N 15

Metallic Boundary-indication Studies.

N193

24/1 45 1119¼

Techn. Prüfs.
12. MAI 1943
Erl.

Geheim

# Physikalisch-Technische Reichsanstalt

Abteilung VI

| Ihre Zeichen | Ihre Nachricht vom | PTR-Nachricht vom | PTR-Zeichen | Tag |
|---|---|---|---|---|
| | | | Bb.-Nr.214/43 g<br>VI-S | 8.5.43 |

Betreff:

Anliegend übersendet die Reichsanstalt einen Bericht über Gleituntersuchungen an metallischen Werkstoffen. Es handelt sich hier um Messungen, über die Ihnen der Unterzeichnete bereits anläßlich seines letzten Besuches kurz berichtete. Die Versuche werden zur Zeit an Lagermetall-Legierungen verschiedener Bewährung fortgesetzt.

Im Auftrage

Kluge

Anlage:

Physikalisch-Technische Reichsanstalt
Berlin-Charlottenburg, Werner-Siemens-Str. 8—12

An die I.G.Farbenindustrie
A.G., Technischer Prüfstand
Oppau,
Ludwigshafen a/Rh.

11193

Es wird gebeten, bei Schreiben an die Reichsanstalt persönliche Anschriften zu vermeiden; sie verzögern nur die Erledigung.

Geheim

Techn. Prüfst.
12 MAI 1943
Erl.

25 Ausfertigungen
6. Ausfertigung

# Bericht
## der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

Gleituntersuchungen an metallischen Werkstoffen
im Zustand der Grenzschmierung.

Der Bericht umfaßt:

10 Blatt Text
3 " Abbildungen
/ " Zeichnungen

Bb.Nr. 214/43g PTR VI-S
Berlin-Charlottenburg, den 22.4.43

Der Sachbearbeiter

Kluge
Regierungsrat Dr.Kluge

Bochmann
Regierungsrat Dr.Bochmann

Der Labor.-Vorsteher VI-S

Kluge
Regierungsrat Dr.Kluge

Der Abteilungsdirektor VI

gez. Dr. K. Möller
Professor Dr.K.Möller

Physikalisch-Technische Reichsanstalt VI

11196

Vordr. 2046 a

Berichte ohne Dienstsiegel haben keine Gültigkeit

Din A 4

Durch die Schmierung von Gleitflächen sollen einmal die Reibungsverluste und andererseits der Verschleiß der Gleitflächen vermindert werden. Die Reibungsverminderung ist von besonderer Bedeutung bei Instrumenten, Elektrizitätszählern, Uhren und dgl. bei Lagern größerer Abmessungen und auch bei Kraftmaschinen , wie bei Motoren usw., spielt sie eine untergeordnete Rolle. Das Verschleißverhalten von Gleitstellen dagegen ist in jedem Falle von Wichtigkeit, da hierdurch die Genauigkeit vieler Geräte und Maschinen und vor allem ihre Lebensdauer bedingt ist.

Bei der Schmierung einer technischen Gleitanordnung ist als Idealfall stets ein verschleißloser Betriebszustand anzustreben. Das ist dann erreicht, wenn die gesamte Belastung durch eine hydrodynamisch gebildete Schmiermittelschicht übertragen wird, wodurch gleichzeitig eine feste Berührung der Gleitflächen verhindert wird. In diesem Vollschmierung [1] oder Flüssigkeitsreibung genannten Zustand wird die Schmierung durch eine einzige Stoffeigenschaft, und zwar durch die Zähigkeit des Schmiermittels in bekannter Weise beeinflußt. Werkstoffeinflüsse sind bei Vollschmierung nicht vorhanden. Im übrigen ist der Zustand der Vollschmierung dadurch gekennzeichnet, daß die Reibung im allgemeinen die niedrigsten erreichbaren Werte annimmt; Ausnahmen bilden nur Lager mit sehr großen Wellendrehzahlen, wie sie z.B. bei Spinnspindeln vorkommen.

Bei dem mit Verschleiß verbundenen technischen Schmiervorgang wird nun die Belastung zu einem mehr oder minder großen Teil in fester Berührung aufgenommen, da die Schmierschicht örtlich durchgedrückt wird, was z.B. durch Überlastung oder zu geringe Gleitgeschwindigkeit geschehen kann. An den Punkten fester Berührung herrscht jedoch normalerweise nicht, wie vielfach angenommen wird, trockene Reibung. Vielmehr ist hier das Schmiermittel in Form einer adsorbierten Schicht wirksam. In einer solchen Schicht besitzt das Schmiermittel aber nicht mehr die Eigenschaft einer Flüssigkeit, und eine hydrodynamische Schmierung kann sich nicht ausbilden. Vielmehr kommen an den Stellen fester Berührung die Grenzflächenkräfte zwischen Lagerwerkstoff und Schmiermittel zur Geltung und beeinflussen den Reibungs- und Verschleißvorgang in maßgebender Weise.

[1] Z.VDI 86 (1942) Nr.25/26 S.408/409

Der durch die Wirkung der adsorbierten Schmiermittelschichten gekennzeichnete Zustand wird als Zustand der Grenzschmierung oder Grenzreibung bezeichnet.

Wie schon gesagt, kommt im Zustand der Vollschmierung als Stoffeigenschaft nur die Zähigkeit des Schmiermittels zur Wirkung. Da die Zähigkeit gesondert gemessen werden kann, sind schmiertechnische Untersuchungen im Zustand der Vollschmierung nur selten erforderlich. Bei Grenzschmierung dagegen spielt die Zähigkeit keine Rolle, und außer den reinen Werkstoffeigenschaften kommen die Wechselwirkungen zwischen Lagerwerkstoff und Schmiermittel zur Geltung. Bei den meisten technischen Schmierungsvorgängen, die mit Verschleiß verbunden sind, treten diese beiden Zustände nebeneinander auf. Man spricht dementsprechend vom Zustand der Teilschmierung oder Mischreibung. Es ist allerdings bei Messungen im Zustand der Teilschmierung zur Zeit noch nicht möglich, den jeweiligen Anteil der Grenzschmierung oder Vollschmierung festzustellen. Diese Schwierigkeit liegt z.B. auch bei den bekannten Lagermetallprüfmaschinen vor, die überwiegend im Zustand der Teilschmierung arbeiten. Jedenfalls ist es notwendig, bei schmiertechnischen Untersuchungen neben der Zähigkeit des Schmiermittels auch das Grenzflächenverhalten zwischen Schmiermittel und Lagerwerkstoff zu berücksichtigen. Zur Feststellung dieses Grenzflächenverhaltens müssen daher Lagerwerkstoffe ebenso wie Schmiermittel unter Grenzschmierungsbedingungen untersucht werden.

Die Forschungsarbeiten der Reichsanstalt haben nun ergeben, daß das Grenzflächenverhalten zwischen Lagerwerkstoff und Schmiermittel besonders in der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung zum Ausdruck kommt. Diese Arbeiten führten weiterhin zu dem Ergebnis, daß für eine Schmierstelle mit Teilschmierungsbedingungen jeweils das Schmiermittel zu bevorzugen ist, das bei Grenzschmierung die größere Werkstoffabtragung ergibt. Diese Forderung bekommt ihren Sinn durch folgende Überlegung: Bei Teilschmierung bestehen, wie schon gesagt, Bereiche mit Grenzschmierung und Bereiche mit hydrodynamischer Schmierung nebeneinander. Der Verschleiß wird nun um so

geringer sein, je mehr Bereiche mit hydrodynamischer Schmierung vorherrschen. Daraus folgt, daß der Verschleiß einer Schmierstelle, die unter Teilschmierungsbedingungen arbeitet, bei gegebenen Betriebsverhältnissen, z.B. durch Anwendung eines Schmiermittels größerer Zähigkeit vermindert werden kann. Außerdem ist auf Grund anderer Versuche der Reichsanstalt bekannt, daß diejenigen Eigenschaften eines Schmiermittels, die bei Grenzschmierung eine größere Werkstoffabtragung bedingen, im Zustand der Teilschmierung zu einer Glättung der Gleitflächen führen. Hierdurch wird aber der hydrodynamische Schmierungsanteil zusätzlich vergrößert und der Verschleiß entsprechend vermindert. Damit ist eine Erklärung dafür gewonnen, daß ein Schmiermittel, das bei Grenzschmierung eine große Werkstoffabtragung ergibt, unter Teilschmierungsbedingungen ein günstigeres Verschleißverhalten zeigt. Es ist anzunehmen, daß das unterschiedliche Verhalten von Lagerwerkstoffen unter Teilschmierungsbedingungen in ähnlicher Weise durch Messung der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung aufgeklärt werden kann. Die vorliegenden Untersuchungen sollen hierzu einen Beitrag liefern.

Aus den vorstehenden Überlegungen ergibt sich, daß die bei Grenzschmierung ermittelte Werkstoffabtragung für das Verhalten eines Schmiermittels und wahrscheinlich auch eines Lagerwerkstoffes im Zustand der Teilschmierung von ausschlaggebender Bedeutung ist. Es muß jedoch in diesem Zusammenhang noch festgehalten werden, daß die Reibung einer Gleitanordnung unter Teilschmierungsbedingungen in ähnlicher Weise wie der Verschleiß durch die anteilige Wirkung der Vollschmierung oder Grenzschmierung beeinflußt wird, d.h., bei zunehmenden hydrodynamischen Schmierungsanteil wird nicht nur der Verschleiß, sondern auch die Reibung verkleinert. Darüber hinaus kann nach den Erfahrungen der Reichsanstalt mit Hilfe von Reibungsmessungen entschieden werden, ob eine Schmierstelle im Zustand der Teilschmierung oder im Zustand der Grenzschmierung arbeitet. Außerdem ist auf Grund früherer Untersuchungen der Reichsanstalt bekannt, daß die Reibungszahl im Zustand der Grenzschmierung unabhängig vom Druck ist. Wird nun die Reibungszahl bei Verringerung des Druckes kleiner, so ist das ein Kennzeichen dafür, daß ein

der Belastung hydrodynamisch aufgenommen wird, d.h., es liegen Teilschmierungsbedingungen vor. Die Verminderung der Reibung durch einen entsprechenden hydrodynamischen Schmierungsanteil ist unter anderem auch für diejenigen technischen Aufgaben von Bedeutung, wo der durch die Reibung bedingte Leistungsaufwand möglichst klein gehalten werden soll. Die bei Grenzschmierung ermittelte Reibung (Grenzreibung) dagegen ist für den technischen Schmierungsvorgang von untergeordneter Bedeutung, Jedenfalls zeigen die nachfolgend beschriebenen Versuche, daß die bei Grenzschmierung ermittelte Werkstoffabtragung sowohl durch das Schmiermittel als auch durch den Werkstoff wesentlich mehr beeinflußt wird als die Grenzreibung.

## Versuchsdurchführung.

Die Versuche wurden nach einem in der Reichsanstalt entwickelten Meßverfahren bei Raumtemperatur durchgeführt. Dabei wird ein stiftförmiger Probekörper aus dem zu untersuchenden Metall mit einstellbarer Belastung gegen eine ebene, umlaufende Scheibe aus gehärtetem Stahl gedrückt. Die Oberfläche der Scheibe wurde nach einem dem Läppen ähnlichen Verfahren feinstbearbeitet. Es ergab sich ein Oberflächenzustand ähnlich dem von sandgestrahlten Flächen, die Profilhöhe der Rauhigkeitsspitzen betrug etwa 0,002 mm. Mit Rücksicht auf die Grenzschmierungsbedingungen wurden die Messungen bei Gleitgeschwindigkeiten von nur einigen cm/s durchgeführt. Aus den gleichen Gründen darf der Druck einen bestimmten Mindestwert nicht unterschreiten. Andererseits ist durch die kleine Festigkeit z.B. von Zinn oder Blei ein oberer Grenzwert für den Druck gegeben. Auf Grund von Vorversuchen wurde schließlich ein Druck von 70 kp/cm$^2$ gewählt. Bei Blei war allerdings eine Messung ohne Schmierung bei den gewählten Versuchsbedingungen nicht möglich. Bei den Versuchen ohne Schmierung sind die, wie üblich, mit Benzin gereinigten Flächen als technisch trocken zu bewerten, d.h., es können sich noch adsorbierte Gas- oder Feuchtigkeitsschichten oder auch Oxydschichten auswirken.

Die Versuche wurden an verschiedenen reinen Metallen durchgeführt. Zum Teil standen diese Metalle in Form von Drähten mit einem Durchmesser von 1 mm zur Verfügung. Der restliche Teil der Metalle ist so duktil, daß sie leicht in Drahtform gebracht werden konnten.

Für die Grenzschmierungsuntersuchungen wurde ein reines Kohlenwasserstofföl ohne Zusätze und ein Fettöl verwendet. Da Fettöle im Gegensatz zu reinen Kohlenwasserstoffölen bekanntlich eine gute Schmierfähigkeit besitzen, ergeben die Versuche außerdem ein Urteil darüber, wie sich die untersuchten Metalle bei Anwendung von Schmiermitteln verschiedener Schmierfähigkeit verhalten.

## Ergebnisse.

In der Abbildung 1 sind die Reibungszahlen aufgetragen, die für die verschiedenen Metalle bei einer Gleitgeschwindigkeit von 7 cm/s erhalten wurden. Daraus ist zu erkennen, daß einmal der Werkstoffeinfluß auf die Reibung im Zustand der Grenzschmierung nur verhältnismäßig klein ist. Im äußersten Fall unterscheiden sich die Reibungszahlen bei Grenzschmierung wie 1 : 2. Dabei ergibt Zinn die kleinsten und Nickel die größten Werte. Der Einfluß des Schmiermittels ist noch geringer. Die Grenzreibungszahl für das Fettöl ist bei allen Metallen mit Ausnahme von Magnesium und Kupfer kleiner als die für das Kohlenwasserstofföl. Bei den Messungen ohne Schmierung sind die Reibungszahlen in jedem Falle wesentlich größer als mit Schmierung, ohne daß eine Parallelität zu den Grenzschmierungsmessungen festzustellen ist. Die Meßunsicherheit beträgt bei den Versuchen an Stahl, Gußeisen und Elektrolyteisen etwa 4 %. Bei anderen Metallen ist sie z.T. wesentlich größer, insbesondere bei den Versuchen ohne Schmierung. Die in diesem Bericht mitgeteilten Folgerungen können jedoch trotzdem mit genügender Sicherheit gezogen werden.

In der Abbildung 2 sind die Werte für die Werkstoffabtragung dargestellt, die nach einem Gleitweg von 25 m unter Grenzschmierungsbedingungen ermittelt wurden. Bemerkenswert ist vor allem, daß im Gegensatz zu den Reibungsmessungen der Werkstoffeinfluß und der Schmiermitteleinfluß sehr groß ist. So verhalten sich z.B. die Werkstoffabtragungen von Blei und Wolfram bei Grenzschmierung mit dem Kohlenwasserstofföl wie etwa 80 : 1. Außerdem ergibt das Fettöl im allgemeinen eine größere Werkstoffabtragung als das Kohlenwasserstofföl. Dieses Verhältnis kehrt sich für einige Metalle um, und zwar für Gold, Wismut, Zinn und Blei.

Bemerkenswert ist ferner das Ergebnis, daß die Werkstoffabtragung ohne Schmierung meistens niedriger als die Abtragungen bei Grenzschmierung liegen. Einige Metalle ergeben jedoch ohne Schmierung auch größere Werte, wie Zink, Kadmium und Zinn. Für Magnesium und Wismut liegen die Abtragungen ohne Schmierung zwischen den Werten, die bei Grenzschmierung mit den reinen Kohlenwasserstoffölen und dem Fettöl erzielt wurden. Die niedrige Werkstoffabtragung ohne Schmierung wird z.T. auf festhaftende Oxydschichten zurückzuführen sein, die die Oberfläche vor einer Abnutzung schützen (z.B.Kupfer). Andererseits können schlecht haftende Oxydschichten bei ausreichender Härte auch als Schleifmittel wirken und die Abtragung vergrößern. Außerdem besteht anscheinend ein Einfluß der Kristallstruktur. Denn nur bei Magnesium, Zink, Cadmium, Wismut und Zinn, die nicht kubisch kristallisieren, ist die Werkstoffabtragung ohne Schmierung größer als die Abtragung bei Grenzschmierung.

Als Hauptergebnis der in Abbildung 1 und 2 dargestellten Meßreihen kann man zusammenfassend feststellen, daß sich die einzelnen Werkstoffe ebenso wie die Schmiermittel hinsichtlich ihres Einflusses auf die Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung wesentlich mehr unterscheiden als hinsichtlich der Grenzreibung. Diese Tatsache trägt der oben beschriebenen Anschauung Rechnung, daß die bei Grenzschmierung beobachtete Werkstoffabtragung zu einer größeren Glättung der Gleitfläche unter Teilschmierungsbedingungen führt. Dies führt aber zu einem größeren hydrodynamischen Schmierungsanteil und damit bei dem technischen Schmierungsvorgang, soweit er nicht rein hydrodynamisch bedingt ist, zu einem besseren schmiertechnischen Verhalten des jeweiligen Schmiermittels oder Werkstoffes sowohl hinsichtlich der Reibung als auch hinsichtlich des Verschleißes.

Außerdem zeigen die in Abbildung 2 wiedergegebenen Messungen, daß die bei Grenzschmierung ermittelte Werkstoffabtragung und damit die oben erläuterte Glättungswirkung von dem Werkstoff wesentlich mehr beeinflußt wird als von dem Schmiermittel. Das bedeutet aber für den technischen Schmierungsvorgang, daß das schmiertechnische

Verhalten eines Lagers durch den Lagerwerkstoff wesentlich mehr bedingt wird als durch das Schmiermittel. Eine fehlerhafte Auswahl des Lagerwerkstoffes kann durch das Schmiermittel offenbar nur zum Teil ausgeglichen werden. Vorausgesetzt ist hierbei noch, daß die Gleitstellen in jeder Hinsicht, so z.B. bezüglich der Kantenpressung konstruktiv richtig durchgebildet sind. Konstruktive Fehler in diesem Sinne können durch Auswahl eines geeigneten Lagerwerkstoffes nur zum Teil und durch das Schmiermittel praktisch überhaupt nicht ausgeglichen werden.

Um den Grundvorgang der Werkstoffabtragung näher zu erklären, wurde versucht, diese Werkstoffabtragung mit anderen physikalischen Eigenschaften der jeweiligen Metalle in Zusammenhang zu bringen. Dabei interessiert besonders die Härte und der Schmelzpunkt dieser Metalle. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen, daß tatsächlich ein derartiger Zusammenhang besteht, ohne daß von einer wirklichen Gesetzmässigkeit gesprochen werden kann[2) 3)]. Auffallend ist die Beobachtung, daß die nicht kubisch kristallisierenden Metalle sich am wenigsten in die dargestellte Schmelzpunktabhängigkeit einfügen. Aus der Abhängigkeit der Werkstoffabtragung von der Härte oder von dem Schmelzpunkt ergeben sich nun für die Beanspruchung des Lagerwerkstoffes oder Schmiermittels bei dem Schmiervorgang bezüglich des wirklichen Druckes und der Temperatur grundlegende wichtige Folgerungen. Nach den Anschauungen von R.Holm[4)] ist die wirkliche Druckbeanspruchung einer Gleitfläche wesentlich größer als die über die geometrische Abmessung der Druckfläche gemittelte Druckbeanspruchung, und zwar erhält man als oberen Grenzwert für die wirkliche Druckbeanspruchung die Härte des jeweils weicheren Werkstoffes der in Frage kommenden Werkstoffpaare, d.h. aber, daß man bei dem Schmiervorgang im äußersten Falle mit wirklichen Druckbeanspruchungen von einigen 10000 kp/cm$^2$ rechnen muß. Diese wirkliche Druckbeanspruchung wird selbstverständlich durch einen hydrodynamischen Schmierungsanteil mehr oder weniger herabgesetzt,

2) Die Werte für die Härte und den Schmelzpunkt wurden entnommen aus: van Arkel, Reine Metalle, Berlin 1939.

3) Vgl. hierzu auch W.Tonn: Z.F.Metallkde. 29(1937) S.196/198, Zusammenhang zwischen Härte und Verschleiß [illegible]

4) R.Holm: Die technische Physik der elektrischen Kontakte, Berlin 1941

Es läßt aber wiederum die besondere Bedeutung der oben beschriebenen Glattungswirkung bei dem Einlaufvorgang erkennen läßt. Aus dem Zusammenhang zwischen der wirklichen Druckbeanspruchung und der Härte folgt andererseits, daß die wirkliche Berührungsfläche um so kleiner ist, je größer die Härte ist oder, anders ausgedrückt, härtere Gleitflächen werden sich mit weniger Rauhigkeitsspitzen berühren als weichere Gleitflächen. Dabei erscheint es aber verständlich, daß der härtere Gleitkörper eine geringere Werkstoffabtragung ergibt als der weichere Gleitkörper.

Bezüglich der wirklichen Erwärmung in der Gleitfläche kann man eine ähnliche Grenzwertbetrachtung anstellen wie bezüglich des wirklichen Druckes, und zwar ist auf Grund des Zusammenhanges zwischen der Werkstoffabtragung und dem Schmelzpunkt zu vermuten, daß die Erwärmung unmittelbar in der Gleitfläche im äußersten Falle gleich dem Schmelzpunkt desjenigen Metalles werden kann, das von den beiden Gleitflächen-Werkstoffen den niedrigeren Schmelzpunkt besitzt. Hierbei spielt jedoch im Gegensatz zu den Betrachtungen über den wirklichen Druck zusätzlich noch die Gleitgeschwindigkeit eine ausschlaggebende Rolle. So kann man durch thermoelektrische Messungen nachweisen, daß die Erwärmung unmittelbar in der Gleitfläche eines niedrig schmelzenden Metalles zunächst linear mit der Gleitgeschwindigkeit zunimmt, um schließlich bei Erreichung des Schmelzpunktes trotz weiterer Steigerung der Gleitgeschwindigkeit nicht weiter zuzunehmen[5]. Diese Beobachtung hat sicher eine allgemeinere Gültigkeit, wenn sie auch bisher für hochschmelzende Metalle noch nicht nachgewiesen werden konnte. Jedenfalls wird der Werkstoff und auch das Schmiermittel bei Lagerwerkstoffen mit höherem Schmelzpunkt in thermischer Hinsicht wesentlich mehr beansprucht als bei Werkstoffen mit niedrigeren Schmelzpunkt. Hierbei sind allerdings auch die Kühlungsbedingungen in der Gleitfläche zu berücksichtigen. So wird z.B. das Schmiermittel selbst, insbesondere bei zunehmenden hydrodynamischen Schmierungsanteil, eine Wirkung ausüben.

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

Wie oben gesagt wurde, wirkt sich die bei Grenzschmierung ermittelte Werkstoffabtragung unter Teilschmierungsbedingungen in einer zusätzlichen Glättung der Gleitfläche schmiertechnisch in jeder Hinsicht günstig aus. Es wurde weiterhin beobachtet, daß ein Fettöl bei den meisten Metallen eine größere Werkstoffabtragung ergibt als ein Mineralöl. Ähnliche Beobachtungen konnten bei einigen Metallen auch an anderen Schmiermitteln mit verschiedener Schmierfähigkeit gemacht werden. Es kann daher in Übereinstimmung mit den bereits früher mitgeteilten Versuchen[6] angenommen werden, daß die unterschiedliche Werkstoffabtragung bei Schmierung mit den einzelnen Ölen durch chemische Wirkungen zwischen dem Schmiermittel und dem Lagerwerkstoff unterstützt wird, wenn man vor allen Dingen dabei beachtet, daß entsprechend den vorstehenden Überlegungen das Schmiermittel beträchtlichen Drucken und Erwärmungen ausgesetzt ist. Diesbezügliche genauere Untersuchungen sollen bei anderer Gelegenheit näher besprochen werden. Hier soll nur noch gezeigt werden, daß offenbar ein Zusammenhang zwischen dem Schmiermitteleinfluß auf die Werkstoffabtragung und zwischen dem Normalpotential der Metalle besteht. In Abbildung 5 ist zu diesem Zweck das Verhältnis der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung mit Fettöl und des entsprechenden Wertes bei Schmierung mit Mineralöl in Abhängigkeit von dem Normalpotential dargestellt. Man erkennt, daß dieses Verhältnis bei den edleren Metallen wie Silber, Gold praktisch gleich 1 ist. D.h. eine zusätzliche chemische Wirkung ist bei Schmierung mit einem reinen Kohlenwasserstofföl und einem Fettöl nicht vorhanden.

