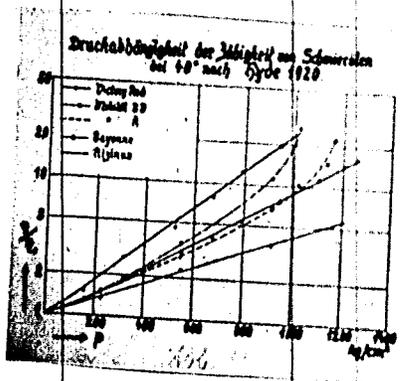


Bild 11

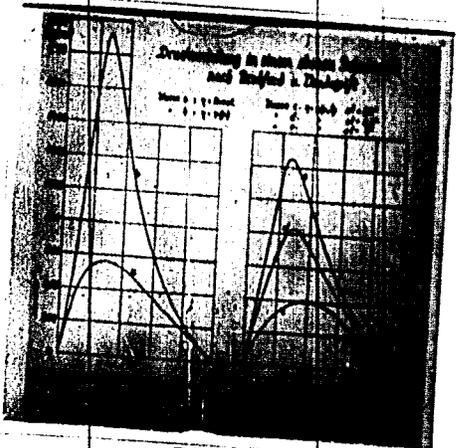


Bild 12

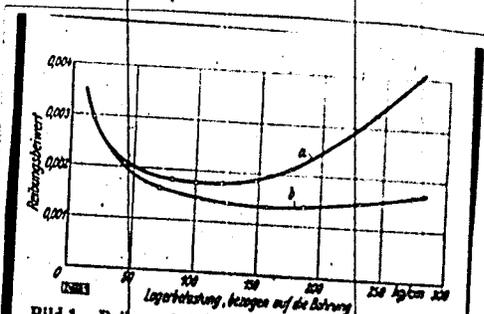


Bild 1. Reibungsbeiwerte eines Lagers bei verschiedenen Belastungen für zwei Öle mit gleicher Zähigkeit bei Atmosphärendruck und bei derselben Temperatur.
 a Pennsylvanisches Öl b Specköl

Bild 13

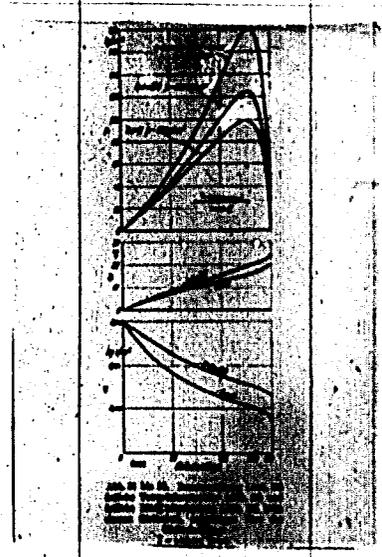


Bild 14

N. Vieweg
~~8~~

* **Vertrauliche Mitteilung No 3**

0 145

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

Wolf u. Harms

Innere Reibung u. Schmierung

5
1

Über innere Reibung und innere Schmierung

von Prof. Dr. K.L. W o l f
und Dr. H. H a r m a

Institut für physikalische Chemie
der Universität Halle.

Vorgetragen in der Sitzung
der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 11. April 1938 in Berlin

Vertrauliche Mitteilung Nr. 3
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 Persönlichkeiten außerhalb des Dienstbereiches des Empfängers bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

I. Teil

0 47

Vor etwa 10 - 20 Jahren war bei dem damaligen Stand der Wissenschaft die hydrodynamische Kontinuumstheorie der Schmiermittelreibung die einzige Theorie, die leitende Gesichtspunkte für die Behandlung schmiertechnischer Fragen geben konnte. Heute besteht auf Grund der Ergebnisse der Forschungen auf dem Gebiet der Molekularkräfte und deren Wirkungen in Flüssigkeiten und an deren Grenzflächen die Möglichkeit und damit zugleich die Aufgabe, die Schmiermittelreibung in ihrer Gesamtheit, d.h. die Probleme der Trockenreibung, der Grenzreibung und der inneren Reibung von bewährter und leistungsfähiger molekulartheoretischer Grundlage her zu behandeln. Da die reiche Mannigfaltigkeit schmiertechnischer Fragen dann naturgemäß auf einige wenige Grundtatsachen, nämlich auf die Eigenschaften der Moleküle zurückgeführt werden kann, wird einerseits notwendigerweise eine wesentliche Vereinfachung der wissenschaftlichen Darstellungen und Anschauungen eintreten, andererseits wird, da die moderne Beschreibung der Eigenschaften der Moleküle ein großes Erfahrungsmaterial umschließt, eine sichere und breite Grundlage zur Behandlung schmiertechnischer Fragen geschaffen, von der aus eine umfassende Lösung aller mit der Schmierung zusammenhängender Probleme erwartet werden kann unter Einschluß einer planvollen Weiterentwicklung der Frage nach den Ersatzstoffen.

Von den ausländischen Forschern hat Kyropoulos (Kalifornien) am weitesten den eben gekennzeichneten Weg beschritten. Seine Ausführungen über die Probleme

der "oiliness" auf der Londoner Schmiermitteltagung ¹⁾ lassen das in klarer Form erkennen. Er sagt dort etwa: Der linkische Ausdruck "oiliness" ist geeignet, den Ingenieur zu dem Glauben zu verleiten, daß "oiliness" letztlich eine physikalisch definierte Größe sei. In der Tat stellt der Begriff "oiliness" nur ein **a u s s c h l i e ß e n d e s** Prinzip dar und umfaßt alle Schmierungserscheinungen, die nicht in der hydrodynamischen Kontinuumstheorie auftreten oder sekundäre mechanische Effekte sind. Ursprung der "oiliness" sind die Erscheinungen der **d i s k o n t i n u i e r l i c h e n** Atom- und Molekülstruktur. Überall dort, wo molekulare Ordnungszustände und Grenzflächenerscheinungen über den Zustand der Unordnung vorherrschen, überall dort, wo die molekularen Dimensionen gegenüber den Erscheinungen im Großen wichtig werden, rufen die Probleme nach einer molekularphysikalischen Behandlung und nicht nach einer grobmechanischen Beschreibung. "Oiliness" beruht auf Erscheinungen, die aufs engste mit den molekularen Wechselwirkungen verknüpft sind.

An anderer Stelle wird aufgeführt: Unsere Annahmen über den flüssigen Zustand sind heute gänzlich andere als vor einigen Jahren. Solange eine Flüssigkeit als ein Zustand völliger Molekül u n e r d n u n g aufgefaßt werden kann, mag die Mechanik der Flüssigkeit geeignet sein, einen tieferen Einblick in die Schmierprobleme

1) General Discussion, On Lubrication and Lubricants, London 1937, Bd.4.

zu geben. Die Mechanik der Flüssigkeit ist jedoch zu-
 meist nur beschreibend, was ausreicht, solange im
 makroskopischen Verhalten die Struktur der Flüssigkeit
 und die molekularen Ordnungszustände nicht hervortreten.
 Während in einem Zustand der Unordnung die innere Rei-
 bung durch den Viskositätskoeffizienten statistisch -
 phänomenologisch hinreichend zu beschreiben und somit
 einer konventionellen mechanischen und formalen Behand-
 lung genügend zugänglich ist, d. h. für die rechnerische
 Behandlung der Erscheinungen der hydrodynamischen Rei-
 bung geeignet ist, gibt es im Fall extremer molekularer
Ordnung kein entsprechendes Verfahren.

g. fert.

In einer in deutscher Sprache gefaßten Schrift:
 "Schmierung, wissenschaftliche Grundlage der Schmierung
 schnelllaufender Verbrennungsmotore" ¹⁾ sagt Kyropoulos:
 Das letzte Verständnis der Schmierungsvorgänge, soweit
 sie nicht durch die reine Mechanik zu beschreiben sind,
 kann nur ihre molekularphysikalische Behandlung er-
 schließen. Deren Aufgaben sind insbesondere Erforschung
 des Wesens der Viskosität, der Grenzschnierung und der
Struktur der Grenzsichten.

Zu den in der Praxis üblichen Verfahren zur
 Bestimmung der "oiliness" nimmt er dann in London wie
 folgt Stellung: "Oiliness"-Untersuchungen, wie sie von
 den Ingenieuren in den letzten 15 Jahren entwickelt
 wurden, zeigen ein wenig die Neigung, sich zu einem
 eigenen Zweig der physikalischen Chemie entwickeln zu

¹⁾ Im Selbstverlag der Deutsch-Amerikanischen
 Petroleum - Gesellschaft

wollen, indem sie gut fundierte Erfahrungen und Theorien der allgemeinen physikalischen Chemie nicht genügend beachten. Der Versuch, die Probleme der "oilness" zurückzuführen auf fundamentale Erscheinungen und die reine Wissenschaft mit der Praxis des Ingenieurs zu vereinigen, mag eine Einbuße an Originalität darstellen. Jedoch ist dieser Weg schon öfter mit Erfolg beschritten worden, so in der Metallkunde und in der Elektrochemie.

Gleichsam als Richtlinie weiterer Arbeiten führt er dann zum Schluß aus: Der methodisch einwandfreieste Weg, sich dem technischen Problem der "oilness" zu nähern, eine klare Fragestellung und eine unswaidentige Antwort zu gewinnen, ist das Studium der physikalisch-chemischen Eigenschaften und insbesondere der Molekülkräfte der betreffenden Öle auf breiter Grundlage. Die verfügbaren Kenntnisse dieser Eigenschaften sind zu nutzen, um Arbeitshypothesen aufzustellen und mit planvollen Arbeiten zu beginnen.

Mit dem Rüstzeug dieser grundsätzlichen Erkenntnisse behandelt Kyropoulos: 1. Die Struktur und den Zustand der adsorbierten Schichten. 2. Die Strömungsorientierung und die mit ihr verbundene Erniedrigung der inneren Reibung. Von diesen beiden Punkten geht uns im folgenden speziell Punkt 2 an. Hier wird gesagt: Die Erniedrigung der inneren Reibung beim Strömen kann und muß aus der Betrachtung der Molekülkräfte in Verbindung mit Molekülstruktur, Molekülgestalt und Molekülabstand ableitbar sein. Die Anisotropie der Molekül-

5
10

gestalt ist wesentlich für die Ausbildung von Molekül-
 aggregaten (Bündeln) in den Flüssigkeiten und wesentlich
 für die Ausrichtung der Moleküle während des Strömens.
 Unter allen Umständen werden die "Enden" ("Köpfe") der
 Moleküle bzw. Molekülbündel weiter von ihren Nachbarn
 entfernt sein, als die Kettenatome einer Kette unter
 sich. Daraus ergibt sich, daß die von den Enden ausge-
 henden Restvalenzkräfte - wenn sie nicht schon aus ande-
 ren Gründen (Dipolgruppe) stärker sind, als die Rest-
 valenzkräfte der Kettenglieder - in allen Fällen, da
 sie weniger durch Nachbarmoleküle abgesättigt wurden,
 größer sind, als die von den Kettenatomen getätigten Kräf-
 te. Im Zustand gerichteter Ordnung, wie er durch Strömung
 anisotroper Moleküle erreicht wird, stehen nun sehr viel
 mehr Kettenglieder mit ihren verhältnismäßig schwachen
 zwischenmolekularen Kräften untereinander in unmittelba-
 rer Wechselwirkung als im Zustand der völligen Unordnung,
 während die unmittelbare Wechselwirkung zwischen den
 "Enden" der Bündel durch ihren relativ großen Abstand
 gegenüber ihrem Abstand im Zustand der völligen Unordnung
 behindert wird. Beide Erscheinungen bedingen eine Ernied-
 rigung der inneren Reibung.

Kyropoulos zieht nun hier zur weiteren Klärung
 des Zusammenhanges zwischen Strömungsorientierung und
innerer Reibung einige bisher weniger beachtete Punkte
 betreffend die Struktur der adsorbierten Schichten etwa
 wie folgt in die Betrachtung ein:

*hydro-
dyn.*

- a) Es gibt keinen Grund dafür, daß der ausgerichte-
 te Primärfilm dieselbe Struktur hat, wie das kristal-

lisierte Schmiermittel, insbesondere braucht der Zwischenraum zwischen den Primärfilmmolekülen nicht gleich dem Zwischenraum der Moleküle im Kristall zu sein (Hardy, Nottage, Trillat); ja es konnte durch die Arbeiten von Hardy schon gezeigt werden, daß der Zwischenraum der Moleküle im Primärfilm abhängig ist von den mechanischen Eigenschaften der Metalloberfläche, die wiederum Funktionen der von den Atomen des Metalls ausgehenden Kräfte sind. Dies Resultat zeigt eindeutig, sagt Kyropoulos, daß der adsorbierte Zustand keine Fixierung des kristallinen Zustandes des Schmiermittels auf der adsorbierten Oberfläche ist, was gleichbedeutend ist mit der Folgerung, daß nicht die von den Kettenatomen ausgehenden zwischenmolekularen Kräfte, sondern die Gitterkräfte der adsorbierten Oberfläche maßgebend für die Packung der adsorbierten Primärfilmmoleküle sind.

2
ND.
28.

b) Der Abfall der Reibungskoeffizienten mit wachsender Kettenlänge wird gewöhnlich in Verbindung gebracht mit den mechanischen Eigenschaften der Moleküle (Elastizität). Von dem gegenwärtigen Standpunkt ist die zunehmende Elastizität mit zunehmender Kettenlänge auf die große freie Beweglichkeit der "Enden" zurückzuführen. Die Kohlenstoffatome der Zickzackkette können frei um ihre C-C-Bindung unter Erhaltung ihres Valenzwinkels rotieren. Je länger die Kette, desto größer ist die Anzahl der "Schaniere" und desto größer ist die Beweglichkeit. Es ist die größere seitliche Freiheit der Bewegung, welche im allgemeinen die Unter-

2

schiede im Verhalten der adsorbierten Schichten gegenüber dem Verhalten eines Kristalls bedingen.

c) Die Frage der Mischungen wird wegen ihrer Bedeutung für die Praxis besonders hervorgehoben. Bei einer Mischung von Ölen mit polaren Bestandteilen ist nicht nur das Vorhandensein dieser polaren Bestandteile wesentlich für die Herabsetzung des Reibungskoeffizienten, sondern ebenso notwendig ist die wesentliche Bedingung, daß die polare Gruppe sich der Oberfläche hinreichend nähern kann, d.h., daß die polare Gruppe frei zugänglich an der Oberfläche des Moleküls liegt. Aber auch wenn das im Einzelmolekül der Fall ist, kann Association Entsprechendes verhindern; tritt z.B. unpolare Dipolassoziation ein, so kann die polare Komponente keinen wesentlichen Einfluß auf den Reibungskoeffizienten mehr ausüben. In anderen Falle wird die polare Komponente vorzugsweise an den Metalloberflächen adsorbiert und trägt zur Herabsetzung des Reibungskoeffizienten bei. Bei einer Mischung von Mineralölen mit nur unpolaren Komponenten werden vorzugsweise die längsten Moleküle an der Oberfläche adsorbiert. Ihre Konzentration sollte deshalb so hoch wie möglich sein.

Wenn man die Überlegungen, die für den Zustand der adsorbierten Schichten gelten, auf die Strömungsorientierung anwendet, wird klar, daß die gleichen "freien Enden" der Moleküle beim Haften an verschiedenen Oberflächen verschieden starke Restvalenzkräfte ausüben können, d.h. aber, daß identisch "freie Enden" Anlaß geben können zu ganz verschiedenen Reibungskoeffizienten, wo-

bei Ähnlich wie beim Übergang vom Emulgator zum Schutzkolloid eine verschieden starke Besetzung der Oberfläche maßgebend sein dürfte. Das besagt aber, (wie Kyropoulos betont) daß, wenn die enge Wechselbeziehung zwischen der molekularphysikalischen Erfahrung und der Praxis des Ingenieurs gesehen wird, kein Grund mehr besteht zu der Annahme, daß die Reichweite der von den Oberflächen ausgehenden Molekularkräfte 10^{-6} cm ist, so daß der Widerspruch zu den spektroskopischen Befunden verschwindet, nach denen diese Reichweite nicht über drei Kettenglieder hinausragt (Größenordnung 6 \AA).

Zusammenfassend möchten wir unsererseits sagen: Während eine molekulartheoretische Betrachtung der Schmiervorgänge im Gebiet der Trockenreibung und der Grenzreibung in jüngster Zeit durchaus üblich geworden ist, findet eine Molekulartheorie der für die Vollschmierung so überaus wichtigen inneren Reibung im allgemeinen für die Betrachtung technischer Fragen noch keine hinreichende Beachtung. Der Grund dafür ist der, daß im Gebiet der Grenzschrerung die hydrodynamische Theorie der Schmiermittelreibung nicht genügt, während im Gebiet der Vollschmierung die mechanisch beschreibende Behandlung der Vorgänge für technische Probleme ausreichen schien. Hier zeigt auch Kyropoulos grundsätzliche Bedenken auf. Eine beschreibende Behandlung der mechanischen Eigenschaften der Körper ist nur möglich und sinnvoll im Zustand der vollkommenen Molekulunordnung als der Voraussetzung der Kontinuumstheorie. Sobald Ordnungszustände wesentlich werden, muß die molekularphysi-

kalische Betrachtung einsetzen. Kyropoulos macht sich diese Erkenntnis an praktischen Beispiel der Strömungsorientierung zunutze, indem er von seinen molekularphysikalischen Vorstellungen aus die Herabsetzung der inneren Reibung als natürliche Folge der Ausrichtung anisotroper strömender Moleküle sieht. Die Herabsetzung der inneren Reibung durch Strömung beträgt nach seinen Angaben bei seinen Untersuchungen 5 - 17 %.

II Teil.

Von ähnlichen Gesichtspunkt also geleitet wie Kyropoulos haben wir unsererseits die Probleme der Vollschmierung angefaßt. Voraussetzung dazu war eine hinreichende Kenntnis der Ordnungszustände der Moleküle in Flüssigkeiten. Für eine Reihe von einfachsten Flüssigkeiten und insbesondere von Flüssigkeitsgemischen - denen wir von jeher besondere Beachtung schenkten - haben wir auf Grund langjähriger Untersuchungen die diesbezüglichen Grundlagen geschaffen, die wir jetzt auf die Frage der inneren Reibung und der inneren Schmierung anwenden können.

Selange in der Flüssigkeit völlige Unordnung aller Moleküle besteht, sollte sich der Viskositätskoeffizient η_{12} einer Mischung nach der einfachen Mischungsregel¹⁾

$$\eta_{12} = c_1 \eta_1 + c_2 \eta_2$$

additiv aus den Viskositätskoeffizienten η_1 und η_2 der Komponenten berechnen lassen. Bei den von uns untersuchten einfachsten Systemen zeigen sich jedoch Abwei-

1) c_1 und c_2 sind die Molenbrüche.

ohungen bis zu 33 % von den Viskositätswert, der bei Gültigkeit dieser einfachen Mischungsregel zu erwarten wäre, während die entsprechende Abweichung von der Volumenadditivität ¹⁾ nur 5 % beträgt. Diese Abweichungen sind nur auf molekularphysikalischer Grundlage zu verstehen. Wir sind zurzeit damit befaßt, die Ergebnisse einer ausgedehnten Viskositäts-Meßreihe unter diesem Gesichtspunkt der Theorie der praktischen Schmierung nutzbar zu machen. Die Kenntnisse der Ordnungszustände der Moleküle in Flüssigkeitsgemischen erhielten wir durch Messung der Orientierungspolarisation, der Mischungswärmen, der Raumbeanspruchung, durch Messung des Ausdehnungskoeffizienten, durch dielektrische Verlustmessungen; durch Messungen der Dampfdrucke von Flüssigkeitsgemischen und durch Messung der Partialdrucke in Gasgemischen ²⁾. Wir sind so jetzt in der Lage, sagen wir bei einem Gemisch von Alkohol und Benzol oder von Alkohol und Cyclohexan bei einer vorgegebenen Konzentration des Alkohols (etwa Molenbruch $c = 0,01$) die Zahl, die Form, den elektrischen Charakter, die Bindefestigkeit und den Solvationszustand der Alkoholeinermoleküle und der alkoholzweiermoleküle **z a h l e n m a ß i g** anzugeben und (was für die Betrachtung der Mischung weiter wichtig ist) die Abhängigkeit der Bildung mehrzähliger

1) Über Volumenadditivität s. K.L. Wolf, H. Frahm, H. Harns, Z.S. f. phys. Chem. (B) 36. (1937) 237 und H. Harns, Würzburger Diss. 1937.

2) Wolf-S. Frahm-Harns, l. o.; E. Steurer u. K.L. Wolf, Z.S. f. phys. Chemie (B) 39. (1938); H. Behrens, Diss. Halle 1938; E. Nordt, Diss. Halle 1938.

Übermoleküle von der Konzentration bzw. dem Konzentra-
tionsverhältnis zu verfolgen. Einzelheiten erübrigen
sich hier und müssen gegebenenfalls im Anschluß an das
Referat gegeben werden.

Diese Grundlage allein genügte jedoch, wie sich
bei dem Versuch einer molekularphysikalischen Behandlung
des Viskositätskoeffizienten herausstellte noch nicht
für ein wirkliches Verständnis des Viskositätsverhaltens
von Mischungen.

Denn die unmittelbare Anwendung der für die
Messung definierten Größe, nämlich des Viskositätskoeffi-
zienten, erwies sich für molekularphysikalische Betrach-
tungen als ungeeignet. Wie nämlich die Bestimmung der
spezifischen Leitfähigkeit, des Berechnungsexponenten
oder der Dielektrizitätskonstanten erst dadurch einer
molekulartheoretischen Betrachtung zugänglich gemacht
wurden, daß man diese Größen entsprechend auf molare Men-
gen bezog, so ist auch bei der Untersuchung der inneren
Reibung von der Meßgröße auf eine molare Größe umzurechnen;
denn wie immer auch der Mechanismus des Impulstrans-
portes in einer Flüssigkeit sein mag, so ist doch ganz
sicher - wenn wir beispielsweise an den Versuch mit zwei
gegeneinander bewegten Platten denken - die bewegte Plat-
te Impulsgeber und die zwischen den Platten befindliche
Materie Impulstransporteur. Molekularphysikalisch gesehen
heißt das: Die Moleküle an den bewegten Platten sind
Impulsempfänger, die Moleküle innerhalb der Flüssigkeit
irgendwie Impulstransporteur. Wenn nun sowohl die Zahl
der Moleküle, die den Transport des Impulses durch die

Flüssigkeit besorgen, wie auch die Zahl der Moleküle, die die Flächeneinheit besetzen, wie das bei der Verwendung des gewöhnlichen Viskositätskoeffizienten der auf einen cm^2 Oberfläche bezogen ist, zutrifft, von Substanz zu Substanz wechselt, so wird ohne weiteres klar, daß durch diese Definition eine vernünftige Erklärung der Unterschiede in dem Viskositätsverhalten von Substanz zu Substanz äußerst erschwert wurde. Es schien uns deshalb notwendig, eine einheitliche Bezugsgröße zum Vergleich der Viskositäten verschiedener Stoffe zu finden. Den auf molare Mengen bezogenen Viskositätskoeffizienten bezeichnen wir als den molaren Viskositätskoeffizienten, der folgendermaßen definiert wird:

Der molare Viskositätskoeffizient ist die Kraft, die auf die Fläche von der Größe der Fläche des Molwürfels einer ruhenden Platte ausgeübt wird, wenn sich im Abstand der Länge der Kante des Molwürfels eine mit der Geschwindigkeit von 1 cm/sek. bewegte Platte und zwischen den Platten sich ein Medium mit streng linearem Geschwindigkeitsgefälle befindet. Es ist also: ¹⁾

$$\eta_m = \eta \cdot (2v)^2$$

Durch diese Definition ist erreicht, daß beim Übergang von einer Substanz zu einer anderen immer die gleiche Anzahl Moleküle die Platte besetzen, von der der Impuls ausgeht und weiter, daß immer die gleiche Anzahl der Moleküle den Impulstransport durch die Flüssigkeit

1) $2v$ = Molvolumen

M
T
I
E
Y
A
FILM

übernimmt, d.h. sowohl hinsichtlich der Impulsenpflinger als auch hinsichtlich der Impulstransporteure sind einheitliche Bedingungen geschaffen worden.¹⁾

Über den Impulstransport in einer Flüssigkeit muß man sich nun auf Grund unserer heutigen Kenntnisse über Art und Größe der zwischenmolekularen Kräfte folgende Vorstellung machen: der Impulstransport senkrecht zur Strömungsrichtung ist vorzugeweise durch eine Art Verkettung aller Moleküle untereinander und insbesondere senkrecht zur Strömungsrichtung bedingt und ist somit naturgemäß wesentlich von der Art und der Stärke dieser Verkettung abhängig. Dort also, wo auf Grund der Kenntnisse der Ordnungszustände der Moleküle in Flüssigkeiten die Art der Verkettung bekannt ist, ist die molekulartheoretische Betrachtung der inneren Reibung möglich. Die Ordnungszustände kennen wir nun bei den niedrigen Kohlenwasserstoffen und ihren Mischungen, bei den Mischungen von Alkoholen und Fettsäuren mit den Kohlenwasserstoffen und dergleichen. Soweit also diese Flüssigkeiten als Schmiermittel in Frage kommen (auch in Hinblick auf Ersatzstoffe) wäre die Nutzbarmachung der molekulartheoretischen Betrachtungen unmittelbar möglich. Soll auch in das Gebiet der heutigen praktischen Schmieröle vorgedrungen werden, so ist lediglich noch erforderlich, daß zu den vorhandenen Messungen der Viskositätskoeffizienten die Mes-

|| ?

1) In den berechneten Flüssigkeitsraum befindet sich also jeweils eine Substanzmenge, die n_L Gasmolekülen entspricht.

neurolövion = 100 (f)

sungen ausgeführt werden, die über den Ordnungszustand der Moleküle in den betreffenden Flüssigkeiten Aufschluß zu geben vermögen. Dann sollte es möglich sein, auf Grund einer Molekulartheorie der Gesamtreibung der praktischen Schmierung neue Wege zu weisen.

Wir erläutern die Ergebnisse unserer bisherigen Grundlagenforschung auf dem Gebiet der inneren Schmierung an einigen beispielhaften Flüssigkeitspaaren. Die in Abb. 1 - 3 aufgetragenen Ordinaten $\eta_{\text{Misch}}^{\text{exp.}}$ - $\eta_{\text{Misch}}^{\text{calc.}}$ ergeben direkt die Abweichung der gemessenen von dem nach der einfachen Mischungsregel berechneten $\eta_{\text{Misch}}^{\text{calc.}}$ Wert an. Wir erklären daraus, daß

1. Benzol durch Hexanzusatz
 2. Alkohol durch Cyclohexanzusatz
- geschmiert wird, während

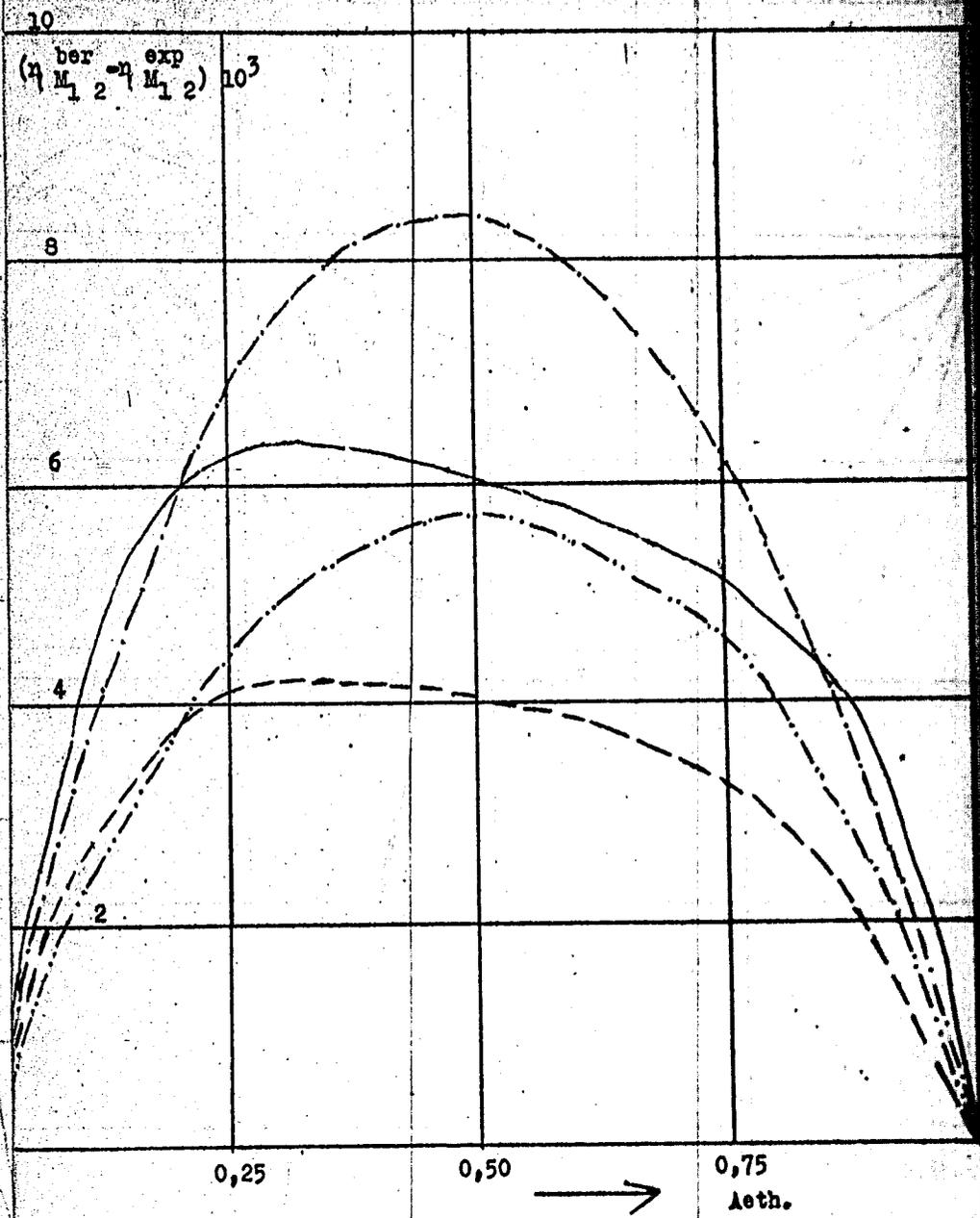
3. bei Gemischen von Methanol und Benzol im Bereich größerer Alkoholkonzentrationen eine "innere" Bremsung stattfindet. Exakter definieren wir als Koeffizienten der molaren "inneren Schmierung" die Größe:

$$k = \frac{\eta_{\text{Misch}}^{\text{exp.}} - \eta_{\text{Misch}}^{\text{calc.}}}{\eta_{\text{Misch}}^{\text{calc.}}}$$

Sie nimmt den Wert 1 an für den nicht realisierbaren Fall der vollständigen Schmierung ($\eta_{\text{Misch}}^{\text{exp.}} = 0$) und wird 0, wenn beim Mischen überhaupt keine Abweichung von der Additivität beobachtet wird ($\eta_{\text{Misch}}^{\text{exp.}} = \eta_{\text{Misch}}^{\text{calc.}}$ "innere Schmierung" = 0). Negative Werte nimmt sie an, wenn beim Mischen eine größere als die nach der Mischungsregel zu erwartende Viskosität (eine "innere Bremsung") beobachtet wird. Über Anwendung dieser Begriffe wird auf Grund unseres reichen exp. Materials demüthet (Harms, Rüssler und

12
12

Wolf) - Zeitschrift f. Phys. Chem. (B) 1938) berichtet werden. Dort soll vor allem auf die Frage, wie weit die Molekülform und die von den Molekülen ausgehenden zwischenmolekularen Kräfte und die durch sie bedingten Ordnungszustände der Moleküle in Flüssigkeiten die Größe der inneren Reibung beeinflussen und auf die Frage der Temperaturabhängigkeit der Viskosität eingegangen werden. Das Resultat dieser Untersuchungen kann, soweit Fragen der praktischen Schmierung zu erörtern sind, unter anderem darin gesehen werden, daß ein Weg aufgezeigt werden soll, wie man durch geeignetes Mischen eine Flüssigkeit von ganz bestimmten Viskositätseigenschaften herstellt. Ist dies erst einmal erreicht, so kann auf diese Flüssigkeit mit den in ihr realisierten η -Wert wieder in die Gleichung der hydrodynamischen Theorie eingegangen werden.

