

# VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

IM NATIONALSOZIALISTISCHEN BUND DEUTSCHER TECHNIK (NSBDT)



Berlin NW7, Ingenieurhaus, Hermann-Göring-Str. 27

Drahtwort: Ingenieurverein

Fernruf: Sammelnummer 11 00 35

Deutsche Bank, Stadtzentrale Abt. A,  
Berlin W8  
Postcheck: Berlin 6535

## Herren:

Heidebroek, Bartel, Holm, Klemencic,  
Kluge, Pfender, v. Philippovich, Prandtl,  
Siebel, Stuart, Thiessen, Wolf, Zorn;  
Böhm, Bussmann, Dunken, Halder, Kadmer,  
Krienke, Morghen, Ramsauer, Vogelpohl,  
Wewerka, Winkelsträter.

RBNr. 9/0250/5293

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Unsere Zeichen

Tag

FE Kr/Kl

18. 7. 44

Betreff

## Arbeitsgruppe "Schmiertechnik", Arbeitstagung.

Mit Schreiben vom 4.7. unterrichteten wir Sie darüber, dass die seither für Graz in Aussicht genommene Schmiertagung nach Dresden verlegt werden muss. Als endgültiger Termin wird hiermit der 12. - 14. September d.J. mitgeteilt. Die Arbeitstagung findet statt  
in der Technischen Hochschule, George-Bähr-Str. 3c,

### Zeunerbau,

und beginnt am Morgen des 12.9. um 9 Uhr. Für die nachstehend aufgeführten, als gemeldet betrachteten Herren wird in Dresden eine Hotelunterkunft für die Nächte vom 11./12. bis einschliesslich 13./14. bestellt.

Dr. Bartel, Dr. Holm, Prof. Klemencic, Reg. Rat Dr. Kluge,  
Dr. Pfender, Dr. v. Philippovich, Prof. Siebel, Prof. Stuart,  
Prof. Wolf, Dr. Zorn; Prof. Bussmann, Dipl.-Ing. Böhm,  
Dr. Dunken, Dipl.-Ing. Halder, Prof. Kadmer, Dr. Krienke,  
Dr. Morghen, Dr. Ramsauer, Dr. Vogelpohl, Prof. Wewerka,  
Dipl.-Ing. Winkelsträter.

Etwaige kurzfristige Absagen müssen auf schnellstem Wege Herrn Dr.-Ing. P. Reschke, Vorsitzender des VDI-Bezirksverbandes Dresden, Dresden A 24, Junghans-Str. 72, mitgeteilt werden, der die örtliche Vorbereitung der Tagung freundlicherweise übernommen hat. (Durchschlag an die Geschäftsführung, Herrn Dipl.-Ing. Kraft, erbeten.) Einzelheiten über die Unterbringung werden Ihnen noch rechtzeitig mitgeteilt. Für diejenigen Herren, die bei der Beschaffung der neuerdings erforderlichen Reisebescheinigung Schwierigkeiten haben, werden wir auf Anforderung (spätestens 15.8.) hin eine solche besorgen.

Wir bitten, Zuschriften unter Angabe unseres Zeichens nur an den Verein, niemals an Mitglieder der Geschäftsführung zu richten.  
D.V.

07064

Wir erinnern noch einmal an unsere Bitte, durch rechtzeitiges Übersenden der Manuskripte oder mindestens ausführlicher Inhaltsangaben bis 31.7. unsere Bestrebung um höchsten Wirkungsgrad der Tagung zu unterstützen. Im Notfalle können die Vielfältigungen auch hier angefertigt werden. Herr Prof. Heidebroek hat sich vorbehalten, bei eintretendem Zeitmangel diejenigen Referate ausfallen zu lassen, die wegen des unterlassenen vorherigen Austausches weniger vorbereitet sind.