## Zusammenfassung.

Es wird über Gleituntersuchungen mit metallischen Werkstoffen im Zustand der Grenzschmierung berichtet. Dabei kann gezeigt werden, daß die Werkstoffabtragung unter Grenzschmierungsbedingungen für den mit Verschleiß verbundenen technischen Schmiervorgang von besonderer Bedeutung ist. Auf Grund solcher Messungen kann z.B. das schmiertechnische Verhalten eines Schmiermittels für den Zustand der Teilschmierung sowohl hinsichtlich der Reibung(Leistungsbedarf)

[6] Mitt. Deutsche Akademie der Luftfahrtforschung 1942 Nr. 6 S. 299/323

als auch hinsichtlich des Verschleisses (Lebensdauer und Betriebssicherheit) vorausgesagt werden. In jedem Falle ist das Schmiermittel vorzuziehen, das unter Grenzschmierungsbedingungen die größere Werkstoffabtragung ergibt. In ähnlicher Weise kann voraussichtlich die unterschiedliche Werkstoffabtragung für die Bewertung von Lagerwerkstoffen hinsichtlich ihres Gleitverhaltens herangezogen werden. Hierzu kommen selbstverständlich noch andere Eigenschaften, wie z.B. die Empfindlichkeit des jeweiligen Lagerwerkstoffes gegen Kantenpressung. Die Untersuchungen zeigen ferner, daß dieses Gleitverhalten in einem gewissen Zusammenhang mit der Härte und dem Schmelzpunkt des jeweiligen Metalles steht. Es ergibt sich hieraus die Folgerung, daß unmittelbar an der Berührungsfläche außerordentlich hohe Drucke und hohe Temperaturen auftreten können, die zu einer zusätzlichen chemischen Wirkung zwischen dem Schmiermittel und dem Werkstoff führen. So erscheint es verständlich, wenn z.B. ein Fettöl unter Grenzschmierungsbedingungen eine größere Werkstoffabtragung hat als ein Mineralöl bezw. wenn ein solcher chemischer Schmiermitteleinfluß bei unedlen Metallen besonders groß ist. Über die weiteren sich ergebenden Folgerungen wird an anderer Stelle ausführlich berichtet. Außerdem ist vorgesehen, die Untersuchungen an den reinen Metallen durch solche an Legierungen und üblichen Lagermetallen zu ergänzen.

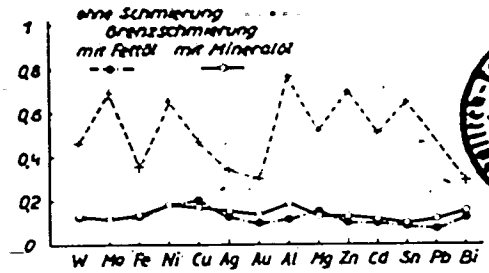



Abb. 1: Reibungszahlen beim Gleiten von Metallen auf Stahlfläche.

Versuchsscheibe : Stahl
Rauhigkeit der Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
Temperatur : 20°C

Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
Last : 0,58 kp
Druck : 70 kp/cm$^2$
Gleitgeschwindigkeit : 7 cm/s

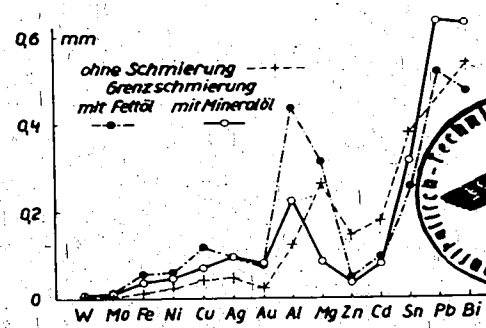



Abb. 2: Werkstoffabtragung der Metalle beim Gleiten auf Stahlfläche.

Versuchsscheibe : Stahl
Rauhigkeit der Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
Temperatur : 20°C

Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
Last : 0,58 kp
Druck : 0,70 kp/cm$^2$
Gleitgeschwindigkeit: 4,7 cm/s
Gleitweg : 25 m

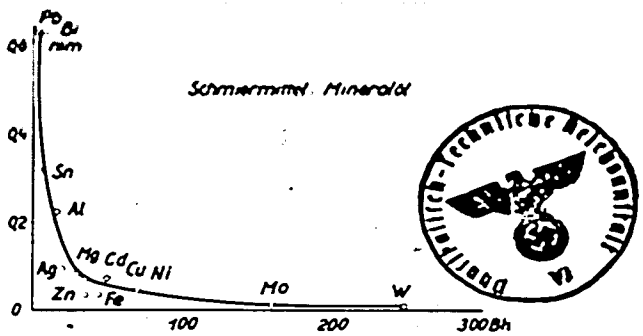



Abb.3: Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung in Abhängigkeit von der Brinellhärte der Metalle.

Versuchsscheibe : Stahl
Rauhigkeit der Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$mm
Temperatur : 20°C

Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
Last : 0,58 kp
Druck : 70 kp/cm²
Gleitgeschwindigkeit : 4,7 cm/s
Gleitweg : 25 m

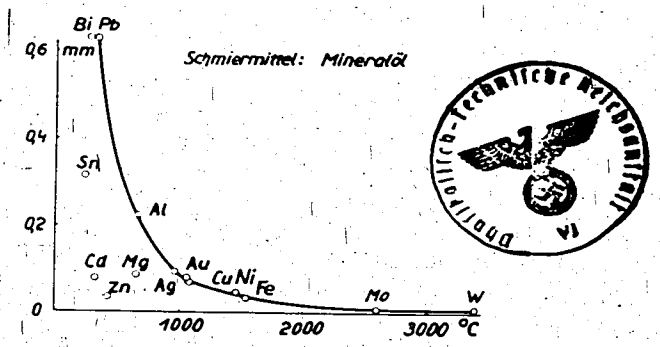



Abb.4 Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung in Abhängigkeit vom Schmelzpunkt der Metalle.

Versuchsscheibe : Stahl
Rauhigkeit der Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$mm
Temperatur : 20°C

Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
Last : 0,58 kp
Druck : 70 kp/cm²
Gleitgeschwindigkeit: 4,7 cm/s
Gleitweg : 25 m

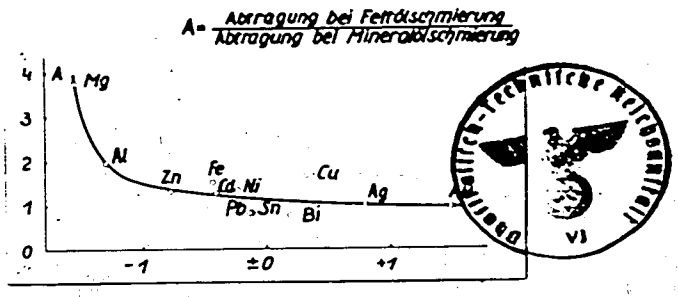



Abb. 5: Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung in Abhängigkeit vom Normalpotential der Metalle.

Versuchsscheibe : Stahl
Rauhigkeit der Scheibe: $2 \cdot 10^{-3}$ mm
Temperatur : 20°C

Durchmesser der Stiftprobe: 1 mm
Last : 0,58 kp
Druck : 70 kp/cm²
Gleitgeschwindigkeit: 4,7 cm/s
Gleitweg: 25 m

27. 3. 1941 0308

# Physikalisch-Technische Reichsanstalt

Abteilung VI 27. MRZ. 1941

Physikalisch-Technische Reichsanstalt
Berlin-Charlottenburg 2, Warmbrunnerstraße 1-11

Fernsprechnummer Charlottenburg Berlin

Drahtwort Reichsanstalt Berlin

Fernsprechnummer Amt II Nummer 290

An die
I-G-Farbenindustrie A.-G.

Ludwigshafen/a.Rh.

| Ihr Zeichen | Ihr Schreiben vom | PTR-Nummer vom | PTR-Zeichen | Tag |
|---|---|---|---|---|
| Lack- r.o r.1. | 19.12.42 | 2.12.42 | 3 Bb.- r.337.43 | 24.3.1943 |

Betreff: Fettungsmittel

Die von Ihnen eingesandten Fettungsmittel wurden nach einem Messverfahren der Reichsanstalt hinsichtlich ihrer Schmierfähigkeit untersucht. Nach den hier vorliegenden Erfahrungen ist die Schmierfähigkeit durch das Grenzflächenverhalten zwischen dem Schmiermittel und dem jeweiligen Lagerwerkstoff bestimmt, das bei dem erwähnten Verfahren aus der Werkstoffabtragung eines stiftförmigen Probekörpers ermittelt wird. Hierbei gleitet dieser Probekörper auf einer umlaufenden, ebenen Scheibe, und die Versuchsbedingungen (Druck, Geschwindigkeit usf.) sind im übrigen so gewählt, daß sich ein messbarer hydrodynamischer Schmierungsanteil nicht auswirken kann, und daß somit reine Grenzschmierung vorliegt. Dabei ist bemerkenswert, daß das Schmiermittel nur in einer an der Gleitfläche adsorbierten Schicht wirkt. Ausser den eingesandten Fettungsmitteln wurden zum Vergleich ein reines Kohlenwasserstofföl mit der Bezeichnung H 32 aus einer Herstellungsreihe des Ammoniakwerkes Merseburg und ein Fettöl (Ricinusöl) in die Untersuchungen einbezogen. Das Kohlenwasserstofföl diente dabei als Beispiel eines Öles mit schlechter Schmierfähigkeit und das Fettöl als Beispiel für ein Öl mit besonders guter Schmierfähigkeit.

3. 1943

In der beigefügten Abbildung sind als Maß für die Werkstoffabtragung die in Abhängigkeit vom Gleitweg ermittelten Stiftverkürzungen des Probekörpers bei Schmierung mit den einzelnen Ölen eingetragen. Die Versuche ergaben für das Fettöl eine wesentlich größere Werkstoffabtragung als für das reine Kohlenwasserstofföl. Die Messwerte für die Fettungsmittel sind untereinander gleich. Sie liegen zwischen den Werten für das Kohlenwasserstofföl und für das Fettöl. Hiernach haben die Fettungsmittel eine gleichgroße Schmierfähigkeit, die zwar größer ist als diejenige des Kohlenwasserstofföles aber noch nicht den Wert des Fettöles erreicht. Diese Feststellung gilt jedoch nur für das verwendete Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen und nur für eine Temperatur von 20° C. Nach den Erfahrungen der Reichsanstalt hat aber der Werkstoff und die Temperatur einen sehr großen Einfluss auf das für die Schmierfähigkeit massgebende Grenzflächenverhalten. Demgemäß kann auch nicht von der Schmierfähigkeit eines Öles an sich gesprochen werden, ohne daß jeweils der Werkstoff oder die Temperatur mitberücksichtigt werden.

11210

...ltisch-Technischen Reichsanstalt vom 24.3.1943 Bb.-Nr.387 ...

...ere (Stiftverkürzung) in Abhängigkeit von Gleitweg.

...igkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm

Temperatur : 20°C

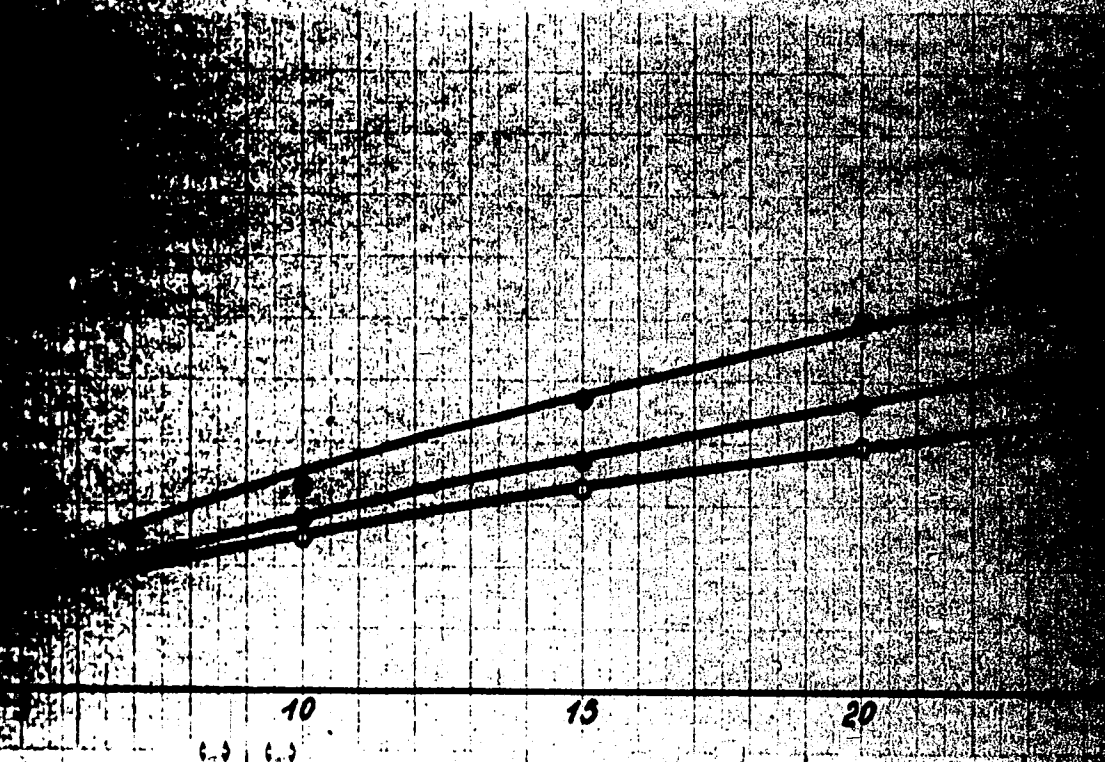
—●— Petröl

—○— Kohlenwasserstofföl

—●— Fettungsmittel I

—●— Fettungsmittel II

—●— Fettungsmittel III



Die vorstehend wiedergegebenen Zusammenhänge zwischen der bei Grenzschmierung ermittelten Werkstoffabtragung und zwischen der Schmierfähigkeit sind demnach dadurch gekennzeichnet, daß eine große Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung einer guten Schmierfähigkeit zuzuordnen ist und umgekehrt. Diese Werkstoffabtragung wirkt sich bei dem technischen Schmiervorgang, soweit er nicht durch rein hydrodynamische Schmierung bedingt ist, in einer zusätzlichen Glättung der jenigen Gleitflächenstellen aus, die in fester Berührung aufeinander laufen. Infolge dieser Glättung nimmt aber bei gegebener Zähigkeit des Schmiermittels der hydrodynamische Schmierungsanteil zu, was sich sowohl in der Abnahme des Verschleisses als auch der Reibung bemerkbar macht. Damit ist der eben angedeutete Zusammenhang zwischen der Schmierfähigkeit und der bei Grenzschmierung ermittelten Werkstoffabtragung verständlich gemacht. Genauere Einzelheiten hierüber wurden bereits anläßlich der Tagung über Schmierungsfragen bei der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt am 11. und 12. Dezember 1941 und bei einer Sitzung der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung am 7. Mai 1942 mitgeteilt. Der Unterzeichnete ist jedoch gern bereit, gelegentlich auch persönlich nähere Auskünfte zu geben. Im Übrigen besteht seit einiger Zeit ein engerer Erfahrungsaustausch über Schmierungsfragen mit dem Prüfstand Oppau, deren Sachbearbeiter über die Ausführungen der Versuchsanstalt bezüglich der Schmierfähigkeit genauestens unterrichtet sind.

Außer den vorstehend beschriebenen Versuchen wurden noch einige Vorversuche an 10 Ölen [illegible] mit dem Kolbenmaschinenprüfstand [illegible] und mit dem [illegible] Werkstoffprüfer durchgeführt. Bei diesen sollte der Einfluß des verwendeten [illegible] Mineralöles untersucht werden, welches Mineralöl außerdem [illegible] gemischt ist. Es ebenfalls müssten [illegible] von [illegible] verschiedenes Mineralöl [illegible]. Außerdem [illegible] bei welchen der Stoffen und [illegible] Mischungen [illegible] sollen. [illegible] sollte die [illegible], die Leitungsmittel wie die Emulsionen in [illegible] sind, ebenfalls [illegible] werden.

Im Auftrage

Klüge

1 Anlage

11211/1

Nur für den Dienstgebrauch

G 35

# Deutsche Luftfahrtforschung

**Forschungsbericht Nr. 1442**

## Thermoelektrisches Meßverfahren zu vergleichenden Reibungsuntersuchungen von Schmiermitteln im Zustand der Grenzschmierung

Vieweg, Kluge, Maske

Verfaßt bei

Physikalisch-Technische Reichsanstalt

Laboratorium für Schmiertechnik



Zentrale für wissenschaftliches Berichtswesen
der Luftfahrtforschung des Generalluftzeugmeisters (ZWB)
Berlin-Adlershof

## Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb dieses Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für Ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen.

Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen.

***Der Bericht ist unter Stahlblechverschluß mit Patentschloß zu halten.***

11213

# Thermoelektrisches Messverfahren zu vergleichenden Reibungsuntersuchungen von Schmiermitteln im Zustand der Grenzschmierung.

**Übersicht:** Es wird über ein Messverfahren berichtet, bei dem die Erwärmung unmittelbar in der Gleitfläche eines geschmierten Werkstoffpaares als Maß für die Reibungsleistung ermittelt wird. Die Versuchsbedingungen sind im einzelnen so gewählt, daß reine Grenzschmierung vorliegt. Das Verfahren zeichnet sich durch eine grosse Messgenauigkeit aus. Dies wird an einigen besonders kennzeichnenden Beispielen erläutert.

**Gliederung:**

1. Grundsätzliches über Schmiermittelreibung und Schmierfähigkeit.
2. Beschreibung des Verfahrens
3. Bearbeitung der Gleitflächen
4. Mechanischer Aufbau der Versuchsanordnung.
5. Durchführung der Versuche und Versuchsergebnisse
6. Schlussfolgerung

**Der Bericht umfasst:**

26 Seiten mit
8 Abbildungen

Physikalisch-Technische Reichsanstalt
Laboratorium für Schmiertechnik

Bearbeiter:
V.Vieweg, J.Kluge, F.Maske

Berlin-Charlottenburg, den 20. Juli 1941
BSa: 333/3,2

## Grundsätzliches über Schmiermittelreibung und Schmierfähigkeit.

Die Forschung über die Schmiermittelreibung kann bereits auf eine lange Geschichte zurückblicken. Die Entwicklung führte vom Coulombschen Gesetz über den Newtonschen Ansatz zu den Vorstellungen und Gesetzen über die hydrodynamische Schmierung und schließlich zu den ausserordentlich vielseitigen Untersuchungen über die Schmierfähigkeit. Allgemein wird heute bei geschmierten Flächen zwischen dem Zustand der Grenzschmierung, Teilschmierung und Vollschmierung unterschieden. Demgemäß spricht man von Grenzreibung, Mischreibung und Flüssigkeitsreibung. Hier bei stellt die Teilschmierung ihrem Wesen nach nicht einen neuen Zustand dar. Vielmehr bestehen im Zustand der Teilschmierung Grenzreibung und Flüssigkeitsreibung nebeneinander.

Die Grenzschmierung und Vollschmierung unterscheiden sich hinsichtlich der gültigen Gesetze grundsätzlich voneinander. Der Unterschied kommt am deutlichsten darin zum Ausdruck, daß die Belastung im Zustand der Grenzschmierung durch Grenzschichten mit molekularen Abmessungen auf die Gleitflächen übertragen wird, während sie im Zustand der Vollschmierung mit den hydrodynamisch gebildeten Drucken im Gleichgewicht steht. Dementsprechend ist im Zustand der Vollschmierung allein die richtige Auswahl der Schmiermittelzähigkeit bezw. die richtige Konstruktion des Lagers für den Schmiervorgang ausschlaggebend. Im Zustand der Grenzschmierung dagegen hat die Zähigkeit keinen Einfluss, es kommen vielmehr die Grenzflächenwirkungen zwischen dem Lagerwerkstoff und dem Schmiermittel zur Geltung. Man fasst alle diese Wirkungen in dem Begriff der Schmierfähigkeit zusammen.

Forscher und Ingenieure sind nun seit einer Reihe von Jahren in gleicher Weise bemüht gewesen diesen Begriff durch Versuche mit entsprechendem technischen und

physikalischem Sinn zu erfüllen. Auch sind die verschiedenen Vorschläge zur Messung der Schmierfähigkeit gemacht worden.[1] Die Versuche, die Schmierfähigkeit allein auf Grund physikalisch-chemischer oder rein chemischer Messungen zu bewerten, führten bis jetzt zu keinem befriedigenden Ergebnis, weil es hierbei nicht möglich ist, alle bei dem Schmiervorgang auftretenden Einflüsse zu berücksichtigen. So handelt es sich z.B. bei den Untersuchungen der Grenzflächenspannung, der Adsorptionswärme, der Haftfestigkeit usf. um eine einzelne vom Schmiermittel benetzte Fläche und nicht wie bei dem Schmiervorgang um ein Werkstoffpaar. Ausserdem fehlt bei diesen Versuchen die durch den Gleitvorgang bedingte Scherbeanspruchung.

Um den tatsächlich auftretenden Bedingungen des Schmiervorganges gerecht zu werden, wurde verschiedentlich versucht die Schmierfähigkeit durch Reibungs- oder Temperaturmessungen an besonderen Prüflagern oder Prüfmaschinen mit den verschiedensten Gleitanordnungen zu erfassen. Auf Grund der langjährigen Erfahrungen der Reichsanstalt ist hierzu festzustellen, daß bei einem Lager, aber auch bei den anderen bisher vorgeschlagenen Gleitanordnungen kein einheitlicher Schmierzustand vorhanden ist. Vielmehr handelt es sich hierbei auch bei grossen Belastungen und kleinen Geschwindigkeiten meistens um Messungen im Zustand der Teilschmierung. Andererseits ist bei denjenigen Versuchseinrichtungen, die angeblich im Zustand der Grenzschmierung arbeiten, zum mindesten kein Nachweis hierfür erbracht worden. In fast allen diesen Fällen insbesondere in einem Lager wird ein Teil der Belastung durch hydrodynamische Drucke aufgenommen, sodaß die Messungen zähigkeitsbedingt sind. Dies ist unter anderem daran zu erkennen, daß bei derartigen Messungen eine ausserordentlich kleine Reibungszahl (0,01 und weniger) festgestellt wurde [2]. Nach Messungen der Reichsanstalt, über die später

---

1) V.Vieweg: Die Schmierfähigkeit und ihre Messung. Ringbuch der Luftfahrttechnik IV C 13.

2) V.Vieweg a.a.O. G.Vogelpohl: Zur Klärung des Gleitreibungsvorganges. Oel und Kohle 37, (1939) S.720-728

noch berichtet wird, ist jedoch die Reibungszahl im Zustand der Grenzschmierung 0,1 bis 0,3. Es kommen somit bei Messungen an Lagern usf. neben Zähigkeitseinflüssen bestenfalls nur grosse Unterschiede in der Schmierfähigkeit zur Wirkung, wie sie z.B. vergleichsweise bei einem fetten Oel und bei einem reinen Mineralöl auftreten. Ausserdem ist der Schmierzustand z.B. in einem Lager beim Lauf dauernden Veränderungen unterworfen, sodaß wiederholbare Messungen kaum möglich sind. Jedenfalls muss grundlegend festgestellt werden, daß Reibungsmessungen im Zustand der Teilschmierung infolge der überlagerten Zähigkeitseinflüsse eine Schmierfähigkeitsbewertung nicht zulassen. Nur im Zustand der Grenzschmierung allein können einwandfreie Untersuchungen der Schmierfähigkeit durchgeführt werden, und nur dann kann die gemessene Reibung oder Temperatur zur Bewertung der Schmierfähigkeit herangezogen werden.