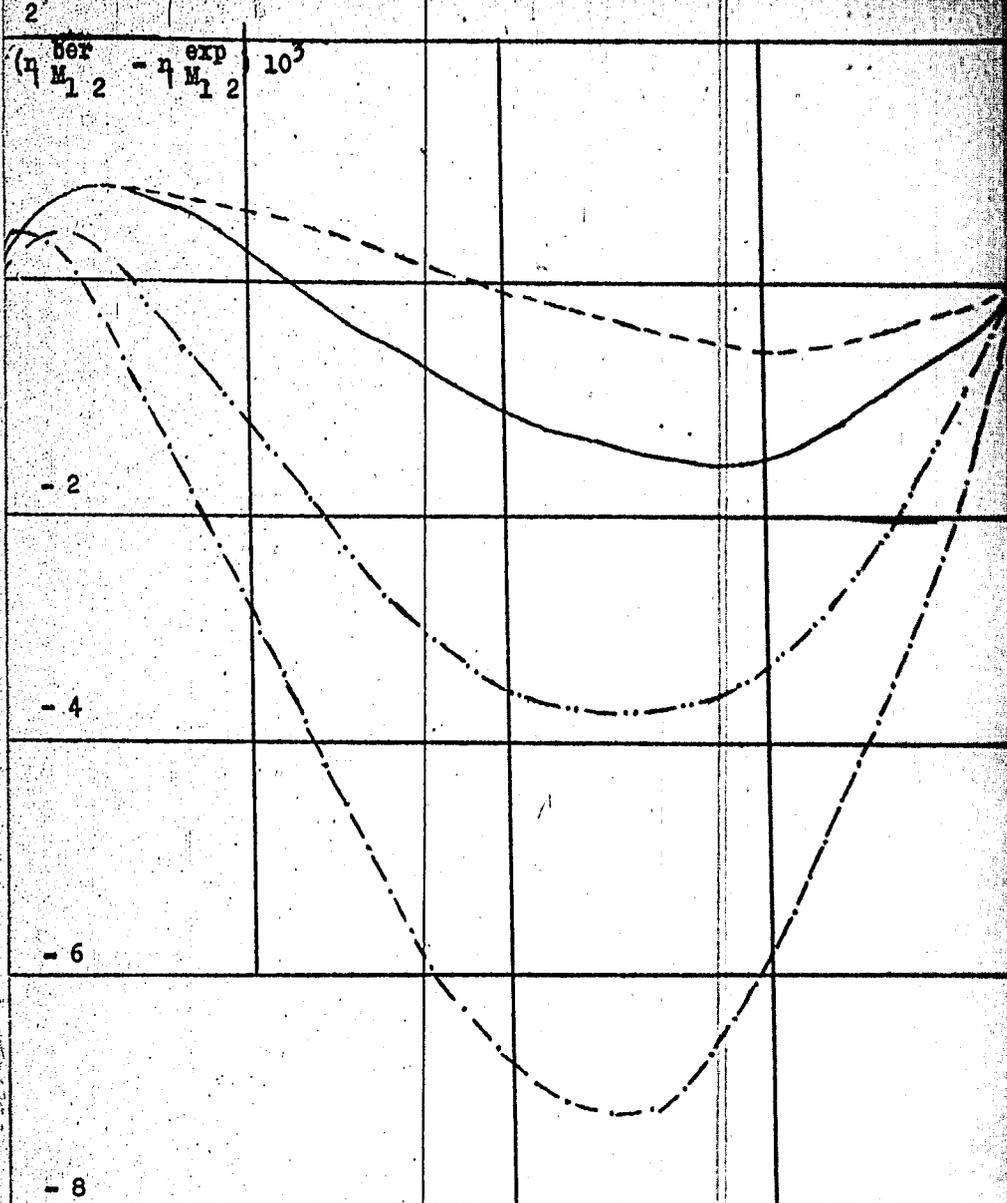


- Aethanol - Cyclohexan 6° 0
- Aethanol - Cyclohexan 30° 0
- Aethanol - Benzol 6° 0
- Aethanol - Benzol 30° 0

Abbildung 2.

343

EASTMAN KODAK



ber exp
 $(q_{M_1 2} - q_{M_1 2}) \cdot 10^3$

0,25 0,50 0,75 → Meth.

_____ Methanol - Benzol 6° C
 - - - - - Methanol - Benzol 30° C
 - · - · - Methanol - Tetrachlerkohlenstoff 6° C
 · · · · · Methanol - Tetrachlorkohlenstoff 30° C

Abbildung 3.

0 25

0 65

Vertrauliche Mitteilung № 4

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

Philippovich

Öl - Alterung

Öl-Alterungsvorgänge und ihre Beziehungen zur

Schmierung von Verbrennungsmotoren.

Von Dr. A. v. Philippovich

Institut für Betriebsstoffforschung
der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt Berlin.

Vorgetragen in der Sitzung
der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 11. April 1938 in Berlin

Vertrauliche Mitteilung Nr. 4
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 Persönlichkeiten außerhalb des Dienstbereiches des Empfängers bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

Unter Alterung sollen nach H. Stüger ¹⁾ ganz allgemein die Veränderungen des Schmieröles verstanden werden, die im Betrieb eintreten und Störungen verursachen können. Im wesentlichen sind es folgende:

1. Viskositätsänderung
2. Aufnahme von Wasser
3. Säurebildung (Laktone)
4. Aufnahme und Bildung fester Rückstände

Die Bedeutung der Veränderung des Öles für die eigentliche Schmierung ist eine zweifache, nämlich die unmittelbare Änderung des Schmierwertes des Öles und die mittelbare Beeinflussung des Schmiervorganges.

I. Die unmittelbare Bedeutung
der Ölalterung für die Schmierung:

1. Viskositätsänderung kann sowohl positiv als negativ sein. Eine chemisch verursachte Erhöhung der Viskosität ist für das Gebiet der flüssigen Reibung gleichbedeutend mit besserer Tragfähigkeit des Ölfilms, aber auch mit zunehmender Reibung, nicht unbedingt dagegen eine physikalisch bedingte wie z.B. Eindickung infolge von Suspensionen oder Emulsionen. Das Ausmaß der Viskositäts-erhöhung wird durch die Menge, Gestalt und Feinheit der festen Fremdstoffe (Dieselschmieröle!), die als Suspensionen starke

- 2 -

¹⁾ H. Stüger, Betriebserfahrungen mit Mineralölen
Ö.P.I., Veröffentlichung 5
Verlag für Fachliteratur G.m.b.H., Wien 1937.

Eindickung geben können, sowie durch den Grad möglicherweise eintretender Verdampfung leichter Anteile des Öles, endlich durch die in manchen Fällen vorkommenden Polymerisationsvorgänge bestimmt. Das Ausmaß solcher Voränderungen ist in Zahlentafel 1 zusammengestellt.

Hier sei erwähnt, daß auch Emulsionsbildung sehr große Steigerungen der Viskosität verursachen kann; Zahlen dafür sind schwer anzugeben, weil die Emulsionen nur selten in einer für die Messung geeigneten Form auftreten, und außerdem bei der Messung s.t. instabil sind.

Viskositätsabnahme ist eine Folge von Schmierölverdünnung durch Aufnahme von Kraftstoffanteilen (besonders bei Schwerölbetrieb), sowie durch Cracking von hochmolekularen Schmierölanteilen. Sie bedeutet geringere Tragfähigkeit des Schmierfilmes und verringerte Reibung. Es ist oft nicht leicht, festzustellen, welcher von beiden Vorgängen die Ursache der Viskositätsabnahme ist, da sowohl die halbverbrannten Kraftstoff-, wie die gecrackten Schmierölanteile ihrer Natur nach ähnlich sind. In manchen Fällen gelingt es durch Bestimmung des Molekulargewichtes der Öle (nach dem Abtreiben der bis rund 250° siedenden Bestandteile) an der Änderung des Molekulargewichtes eine Entscheidung zu fällen. - Das Ausmaß der vorkommenden Viskositätsabnahmen zeigt für einige Fälle die Zahlentafel 2.

Zahlentafel 2

Viskositätsabnahme von Schmierölen.

Ölbezeichnung	Visk. bei 50° B
Frischöl Mot. S.	12.0
2000 km 55 PSDB Diesel	10.3
Frischöl Av.S.	10.4
2500 km 55 PSDB Diesel	9.2
2500 km 8/40 Mercedes Otto	6.0

2. Wasseraufnahme führt unmittelbar nur durch die bereits erwähnte Emulsionsbildung und damit verbundene Eindickung zu einer Änderung der Schmierfähigkeit der Öle.

3. Säurebildung (in geringerem Ausmaße auch Laktonbildung) steigert im allgemeinen die Polarität der Moleküle und die dadurch bedingte Adsorptionsfähigkeit und Schmierfähigkeit, wenn die Säuremoleküle etwa gleich groß sind wie die Schmierölmoleküle, aus denen sie entstanden. Stark raffinierte Schmieröle neigen dazu, niedermolekulare, chemisch stark aggressive organische Säuren ohne merkliche Erhöhung des Schmierwertes zu liefern. Dadurch sind die vielfach bemerkten Korrosionserscheinungen solcher Öle an Bleibronze und Kadmiumlagern verursacht. Zahlenwerte für die Säurebil-

ung gibt Zahlentafel 3.

4. Aufnahme und Bildung fester Rückstände:

Die Bildung fester Rückstände wirkt sich auf die Schmierung unmittelbar nicht aus. Versuche, an Leichtmetallkolben beobachtete Riefen auf die Schleifwirkung harter Ölkohleteilchen zurückzuführen, schlugen - vielleicht wegen der beim Versuch angewendeten niedrigen (Zimmer-)temperatur - fehl. Vielleicht ist ein solcher Einfluß zu einem gewissen Grade vorhanden, gegenüber der Schleifwirkung von Sand (aus staubiger Luft) spielt er aber eine ganz untergeordnete Rolle.

II. Die mittelbare Bedeutung der Ölalterung für die Schmierung:

1. Viskositätsänderung

Viskositätsabnahme verursacht ungünstigenfalls höheren Ölverbrauch sowie geringeren Öldruck infolge stärkerer Leckverluste. Bei sehr starkem Viskositätsabfall kann sogar Fressen der Lager oder Kolben eintreten, der nicht nur durch die verringerte Tragfähigkeit des dünneren Öles bedingt ist, sondern auch durch das Nicht-zufließen zu den letzten Schmierstellen, (die unter Druck stehen sollten), erfolgen kann. Mit zunehmender Belastung wird die Gefahr solchen Versagens größer.

Viskositätszunahme wirkt sich, gleichgültig, welche Ursache sie hat, mittelbar so aus, daß beim Anlassen

des kalten Motors das Öl nur sehr langsam zu den Schmierstellen kommt. Je dicker also das Öl geworden ist, umso gefährlicher ist der Anlaufvorgang.

2. Wasseraufnahme

Die Aufnahme von Wasser bedeutet mittelbar Gefahr des Einfrierens im Winter (Ölpumpen !), der Emulsionsbildung und Eindickung, die bereits besprochen wurde, sowie endlich die einer verstärkten Schlammabildung. Thornycroft und Barton ¹⁾ fanden nämlich, daß bei 50 Stundenläufen mit verschiedenen Ölen in einem Einzylindermotor die Zugabe von 1/2 % Wasser je 8 h die Schlammabildung in folgendem Maße erhöhte:

Zahlentafel 4

Schlammabildung bei Wasserezusatz.

Öl - Nr.	1	2	3	4	5
Schlamm normal g	3,2	9,5	9,1	4,8	8,1
" m. 1/2 % Wasser) bei Zugabe alle 8 h	14,3	12,8	13,6	15,4	15,9

Wenn die Schlammabildung auch nicht selbst den Schmierwert des Öles beeinträchtigt, stört sie doch den Schmiervergang sehr, wie im folgenden noch besprochen wird.

1) O. Thornycroft u. G.H. Barton, The Lubrication of Engines, Aircraft Engineering 1930, 2, 36, 109 (Vgl. 202)

3. Säurebildung

Mittelbar wirkt sich die Säurebildung so aus, daß Korrosionsangriff die Lagermetalle (Bleibronze und Kadmium) zerstört. Auch verstärkte Alterung des Öles kann durch so aufgenommene Bleiseifen einsetzen, die dann ihrerseits wieder zur Störung der Schmierung führt.

4. Aufnahme und Bildung fester Rückstände

Wie bereits erwähnt, sind feste Rückstände mittelbar die Ursachen einer Reihe von Störungen des Schmierungsvorganges. Wenn man die Rückstände des Verbrennungsraumes und der Kolbenringe mit Ölkohle bezeichnet, die im Umlauföl befindlichen aber mit Schlamm, so sind folgende Erscheinungen möglich:

Durch Ölkohle: Festsetzen der Kolbenringe, Vorbeiblasen der Verbrennungsgase und Pressen.

Durch Schlamm: Zusetzen von Ölbohrungen, Aussetzen der Schmierung und Pressen. Hängen von Ventilen.

Die Menge fester Rückstände, die sich aus einem gegebenen Öl bilden, schwanken nun mit den Betriebsbedingungen erheblich. Über diesen Vorgang, der durch steigende Temperatur begünstigt wird, lagert sich als zweiter die Verbrennung der bereits gebildeten und abgelagerten Ölkohle, der ebenfalls mit steigender Temperatur zunimmt, und zwar noch rascher als der erste. Wird

deshalb ein Motor bei sehr hohen Temperaturen betrieben, so verbrennt die Ölkohle so lebhaft, daß man sie in Verbrennungsraum nur mehr zu sehr geringem Anteil vorfindet,

Bedenkt man die Vielheit der möglichen Einwirkungen der Ölalterung auf den Schmiervorgang und bedenkt man, daß dessen einwandfreie Erfassung bisher noch nicht gelungen ist, so ergibt sich ein Bild der Schwierigkeiten der sinngemäßen Laboratoriumsprüfung dieser Erscheinung. Es ist deshalb notwendig, sich allgemein darüber klar zu werden, in welcher Weise eine Beziehung zwischen Laboratoriumsuntersuchung und Motorverhalten von Schmierölen überhaupt aufstellbar ist. (Vgl. v. Ph. The Principles of Testing of Lubricants, Proceeding Ind. Mech. Eng. 1938)

Laboratoriumsmäßig werden zweierlei Stoffeigenschaften bestimmt: solche von eindeutiger chemisch-physikalischer Bedeutung und solche, deren Zahlenwerte mehr oder weniger durch das Prüfverfahren bedingt, d.h. konventioneller Art sind. Die einzig objektiv meßbare Eigenschaft der Schmieröle von wirklicher praktischer Bedeutung ist ihre Zähigkeit. Da sie über einen größeren Temperaturbereich gemessen wird, kann man bei bekannter Öltemperatur verlässliche Voraussagen über die in Betrieb erreichten Werte machen. Der gleiche Weg müßte nun für die konventionelle Bestimmung der anderen, so-

wohl für die Schmierung selbst als für das gesamte Verhalten des Öles bedeutungsvollen Prüfwerte eingeschlagen werden: die Aufnahme von Diagrammen über die wichtigste Betriebsbedingung, nämlich die Betriebstemperatur. Aber auch die bisher nicht erfaßten, künftig zu erwartenden Prüfwerte, wie derjenige der Schmierfähigkeit, sollten von vornherein in diesem Sinne durchgemessen werden; bei Festigkeitseigenschaften von Werkstoffen metallischer Art ist das ja längst üblich. Die Anwendung dieses Grundsatzes auf die konventionellen Verfahren ist natürlich nicht ganz unbedenklich, weil nicht sicher ist, ob die für ganz genau festgelegte Prüfbedingungen ausgearbeitete Methode auch für andere Bedingungen den ursprünglichen Sinn behält. Immerhin ist zu erwarten, daß derartig aufgestellte Diagramme eine Beurteilung der Schmieröle nach verschiedenen Gesichtspunkten für vielmehr Motoren und Betriebsbedingungen zulassen als die bisher übliche, bei der z.B. die Alterung nur bei einer genau festgelegten Art von Prüfbedingungen durchgeführt wurde.

Will man aber nun das Ergebnis dieser Untersuchungen zu dem praktischen Verhalten der Schmieröle in Beziehung setzen, so erhebt sich sofort die Frage, bei welcher Temperatur (z.B.) der Vergleich zwischen Laboratoriums- und Motorversuch gemacht werden sollte. Und damit kommt man zu einem Punkt, der in der Londoner Schmieröltagung immer wieder hervorgehoben wurde:

die praktischen Bedingungen, unter denen die Schmieröle arbeiten, sind fast restlos unbekannt! (Ähnlich wie diejenigen, unter denen die motorische Verbrennung abläuft). Eine der wichtigsten Aufgaben wird es deshalb sein, durch Versuche und genaue Messungen in Motoren die Unterlagen dafür zu schaffen, daß die Wahl der Temperatur in den Diagrammen der Stoffwerte vorgenommen werden kann, die für den betreffenden Motor und den betreffenden Vorgang (Schmierung, Alterung, Kohlebildung, Cracking usw.) von Wichtigkeit ist.

Die vorgebrachten Überlegungen führen dazu, daß man auch die derzeit üblichen Ölprüfverfahren unter dem Gesichtspunkt der Durchführbarkeit solcher Messungen über die Temperatur betrachten muß. Ein vielfach gegen solche Diagrammuntersuchungen gemachter Einwand ist der ihrer Kostspieligkeit. Natürlich sind Aufnahmen von mehreren Punkten teurer als die eines einzigen. Umso wichtiger ist es aber gerade deshalb, darauf zu achten, daß Prüfverfahren nicht zu umfangreich nach Dauer und Menge des Prüfstoffes sind, (Das Indiana-Verfahren würde z.B. unter diesem Gesichtspunkt gleich ausscheiden.) Andererseits ist zu bedenken, daß nach der erstmalig durchgeführten "Bestandaufnahme" der charakteristischen Schmieröle möglicherweise Grundtypen von Ölen aufgestellt werden können, deren Diagramme dann bei Kenntnis der Type des Untersuchungstoffes bei Bestimmung nur eines einzigen Punktes vielleicht zugrunde gelegt werden könnten. Eine solche Hoffnung ist freilich nicht allzu aussichtsreich:

SAFETY

17
C

Zahlenfeld 1
Vielzahlkessnahme

Schmierstoff	Kraftstoff	Motor	Betriebsst.	Frischöl	Altol	V 1 o k o s i t e t h t b. 50 E n. Kraft. d. n. Kraft. d. Kraftst. Fremdst.	Zunahme	
4420/36	02 87	BMW 106	145 h	21,7°E	22,2°E	23,0°E	22,8°E	1,1°E
38/37	" 87	" 132A	100 h	17,0 "	17,7 "	20,9 "	18,0 "	1,0 "
4420/36	" 87	LG 5	127 "	16,3 "	19,0 "	19,6 "	18,5 "	2,2 "
313E/37	" 87	BMW 132 F/V95	100 "	17,3 "	20,0 "	21,9 "	21,3 "	4,0 "
345E/37	" 87	BMW 132 F/V95	100 "	18,5 "	19,6 "	20,8 "	19,8 "	1,3 "
Met. S	-	2 1/2 t. Kruppwg. m. n. 5800km Lehrantrieb	12,0°E	18,2°E	-	-	-	6,2°E
" "	-	3 t. MAN-Wg. Dieselbetrieb	n. 2800 "	12,0 "	13,0 "	-	-	1,0 "
1 I	-	-	-	6,3 "	+ 0,5 %	Grephit	-	0,5 "
"	-	-	-	11,9 "	+ 1,0 %	-	-	0,8 "
"	-	-	-	11,9 "	+ 0,5 %	Altolgeschmutz	-	0,7 "
"	-	-	-	11,9 "	+ 1,0 "	"	-	0,6 "
"	-	-	-	11,9 "	+ 2,0 "	"	-	1,1 "

Man denke nur an die ...
Reinige und ...
Zeit für ...
Öle und ...
die den ...
nicht vorher ...
zu ...
eine ...
Gewinnung ...
bleibt eine ...
Reinigung ...
darstellt ...
bedeutet ...
Wohlstand ...

44

0 *

0 79

Vertrauliche Mitteilung No 5

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

Heidebroek u. Rumpf

Temperaturverlauf in der Schmierschicht

11 11. N V M T

Untersuchungen über den Temperaturverlauf
quer zur Schmierschicht eines Gleitlagers.

Von Prof. Dr.-Ing. H e i d e b r o e k VDI
und Dipl.-Ing. R u m p f VDI
Technische Hochschule Dresden.

Vorgetragen in der Sitzung
der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI

Vertrauliche Mitteilung Nr. 5
für die Mitglieder der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI

Zu beachten: Eine Veröffentlichung auch von Aus-
zügen oder Teilen des Berichtes sowie Weiterlei-
tung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstbe-
reiches des Empfängers bedarf der Genehmigung der
Geschäftsstelle des Fachausschusses für Maschinene-
lemente des VDI.

Pl.

Die Temperaturen in der Schmierschicht eines Lagers kann man nicht messen, nur ihre beiden Randwerte an der Schalen- und Wellenoberfläche. Es soll daher versucht werden, aus dem allgemeinen Wärmeleitungs- und Strömungsansatz den Temperaturverlauf in der y-Richtung, d.h. quer zur Schicht, zu berechnen, wobei die im Versuch meßbaren Randbedingungen eingesetzt werden.

Differentialgleichung der Wärmeleitung:

Alle Untersuchungen dieser Arbeit beziehen sich auf Beharrungszustand im Lager, also auf stationäre Flüssigkeits- und Wärmeströmung.

Die Glieder der folgenden Bilanz werden als Leistungen dargestellt, auf sec als Zeiteinheit bezogen.

Bei beliebigem Geschwindigkeitsverlauf in der Schicht nach Abb. 1 haben zwei benachbarte Flüssigkeitsteilchen eine Relativgeschwindigkeit in der Umfangsrichtung (x-Richtung)

$\frac{\delta v_x}{\delta y} dy$ gegeneinander. Die zwischen ihnen erzeugte Reibungsleistung ist:

$$(1) \quad d I_x = \tau_x dx dz \frac{\delta v_x}{\delta y} \cdot dy = \tau_x \frac{\delta v_x}{\delta y} dx dy dz$$

oder, da die Schubspannung $\tau = \gamma \frac{\delta v_x}{\delta y}$:

$$d I_x = \gamma \left(\frac{\delta v_x}{\delta y} \right)^2 dx dy dz$$

(Siehe Abb. 1. Geschwindigkeit und Schubspannung.)

Anm.: Diese Berechnung ist ein Teil der von der Technischen Hochschule Dresden als Dissertation angenommenen Arbeit "Reibung und Temperaturverlauf im Gleitlager". Die Arbeit wird demnächst - ohne die hier vorliegende Temperaturberechnung - veröffentlicht und ist am Lehrstuhl von Prof. Dr.-Ing. Heidebroek angefertigt. Die Versuche wurden an der dort befindlichen Lagerprüfmaschine durchgeführt.

Ebenso entsteht aus der axialen Bewegung in der z-Richtung:

$$(2) \quad d I_z = \tau_z \frac{\partial v_z}{\partial y} dx dy dz = \gamma \left(-\frac{\partial v_z}{\partial y} \right) z dx dy dz$$

Die Geschwindigkeit in der y-Richtung v_y ist sehr klein,

$$(3) \quad d I_y \approx 0.$$

Die Reibungswärme wird abgeführt durch die Flüssigkeit selbst und durch Wärmeleitung. Die Temperaturgefälle in der x- und z-Richtung sind bedeutend kleiner als das in der y-Richtung, die Wärmeleitung wird daher nur in der y-Richtung berücksichtigt.

Abb. 2 zeigt die in einem Raumelement $dy dy dz$ zu- und abgeführten Wärmemengen, der Übersichtlichkeit wegen jedoch nur in zwei Dimensionen. In der 3. Dimension z sind die Verhältnisse dieselben wie in der x-Richtung. (Siehe Abb. 2. Wärmebewegung in einem Flüssigkeitselement).

Wärmeleitung:

Das Öl tritt in x-Richtung in das Raumelement ein mit der Geschwindigkeit v_x , der Temperatur t und der Wärmemenge je sec:

$$(4) \quad \dot{W}_{01}^x = 0 \cdot \gamma \cdot t \cdot v_x dy dz.$$

Es tritt an der anderen Seite aus mit $v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx$, $t + \frac{\partial t}{\partial x} dx$ und

$$\begin{aligned} \dot{W}_{01}^x + \frac{\partial \dot{W}_{01}^x}{\partial x} dx &= 0 \cdot \gamma \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right) \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy dz \\ &= 0 \cdot \gamma \left(t \cdot v_x + v_x \frac{\partial t}{\partial x} dx + t \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy dz \end{aligned}$$

Folglich ist die im Element vom Öl aufgenommene Wärme

$$(5) \frac{\partial W_{01}^x}{\partial x} dx = \rho \cdot \gamma \left(v_x \frac{\partial t}{\partial x} + t \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) dx dy dz$$

Ebenso ist:

$$(6) \frac{\partial W_{01}^y}{\partial y} dy = \rho \cdot \gamma \left(v_y \frac{\partial t}{\partial y} + t \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) dx dy dz$$

$$(7) \frac{\partial W_{01}^z}{\partial z} dz = \rho \cdot \gamma \left(v_z \frac{\partial t}{\partial z} + t \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dx dy dz$$

Wärmeleitung:

Am Eintritt in das Element sei das Temperaturgefälle in y-Richtung = $-\frac{\partial t}{\partial y}$, dann wird eine Wärmemenge je sec zugeführt:

$$(8) W_1 = - \frac{\partial t}{\partial y} dx dy$$

Bei gleichem Gefälle $-\lambda \frac{\partial t}{\partial y}$ an der Austrittsseite wird auch die gleiche Wärmemenge wieder abgeführt. Eine zusätzliche Wärmeabfuhr aus dem Element selbst kann nur erfolgen, wenn sich das Temperaturgefälle auf der Strecke y um

$$= \frac{\partial \left(-\frac{\partial t}{\partial y} \right)}{\partial y} dy = - \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dy$$

größert.

Dann ist

$$W_1 + \frac{\partial W}{\partial y} = - \lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dy \right) dx dz$$

$$(9) \text{ und } \frac{\partial W_1}{\partial y} dy = + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dx dz$$

Die erzeugte Reibungsleistung, auf $\frac{\text{kcal}}{\text{sec}}$ ungerechnet, muß gleich dem Unterschied zwischen ab- und zugeführter Wärmemenge je sec sein:

$$(10) AdL_x + AdL_z = \frac{\partial W_{01}^x}{\partial x} dx + \frac{\partial W_{01}^y}{\partial y} dy + \frac{\partial W_{01}^z}{\partial z} dz + \frac{\partial W}{\partial y} dy$$

In diese Gleichung werden die Ausdrücke aus Glg. 1 bis 9 eingesetzt und die ganze Gleichung durch $dx dy dz$ dividiert:

$$(11) \quad \left. \begin{aligned} & \lambda \tau_x \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \\ & + \lambda \tau_z \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \end{aligned} \right\} = \begin{cases} 0 \cdot \gamma (v_x \frac{\partial t}{\partial x} + t \frac{\partial v_x}{\partial x}) \\ + 0 \cdot \gamma (v_y \frac{\partial t}{\partial y} + t \frac{\partial v_y}{\partial y}) \\ + 0 \cdot \gamma (v_z \frac{\partial t}{\partial z} + t \frac{\partial v_z}{\partial z}) \end{cases}$$

Die Gleichung läßt sich vereinfachen mit Hilfe des Kontinuitätsgesetzes, das bei konstanter Dichte in allgemeiner Form lautet:

$$(12) \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Da die Temperatur t des Elementes unabhängig von der Richtung ist, fallen die zweiten Glieder des Wärmeconvektionsanteils fort. Ferner ist $v_y = 0$. Die allgemeine Wärmeleitungsgleichung für die Schmierschicht des Lagers heißt demnach mit den dafür gültigen Vereinfachungen ($v_y = 0$, $dv_y = 0$, Wärmeleitung nur quer zur Strömungsrichtung):

$$(13) \quad \lambda \tau_x \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda \tau_z \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \cdot \gamma (v_x \frac{\partial t}{\partial x} + v_z \frac{\partial t}{\partial z})$$

x) Man kann die Gleichung auch aus der Fourierschen Differentialgleichung der Wärmeleitung

$$(14) \quad 0 \cdot \gamma \frac{dt}{dt} = \lambda (\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}) \quad (t = \text{Zeit})$$

ableiten, wenn man das vollständige Differential $\frac{dt}{dt}$ ausrechnet:

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dt} &= \frac{dt}{dt} + \frac{dt}{dx} \frac{dx}{dt} + \frac{dt}{dy} \frac{dy}{dt} + \frac{dt}{dz} \frac{dz}{dt} \\ &= \frac{dt}{dt} + v_x \frac{dt}{dx} + v_y \frac{dt}{dy} + v_z \frac{dt}{dz} \end{aligned}$$

$\frac{dt}{dt}$ ist dann nicht die zeitliche Temperaturänderung des Elements, sondern die in der Zeiteinheit zugeführte Wärmemenge $0 \cdot dz \cdot dy \cdot dz \cdot \gamma \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$ und damit = der negativen Reibungsleistung.