Anliegend erhalten Sie folgende Unterlagen:

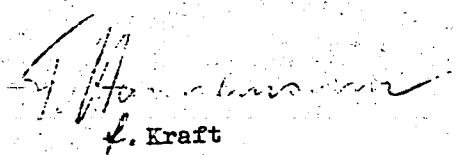
- 1.) Vertraulichen Bericht Nr. 11 der Arbeitsgruppe "Schmiertechnik" über die letzte Sitzung vom 29.2.44 in Halle,
- 2.) Stellungnahme des Herrn Dr. v. Philippovich zum Aufsatz des Herrn Prof. Heidebroek, welcher den engeren Mitarbeitern als Diskussionsgrundlage für die kommende Tagung zugegangen ist,
- 3.) Inhaltsangabe des Herrn Böhm zum Referat "Wasser-Grafit-Schmierung im Kolbenmaschinenbau".

Weitere Unterlagen werden Ihnen nach Eingang übermittelt.

Heil Hitler!

Verein deutscher Ingenieure im NSBDT  
Fachausschuss für Maschinenelemente  
Geschäftsstelle

I.V.

  
F. Kraft

3 Anlagen

*Frl. Dr. Rosig & Walter Riedel*

07065

# VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

IM NATIONALSOZIALISTISCHEN BUND DEUTSCHER TECHNIK (NSBDT)



Berlin NW7, Ingenieurhaus, Hermann-Göring-Str.27

Drahtwort: Ingenieurverein

Deutsche Bank, Stadtzentrale Abt. A, Berlin W8

Herrn

Fernruf: Sommernummer 11 00 35

Postcheck:  
Berlin 6535 nur für Mitgliedbeiträge  
Berlin 60224 sonstige Zahlungen

Dr. H. Zorn

Ammoniakwerk Morseburg G.m.b.H.

Leuna Krs. Morseburg

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Unsere Zeichen

Tag

Betreff

FE Kr/Mt

24.8.44.

### Schmieretagung Dresden 1944

In Verfolg unseres Schreibens vom 8.8. ds.Js. übersenden wir Ihnen mit heutiger Anlage 4 weitere Beiträge zur Schmieretagung in Dresden.

- 1.) Dr.-Ing. A. Bartel: "Zum Problem der Ruhereibung (II. Teil)"
- 2.) Reg.-Rat Dr.-Ing. Kluge: "Schmierung als Grenzflächenvorgang"
- 3.) Dr. Pfender: "Einfluß der Flächenpressung auf den Verschleiß bei Trocken- und Mischreibung"
- 4.) Dr. Seelich: "Zur Frage der Bekämpfung des Schäumens von Schmierölen".

Gleichzeitig reichen wir die jetzt erst fertig gewordene Abbildung zu dem Ihnen schon übersandten Referat des Herrn Dr. Morghen nach (Vierkugelgerät).

Für den Fall, daß die Vervielfältigung des Beitrages Dr. Pfender nicht rechtzeitig fertig wird, senden wir diese mit nächster Post ohne gesondertes Begleitschreiben nach.

Für Sie ist vereinbarungsgemäß ein Zimmer vorbestellt worden

#### in Hotel Europahof

für die Nächte vom 11. zum 12., vom 12. zum 13. und vom 13. zum 14. September ds. Js.

Falls nach Ihrer Ankunft in Dresden irgendeine Unklarheit auftreten sollte, haben wir die dortige Geschäftsstelle des VDI (Dr. Reschke, Frl. Silber) gebeten, zur Entlastung von Herrn Prof. Heidebroek die Auskunftserteilung bezw. Beratung zu übernehmen.

07066

- 2 -

Ihre Anschrift lautet: Dresden; Eisenstückstr. 5 (Herr Direktor Hartung), Telefon: 43 123.

Für die Abende des 12. und 13. September ist ein gemeinsames Abendessen im Dresdener Ratskeller vorgesehen.