Um nun dem dringenden Bedürfnis nach einwandfreien Messverfahren zur Untersuchung der Schmierfähigkeit abzuhelfen, wurde in der Reichsanstalt auf Grund langjähriger Erfahrungen auf dem Gebiet der Oel- und Lagerforschung zunächst eine Messanordnung geschaffen, die den reinen Zustand der Grenzschmierung herzustellen erlaubt und die genaue wiederholbare Messungen ermöglicht. Neben der besonderen Wahl der Gleitanordnung ist hierfür vor allem der mechanisch einwandfreie Aufbau dieser Anordnung sowie das gewählte Bearbeitungsverfahren der Gleitflächen ausschlaggebend.

Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Verfahren bewertet die Schmierfähigkeit durch Messungen der Reibungsleistung und Temperatur. Es wird hierbei unmittelbar die Temperatur bezw. Erwärmung in der Grenzfläche ermittelt. Dieses Verfahren wurde bereits im Jahre 1936 ausgearbeitet [3]. Die etwa zu gleicher Zeit in England durchgeführten Untersuchungen über die Oberflächentemperatur von gleitenden Metallen [4] dienten mehr der allgemeinen Erforschung

---

[3] Von den Verfassern wurden 1936 Schutzrechte für das Verfahren angemeldet.

[4] F.P.Bowden und K.E.W.Ridler. Physical Properties of Surfaces. III The Surfaces Temperature of Sliding Metals. The Temperatur of Lubricated Surfaces. Proc. Roy. Soc. London (A) 154, (1936) S.640 - 656.

der Oberflächenvorgänge bei gleitender Reibung. Eine quantitative Bewertung der Schmierfähigkeit auf Grund von Erwärmungsmessungen konnte offenbar noch nicht erfolgen, da die Voraussetzungen für eine entsprechend gute Wiederholbarkeit, wie sie in der vorliegenden Arbeit besprochen werden, insbesondere hinsichtlich der Bearbeitung der Gleitflächen nicht erfüllt sind.

Über die Messungen der Reichsanstalt wird erst jetzt im einzelnen berichtet, nach dem sich das beschriebene Verfahren längere Zeit bewährt hat. Andererseits ergaben sich aus diesen Messungen grundsätzliche Folgerungen über den Schmiervorgang, für die wegen ihrer Neuartigkeit eine weitere Bestätigung durch unmittelbare Messung der Reibung und der Abnutzung abgewartet werden sollte. Es wurden daher in letzter Zeit an der Reichsanstalt je ein weiteres Verfahren zur Messung der Reibungskraft und der Abnutzung im Zustand der Grenzschmierung ausgearbeitet, über die später in einigen weiteren Arbeiten fortlaufend berichtet werden soll.

## 2. Beschreibung des Verfahrens

Die grundsätzliche Wirkungsweise des genannten Verfahrens beruht darauf, daß zwischen metallischen Gleitflächen bei Erwärmung eine thermoelektrische Spannung entsteht. Da sich die Gleitflächen bei Grenzschmierung elektrisch gut leitend berühren, kann auf diese Weise die in der Gleitfläche infolge der Reibung entstehende Erwärmung thermoelektrisch ermittelt werden. Und zwar nimmt die thermoelektrische Spannung linear mit der Erwärmung in der Grenzfläche zu. Sie hängt also sowohl von der Reibungskraft als auch von der Gleitgeschwindigkeit ab und ist der Reibungsleistung proportional. Wie die in dieser Arbeit gebrachten Versuchsergebnisse zeigen, lässt das beschriebene Verfahren deutlich die Einflüsse der Schmierfähigkeit eines Schmiermittels in seinem Reibungsverhalten erkennen. Es ist hiernach möglich, die Reibungsleistung bezw. die Erwärmung in der Grenzfläche und die von ihr abhängige thermoelektrische Spannung zwischen den Gleitflächen für eine vergleichende Bewertung

von Schmiermitteln hinsichtlich ihrer Schmierfähigkeit zu verwenden. Nachdem bereits bei früheren Versuchen der Reichsanstalt die thermoelektrische Spannung zwischen den Gleitflächen eines Lagers zur Untersuchung der Grenzschmierung herangezogen wurde [5], bestand Aussicht, derartige thermoelektrische Messungen auch auf andere Gleitanordnungen anzuwenden. Hierbei war durch einen möglichst einwandfreien und einfachen Aufbau der Gleitanordnung eine entsprechend grössere Messgenauigkeit zu erwarten.

Als Grundanordnung dient daher bei diesem Verfahren eine umlaufende ebene Scheibe und ein ruhender zylindrischer stiftförmiger Prüfkörper, der mit einstellbarem Druck gegen die Scheibe gedrückt wird. Das zu untersuchende Schmiermittel wird in dünner Schicht auf die ebene Scheibe aufgebracht. Gemessen wird die infolge der Reibung unmittelbar in der Grenzfläche der Gleitkörper auftretende Temperaturänderung (Erwärmung). Diese Erwärmung ist ein Maß für die Reibungsleistung. Wird die Erwärmung durch die Gleitgeschwindigkeit dividiert, so ist der erhaltene Wert auch ein Vergleichsmaß für die Reibungskraft. Durch die kleinen Abmessungen des Stiftes stellt sich auf diesem nahezu sofort der den jeweiligen Gleitbedingungen entsprechende Erwärmungszustand ein, wodurch eine kurze Versuchsdauer bedingt ist. Der Bearbeitungszustand der Gleitfläche wird daher während der Messung nur wenig geändert. Wie später noch gezeigt wird, ist diese kleine Änderung des Bearbeitungszustandes ohne Einfluss auf die Reibungsmessungen. Die Erwärmung selbst beträgt nur wenige Grad Celsius, sodaß die Versuchstemperatur praktisch unverändert bleibt. Es ist somit z.B. möglich die Reibung unter sonst gleichen Bedingungen allein in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit zu untersuchen, ohne daß sich wie in einem Prüflager gleichzeitig die Temperatur als weitere wichtige Einflussgrösse der Schmierung ändert.

---

5) V. Vieweg und J. Kluge Arch. Eisenhüttenwes. 2 (1929) S.808; Über Messungen der Schmierfähigkeit von Oelen in Lagern.

Ist nur der stiftförmige Prüfkörper aus Metall, so kann die Erwärmung in der Grenzfläche der Gleitkörper nicht mehr in der vorstehend beschriebenen Weise bestimmt werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, diese Erwärmung auch aus dem Temperaturverlauf längst des Stiftes zu ermitteln. Und zwar genügt bei Vergleichsmessungen an dem gleichen Werkstoffpaar die Temperaturmessung an einer an sich beliebigen aber bestimmten Stelle der Stiftes. Für solche indirekten Messungen wird an dem Stift seitlich ein Konstantandraht angelötet, der mit dem Metallstift zusammen ein Thermoelement bildet. Grundsätzlich kann die genaue Grösse der Erwärmung in der Grenzfläche eines beliebigen Werkstoffpaares aus der Erwärmung an zwei Messtellen des Stiftes berechnet werden. Hierbei muss nur berücksichtigt werden, daß die Temperatur längst des Stiftes exponentiell verläuft. Es gilt dementsprechend für die Erwärmung $(\Delta t)_x$ an einer beliebigen Stelle x des stiftförmigen Körpers folgende Beziehung.

$$(\Delta t)_x = (\Delta t)_0 \, e^{-cx}$$

Hierbei ist $(\Delta t)_0$ die gesuchte Erwärmung der Grenzfläche und $c$ eine Konstante. Ist nun $(\Delta t)_1$ die Erwärmung an der Stelle $x = l$ und $(\Delta t)_2$ die Erwärmung an der Stelle $x = 2l$, so wird die Berechnung besonders einfach. Man erhält

$$(\Delta t)_0 = \frac{(\Delta t)_1^{\,2}}{(\Delta t)_2}$$

Es ist allerdings nicht einfach, zwei Messtellen in derartig bestimmter Zuordnung zu schaffen. Die indirekte Bestimmung der Erwärmung in der Grenzfläche aus der Erwärmung an ein oder zwei Stellen des Stiftes ist vor allem dann anzuwenden, wenn z.B. die Scheibe aus Kunststoff besteht, bezw. wenn sich die thermoelektrische Eichkonstante für das als Thermoelement dienende Werkstoffpaar infolge Metallübertragung während des Gleitvorganges verändert.

Je nachdem ob nun die Erwärmung in der Grenzfläche aus der dort entstehenden Thermospannung oder aus dem Temperatur-

verlauf längs des Stiftes ermittelt wird, wird zwischen dem direkten oder indirekten thermoelektrischem Verfahren zur Bestimmung der Reibungsleistung unterschieden. In beiden Fällen ist die thermoelektrische Spannung der Grösenordnung nach einige $10^{-5}$ V. Sie wird durch ein Spiegelgalvanometer von grosser Schwingungsdauer gemessen. Durch Anwendung eines Stromschreibers mit lichtelektrischem Verstärker [6] kann diese kleine Spannung auch laufend aufgezeichnet werden, was für die Beobachtung von Einlaufvorgängen usf. von Wichtigkeit ist. Dieser lichtelektrische Verstärker hat ausserdem die wichtige Eigenschaft, daß er die zu messende Spannung selbsttätig kompensiert. Kontaktübergangswiderstände zwischen den Gleitkörpern, wie sie auch im Zustand der Grenzschmierung auftreten, werden somit bei dem direkten Verfahren durch diese selbsttätige Kompensation ausgeschaltet. Andererseits kann durch eine vergleichende Spannungsmessung an dem durch die Gleitkörper gebildeten Thermoelement bei einem parallel geschalteten Widerstand auf den Kontaktwiderstand geschlossen werden. Wird der Parallelwiderstand z.B. so eingestellt, daß die gemessene Spannung auf den halben Wert absinkt, so ist der Kontaktwiderstand gleich diesem Parallelwiderstand. Somit gestattet das direkte thermoelektrische Verfahren ausserdem die Untersuchung von kleinsten Filmdicken mit molekularen Abmessungen, wie sie in der Grenzschmierung auftreten. Bemerkenswert ist, daß diese elektrische Filmuntersuchung nicht unter Verwendung einer fremden Spannungsquelle erfolgt, wie dies bei den sonst vorgeschlagenen Verfahren üblich ist, wo z.B. aus Widerstandsmessungen auf die Filmdicke geschlossen wird.

## 3. Bearbeitung der Gleitflächen

Wie oben bereits angedeutet, ist die Bearbeitung der Gleitflächen für einwandfreie Reibungsuntersuchungen von ausschlaggebender Bedeutung. Bei dem Verfahren der Reichsanstalt wird die umlaufende Scheibe unmittelbar in der Versuchsanordnung geläppt, wobei als Gegenscheibe im allgemei-

[6] Ludwig Merz: Messung und Aufzeichnung kleinster Spannungen mit einem lichtelektrischen Kompensator VDE Fachber. 1938, S.134 - 137

nen eine Scheibe aus gleichem Werkstoff dient und als eigentliches Schleifmittel künstlicher Korund verwendet wird, der in bestimmter Menge mit Petroleum zu einer Schleifpaste angerührt wird. Ausserdem wird die Schleifdauer einheitlich festgelegt. Wie durch Kontrollmessungen der Rauhigkeit festgestellt werden konnte, ist hierdurch ein genau wiederholbarer Oberflächenzustand gewährleistet. Auf diese Weise können z.B. feinstbearbeitete Flächen hergestellt werden, deren Rauhigkeit nur etwa 1$\mu$ beträgt, womit diese Rauhigkeit an der Genauigkeitsgrenze der üblichen bekannten Rauhigkeitsmessgeräte liegt.

Eine derart feinstbearbeitete Oberfläche hat stets ein mattes Aussehen. Ein Glanz ist nur unter praktisch streifendem Einfall erkennbar. Ihr Aussehen ähnelt etwa Flächen, die nach dem "Superfinish Verfahren" bearbeitet sind. Bemerkenswert ist jedoch ausserdem, daß die nach dem Verfahren der Reichsanstalt bearbeiteten Flächen keinerlei Bearbeitungsspuren erkennen lassen. Es wurde in diesem Zusammenhang für derartige Flächen der Begriff der ungeordneten Rauhigkeit geprägt. Im Gegensatz hierzu zeigt z.B. eine in der üblichen Weise feinstgeschliffene Fläche eine geordnete Rauhigkeit in Form der Bearbeitungsspuren.

Das Bearbeitungsverfahren der Reichsanstalt stellt in gewissem Sinn noch eine Verfeinerung des "Superfinish Verfahrens" dar. Bei diesem wird ein Schleifstein verwendet, der eine Schleifbewegung mit möglichst vielen Freiheitsgraden ausführt. Bei dem Verfahren der Reichsanstalt dagegen entsprechen die Schleifkörner zwischen den Scheiben in ihrer Wirkung einem Schleifsystem mit unendlich vielen Freiheitsgraden. Jedes einzelne Schleifkörnchen führt zwischen den Scheiben eine Abroll- und Gleitbewegung aus. In Bild 1 sind zur Klarstellung aller dieser Fragen verschiedene Mikroaufnahmen von feinstbearbeiteten Oberflächen dargestellt. Die nach dem Verfahren der Reichsanstalt bearbeiteten Flächen zeigen hiernach einen einheitlichen gleichmässigen Zustand. Eine abgezogene

oder geschliffene Fläche [illegible] dagegen auch bei kleinster Rauhigkeit deutliche Bearbeitungsspuren in einer ausgezeichneten Richtung. Aus den Aufnahmen in Bild 1 ist ausserdem zu erkennen, daß die Abnutzung auf der umlaufenden Scheibe ausserordentlich klein ist. Bei streifender Beleuchtung ist die Gleitbahn fast garnicht zu erkennen. Offenbar werden nur die Hunderten Spitzen durch den Gleitvorgang abgeschliffen. Und zwar sind es die Stellen, die bei einer Beleuchtung senkrecht zur Oberfläche glänzend erscheinen.

Wichtig ist ferner, daß das kristalline Gefüge des Werkstoffes bei einer Bearbeitung nach dem Verfahren der Reichsanstalt erhalten bleibt. Im Gegensatz hierzu wird beim polieren einer Fläche eine amorphe Schicht gebildet (Beilby-Schicht) [7], die schalenartig über dem kristallinen Werkstoff lagert. Beim Gleitvorgang werden nun einzelne Teile aus der schalenartigen Schicht einer polierten Fläche abblättern und damit zu einer verhältnismässig groben Veränderung der Gleitfläche führen. Hierdurch sind aber einwandfreie und wiederholbare Reibungsuntersuchungen in Frage gestellt, Flächen, die nach dem Verfahren der Reichsanstalt feinstbearbeitet sind, ergeben dagegen beim Gleitvorgang eine allmähliche gleichmässige Werkstoffabtragung.

Bei allen bisher bekannt gewordenen Reibungsuntersuchungen, die zur Bewertung von Schmiermitteln dienen sollten, werden nun polierte Flächen verwendet, oder die verwendeten Flächen haben im obigen Sinn eine geordnete Rauhigkeit (Bearbeitungsspuren). Neben den bereits eingangs geschilderten Schwierigkeiten bei der Herstellung des Grenzschmierungszustandes sind dies die Hauptgründe dafür, daß die bisher bekannt gewordenen Reibungsuntersuchungen hinsichtlich der Wiederholbarkeit nicht immer befriedigten, und daß somit eine genaue Bewertung von Schmiermitteln auf Grund von Reibungsuntersuchungen nicht möglich war.

## 4. Mechanischer Aufbau der Gleitanordnung.

Der mechanische Aufbau der Gleitanordnung geht aus dem Bild 2 hervor. Der stiftförmige Prüfkörper ist mit einer Spannzan-

[7] Ein neues Feinstbearbeitungsverfahren (Superfinish), Automobiltechnische Zeitschrift (1940) S.596

se, wie sie in der Werkstattstechnik üblich ist, an einem einarmigen Hebel befestigt. Die Seitenlagerung dieses Hebels sorgt für die Einhaltung der einmal vorgenommenen Einstellung des Stiftes gegenüber der umlaufenden Scheibe. Die Belastung kann durch Zusatzgewichte auf dem Hebel eingestellt werden. Zur Erzielung einer gleichmässigen Druckverteilung auf den Gleitflächen müssen diese jedoch einwandfrei aufeinander eingeschliffen sein. Dies geschieht unmittelbar an der Anordnung durch einen besonderen Versuch. Damit nun die Stellung der Gleitflächen gegeneinander bei allen Drehlagen der Scheibe die gleiche ist, darf diese Scheibe beim Umlaufen an der Messtelle keinen Schlag in der Achsenrichtung ergeben. Die umlaufende Scheibe ist daher auf einer besonders gut gelagerten Schleifspindel befestigt. Ausserdem kann die Messcheibe noch durch eine Justiereinrichtung fein eingestellt werden. Die Justiereinrichtung ist hierfür mit einem membrangelagerten Gewindezapfen und mit mehreren Stellschrauben versehen. Hierdurch liess sich der Schlag an der Messtelle bei einem Durchmesser der Gleitbahn von 120 mm auf 1 $\mu$ und weniger begrenzen. Durch den vorstehend beschriebenen mechanischen Aufbau ist ausserdem gewährleistet, daß die gegenseitige Stellung der Gleitflächen auch erhalten bleibt, wenn der Stift zur Reinigung der Gleitflächen oder zur neuen Bearbeitung der Scheibe von dieser abgehoben wird. Es genügt dann selbst bei hartem Werkstoffen wie Stahl und Gußeisen ein Einlauf von nur etwa 10 min um die Stiftfläche auf der Scheibe neu einzuschleifen und damit eine eventuell eingetretene kleine gegenseitige Verlagerung der Gleitflächen wieder zu beseitigen.

## 5. Durchführung der Versuche und Versuchsergebnisse

Nach der Bearbeitung der umlaufenden Scheibe wird das Schleifmittel sorgfältig entfernt und die Fläche durch rückstandfreies Benzin gereinigt. Das zu untersuchende Schmiermittel wird in dünner Schicht auf die Scheibe aufgetragen und während des Laufes durch ein leicht gegen die Scheibe gedrücktes und ebenfalls gereinigtes Lederläppchen gleich-

mäßig verteilt. Wie bereits im vorstehenden Abschnitt gesagt ist, schleift sich der Stift in wenigen Minuten auf die Oberfläche der Scheibe ein. Der sich dann ergebende Messzustand bleibt bei dem Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen auch bei einem Dauerversuch von etwa 2 Std. unverändert erhalten. In Bild 3 ist ein solcher Dauerversuch wiedergegeben. Wenn nun außerdem berücksichtigt wird, daß bei den eigentlichen Versuchen für die Einstellung eines Messwertes und für seine Ablesungnur wenige Sekunden erforderlich sind, so ist der Messzustand auch für mehrere auf der gleichen Gleitbahn hintereinander durchgeführte Messreihen genügend lange erhalten.Bei noch längerem Lauf tritt jedoch nach und nach eine stärkere Glättung der Scheibenfläche ein, sodaß der Zustand der Grenzschmierung allmählich in den Zustand der Teilschmierung übergeht. Dies macht sich in einer Abnahme des Messausschlages bemerkbar, wobei diese Abnahme z.T. auf eine tatsächliche Abnahme der Reibung infolge einer Filmbildung und z.T. auf den Kontaktwiderstand infolge des Schmiermittelfilmes zurückzuführen ist.

Die vorstehend erwähnte kurze Messzeit für die Einstellung und Ablesung eines Messwertes ist nun andererseits der trägheitsfreien Arbeitsweise des beschriebenen Verfahrens äquivalent. In Bild 4 ist zum Nachweis hierfür der zeitliche Verlauf der Reibungsleistung durch ein Schreibgerät aufgeschrieben, wobei die Scheibenfläche mit einer dünnsten Schicht Mineralöl benetzt ist und nur an einer kleinen Stelle der Gleitbahn etwas Ölsäure aufgebracht ist. Der Versuch ergibt eine der Drehzahl entsprechende Periodizität der Reibungsleistung. Jedesmal, wenn die mit Oelsäure benetzte Stelle der Scheibenfläche unter dem Stift weggleitet,sinkt die Reibungsleistung sofort ab, um ebenso schnell wieder anzusteigen, wenn diese Stelle weiter weggelaufen ist. Für diesen Versuch war natürlich das oben erwähnte Lederläppchen entfernt. Das allmähliche Absinken des mittleren Ausschlages ist darauf zurückzuführen, daß der Stift nach und nach auch etwas Oelsäure auf die anderen Teile der Scheibenfläche trägt.

Von den zahlreichen an den verschiedensten Schmiermitteln durchgeführten Messungen seien nun einige besonders kennzeichnende Beispiele beschrieben. In Bild 5 sind zunächst zwei Messreihen wiedergegeben, die einen Beweis für die gute Wiederholbarkeit des Verfahrens erbringen. Die Schmiergleitung ist hierbei wie auch bei den folgenden Messungen in willkürlichen Einheiten aufgetragen. Es ist jedoch jeweils nur ein Vergleich der in einem Bild zusammengefassten Versuchsergebnisse möglich, da die Empfindlichkeit von Fall zu Fall anders eingestellt wurde. Die Übereinstimmung der beiden Messreihen in Bild 5 ist ausserordentlich befriedigend und beweist, daß der Bearbeitungszustand der Gleitfläche während der kurzen Messzeit der einzelnen Messungen kaum verändert wird, bezw. daß diese Veränderung keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit hat. Bemerkenswert ist dabei, daß zwischen den beiden Messungen verschiedene andere Messungen auf der gleichen Gleitbahn der umlaufenden Scheibe durchgeführt wurden, ohne daß die Scheibe von neuem in der Zwischenzeit bearbeitet wurde. Die gleiche Messgenauigkeit und gute Wiederholbarkeit erhält man aber auch, wenn die Oberfläche der Scheibe vor jedem Versuch neu bearbeitet wird. Eine solche Neubearbeitung empfiehlt sich insbesondere dann, wenn durch das untersuchte Schmiermittel ein chemischer Angriff der Gleitfläche zu befürchten ist. Ausserdem sind in der Abbildung 5 die Erwärmungen in der Gleitfläche angegeben. Sie wurden durch eine besondere Eichung ermittelt und bestätigen die obige Feststellung, daß die Versuchstemperatur durch den Reibungsversuch selbst praktisch nicht verändert wird.

Wie bei der Beschreibung näher ausgeführt wurde, arbeitet das Verfahren im Zustand der Grenzschmierung. Somit muss es möglich sein, auch Schmiermittel mit verschiedener Zähigkeit zu vergleichen, ohne daß die Vergleichsmessungen durch Zähigkeitswirkungen beeinflusst sind. Im Bild 6 sind die Messungen von 2 Oelen wiedergegeben, de-

ren Zähigkeiten sich etwa wie 1 zu 30 verhalten. Und zwar handelt es sich um synthetische Oele, die sich hinsichtlich ihrer Grenzflächenwirkungen gleich verhalten, sodaß bei Messungen im Zustand der Grenzschmierung auch kein Unterschied bezüglich der Reibung zu erwarten war. Die Messungen bestätigen diese Erwartung und ergeben, auch andeutungsweise, keinen Einfluss der Zähigkeit. Ein solcher Einfluss müßte sich aber nach den Erfahrungen der Reichsanstalt in einer zusätzlichen Reibungsverringerung bemerkbar machen; und dies um so mehr, je grösser die Zähigkeit ist. Denn in jedem Fall nimmt die Reibung beim Übergang vom Zustand der Grenzschmierung in den Zustand der Teilschmierung ab. Sie nimmt erst wieder zu, wenn der Zustand der reinen Vollschmierung einsetzt, erreicht aber niemals die Werte der Grenzschmierung.

Da das Verfahren im Zustand der Grenzschmierung arbeitet, müssen bei den Messungen auch Konstitutionseinflüsse des Schmiermittels auf die Reibung besonders deutlich werden. In Bild 7 sind Vergleichsmessungen an Cetan und an Cetan mit verschieden grossem Zusatz von Palmitinsäure gegenübergestellt. Die bekannte reibungsvermindernde Wirkung des Säurezusatzes ist klar zu erkennen. Hierbei rufen zunächst sehr kleine Zusatzmengen eine grosse Reibungsverminderung hervor. Bei grösseren Zusatzmengen tritt schließlich der bekannte Endzustand bezüglich der Reibung ein. Eine weitere Vergrösserung des Zusatzes ändert die Reibung dann nicht mehr.