Der erste Ansatz 11 erweckt zunächst den Anschein, als ob Wärme auf zwei Arten durch Konvektion abgeführt werden könne; einmal, indem bei konstanter Geschwindigkeit und durchfließender Menge eine Temperaturerhöhung eintritt, und dann, indem bei konstanter Temperatur eine größere Menge abfließt. Der Fortfall der zweiten Glieder zeigt aber, daß letzteres nicht nur im ganzen, sondern auch in jeder Strömungsrichtung unmöglich ist. Wärmekonvektion muß stets mit einem örtlichen Temperaturanstieg verbunden sein.

Diese Erkenntnis ist wichtig für die Beurteilung der Wärmeabfuhr in dem Teil der Schicht, in dem die Temperaturkurve nicht mehr ansteigt. Sie gestattet ferner, die axiale Wärmeabfuhr zu beurteilen: Abgesehen von Versuchen ^{x)} mit kleiner Belastung und Verlagerung, bei denen die mangelhafte Durchmischung des Frischöls mit dem aus der unbelasteten Schale kommenden Öl zu einer niedrigeren Temperatur in der Mittelebene führt, ist die Temperatur in axialer Richtung praktisch konstant. Sie zeigt nur eine geringe Tendenz, von der Mitte nach der Seite zu ansteigen, etwa um 0 - 1°, bei hoher Umfangsgeschwindigkeit auch 2°. Innerhalb der Schicht findet demnach eine nennenswerte Wärmekonvektion in axialer Richtung nicht statt, und man kann mit einer gewissen Berechtigung annehmen, daß der kleine Temperaturanstieg etwa der Reibung infolge der axialen Strömungskomponente entspricht, daß also axiale Reibungsleistung und Wärmekonvektion sich ausgleichen. Das steht scheinbar im Widerspruch zu der Tatsache, daß im

^{x)} Alle hier angeführten Versuchsergebnisse sind der auf S. 1 erwähnten Arbeit des Verfassers entnommen. Das Versuchslager hat 220 mm ϕ und 300 mm Länge. Das Öl wird in der Teilfuge zugeführt.

wirklichen, dreidimensionalen Lager der größte Teil der erzeugten Wärme durch das seitlich aus tretende Öl abgeführt wird. Der Widerspruch läßt sich aber leicht klären:

Der Ölaustritt am seitlichen Rand ist von zwei Gesichtspunkten aus zu betrachten, dem der Kontinuität der Strömung und dem der Wärmebilanz.

Das Kontinuitätsgesetz wird dann automatisch gewahrt, wenn man, wie es bei der späteren Rechnung geschieht, für Schichtdicke, Geschwindigkeit, Druckanstieg usw. in jedem Querschnitt die im Versuch ermittelten Werte einsetzt; denn dann rechnet man mit der wirklichen Ölmenge. Eine Änderung der umlaufenden Menge infolge axialer Abströmung muß sich selbsttätig in irgend einer Weise im Verlauf der Schichtdicke oder des Drucks äußern, da Öl unter den hier auftretenden Drücken praktisch inkompressibel und der Spalt in der tragenden Schale mit Sicherheit gefüllt ist.

In der Wärmebilanz wirkt sich die mit dem Öl abgeführte Wärmemenge nicht in dem Längsstreifen aus, in dem das Öl axial austritt, sondern schon vorher in dem Teil des Umfangs, in dem es noch tangential strömt und dabei seine Temperatur erhöht. Maßgebend ist also nicht die Stelle, an der das warme Öl abgeführt wird, sondern die, an der ihm selbst die Wärme zugeführt und so sein Temperaturniveau gehoben wird.

Setzt man, wie angegeben, die Reibungsleistung der axialen Strömungskomponente = der ihrer Wärmekonvektion

$$A \approx \frac{\delta v_z}{\delta y} = \sigma \gamma v_z \frac{\delta z}{\delta y},$$

dann reduziert sich die dreidimensionale Gleichung 13 auf die zweidimensionale:

$$(15) \quad \lambda \tau_x \frac{\partial v_x}{\partial y} = \rho \gamma v_x \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$$

oder:

$$(16) \quad \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{c \gamma}{\lambda} v \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda \tau \frac{\partial v}{\partial y}$$

Die Indizes x sind jetzt überflüssig. x)

Zu bemerken ist noch, daß die Rückführung auf das zweidimensionale Problem exakt richtig wird für die Mittelebene des Lagers, in der aus Symmetrie-Gründen

$$v_x = 0 \text{ und } \tau_x = \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0 \text{ ist.}$$

Die mit Gleichung 16 erhaltene Wärmeleitungsgleichung des Lagers wird erst integrierbar durch Einsetzen der Strömungsgesetze. Das Ziel ist dabei, die verschiedenen abhängigen Veränderlichen τ, v usw. direkt als Funktion der unabhängigen Veränderlichen y darzustellen, und so eine Gleichung nur zwischen t und y zu erhalten.

Die Strömungsgesetze sind für die x y-Ebene:

$$(17) \quad \tau = \gamma \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$(18) \quad \frac{dv}{dx} = \frac{dv}{dy}$$

integriert:

$$(19) \quad \tau = \frac{dv}{dy} \gamma + \tau_0$$

x) Zu den Vorzeichen ist zu bemerken:

Die durch Leitung dem Element $dx \, dy \, dz$ entzogene Wärmemenge wird unabhängig davon, ob t mit y steigt oder fällt, umso größer, je stärker negativ $\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$ ist; positives $\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$ bedeutet Wärmezufuhr in das Element.

Es ist daher richtig, wenn $\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$ umso kleiner wird, je größer die erzeugte Wärmemenge $\lambda \tau \frac{\partial v}{\partial y}$ und umso größer, je größer die Wärmekonvektion $\frac{c \gamma}{\lambda} v \frac{\partial t}{\partial x}$.

$\frac{dp}{dx}$ ist im Lager in der y-Richtung konstant. 1) 0 88

(20) $\frac{dv}{dy} = \frac{\tau}{\eta}$

(21) $v = \int \frac{\tau}{\eta} dy + v_0 = \frac{dp}{dx} \int \frac{y dx}{\eta} + \tau_0 \int \frac{dx}{\eta} + v_0$

Gleichung 21 und die Wärmeleitungsgleichung 16, die v enthält, sind nur integrierbar, wenn $\eta = f(y)$ bekannt ist. Das ist aber nicht der Fall. Es ist nur bekannt, daß η die beiden der Wellen- und Schalentemperatur entsprechenden Randwerte η_w und η_s hat und daß es nicht = 0 wird. Da kein Anhaltspunkt für eine andere Funktion vorliegt, wird die einfachste Annahme gemacht,

$\eta = f(y) = \text{konstant} = \text{dem Mittelwert zwischen } \eta_w \text{ u. } \eta_s$ gesetzt und die Strömungsgleichungen in der üblichen Weise so integriert, als ob $\eta = \text{konstant}$ wäre. 2)

Wenn wie hier der Temperaturverlauf gesucht wird und die Zähigkeit stark von der Temperatur abhängt, ist die Annahme $\eta = \text{konstant}$ eine starke Beschränkung, Sie verliert aber etwas an Bedeutung, wenn man berücksichtigt, daß in Gleichung 16 η nicht selbst vorkommt, sondern nur indirekt in v , $\frac{dv}{dy}$ und t . Der Verlauf dieser Größe ist aber in erster Linie von dem Geschwindigkeits- und dem Druckgefälle abhängig; er wird durch die Veränderlichkeit von η nicht grundsätzlich geändert, sondern nur sozusagen moduliert. Am wenigsten wird t durch η berührt, denn Gleichung 19 zeigt, daß $t = f(y)$ eine Gerade ist und daß es für reine Schubströmung ($\frac{dp}{dx} = 0$) konstant ist, beides unabhängig davon, wie sich die beiden

- 1) Über den Stromlinienverlauf bei stark divergierenden Spalten, z.B. zwischen Rollen, vgl. Heidebrock. 1)
- 2) Gegebenenfalls könnte aus dem später berechneten Temperaturverlauf η bestimmt, in die Differentialgleichung eingesetzt und mit der Methode der fortschreitenden Näherung nochmals t ermittelt werden. Das Verfahren ist aber sehr umständlich und daher bei den hier sowieso unvermeidlichen Ungenauigkeiten nicht lohnend.

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dy} = \frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dy} \quad (20)$$

$$= \dots \quad (21)$$

Gleichung 19 und 20

enthalten sind mit Gleichung 17

und 21 zusammengefasst werden

und die resultierenden Formeln

mit Gleichung 17 zusammengefasst

werden. Die resultierenden

Formeln sind:

(22) $z = \gamma \frac{y}{h} - \frac{h}{2} \frac{dp}{dx}$

(23) $\frac{dz}{dy} = \frac{v}{h} - \frac{h}{2\gamma} \frac{dp}{dx}$

(24) $v = \frac{z_0}{\gamma} y + \frac{y^2}{2\gamma} \frac{dp}{dx}$

Hiermit können in Gleichung 16

alle von y abhängigen

Veränderlichen als Funktionen

von y dargestellt werden bis

auf $\frac{dt}{dx}$.

Die partielle Differentialgleichung

16 wäre an sich

aufzulösen als Doppelintegral

nach x und y . Der Verlauf

von $\frac{dt}{dx}$ ergibt sich dann aus

den Randbedingungen am

Anfang der Schicht. Mathematisch

ist aber dieser Weg nicht

durchführbar, außerdem ist

der Temperaturzustand am

Anfang der Schicht nicht

eindeutig bekannt. Hier wird

Faktoren γ und $\frac{dz}{dy}$ des Produktes $z = \gamma \frac{dz}{dy}$ mit y ändern. Nur der Randwert z_0 ist erst aus Gleichung 17 zu bestimmen und daher hiervon abhängig.

Mit der Annahme $\gamma = \text{konst.}$ und den Randbedingungen

$$y = 0 \quad v = 0 \quad z = z_0$$

$$y = h \quad v = v$$

ergeben sich die bekannten Strömungsformeln.

$$(22) \quad z = \gamma \frac{y}{h} - \frac{h}{2} \frac{dp}{dx}$$

$$(23) \quad \frac{dz}{dy} = \frac{v}{h} - \frac{h}{2\gamma} \frac{dp}{dx}$$

$$(24) \quad v = \frac{z_0}{\gamma} y + \frac{y^2}{2\gamma} \frac{dp}{dx}$$

Hiermit können in Gleichung 16 alle von y abhängigen

Veränderlichen als Funktionen von y dargestellt werden bis

auf $\frac{dt}{dx}$.

Die partielle Differentialgleichung 16 wäre an sich

aufzulösen als Doppelintegral nach x und y . Der Verlauf

von $\frac{dt}{dx}$ ergibt sich dann aus den Randbedingungen am

Anfang der Schicht. Mathematisch ist aber dieser Weg nicht

durchführbar, außerdem ist der Temperaturzustand am

Anfang der Schicht nicht eindeutig bekannt. Hier wird

daher nur die einfache Integration nach y durchgeführt

und $\frac{dt}{dx}$ als Funktion von y angenommen.

Durch den Versuch bekannt sind die Randwerte

$$y = 0 \quad \frac{dt}{dx} = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \text{Temperaturanstieg an der Schalen-Oberfläche.}$$

$$y = h \quad \frac{dt}{dx} = 0, \quad \text{da } t_w = \text{konstant ist.}$$

Es ist nicht gesagt, daß der Verlauf $\frac{dt}{dx} = f(y)$ zwischen

diesen beiden Randwerten an verschiedenen Punkten x , z der

Schicht dem gleichen Gesetz gehorcht. Als Arbeitshypothese

wird aber hier ein solches Gesetz angenommen, und zwar die einfachste Funktion, die den Randbedingungen genügt. Das ist die Gerade

$$(25) \quad \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\Delta t_0}{\Delta x} \frac{h - y}{h}$$

Diese Annahme kann nicht bewiesen werden, sie ist aber physikalisch vorstellbar. Sie bedeutet etwa, daß das Temperaturbild $t = f(y)$ sich mit fortschreitendem x stetig ändert, und sie wird z.B. der auch von Nücker (6) erwähnten Vorstellung gerecht, daß eine gewisse Ölmenge in der Nähe der Welle dauernd umläuft und ihre Temperatur wenig ändert, während das kalte Frischöl von außen hinzutritt und bei der laminaren Strömung naturgemäß in erster Linie außen weiterfließt und sich dort erwärmt.

Setzt man die Formeln für z , $\frac{\partial v}{\partial y}$, v und $\frac{\partial t}{\partial x}$ in Gleichung 16 ein, multipliziert aus und ordnet die Glieder,

dann ergibt sich:

$$(26) \quad \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = - \frac{c_k \cdot \Delta t_0}{\lambda} \frac{1}{h y} \cdot \frac{d p}{d x} y^2 + \frac{c_k}{\lambda} \frac{d p}{d x} \frac{h - y}{h} \cdot \frac{h - y}{h} - \frac{A}{\lambda} \frac{1}{h} \left(\frac{d p}{d x} \right)^2 - 2 \frac{A}{\lambda} \frac{1}{h} \frac{d p}{d x} y - \frac{A}{\lambda} \frac{1}{h} \frac{1}{h}$$

Die Gleichung enthält y in einfachen Potenzen. Sie ist daher integrierbar. Auffällig ist, daß y in allen Gliedern einmal im Nenner vorkommt. Wenn es hier auch ein Teil von Strömungsgliedern ist, die nach S. 9 als Ganzes weniger stark von t abhängen als y selbst, so liegt doch der Gedanke nahe, y auf die linke Seite zu bringen und die dem Öl entsprechende Funktion $y = f(t)$ einzusetzen. Z.B. gilt für das bei den Versuchen benutzte Öl im Bereich von $45^\circ - 80^\circ$ sehr gut die Funktion

der Temperatur veränderlich, können aber im Rahmen dieser Rechnung hinreichend genau konstant gesetzt werden.

Zum Schluß der Ableitung sei noch auf die in der Strömungs- und Wärmelehre bekannte Tatsache hingewiesen, daß eine dünne laminare Strömungsschicht als Ganzes eine "Grenzschicht" ist und daher in ihr ein stetiger Temperaturverlauf von der Flüssigkeit zur Wand erfolgt. Der Begriff "Wärmeübergang" und seine Darstellung durch die Übergangszahl α und einen Temperatureprung gilt nur dann, wenn die Vorgänge in der Grenzschicht summarisch erfaßt werden gegenüber der übrigen Strömung.

Stoffwerte des Öls:

Das spezifische Gewicht ist bei 50° etwa $\gamma = 880 \frac{kg}{m^3}$. Für die spezifische Wärme c und die Wärmeleitfähigkeit λ gibt Kraußold ²⁾ die Ergebnisse eigener Messungen und von amerikanischen Forschern abgeleitete Formeln an. Er findet für das von ihm untersuchte Maschinenöl BE 22 der Rheinisch-Ossag mit einem

$$\gamma_{15^\circ} = 929,23 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 0,418 + 0,0009 t; \text{ bei } t = 50^\circ: c = 0,469 \frac{kcal}{kg^\circ C}$$

$$\lambda = 0,115 - 0,00075 t; \text{ " } 50^\circ: \lambda = 0,0775 \frac{kcal}{m \cdot h^\circ C}$$

Die von Kraußold ²⁾ zitierte Formel von Fortsch und Whitman lautet

$$c = \frac{(t + 390)(2,10 - \gamma_{15^\circ})}{1128}$$

Mit $\gamma_{15} = 0,902$ des hier verwendeten Öls ergibt sich daraus:

$$c = 0,414 + 0,00105 t; \text{ bei } t = 50^\circ c = 0,467 \frac{kcal}{kg^\circ C}$$

Da es sich bei Krausold um ein ähnliches Öl wie hier handelt, werden seine Angaben übernommen. Die Temperaturunterschiede betragen bei dem folgenden Beispiel $\approx 15^\circ$; in Rahmen dieser Rechnung kann daher der Wert für eine mittlere Temperatur von etwa 50° eingesetzt werden mit

$$\alpha = 0,47 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$\lambda = 0,075 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h}^\circ\text{C}} \quad \alpha = 0,000215 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{sec}^\circ\text{C}}$$

Durchführung der Rechnung:

In Zahlentafel 1 ist der Temperaturverlauf quer zur Schicht nach Gleichung 28 berechnet für den Punkt $x = 102,5$ mm, $z = 0$ (Mittelsebene) des Versuchs 164 mit $n = 600$ U/min $V = 6,9$ m/s $t_b = 51^\circ$ $P = 7,5$ t

t_b ist die Mitteltemperatur, P die Belastung des Lagers.

Der Verlauf der Temperatur in Umfangsrichtung ist für diesen Versuch in Abb. 3 dargestellt. Die Abszisse $x = 102,5$ entspricht dem Längsschnitt 3 in der Mitte zwischen Maßpunkt 3 und 4. Es ist hier:

$$t_s = 45,2^\circ \quad \gamma_s = 3,96 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

$$t_w = 53,8^\circ \quad \gamma_w = 2,64 \cdot 10^{-3} \quad "$$

$$\Delta t = 8,6^\circ \quad \gamma_m = 3,30 \cdot 10^{-3} \quad "$$

Schichtdicke $h = 0,164 \cdot 10^{-3}$ m

Durch zeichnerische Differentiation der Temperatur- und Druckkurven ergibt sich:

$$\frac{\Delta t_s}{\Delta x} = 0,72^\circ/\text{cm} = 72^\circ/\text{m}$$

$$\frac{dp}{dx} = 1,45 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$z_s = \gamma_m \frac{V}{h} - \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} = 138,9 - 118,9 = 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Zahlentafel 1. Berechnung des Temperaturverlaufs.

Versuch 164 n = 600, t₀ = 51°, P = 7,5 t

y	=	0	30	60	90	120	150	164
$\frac{y}{h}$	=	0	0,183	0,366	0,549	0,732	0,915	1,0
H.y	=	-	0,72	1,45	2,17	2,89	3,62	3,95
E ₁ y ³	=		0,04	0,30	1,02	2,42	4,73	6,16
E ₁ y ⁴	=		0,02	0,27	1,38	4,38	10,70	15,23
-D ₁ y ⁵	=		-	-0,07	-0,55	-2,31	-7,06	-10,97
Summe 1	=	-	0,06	0,50	1,85	4,49	8,37	10,42
-G ₂ y ²	=	-	0,01	-0,02	-0,05	-0,10	-0,15	-0,18
-F ₂ y ³	=	-	0,01	-0,07	-0,23	-0,55	-1,08	-1,40
-E ₂ y ⁴	=	-	-	-0,07	-0,38	-1,20	-2,93	-4,17
Summe 2	=	-	0,02	-0,16	-0,66	-1,85	-4,16	-5,75
Δt	=	0	0,8°	1,8°	3,4°	5,5°	7,8°	8,6°
t	=	45,2°	46°	47°	48,6°	50,7°	53°	53,8°
$\frac{kg}{m}$	=	0,00396	0,0038	0,00365	0,0034	0,0030	0,0027	0,00264

In der gleichen Weise wie für Längsschnitt 3 wird der Temperaturverlauf für folgende Längsschnitte berechnet:

Längsschnitt 1, $x = 40$ mm $\tau_0 = -12,2 \text{ kg/m}^2$
(Meßpunkt 1) (Rückströmung in der Nähe der Schale)

Längsschnitt 17, $x = 198$ mm $\frac{dp}{dx} = 0$ (Druckmaximum)

" 18, $x = 238$ " $t_s = t_w$

" 19, $x = 258$ " $h = h_0$ (Engster Querschnitt)

" 20, $x = 306$ " $\frac{\Delta t_0}{\Delta x} = 0$ (Maximum d. Temperatur)

Die Berechnungen gelten für die Symmetrieebene des Lagers, in der der axiale Druckverlauf seinen Höchstwert hat. Nach der Seite fällt der Druck und sein Differentialquotient $\frac{dp}{dx}$ ab. Die Form der Temperaturkurven hängt ab, wie später erläutert wird, von dem Verhältnis der Schubströmung zur überlagerten Druckströmung. An seitlich gelegenen Stellen sind daher ähnliche Temperaturkurven zu erwarten wie an Stellen gleicher überlagerter Druckströmung in der Mittelebene, nur gilt die Beschränkung auf das zweidimensionale Problem in dieser genau, außerhalb der Mitte aber nur in der auf Seite 3 ff. erörterten Näherung.

Abb. 4 zeigt die für die verschiedenen Punkte berechneten Temperaturkurven abhängig von der dimensionslos gemachten Abszisse $\frac{y}{h}$ (ausgezogene Linien). Die Temperatur der Welle ist praktisch konstant, da die Wärmeleitfähigkeit des Stahls etwa 400 mal so groß wie die des Öls ist und da die Welle sich in $1/10$ sec einmal voll dreht. Der Ausgleich innerhalb der rasch umlaufenden, großen Masse erfolgt wesentlich schneller als die Wärmebewegung zwischen dem schlecht leitenden Öl und der Welle.

Durch Einsetzen der zu jeder Temperatur gehörigen Zähig-

EASTMAN

keit erhält man den Zähigkeitsverlauf in Abb. 5.

Abb. 6 und die zugehörige Zahlentafel 2 geben zur Temperaturkurve des Punktes 3 die zugehörige v -Kurve und die Glieder der Wärmebilanz wieder, die man durch Multiplikation der Gleichung 26 bzw. 27 mit λ und Ordnen der Glieder in der Form erhält: Reibungsleistung = durch Konvektion und durch Leitung abgeführte Wärme. Auf die Annahme $\frac{d^2 t}{dy^2} = f(y) = \text{Gerade}$ wird in Abb. 6 nochmals hingewiesen.

Zahlentafel 2. Glieder der Wärmebilanz.

Versuch 164, $n = 600$, $t_b = 51^\circ$, $P = 7,5 \text{ t}$

Dimension: $\frac{\text{kcal}}{\text{cm}^3 \text{ sec}}$ = $10^{-6} \frac{\text{kcal}}{\text{cm}^3 \text{ sec}}$

$y =$	0	30	60	90	120	150	164	
$\frac{y}{h} =$	0	0,183	0,366	0,549	0,732	0,915	1,0	
$2\lambda G_2 = + 280$	+ 280	+ 280	+ 280	+ 280	+ 280	+ 280	+ 280	
$5\lambda F_2 y =$		+1240	+2490	+3740	+4980	+6230	+6800	
$2\lambda E_2 y^2 =$		+1340	+5370	+12080	+21480	+33600	+40100	
Reibung (A)		+ 280	+2860	+8140	+16100	+26740	+40100	+47200
$\lambda E_1 y =$		+5420	+10840	+16270	+21700	+27100	+29600	
$\lambda E_1 y =$		+4900	+19600	+44100	+78400	+122400	+146300	
$\lambda D_1 y^3 =$		-1080	- 8640	-29180	-69100	-135000	-176100	
Konvektion (B)	0	+9240	+21800	+31200	+31000	+ 14500	0	
$\frac{d^2 t}{dy^2} (0) =$	+280	-6380	-13660	-15100	- 4260	+ 25600	+47200	

Erörterung der Abbildungen.

Es ist zunächst nachzuprüfen, inwieweit sich aus den Ergebnissen der Rechnung eine Bestätigung oder ein Widerspruch zu den gemachten Annahmen entnehmen läßt. Das gilt besonders für die Annahme, daß $\frac{\partial t}{\partial x}$ zwischen seinen Randwerten linear mit $(h - y)$ zunimmt, denn sie ist vollkommen willkürlich, während man z.B. über die Auswirkung der Annahme $\eta = \text{konst.}$ von vornherein gewisse Aussagen machen kann (s. S. 8).

Wenn die Unterschiede ∂t für alle x auf jedem kleinen Weg ∂x proportional $(h-y)$ sein sollen, dann müssen auch bei einem endlichen Wert $(x_2 - x_1)$ die Unterschiede zwischen zwei Temperaturkurven annähernd proportional $(h-y)$ sein. Eine genaue Bestätigung erwartet man hier allerdings nicht, weil jene Annahme nur als Näherung gedacht ist und auch, weil sich h ändert und die Punkte mit gleichen $\frac{y}{h}$ nicht unbedingt dem gleichen Stromfaden angehören müssen.

Auffällig ist, daß Temperatur-Kurve 1 in Abb. 4 die Kurve 3 schneidet und demnach im rechten Teil ein Temperaturabfall stattfinden soll. Das widerspricht eindeutig unserer Annahme, und es ist auch unwahrscheinlich, daß im Gebiet hoher Geschwindigkeit keine Wärme mit dem Öl fortgeführt werden soll - Wärmeabfuhr durch Konvektion ist nach S. 6 nur bei Temperaturerhöhung möglich. Im Gebiet des Längsschnitts 1 ist demnach die Annahme $\frac{\partial t}{\partial x} = c (h-y)$ falsch. Zwischen den Kurven 1, 17, 18 und 19 bestätigt sie sich dagegen recht gut.

Um den Fehler der Kurve 1 nachzugehen, sind in Abb. 4 zwei weitere Temperaturkurven 3' und 1' für Längsschnitt 1 und 3 eingetragen (gestrichelt gezeichnet), die mit parabolischer Annahme:

Table with multiple columns and rows, containing numerical data and some text. The text is mirrored from the reverse side of the page. Some rows are labeled with (A), (B), and (C). The table appears to be a calculation or data recording sheet related to the technical document.

$$(30) \quad \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\Delta t_0}{\Delta x} \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2 \right]$$

berechnet sind. Die Differentialgleichung heißt dann

$$(31) \quad \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = - \frac{c \gamma}{\lambda} \frac{\Delta t_0}{\Delta x} \frac{1}{2R^2} \frac{d\rho}{dx} y^4 - \frac{c \gamma}{\lambda} \frac{\Delta t_0}{\Delta x} \frac{\tau_0}{\eta_0} y^3 + \frac{c \gamma}{\lambda} \frac{\Delta t_0}{\Delta x} \frac{1}{2R^2} \frac{d\rho}{dx} y^2 + \frac{c \gamma}{\lambda} \frac{\Delta t_0}{\Delta x} \frac{\tau_0}{\eta_0} y - \frac{A}{\lambda} \frac{1}{\eta_0} \left(\frac{d\rho}{dx}\right)^2 y^2 - 2 \frac{A}{\lambda} \frac{\tau_0}{\eta_0} \frac{d\rho}{dx} - \frac{A}{\lambda} \frac{\tau_0}{\eta_0}$$

und die Temperaturgleichung ist von der Form:

$$(32) \quad t = - A_1 y^6 - B_1 y^5 + C_1 y^4 + F_1 y^3 - E_2 y^4 - F_2 y^3 - G_2 y^2 + H y + t_0$$

Die Konstanten E_2, F_1, F_2, G_2 sind dieselben wie in Glg. 26-29.

Die Kurven liegen tiefer als die alten. Auf die physikalischen Gründe hierfür wird später eingegangen, vorerst sollen nur formal die berechneten Kurven mit dem Ansatz verglichen werden. Deshalb sind in Abb. 7 die Temperaturunterschiede zwischen je zwei benachbarten Längsschnitten eingetragen, außerdem die die Annahme entsprechende Gerade und Parabel. Es zeigt sich, daß die Kurve $\Delta l = 3$ unter der Geraden liegt, die Kurve $\Delta l = 3'$ dagegen über der Parabel. Daher ist anzunehmen, daß sich zwischen der Geraden und der Parabel Annahmen

$\frac{\partial t}{\partial x} = f(y)$ finden lassen, - sie müssen nicht für alle Längsschnitte zwischen 1 und 3 dieselben sein und sie müssen auch nicht einem einfachen mathematischen Gesetz gehorchen -, deren Integral $\int \frac{\partial t}{\partial x} dx$ vom Längsschnitt 1 bis 3 entlang einem Strahlfaden = dem Unterschied der für 1 und 3 berechneten Temperaturkurven ist. Auf diese Weise wäre die Stetigkeit in der x-Richtung hergestellt. Die Aufgabe ist allerdings praktisch schwer durchführbar. Im Rahmen dieser Untersuchung genügt es, festzustellen, daß der richtige Verlauf $\frac{\partial t}{\partial x} = f(y)$ zwischen der Geraden und der Parabel und damit die richtige Temperaturkurve

zwischen 1 und 1' bzw. 3 und 3' zu erwarten ist.

Will man weitere Vermutungen anstellen, dann ist wahrscheinlich, daß im Längsschnitt 1 der Verlauf $\frac{t}{x}$ stärker parabolisch ist und nach dem Längsschnitt 3 zu flacher wird.

Entsprechend mögen die Temperaturkurven in Abb. 4 etwa mit den Linien v_1 und v_3 zusammenfallen. Die Tendenz zum flacheren Verlauf von $\frac{t}{x}$ bei fortschreitendem x ist ohne Zweifel da, denn die in Abb. 8 dargestellten Linien des Temperaturanstiegs zwischen Schnitt 3 und 17, 17 und 18, 18 und 19 liegen schon über der Geraden, sie wären also durch einen entsprechend nach unten gekrümmten $\frac{t}{x}$ -Verlauf zu korrigieren. Die Abweichungen von der Geraden sind hier aber gering, die Fehler dieser Temperaturkurven werden im Hinblick auf die Stetigkeit in der x -Richtung nicht sehr groß sein.

Die seitherigen Betrachtungen zeigen in ihren Ergebnissen eine gewisse Übereinstimmung mit einer ganz anderen Betrachtungsweise, nämlich der Prandtl-Latzko'schen Theorie der Analogie zwischen stofflicher Strömung und Wärmeströmung.