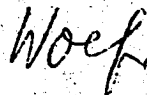
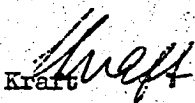
Anliegend übersenden wir Ihnen noch eine vorläufige Tagesordnung für die einzelnen Vorträge.

Heil Hitler!

Verein deutscher Ingenieure im NSBDT  
Fachausschuss für Maschinenelemente  
Geschäftsstelle

I.V.

Kraft



Anlagen: 4 Beiträge  
1 Zeichnung  
1 Tagesordnung

Verein deutscher Ingenieure im NSBDT  
 Fachausschuß für Maschinenelemente

24.8.1944.

FE Kr/Mt

### T a g e s o r d n u n g

zur Schmiertagung in Dresden vom 12.-14.9.1944

Ort der Tagung: Technische Hochschule Dresden,  
 Zeunerbau, George-Bährstr. 3c,  
 Hörsaal 16a.

#### A. 12. September 1944, 9 - 12 Uhr:

- 1.) Prof. Dr. Heidebroek.....Eröffnung
- 2.) Dr. v. Philippovich }.....Stellungnahmen
- 3.) Prof.Dr. Klemencic }.....zur Begriffsbestimmung
- 4.) Dr. Vogelwohl }.....der Schmiertechnik
- 5.) Dr. v. Philippovich: „Bericht über die Erfassung der  
 Lager-Prüfeinrichtungen“

#### 15 bis 18 Uhr: „Ruhreibung, Anlaufreibung“:

- 6.) Prof. Dr. Klemencic: „Über die Anlaufreibung in Gleitlagern“
- 7.) Dr. Kluge: „Schmierung als Grenzflächenvorgang“
- 8.) Dr. Bartel: „Zum Problem der Ruhreibung, 2. Teil“
- (9.) Dipl.-Ing. Winkelsträter: „Die Bedeutung der Ruhreibung  
 für den Elektro-Maschinenbau“

#### B. 13. September 1944, 9 - 12 Uhr: „Verschleiß“:

- 10.) Dr. Holm: „Neuere Erkenntnisse in der Verschleißfrage“
- 11.) Dr. Krienke: „Verschleißmessungen in der Vierkugelmachine  
 bei niederen Belastungen“
- 12.) Dr. Morghen: „Reibungsmessungen im DVL-Vierkugelgerät mit  
 Luftantrieb“

#### 15 bis 18 Uhr:

- 13.) Dr. Seelich: „Zur Frage der Bekämpfung des Schäumens  
 von Schmierölen“
- 14.) Dipl.-Ing. Halder: „Beobachtungen bei Verschleiß- und Rei-  
 bungsversuchen“
- 15.) Dr. Pfender: „Einfluß der Flächenpressung auf den Verschleiß  
 bei Trocken- und Mischreibung“

#### C. 14. September 1944, 9 - 12 Uhr:

- 16.) Obering. Böhm: „Praktische Bestätigungen aus dem Kolbenma-  
 schinenbau zur Grenzflächenschmierung durch  
 Wasser-Graphit-Schmierung“
- 17.) Prof. Dr. Klemencic: „Über die Tragfähigkeit des Gleitlagers  
 bei hohen Geschwindigkeiten“

#### 15 bis 18 Uhr:

- 18.) Schlußaussprache.

Änderungen vorbehalten!

*W. Hoff*

07068

# VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

IM NATIONALSOZIALISTISCHEN BUND DEUTSCHER TECHNIK (NSBDT)



Berlin-NW7, Ingenieurhaus, Hermann-Göring-Str.27

Drahtwort: Ingenieurverein

Deutsche Bank, Städtzentrale-Abt. A.  
Berlin W8

Fernruf: Sammelnummer 11 0035

Postcheck:  
Berlin 6535 nur für Mitgliedbeiträge  
Berlin 60224 sonstige Zahlungen

Herrn

Dr. H. Zorn

Ammoniakwerk Merseburg G.m.b.H.

Leuna Krs. Merseburg (10)

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Unsere Zeichen

Tag

Betreff

FE Kr/Mt

6.9.1944.