Einen weiteren Beweis für die Brauchbarkeit des beschriebenen Verfahrens sind die Messungen, die in Bild 8 wiedergegeben sind. In Übereinstimmung mit den praktischen Erfahrungen ergibt das Fettöl gegenüber dem Mineralöl eine wesentlich kleinere Reibung. Das synthetisch hergestellte Oel verhält sich noch etwas ungünstiger als das untersuchte Mineralöl. Auch diese Beobachtungen decken sich mit den praktischen Erfahrungen, da es sich bei dem synthetischen Oel zunächst um ein Ausgangsöl handelt, was sich erwartungsge-

und etwa wie ein reines Mineralöl verhalten müsste. Diese Feststellung ist insofern wichtig, als die Messungen in Bild 8 den Schluss zulassen könnten, daß die synthetischen Öle für die Schmierung nicht geeignet seien. Die Erfahrungen der Reichsanstalt an synthetischen Ölen verschiedener Herkunft und mit verschiedenem Anwendungsgebiet haben vielmehr ergeben, daß es heute möglich ist, synthetische Öle mit ausgezeichneten Schmiereigenschaften herzustellen. Hierauf soll jedoch erst bei späterer Gelegenheit eingegangen werden.

## 6. Schlussfolgerung

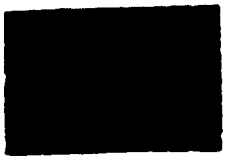
Das beschriebene Verfahren zur thermoelektrischen Messung der Reibungsleistung hat sich bei der Untersuchung von Schmiermitteln hinsichtlich ihres Reibungsverhaltens im Zustand der Grenzschmierung bewährt. Die Messungen lassen einwandfrei den Einfluss der Schmiermittelkonstitution auf die Reibung erkennen. Durch die Ausschaltung jeder hydrodynamischen Filmbildung sind auch Vergleichsmessungen von Schmiermitteln mit grossen Zähigkeitsunterschieden möglich.

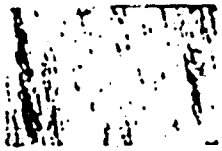
Grundsätzlich kann das thermoelektrische Verfahren nur für vergleichende Messungen verwendet werden. Eine quantitative Reibungsmessung, insbesondere eine genaue Angabe der Reibungszahl ist nach dem beschriebenen Verfahren nicht möglich. Für solche Reibungsmessungen wurde daher noch ein besonderes Verfahren entwickelt, das in einem weiteren Bericht beschrieben wird.

## Bild 1

**Mikroaufnahmen von feinstbearbeiteten Gußeisenflächen**

Vergrößerung 15 fach

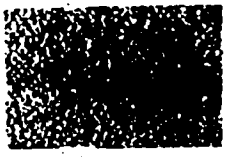




Strichpolitur

Rauhigkeit 1 µ

streifende Beleuchtung — senkrechte Beleuchtung



Feinstbearbeitung nach PTR

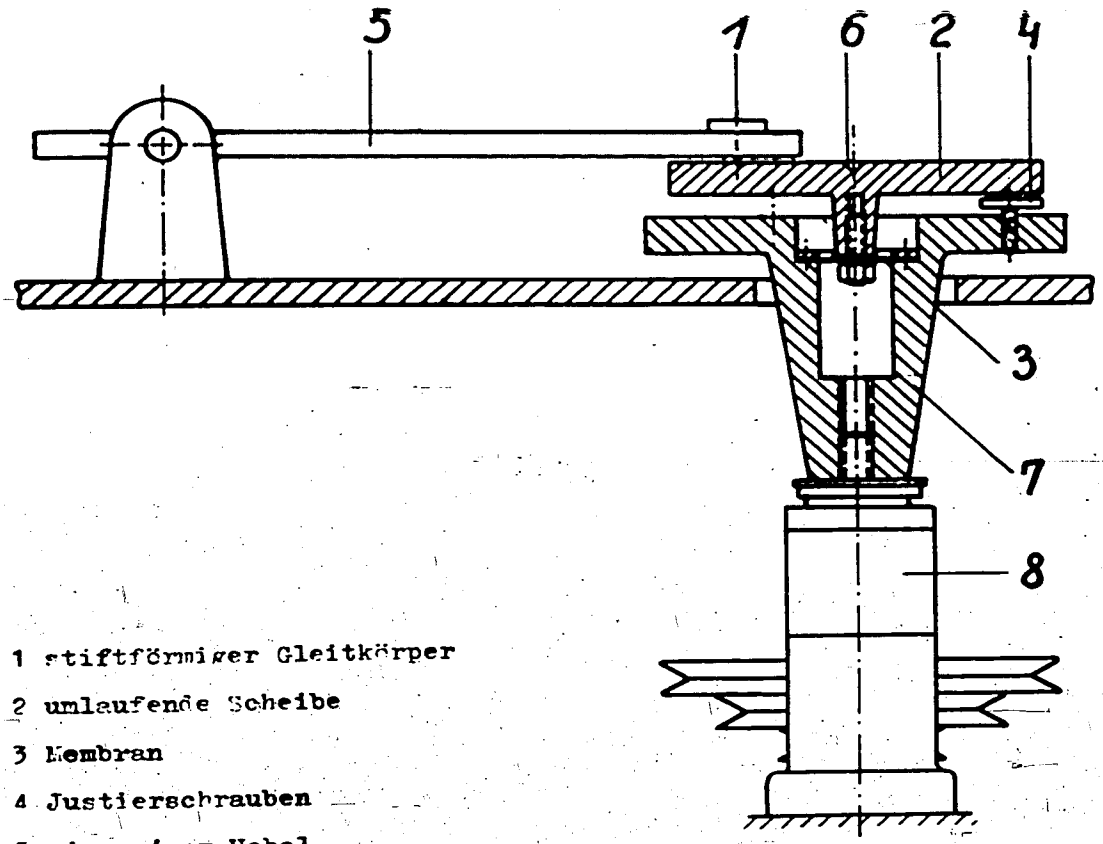
Rauhigkeit 5 µ Korngrösse des Schleifmittels 25-80 µ

streifende Beleuchtung — senkrechte Beleuchtung

Feinstbearbeitung nach PTR

Rauhigkeit 2 µ Korngrösse des Schleifmittels 7-20 µ

streifende Beleuchtung — senkrechte Beleuchtung




1 stiftförmiger Gleitkörper

2 umlaufende Scheibe

3 Membran

4 Justierschrauben

5 einarmiger Hebel

6 Quecksilberkontakt für Anschluss der Messleitung an die umlaufende Scheibe

7 Justiereinrichtung

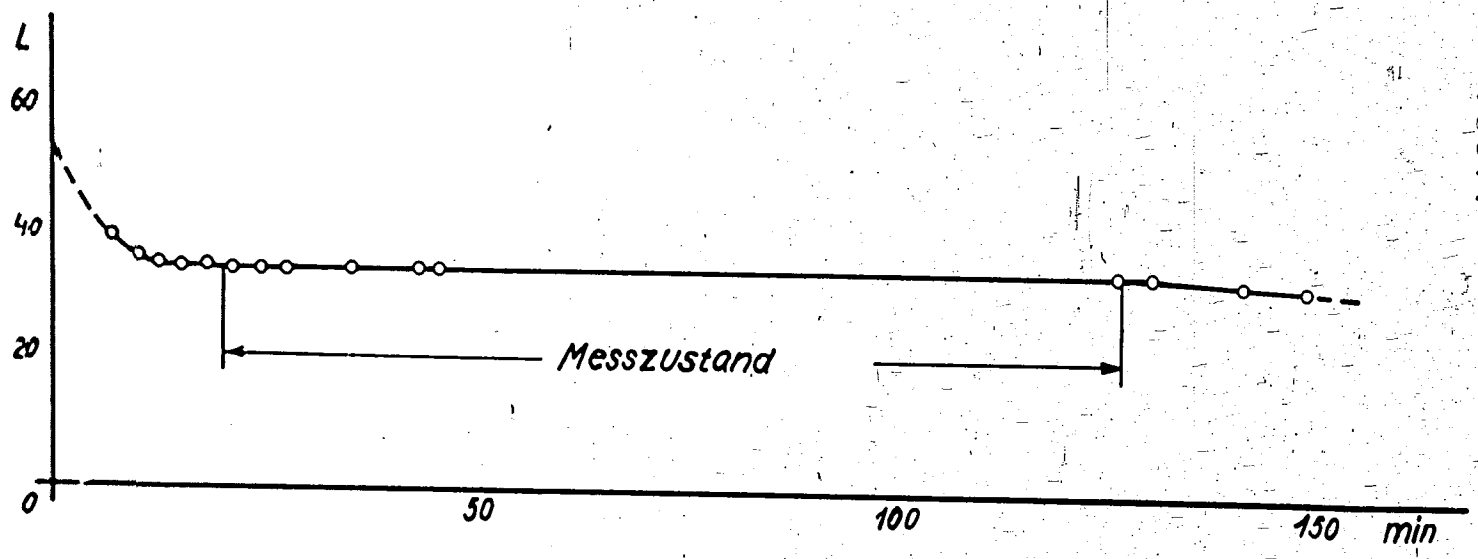
8 Spindelkasten

Bild 2 Mechanischer Aufbau der Gleitanordnung

Bild 3

**Verlauf der Reibungsleistung bei einem Dauerversuch**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Werkstoffpaar | Stahl-Gußeisen | Belastung | 160 kg/cm² |
| Rauhigkeit | ~ 5μ | Stiftdurchmesser | 0,62 mm |
| Temperatur | 20°C | Schmiermittel | Mineralöl |

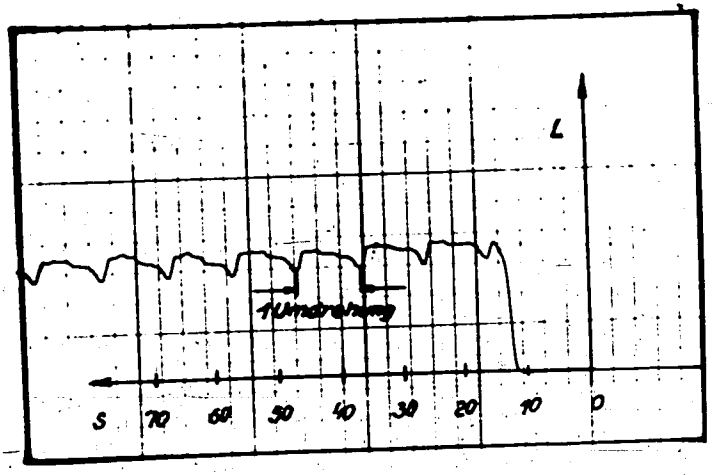





11231

Bild 4

Versuch zum Nachweis der trägheitsfreien Arbeitsweise des Verfahrens.




reibungsvermindernde Wirkung durch einen Tropfen Oelsäure auf der umlaufenden Scheibe.

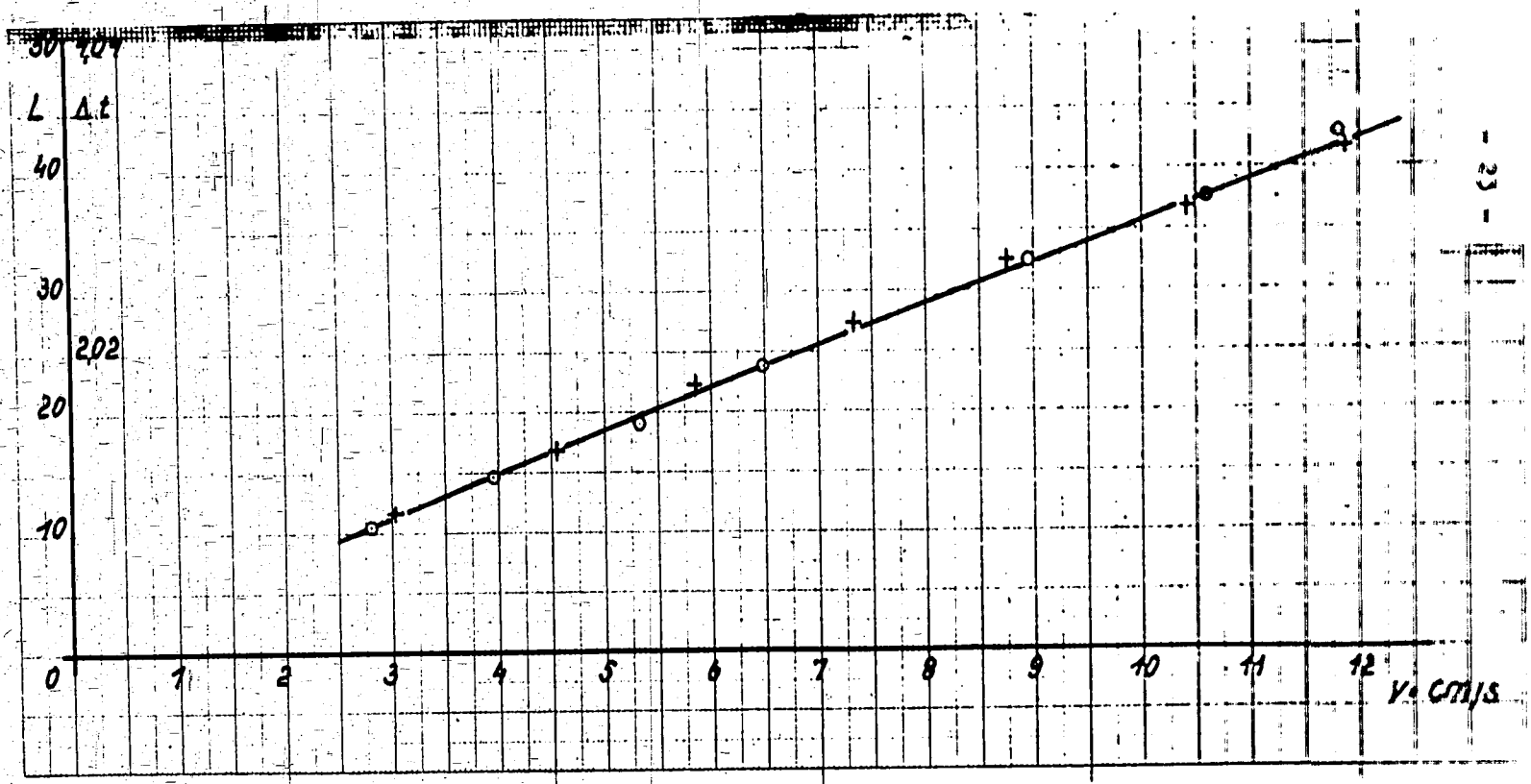
Bild 5 Reibungsleistung L in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit

Wiederholbarkeit

| | | | |
|---|---|---|---|
| Werkstoffpaar | Stahl-Gußeisen | Belastung | 160 kg/cm² |
| Rauhigkeit | ~5 µ | Stiftdurchmesser | 0,62 mm |
| Temperatur | 20 °C | Schmiermittel | Mineralöl |

—o— 1. Messung

—+— 2. Messung

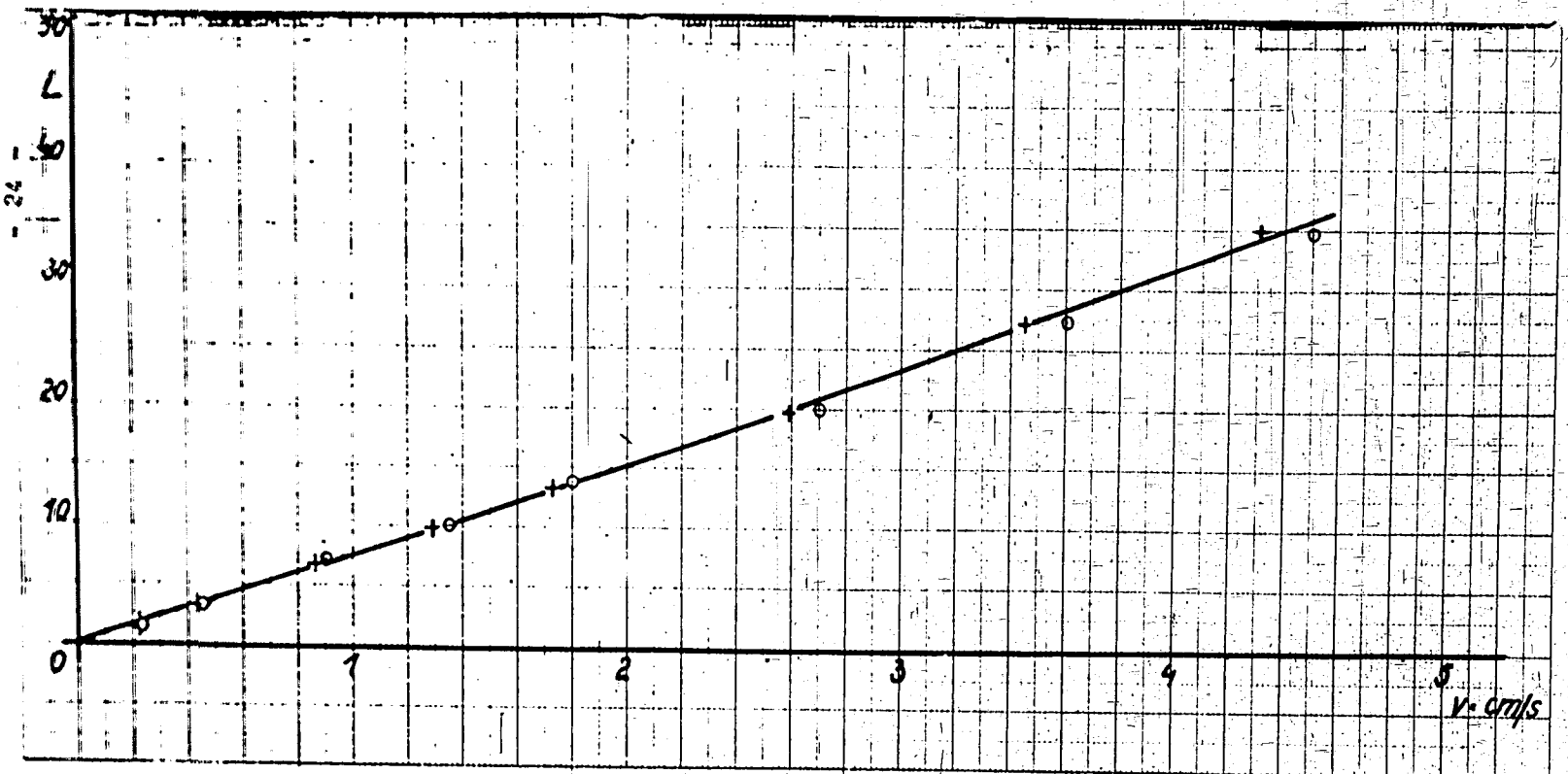


Bl. C

Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit.
Einfluß der Zähigkeit des Schmiermittels.

Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen Belastung 200 kg/cm²
Rauhigkeit 2μ Stiftdurchmesser 0,57 mm
Temperatur 20°C

—o— Ölzähigkeit 154 cSt
—+— Ölzähigkeit 1340 cSt






11231

Bild 7 **Reibungszahl L in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit**

**Reibungsverminderung durch Zusatz von Palmitinsäure**

Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen Stiftdurchmesser 0,62 mm

Rauhigkeit $\sim 2\mu$ Temperatur 20° C

Druck 160 kg/cm²

—o— reines Cetan --o-- 0,01 % Zusatz

—o— 0,001 % Zusatz --•-- 0,1 % Zusatz

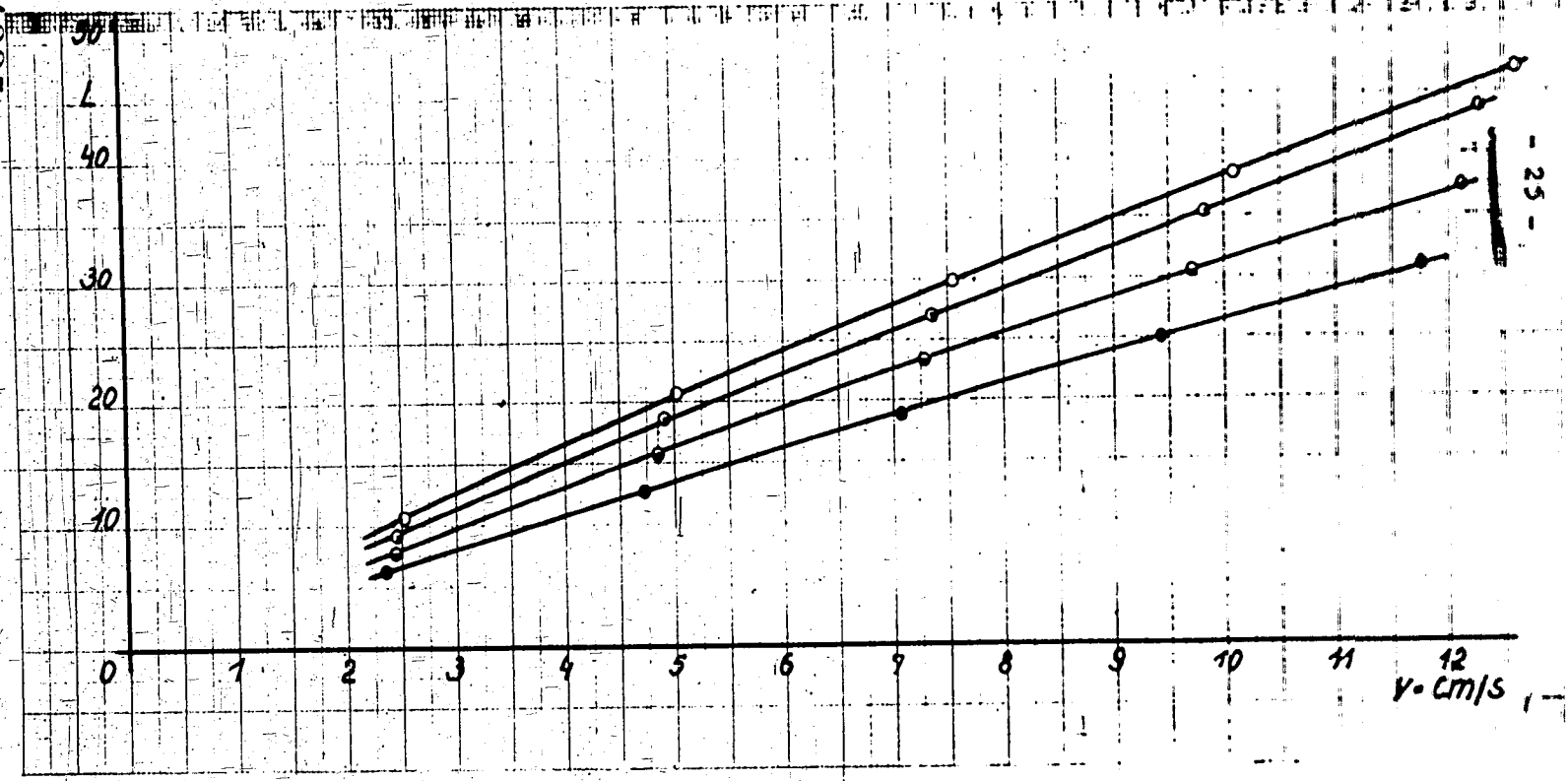


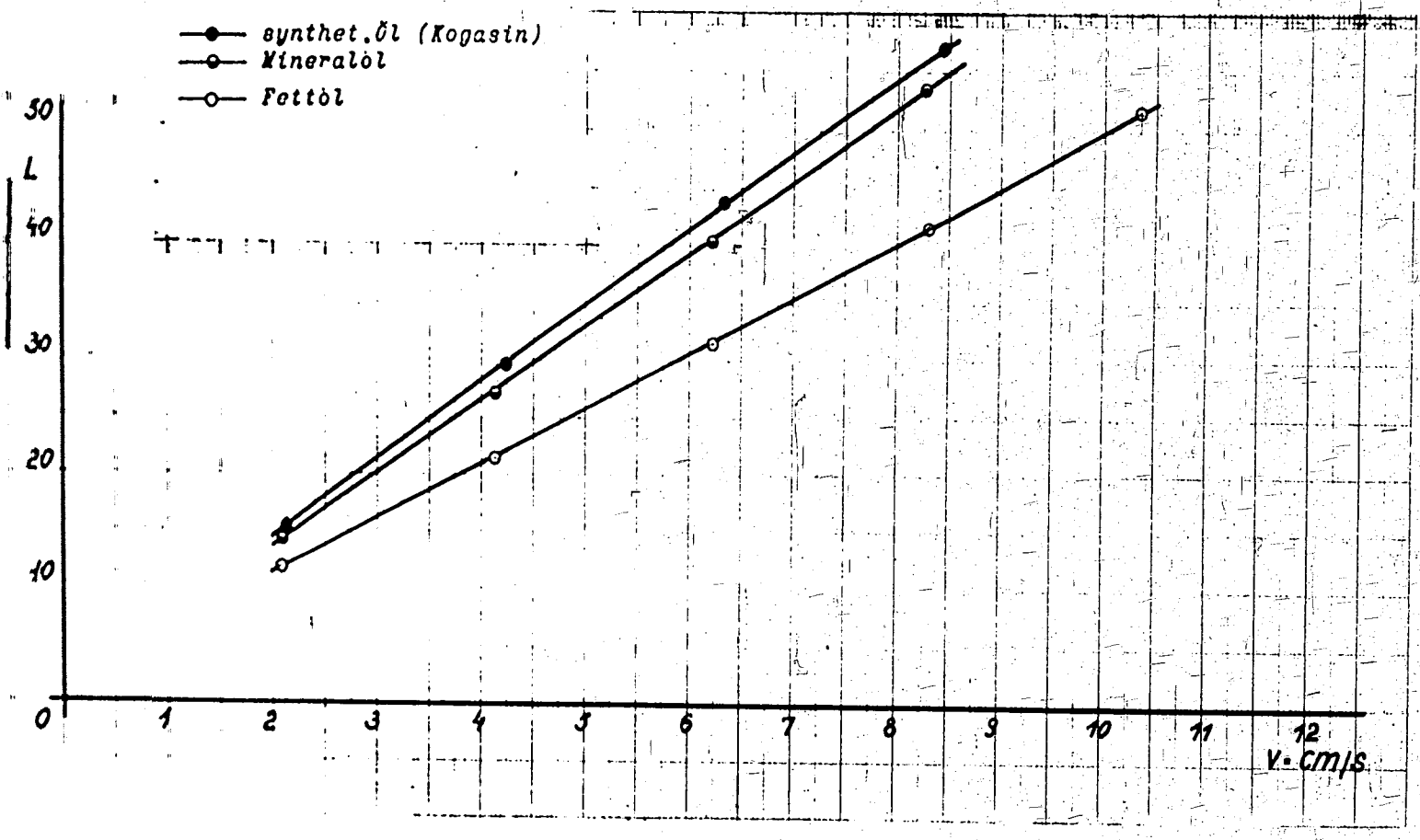
Bild 8 Reibungsleistung L in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit

Einfluß der Konstitution des Schmiermittels

Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen Stiftdurchmesser 0,62 mm

Rauhigkeit ~5μ Temperatur 20° C

Druck 160 kg/cm²



Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt e.V.
Berlin - Adlershof
Postschließfach 2

Geheim

Chemische Werke "Heinebung G.m.b.H."
z.Hd. von Herrn Dr. [illegible]

Leuna - Werke, Merseburg

DVL-Institut Ab 5 — DVL-Zeichen Fb/v.Ph./Pn. — 12.5.41

Betreff: Schmierfähigkeitsuntersuchung von Ölen 1161/41 g

In der Anlage übersendet Ihnen die DVL das Ergebnis der Untersuchung von Ölen verschiedener Zähigkeit, die Sie der DVL s.Zt. zugeschickt hatten. Der Zweck der Untersuchung war, festzustellen, ob bei dem Verfahren zur Erhöhung der Schmierfähigkeit, das in der Zusammenarbeit mit der DVL und der PTR entwickelt worden ist, Einflüsse der Zähigkeit störend auftreten. Ausserdem sollten die Ergebnisse von Prof. Heidebroek überprüft werden, die er nach seinem Verfahren erhalten hat. Wie der Bericht zeigt, sind bei dem Verfahren die ersten 5 Öle trotz Zähigkeitsunterschieden, die 1:28, nach ihrer Schmierfähigkeit beurteilt, bei verschiedenen Geschwindigkeiten fast gleichwertig. Ein Öl mit aktiven Gruppen hingegen zeigte dem gegenüber eine deutliche Verringerung des Reibungskoeffizienten.

Die DVL bittet um Angabe der von Prof. Heidebroek gefundenen Meßwerte und würde es auch begrüßen, wenn die I.G. der DVL weitere Einzelheiten über die Eigenschaften der untersuchten Öle mitteilen würde (physikalisch-chemische Kennzeichnung). Es dürfte sich empfehlen, gelegentlich eine Aussprache mit Herrn Prof. Heidebroek in dieser Angelegenheit zu vereinbaren.

Die DVL bittet um Nachricht, ob Ihnen zu diesem Zwecke ein Zeitpunkt Ende Juni 41 angenehm ist.

Institut für Betriebsstoffforschung
der
Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt E.V.
gez. Philippowich gez. Seeber

Anlage: 1 Bericht zum Schreiben d. Präsidenten der PTR vom 10.5.41 Bb.-Nr.136 41 g (DVL-Nr.1084/41 g) mit der Bitte um Rückgabe.

1123

[illegible]

[illegible] vom [illegible] = [illegible]

**Geheim!**

[illegible]

Bericht über die Untersuchung von [illegible] der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt.

Aufgabenstellung: Die [illegible] vom der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, Institut für Betriebsstoffforschung, [illegible] - [illegible] eingesandt. Es [illegible] Öle sich um synthetische Öle verschiedener Zähigkeit, die von dem Ammoniakwerk Merseburg G.m.b.H. Leuna - Werke hergestellt sind. Die Bezeichnung der Öle und die vom Hersteller angegebenen Zähigkeitswerte sind in der nachstehenden Zahlentafel zusammengestellt.

Zahlentafel

| Ölbezeichnung Nach DVL | Nach Hersteller | Zähigkeit in Ent bei 20°C |
|---|---|---|
| 377a/40 | H 8 | 153.6 |
| 377b/40 | H 16 | 325.3 |
| 377c/40 | H 32 | 775.2 |
| 377d/40 | H 88 | 2365 |
| 377e/40 | H 140 | 4349 |
| 377f/40 | E 426 | 146.8 |

Vereinbarungsgemäß wurden die Öle hinsichtlich ihres Reibungsverhaltens nach einem neuen in der Reichsanstalt entwickelten Verfahren untersucht.

Beschreibung des Messverfahrens: Bei dem Verfahren der Reichsanstalt wird ein stiftförmiger Prüfkörper gegen eine umlaufende Scheibe gedrückt. Der stiftförmige Prüfkörper ist in einer mechanisch eingandfreien und reibungsfreien Halterung befestigt, die eine Auslenkung des Stiftes in Richtung der Reibungskraft zulässt, ohne dass sich die Gleitflächen hinsichtlich ihrer Flächennormalen gegeneinander verstellen können. Die Reibungskraft wird über diese Halterung auf ein Meßpendel mit großer Schwingungsdauer und kleinem Verstellweg übertragen. Die statische Auslenkung des Pendels ist ein Maß für die Reibungskraft. Und zwar ist die Auslenkung des Pendels infolge seiner besonderen Abmessungen so klein, dass die Verschiebung des Stiftes durch die Reibungskraft nur wenige beträgt. Die Auslenkung des Pendels wird verstärkt und kann an einem elektrischen Messgerät abgelesen oder aufgezeichnet werden.

[illegible]

[illegible] Die Möglichkeit, [illegible] Reibung [illegible] Schmiermittel, Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit usw.) [illegible] Verhältnisse [illegible] Einflüssen [illegible] zu untersuchen. Der [illegible] Bedingungen entsprechende Reibungsvorgang endlich der Reibungskraft und Erwärmung (Temperaturerhöhung) stellt sich trotz der kleinen Abmessungen [illegible] Gleitfläche und der Stiftform des einen Prüfkörpers praktisch trägheitslos ein. Die hierdurch ermöglichte kurze Versuchsdauer bedingt, daß während des Versuches eine meßbare Veränderung der Oberfläche nicht eintritt. Die [illegible] nach den neuen Verfahren sind daher gut wiederholbar. Im übrigen beträgt die durch die Reibung hervorgerufene Erwärmung [illegible] Grad Celsius, so daß praktisch keinen Einfluß auf die Versuchstemperatur hat. Außerdem können nach den neuen Verfahren infolge der kleinen Verschiebungen des stiftförmigen Prüfkörpers während der Messeinstellung auch Messungen bei kleinsten Gleitgeschwindigkeiten durchgeführt werden. Ferner scheidet die große Schwingungsdauer des Pendels eine Schwingungsanregung durch den Reibungsvorgang aus. Dies ist insofern wichtig, als der Reibungsvorgang nach den Erfahrungen der Reichsanstalt durch solche Schwingungen stark beeinflußt werden kann.

Die vorstehend aufgeführten Merkmale sind jedes einzeln für sich von besonderer Wichtigkeit; für eine einwandfreie Reibungsmessung müssen sie jedoch sämtlich vorhanden sein, was bei keiner der bisher bekannt gewordenen Prüfeinrichtungen der Fall ist.

Versuche: Die Untersuchungen bezogen sich auf den Werkstoff-Paar Stahl-Gußeisen durchgeführt, wobei der stiftförmige Prüfkörper aus Stahl und die umlaufende Scheibe aus Gusseisen hergestellt war. Die Rauhigkeit der Gusseisenplatte wurde mit dem Oberflächenprüfgerät nach Schmalz ermittelt. Die betrug bei den beiden Bearbeitungszuständen etwa 2 bezw. 5 . Sämtliche Messungen wurden bei einer Temperatur von 20° durchgeführt. In den anliegenden Blättern 1 und 2 sind die Reibungszahlen der Öle in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit für einen Druck von 150 kg/cm² aufgetragen. In ähnlicher Weise wurden Messungen bei einem Druck von 10, 25 und 50 kg/cm² durchgeführt. Aus allen diesen Messungen sind die Reibungszahlen für die Gleitgeschwindigkeit 4 cm/s herausgezogen und in den Blättern 3 und 4 in Abhängigkeit von Druck aufgetragen.

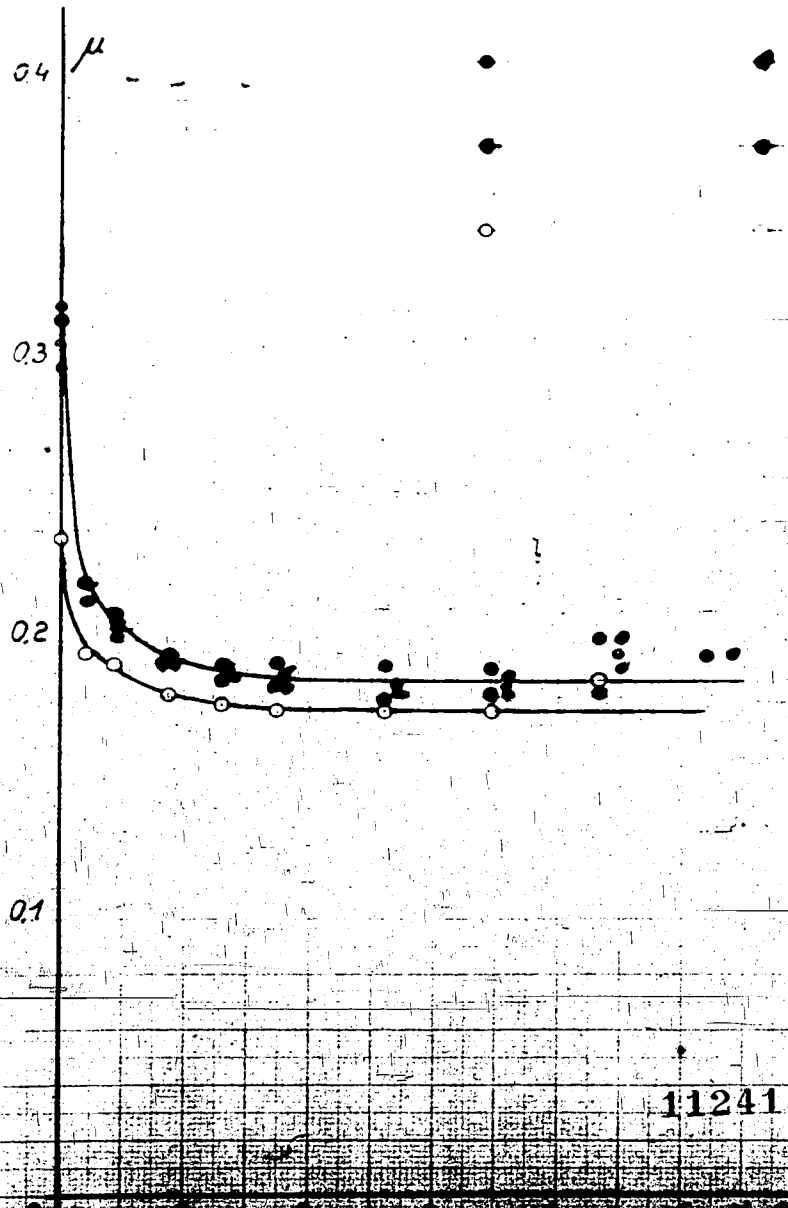
[illegible] Belastung von 150 kg/cm² (Blatt 1 und 2) [illegible] für [illegible] Öle [illegible] Zähigkeit [illegible] Gleitgeschwindigkeit [illegible] Gleitgeschwindigkeit. [illegible] der Bearbeitungszustand [illegible] Einfluss auf die Reibungszahlen dieser Öle. Das Öl 377 [illegible] bei beiden Rauhigkeiten [illegible] Reibungszahl. [illegible] Angaben der Herstellerfirmen handelt es sich [illegible] Öl, [illegible] Grenzflächenaktivität besitzt. Nach anderen in der Reichsanstalt durchgeführten Untersuchungen über den Einfluß der Konstitution eines [illegible] Schmiermittels auf die Reibung haben [illegible] Öle mit größerer Oberflächenaktivität unter sonst gleichen Bedingungen [illegible] Reibungszahl.

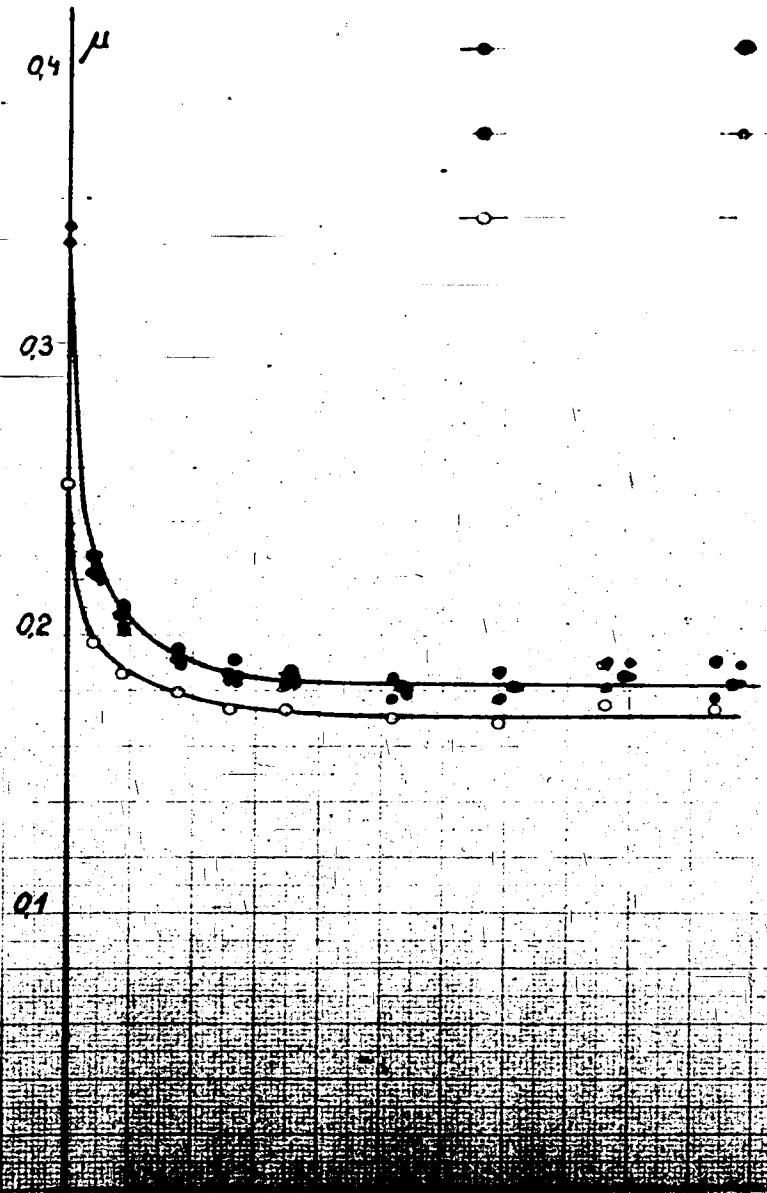
Die Messungen der Reibungszahl bei Drucken kleiner als 150 kg/cm² (Blatt 3 und 4) ergeben einen scheinbaren Einfluß des Bearbeitungszustandes. Wie ein Vergleich der einzelnen Öle untereinander zeigt, ist dieser Einfluss auf die verschiedene Zähigkeit der einzelnen Öle zurückzuführen, so daß die Reibungszahlen bei kleinen Drucken lediglich nach der Zähigkeit ordnen. Der Vergleich von Blatt 3 und 4 zeigt ferner, daß dieser Zähigkeitseinfluss bei größerer Rauhigkeit wesentlich kleiner ist als bei kleinerer Rauhigkeit. Diese Beobachtungen stehen ebenfalls im Einklang mit früheren Messungen der Reichsanstalt, nach denen eine Fläche mit kleinerer Rauhigkeit beziehungsweise ein Öl mit größerer Zähigkeit unter sonst gleichen Bedingungen leichter zu einer Filmbildung führt, was stets in einer zusätzlichen reibungsvermindernden Wirkung zum Ausdruck kommt.

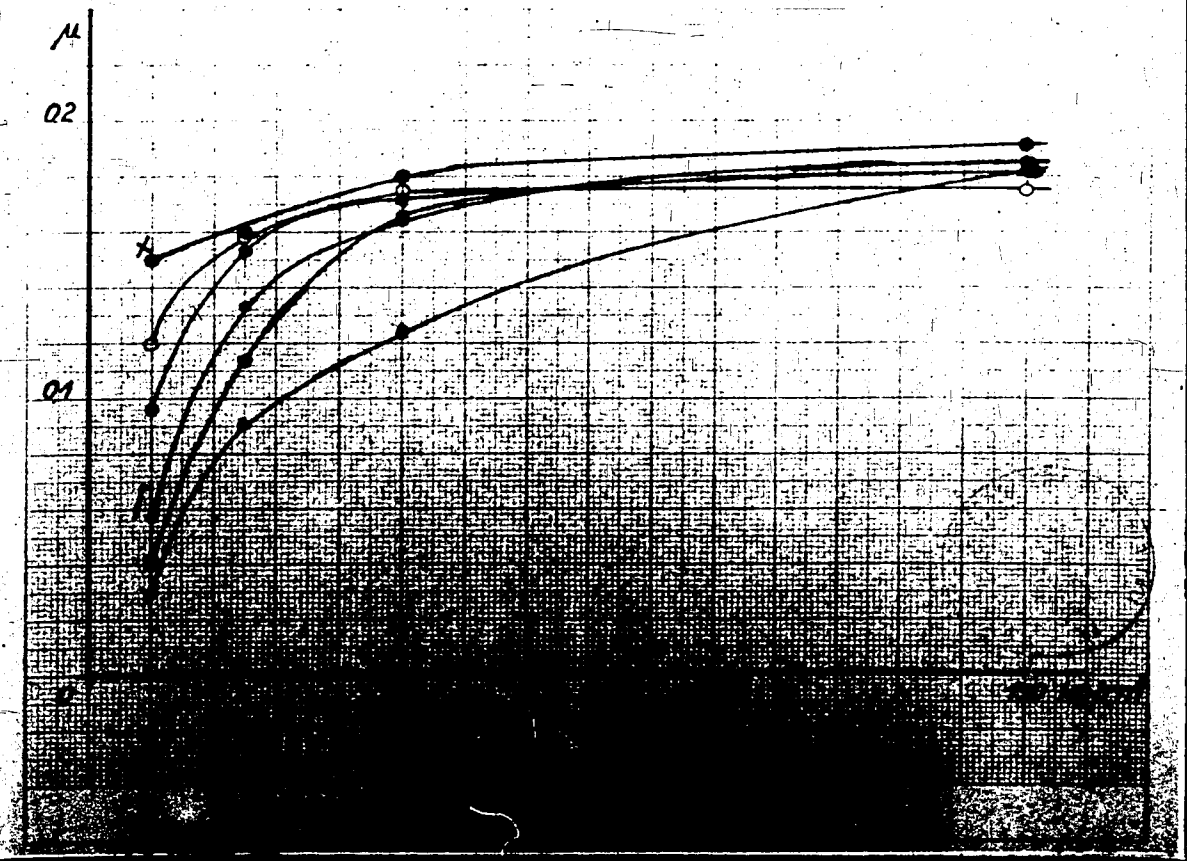
Zusammenfassung: Durch vergleichende Reibungsuntersuchungen an verschiedenen Ölen mit sehr grossen Zähigkeitsunterschieden nach einem neuen Verfahren der Reichsanstalt wird der Nachweis erbracht, dass bei diesem Verfahren einwandfrei der Zustand der Grenzschmierung eingehalten werden kann, ohne dass die Messungen durch eine Filmbildung infolge der Zähigkeit beeinflusst werden. In Übereinstimmung mit den allgemeinen Erfahrungen ist der Zustand der Grenzschmierung um so leichter zu erreichen, je größer die Gleitgeschwindigkeit ist. Darüberhinaus führen die Untersuchungen zu der Erkenntnis, dass der Zustand der Grenzschmierung bei gleicher Belastung und bei gleicher Gleitgeschwindigkeit um so leichter einzuhalten ist, je größer die Rauhigkeit der Gleitflächen ist. Ausserdem läßt das Verfahren deutlich Einflüsse der Konstitution des Schmiermittels auf die Reibung im Zustand der Grenzschmierung erkennen.