Diese Theorie sagt aus (s. Latzko⁴⁾ und Merkel⁵⁾), daß der Transport von Wärme nach denselben Gesetzen erfolgt wie der von Impuls und daß sich vom Geschwindigkeitsverlauf Rückschlüsse auf den Temperaturverlauf ziehen lassen. Eine vollständige Analogie ist aber nur zu erwarten, wenn die Prandtl'sche Zahl $Pr = \frac{\nu}{a} = 1$ ist. ν ist die kinematische Zähigkeit und $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ die "Temperaturleitfähigkeit". Bei Gasen ist $Pr \sim 1$, bei Flüssigkeiten dagegen nicht. Im vorliegenden Fall ist Pr etwa 500 + 900, je nach der Temperatur. Die Voraussetzung für die Gültigkeit der Prandtl'schen Theorie ist demnach nicht erfüllt. Trotzdem ist es bemerkenswert, daß die

oben angestellten, davon unabhängigen Überlegungen zu Temperaturkurven führen, die den Geschwindigkeitskurven qualitativ ähnlich sind. Die Geschwindigkeit ist in Abb. 4 als Kurve v_1 , v_3 und v_{17} so aufgetragen, daß die Umfangsgeschwindigkeit der Welle, also der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Welle und Schale, maßstäblich = dem Temperaturunterschied zwischen beiden gesetzt ist und die Geschwindigkeiten der Zwischenschichten im richtigen Verhältnis dazu stehen. Im Längsschnitt reiner Schubströmung ($\frac{dp}{dx} = 0$, IS 17) verläuft die Temperaturkurve annähernd gradlinig und analog der Geschwindigkeitslinie. Ebenso stimmt die v -Kurve im Längsschnitt 3 gut mit der Temperaturkurve 3 überein. Im Längsschnitt 1 liegt die Geschwindigkeitskurve zwischen der Temperaturkurve 1 mit geradlinigen $\frac{dt}{dx}$ -Verlauf und der Kurve 1' mit parabolischem Verlauf, aber näher an letzterer. Ein ähnliches Ergebnis ergab sich bei der Diskussion der Annahme $\frac{dt}{dx}$ auf S. 12:

Im Druckabfall-Gebiet ist es nicht möglich, einen unmittelbaren Vergleich zwischen Temperatur- und Geschwindigkeitskurve zu ziehen, da der Temperaturabfall von der Schale zur Welle erfolgt. Eine Parallele ist aber insofern da, als die Druckströmung hier in der Bewegungsrichtung erfolgt und die Geschwindigkeitskurven ebenso wie die Temperaturkurven nach oben gekrümmt sind.

Zusammenfassend sei nochmals darauf hingewiesen, daß die Funktion $\frac{dt}{dx} = f(y)$ wahrscheinlich nicht einem Gesetz von einfacher, mathematischer Form gehorcht und daß sie auch nicht für alle Punkte der Schicht dem gleichen Gesetz gehorchen muß. Wenn man ^{aber} überhaupt den Temperaturverlauf berechnen will,

muß man - wie auch bei allen anderen Berechnungen der hydrodynamischen Lagertheorie - mit Vereinfachungen arbeiten, da die Differentialgleichung der Wärmebilanz nicht in allgemeiner Form integrierbar ist. Die seitherigen Erörterungen haben gezeigt, daß die erhaltenen Kurven die Berechtigung der Annahmen als Näherungen bestätigen.

Reibungsleistung und Wärmeabfuhr.

In Längsschnitt 1 und 3, Abb. 4, und allgemein bei Druckanstieg und rückwärts gerichteter Druckströmung steigt v mit y zunächst langsam an oder ist sogar negativ und wächst dann nahe an der Welle sehr rasch. Ebenso verhalten sich die Reibungsleistung (A in Abb.6) und die Temperaturkurve.

In der Anmerkung über die Vorzeichen auf S. 7 wurde festgestellt, daß negatives $\frac{d^2t}{dy^2}$ und nach oben gekrümmte t -Kurve Wärmeabfuhr durch Leitung aus einem Schichtelement bedeuten, eine nach unten gekrümmte Kurve aber Wärmezufuhr durch Leitung.

Die Temperaturkurve 3 hat an der Welle einen negativen 1. Differentialquotienten $\frac{dt}{dy}$, sie nimmt eine erhebliche Wärmemenge von der heißen Welle durch Leitung auf. In den ersten Schichten wird weitere Wärme durch Leitung abgegeben (Q_2 in Abb.6) und außerdem in zunehmendem Maße durch Wärme-konvektion (B). Von dem Wendepunkt W ab ist die Kurve nach unten gekrümmt, die Ölteilchen nehmen Wärme durch Leitung auf, um sie durch Konvektion abzugeben (Q_1 = negativer Wert). Die Umwandlung der durch Leitung aufgenommenen Wärme in Temperaturerhöhung des Teilchens bei seiner Fortbewegung, also Abgabe durch Konvektion, kommt noch stärker zum Ausdruck in den Kur-

ven mit parabolisch angenommenen $\frac{d^2t}{dx^2}$ - Verlauf. Sie sind stark nach unten gekrümmt, und das Öl nimmt sogar von der kalten Schale Wärme durch Leitung auf, um sie durch Konvektion abzuführen.

Im Längsschnitt reiner Schubströmung, $\frac{dp}{dx} = 0$, verläuft die Temperatur im mittleren Teil fast geradlinig, es fließt eine konstante Wärmemenge von den der heißen Welle benachbarten Schichten zur kälteren Schale. Die im Öl entstehende Wärme wird unabhängig davon durch Konvektion abgeführt.

In dem Gebiet kleiner Schichtdicke und großer Druckströmung in der Bewegungsrichtung kehren sich die Verhältnisse um. Hier sind die Temperaturkurven nach oben gekrümmt, ein Beweis, daß der Anteil der Wärmeleitung immer größer wird und die Konvektion zurücktritt. Obwohl nach der hier gemachten Annahme der Temperaturanstieg $\frac{d^2t}{dx^2}$ in der Schicht proportional dem Randwert $\frac{\Delta t_0}{\Delta x}$ zurückgeht (vgl. S. 9) und für $\frac{\Delta t_0}{\Delta x} = 0$ sogar jede Wärmeabfuhr durch Konvektion ausgeschaltet ist, genügt eine Temperaturerhöhung in der Mitte der Schicht um 1° gegenüber der Schale, um die entstehende Wärme durch Leitung abzuführen. Da eine solche Erhöhung ohne weiteres möglich ist, ist bewiesen, daß das angenommene Gesetz für $\frac{d^2t}{dx^2}$ auch im Gebiet kleiner Schichtdicke und entsprechend großen Geschwindigkeitsgefälles durchaus hinreicht, um die Abfuhr der entstehenden Reibungswärme zu erklären.

Auf die Reibungsleistung hat die Art der Annahme $\frac{d^2t}{dx^2}$ keinen Einfluß, nur auf ihre Aufteilung in Abfuhr durch Konvektion und Leitung. Ebenso wirkt sich die zweite wichtige Vereinfachung unserer Rechnung, das Einsetzen eines konstanten Mittelwertes der Zähigkeit, weniger im Gesamtbetrag der Reibung

als in deren Aufteilung entlang der y-Achse aus.

Im ganzen erhalten wir das folgende Bild der Wärme-
strömung im Lager. Es ist nicht nur für diesen Versuch, sondern
für Lager solcher Art allgemein gültig, da es sich aus der Art
der Überlagerung von Schub- und Druckströmung ergibt. Nur in den
seltenen Fällen, in denen die Welle gekühlt wird, ändern sich
die Verhältnisse.

Im Anfang der tragenden Schale, im Gebiet des
Druck- und Temperaturanstiegs, konzentriert sich die Reibung
sehr stark in der Nähe der Welle.

Da das Öl dort sehr rasch fließt, kann es die ent-
sprechende Wärmemenge zwar annähernd, aber nicht immer voll-
ständig abführen und jedenfalls kann es nicht zusätzliche
Wärme aus der Welle aufnehmen. Die von ihr abgegebene Wärme
fließt vielmehr durch die ersten Schichten hindurch und wird
erst von den äußeren Schichten mitgeführt, zu deren Tempera-
turerhöhung sie gleichzeitig dient. Die an die Schale abgege-
bene Wärme ist, besonders ^{im} ersten Teil der tragenden Schicht,
gering, es ist sogar nicht ausgeschlossen, daß dort der Schale
Wärme durch Leitung entzogen wird (Kurve 1' in Abb. 4).

Im zweiten Teil der tragenden Schicht, im Gebiet
des engen Spalts und des Druckabfalls, wird die entstehende
Wärme im Gegensatz zu der landläufigen Vorstellung nicht nen-
nenswert durch Konvektion, sondern hauptsächlich durch Wärme-
leitung abgeführt.

Es ist nicht gesagt, dass sie von der Schale auch
weiter radial an die Außenluft abgeführt wird, sondern es wird
sicher ein Teil in der Schale zurück zu den kälteren Stellen
am Anfang der Schicht geleitet. Der so entstehende innere
Wärmeleitungsstrom macht es auch verständlich, daß an der

inneren Oberfläche der Schale erhebliche Temperaturunterschiede auftreten können, obwohl sie ein massives Gießstück von 40 mm Dicke ist.

Überhaupt sehen wir, daß die Wärmeleitung bei der Beurteilung des Wärmeumsatzes auch in einem Lager mit starker Ölkühlung eine erhebliche Rolle spielt, und zwar weniger in der Gesamtbilanz ^{x)} als bei der Beurteilung der inneren Wärme-strömungen und der sich daraus bildenden Temperaturkurven.

Allgemein wird eben dort, wo ein Temperaturgefälle auftritt, zwangsläufig auch Wärme weitergeleitet, und umgekehrt ist die Wärmeleitung ein Maß für die Form der Temperaturkurven. Mathematisch kommt das in dem Differentialquotient $\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$ zum Ausdruck.

Zusammenfassung, Voraussetzungen und Grenzen der Ableitung.

Zweck dieses Abschnitts ist, ein Bild des Temperaturverlaufes quer zur Schmierschicht zu erhalten. Die partielle Differentialgleichung der Wärmebilanz enthält so viele, gegenseitig abhängende Veränderliche, daß eine Integration in der allgemeinen Form nicht möglich ist. Es mußten daher eine Reihe Vereinfachungen und Annahmen vorgenommen werden:

- x) Eine überschlägige Gegenüberstellung von Reibungsleistung und zugeführter Ölmenge, multipliziert mit dem Temperaturunterschied des ein- und austretenden Öls, ergibt, daß in der Gesamtbilanz bei dem untersuchten Versuch etwa 3/4 der Wärme an das Öl und 1/4 durch Leitung und Strahlung abgegeben wird.

1. Die Strömungs- und Wärmeleitungsgleichungen werden so integriert, als ob die Zähigkeit γ abhängig von y konstant sei.
2. Es wird angenommen, daß die Temperaturänderung in der Strömungsrichtung $\frac{dt}{dx}$ nach einem einfachen Gesetz (Gerade oder Parabel) vom Wert 0 an der Welle auf den gemessenen Wert $\frac{\Delta t_0}{\Delta x}$ an der Schale ansteigt.
3. Die Beschränkung auf den zweidimensionalen Zustand ist für die Mittelebene aus Symmetriegründen richtig und läßt sich auch sonst aus den Wärmeleitungsgesetzen recht gut begründen.

Die Richtigkeit dieser Annahmen wird untersucht. Mit ihnen ergibt sich eine Gleichung zwischen t und y . Sie gilt jeweils nur für einen Punkt x , z , da $\frac{dt}{dx}$ sich nicht nur mit x , sondern auch mit z ändert.

Die Berechnung stützt sich auf die im Versuch gemessenen Randbedingungen an Schale und Welle. Sie kann nicht zu quantitativ genauen Temperaturkurven führen, aber sie liefert brauchbare Näherungen. Ferner will sie ein qualitatives Bild der Wärmeerzeugung und Wärmeabfuhr in der Schmie schicht geben und gestatten, den Strömungsvorgang auch von der wärmetechnischen Seite aus zu verfolgen.

Quellenverzeichnis.

- 1) Heidebroek: Zur Theorie der Flüssigkeitsreibung zwischen Gleit- und Wälzflächen. Zeitachr. Forschung Bd. 6, 1935, S.161.
- 2) Krausold: Die Wärmeübertragung bei zähen Flüssigkeiten in Rohren. VDI-Forschungsheft 351, 1931.
- 3) Landolt-Börnstein: Physikalisch-Chemische Tabellen. 4. u. 5. Aufl., Berlin.
- 4) Latzko: Wärmeübergang an einem turbulenten Flüssigkeits- oder Gasstrom. Zeitschr. f. angew. Math. u. Mechanik, 1921, S. 268.
- 5) Merkel: Grundlagen der Wärmeübertragung. Th. Steinkopff, 1927.
- 6) Nücker: Über den Schmiervorgang im Gleitlager. VDI-Forschungsheft 352, 1932.

FILM

Verzeichnis der Abbildungen.

- Abb. 1 Geschwindigkeit und Schubspannung.
- 2 Wärmebewegung in einem Flüssigkeitselement.
- 3 Temperaturverlauf bei Versuch 164, $n = 600$,
 $t_b = 51^\circ$, $P = 7,5$ t.
- 4 Berechneter Temperaturverlauf quer durch die
Ölschicht.
- 5 Zugehöriger Zähigkeitsverlauf.
- 6 Vergleich von Temperatur- und Geschwindig-
keitsverlauf; Glieder der Wärmebilanz abhän-
gig von $\frac{y}{h}$.
- 7 Unterschiede zwischen den Temperaturen 1
und 3 bzw. 1' und 3'.
- 8 Unterschiede zwischen den Temperaturkurven 3, 17,
18 und 19.

SAFETY

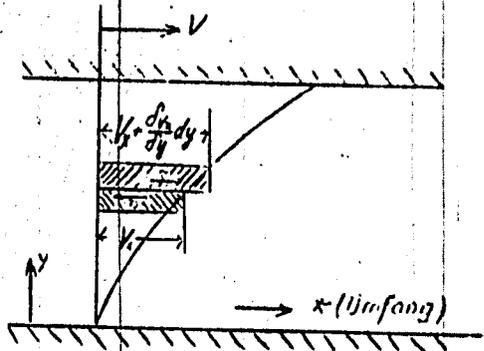


Abb. 1

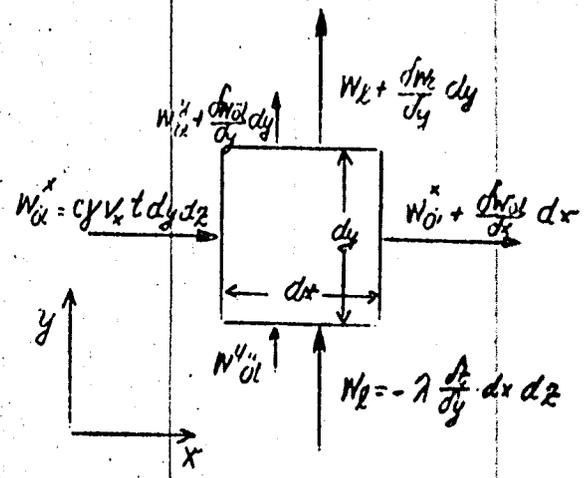
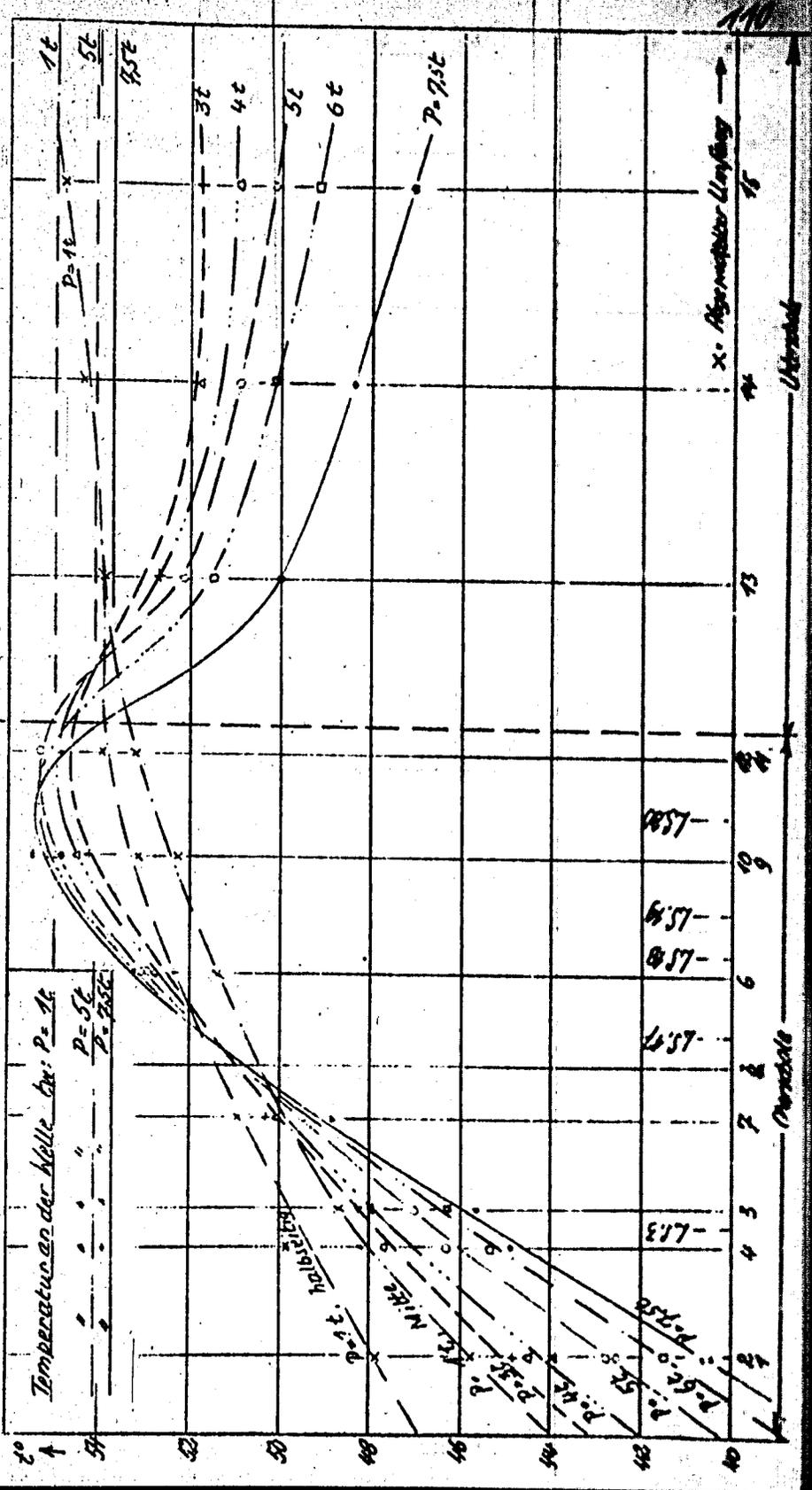
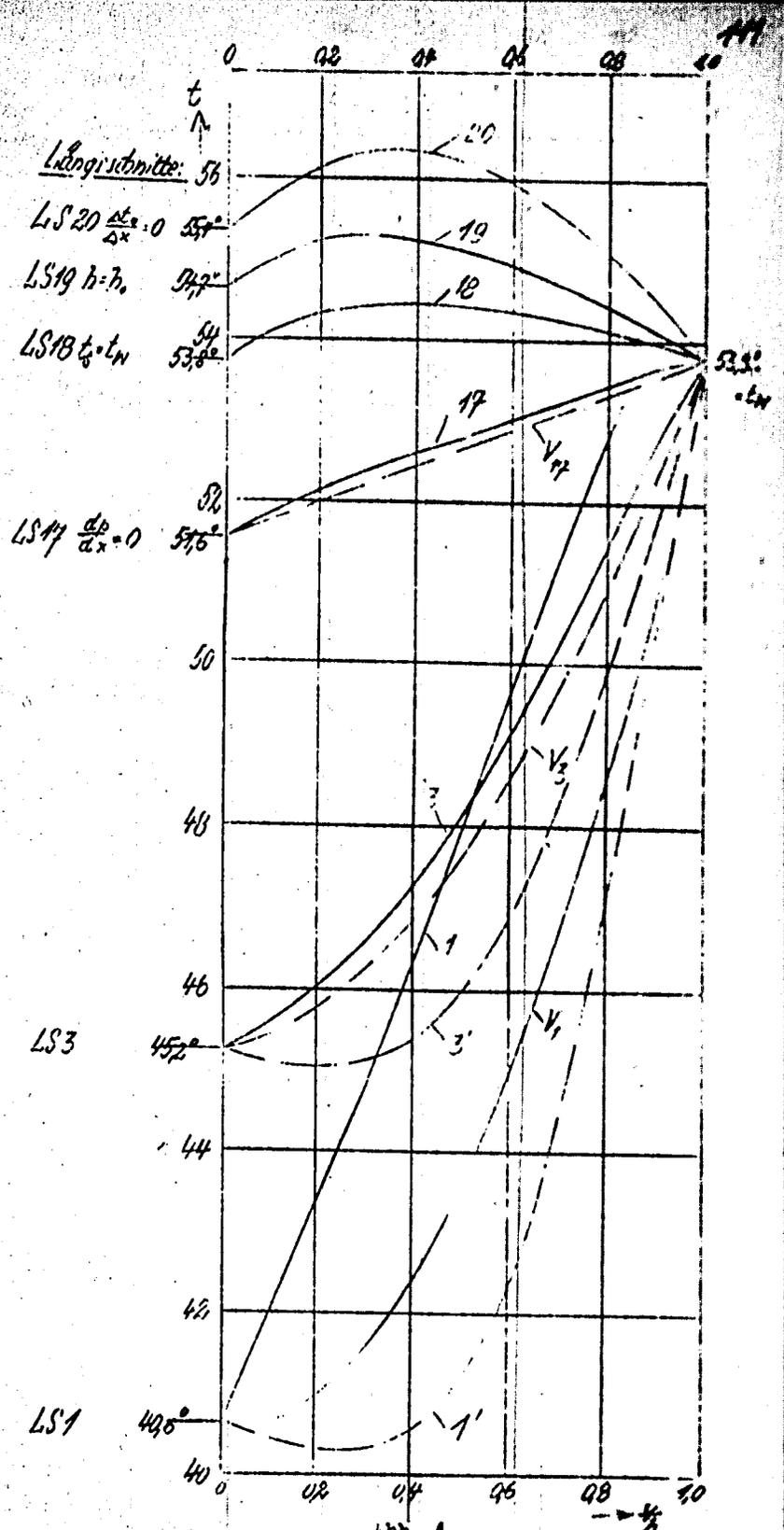


Abb. 2

33

Abb. 3





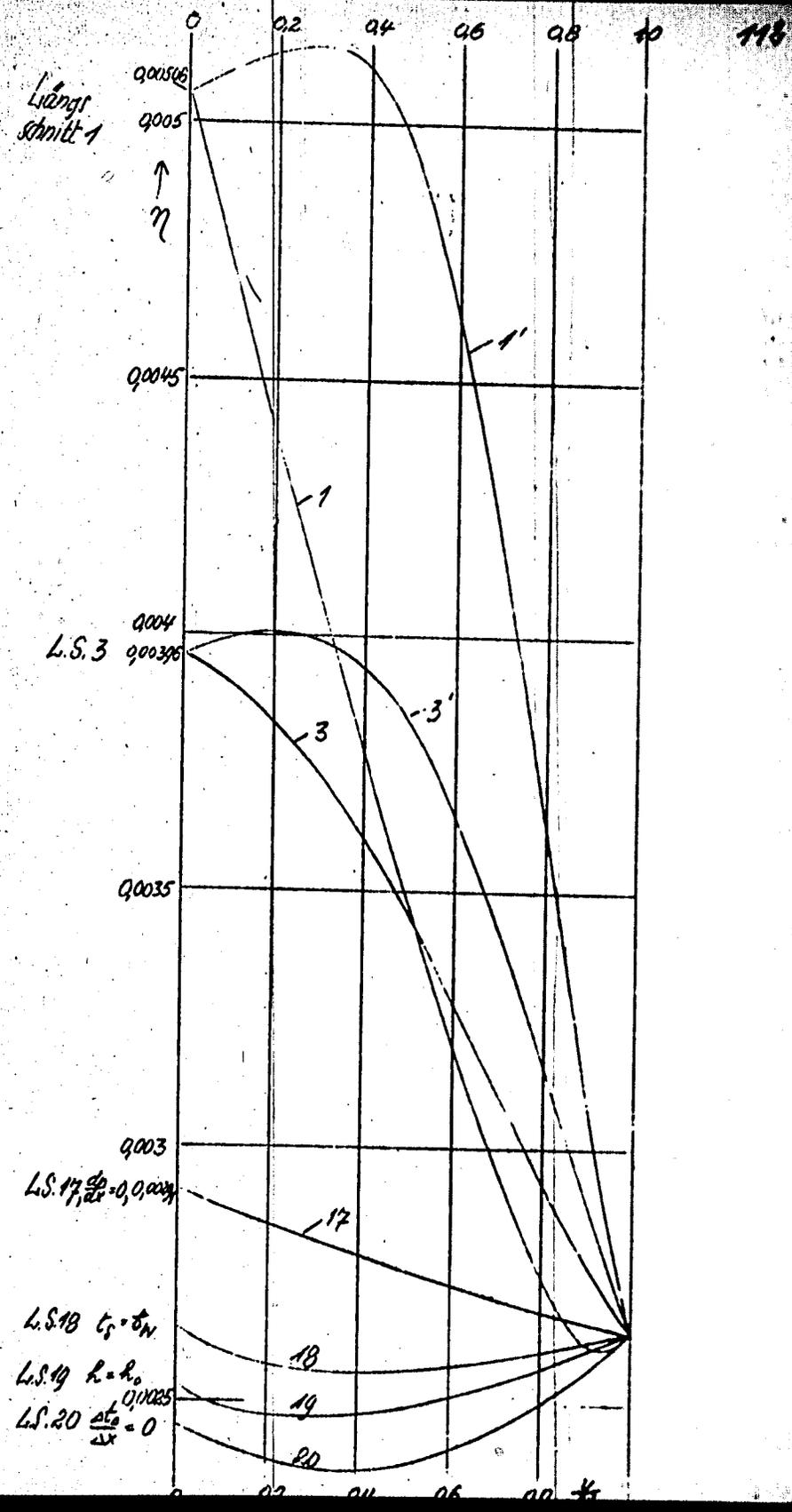
4

1200
1200
1200

1200

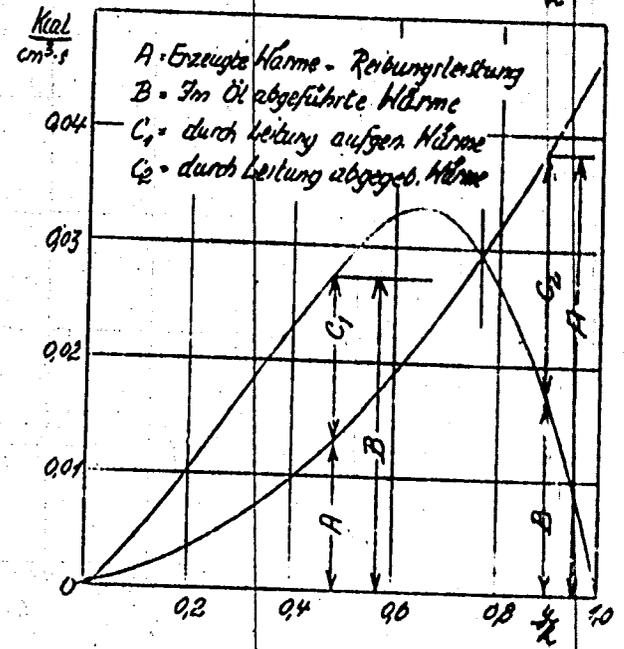
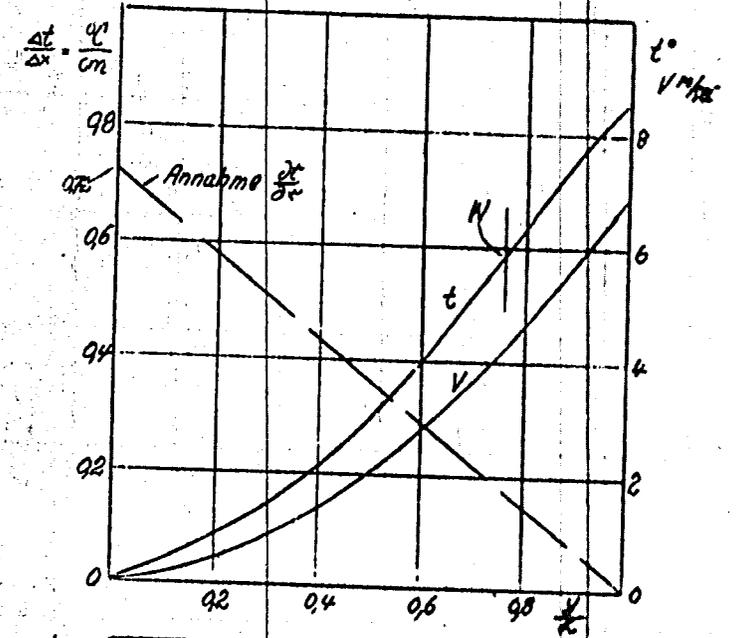
121

Abb. 5



EASTMAN KODAK

Abb. 6



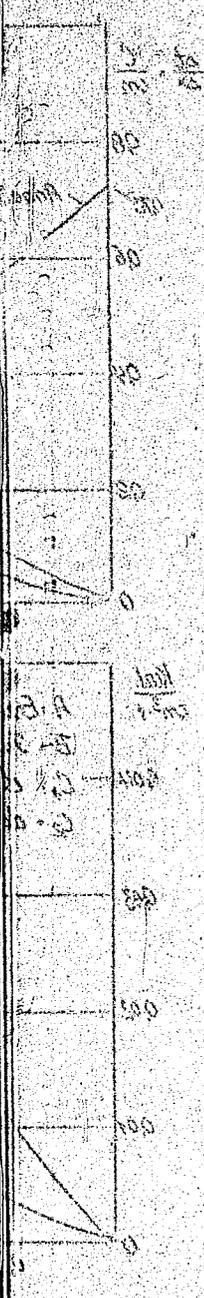


Abb. 7

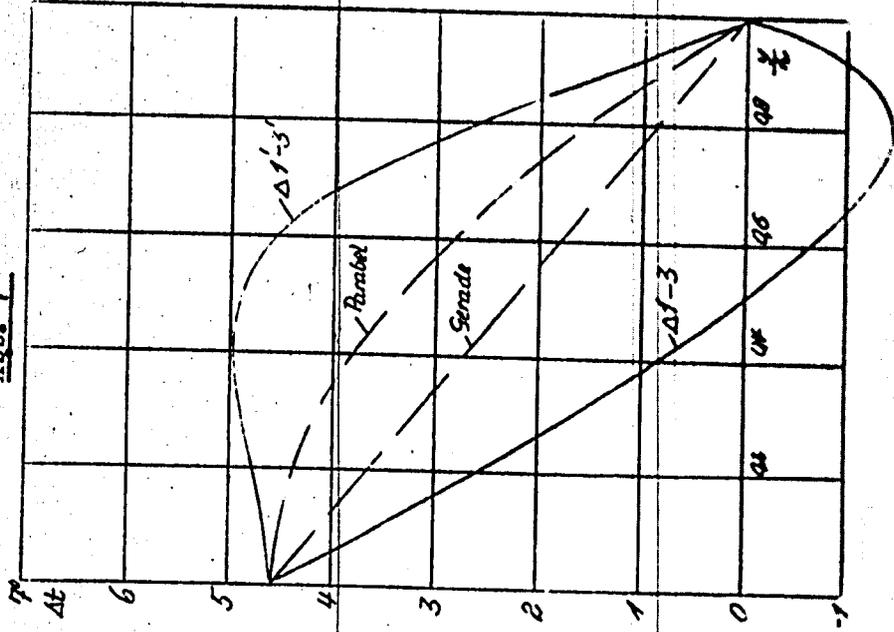
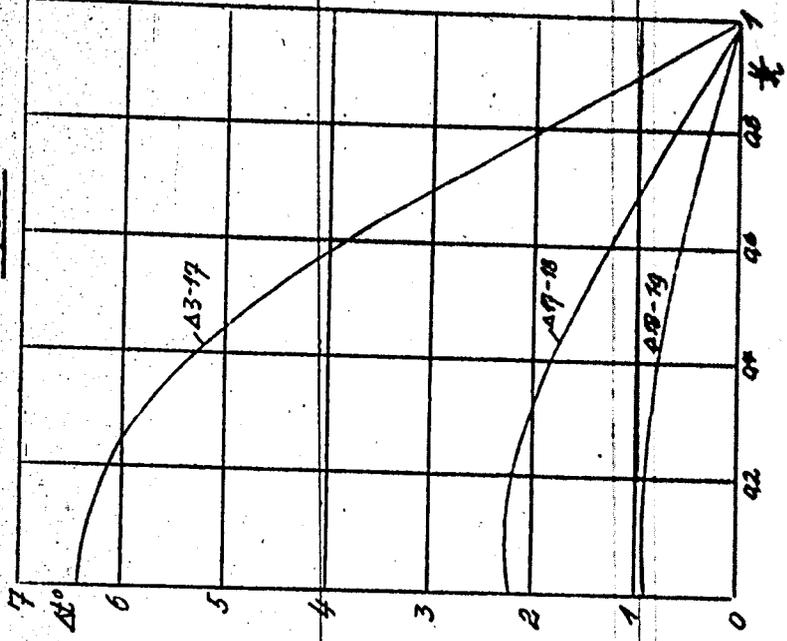


Abb. 8



114

0 ~~115~~
115

Vertrauliche Mitteilung № 6

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

Siebel

Verschleißprüfug

116

Verschleißprüfung

Von Prof. Dr.-Ing. E. Siebel VDI
Materialprüfungsanstalt
an der Technischen Hochschule in Stuttgart

Vorgetragen in der Sitzung
der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 11. April 1938 in Berlin

Vertrauliche Mitteilung Nr. 6
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 Persön-
lichkeiten außerhalb des Dienstbereiches des Empfan-
gers bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des Fach-
ausschusses für Maschinenelemente des VDI.