## Schmieretagung Dresden 1944

Anliegend erhalten Sie die noch ausstehenden bzw. zusätzlichen Beiträge der Herren:

Prof. Klemencic: „Vorschläge zur Benennung der Reibungsarten und Schmierzustände“

„Über die Tragfähigkeit des Gleitlagers bei hohen Geschwindigkeiten“.

Dr.-Ing. Vogelpohl: „Bemerkungen zu den Begriffsbestimmungen“

Dipl.-Ing. Winkelsträter: „Die Bedeutung der Ruhreibung für den Elektromaschinenbau“.

Gleichzeitig teilen wir Ihnen noch nachfolgend die genaue Anschrift Ihres Hotels mit:

### Hotel Europahof, Pragerstr.39.

Diejenigen Herren, welche Vorträge oder wesentliche Diskussionsbeiträge halten, werden noch einmal gebeten, ihre Unterlagen (Vorträge Diskussionsbeiträge), insbesondere auch ihre Bildunterlagen möglichst schon im Laufe der Tagung an Frau Melinat (Geschäftsführung des VDI-Fachausschusses für Maschinenelemente) auszuhändigen, oder mindestens 3 Wochen nach der Tagung an die Geschäftsführung in Berlin einzusenden, damit eine rechtzeitige Berichterstattung ermöglicht wird. Damit größere Umzeichnungsarbeiten hier vermieden werden, wären wir Ihnen für Zustellung möglichst deutlicher und nach Möglichkeit druckfähiger Bildunterlagen dankbar.

Heil Hitler!

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE IM NSBDT  
FACHAUSSCHUSS FÜR MASCHINENELEMENTE  
GESCHÄFTSTELLE

I.V.

Anlagen!

Beitrag Dr. Pfender!

*Kraft*  
Kraft

*Wopf.*

Begriffsbestimmungen der Schmier-technik

An Hand der beige-fügten Übersicht werden die Typen der Reibung in Ergänzung zu den Ausführungen von Herrn Professor Heidebroek unter molekularphysikalischen Gesichtspunkten erörtert.

Es erscheint sinnvoll, als Grundtypen der Reibung nur zwei, nämlich die flüssige Reibung und die Grenzflächenreibung zu kennzeichnen. Beide Typen sind grundsätzlich unterschieden in Bezug auf die Träger der Reibung und in Bezug auf die Abhängigkeit der Reibung von den Stoffeigenschaften. Die flüssige Reibung ist, in Übereinstimmung mit den allgemein angenommenen Festlegungen, diejenige Reibung, die in dem hydrodynamisch berechenbaren Teil der Stribeckkurve fällt und für deren molekularphysikalischen Behandlung die Untersuchung des innermolekularen Ordnungszustandes in der Flüssigkeit allein ausreichend ist.

Grundsätzlich verschieden davon ist hingegen die Grenzflächenreibung — dieser Name erscheint richtiger als Grenzreibung — da hier die Anwesenheit der festen Grenzflächen die Änderung und damit die Eigenschaften der schmierenden Schicht entscheidend bestimmen. Die viskosimetrische Zähigkeit steht nicht mehr in unmittelbarem Zusammenhang mit der Größe der Reibung. Welche stofflichen Größen dafür als kennzeichnend anzusehen sind, kann heute noch nicht gesagt werden. Fest steht aber, daß die molekularphysikalischen Kräfte an den Grenzflächen der festen Körper einerseits, andererseits aber die molekularen Kräfte in einer anders als statistisch geordneten Flüssigkeit von entscheidender Bedeutung sind.

Der Übergang von der flüssigen Reibung zur Grenzflächenreibung ist ein stetiger, so daß in einem weiteren Bereich die Reibungsgrenzflächenwirkungen zwar schon feststellbar, aber noch keineswegs allein bestimmend sind. Wegen der großen praktischen Bedeutung, die gerade in solche Fälle die Reibung und Schmierung haben, empfiehlt es sich, diese Zwischenform als flüssige Mischreibung als weiteren Typ der Reibung einzufügen, dessen nähere Bestimmung sich aus der Kennzeichnung als Zwischenstufe ergibt.