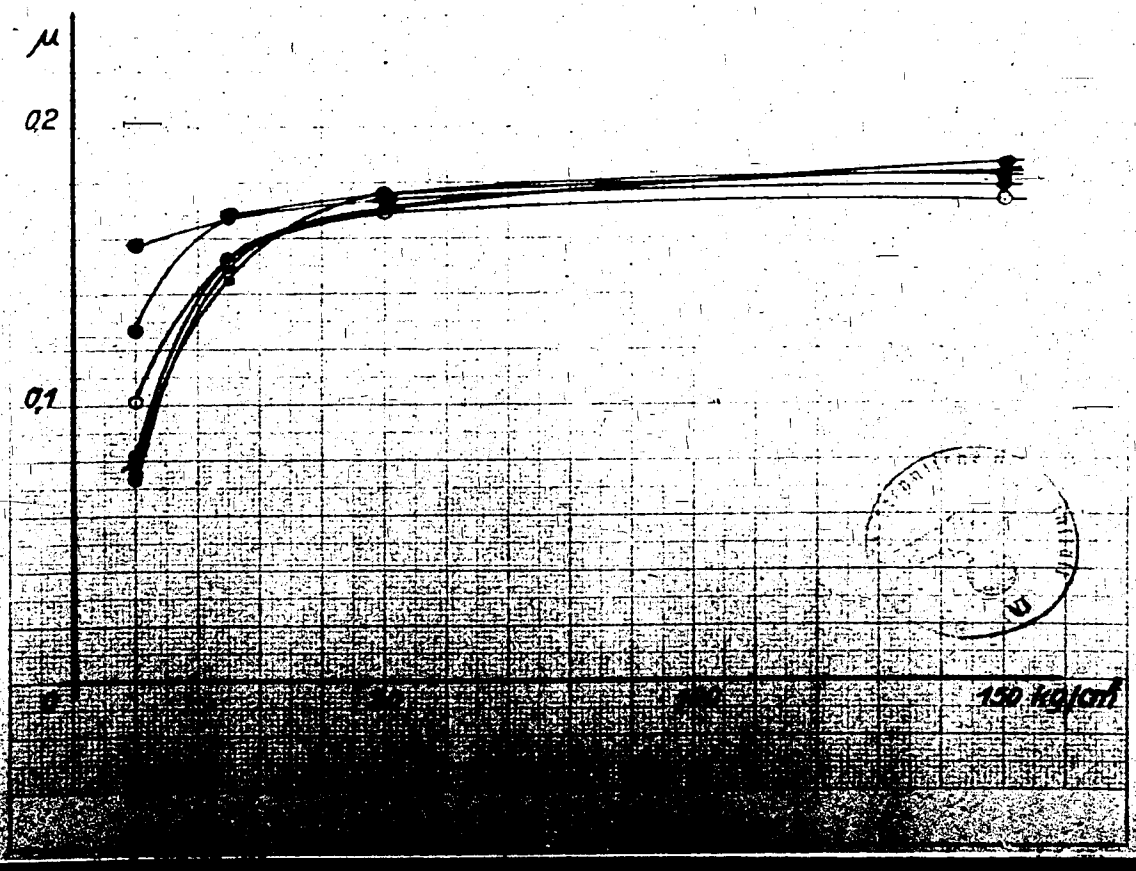
Laboratorium für Schmiertechnik

| Bearbeiter | Laboratoriumsvorsteher |
|---|---|
| gez. Kluge | gez. Kluge |
| gez. Buchmann | |




μ
0,4
0,3
0,2
0,1


μ
0,2
0,1


μ
0,2
0,1
0
150 kg/cm²

# Physikalisch-Technische Reichsanstalt

Physikalisch-Technische Reichsanstalt
Berlin-Charlottenburg 2, Marchstraße 8-12

Fernsprechanschluß
Charlottenburg
Berlin-Charlottenburg

Drahtwort
Reichsphysik
Berlin

Fernsprechnummer
10 00 21
Hausruf
290

I.G. Farbenindustrie A.G.,
Technischer Prüfstand Oppau,

Ludwigshafen a/Rh.

Techn. Prüfst.
30. JULI 1943
Erl.

| Ihre Zeichen | Ihre Nachricht vom | PTR-Nachricht vom | PTR-Zeichen | Tag |
|---|---|---|---|---|
| TA/TPr.Op.471 Ha | | | Bb.-Nr.214/43g VI-S | 28.7.43 |

Betreff: Vergleichsversuche
Vorg.: Ihre Schreiben v.24.3.,19.4. und 19.5.43

Die von Ihnen eingesandten Schmierstoffe mit den Bezeichnungen K7, LK 2200, E 515 und S-Ester wurden vereinbarungsgemäß bezüglich der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung an den vorgesehenen Werkstoffpaaren Schweißdraht bzw. Aeterna VL 22 gegen ungehärteten Stahl (St 5011) untersucht. Die Versuchstemperatur betrug 100°. Im übrigen wurden die Messungen an der Ihnen bekannten Versuchseinrichtung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den beiden anliegenden Bildern zusammengestellt.

Bemerkenswert ist die außerordentlich hohe Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung mit dem S-Ester. Das Schmiermittel K 7 verhält sich praktisch wie ein zusatzfreies reines Mineralöl, während sich die Schmierstoffe LK 2200 und E 515 zwischen dem S-Ester und K7 einordnen. Ein Vergleich mit den von Ihnen im Schreiben vom 19.5. mitgeteilten Meßergebnissen zeigt, daß die von Ihnen vermutete Glättung der umlaufenden Scheibe bei der Anordnung der Reichsanstalt sich praktisch nicht auswirkt. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache stimmt die von Ihnen bei kurzer Meßzeit ermittelte Einordnung der genannten Schmierstoffe mit den Messungen der Reichsanstalt überein. In diesem Zusammenhang wird noch auf Messungen verwiesen,

Herrn Dalder

11243

b.w.

Es wird gebeten, bei Schreiben an die Reichsanstalt persönliche Anschriften zu vermeiden, sie verzögern nur die Erledigung.

Konten: Reichsbank-Giro Berlin-Charlottenburg Nr. 15/1912 — Postscheck Berlin 11277

Zum Bericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vom 21.7.1943 Bo.-Nr: 427.43 VI-S

Bild 2: Abnutzung eines Metallstiftes (Aeterna VL 22) in Abhängigkeit vom Gleitweg (Stiftverkürzung).

Werkstoffpaar: Aeterna VL 22-ungeh.Stahl

Belastung: 0,820 kp

Stiftdurchmesser: 0,6mm

Geschwindigkeit: 3,9 cm/s

Rauhigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm

Temperatur: 100°C

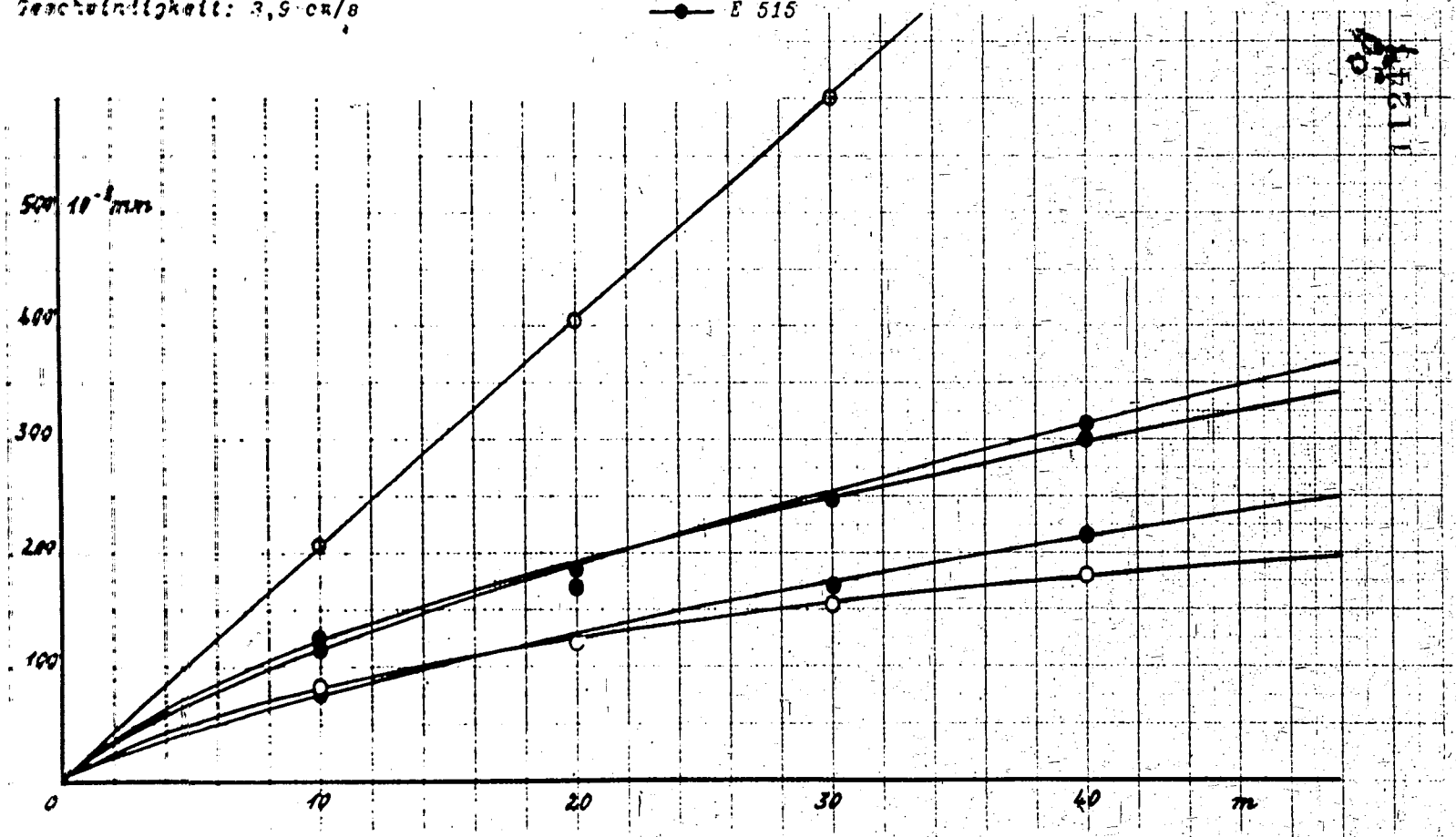
S Ester

E 515

K 7

LK 2200

Kohlenwasserstofföl



die die Reichsanstalt mit den gleichen Schmiermitteln an dem Werkstoffpaar Stahl - Stahl und Messing - Stahl durchgeführt hat und die Ihnen mit Schreiben vom 19.4.43 (Sb.-Nr. 427/43 VI-S) bereits mitgeteilt wurden. Die hierbei ermittelte Einordnung der genannten Schmierstoffe ist qualitativ die gleiche wie an den Werkstoffpaaren Schweißdraht bzw. Aeterna VL 22 gegen Stahl.

Im Auftrage

Kluge

Anlage:
2 Bilder

11246

Zum Bericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vom 24.7.1942 Bb.-Nr: 427.43 VI-S

Bild 1: Abnutzung eines Metallstiftes (Schweissdraht) in Abhängigkeit vom Gleitweg (Stiftverkürzung).

Werkstoffpaar: Schweissdraht-ungeh.Stahl

Belastung: 0,820 kp

Stiftdurchmesser: 0,6mm

Geschwindigkeit: 3,9 cm/s

Rauhigkeit: $2 \cdot 10^{-3}$ mm

Temperatur: 100°C

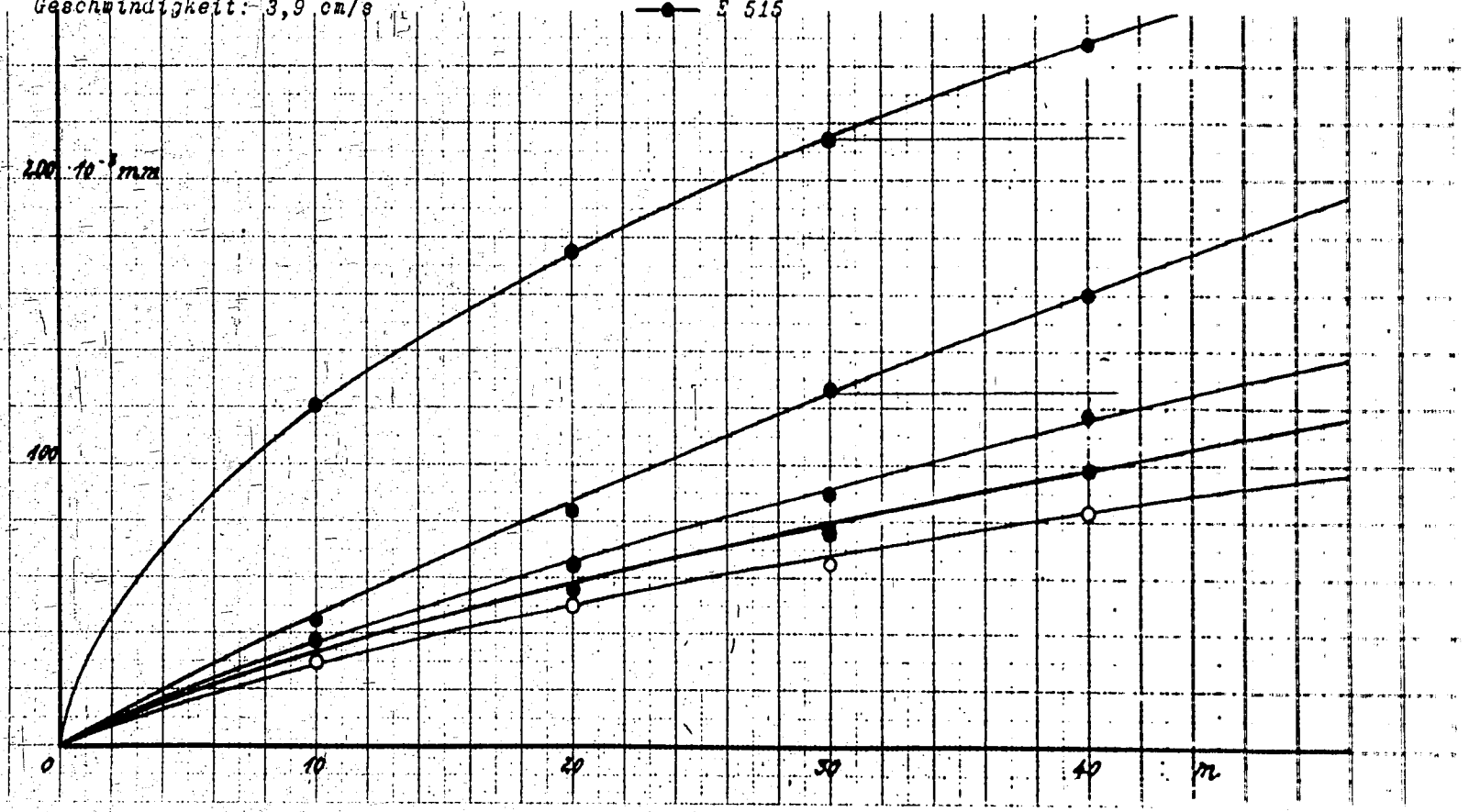
S Ester

E 515

K 7

LK 2200

Kohlenwasserstoffol



Kern

Streng geheim

Bh.Nr. 169.41.g

# Bericht

## der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

**Über die Untersuchung von sechs Maschinengewehrölen**

**der Firma Ammoniakwerk Merseburg G.m.b.H.**

**Leuna-Werke**

Die Maschinengewehröle sind auf synthetischem Weg im Ammoniakwerk Merseburg G.m.b.H. Leuna werke hergestellt. Sie wurden der Reichsanstalt von der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt eingesandt. Die Untersuchung der Öle erstreckte sich auf ihr Reibungs- und Verschleissverhalten. In der nachstehenden Tafel sind die Bezeichnungen der le sowie Angaben über ihre Konstitution zusammengestellt.

Tafel 1

| Bezeichnung nach Einsender | Bezeichnung nach Hersteller | Angaben über die Konstitution des Öles |
|---|---|---|
| 414/40 | 463 a | reiner Ester |
| 415/41 | 463 b | Ester mit 5 v.H. Zusatz |
| 416/40 | 494 b | Mischung 1/1 von 463 b und 495 b |
| 417/40 | 495 a | reines Kohlenwasserstofföl |
| 418/40 | 495 b | Kohlenwasserstofföl mit 5 v.H. Zusatz |
| 419/40 | 495 c | Kohlenwasserstofföl mit 10 v.H. Zusatz. |

1124

## Untersuchung des Reibungsverhaltens

Die Reibungsmessungen an den Maschinenölen wurden an dem Werkstoffpaar Stahlstift – Gußeisenscheibe im Zustand der Grenzschmierung durchgeführt. Die Belastung betrug 2,6 kp/cm² und die Versuchstemperatur 21 °C. Vor jeder Untersuchung der einzelnen Öle wurde die Gleitfläche feinstbearbeitet. Die Genauigkeit betrug etwa 2 %. Für die Reibungsmessungen wurde ein in der Reichsanstalt entwickeltes Verfahren verwendet. In den anliegenden drei Kurvenblättern sind die Reibungszahlen für die sechs Öle in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit dargestellt.

In Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen der Reichsanstalt ergeben die Messungen an den Ölen ohne Zusatzstoff, Nr.493 a und Nr.495 a eine fallende Charakteristik des Reibungsverlaufes, d.h. die Reibungszahl bei kleinsten Gleitgeschwindigkeiten ist größer als die Reibungszahl bei größeren Gleitgeschwindigkeiten. In Gegensatz hierzu ergibt das Öl mit Zusatzstoff Nr.493 b eine steigende Charakteristik, was nach den Erfahrungen der Reichsanstalt auf die oberflächenaktive Wirkung des nicht näher bekannten Zusatzstoffes zurückzuführen ist. Bei den Ölen Nr.493 b, Nr.494 b und Nr.495 c ist die Reibungszahl im gesamten Messbereich von der Gleitgeschwindigkeit unabhängig. Eine größere Dimensionierung des genannten Zusatzstoffes hat keine weitere Reibungsverminderung zur Folge. In der nachstehenden Tafel 2 sind zum Vergleich die Messwerte ohne Öl der sechs Öle gegenübergestellt.

Tafel 2

| Öl | Reibungszahl bei v = 3 cm/s | Charakteristik |
|---|---|---|
| 493 a | .177 | fallend |
| 493 b | .185 | eben |
| 493 c | .175 | eben |
| 494 a | .169 | fallend |
| 494 b | .161 | steigend |
| 495 b | .156 | eben |
| 495 c | | |

11250

## Untersuchung des Verschleissverhaltens

Die Verschleissmessungen wurden ebenfalls an dem Werkstoffpaar Stift - Scheibe durchgeführt. Die Belastung betrug kg/cm² und die Gleitgeschwindigkeit etwa 4, cm/s. Im übrigen waren die Versuchsbedingungen gleichen wie bei den Reibungsmessungen. In der nachstehenden Tabelle ist die Abnutzung des Stahlstiftes bei Schmierung mit den [illegible] einzelnen Schmierstoffen, die nach einer Laufzeit von 5, 1 und 15 min [illegible] wurde. Die Abnutzung wurde aus der Verkürzung des Stahlstiftes [illegible] und laufend während des Gleitversuches nach einem neuen [illegible] Gleichsamtalt aus erarbeiteten Verfahren aufgezeichnet. [illegible] wird zwar die in der Zeiteinheit sich ergebende Abnutzung mit längerer Versuchsdauer allmählich immer kleiner. Sie hat jedoch [illegible] Lauf noch einen deutlich messbaren Wert.

Tafel 3

| Oel | Stiftverkürzung in μ nach einer Laufzeit von | | |
|---|---|---|---|
| | 5 min | 10 min | 15 min |
| 463 a | 37 | 67 | [illegible] |
| 463 b | 45 | [illegible] | 107 |
| 494 b | [illegible] | 117 | 165 |
| 495 a | [illegible] | 39 | 48 |
| 495 b | [illegible] | [illegible] | 77 |
| 495 c | [illegible] | [illegible] | 123 |

Der Vergleich der einzelnen Messungen zeigt einen grossen Einfluss der Konstitution des Schmiermittels auf sein Verschleissverhalten. Dies wird besonders deutlich durch die Beobachtung, daß der Zusatzstoff als Beimengung zu dem Grundöl eine Verringerung des Verschleisses nur selten hat. Besonders macht sich bei der Verschleissmessung mit dem Oel [illegible] b [illegible] ein Mischeffekt bemerkbar. Nach Erfahrungen der Gleichsamtalt mit anderen Oelen verschiedener Konstitution hat ein Schmiermittel mit größerer Oberflächenaktivität auch einen

geringeren Verschleiss. Die vorstehenden Messergebnisse stehen hiermit im Einklang.

## Zusammenfassung

Die vergleichenden Untersuchungen der beiden Maschinengewehrläufe ergeben hinsichtlich der Reibung und ganz besonders deutlich hinsichtlich des Verschleisses einen großen Einfluss des Zusatzstoffes. Darüber hinaus ist bei den Verschleissmessungen mit dem Oel Nr.4.4 b ein Wiedereffekt festzustellen. Die Messungen an den Maschinengewehrläufen lassen in Übereinstimmung mit Erfahrungen der Reichsanstalt an anderen Schmiermitteln verschiedener Konstitution einen inneren Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Reibungscharakteristik und dem Verschleiss erkennen.

Nach Angaben der Herstellerfirma haben sich die Oele, die bei den vorstehend beschriebenen Versuchen einen geringen Verschleiss ergeben, beim praktischen Betrieb besonders bewährt. Im übrigen ist der beobachtete Verschleiss sowohl nach seiner Aufzeichnung als auch nach der mikroskopischen Beobachtung der Gleitflächen eine vollständig gleichmässige Abtragung des Werkstoffes darstellt, so dass anzunehmen, dass gerade diese gleichmässige Abtragung durch die Bildung einer autoxydierten Oelhaut für einen störungsfreien Betrieb verantwortlich zu machen ist.

Berlin-Charlottenburg, den 9.Juni 1941
Physikalisch-Technische Reichsanstalt
Laboratorium für Schmiertechnik

Bearbeiter

Bo
la

Laboratoriumsvorsteher

K 10/6.41

Zum Bericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Bb.Nr. 169.41.g v. 9.6.41

Blatt 2 Reibungszahl $\mu$ in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit:

Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen Schmiermittel

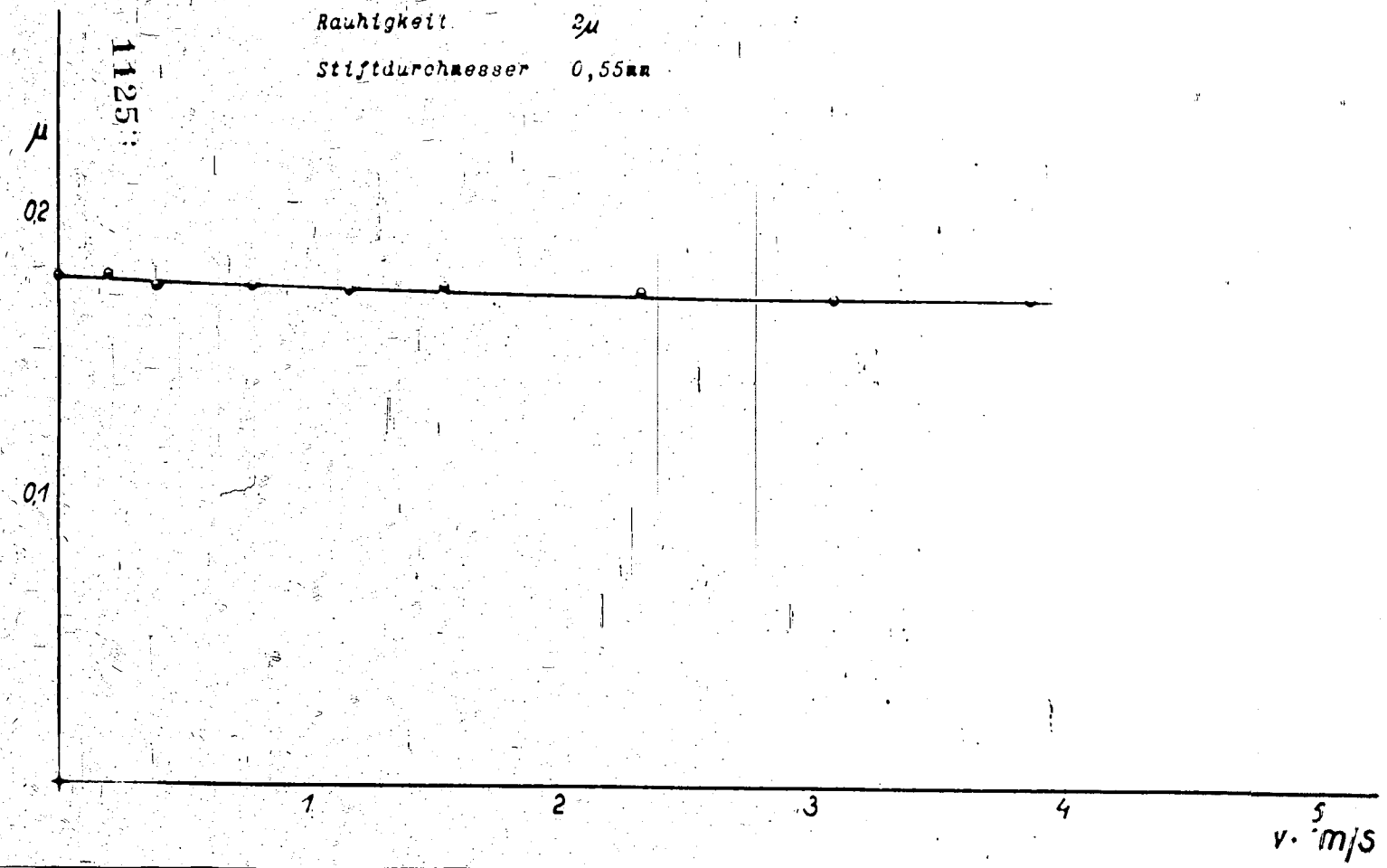
Druck 206 kg/cm² --o-- Nr. 4945

Temperatur 20°C

Rauhigkeit 2$\mu$

Stiftdurchmesser 0,55mm

1125



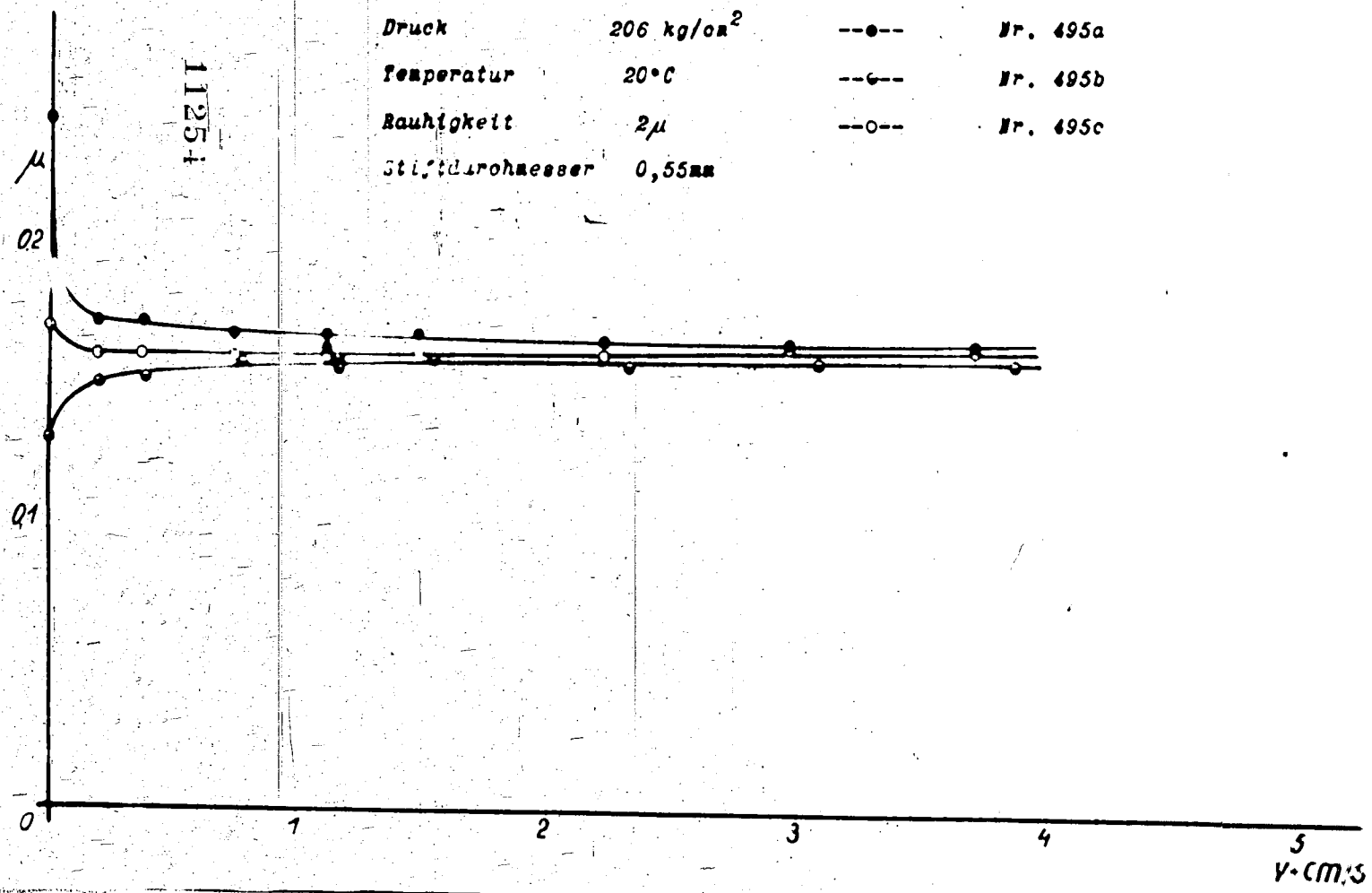
Zum Bericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

Blatt 3 Bl.Nr. 169.41.g v. 9.6.41

Reibungszahl $\mu$ in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit

| Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen | | | Schmiermittel |
|---|---|---|---|
| Druck | 206 kg/cm² | --●-- | Nr. 495a |
| Temperatur | 20°C | --○-- | Nr. 495b |
| Rauhigkeit | 2 $\mu$ | --o-- | Nr. 495c |
| Stiftdurchmesser | 0,55mm | | |

1125

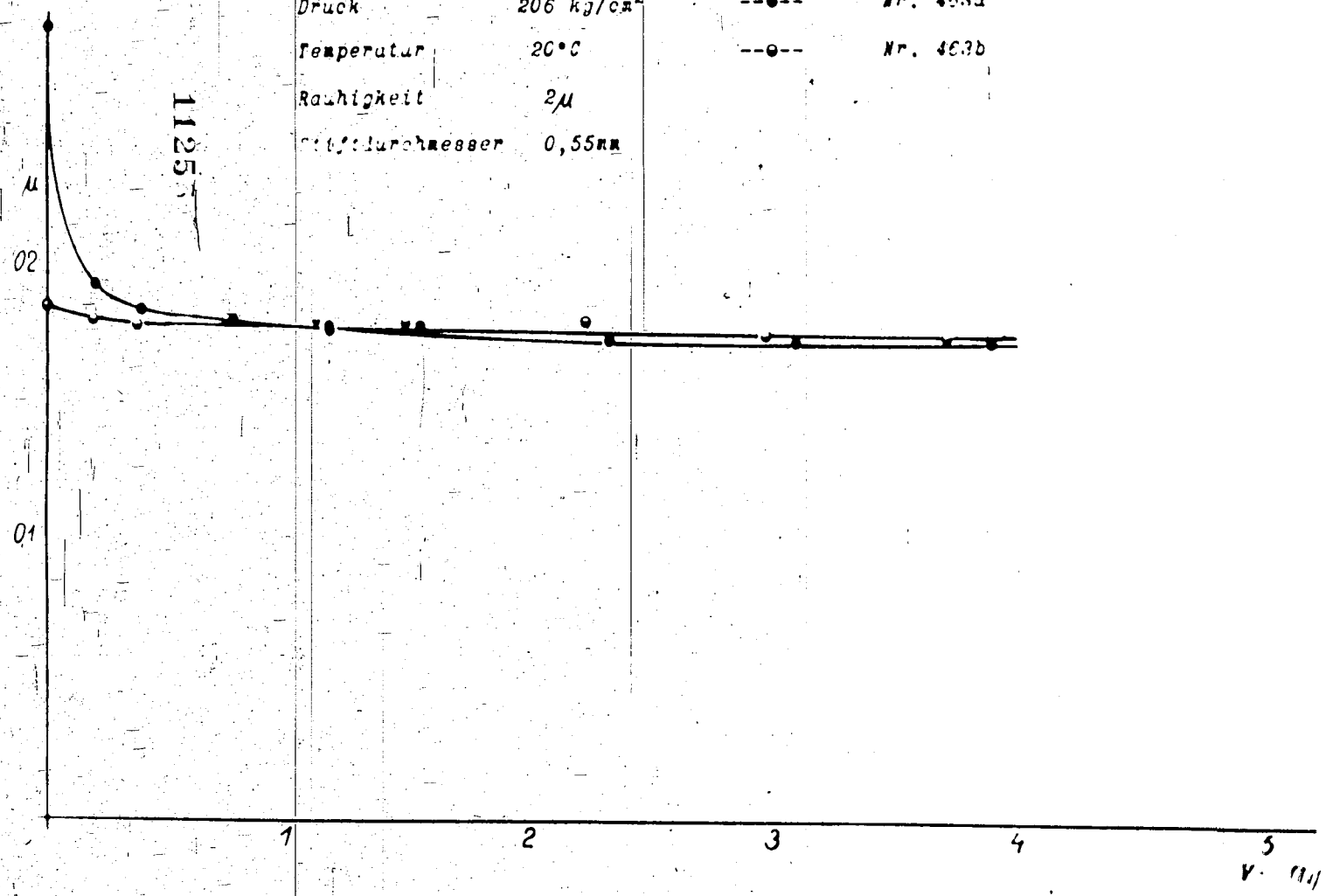


Zum Bericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Bb.Nr. 169.41. 3 v. 9.5.41

Blatt 1

Reibungszahl $\mu$ in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit

| | | | |
|---|---|---|---|
| Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen | | | Schmiermittel |
| Druck | 206 kg/cm² | --●-- | Nr. 463a |
| Temperatur | 20°C | --○-- | Nr. 463b |
| Rauhigkeit | 2 $\mu$ | | |
| Stiftdurchmesser | 0,55 mm | | |




1125

# Nur für den Dienstgebrauch

Sonderdruck aus Heft 6
der Mitteilungen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung

## Neue Erkenntnisse über die Schmierfähigkeit und ihre Messung

von Johannes Kluge

Der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung
vorgetragen
am 7. Mai 1942

# Neue Erkenntnisse über die Schmierfähigkeit und ihre Messung

Von Johannes Kluge, Berlin

(vorgetragen von A. Esau)

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

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

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

Fettöle und reine reinen Mineralöle bei der Motoren- und Getriebeschmierung verwiesen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Lagerflächen bei hoher Belastung oder bei Mangelschmierung (z. B. Kolbenringschmierung) ganz bzw. teilweise in fester Berührung aufeinander gleiten. Es wirken hierbei molekulare Grenzflächenkräfte zwischen Schmiermittel und Lagerwerkstoff, die in der Zähigkeit nicht mit zum Ausdruck kommen. Die moderne Schmiermittelforschung faßt die Wirkung dieser Grenzflächenkräfte in dem Begriff der Schmierfähigkeit zusammen, ohne daß damit zunächst eine Lösung der in Frage kommenden Aufgaben möglich war. In den meisten Fällen konnte die richtige Auswahl eines Schmiermittels nach wie vor nur auf Grund eines kostspieligen Betriebsversuchs getroffen werden. Es lag daher ein dringendes Bedürfnis vor, für die Auswahl eines Schmiermittels hinsichtlich des erwähnten Grenzflächenverhaltens und damit hinsichtlich der Schmierfähigkeit zuverlässige Meßverfahren und Bewertungsgrundlagen zu schaffen. Die neueren Arbeiten der Reichsanstalt, die mit Rücksicht auf die besondere Bedeutung der Kolbenringschmierung zunächst nur an dem Werkstoffpaar Stahl-Gußeisen durchgeführt wurden, geben hierfür einen entscheidenden Beitrag.

Bevor hierüber Näheres berichtet wird, sei zur grundsätzlichen Klarstellung festgehalten, daß man bei geschmierten Gleitflächen mehrere Betriebszustände unterscheiden muß. Wenn beispielsweise die Gleitflächen durch einen hydrodynamisch gebildeten Film getrennt sind, spricht man von der bereits erwähnten hydrodynamischen Schmierung oder Vollschmierung. Die Belastung steht mit hydrodynamisch gebildeten Drucken im Gleichgewicht, und die Zähigkeit ist die einzig ausschlaggebende Kenngröße des Schmiermittels. Ist die Belastung zu hoch oder die Drehzahl zu klein, so daß sich ein hydrodynamischer Film nicht bilden kann, so wirkt das Schmiermittel nur in dünnen, an den Grenzflächen haftenden Schichten, dementsprechend bezeichnet man diesen Zustand als Grenzschmierung. Die Schmierung wird hierbei von der Zähigkeit nicht beeinflußt. An technischen Gleitflächen bestehen nun häufig Grenzschmierung und Vollschmierung nebeneinander, man spricht dann von Teilschmierung. Abbildung 1 zeigt zur weiteren Klarstellung dieser Begriffe die Reibungszahl eines Gleitlagers in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit $\omega$ bzw. von der dimensionslosen Größe $\eta \cdot \omega / p$. Wie man aus der Abbildung 1 beispielsweise erkennt, ist die Reibungszahl in der Teilschmierung im Gegensatz zur Vollschmierung um

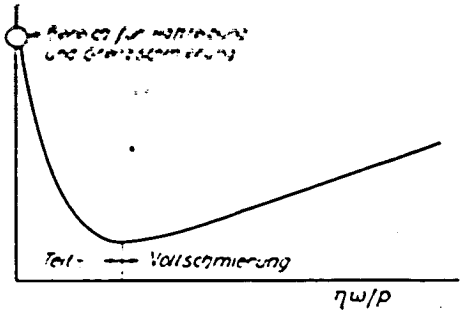



**Abb. 1**
**Reibungskurve nach Striebeck**

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

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

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

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

## Schmiermittelbewertung durch Grenzreibungsmessungen

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

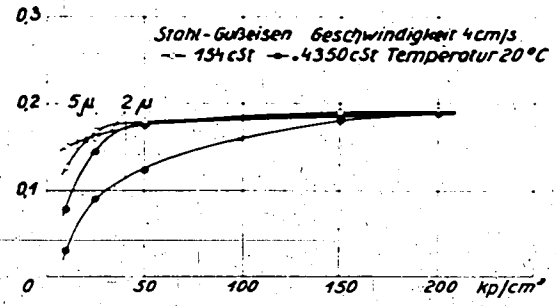



Abb. 2
Reibungszahl in Abhängigkeit von Druck und Rauhigkeit

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

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

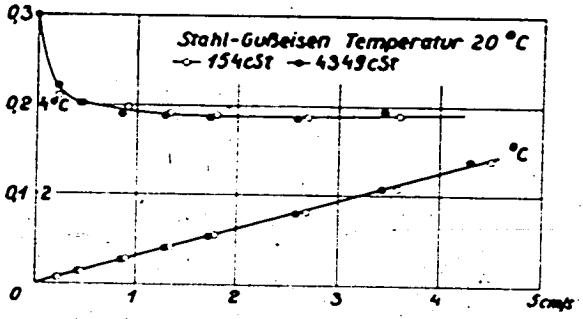



Abb. 3
Grenzreibungszahl und Erwärmung bei verschiedener Ölzähigkeit

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

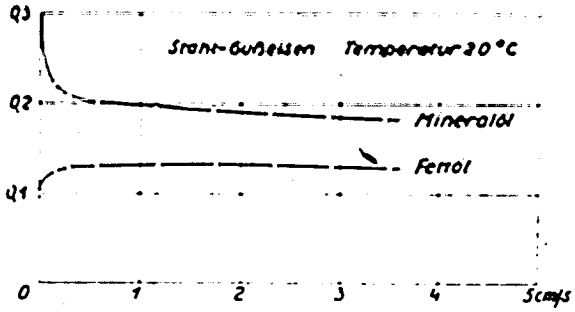



Abb. 4
Grenzreibungszahl von Mineralöl und Fettöl

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

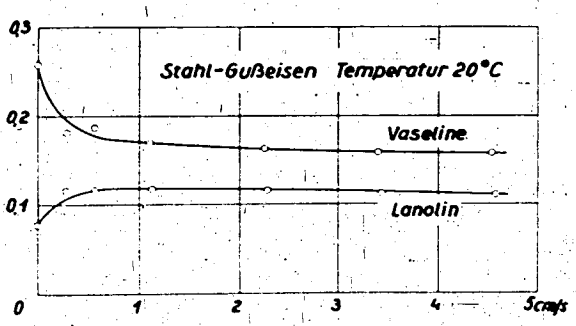



Abb. 5
Grenzreibungszahl von Vaseline und Lanolin

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

## Grenzreibung und Konstitution des Schmiermittels

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

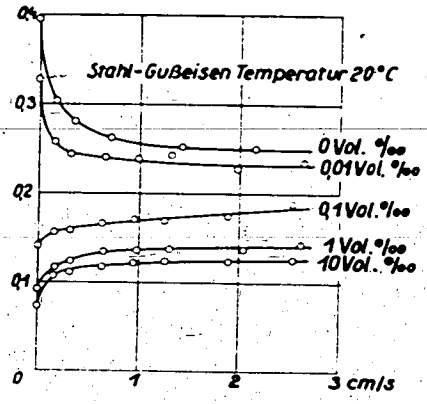



Abb. 6
Grenzreibungszahl von Cetan mit Zusatz von Ölsäure

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

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

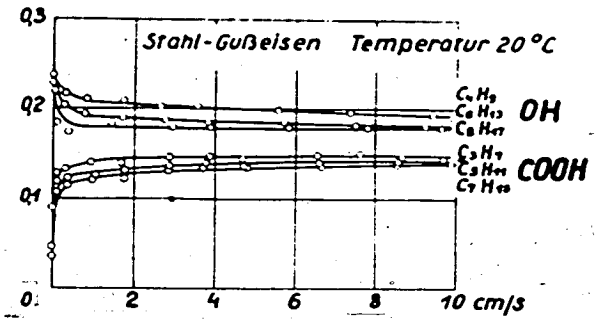



Abb. 7
Grenzreibungszahl homologer Alkohole und Säuren

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

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

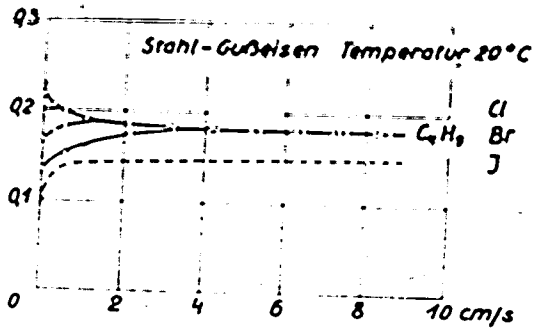



Abb. 8
Grenzreibungszahl der Butylderivate

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

## Schmiermittelbewertung durch Abnutzungsmessungen im Zustand der Grenzschmierung

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

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

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

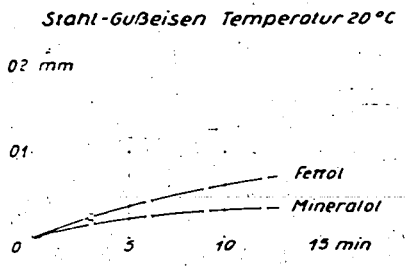



Abb. 9
Abnutzung der Grenzschmierung mit Mineralöl und Fettöl

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

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

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

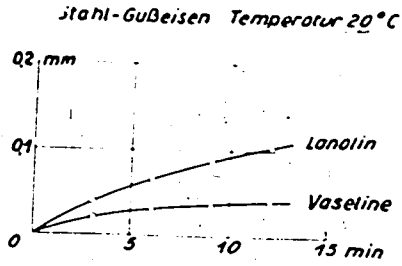



Abb. 10
Abnutzung bei Grenzschmierung mit Vaseline und Lanolin

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

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

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

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

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

## Zusammenfassung

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

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

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

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

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

# Schrifttum


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


---

Der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung
vorgetragen am 7. Mai 1942

# Aussprache

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

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

**Kluge**, Berlin (als Gast): Bei dem verwendeten Gußeisen handelt es sich um einen Büchsenguß der Firma Goetze. Wir haben auch andere Gußeisensorten verwendet und konnten da bei der Grenzreibung keinen großen Einfluß des Werkstoffs feststellen. Bei den Abnutzungsversuchen dagegen ist der Werkstoffeinfluß wesentlich größer. Der verwendete Stahl war ein Federstahldraht mit 0,9 % Kohlenstoff, 0,15 % Silicium und 0,50 % Mangan. Der Büchsenguß enthält 3.3 % Kohlenstoff, 0,9 % Mangan und 1,8 % Silicium.

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

### I. Welche Schmierungsphase liegt vor?

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

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

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

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

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

### II. Was ist »Reibungskraft«?

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

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

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

Ist aber der Reibungsvorgang in diesem beschränkten Sinne »hydrodynamisch«, so ist er formabhängig. Der Nadeldurchmesser von 0.6 mm ist — immer im Verhältnis zur Molekülgröße — eine »technische Fläche«, jedenfalls sehr viel größer als z. B. die Abplattungsfläche bei Kugellagern. Trifft dieses zu, so ist aber die gemessene Reibungskraft $K$ eine komplexe Funktion von Geschwindigkeit,

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

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

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

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

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

Auch hier kann man nicht von einer absoluten Reibungszahl sprechen.

### *III. Der technische Schmiervorgang*

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

a) die geometrische Form der Schmierstelle, d. h. die strömungstechnische Situation,

b) die Schmiereignung der angrenzenden Werkstoffe,

c) die Schmiereigenschaften des Schmierstoffs.

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

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

## *IV. Der Begriff der Schmierfähigkeit*

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

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

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

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

## *V. Erweiterung der Versuche der PTR*

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

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

3. Wie verhalten sich die Reibungszahlen bei veränderlicher Belastung, insbesondere beim Übergang in die Verschleißphase und bei verschiedenen Temperaturen?
4. Welche Ursache liegt dem Ansteigen der Reibungszahlen bei sog. fetten, d. h. stark grenzflächenaktiven Ölen bzw. dem Absinken bei den Mineralölen zugrunde?

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

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

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

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

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

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

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

Vereinbarung. Hierbei wird, um auf den wichtigsten von Herrn Heidebroek angeregten Punkt einzugehen, kein Unterschied zwischen Grenzreibung und Epilamenreibung gemacht. Beide Begriffe sind vielmehr identisch. Weiterhin ist der Zustand der Grenzschmierung nach dieser Vereinbarung dadurch gekennzeichnet, daß die Reibung durch die Zähigkeit meßbar nicht beeinflußt wird. Bei unseren Versuchen ist ein solcher Einfluß nicht vorhanden, somit liegt hierbei einwandfrei der Zustand der Grenzschmierung vor. Wenn wir nun außerdem zeigen konnten, daß die Grenzreibungszahl eines Schmiermittels, d. h. die im Zustand der Grenzschmierung gemessene Reibungszahl, für ein gegebenes Werkstoffpaar vom Druck, von der Rauhigkeit und in gewissen Grenzen von der Gleitgeschwindigkeit unabhängig ist, so ist es durchaus berechtigt, bei einer bestimmten Werkstoffpaarung von der Grenzreibungszahl eines Schmiermittels zu sprechen. Dies um so mehr, als in der Grenzreibung der für die Grenzflächenkräfte verantwortliche chemische Aufbau des Schmiermittels klar zum Ausdruck kommt. Es darf allerdings nicht außer acht gelassen werden, daß durch die gewählte Bearbeitung der Gleitfläche, wie Drehen, Schleifen, Polieren usw., starke Veränderungen im Gefügeaufbau der Gleitfläche mit entsprechender Beeinflussung des gesamten Gleitvorganges auftreten können, wie ja auch andere Grenzflächenerscheinungen (z. B. Benetzungsfähigkeit) durch die angewandte Bearbeitung stark beeinflußt werden. Aus diesem Grunde verwenden wir bei unseren Versuchen ein Feinstläppverfahren, wo derartige Gefügeänderungen durch kleinsten Arbeitsdruck (0,02 kg/cm²) und kleinste Arbeitsgeschwindigkeit (2 bis 3 cm/s) vermieden werden oder zum mindesten klein gehalten werden.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Holm:** Ich habe aus Versuchen von Herrn Kluge berechnet, daß am eingeschliffenen Kontakt die im Mittel je Überfahrung einer Kontaktfläche von dieser abgeschliffenen Menge zu einer oder einigen oberflächlichen Metallschichten ausreicht. Der anfängliche Verschleiß liegt eine Zehnerpotenz höher.

**Kluge:** Zur Frage Druckabhängigkeit der Grenzreibung möchte ich noch sagen, daß wir Grenzreibungsuntersuchungen zum Teil bis zu 2000 kg cm² durchgeführt haben und bis zu diesen hohen Drucken keinerlei Druckabhängigkeit beobachten konnten. Dies ist mit ein sehr entscheidender Beweis dafür, daß bei unseren Meßverfahren zur Untersuchung der Grenzschmierung kein hydrodynamischer Schmierungsanteil wirksam wird.