Pl.

Das Verschleißverhalten der Werkstoffe ist weitgehend von den besonderen Bedingungen abhängig, unter denen die Verschleißbeanspruchung vor sich geht. In beliebiger Aufstellung der in der Praxis vorkommenden Verschleißbeanspruchungen ist der Versuch gemacht, diese Verschleißbedingungen klar zu legen und eine Einteilung in verschiedene Gruppen vorzunehmen. Um das Verschleißverhalten der Werkstoffe richtig beurteilen zu können, ist die Prüfung unter verschiedenartigen Versuchsbedingungen erforderlich. Die Beurteilung nach den Ergebnissen nur einer einzigen Prüfung kann leicht zu Fehlschlüssen führen.

In der Materialprüfungsanstalt Stuttgart wurden zwei Arten der Verschleißprüfung besonders entwickelt, nämlich diejenige bei gleitender Reibung im Trockenlauf und die Verschleißprüfung mit Schmierung unter Beigabe von Verschleißmitteln. In beiden Fällen werden ringförmige Verschleißproben gemäß Abb. 1 verwendet, von denen die obere umläuft, während die untere feststeht und nur kleine seitliche Verschiebungen ausführt, um eine Riefenbildung an den Gleitflächen zu vermeiden. Der äußere Aufbau der verwendeten Verschleißprüfmaschine ist aus Abb. 2 ersichtlich. Die Maschine gestattet es, das durch die Reibungskräfte erzeugte Drehmoment zu messen. Im übrigen wird der bei der Verschleißprüfung auftretende Abrieb durch Wägung bestimmt.

Bereits beim Trockenlaufversuch erweist sich der Verschleiß von einer ganzen Reihe von Einflüssen abhängig, nämlich:

1. vom Werkstoff beider aufeinander gleitender Körper
2. von der Form der Gleitflächen
3. von der Oberflächenbeschaffenheit
4. von dem zwischen den Gleitflächen befindlichen Schmier- oder Verschleißmittel
5. von der umgebenden Atmosphäre
6. von der Temperatur der Gleitflächen
7. von der Flächenpressung
8. vom Gleitweg
9. von der Gleitgeschwindigkeit

Die Bedingungen von 1 - 3 können bei den beiden aufeinander gleitenden Körpern verschieden sein, so daß der Verschleiß durch insgesamt 12 Veränderliche beeinflusst wird.

Gemäß Abb. 3 ändert sich das Verschleißverhalten von Gußeisen beim Trockenlaufversuch sprunghaft, sobald die Gleitgeschwindigkeit etwa 1 m/sec erreicht. Ähnliche Verhältnisse wurden gemäß Abb. 4 auch bei Stahl beobachtet. Bei niedriger Geschwindigkeit ist deutlich der Einfluß der Gefügebesechaffenheit bzw. der Härte zu erkennen, während dieser Einfluß bei höherer Geschwindigkeit weniger deutlich in Erscheinung tritt. Die sprunghafte Veränderung im Verschleißverhalten beim Trockenlaufver-

such kann nur so gedeutet werden, daß bei kleiner Gleitgeschwindigkeit vorwiegend metallischer Verschleiß, bei großer Geschwindigkeit aber, infolge der stärkeren Erwärmung an den Gleitflächen oxydischer Verschleiß auftritt. Von Bedeutung erscheinen auch die Preßerschbinungen, die bei der Prüfung von weichen Stahlproben beobachtet werden. Es bilden sich hier kissenartige Stellen von stark verfestigtem Werkstoff. Während der Verschleiß bei den weichen Stahlproben durch Herausreißen größerer Gefügeteile zustande kommt, wird die Oberfläche bei gehärteten Stahlproben gleichmäßig abgetragen.

Beim Trockenlauf wird normalerweise die weichere Probe stärker abgenutzt. Bei Versuchen mit Schmierung unter Zugabe eines sehr harten Verschleißmittels (Korund oder Quarz) zeigt hingegen stets die härtere Probe den größeren Verschleiß. Diese Erscheinung dürfte durch die Einbettung des Verschleißmittels in den weicheren Werkstoff zu erklären sein, wodurch das Verschleißmittel mit einer entsprechenden größeren Geschwindigkeit an der harten Probe entlang gleitet. Eine systematische Untersuchung dieses Verhaltens war erst möglich, nachdem die Versuchsbedingungen genügend gleichmäßig gestaltet werden konnten, und nachdem so die Streuung der Versuchsergebnisse weitgehend herabgesetzt war. Es erwies sich dabei als erforderlich, die Öltemperatur zu regeln und die Korngröße des Verschleißmittels genau festzulegen.

In Abb. 5 sind die Ergebnisse von Versuchen über den Einfluß der Oberflächenhärte auf das Verschleißverhalten bei Ölschmierung dargestellt. Die unlaufende obere Probe aus gehärtetem Kugellagerstahl besaß bei diesen Versuchen eine Brinellhärte $H_B = 650 \text{ kg/mm}^2$. Die Gegenprobe aus dem gleichen Material wurde durch Anlassen auf eine Härte von $H_B = 350 - 650 \text{ kg/mm}^2$ gebracht. Weiterhin wurden Bronze und Weißmetalle mit geringerer Härte als Gegenprobe verwendet. Wie die Abbildung erkennen läßt, sinkt der Verschleiß der Gegenprobe mit abnehmender Härte derselben stetig ab, während der Verschleiß der harten unlaufenden Probe zunächst ansteigt und erst wieder abfällt, wenn die Härte des Gegenwerkstoffes unter 300 Brinell-Einheiten sinkt. Bei niedrigerer Härte der Gegenprobe wird der Gesamtverschleiß geringer, da das Verschleißmittel jetzt so tief in die Gegenprobe einsinkt, daß sie die unlaufende Probe nicht mehr angreift.

Ähnliche Erscheinungen wurden beobachtet, wenn die unlaufende Probe eine Härte von $H_B 300 - 400 \text{ kg/mm}^2$ erhielt und die Härte der Gegenprobe wiederum in weiten Grenzen geändert wurde. Die größte Abnutzung wurde stets bei gleicher Härte der beiden Probekörper beobachtet. Dabei trat zugleich eine Anfreßneigung zutage, die sich in entsprechenden Ausschlägen in der Drehmomentanzeige bemerkbar machte. Lag die Härte der Gegenprobe über oder unter derjenigen der unlaufenden Probe, so ergibt sich

in beiden Fällen ein Absinken des Verschleißes. Die härtere Probe wird stets am stärksten angegriffen.

Ist der Schmierfilm dicker als die Korngröße des Verschleißmittels, so geht der Verschleiß sehr stark zurück. Das Verschleißmittel vermag auch dann nur in geringem Maße anzugreifen, wenn dasselbe weicher ist, als die Gleitflächen. Um den Nachweis hierfür zu erbringen, wurde metallischer Abrieb als Verschleißmittel benutzt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abb. 6 und 7 niedergelegt. Eine harte Oberfläche erweist sich hier nach als überlegen, sobald das Verschleißmittel verhältnismäßig weich ist.

Um den Einfluß der Oberflächenbearbeitung auf das Verschleißverhalten zu kennzeichnen, fanden Einlaufversuche an verschiedenen bearbeiteten Proben mit sehr feinem Verschleißmittel statt, deren Ergebnisse in Abb. 8 dargestellt sind. Als Verschleißmittel wurde Korund mit 0 - 5 μ verwendet. Wie die Darstellung erkennen läßt, stellt sich das Drehmoment bei geläppter Oberfläche bereits nach kurzer Zeit auf einen bestimmten Endwert ein, während bei größerer Bearbeitung dieser Endwert erst viel später erreicht wird.

oooooooo

Aufstellung der in der Praxis vorkommenden Verschleißbeanspruchungen

Gruppe	Maschinenteile	Art der Verschleißbeanspruchung
<u>I. Gleitende Reibung.</u>		
1	Rad und Bremsklotz a) bei trockenem Wetter b) bei nassem Wetter	Trockene, gleitende Reibung ohne oder mit wenig Verschleißmittel (Schmutz- u. Verschleißstaub). Geschwindigkeiten bis 30m/sec, Belastungen bis 15 kg/cm ² . Gleitende Reibung mit Wasser zwischen den Gleitflächen unvermischt oder vermischt mit Verschleißmittel. Geschwindigkeiten bis 30 m/sec. Belastungen bis 15 kg/cm ² .
2	Gleitschienen von Hobelmaschinen, Pressen u. dergl., ferner Drehbankbetten, Schneckenradgetriebe usw.	gleitende Reibung mit wenig Schmiermitteln, ohne oder meist mit Verschleißmitteln. Geschwindigkeiten bis 2m/sec Belastungen bis 15 kg/cm ² .
3	Zylinderlaufbüchse und Kolbenring bzw. Kolben	Gleitende Reibung mit wenig Schmiermittel, das mehr oder weniger verunreinigt ist. Geschwindigkeiten bis 20m/sec Anpreßdrücke bis 60 kg/cm ² Temperaturen bis 350°.
4	Gleitlager	Gleitende Reibung mit guter Schmierung, u.U. Schmiermittel verschmutzt. Geschwindigkeiten bis 40 m/sec Anpreßdrücke bis 200 kg/cm ² .
5	Baggerketten-Bolzen und Laschen, sowie Raupenketten usw.	Gleitende Reibung, Wasser und viel Verschleißmittel zwischen den Gleitflächen. Geschwindigkeiten bis 1 m/sec. Anpreßdrücke bis 10 kg/cm ² .

Gruppe	Maschinenteile	Art der Verschleißbeanspruchung
6	Brechbacken, Mahlgänge, Stempel und Formen an Brikettierungspressen	Trockene gleitende Reibung mit viel Verschleißmittel. Geschwindigkeiten bis 1m/sec Anpreßdrücke bis 200 kg/cm ² .
7	Drahtseile	Gleitende Reibung mit wenig Schmiermittel bei gleichzeitigem Korrosionsangriff und gleichzeitiger Wechselbeanspruchung. Geschwindigkeiten unter 0,1 m/sec. Anpreßdrücke bis zur Quetschgrenze des Werkstoffes.
8	Pflugscharen, Bagger, Versatzleitungen, Betonmiecher, Siebtrommeln, Förderbänder usw.	Gleitende Reibung von Metall am Verschleißmittel, das mehr oder weniger mit Wasser angefeuchtet ist. Geschwindigkeiten bis 3m/sec Anpreßdrücke bis 50 kg/cm ² .
9	Sandstrahlgebläse, Leitungen für pneumatischen Transport	Metalle gegen trockenes im Gasstrom schwabendes Verschleißmittel. Geschwindigkeiten bis 300m/sec Anpreßdrücke unter 2 kg/cm ² .
10	Wasserturbinen, Kreiselpumpen	Metall gegen Verschleißmittel, das in Wasser in geringen Mengen enthalten ist. Geschwindigkeiten bis 200 m/sec. Anpreßdrücke bis 70 kg/cm ² .
<u>II. Rollende Reibung.</u>		
11	Rad und Schiene	Rollende Reibung mit Schlupf. Laufflächen trocken oder feucht zuweilen mit Verschleißmitteln verunreinigt.

Gruppe 8 Zur Prüfung des hier vorliegenden Verschleißes durch Erosionswirkung sind Sonderverfahren zu entwickeln (vgl. Piowarsky "Untersuchungen an Gußeisen auf einer neuen Verschleißmaschine" Arch. Eisenhüttenwesen 6 (1933) S.501).

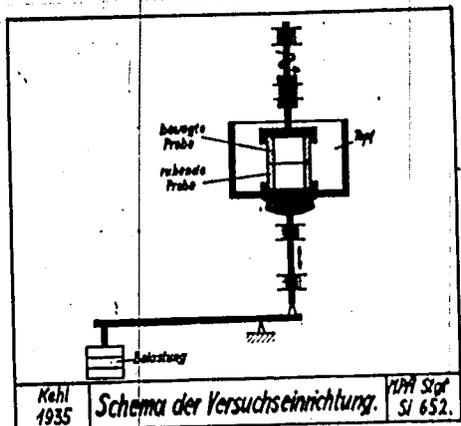
Gruppe 9 u. 10 Hier kommen Versuche mit Sandstrahlgebläse bzw. mit bewegter Flüssigkeit in Frage (vgl. Gary "Versuche mit Sandstrahlgebläse". Mitt.MPA Dahlen 1901 S.211 und 1904 Heft 1 und Roesch Gießerei 23 (1936) S.97/101).

Gruppe 11 Die bei Rad und Schiene vorliegenden Verhältnisse werden in etwa durch die Prüfung auf den Maschinen von Anslor und von Mohr & Federhaff erfaßt.

Gruppe 12 Für die Zahnräder erscheinen Sonderversuche erforderlich (vgl. Ulrich "Verschleißversuche mit Zahnrädern für Kraftwagen" Reichsverb.d.Autom.Industr. E.V. Berlin, Versuchbericht Nr.4 (1932).

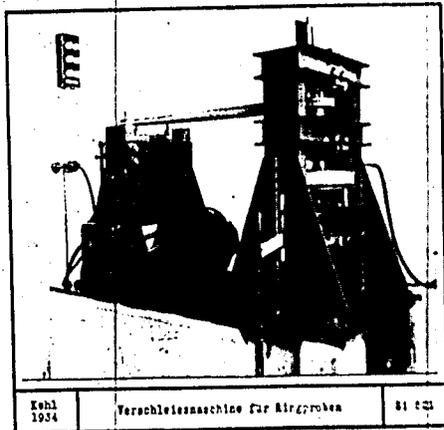
Gruppe 13 Bei richtiger Konstruktion der Lager treten die Verschleißerscheinungen so in den Hintergrund, daß eine Prüfung auf Verschleiß zwecklos erscheint. Sonderprüfungen auf Ermüdung sind an Platze.

oooooOoooo



Kohl 1935 Schema der Versuchseinrichtung. VPM Stg. SI 652.

Bild 1



Kohl 1934 Verschleißmaschine für Kitzproben. SI 653

Bild 2

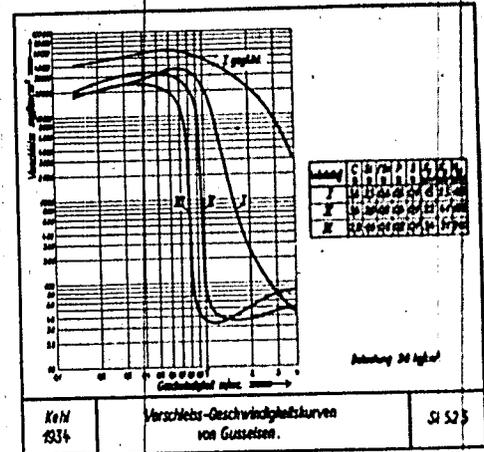


Bild 3

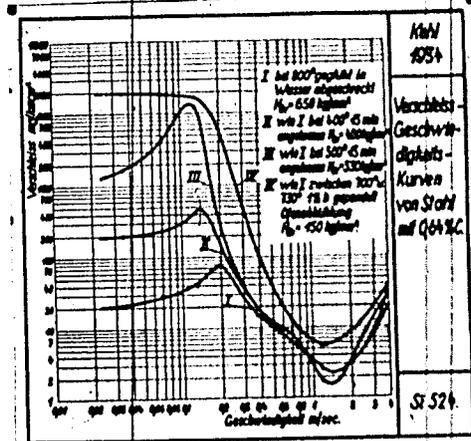


Bild 4

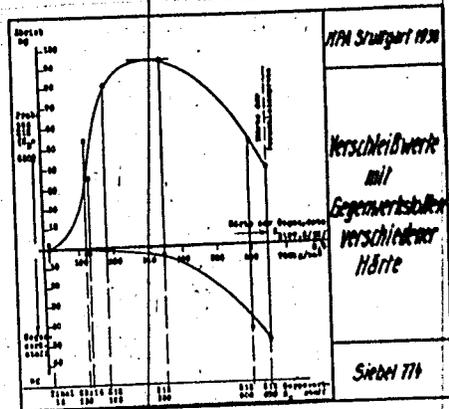


Bild 5

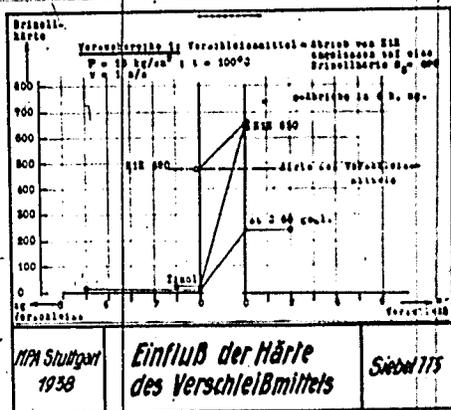


Bild 6

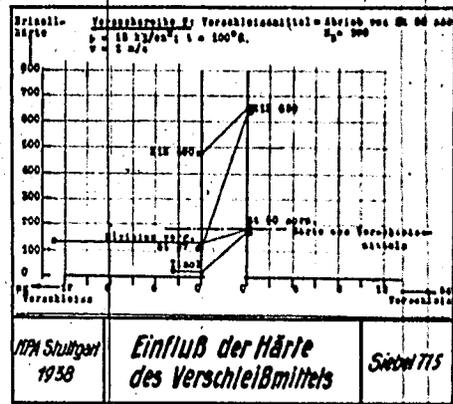


Bild 7

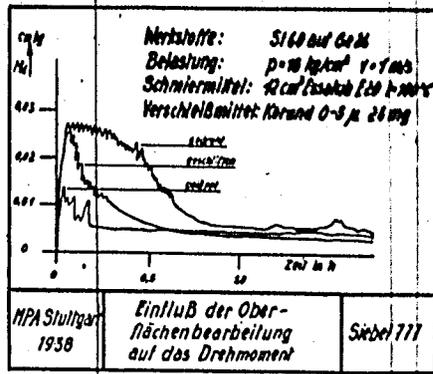


Bild 8

EASTMAN KODAK

0 28

130

Vertrauliche Mitteilung № 7

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

37

Beiträge zur Chemie und Physik der Schmieröl - Kohlenwasserstoffe.

Von Dr. Hermann Z o r n, Leuna.

Vorgetragen in der Sitzung
der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"
des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI
am 17. Dezember 1938 in Berlin

Vertrauliche Mitteilung Nr. 7
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 Persön-
lichkeiten außerhalb des Dienstbereiches des Empfängers
bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des Fachauss-
schusses für Maschinenelemente des VDI.

Pl.

Wir unterscheiden die folgenden K.W. - Gruppen:

1) Paraffin. C_nH_{2n+2}

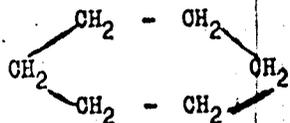
a) mit gerader C - atomkette $CH_3 - (CH_2)_x - CH_3$

b) mit verzweigter C - atomkette s.B. $CH_3 - (CH_2)_x - CH - (CH_2)_y - CH_3$ $(CH_2)_z - CH_3$

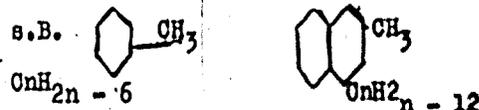
2) Olefine: C_nH_{2n} s.B. $CH_3 - (CH_2)_x - CH = CH_2$

die Lage der Doppelbindung kann endständig oder mittelständig sein, die C - Kette kann gerade oder verzweigt sein.

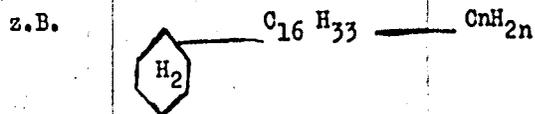
3) Naphtene. C_nH_{2n} s.B.



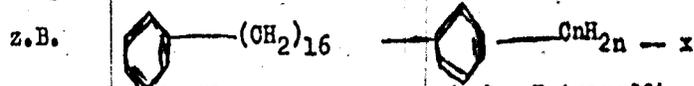
4) Aromatische KW. C_nH_{2n-x} s.B.



5) Gemischt aliphatisch - naphtenische KW.



6) Gemischt aliphatisch - aromatische KW.



In den natürlichen Schmierölen kommen nun nach der Entparaffinierung Kohlenwasserstoffe der Formel 1 - 3 überhaupt nicht vor. Die von Mabery ¹⁾ und neuerdings von Mair u. Willingham ²⁾ isolierten mehr oder minder einheitlichen KW. zeigen eine Zusammensetzung, die dem Formelschema C_nH_{2n-x} entspricht worin x die Werte 2 - 8 annehmen kann. Wir haben es also bei den natürlichen Schmierölen mit Gemischen aus aliphatisch - naphtenischen und aus aliphatisch - aromatischen K.W. zu tun. Grund-

sätzlich davon unterscheiden sich die K.W. - Gemische der synthetischen Schmieröle. Hier finden sich K.W., die den Summenformeln C_nH_{2n} und C_nH_{2n+2} entsprechen.

Hier sind also iso - Paraffine vorhanden.

Um den Weg der Aufbereitung der natürlichen Schmieröle und den Weg des Aufbaues künstlicher Schmieröle erfolgreich beschreiten zu können, ist die Kenntnis der Beziehungen zwischen der chemischen Konstitution und dem physikalischen Verhalten der Schmieröl - K.W. notwendig. Diese Beziehungen sind aber nur erforschbar an chemisch reinen, konstitutionell genau bekannten K.W.. Diese Erkenntnis ist an sich schon recht alt. Als erster hat sie 1891 Spilker 3) ausgesprochen. Dieser sah aber nur in der Viskositätshöhe selbst das Hauptcharakteristikum eines Schmierölkohlenwasserstoffs, während heute die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur und vom Druck die entscheidendsten Merkmale für die Eignung eines Schmieröles sind. Spilkers Erkenntnis blieb von einigen bescheidenen Experimenten, die er selbst ausführte, ohne Folgen. Bis etwa zum Jahre 1930 hat niemand sich mit der Synthese und der Untersuchung der Eigenschaften hochmolekularer Schmieröl - K.W. - befaßt. Dann begann Ianda 4) mit der Synthese einfach und zweifach verzweigter Paraffin - K.W. von der Größe C_{18} bis C_{24} und der Messung ihrer Eigenschaften. Eine kritische Zusammenfassung seiner Messungsergebnisse ist aber bis heute ausgeblieben. Nach ihm fingen 1931 Hugel und Lehrer 5) an hochmolekulare Substitutionsprodukte des Naphtalins und Anthracens darzustellen. Ferner synthe-

tisierten sie Isoparaffine und untersuchten das Viskositäts-Verhalten ihrer Produkte. Leider waren die angewandten synthetischen Methoden mehrdeutig, so daß ihre Aussagen über ihre Messungsergebnisse keinen bindenden Charakter haben können. Sie glaubten, auf Grund ihrer Messungen aussagen zu können, daß von zwei K.W., die bei einer bestimmten Temperatur die gleiche Viskosität haben, derjenige das bessere Viskositäts-Temperatur - Verhalten aufweist, der das höhere Molekulargewicht hat. Wir werden später sehen, wie die Dinge wirklich liegen.

Die bisher wichtigsten Beiträge zur Frage des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens von definierten K.W. sind bisher Wiggins⁶⁾ und Mikeska⁷⁾ geliefert worden. Während der erstere sich noch darauf beschränkte, durch Zusammenstellung der in der Literatur angeführten Viskositätsdaten von meist niedrigmolekularem Benzin - K.W. Aussagen über den Zusammenhang zwischen chemischer Konstitution und Viskositäts-Temperatur-Verhalten zu machen, hat Mikeska in einer grundlegenden Arbeit eine große Zahl hochmolekularer K.W. dargestellt und ihre Eigenschaften bestimmt. Sein Ziel war, Modelle zu synthetisieren, die für Vergleiche mit natürlichem Schmieröl - K.W. - Gemischen geeignet sind. Da diese fast ausschließlich aus naphthenischen und aromatischen Derivaten bestehen, beschränken sich seine Untersuchungen auf diese Stoffklasse.

Da für uns in Deutschland wegen des natürlichen Stoffmangels synthetische Gedanken und Methoden mehr in den Vordergrund stehen, haben wir unsere Untersuchungen auch auf das Gebiet

der rein aliphatischen K.W. ausgedehnt. Die in den folgenden Tabellen aufgeführten K.W. sind von den folgenden Autoren erstmalig hergestellt und gemessen worden:

- B = Dr. Bossat - Dr. Zorn I.G. Farbenindustrie
Werk Oppau
- Br = Prof. v. Braun, Heidelberg, u. Dr. Zorn " "
- H = Prof. Hogel, Straßburg Ann. officiel Nat.-Coub.
lagaudes 8, 68 (1933)
- L = Prof. Iauda, Prag Coll. Trav. Chim. Tsch.
2, 520 (1930)
- M = Mikeska, Standard Ove of New Jersey, Ind. Eng. Chem.
28, 970 (1936)
- N = Dr. Nienburg - Dr. Zorn I.G. Farbenindustrie
Werk Oppau

Die erste zahlenmäßige Erfassung des Viskositäts - Temperatur-Verhaltens wurde von Dean und Davos ⁸⁾ gegeben in dem sogenannten Viskositäts - Index (V.J.). Dieser ist ein ganz willkürliches Kennzeichen, nach dem das zu untersuchende Öl mit zwei natürlichen Ölen von dem festgesetzten Indices 0 und 100 verglichen wird. Dieser Viskositäts - Index hat sich, weil er seinerzeit einem sehr fühlbaren Mangel abhalf, schnell und weitgehend in der ganzen Welt eingeführt, obwohl sein willkürlicher, rein empirischer Charakter tiefere Erkenntnisse nicht erwarten ließ. Er war nur praktisch.

Eine andere Kennzeichnung des Viskositäts-Temperatur-Verhältnisses geschieht durch die Polhöhe von Ubbelohde ⁹⁾. Diese fußt auf einer empirischen Gleichung von Walther ¹⁰⁾, welche lautet:

$$w = m (\log T_1 - \log T) + w_1$$

$$w = \log \log (v + 0,8)$$

$$w_1 = \log \log (v_1 + 0,8)$$

m = die für das Öl charakteristische Richtungs-
konstante

T und T₁ = absolute Temperaturen

v und v₁ = kinematische Zähigkeit im absol. Maß.

Diese Gleichung besagt also, daß der Logarithmus des Logarithmus der in Centistokes gemessenen kinematischen Viskosität von dem Logarithmus der absoluten Temperatur hiervon abhängt. Diese Beziehung ist allerdings nur in einem beschränkten Temperatur- und Viskositätsbereich gut bestätigt.¹¹⁾ Ubbelohde selbst beschränkt seine Ableitung auf Öle mit einer Viskosität von über 20 c-St bei 50° C. Die durch obige Gleichung bestimmte Gerade nennt Ubbelohde "Viskositätsgerade"; den Schnittpunkt der Viskositätsgeraden von Ölen gleicher Herkunft miteinander heißt "Viskositätspol" dieser Serie. Andere Ölserien haben andere Viskositätspole. Alle Pole sollen auf einer Geraden der "Polgeraden" liegen. Die Ordinate eines Viskositätspols ist die "Polhöhe" w_p. Der Zahlenwert der Polhöhe ist nun das Charakteristikum des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens. Je höher der Pol einer Ölserie liegt, je größer also der w_p - Wert ist, umso größer ist die Temperatur-Abhängigkeit der Viskosität Ölserie.

Um zu prüfen, inwieweit eine rechnerische Extrapolation auf Grund der Walther-Ubbelohdeschen-Formel möglich ist, wurden bei einigen reinen, chemisch wohldefinierten K.W. aus je zwei verschiedenen Temperaturpunkten die zugehörigen Werte von m und

w_p berechnet und in Tabelle 1 eingetragen. Man sieht, daß die Werte für m und w_p abhängig sind von den gewählten Temperaturen. Ihre Werte sind umso höher, je tiefer die untere Temperaturgrenze gewählt ist. Diese Feststellungen decken sich mit denen, die Erk u. Eok (l.o.) bei natürlichen Ölen gemacht haben. m und w_p liefern also nur dann für Vergleichszwecke brauchbare Werte, wenn man bei ihrer Berechnung oder graphischen Auswertung stets die gleichen Meßtemperaturen zugrunde legt. Das ist im folgenden stets geschehen.