Die Grenzflächenreibung wird zweckmäßig untergliedert in eine volle Grenzflächenreibung, bei der die Trennung der festen Grenzkörper durch eine kontinuierliche Schmierschicht voll gewahrt ist und in der Trocken- oder Kontaktreibung, bei der die Grenzflächen der Festkörper unmittelbaren Kontakt haben, die Reibung also in wesentlichen Teilen als Reibung fester Körper anzusehen ist. Da dieser Zustand selten verwirklicht ist, schiebt sich zwangsläufig die Trockenmischreibung als weitere Zwischenstufe der Ordnung der Reibungstypen ein. Über das Verhältnis dieser Typen der Reibung zur Schmierung und zum Verschleiß gibt die Übersicht Hinweise.

Die ~~angesprochenen~~<sup>nen</sup> Formen der Reibung stellen typische Formen der Reibung dar. In der Praxis werden die Typen der Reibung selten in reiner Form auftreten, sodaß man es vorwiegend mit Zwischenformen der Reibung zu tun hat, die als zeitliche und örtliche Überlagerung der Grundtypen aufzufassen sind.



Anlage zum Beitrag Prof. Wolf  
zur Schmiertagung Dresden 1944

| Typen der Reibung                        | Träger der Reibung   | Schmierzustand                              |
|--|--|---|
| I. <u>Flüssige Reibung</u>               | <u>Innere Flüssigkeitsreibung ohne Grenzflächen-Einwirkung.</u>          | <u>Vollschmierung</u>                       |
| I/II. <u>Flüssige Mischreibung</u>       | Innere Flüssigkeitsreibung mit Grenzflächen-Einwirkung.                  | Flüssige Teilschmierung                     |
| II. <u>Grenzflächenreibung</u>           | <u>Reine Grenzflächenwirkung:</u>  | <u>Grenzflächenschmierung:</u>              |
| a. Volle Grenzflächenreibung             | Reibung der durch Grenzflächenkräfte geordneten Flüssigkeitsmoleküle.    | a. Reine Grenzflächenschmierung             |
| (a/b. Trockene Mischreibung)             | Zwischenstufe a/b  | (b. Trockene Teilschmierung)                |
| b. Trockene Reibung oder Kontakt-Reibung | Kontakt der festen Grenzkörper   | c. Fehlende Schmierung (u.U. Kaltschweißen) |
| <u>Zwischenformen</u>                    | Durch örtliche bzw. zeitliche Überlagerung der verschiedenen Haupttypen. |   |

Anlage zum Beitrag Prof. Wolf  
zur Schmiertagung Dresden 1944

| Typen der Reibung                        | Träger der Reibung   | Schmierzustand                              |
|--|--|---|
| I. <u>Flüssige Reibung</u>               | <u>Innere Flüssigkeitsreibung ohne Grenzflächen-Einwirkung.</u>          | <u>Vollschmierung</u>                       |
| I/II. <u>Flüssige Mischreibung</u>       | Innere Flüssigkeitsreibung <u>mit Grenzflächen-Einwirkung.</u>           | Flüssige Teil-schmierung                    |
| II. <u>Grenzflächenreibung</u>           | <u>Reine Grenzflächenwirkung:</u>  | <u>Grenzflächen-schmierung:</u>             |
| a. Volle Grenzflächenreibung             | Reibung der durch Grenzflächenkräfte geordneten Flüssigkeitsmoleküle.    | a. Reine Grenzflächen-schmierung            |
| (a/b. Trockene Mischreibung)             | Zwischenstufe a/b  | (b. Trockene Teil-schmierung)               |
| b. Trockene Reibung oder Kontakt-Reibung | Kontakt der festen Grenzkörper   | c. Fehlende Schmierung (u.U. Kaltschweißen) |
| Zwischenformen                           | Durch örtliche bzw. zeitliche Überlagerung der verschiedenen Haupttypen. |   |