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

**Kluge:** Abschließendes über die Druckabhängigkeit der Abnutzung bei Grenzschmierung können wir nicht sagen. Aber es kommen da offenbar auch recht interessante Sachen heraus. Jedenfalls nimmt die Abnutzung nicht in dem erwarteten Maße mit dem Druck zu. Wir haben z. B. in einem Fall den Druck verdoppelt, und da nahm die Abnutzung nur um einige Prozente zu. Die Ihnen mitgeteilten Abnutzungswerte sind bei einem über dem Querschnitt der Gleitfläche gemittelten Druck von 500 kg m² ermittelt.

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

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

**Körber:** Mit dem Ultramikroskop würde es gehen.

# Physikalisch-Technische Reichsanstalt

Geheim

2 Ausfertigungen
1 Ausfertigung

## Prüfungsbericht

Gegenstand: Untersuchung von 6 synthetischen Ölen.

Briefbuch-Nr.: PTR 53 / 43g VI-S

Die Öle wurden der Reichsanstalt vom Ammoniakwerk Merseburg zur Untersuchung eingesandt. Ihre Bezeichnungen und ihre Zähigkeitswerte gehen aus nachstehender Zahlentafel hervor.

Zahlentafel

| Temperatur | Zähigkeit in c St für das Öl H 8 | H 16 | H 32 | H 88 | H 140 | E 426 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20° | 153,6 | 325,3 | 775,2 | 2365 | 4349 | 146,8 |
| 100° | 8,53 | 14,23 | 22,63 | 42,42 | 55,7 | 6,4 |

Bei den Ölen H 8 bis H 140 handelt es sich hierbei um synthetische Kohlenwasserstofföle, während das Öl E 426 ein Ester ist.

Die Untersuchung der Öle wurde nach dem in der Reichsanstalt entwickelten Verfahren durchgeführt. Sie erstreckte sich auf die Bestimmung der bei Grenzschmierung[1] auftretenden Werkstoffabtragung die nach den Erfahrungen der Reichsanstalt zur Bewertung der Öle hinsichtlich ihrer Schmierfähigkeit herangezogen werden kann. In diese Untersuchung wurde ferner ein Fettöl mit einbezogen.

Ausserdem sind zum Vergleich in diesem Bericht Untersuchungsergebnisse wiedergegeben, die an dem Technischen Prüfstand ,Oppau der I-G Farbenindustrie A.G, Ludwigshafen nach einem dort entwickelten Verfahren ermittelt wurden.[2]

[1] VDI, Bd.86 S.408/9 (1942)

11281

Prüfungsberichte ohne Dienstsiegel haben keine Gültigkeit.

Vordr. A 2

## 1. Bestimmung der Werkstoffabtragung nach dem Verfahren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

Eine umlaufende, ebene, geläppte Scheibe aus Gußeisen und eine stiftförmige Probe aus Stahl (Durchmesser 0,6 mm) dienten als Gleitanordnung. Letztere wurde mit einstellbarer Belastung gegen die Stahlscheibe gedrückt. Die Versuchsbedingungen waren im übrigen so gewählt, daß reine Grenzschmierung vorlag. Die Untersuchungen der Reichsanstalt nach diesem Verfahren haben zu der Anschauung geführt, daß die bei Grenzschmierung ermittelte Werkstoffabtragung ein Kennzeichen für das Einlaufverhalten der Öle ist und damit eine vergleichsweise Bewertung dieser Öle hinsichtlich ihrer Schmierfähigkeit zulässt. Hierbei entspricht eine grosse Werkstoffabtragung einem guten Einlaufverhalten bezw. einer guten Schmierfähigkeit und umgekehrt. Bezüglich der technischen Ausdeutung dieses Zusammenhanges ist zu beachten, daß bei technischen Schmiervorgängen, die mit Verschleiss verbunden sind, Bereiche mit hydrodynamischer Schmierung und Bereiche mit Grenzschmierung nebeneinanderbestehen (Teilschmierung [1]), wobei an den verschleissgefährdeten Stellen Grenzschmierungsbedingungen vorliegen. Ein gutes Einlaufverhalten eines Öles führt somit zur Abtragung dieser verschleissgefährdeten Stellen und damit zu einer gleichmässigeren Druckverteilung. Gleichzeitig wird hierdurch die Verschleissgefahr herabgesetzt, da sich dann leichter ein hydrodynamischer Film bildet.

## 2. Untersuchung der Schmierfähigkeit nach dem Verfahren der I-G.

Als Gleitanordnung bei dem Verfahren der I-G diente ein Probekörper aus gezogenem Messing, der gegen eine sich oszillierend bewegende Trommel mit auswechselbarer Stahlbandauflage gedrückt wurde. Die von der I-G mitgeteilten Versuchsergebnisse (vergl. angezogene Berichte) lassen deutlich erkennen, daß bei dem angewandten Verfahren Zähigkeitseinflüsse mitwirken. Es liegt daher bei diesem Verfahren der Zustand Teilschmierung [1] vor.

[2] Bericht des Techn. Prüfstandes, Oppau Nr. 478 "Ein Gerät zur Prüfung der Schmierfähigkeit von Ölen durch Bestimmung des Verschleisses."

Bericht des Techn. Prüfstandes, Oppau Nr. 518 "Prüfung von Schmierstoffen durch Verschleissmessung."

## Ergebnis der Untersuchung.

In dem anliegenden Bild sind die Messergebnisse nach den beiden Verfahren gegenübergestellt. Wenn auch das Werkstoffpaar und die Versuchstemperatur nicht die gleichen sind, so ergeben sich doch zwischen den Messergebnissen nach diesen beiden Verfahren deutliche Zusammenhänge.

Bei dem Verfahren der Reichsanstalt verhalten sich die reinen Kohlenwasserstofföle H 8 bis H 88 praktisch gleich entsprechend ihrem neutralen Grenzflächenverhalten und entsprechend der Tatsache, daß hier hydrodynamische Schmierungsanteile nicht vorliegen. Nur das Öl H 140 fällt ausser der Reihe und ergibt eine grössere Werkstoffabtragung als die anderen Kohlenwasserstofföle, eine Erscheinung die jedenfalls nicht hydrodynamisch bedingt sein kann, und die Gegenstand einer weiteren Untersuchung werden soll. Das Verfahren der I-G dagegen ergibt bei den reinen Kohlenwasserstoffölen einen um so kleineren Verschleiss, je größer die Zähigkeit ist. Da die Kohlenwasserstofföle hinsichtlich der Grenzflächenaktivität als gleichwertig zu betrachten sind, kann der unterschiedliche Verschleiss dieser Öle nach dem Verfahren der I-G nur hydrodynamisch erklärt werden. D.h. unter sonst gleichen mechanischen Bedingungen wird in der Versuchseinrichtung der I-G bei dem zäheren Öl ein grösserer Anteil der Belastung durch hydrodynamische Teildrucke aufgenommen als bei einem weniger zähen Öl. Dies bedeutet aber bei Schmierung mit dem zäheren Öl einen entsprechend geringeren Verschleiss.

Auch das unterschiedliche Verhalten des Esters nach den beiden Verfahren lässt sich entsprechend zwanglos erklären. Der Ester gibt nach dem Verfahren der Reichsanstalt bei reiner Grenzschmierung infolge seiner größeren Grenzflächenaktivität eine größere Werkstoffabtragung. Dies wirkt sich bei Teilschmierung in einer größeren Glättung der Gleitfläche aus, sodaß gegenüber dem Kohlenwasserstofföl H 8 trotz gleicher Zähigkeit ein grösserer Anteil der Belastung hydrodynamisch aufgenommen wird. Damit ist aber

bei dem Ester die Voraussetzung für eine Verschleissverhinderung in höherem Maße gegeben als bei dem Kohlenwasserstofföl.

Berlin-Charlottenburg, den 11.2.43
Physikalisch-Technische Reichsanstalt
Laboratorium für Schmiertechnik

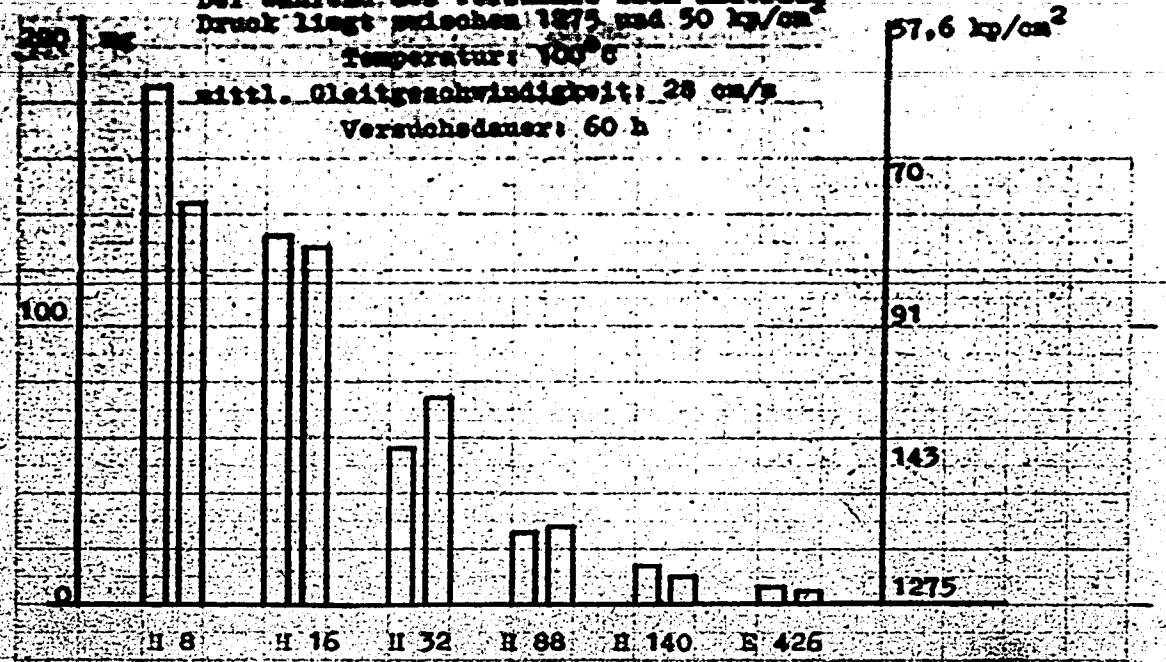
Im Auftrage

Kluge

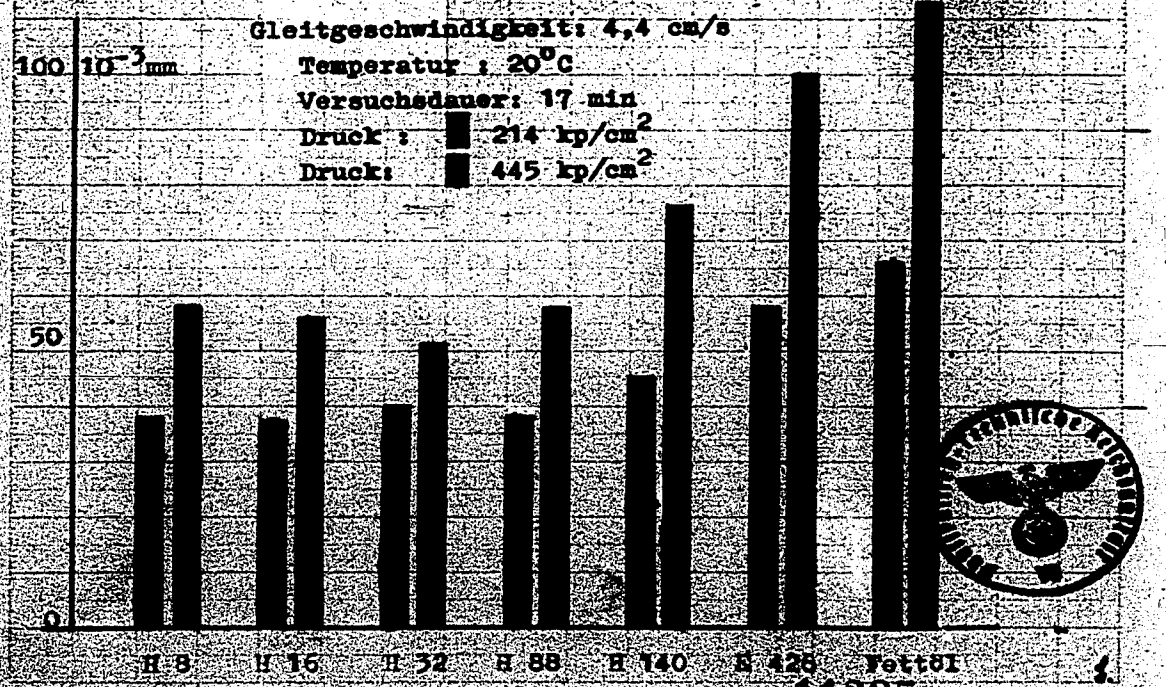
Zu diesem Bericht
gehört 1 Bild

Zum Bericht der Physikalisch-Techn. Reichsanstalt v. 11.2.1943 Bb.-Nr. 53/43 gVI-8

**Verschleiß eines kupferhaltigen Messingstiftes auf einer Stahlgleitfläche bei Schmierung mit Benzol (Verfahren der PTR)**

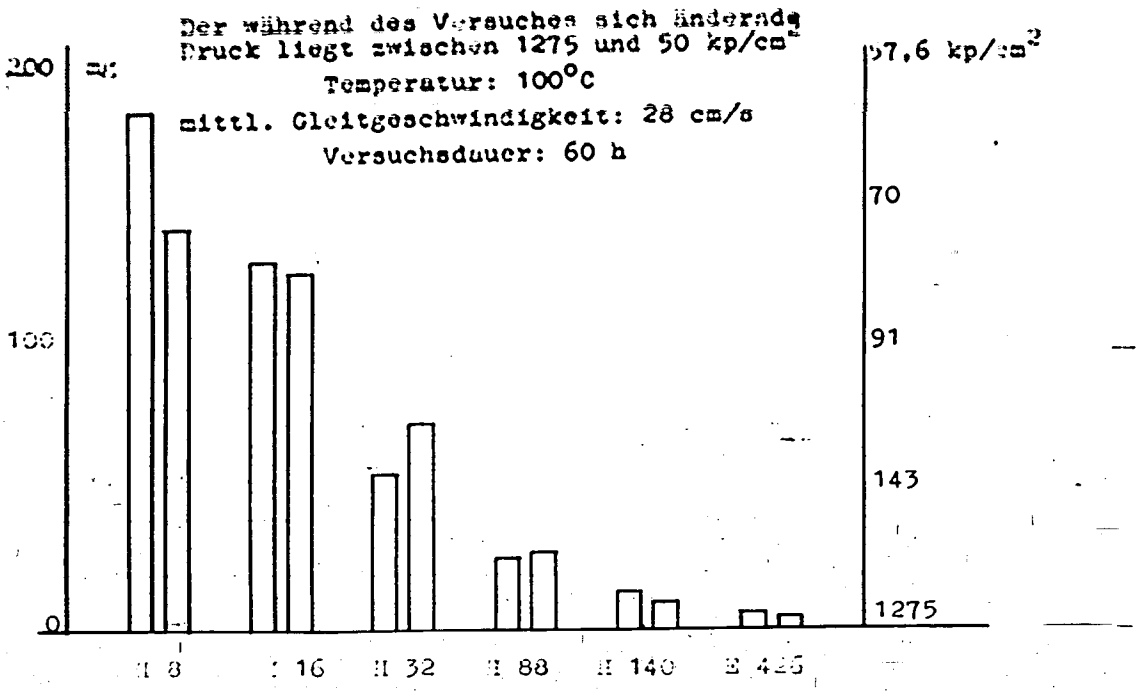



**Werkstoffabtragung eines Stahlstiftes (Stiftverkürzung) auf einer Gußeisengleitfläche bei gleichförmiger Gleitgeschwindigkeit (Verfahren der PTR)**

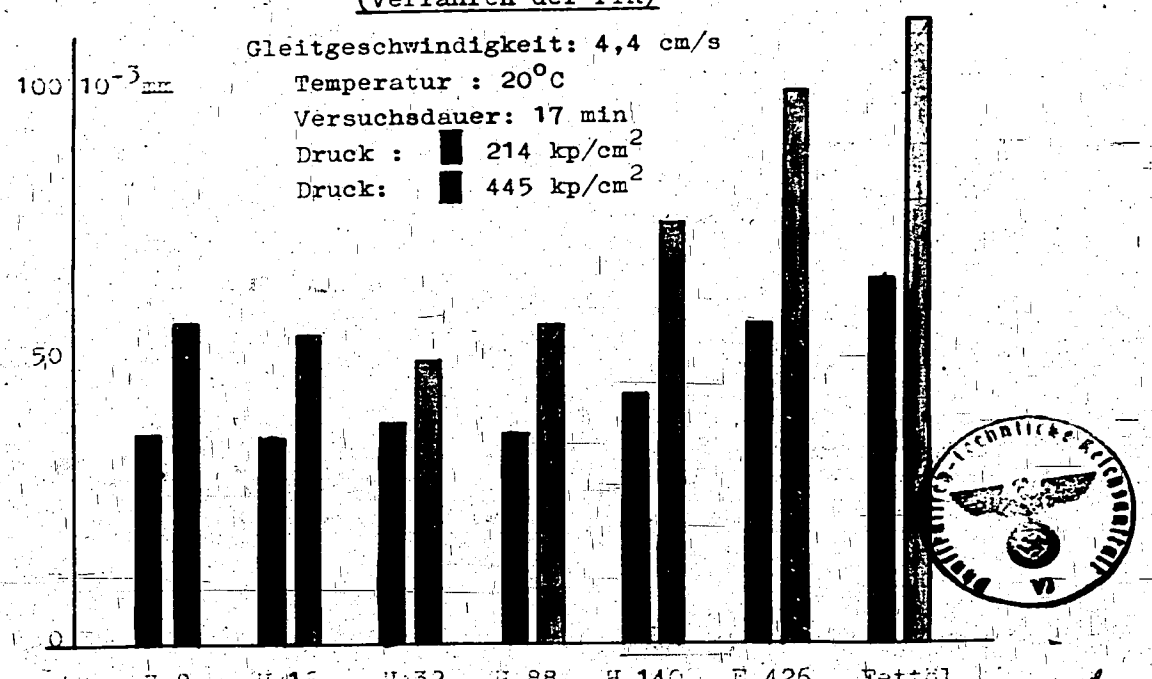


Zum Bericht der Physikalisch-Techn. Reichsanstalt v. 11.2.1943 I .-Nr. 53/43g/I-3

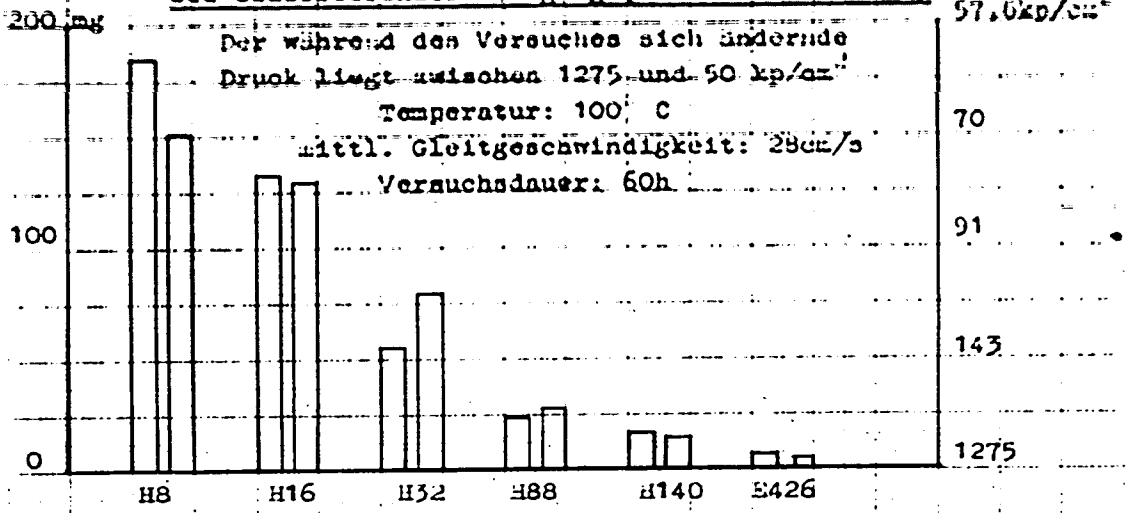
**Verschleiß eines konischen Messingstiftes auf einer Stahlgleitfläche bei oszillierender Bewegung (Verfahren der I-C)**




**Werkstoffabtragung eines Stahlstiftes (Stiftverkürzung) auf einer Gußeisengleitfläche bei gleichförmiger Gleitgeschwindigkeit (Verfahren der PTR)**

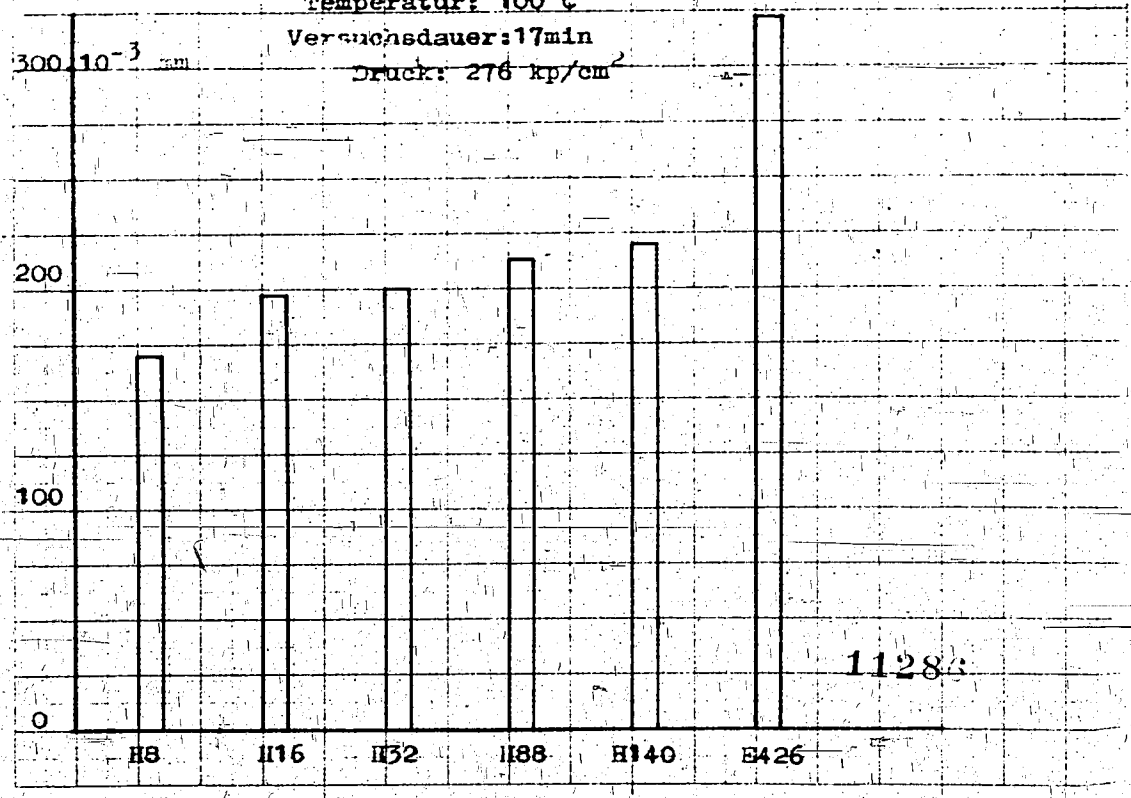


Verschleiß eines konischen Messingstiftes auf einer Stahlgleitfläche bei oszillierender Bewegung (Verfahren der I-G)




Werkstoffabtragung eines Messingstiftes (Stiftverkürzung) auf einer Stahlgleitfläche bei gleichförmiger Gleitgeschwindigkeit

Verfahren der PTR




11286