Auf der Tabelle 2 sind einige homologe K.W. - Reihen zusammengestellt. Allgemein zeigt sich in allen drei Reihen ein stetiges Ansteigen der Viskositäten mit zunehmendem Molekulargewicht. Die Ansicht von Hugel (l.o.), daß mit steigendem Molekulargewicht auch das Viskositäts-Temperatur-Verhalten verbessert wird, kann jedoch nicht beobachtet werden, sondern das Gegenteil ist feststellbar. Die Polhöhenwerte steigen mit wachsendem Molgewicht. Diese Abhängigkeit der Polhöhe von der Molekulargröße ist jedoch nur bei den niederen Gliedern der homologen Reihe der Fall. Ist eine bestimmte Molekulargröße erreicht, etwa C_{32} , so bleiben die Polhöhenwerte konstant innerhalb der Reihe. Damit ist an chemisch reinen, wohldefinierten K.W. bestätigt worden, was Ubbelohde an natürlichen Ölen festgestellt hat, nämlich, daß Öle gleicher Herkunft im vorliegenden Falle gleicher Konstitution - die gleiche Polhöhe haben. Ubbelohde beschränkt sich bei dieser Feststellung ja ausdrücklich auf Öle, deren Viskosität bei $50^{\circ}C$ größer

als 20 c-St ist. Die gleiche Feststellung konnte auch Koch¹²⁾ bei den Fraktionen von Ölen aus der Fischer - Tropsch - Synthese feststellen. Bondi fand dagegen bei den aufeinander folgenden Fraktionen natürlicher Erdöle einen ganz unregelmässigen Gang der Polhöhenwerte, allerdings waren die Öle nicht raffiniert gewesen.

Auf den nun folgenden Tabellen 3a und 3b ist der Einfluß der Doppelbindung als Konstitutionselement dargestellt. Die K.W. sind nach der Molekülgröße geordnet. Allgemein und fast ausnahmslos zeigt sich, daß durch die Einführung einer Doppelbindung die Viskosität herabgemindert wird. Die einzige Ausnahme ist der K.W. 110, jedoch dürfte hier ein Meßfehler vorliegen, wie der Vergleich mit Nr.75 zeigt. Ferner erkennt man an dem Verlauf der Polhöhenwerte ganz eindeutig, daß der stärker ungesättigte K.W. nicht nur dünnflüssiger ist, sondern auch das bessere Viskositäts-Temperatur-Verhalten aufweist. Damit ist die Auffassung Hügels, daß Doppelbindungen verschlechternd auf das Viskositäts-Temperatur-Verhalten wirken, eindeutig widerlegt. Eine kleine Ungenauigkeit ist noch in dem Vergleich 37 und 38 enthalten. Der K.W. 38 war ebenfalls von Landa zuerst dargestellt und gemessen worden. Aus den Landaschen Messungen ergab sich für den ungesättigten KW 38 aber ein größerer Polhöhenwert als wie für den gesättigten KW 37. Wir haben daher diesen KW 38 erneut hergestellt und gemessen und erhielten nun einen niederen Polhöhenwert. Die Diskrepanz in den Viskositätsdaten ist auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Bemerkenswert ist ferner, daß die Wirkung

der Doppelbindung bei einem hochmolekularen KW C_{36} genau so deutlich zu erkennen ist wie bei einem niedermolekularen KW C_{18} , man vergleiche 129/130 mit 10/11. Wichtig ist auch, daß sich aliphatische und aromatische Doppelbindungen in ihrer Wirkung nicht unterscheiden, man vergleiche 27/28 mit 84, 82 und 82 oder 92 mit 90 und 91.

In den nun folgenden Tabellen 4a und 4b ist der Einfluß der Art der Verzweigung der aliphatischen Kohlenstoffkette auf die Viskosität dargestellt.

Die KW 1 - 5 zeigen bei gleichbleibender Molekülgröße mit wachsendem Verzweigungsgrad ein regelmäßiges Absinken der Viskositätsgröße. Je verzweigter, umso dünnflüssiger werden sie. In allen Gruppen - man vergleiche 22 - 27; 36 - 46; 102 - 107 - haben stets bei gleicher Molekülgröße die verzweigten KW. eine geringe Viskosität und von der Molekülgröße C_{22} ab auch ein schlechteres Viskositäts-Temperatur-Verhalten, man vergleiche 41 mit 42 und 43; 104 mit 103, 105. Die Einwirkung der Verzweigung auf das letztere ist je nach ihrer konstitutionellen Anordnung verschieden. Sehr stark wirkt die Methyl - Gruppe vermindern auf die Viskosität und verschlechternd auf das Viskositäts-Temperatur-Verhalten, man vergleiche 1 mit 2 und 3; 9 mit 10; 22 mit 27; 36 mit 37; 103 mit 107. Besonders stark wirken endständige Methyl-Gruppen, man vergleiche 9 und 10 mit 1 und 3, ferner 22 mit 26 und 27. Aethyl - Gruppen verhalten sich ganz anders; sie können sogar verbessernd auf das Viskositäts-Temperatur-Verhalten wirken, wie z.B. der Vergleich von 4 und 5; 10 und 12 zu zeigen scheint.

Genau ist dieser Befund nicht, da die Ubbelohde'sche Formel bei so dünnflüssigen KW nicht gesichert ist. Bei größeren Molekülen zeigt sich, daß das Viskositäts-Temperatur-Verhalten umso schlechter wird, je mehr sich der räumliche Bau des Moleküles durch die Verzweigung der Form einer Kugel nähert. Man vergleiche 41, 42 und 43; ferner 104, 103, 105 und 106. Beim KW 106 ist noch die gleichzeitig auftretende starke Erhöhung der Viskosität besonders bemerkenswert.

In der nun folgenden Tabelle 4c sind einige homologe Reihen verzweigter hochmolekularer KW. zusammengestellt, deren Molekulargröße derjenigen der natürlichen Schmieröle bis zu den Bright - stock - Ölen hinauf entspricht. Die Bauprinzipien sind dadurch gekennzeichnet, daß in der Reihenfolge I, II, III der Symmetriegrad zunimmt und der Verzweigungsgrad abnimmt. Das hat in bezug auf das Viskositäts-Temperatur-Verhalten zur Folge, daß dieses in der Reihenfolge I, II, III besser und in der Gruppe III fast so gut wird, wie es bei natürlichen fetten Ölen ist, wie die Vergleichswerte des Olivenöles zeigen. In der Gruppe I erkennt man deutlich, daß von der Molekulargröße C_{32} ab bei weiterer Molekularvergrößerung nur noch die Viskosität erhöht wird, aber das Viskositäts-Temperatur-Verhalten keine weitere Änderung mehr erfährt, wie es gemäß der Feststellung von Ubbelohde auch der Fall sein soll.

Auch in den Gruppen II und III bleibt der Polhöhenwert mit zunehmender Molekülgröße konstant.

Interessant sind an diesen KW noch ihre Schmelzpunkte. Sie zeigen, daß es sehr hochmolekulare KW gibt, die trotz ihrer

44

M

141

Molekülgröße doch erst bei sehr tiefen Temperaturen fest werden. Z.B. KW. 146. Und endlich ist noch bemerkenswert, daß trotz der beachtlichen Molekülgröße die Viskosität der KW. nicht sehr hoch ist, z.B. entspricht der KW. 146 in seiner Molekülgröße dem mittleren Molekulargewicht der Heißdampfzylinderöle. Diese aber haben bei 99° etwa eine Viskosität von 40 - 60 c-St. und nicht 13 c-St. wie hier.

Wir wenden uns nun denjenigen Wirkungen zu, die durch eine Cyclisierung der aliphatischen Kette hervorgerufen werden. Auf Tabelle 6 sind einige Beispiele zusammengestellt. Sie zeigen, daß durch die Bildung naphtenischer Ringsysteme eine starke Viskositäts-erhöhung und eine sehr starke Verschlechterung des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens hervorgerufen wird. Beides verstärkt sich in dem Maße, wie die Zahl der Ringe sich erhöht. Es wurden schon bei relativ kleinen Molekülen z.B. C₃₀ KW. 99 und 100 Viskositäten erreicht, die ein Vielfaches von dem des KW 146 mit der Molekülgröße C 64 sind. Diese Tatsache zusammen mit der eingangs erwähnten (s.S.), daß die aus natürlichen Schmierölen isolierten KW. eine Zusammensetzung aufweisen, die der Formel C_nH_{2n-x} (x 2) entspricht, stützt sehr stark die Annahme, daß die KW, der natürlichen Schmieröle, im besonderen deren hochmolekularen Anteile, aus Kohlenwasserstoffen bestehen, die auf keinen Fall isoparaffinisch sind, sondern aus aromatischen bzw. naphtenischen KW. mit mehr oder minder langen bzw. zahlreichen aliphatischen Seitenketten aufgebaut sein müssen. Hierbei wird nun einmal die Frage nach der Anordnung der Ringe im Molekül und zum ande-

SAFETY FILM

ren die Frage nach ihrer Struktur: ob naphtenisch oder aromatisch, ob Sechs- oder Fünfring und endlich noch die Frage nach der Struktur der aliphatischen Seitenkette von besonderer Bedeutung sein. Diese konstitutionellen Fragen sollen auf den nun folgenden Tabellen aufgestellt werden. Die Tabelle 7 zeigt zunächst die Bedeutung der innermolekularen Ringanordnung. Der Vergleich von 51, 52, 53 sowie der von 61 mit 57 zeigt, daß der verschlechternde Einfluß des Ringes am geringsten ist, wenn der Ring in der Mitte der geraden aliphatischen C - Kette angeordnet ist. Sind zwei Ringe im Molekül vorhanden, so ist ihr Einfluß am geringsten, wenn die beiden Ringe kondensiert und als solche endständig angeordnet sind, man vergleiche 32 mit 31 und 84 mit 80, 87 und 78. Ferner scheint die symmetrische Anordnung der Ringe, je ein Ring an jedem Ende der Kette, günstiger zu sein als die unsymmetrische Anordnung, also beide Ringe an einem Ende der Kette, man vergleiche 54 mit 61 und 61 und 78 mit 87.

Auf die Bedeutung der Symmetrie wurde auch schon bei der Besprechung der verzweigten aliphatischen KW. aufmerksam gemacht.

Tabelle 8 zeigt das unterschiedliche Verhalten des Fünfringes gegenüber dem Sechsering. Der Fünfring zeigt günstigere Wirkungen als der Sechsering in bezug auf das Viskositäts-Verhalten und bewirkt eine starke Erniedrigung der Viskositätshöhe. Es wäre nun noch auf das verschiedene Verhalten des hydrierten

naphtenischen Sechsrings und des ungesättigten aromatischen Ringes hinzuweisen. Das ist aber bereits auf den Tabellen 3a und 3b ausführlich geschehen. Dort ist gezeigt, daß der ungesättigte Ring stets das günstigere Viskositäts-Temperatur-Verhalten und die niedrigere Viskosität aufweist. Es bleibt nun noch übrig, den Einfluß der Struktur und die Anordnung der aliphatischen Seitenketten zu untersuchen. Auf der Tabelle 9 sind die diesbezüglichen bisher vorliegenden Ergebnisse zusammengestellt.

Der Vergleich von 57a mit 55 zeigt die Wirkung zweier Methyl-Gruppen zu einer Aethyl-Gruppe; der Vergleich von 57 mit 56 und 59 mit 58 zeigt das unterschiedliche Verhalten zwischen der n - Propyl - und der iso - Propylgruppe, die letztere bewirkt eine Erhöhung der Viskosität und Verschlechterung des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens. Allgemein kann man sagen: je stärker die gerade O - Kette verkürzt wird, je mehr sich die räumliche Gestalt des Moleküles der Kugel nähert, umso mehr wird bei gleicher Molekülgröße die Viskosität erhöht und das Viskositäts-Temperatur-Verhalten verschlechtert. Ob diese Veränderung der räumlichen Gestalt durch Verzweigung oder durch Cyclisierung bewirkt wird, ist prinzipiell gleich nur graduell wirkt die Cyclisierung stärker im besonderen auf die Erhöhung der Viskosität, man vergleiche 57, 56, 59, 58 und 63, ferner 56, 65 und 66, sowie 56, 58 und 60.

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß das Viskositäts-

Temperatur-Verhalten eines Kohlenwasserstoffes außerordentlich empfindlich ist gegen die geringste konstitutionelle Veränderung im Molekül. Mit anderen Worten: das Viskositäts-Temperatur-Verhalten ist ausgezeichnet geeignet zur Mitwirkung bei der Aufklärung der chemischen Konstitution. Hierfür sei im folgenden ein Beispiel gegeben:

Hugel (14) und Lerer (15) synthetisierten aus 1 -
- Octylalkohol $C_8H_{17}OH$.

OH - OH nach der Methode von Guerbert (16) unter der Einwirkung von festem Alkali die Di- und Trimeren - Alkohole $C_{16}H_{33}OH$ und $C_{24}H_{49}OH$. Aus den letzteren erhielten sie durch Wasserabspaltung das Olefin (KW 45), und aus den Joliden der beiden Alkohole wurden mittels der Wurtzschen Reaktion die KW $C_{32}H_{66}$ (107) $C_{32}H_{66}$ (107) und $C_{48}H_{98}$ (142) erhalten; siehe Tabelle 11. Für die Konstitution dieser KW. geben nun Hugel und Lerer jeder eine andere Formulierung an, da sich aus verschiedenen Auffassungen über den vermutlichen Verlauf der Guerbertschen Reaktion ergeben. Für diese Reaktion sind die folgenden zwei Reaktionswege möglich; siehe Tabelle 10. Hugel nimmt den Weg A an und Lerer den Weg B. Es ergeben sich für die in Frage stehenden KW. die in der Tabelle 11 zusammengestellten Strukturformeln. Zu jedem Hugel - Lerer - Kohlenwasserstoff ist ein Vergleichskohlenwasserstoff angegeben, der wegen seiner analogen Konstitution zum Entscheid herangezogen werden kann. So ist der KW. 45 bis auf die Doppelbindung identisch mit dem in der Konstitution genau bekannten KW. 44. Da nun die Polhöhe des KW. 44 und seine

115

ist
 Viskosität niedriger als die von 45, und da ferner eine
 Doppelbindung einen erniedrigenden, aber keinen erhöhenden
 Einfluß ausübt, so kann die Formel von Lerer nicht
 zutreffen. Der Vergleich entscheidet vielmehr eindeutig
 zugunsten der Hugelschen Formel, bei welcher der erhöhte
 Verzweigungsgrad für den größeren Polhöhenwert verantwort-
 lich zu machen ist. Im gleichen Sinne erfolgt die Entschei-
 dung bei den beiden folgenden KW. Die Lerersche Formel für
 KW107 ist fast identisch mit der des KW 105, nur stehen bei
 107 die beiden mittleren Hexyl - Seitenketten nachbarständig,
 während sie bei 105 durch eine OH₂ - Gruppe getrennt sind.
 Durch den Vergleich von 103 mit 104 ist aber nachgewiesen,
 daß die nachbarliche Verzweigung den Polhöhenwert verbessert,
 aber nicht verschlechtert, Da aber der Polhöhenwert von 107
 größer ist als der von 105, so ist die Hugelsche Formel
 richtig und die Lerersche falsch. In dem gleichen Sinne ist
 beim KW 142 durch den Vergleich mit 141 zu entscheiden.
 Durch diese Gegenüberstellung ist damit auch der Beweis er-
 bracht, daß die Guerbertsche Reaktion nach dem Reaktions-
 schema A verläuft und nicht nach B. Dieses steht im Einklang
 mit der allgemeinen Erfahrungstatsache, daß die Methylengruppe
 reaktionsfähiger ist als die Methylgruppe.
 Zum Schluß soll noch kurz auf eine Methode eingegangen wer-
 den, die von Watermann 17) entwickelt worden ist zur Konsti-
 tutionsaufklärung natürlicher Schmieröle und die auch von
 Koch (18) zur Konstitutionsaufklärung synthetischer Schmieröle

EAST

196

benutzt worden ist. Watermann versucht, durch Messung einiger physikalischer Eigenschaften den Gehalt der Schmieröle an Paraffinen, Aromaten und Naphtenen zu errechnen. Er bestimmt von dem zu untersuchenden Öl: Dichte, Brechungsindex, Molekulargewicht und Anilinpunkt. Dann ermittelt er aus diesen Daten mit Hilfe zweier empirisch aufgestellter Kurvenblätter die prozentualen Gehalte der verschiedenen Strukturelemente. Das eine Kurvenblatt verbindet die spezifischen Refraktionen von Paraffinen, mono- und bisyklischen Naphtenen mit dem Molekulargewicht, das andere die spezifischen Refraktionen aromatenfreier Öle mit Anilinpunkten und Molekulargewicht. Wir haben diese Methode auf sechs synthetisch dargestellte Kohlenwasserstoffe angewandt und die Ergebnisse auf der Tabelle 12 wiedergegeben. Untersucht wurden zwei Paraffin - KW 44 und 103; zwei aliphatisch-aromatische - KW. (29 und 30) ein aliphatisch - naphtenischer KW. (70) und ein aliphatisch - naphtenisch aromatischer Kohlenwasserstoff. (69). Das Ergebnis ist, daß bei paraffinierten KW. ein Fehler $\pm 5\%$ möglich ist. Bei den übrigen KW. mit mehreren Strukturelementen im Molekül kann ein Fehler von $\pm 30\%$ auftreten. Damit muß man die Watermannsche Methode als unbrauchbar für die Konstitutionsaufklärung von Schmierölen bezeichnen.

Damit möchte ich meine Ausführungen abschließen. Ich hoffe, Ihnen gezeigt zu haben, wie man durch systematisch aufgebaute Synthesen das dunkle Gebiet der Schmierölkonstitution

allmählich aufklären kann. Ich bin mir dabei bewußt, daß das bisher Erreichte nur ein Anfang ist und daß noch viel Arbeit in dieser Richtung geleistet werden muß, wenn das Ziel der Technik: ein ideales Schmieröl zu schaffen und eine ideale Schmierleistung zu gewährleisten, erreicht werden soll, und wenn Deutschland die Führung auf diesem Gebiet der Technik erreichen und halten will.

oooooooo

Fußnoten:

- 1) Journ.Am.Chem.Soi. 30 992
Jnd.Eng.Chem. 15, 1233 (1923)
18, 814 (1926)
19, 526 (1927)
- 2) Jnd.Eng.Chem. 28, 1452 (1936)
- 3) B.24, 2785 (1891)
- 4) Coll.Trav.chim.Ts 2, 520 (1930)
- 5) Chimie et Industrie 26 1282 (1931)
Ann. officiel Nat.Comb. liquides 8, 68 (1933)
- 6) Jour. Jnst.Petr.Techm. 22, 305 (1936)
- 7) Jnd.Eng.Chem. 28, 970 (1936)
- 8) Chem.Met.Eng. 36, 618 (1929)
- 9) "Zur Viskosimetrie" 2.Aufl. Berlin 1936
- 10) Maschinenbau 10, 671 (1931)
- 11) Erk und Eck Physikal.Z. 31, 118 (1936)
- 12) Brennst.Chem. 19, 337 (1938)
- 13) Petroleum 34 H.6 S.1 (1938)
- 14) Chimie et Industrie 26, 1282 (1931)
- 15) Ann.official Nat.Comb.Liquides 8, 68 (1933)
- 16) - - -
- 17) Jour.Jnst.Petrol.Technologist 21, 661, 707 (1935)

1) ...
 2) ...
 3) ...
 4) ...
 5) ...
 6) ...
 7) ...
 8) ...
 9) ...
 10) ...
 11) ...
 12) ...
 13) ...
 14) ...
 15) ...

Nr. des K.W.	Summen-Formel	Strukturformel	Viskosität			m	w	P
			Temp.	c-St	Temp.			
2	C ₁₆ H ₃₄	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - (OH) ₂ - CH ₃	- 40 + 20	46,4 16,3 4,20	+ 20 + 40 + 100	3,80 3,74 3,29	0,23 0,24 0,09	
3	C ₁₆ H ₃₄	CH ₃ - (OH) ₂ - CH - CH - (OH) ₂ - CH ₃	- 40 + 20 + 40	60,26 4,22 2,68	+ 20 + 100 + 100	4,08 3,44 3,27	0,37 0,12 0,04	
4	C ₁₆ H ₃₄	CH ₃ - (OH) ₂ - CH - CH - OH - (OH) ₂ - CH ₃	+ 20 + 40	3,70 2,42	+ 100 + 100	3,56 3,47	0,17 0,01	
44	C ₂₄ H ₅₀	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - OH - CH - OH - CH - OH - CH ₃	+ 20 + 75	15,8 3,53	+ 100 + 140	3,80 3,52	1,15 0,84	
46	C ₂₄ H ₅₀	C ₄ -H - CH - CH - CH - CH - CH - OH - CH ₃	+ 20 + 40	18,27 8,30	+ 100 + 100	4,05 3,93	1,57 1,35	
140	C ₄₈ H ₉₈	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - OH - CH ₂ - CH - OH - CH ₂ - CH ₃	+ 20 + 40	121,2 46,85	+ 120 + 120	3,28 3,29	1,39 1,40	

1	C ₁₆ H ₁₆ O ₃	CH ₃ -(CH ₂) ₅ -CH ₂ -CH ₂ -OH-(OH) ₂ -CH ₃	1,80	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60
2	C ₁₈ H ₁₈ O ₃	CH ₃ -(CH ₂) ₆ -CH ₂ -CH ₂ -OH-(OH) ₂ -CH ₃	1,80	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60
3	C ₁₈ H ₁₈ O ₃	CH ₃ -(CH ₂) ₅ -CH ₂ -CH ₂ -OH-(OH) ₂ -CH ₂ -OH	1,80	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60

Tab elle 2 a

Nr.	Summenformel	Mol. Gew.	Strukturformel	Yiskobilität C-St	Polliche V.J.
9	C ₁₆ H ₁₆ O ₃	226	OH - (CH) ₂ - CH ₃	38°	99°
22	C ₁₈ H ₁₈ O ₃	254	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₃	4,30	1,64
67	C ₂₄ H ₂₄ O ₃	310	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₃	7,01	2,31
71	C ₂₆ H ₂₆ O ₃	338	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₃	10,25	3,19
102	C ₂₈ H ₂₈ O ₃	364	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₃	12,80	3,63
	C ₃₀ H ₃₀ O ₃	394	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₃	20,30	5,20
	C ₃₂ H ₃₂ O ₃	540	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₃		

149

134 30	CH - (OH)	338	CH - CH - CH	3
330	CH - (OH)	330	CH - CH - CH	3
332	CH - (OH)	332	CH - CH - CH	3
338	CH - (OH)	338	CH - CH - CH	3
340	CH - (OH)	340	CH - CH - CH	3
342	CH - (OH)	342	CH - CH - CH	3
344	CH - (OH)	344	CH - CH - CH	3
346	CH - (OH)	346	CH - CH - CH	3
348	CH - (OH)	348	CH - CH - CH	3
350	CH - (OH)	350	CH - CH - CH	3
352	CH - (OH)	352	CH - CH - CH	3
354	CH - (OH)	354	CH - CH - CH	3
356	CH - (OH)	356	CH - CH - CH	3
358	CH - (OH)	358	CH - CH - CH	3
360	CH - (OH)	360	CH - CH - CH	3
362	CH - (OH)	362	CH - CH - CH	3
364	CH - (OH)	364	CH - CH - CH	3
366	CH - (OH)	366	CH - CH - CH	3
368	CH - (OH)	368	CH - CH - CH	3
370	CH - (OH)	370	CH - CH - CH	3
372	CH - (OH)	372	CH - CH - CH	3
374	CH - (OH)	374	CH - CH - CH	3
376	CH - (OH)	376	CH - CH - CH	3
378	CH - (OH)	378	CH - CH - CH	3
380	CH - (OH)	380	CH - CH - CH	3
382	CH - (OH)	382	CH - CH - CH	3
384	CH - (OH)	384	CH - CH - CH	3
386	CH - (OH)	386	CH - CH - CH	3
388	CH - (OH)	388	CH - CH - CH	3
390	CH - (OH)	390	CH - CH - CH	3
392	CH - (OH)	392	CH - CH - CH	3
394	CH - (OH)	394	CH - CH - CH	3
396	CH - (OH)	396	CH - CH - CH	3
398	CH - (OH)	398	CH - CH - CH	3
400	CH - (OH)	400	CH - CH - CH	3
402	CH - (OH)	402	CH - CH - CH	3
404	CH - (OH)	404	CH - CH - CH	3
406	CH - (OH)	406	CH - CH - CH	3
408	CH - (OH)	408	CH - CH - CH	3
410	CH - (OH)	410	CH - CH - CH	3
412	CH - (OH)	412	CH - CH - CH	3
414	CH - (OH)	414	CH - CH - CH	3
416	CH - (OH)	416	CH - CH - CH	3
418	CH - (OH)	418	CH - CH - CH	3
420	CH - (OH)	420	CH - CH - CH	3
422	CH - (OH)	422	CH - CH - CH	3
424	CH - (OH)	424	CH - CH - CH	3
426	CH - (OH)	426	CH - CH - CH	3
428	CH - (OH)	428	CH - CH - CH	3
430	CH - (OH)	430	CH - CH - CH	3
432	CH - (OH)	432	CH - CH - CH	3
434	CH - (OH)	434	CH - CH - CH	3
436	CH - (OH)	436	CH - CH - CH	3
438	CH - (OH)	438	CH - CH - CH	3
440	CH - (OH)	440	CH - CH - CH	3
442	CH - (OH)	442	CH - CH - CH	3
444	CH - (OH)	444	CH - CH - CH	3
446	CH - (OH)	446	CH - CH - CH	3
448	CH - (OH)	448	CH - CH - CH	3
450	CH - (OH)	450	CH - CH - CH	3
452	CH - (OH)	452	CH - CH - CH	3
454	CH - (OH)	454	CH - CH - CH	3
456	CH - (OH)	456	CH - CH - CH	3
458	CH - (OH)	458	CH - CH - CH	3
460	CH - (OH)	460	CH - CH - CH	3
462	CH - (OH)	462	CH - CH - CH	3
464	CH - (OH)	464	CH - CH - CH	3
466	CH - (OH)	466	CH - CH - CH	3
468	CH - (OH)	468	CH - CH - CH	3
470	CH - (OH)	470	CH - CH - CH	3
472	CH - (OH)	472	CH - CH - CH	3
474	CH - (OH)	474	CH - CH - CH	3
476	CH - (OH)	476	CH - CH - CH	3
478	CH - (OH)	478	CH - CH - CH	3
480	CH - (OH)	480	CH - CH - CH	3
482	CH - (OH)	482	CH - CH - CH	3
484	CH - (OH)	484	CH - CH - CH	3
486	CH - (OH)	486	CH - CH - CH	3
488	CH - (OH)	488	CH - CH - CH	3
490	CH - (OH)	490	CH - CH - CH	3
492	CH - (OH)	492	CH - CH - CH	3
494	CH - (OH)	494	CH - CH - CH	3
496	CH - (OH)	496	CH - CH - CH	3
498	CH - (OH)	498	CH - CH - CH	3
500	CH - (OH)	500	CH - CH - CH	3

Tabelle 2 b

Nr.	Summenformel	Mol. Gew.	Strukturformel	Viskosität		Schp.
				c-St.	Poi = Höhe V.J.	
2	C ₁₆ H ₃₄	226	nC ₈ H ₁₇ - CH - CH ₃ nC ₆ H ₁₃	2,96	1,28	0,09 - 39°
44	C ₂₄ H ₅₀	338	CH - CH - CH - CH - CH ₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃	8,60	2,21	1,16 - 80° 1,23
105	C ₃₂ H ₆₆	450	CH - CH - CH - CH - CH - CH ₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃	18,50	3,74	1,48 - 80° 1,18
137	C ₄₀ H ₈₂	562	CH - CH - CH - CH - CH - CH - CH ₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃	31,90	5,60	1,49 - 78° 1,28
141	C ₄₈ H ₉₆	674	CH - CH ₃ CH ₆ H ₁₃ CH ₆ H ₁₃	53,90	7,49	1,48 - 60° 1,09

151

103 32,66 450 17,46 3,74 1,43 134 - 200
 140 48,98 674 50,80 8,10 1,40 121 - 500
 146 64,130 899 101,0 13,14 1,44 127 - 390

Tabell e 2 c

Nr.	Summen- formel	Mol. Gew.	S t r u k t u r f o r m e l	Viskosität c-St.		Polhöhe V.J.	Schp.
				380	990		
103	C ₃₂ H ₆₆	450	$ \begin{array}{c} \text{C}_8\text{H}_{17} \text{---} \text{OH} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{C}_8\text{H}_{17} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \\ \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \end{array} $	17,46	3,74	1,43 134	- 200
140	C ₄₈ H ₉₈	674	$ \begin{array}{c} \text{C}_8\text{H}_{17} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{C}_8\text{H}_{17} \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \end{array} $	50,80	8,10	1,40 121	- 500
146	C ₆₄ H ₁₃₀	899	$ \begin{array}{c} \text{C}_8\text{H}_{17} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{CH} \text{---} \text{C}_8\text{H}_{17} \\ \qquad \qquad \qquad \\ \text{C}_6\text{H}_{13} \qquad \qquad \qquad \text{C}_6\text{H}_{13} \end{array} $	101,0	13,14	1,44 127	- 390

8

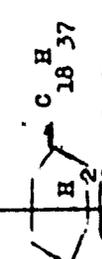
10	18 38	254	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₃	2,52 50°	1,26	0,42	L
11	18 36	252	CH ₃ - (CH) ₂ - OH = C(OH) - CH ₃	2,44 50°	1,17	0,38	L
18	20 42	282	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₂ - CH ₃	3,28 50°	1,48	0,47	L
19	20 40	280	CH ₃ - (CH) ₂ - C = CH - CH ₃	3,23 50°	1,46	0,41	L
22	22 46	310	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₂ - CH ₃	7,01	2,31	0,64	B
23	22 44	308	CH ₃ - (CH) ₂ - CH = CH ₂	6,65	2,27	0,57	B
24	22 46	310	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₂ - CH ₃	6,49	2,17	0,61	L
25	22 44	308	CH ₃ - (CH) ₂ - C = CH - CH ₂ - CH ₃	6,27	2,12	0,59	L

Таблица

Nr.	Summenformel	Mol. Gew.	Strukturformel	Viskosität 38° c-St. 99°	Polhöhe V, J.	Schp.
10	C ₁₈ H ₃₈	254	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₃	2,52 50°	0,42	L
11	C ₁₈ H ₃₆	252	CH ₃ - (CH) ₂ - OH = C(OH) - CH ₃	2,44 50°	0,38	L
18	C ₂₀ H ₄₂	282	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₂ - CH ₃	3,28 50°	0,47	L
19	C ₂₀ H ₄₀	280	CH ₃ - (CH) ₂ - C = CH - CH ₃	3,23 50°	0,41	L
22	C ₂₂ H ₄₆	310	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₂ - CH ₃	7,01	0,64	B
23	C ₂₂ H ₄₄	308	CH ₃ - (CH) ₂ - CH = CH ₂	6,65	0,57	B
24	C ₂₂ H ₄₆	310	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₂ - CH ₃	6,49	0,61	L
25	C ₂₂ H ₄₄	308	CH ₃ - (CH) ₂ - C = CH - CH ₂ - CH ₃	6,27	0,59	L

32

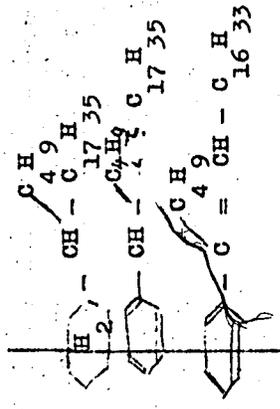
BL.2
 10/15/53

27	C H 22 46	310	$\begin{array}{c} \text{C H} - \text{CH} - (\text{CH}) - \text{CH} - \text{C H} \\ 6 \ 13 \ \text{CH} \ 2 \ 6 \ \text{CH} \ 3 \ 6 \ 13 \end{array}$	6,08	2,03	0,63	Br
28	C H 22 42	306	$\begin{array}{c} \text{C H} - \text{C} = \text{CH} - (\text{CH}) - \text{CH} = \text{C} - \text{C H} \\ 6 \ 13 \ \text{CH} \ 2 \ 4 \ \text{CH} \ 3 \ 6 \ 13 \end{array}$	5,76	2,01	0,54	Br
37	C H 24 50	338	$\begin{array}{c} \text{CH} - (\text{CH}) - \text{CH} \\ 3 \ 2 \ 20 \ \text{CH} \ 3 \end{array}$	8,20	2,20	1,25	L
38	C H 24 48	336	$\begin{array}{c} \text{CH} - (\text{CH}) \\ 3 \ 2 \ 19 - \text{CH} = \text{C} \\ \text{CH} \ \text{CH} \end{array}$	8,77	2,74	0,70	N
39	C H 24 50	338	$\begin{array}{c} \text{CH} - (\text{CH}) - \text{CH} \\ 3 \ 2 \ 14 \ \text{C H} \ 4 \ 9 \\ \text{C H} \ 4 \ 9 \end{array}$	8,71	2,64	0,77	L
40	C H 24 48	336	$\begin{array}{c} \text{CH} - (\text{CH}) - \text{C} = \text{CH} - \text{C H} \\ 3 \ 2 \ 14 \ \text{CH} \ 2 \ \text{CH} \ 3 \ 7 \\ \text{CH} \ 2 \ \text{CH} \ 3 \ 7 \end{array}$	7,95	2,49	0,71	L
51	C H 24 48	336		13,24	3,39	0,97	M
51 b	C H 24 42	330		9,28	2,78	0,77	M

76	55.48 C H	392	224	224	2'35	5'14	0'30	F
74	57.20 C H	386	136	136	2'30	5'00	1'52	F
58	55.48 C H	300	200	200	2'12	5'07	0'24	F
54	55.42 C H	270	180	180	2'08	5'09	0'23	F

For. Tab. 3 a
Bl. 3

76	C H 28.56	392	224	224	19,60	4,17	1,25	M
74	C H 28.50	386	136	136	16,57	3,72	1,20	M
75	C H 28.48	384	136	136	14,57	3,51	1,13	M



111	C H 32 64	448		28,18	5,60	1,22	M
109	O H 32 58	442		23,90	5,00	1,17	M
110	C H 32 56	470		22,10	5,95?	0,78	M

124	C H 34 66	474		77,12	9,10	1,82	M
125	O H 34 54	462		56,80	7,60	1,73	M
123	O H 34 52	460		54,42	7,46	1,68	M
129	O H 36 64	496		68,39	9,11	1,65	M
130	O H 36 62	494		60,95	8,52	1,57	M

Portis. Tab. 3 b
Bl. 2

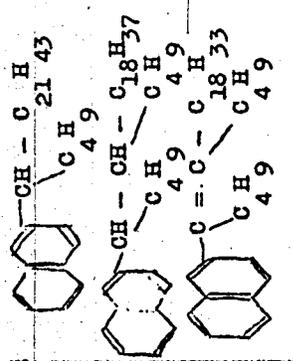
28 0 0-21. 256
KIMBISHI
Page 501

2 4 1 0 5 4 1 1 0 1 1 1 1 1

1

128	C H	36 60	492	40,97	6,74	1,44	M
135	C H	38 64	520	68,76	8,57	1,71	M
136	C H	38 62	518	62,60	8,25	1,67	M

FORIS. Tab. 3 b.
Bl. 3



128	C H	36 60	492	40,97	6,74	1,44	M
135	C H	38 64	520	68,76	8,57	1,71	M
136	C H	38 62	518	62,60	8,25	1,67	M

157

A F E T Y A FILM

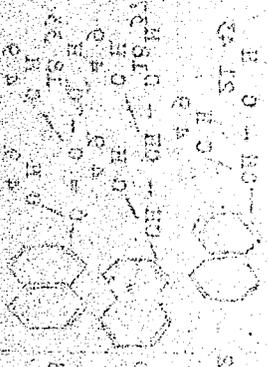
19068
 219
 220
 226
 254
 254

19068
 219
 220
 226
 254

19068
 219
 220
 226
 254

19068
 219
 220
 226
 254

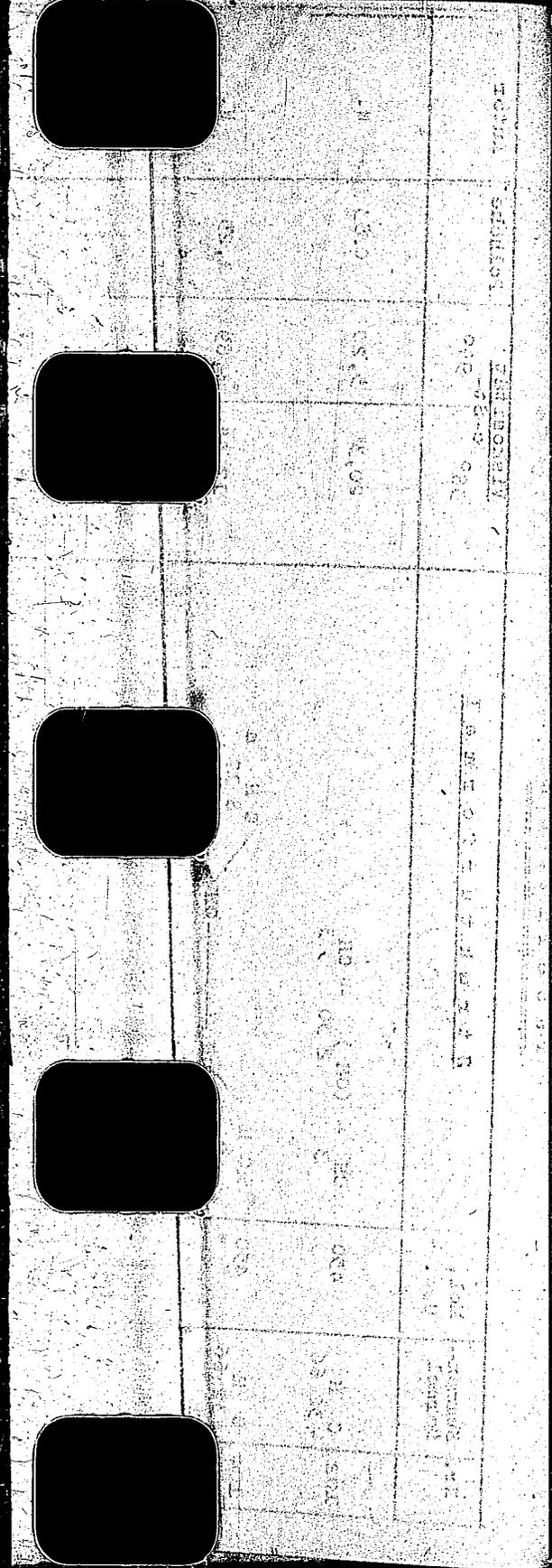
19068
 219
 220
 226
 254



85'00 8'50 1'05 W
 88'12 8'25 1'11 W
 90'25 8'14 1'08 W

Nr.	Summenformel	Mol. Gew.	Strukturformel	Viskosität 38° c-St. 99°	Polhöhe	Autor
1	C ₁₆ H ₃₄	226	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₃	3,06	0,12	N
2	C ₁₆ H ₃₄	226	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - (CH) ₂ - CH ₃	2,96	0,09	B
3	C ₁₆ H ₃₄	226	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₂ - (CH) ₂ - CH ₃	2,92	0,12	B
4	C ₁₆ H ₃₄	226	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₂ - CH ₂ - CH - (CH) ₂ - CH ₃	2,57	0,17	N
5	C ₁₆ H ₃₄	226	CH ₃ - (CH) ₂ - CH - CH ₂ - CH - CH ₂ - CH - CH ₂ - CH ₃	2,51	0,04	N
9	C ₁₈ H ₃₇	254	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₂ - CH ₃	4,30	0,37	B
10	C ₁₈ H ₃₈	254	CH ₃ - (CH) ₂ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₃	2,52 50	0,42	L

PSV



Ports. Tab. 4 b
Bl. 2

107	C H 32 66	450	C H 6 13	-CH-CH-CH-CH-CH-CH-CH CH CH CH CH CH CH 3 3 3 3 3 3	6 H 13	22, 40	3, 73	2, 31	H
-----	--------------	-----	-------------	--	-----------	--------	-------	-------	---

Tabelle 4c

Nr.	Summenformel	Mol.-Gew.	Strukturformel	Viskosität		Polhöhe V.J.	Schp. Co	Autoc
				38°	C-St. 99°			
2	C ₁₆ H ₃₄	226	I. $\begin{array}{c} \text{C H} \\ \\ \text{C H} - \text{OH} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{C H} \\ \\ \text{C H} \end{array}$	2,96	1,28	0,09	- 39	B.
44	C ₁₈ H ₃₈	338	$\begin{array}{c} \text{C H} \\ \\ \text{C H} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \\ \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \end{array}$	0,00	2,21	1,16 1,23	- 80	B.
105	C ₁₈ H ₃₆	450	$\begin{array}{c} \text{C H} \\ \\ \text{C H} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \quad \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \quad \text{C H} \\ \quad \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \quad \text{C H} \end{array}$	18,50	3,74	1,48 1,18	- 80	N.
137	C ₁₈ H ₃₄	562	$\begin{array}{c} \text{C H} \\ \\ \text{C H} - \text{CH} - (\text{CH}_2)_3 - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \\ \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \end{array}$	31,90	5,60	1,49 1,28	- 78	N.
141	C ₁₈ H ₃₈	674	$\begin{array}{c} \text{C H} \\ \\ \text{C H} - \text{OH} - (\text{CH}_2)_4 - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \\ \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \end{array}$	53,90	7,49	1,48 1,09	- 60	N.
103	C ₁₈ H ₃₆	450	II. $\begin{array}{c} \text{C H} \\ \\ \text{C H} - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \quad \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \quad \text{C H} \\ \quad \quad \\ \text{C H} \quad \text{C H} \quad \text{C H} \end{array}$	17,46	3,74	1,43 1,34	- 80	B. 163

Forst. Tab. 4 c
Bl. 2

140	C H 48 98	674	$\left. \begin{array}{l} \text{C H} \quad 8 \quad 17 \\ \text{C H} \quad 6 \quad 13 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \\ \quad \quad \quad \\ \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \end{array} \right\} 2$	50,80	8,10	1,40 121	- 50	N.
146	C H 64 130	899	$\left. \begin{array}{l} \text{C H} \quad 8 \quad 17 \\ \text{C H} \quad 6 \quad 13 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \\ \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \end{array} \right\} 2$	101,0	13,14	1,44 127	- 39 127	N.
104	C H 32 66	450	<p>III.</p> $\begin{array}{c} \text{C H} \quad 8 \quad 17 \\ \text{C H} \quad 7 \quad 15 \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \\ \quad \quad \\ \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{C H} \quad 8 \quad 17 \\ \text{C H} \quad 7 \quad 15 \end{array}$	17,55	3,89	1,25	- 80	N.
139	C H 48 98	674	$\begin{array}{c} \text{C H} \quad 12 \quad 25 \\ \text{C H} \quad 10 \quad 21 \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH} - \\ \quad \quad \quad \\ \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \quad \text{C H} \quad 2 \end{array} \right\} \begin{array}{c} \text{C H} \quad 12 \quad 25 \\ \text{C H} \quad 10 \quad 21 \end{array}$	42,70	7,73	1,23 147		H.

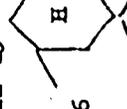
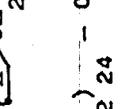
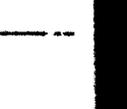
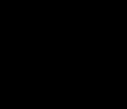
164

340 C H 24 50
 346 C H 24 48
 352 C H 24 46
 358 C H 24 42
 364 C H 24 40
 370 C H 26 54
 376 C H 26 50
 382 C H 26 46

107,0 11,44
 20,80 8,70
 11,40 1,45
 11,40 3,80
 11,40 8,52
 11,40 10,73
 11,40 1,75
 11,40 2,60

107,0 11,44
 20,80 8,70
 11,40 1,45
 11,40 3,80
 11,40 8,52
 11,40 10,73
 11,40 1,75
 11,40 2,60

Tabelle 6

Nr.	Summenformel	Mol. Gew.	Strukturformel	Viskosität 380 c-St	Polhöhe 990	Autor
36	C ₂₄ H ₅₀	338	CH ₃ - (CH ₂) ₂₂ - CH ₃	9,33	2,80	Br
51	C ₂₄ H ₄₈	336		13,24	3,39	M
61	C ₂₄ H ₄₆	334		25,00	4,67	Br
63	C ₂₄ H ₄₂	330		145,00	9,40	Br
66	C ₂₄ H ₄₀	328		372	12,10	Br
67	C ₂₆ H ₅₄	366	CH ₃ - (CH ₂) ₂₄ - CH ₃	10,73	3,19	Br
69	C ₂₆ H ₅₀	362		35,0	5,41	Br
70	C ₂₆ H ₄₆	334		99,0	8,95	Br

165

81

171	C H 28 58	394	OH - (CH) ₂ - CH ₃ 	12,80	3,63	0,87	Br
173	C H 28 56	392	C H 22 45 	19,80	4,70	1,00	M
187	C H 28 54	390	H 16 33 	41,40	6,65	1,53	Br
189	C H 28 50	386	H OH - CH ₂ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₂ - H 	785	21,8	4,37	Br
197	C H 30 58	418	H OH - CH ₂ - CH ₂ - (CH) ₂ - CH ₃ 	30,20	5,16	1,63	L
199	C H 30 54	414	H OH - (CH) ₂ - (CH) ₂ - H 	282,0	20,7	2,00	Br
200	C H 30 52	412	H OH - CH ₂ - CH ₂ - H 	280 80°	73,6	12,30	

Port. Tab. 6
Bl.2

171	C H 28 58	394	OH - (CH) ₂ - CH ₃ 	12,80	3,63	0,87	Br
173	C H 28 56	392	C H 22 45 	19,80	4,70	1,00	M
187	C H 28 54	390	H 16 33 	41,40	6,65	1,53	Br
189	C H 28 50	386	H OH - CH ₂ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₂ - H 	785	21,8	4,37	Br
197	C H 30 58	418	H OH - CH ₂ - CH ₂ - (CH) ₂ - CH ₃ 	30,20	5,16	1,63	L
199	C H 30 54	414	H OH - (CH) ₂ - (CH) ₂ - H 	282,0	20,7	2,00	Br
200	C H 30 52	412	H OH - CH ₂ - CH ₂ - H 	280 80°	73,6	12,30	

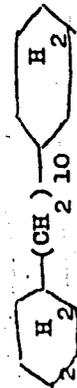
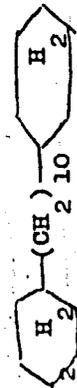
31	C ₂₂ H ₄₂	306		17,10	3,88	1,15	Br.
32	C ₂₂ H ₄₂	306		13,70	3,57	0,97	Br.
51	C ₂₄ H ₄₈	336		13,24	3,39	0,97	M.
52	C ₂₄ H ₄₈	336		13,23	3,32	0,71	Br.
53	C ₂₄ H ₄₈	336		13,25	3,40	0,66	Br.
61	C ₂₄ H ₄₆	334		25,00	4,67	1,45	Br.
57	C ₂₄ H ₄₆	334		23,40	4,49	1,43	Br.
54	C ₂₄ H ₄₆	334		23,10	4,91	1,12	Br.

Tabella 7

Nr.	Summenformel	Mol. Gew.	Strukturformel	Viskosität 38° g-St. 99°	Polhöhe V.J.	Autor
31	C ₂₂ H ₄₂	306		17,10	3,88	Br.
32	C ₂₂ H ₄₂	306		13,70	3,57	Br.
51	C ₂₄ H ₄₈	336		13,24	3,39	M.
52	C ₂₄ H ₄₈	336		13,23	3,32	Br.
53	C ₂₄ H ₄₈	336		13,25	3,40	Br.
61	C ₂₄ H ₄₆	334		25,00	4,67	Br.
57	C ₂₄ H ₄₆	334		23,40	4,49	Br.
54	C ₂₄ H ₄₆	334		23,10	4,91	Br.

28 C H 334
 28 C H 390
 28 C H 390
 28 C H 390
 28 C H 390

H H C H
 H (CH) H
 H H C H
 H H C H
 H H C H

350
 350
 350
 350

42,00
 41,40
 37,90
 30,88
 32,30

4,97
 1,53
 6,43
 1,25
 1,80

Br.
 Br.
 Br.
 M.
 I.

Forts. Tab. 7
Bl. 2

62	O H 24 46	334		42,00	4,51	4,97	Br.
87	O H 28 54	390		41,40	6,65	1,53	Br.
78	O H 28 54	390		37,90	6,41	6,43	Br.
84	O H 28 54	390		30,88	5,86	1,25	M.
80	O H 28 54	390		32,30	5,18	1,80	I.

168

OS

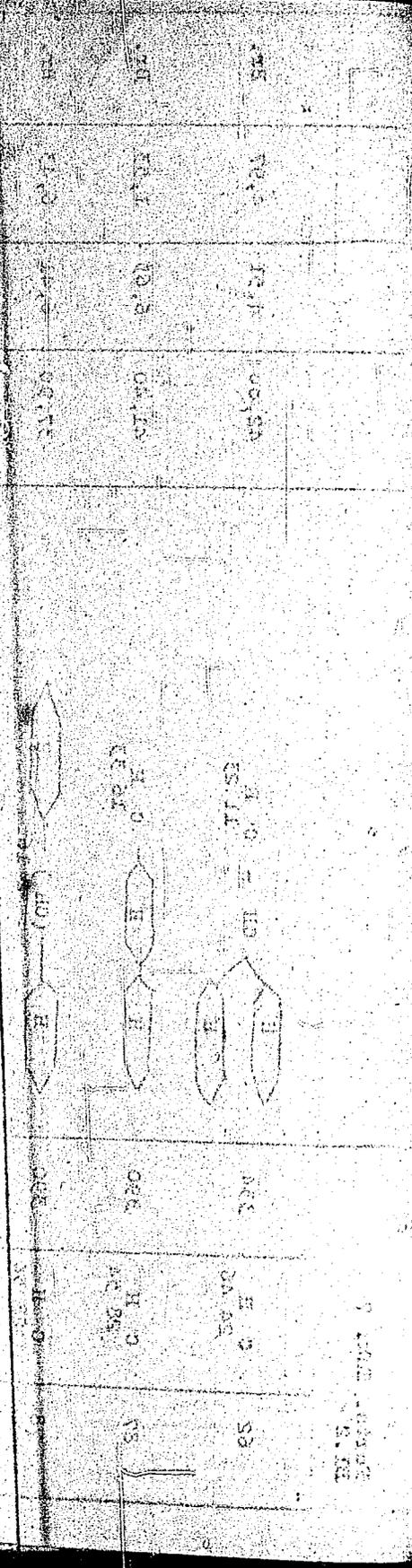
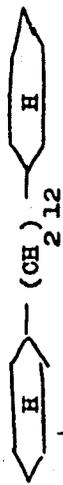
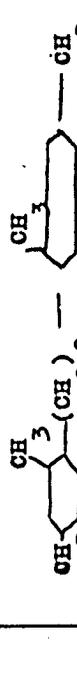


Tabelle 8

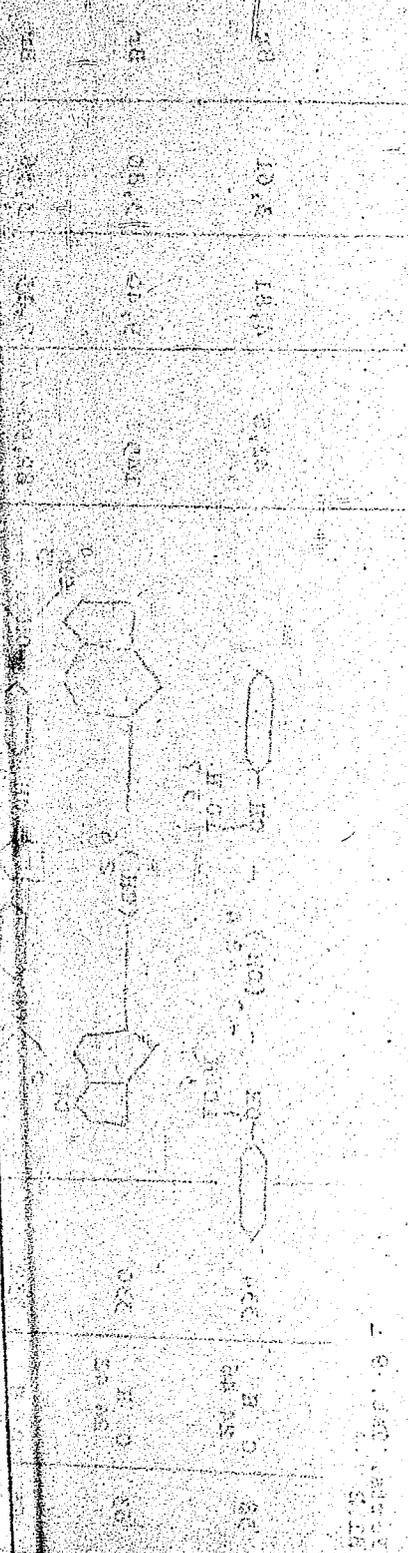
Nr.	Summenformel	Mol. Gew.	Strukturformel	Viskosität 38° C - St. 99°	Polhöhe	Auter
51	C ₂₄ H ₄₈	336		13,24	0,97	M.
35	C ₂₃ H ₄₆	322		7,82	0,79	Br.
54	C ₂₄ H ₄₆	334		23,10	1,12	Br.
47	C ₂₄ H ₄₆	334		15,30	1,07	Br.
49	C ₂₄ H ₄₆	334		12,50	1,04	Br.

109

Tabelle 9

Nr.	Summenformel	Mol.-Gew.	Strukturformel	Viskosität 30°C - St. 99°	Polhöhe	Autor
54	C ₂₄ H ₄₆	334		23,1	1,12	Br
57a	C ₂₄ H ₄₆	334		29,07	1,41	Br
55	C ₂₄ H ₄₆	334		19,50	1,50	Br.
57	C ₂₄ H ₄₆	334		23,40	1,43	Br
56	C ₂₄ H ₄₆	334		28,60	1,53	Br
59	C ₂₄ H ₄₆	334		30,50	2,45	Br

116



Forts. Tab. 9
 Bl. 3

88	C_8H_{16} 28 56	 392	24,47	4,56	1,80	Br
80	C_8H_{16} 28 54	 390	32,30	5,18	1,80	L

Tabelle 12

KW.Nr.	44	103	29	30	70	69
Konstitution	$\begin{matrix} \text{C H - CH - CH} \\ 8 \quad 17 \quad 2 \\ \text{C H} \\ 6 \quad 13 \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{-CH - C H} \\ 6 \quad 13 \\ \text{CH} \\ 3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{C H - CH - CH -} \\ 8 \quad 17 \quad 2 \quad 2 \\ \text{C H} \\ 6 \quad 13 \end{matrix}$	(CH) 2 10	(CH) 2 10	$\begin{matrix} \text{C H} & \text{H} & \text{CH} & \text{C H} \\ 6 \quad 13 & & 2 & 6 \quad 13 \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{-CH} & \text{H} & \text{C H} \\ 2 & & 6 \quad 13 \end{matrix}$ - CH 2 $\begin{matrix} \text{C H} & \text{C H} \\ 2 & 6 \quad 13 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{C H} & \text{C H} \\ 2 & 6 \quad 13 \end{matrix}$
Summenformel	$\begin{matrix} \text{C H C H} \\ 24 \quad 50 \quad n \quad 2n+2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{C H C n H} \\ 32 \quad 66 \quad 2n+2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{C H C n H} \\ 22 \quad 30 \quad 2n-14 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{C H C n H} \\ 22 \quad 36 \quad 2n-8 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{C H C n H} \\ 26 \quad 50 \quad 2n-2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{C H C H} \\ 26 \quad 38 \quad 2n-14 \end{matrix}$
d 20°	0,8000	0,8133	0,9398	0,8990	0,8690	0,9233
n D	1,4450	1,4535	1,5328	1,5002	1,4759	1,5220
Mol.-Gew.	338	450,53	294,24	300,29	362,40	350,3
Mol.-Ref. gef.	112,5	149,7	97,13	98,3	117,5	115,7
Mol.-Ref. ber.	112,5	149,3	85,85	92,4	117,3	104,1
Doppelbindung gef.	0	0,24	6,7	3,5	0,09	6,8

Forts.
Tab. 12
Bl. 2

Doppelbindung theor.	0	0	6	3	0	6
Spez.-Ref. gef.	0,3327	0,3326	0,3301	0,3273	0,3245	0,3303
Anilinpunkt gef.	109	121,5	0,5	13,8	103,2	- 3
Anilinpunkt abgel.	110	122	100	96,8	103	109
Differenz	1,0	0,5	99,5	82,7	0,2	112
Anilinpunkter- höhung	0,8	0,4	79,6	66,2	0	89,6
Anilinpunkt nach Hydrirerg. errechnet	109,8	121,9	80,1	80,0	103,2	86,6
Spez.-Ref., die dem Anilin-P. entspricht	0,3327	0,3326	0,3168	0,3160	0,3245	0,3148
Paraffin gef. %	95,0	98,5	30,0	27,8	63,4	26,6
" ber. %	100,0	100,0	47,4	46,6	34,7	36,6
Aromaten ref. %	0,68	0,34	67,7	56,23	0	76,2

N. Vieweg
179

Vertrauliche Mitteilung No 8

*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 17. Dezember 1938 in Berlin, Ingenieurhaus.

Vertrauliche Mitteilung Nr. 8

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 Empfän-
gers bedarf der Genehmigung der Geschäftsstelle des
Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

181

Verein deutscher Ingenieure Im Februar 1939
im NSBDT

Fachauschuß für Maschinenelemente

Arbeitsgruppe "Schmiertechnik"

Sitzung am 17. Dezember 1938, 9³⁰ Uhr,
in Berlin NW 7, Ingenieurhaus.

Verhandlungsleiter: Hr. Heidebroek VDI
Schriftführer: Hr. Würges VDI

Anwesend die Herren: Heidebroek (Obmann), Dahl, Erk, Harms,
Holm, v. Phillipovich, Prandtl, Ude,
Vieweg, Wolf, Würges, Zorn.

Tagesordnung:

1. Dr. Hermann Z o r n, Merseburg:
"Beiträge zur Chemie und Physik der Schmieröl-Kohlenwasser-
stoffe".
2. Berichte über den Stand der Forschungsarbeiten:
 - a) Prof. Dr.-Ing. E.h. P r a n d t l, Göttingen (S.1),
 - b) Prof. Dr. K.L. W o l f, Halle (S.3),
 - c) Dr.phil. R. H o l m, Berlin (S.16).
3. Besprechung des Arbeitsprogrammes.
4. Einladung der Royal-Shell-Gruppe zu einer Besichtigung
der Laboratorien in Amsterdam.

Zu Punkt 1: Der Bericht von Herrn Dr. Z o r n wird den Mitglie-
dern des Ausschusses als "Vertrauliche Mitteilung" Nr. 7
übergeben werden.

Zu Punkt 4: Die Einladung der Rhenania-Ossag AG. zum Besuch
der Shell-Laboratorien in Amsterdam wird außerordentlich
begrüßt. Die Geschäftsstelle wird beauftragt, einen geeigneten
Zeitpunkt für die Besichtigung zu ermitteln und bekanntzu-
geben.

Zu Punkt 3 und 4 der Tagesordnung:

Hr. P r a n d t l: Bei den Göttinger Arbeiten stehen natürlich die Strömungserscheinungen des Öles im Lager im Vordergrund. Durch den ersten Mitarbeiter auf diesem Gebiet, Hr. Dr. K y r o p o u l o s, der physikalischer Chemiker war, bin ich auch etwas mit den physikalischen und chemischen Ölfragen in Verbindung gekommen. Die erste Arbeit bezog sich auf die Klärung der Frage, ob die Zähigkeit bei den kleinen Scherungsgeschwindigkeiten im Viakosimeter und bei den viel tausendmal größeren im Lager denselben Zahlwert hat. Dies war von vornherein keineswegs sicher. Die sehr sorgfältigen Versuche von Kyropoulos mit einer von mir entworfenen Maschine ^{x)} haben dann aber gezeigt, daß größere Abweichungen nicht auftreten ^{xx)}. Gewisse Abweichungen, nämlich eine Verminderung der Zähigkeit um 10 bis 20 vH sind allerdings beobachtet, die gleichen Zähigkeitsveränderungen ergeben sich aber bei Temperaturerhöhungen von 2 bis 3°, so daß die technische Wichtigkeit dieser Abweichungen nicht gerade groß ist.

Eine zweite Versuchsreihe ist nun mit einer neuen Maschine von W. F r ö s s e l durchgeführt worden ^{xxx)}. Es handelt sich hier um Versuche zur Nachprüfung der hydrodynamischen Theorie der Lagerreibung. Da die Theorie über das Michell-Lager besonders vollständige Angaben macht, wurde die erste Versuchsreihe mit solchen Lagern durchgeführt.

^{x)}Forsch.Ing.-Wes. 3 (1932), S.293

^{xx)}Forsch.Ing.-Wes. 3 (1932), S.296

^{xxx)}Forsch.Ing.-Wes. 9 (1938), S.261/278

183

In der Versuchseinrichtung (vgl. Bild 1) sind drei gleiche Lagerschalen angeordnet, die von einer Zange mit einem meßbaren Druck gegen den Zapfen gepreßt werden. Durch ein Hebelwerk ist dafür gesorgt, daß die Zange frei schwebt, so daß die Belastung der drei Lagerschalen gleich groß ist. Das Reibungsdrehmoment der drei Schalen wird an einem Waghebel gemessen. Die einzelne Lagerschale ist um einen Punkt frei drehbar und stellt sich unter den in dem strömenden Öl erzeugten Drücken selbsttätig so ein, daß die resultierende Kraft durch den Drehpunkt geht. Die Größe des Lagerspaltes und die Verkantung der Lagerblöcke gegenüber dem Stillstand wurde mit Meßuhr und Spiegeln gemessen.

Die ersten Versuche zeigten trotz reichlicher Ölzufuhr große Unstimmigkeiten gegenüber der Theorie, vor allem waren die Lagerspalten viel zu klein. Die Unstimmigkeiten verschwanden aber völlig, als die gesamte Lagereinrichtung in eine vollkommen mit Öl gefüllte Wanne getaucht wurde. Die einzig mögliche Erklärung für die erwähnten Unstimmigkeiten ist die, daß auf der den Zapfen umkleidenden Ölhaut immer noch eine Lufthaut mit in den Lagerspalt eintrat und die Lager damit also "luftgeschmiert" waren. Nach dem Eintauchen der Vorrichtung in die Ölwanne ergab sich sehr gute Übereinstimmung mit den theoretischen Resultaten. Eine zweite Versuchsreihe betraf das Verhalten von Lagerblöcken, deren Innenfläche einen etwas größeren Radius hatte als der Zapfen, so daß die engste Stelle des Lagerspaltes im Inneren der Lagerfläche lag. Bei diesen Lagern war noch

eine in der Theorie unentschieden gebliebene Frage zu klären, nämlich nach dem tiefsten Druck, der dabei hinter der engsten Stelle entsteht. Es war hier Kavitation erwartet worden. Die Druckmessungen zeigten aber, von wenigen Ausnahmen abgesehen, keinen tieferen Druck als Atmosphärendruck, was dadurch erklärt werden kann, daß das Öl Gas enthält, die bei Druckerniedrigung ausgeschieden werden und die den Kavitationsraum mit atmosphärischem Druck auffüllen, selbst wenn Außenluft nicht Zutreten kann. Nach Aufklärung dieses Punktes durch die Druckverteilungsmessungen zeigten auch diese Versuche gute Übereinstimmung der berechneten Reibungskräfte und Spaltweiten mit dem Versuch.

Hr. H. T h o m a, Karlsruhe, hat bei seinen Ölgetrieben sehr viel Erfahrungen über die Verwendung geeigneter Lagermetalle gesammelt. Nach seiner Ansicht führt beim Durchgang von Fremdkörpern u. dergl. eine lokale Reibungserwärmung zum Verschweißen der beiden Metalle in mikroskopischen Bereichen, wobei in diesen Bereichen Legierungen entstehen. Alle Lagermetalle lassen sich daher paaren, bei denen diese Legierung weniger fest ist als das weichere der beiden Metalle.

Hr. W o l f: Im April dieses Jahres berichteten wir unter anderem über damals noch nicht abgeschlossene Arbeiten über "Innere Reibung und innere Schmierung" ¹⁾, deren Zielsetzung

¹⁾ Die Niederschrift des genannten Berichtes erfolgte in der Vertraulichen Mitteilung Nr. 3 für die Mitglieder der Arbeitsgruppe "Schmieretechnik" des Fachausschusses für Maschinenelemente des VDI.

es-u.a. im Hinblick auf die Frage, wie man bei gegebenen anderweitigen Anforderungen Flüssigkeiten bestimmter Zähigkeit herstellen könne - war, eine Molekulartheorie der Inneren Reibung und inneren Schmierung zu geben unter Berücksichtigung des in Flüssigkeiten immer stark hervortretenden Einflusses der zwischenmolekularen Kräfte. Grundlage dieser Untersuchung boten kurz zuvor abgeschlossene Untersuchungen über den Ordnungszustand der Moleküle in Flüssigkeiten, die wir an einfachsten organischen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen auf Grund von Messungen der Dichte, der Dielektrizitätskonstanten, der Gas- und Dampfdrucke, der dielektrischen Verluste und der Mischungswärmen ²⁾ ausgeführt hatten. Diese an übersichtlichen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen (gleichsam am "Modell") durchgeführten Untersuchungen über innere Reibung und innere Schmierung konnten wir im August zu einem ersten Abschluß bringen. Wegen aller Einzelheiten müssen wir auf die ausführliche Veröffentlichung ³⁾ verweisen, die hier hervorzuhebenden allgemeinen Ergebnisse dieser Untersuchung sind kurz zusammengefaßt die folgenden:

1) Die innere Reibung von Flüssigkeiten bzw. Flüssigkeits-

²⁾ K.L. Wolf, H. Harms u. H. Frahm, Z. phys. Chem. (B) 36, S. 237, (1937), K.L. Wolf, Trans. Faraday Soc. XXXIII (1936/37), S.179.

³⁾ H. Harms, H. Rössler und K.L. Wolf, Z. phys. Chem. (B) Bd.41 (1938) S. 321/364.

gemischen wird mit den Eigenschaften der die Flüssigkeit aufbauenden Moleküle und den von Ihnen ausgehenden zwischenmolekularen Kräften in Verbindung gebracht. Es wird bei der inneren Reibung in Flüssigkeiten unterschieden zwischen dem (bei Gasen allein tätigen) Impuls - Transport und einer nur in Flüssigkeiten bestehenden und hier wesentlich wirksameren durch die Wirkung der zwischenmolekularen Kräfte (Restvalenzkräfte) bedingten Impuls - Leitung. Das so gewonnene und an breiten experimentellen Material erprobte Verständnis des Mechanismus der inneren Reibung in Flüssigkeiten setzt voraus die Einführung einer molaren Viskositätsgröße, die beim Übergang von einer zur anderen Substanz erst die Voraussetzung einheitlicher und vergleichbarer Bedingungen schafft.

- 2) Die als "innere Schmierung" zu bezeichnende Herabsetzung der inneren Reibung, die beim Mischen von verschiedenen Flüssigkeiten beobachtet wird, wird auf Grund der Kenntnis des Ordnungszustandes der Moleküle in den Flüssigkeiten mit der Wirkung der zwischenmolekularen Kräfte verknüpft. Die gesamte beobachtete innere Schmierung kann jeweils quantitativ in drei Teilbeträgen zerlegt werden, die herühren
- a) von der Verschiedenheit der Molvolumina der zur Mischung gelangenden Flüssigkeiten,
 - b) von den beim Mischen auftretenden Änderungen in der Raumbeanspruchung (Volumenkontraktion bzw. Dilatation) und
 - c) insbesondere von der Wirkung der zwischenmolekularen Kräfte.

3) Die molekularen Vorstellungen über das Wesen der inneren Reibung und inneren Schmierung in Flüssigkeiten werden an neuen Messungen erprobt und bestätigt. Hervorsuhaben ist hier u.a., daß sich die starke Temperaturabhängigkeit der Viskosität wohl zum ersten Mal auf einfache molekulare Vorgänge zurückführen läßt und daß Zusammenhänge mit der chemischen Konstitution sichtbar werden.

Die Untersuchungen dieser Art werden fortgeführt. Messungen, die uns Aufschluß geben sollen über den jeweiligen Ordnungszustand der Moleküle in Flüssigkeitsgemischen werden verbunden mit Messungen der inneren Reibung und inneren Schmierung solcher Stoffe, die den praktisch verwandten Schmiermitteln näher stehen als die für unsere "Modellversuche" verwandten niederen Kohlenwasserstoffe und Alkohole. Insbesondere ist dabei an höhere Kohlenwasserstoffe, Fettsäuren, Thioalkohole und an andere hochviskose Flüssigkeiten als Endziel gedacht. Daneben soll die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Viskosität als das bisher (wenigstens hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit) geschehen konnte, untersucht werden. Mit der Messung der Temperaturabhängigkeit haben wir bereits begonnen (Dr. Dunken, H. Rößler). Die Messung der Druckabhängigkeit ist vorgesehen. Die Ausdehnung auf die oben genannten Flüssigkeiten erfordert jedoch noch langwierige präparative Vorbereitungen, insbesondere dann, wenn der Zusammenhang zwischen Reibung, Schmierung und chemischer Konstitution wirklich erfaßt werden soll.

188

II.

Die Frage nach dem Wesen der inneren Reibung und inneren Schmierung ist die Frage nach der Impulsüberführung, die in Flüssigkeiten, wie wir unter I gezeigt haben, teils durch Impulstransport (Überführung des Impulses durch "gaskinetischen" Stoß), teils durch Impulseitung (Überführung des Impulses über kraftmäßig verbundene Molekülaggregate) erfolgt. Bei Gasen, wo die innere Reibung allein auf dem Impulstransport beruht und wo die mathematische Theorie voll entwickelt vorliegt, besteht eine volle Analogie der inneren Reibung zur Wärmeleitung. Bei der Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit hat an Stelle des Impulstransportes nur der Energie-transport zu treten. Man könnte also erwarten, daß auch bei Flüssigkeiten eine ähnliche Entsprechung zwischen Viskosität und Wärmeleitung bestände, so daß Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten zugleich der Schmiermittelforschung nützlich sein sollten. Dabei sollten hier, da bereits bei Gasen trotz aller Analogie doch schon typische, von Molekülbau abhängige Unterschiede, die wohl auf unterschiedliches Verhalten der Molekültranslation gegenüber der Molekülrotation beim Transport zurückgehen¹⁾, hervortreten, gerade gewisse Verschiedenheiten in Impuls-

- 8 -

1) Die sonst bewährte Theorie verlangt, daß das Verhältnis $\lambda/\eta = cr$ sei (η = Koeffizient der inneren Reibung, λ = Wärmeleitfähigkeit, c = spezifische Wärme. Tatsächlich ist aber $\lambda/\eta = K/cr$, wo K von der Struktur der Moleküle abhängt, s. etwa Handb. der Exper. phys. VIII, 1 S.429 ff., Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik III 2 S.91, Cl. Schäfer, Theor. Physik II S.423.

- 8 -

und Energietransport zu erfassen sein. Als Ausgangspunkt wäre, wollte man wieder das die Flüssigkeit von Gas Absetzende erkennen, wie bei der inneren Reibung in erster Linie die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitung und die Wärmeleitung von Flüssigkeitgemischen zu wählen. Die Durchsicht des bereits vorhandenen Meßmaterials zeigt, daß dieses in Vergleich zu den Messungen der Viskosität noch sehr spärlich ist. Die wenigen in dem Tabellenwerk von Landolt und Börnstein angegebenen Werte der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten und ihrer Temperatur- und Druckabhängigkeit ergeben jedoch bereits gewisse Anhaltspunkte dafür, daß die vermutete Gleichartigkeit auch in Flüssigkeiten besteht, so daß eine Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten lohnend erscheint. Wir beabsichtigen daher (Dr. Dunken, Dr. Behrens) gerade auch im Hinblick auf die weitere Aufklärung des Wesens der Impulsüberführung, Messungen der Wärmeleitfähigkeit an Flüssigkeiten und Flüssigkeitgemischen auf breiterer Grundlage und in systematischer Form in Angriff zu nehmen, doch werden diese Arbeiten aus Mangel an Arbeitskraft und -mitteln erst in einiger Zeit begonnen werden können.

III.

Betrafen die unter I und II gemachten Ausführungen über die innere Reibung und innere Schmierung von Flüssigkeiten das Gebiet der Vollschrnerung, so können wir heute zum ersten Mal auch davon berichten, auf welchen Wege wir im Anschluß an unsere Vorstellungen über das Wirken der

190

zwischenmolekularen Kräfte und mit Hilfe einiger in den letzten Jahren entwickelter Meßmethoden die molekularen Vorgänge bei der Grenzschnierung wesentlich fördern und klären zu können hoffen. Das Ziel der in folgenden zu nennenden Untersuchungen sehen wir, soweit diese die Frage der Schnierung betreffen, ganz entsprechend den unter I und II gemachten Ausführungen in der Auffindung des tatsächlichen Zusammenhanges zwischen den Eigenschaften der die Grenzschnierung besorgenden Moleküle, den Eigenschaften des Lagermaterials und der Schmierwirkung und insbesondere den unter dem Namen Oiliness zusammengefaßten Erscheinungen.

Die erste und wohl wichtigste Frage, deren experimentelle Beantwortung wir in Angriff genommen haben (Dr. Harms, K. Merkel), ist die nach der (in kcal/Mol zu messenden) Haftfestigkeit der die Grenzschnierung besorgenden, am Lagermaterial adsorbierten Moleküle. Die Kenntnis dieser Größen wurde bereits bei der Ausschußsitzung in April dringend gefordert. Sie scheint uns - abgesehen von der allgemeinen Frage nach dem Wesen der Grenzschnierung - heute umso dringlicher zu sein, als bei der heute oft sehr geringen Größe des Lagerspiels die Frage, wie weit die bei der Anwendung der hydrodynamischen Grundgleichungen gemachte Voraussetzung "unendlich großer Haftfestigkeit" der Grenzschnierung noch zutreffend sei, erst beantwortet werden kann, wenn die Größe der Haftfestigkeit endlich einmal gemessen ist. Es sprechen bereits Anzeichen dafür, daß die Grenzen der Gültigkeit der hydrodynamischen Kontinuumstheorie heute

SAFETY FILM

bereits oft überschritten werden, so daß diese überhaupt durch eine Molekulartheorie zu ersetzen wäre. Daneben spielt, wenn wir die Messung der Adsorptionswärme an Lagerersatzstoffen mit einbeziehen, auch die Frage der Bereitung von für Ersatzstoffe geeigneten Schmiermitteln hier eine wichtige Rolle. Es wird die Untersuchung der Haftfestigkeit also systematisch so zu erweitern sein, daß unter begründeten molekular physikalischen Gesichtspunkten ganz allgemein die günstigsten Bedingungen für die Schmierwirkung in Abhängigkeit von der chemischen Konstitution des Schmiermittels und des Lagermaterials ermittelt werden.

Zur Entscheidung der Frage der Haftfestigkeit der Schmiermittelmoleküle an Metallen oder Lagerersatzstoffen haben wir zunächst mit dem Aufbau einer Apparatur zur Bestimmung von Präzisionsdichten begonnen. Die Dichtemessung erfolgt nach einer von Prang angegebenen Differenzmethode durch Wägen zweier großer Schwimmer mit einer Genauigkeit von einigen Einheiten in der achten Dezimale der Dichte. Die Messungen werden zunächst an der molekularen Zusammensetzung nach bekannten Flüssigkeitsgemischen durchgeführt werden, derart, daß in den einen der beiden (mit dem gleichen Flüssigkeitsgemisch beschickten) Standzylinder definierte, optisch glatte Metallflächen (Folien bekannter Größe) hineingebracht werden. Sind die Vorstellungen über die vorzugeweise Adsorption von Molekülen mit "aktiven" Gruppen (Dipolmoment, Polarisierbarkeit) an den Grenzflächen richtig, so folgt, falls ein Flüssigkeitsgemisch mit verschiedenartigen (aktiven und inaktiven)

Molekülen vorliegt, daß bei spezifischer Adsorption der einen Komponente eine Dichteänderung resultieren muß. Eine Überschlagsrechnung an einem bestimmten Flüssigkeitgemisch, welches als eine Komponente ein wirksames Dipolmolekül enthält, deren andere Komponente aber aus dipollosen Molekülen zusammengesetzt ist, ergibt unter der Annahme, daß die Dipolmoleküle vom Metall in Monomolekularer Schicht adsorbiert werden, eine Änderung der Dichte ρ um den Betrag $\Delta\rho = 0.0000004$, wenn in den einen der beiden vorliegenden Standzylinder eine Metallfolie von 16 cm^2 Fläche gebracht wird. Erhöht man die Zahl der Metallfolien, so erhöht sich entsprechend die Dichteänderung und damit die Meßgenauigkeit. Aus der Dichteänderung kann dann, da die Größe der Oberfläche des Metalls makroskopisch ausmeßbar ist, die Zahl der pro Quadratzentimeter adsorbierten Moleküle berechnet werden ¹⁾. Bei der oben angegebenen Meßgenauigkeit muß erwartet werden, daß so die Zusammenhänge zwischen Adsorption, chemischer Konstitution und Art des Lagermaterials aus den Meßergebnissen abgelesen werden können. Schwierigkeiten dürfte bei manchen Metallen und Erstattstoffen oft noch die Herstellung genügend dünner Folien machen.

Diese Untersuchungen, die also als Ziel die Angabe der Zahl der adsorbierten Moleküle pro cm^2 haben, sollen, durch Messungen der Adsorptionswärme an Metallen und Lagerersatzstoffen ergänzt, die Bestimmung der Haftfestigkeit der Moleküle ermöglichen. Die Messungen werden mit Hilfe einer zur Messung kleiner Wärmetönung in unserem Laboratorium (gemeinsam mit Frahm und Merkel) entwickelten Apparatur - unbescha-

1) Kennt man - was immer der Fall sein dürfte - noch die Größe der Moleküle, so können von hier aus auch noch Rückschlüsse auf die Zahl der adsorbierten Schichten gezogen werden.

193

det der vorzuziehenden Schwierigkeiten - wieder an definierten, optisch glatten Metallflächen (Polier) durchgeführt werden. Unter der Annahme, daß die Adsorptionswärme 10 - 100 Kal/pro Mol adsorbierter Substanz beträgt, können wir mit der Apparatur, die bei uns seit Jahren erfolgreich zur Messung von Mischungswärmen verwandt wird ¹⁾, nach Ausführung kleiner Änderungen, die Adsorptionswärmen voraussichtlich auf etwa 10 % genau bestimmen. Die Ergebnisse der Dichtemessungen und der Adsorption zusammengefaßt ergeben dann jeweils die gesuchte Auskunft über die Haftfestigkeit pro adsorbiertes Molekül.

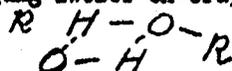
IV.

Wir haben des Öfteren auf die Bedeutung der Kenntnis der Ordnungszustände der Moleküle in Flüssigkeiten für die Fragen der Gesamtschmierung (innere und Grenzschmierung) hingewiesen. Es muß deshalb hier schließlich noch auf neuere Untersuchungen eingegangen werden, die wir zur weiteren Aufklärung des Ordnungszustandes der Moleküle in Flüssigkeiten und der Wirkung der zwischenmolekularen Kräfte auszuführen begriffen sind. Anlaß zu diesen Untersuchungen gaben die Ergebnisse einer in unserem Institut von H. Bohrens ausgeführten Doktorarbeit, die von Messungen der Temperaturabhängigkeit der Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen handelt. Bei einigen Flüssigkeiten zeigten sich in der Temperatur-

1) S.H. Frahm u. K.L. Wolf, Z. phys. Chem. (A) 178, 411 (1937);
K.L. Wolf, H. Pahlke und K. Wehage, Z. phys. Chem. (B) 28, 1, (1935)

194

abhängigkeit der Ausdehnung Unregelmäßigkeiten und Hysteresiserscheinungen. Da die Unregelmäßigkeiten (zwischen 37 und 39°) bis jetzt nur bei den Alkoholen und Wasser bemerkt wurden ¹⁾, lag es nahe, die Ursache in einer spezifischen Wirkung der polaren OH-Gruppe zu suchen. Die Ergebnisse der Messungen führten uns zu der Annahme, daß die Unregelmäßigkeit auf unpolare Assoziation zurückgeht, speziell an die gegenseitige Absättigung zweier OH-Gruppen in der Form



gebunden ist, so daß die Unregelmäßigkeiten wahrscheinlich auf spontane Änderungen dieser zwischenmolekularen Ordnungszustände zurückzuführen wären. ²⁾ Die Ergebnisse dieser Messungen werden z.Zt., da in der Literatur nicht viele Angaben über derartige Unregelmäßigkeiten in den makroskopischen Eigenschaften von so einfachen Flüssigkeiten zu finden sind und das Auftreten spontaner Änderung der Ordnungszustände in solchen Flüssigkeiten entscheidende Bedeutung hätte, mit erhöhter Genauigkeit nachgeprüft. Während nämlich die bisherigen Messungen von Behrens mit einer dilatometrischen Methode ausgeführt wurden, wollen wir auf experimentell unabhängigen Wege durch genaueste Messung der Temperaturabhängigkeit der Dichten mit der schon oben beschriebenen Apparatur diese Frage endgültig

- 1) Fettsäuren sind noch nicht untersucht !
- 2) Bei Glykol und Glycerin fehlen diese Anomalien, wohl infolge intramolekularer Absättigung der OH-Gruppen. Ebenso verschwinden sie bei Zusatz von Ionenbildnern (anorganischen Salzen) wohl infolge "Einschmelzen" der Molekülkomplexe, s. Diss. Behrens.

entscheiden. Messungen des Ramaneffektes und der Ultrarotabsorption sowie die Feststellung von Anomalien des Wassers bei 37°0, die von anderen Autoren mitgeteilt wurden, wären dann zur Ergänzung mit herbeizuziehen.

V.

Zum Schluß möchten wir auf eine Arbeit von Y. Suge¹⁾ (Tokio) hinweisen. Suge untersucht zur Aufklärung der Schmier-eigenschaften, insbesondere der "Oiliness", die Viskosität, die Temperaturabhängigkeit, die Druckabhängigkeit der Viskosität, die Wärmeleitung und die Kompressibilität von Ölen und berichtet weiter über die Ergebnisse von Elektronenbeugungen an Schmierfilmen. Praktisch dürfte diese Arbeit manches Wertvolle bringen. Das molekulare Verständnis seiner Versuche ist jedoch bei der Unkenntnis des molekularen und zwischenmolekularen Aufbaues seiner Substanzen nur in sehr begrenztem Maße möglich. Ein allgemeineres Verstehen kann wohl erst erreicht werden, wenn grundlegende Untersuchungen über den molekularen und zwischenmolekularen Aufbau derartiger Stoffe vorliegen.

VI.

Insgesamt möchten wir zur Lage der Schmiermittelforschung folgendes sagen: Die Kontinuumslehre (insbesondere Thermodynamik und Hydrodynamik) sind, wie auch sonst oft in

1) Oktoberheft der Scientific Papers

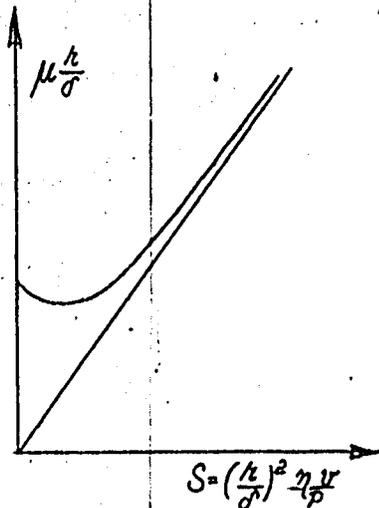
der modernen Technik so auch in der Frage der Schmierung an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit angelangt. Was heute für eine wissenschaftliche Behandlung nötig ist, ist die molekulare Betrachtungsweise. Da aber insbesondere in der vor allem zuständigen physikalischen Chemie unter der Vorherrschaft und unter dem Eindruck der Erfolge der thermodynamischen Betrachtungsweise die molekularphysikalischen Betrachtung lange Zeit stark zurückgedrängt blieb und bleiben mußte, sind wir heute vor die Notwendigkeit gestellt, zunächst noch Vorarbeiten ganz allgemeiner Art zu leisten, wie das u. a. auch das heutige Referat von Hrn. Dr. Z o r n über den Zusammenhang zwischen chemischer Konstitution und Schmiermitteleigenschaften eindringlich zeigte. Die Fortschritte, welche die Methoden zur Bestimmung molekularer Größen und Eigenschaften in den letzten zehn Jahren gemacht haben, zeigen wohl den Weg, wo die weitere Untersuchung auszuführen ist. Zu tun bleibt aber - wenn wir zur praktischen Schmierung vordringen wollen - fast noch alles. Aussicht darauf, daß wir die hier gestellten Aufgaben in erträglicher Zeit hinreichend fördern, besteht bei dieser Lage also nur dann, wenn die erforderliche Untersuchung in wesentlich größerem Umfang als bisher durchgeführt werden kann.

Zu dem nachfolgenden Bericht von Hrn. H o l m gehören folgende Bezeichnungen:

- | | |
|---|--|
| p = Last des Lagers je cm Zapfenlänge | δ = Differenz zwischen den Radien von Lagerschale u. Zapfen |
| v = Geschwindigkeit | η = Reibungskoeffizient der Schmiermittelflüssigkeit |
| r = Zapfenradius | μ = Reibungszahl |
| q = Reibungsfläche | φ = Reibungskraft |

$$M = \mu \cdot r \cdot P = \text{Reibungsmoment je cm Zapfenlänge}$$

Bild (1)



Hr. H o l m: Unter Voraus-
 setzung einer hydrodynamischen Schmierung, also einer
 Reibungskraft $f = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \cdot A$,
 besteht nach S o m m e r -
 f e l d ein Ähnlichkeits-
 gesetz für ein unendlich
 langes Lager. Es kann mit
 Hilfe der bekannten Figur (1)
 so ausgedrückt werden: Der
 reduzierte Reibungskoeffi-
 zient hängt nur von der

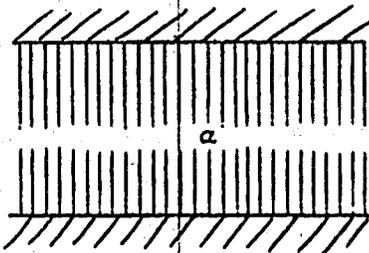
Sommerfeld Variabel S (siehe Bild) ab.

Es ist von vornherein klar, daß das obige Ähnlich-
 keitsgesetz nicht für ein endliches Lager gültig sein kann.
 Für endlich lange Lager ist sicherlich auch ein Ähnlichkeits-
 gesetz zu erwarten; aber dieses muß den seitlichen Abfluß des
 Schmiermittels und die Länge des Lagers mit in die Beziehung
 hineinnehmen, d.h. diese Größen müssen in gewissem Verhältnis
 mit den sonstigen Variablen geändert werden, wenn eine Ähnlich-
 keit bestehen soll. Es ist bekannt, daß bei endlich langen
 Lager die Asymptote in der Figur (1) nicht von 0, sondern von
 einem endlichen μ -Wert ausgeht. Unserer Überlegung gemäß müßte
 dieses μ höher liegen, je größer die Abweichung von den unend-
 lichen Lager, je kürzer also das Lager und je größer der Ab-
 fluß ist.

Nun wird auf eine andere Abweichung von den

Sommerfeldschen Gesetz hingewiesen in der Hoffnung, daß Messungen über diese Abweichung nützliche Auskünfte geben können. Bei Verkleinerung der Schmierstoffdicke nähert

Bild (2)

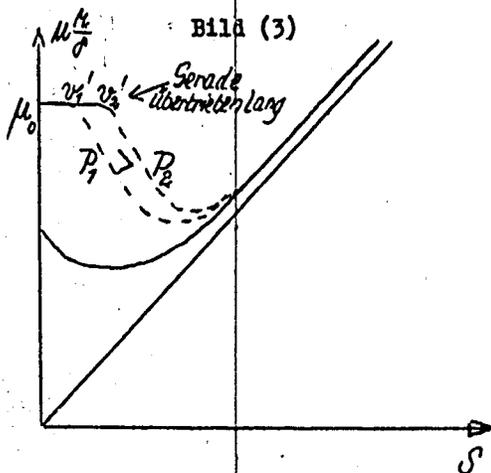


man sich dem durch das Bild (2) veranschaulichten Zustand. Dieses Bild (2) deutet an, wie Ölmoleküle als Borsten auf den Kontaktgliedern sitzen. Der Kontaktpalt ist dabei so eng gedacht, daß die Borsten sich gerade in der Fläche a berühren.

Sie sitzen am Metall sehr fest, und es ist also ziemlich sicher, daß a zur Reibfläche wird, und daß die Reibung den "festen" Charakter hat mit μ unabhängig von P und v, wobei μ in Verhältnis zum Minimum im Bild (1) hoch liegt.

Eine Annäherung zu der festen Reibung muß wohl besonders bei kleinem v auftreten, lange bevor der Kontaktpalt so eng wie nach dem Bilde (2) ist. Gemäß der geschilderten Vorstellung ergänzen wir nun das Bild (1), siehe Bild (3). Die

Bild (3)



horizontale Gerade bei μ_0 repräsentiert die erwähnte feste Reibung, welche bis zu gewissen Geschwindigkeiten anhält und von v und P unabhängig ist. Wir haben sie also durch eine konstante Reibungszahl gekennzeichnet, sind uns aber dabei bewusst, daß

in Wirklichkeit statt der Geraden eine nach unten gekrümmte Linie herauskommen muß. Von dieser μ_0 -Linie führt eine Verbindung (im Bilde rot gezeichnet) herunter nach der Sommerfeldschen Kurve. Nun dürfte die v -Grenze v' , von wo die Biegung nach unten ausgeht, mit steigendem P in die Höhe klettern, aber nicht so schnell wie P selbst. Der Ausdruck $\frac{v'}{P}$ wird also mit wachsendem P kleiner. Mißt man einmal mit einem großen P_1 und ein andermal mit einem kleinen P_2 , so müßten gegeneinander verschobene Verbindungskurven, so wie auf dem Bild (3) angedeutet, entstehen.

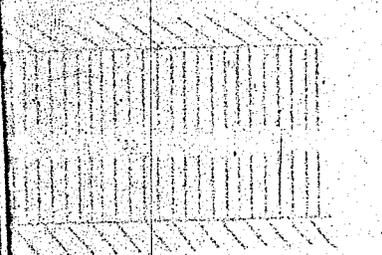
Es kommt hinzu: Bei der "festen" Reibung ist μ konstant, und die in den Bildern (1) und (3) eingetragene Variable $\mu \cdot \frac{v'}{P}$ kann durch die Wahl von $\frac{v'}{P}$ gegenüber dem Sommerfeldschen Minimum verschoben werden.

Die obigen Überlegungen führen zu dem Schluß, daß Messungen gewisse Anzeichen von der Wirkung derjenigen Reibung geben können, welche durch das Bild (2) gekennzeichnet wurde. Es ist nicht ausgeschlossen, daß in dieser Weise nützliche Kenntnisse über die haftende Ölschicht gewonnen werden können. Ich bin mir dabei wohl bewußt, daß solche Messungen schwierig sind.

Aussichtsreicher als die eben geschilderten Messungen wären vielleicht die folgenden: Man messe die Ruhereibung (μ) eines Lagerzapfens, der vorher gut eingelaufen ist. Dieses Einlaufen soll u.a. den Zweck haben, Zapfen und Lager von ursprünglichen Fremdschichten zu befreien, so daß nunmehr die Schmierflüssigkeit direkt das

Wird es sich nicht um ein
 Problem handeln, das
 durch die Sommerfeldsche
 Kurve gelöst werden kann?

(2) Bild



Es ist nicht ausgeschlossen,
 daß in dieser Weise nützliche
 Kenntnisse über die haftende
 Ölschicht gewonnen werden
 können.

(3) Bild