Stellungnahme zum Bericht über die Beziehungen zwischen  
Schmierung und Verschleiß von Prof. Heidebroek (Mai 1944)

Was die Grenzreibung anbelangt, habe ich schon in Halle darauf hingewiesen, daß sie in reiner Form wohl nicht realisiert werden könne und deshalb der Gebrauch dieses Begriffes für praktische Schmierzustände möglichst einzuschränken, ja kraß ausgedrückt, am besten ganz zu vermeiden wäre.

Nach den Begriffsbestimmungen ist Grenzreibung jener Zustand, bei dem sich molekularmechanische Einflüsse auswirken, ohne daß die Zähigkeit eine Rolle spielt. Diese Definition ist sicher ungenügend, sodaß Heidebroek mit Recht dagegen Einwände macht; und zwar vermißt er eine Angabe darüber, welche Zähigkeit denn gemeint ist. Zähigkeit als Newtons'scher Faktor, kann sinngemäß auch nur für jenen Bereich angewendet werden, für den sie Gültigkeit hat, ob dies für die Grenzschichten zutrifft, kann derzeit nicht entschieden werden. Sonst spricht man besser von Fließverhalten oder scheinbarer Zähigkeit. Unabhängig davon ist aber der Wert der Zähigkeit oder des Fließverhaltens in der Grenzschicht nur sehr schwer zahlenmäßig zu erfassen. Deshalb war auch bei der allerersten Definition des Begriffes die Oiliness von Herschel als jene Eigenschaft gekennzeichnet, die einen Unterschied in Reibungswert zwischen zwei Schmiermitteln gibt, die bei der Temperatur des Schmierfilms gleiche Zähigkeit aufweisen. Die Abhängigkeit der Zähigkeit vom Druck wurde in die Definition wegen der Schwierigkeit, in praktischen Fällen den herrschenden Druck zu bestimmen, nicht mit einbezogen. Die Begriffsbestimmungen sollen entweder eine theoretisch eindeutige Festlegung treffen oder die Behandlung von Fragen der Praxis erleichtern. Dazu muß man dann aber auch Mittel zur Verfügung stellen, um Unterscheidungen zwischen den einzelnen Schmierzuständen vornehmen zu können. Das einzige Kennzeichen der Grenzreibung war bisher die Unabhängigkeit von der in gewöhnlicher Weise bestimmten Zähigkeit (bei der Lagertemperatur usw.). Es ist nicht undenkbar, daß weitere Mitberücksichtigung anderer Zusammenhänge immer mehr Gebiete aus dem Bereich der Grenzreibung löst und dem hydrodynamischen Bereich zuordnet, aber solange dies nicht der Fall ist, wird man den Begriff Grenzreibung noch gebrauchen und die

- 2 -

Zähigkeitsunabhängigkeit bezogen auf gleiche Schmiertemperaturen als sein Merkmal beibehalten müssen. Die Definition der Grenzreibung als innere Flüssigkeitsreibung mit Grenzflächen-Einwirkung gibt keine Möglichkeiten zur Abgrenzung gegenüber der hydrodynamischen Reibung, wenn man nicht den von der DVL vertretenen Vorschlag annimmt, einfach das verschiedene Reibungsverhalten von Flüssigkeiten gleicher Zähigkeit bei der Schmiertemperatur (allerhöchstensfalls auch bei dem Druck im Film) als Grundlage zu verwenden. Tut man das, so bleibt man aber bei den früheren Definitionen, bzw. kann dabei bleiben. Das gleiche Bedenken, daß man den Zustand nicht erfassen kann, obwohl man ihn definiert hat, gilt für die Kontaktreibung. Ich möchte deshalb die folgende Stellung zu den Vorschlägen der Neueinteilung der Begriffe nehmen:

- 1) Flüssigkeitsreibung: Der Begriff "viskosimetrische Zähigkeit" dürfte als Pleonasmus in der Besprechung des Zähigkeitseinflusses besser wegfallen.
- 2) Grenzreibung: Jener Reibungszustand, bei dem in wenigen Moleküllagen molekularmechanische Einflüsse ausgeübt werden, die Zähigkeit bei der Temperatur (gegebenenfalls auch der Druck) der Schmierstelle aber keine Rolle spielt.
- 3) Kontaktreibung: Fällt besser weg, weil sie gegen die Grenzreibung nicht abgegrenzt werden kann. Die unmittelbare Verzerrung von Oberflächenatomen durch die Schmierschicht hindurch ist sehr unwahrscheinlich; Holm hat sie ja auch nur für die verschleißlose Trockenreibung angenommen.
- 4) Mischreibung: Muß auch die Trockenreibung umfassen, und zwar entweder in der Form, daß sie zusammen mit Grenzreibung und flüssiger Reibung oder aber nur mit Grenzreibung vorkommt, je nachdem, ob man unendlich festhaftende Epilamen voraussetzt oder nicht.

Bezüglich des Verschleißes ergibt sich eine Unklarheit, weil S. 9 Flüssigkeits-, Misch- oder Grenzreibung als eine der möglichen Schmierphasen ohne Abrieb gekennzeichnet werden, sodaß der Verschleiß nur bei Kontakt- oder Trockenreibung auftreten kann. Dem steht aber die Bezeichnung der PFR-Maschine als eines Gerätes entgegen, in dem allerdings nur vorübergehend - Grenzreibung nach der ursprünglichen Definition in Reinkultur herausgearbeitet werden könne (S. 14). Die Messungen auf der Maschine weisen aber einen so hohen Verschleiß auf, daß daraus geschlossen wird, daß man es weder mit Grenzreibung noch irgendeiner anderen der vorgesehenen Schmierphasen zu tun hat.

Nach meiner Ansicht müßte man bei der Besprechung der Verschleißfrage sehr vorsichtig sein und erst einmal versuchen, den einzelnen Schmierzuständen zugehörige Verschleißerscheinungen zuzuordnen. Eine Unterteilung in Gebiete, die man nicht erkennen kann, hat keinen Zweck; so ist auch hier wieder die Grenz- und die Kontaktreibung nur schwer auseinanderzuhalten. Die Frage: Gibt es bei Grenzreibung Verschleiß oder nicht, erscheint von grundsätzlicher Bedeutung und wäre besonders zu behandeln; sie ist vor allem deshalb wichtig, weil sie von einer anderen Seite her Auskunft darüber gibt, ob die vorgeschlagenen Prüfgeräte in den Gebieten arbeiten, für die sie bestimmt sind.

Ein Faktor von wesentlichster Bedeutung ist in der ganzen Arbeit nicht besprochen: Die Temperatur, und zwar sowohl in ihrer Auswirkung auf die hydrodynamische Belastbarkeit ( S. 2) des Filmes infolge der Verringerung der Zähigkeit und die durch die Temperatur bewirkte Annäherung an die Grenzreibung als auch die durch die Temperatur erfolgende Veränderung der Oberflächen. Nach meiner Ansicht sollte für die Beurteilung der Prüfmaschinen der von mir vorgeschlagene Grundsatz der Eczugsöle beibehalten werden; die Anwendung der verschiedenen Öle ergibt dann ohne weiteres die Rolle, die Zähigkeit, physikalische und chemische Aktivität beim Schmiervorgang spielen und damit die zwar indirekt erreichte aber saubere Zuordnung von Prüfmaschine und Schmierzustand.

Die Trockenreibung sollte wohl auch noch genauer definiert werden, weil die Begriffe technisch trockene Reibung und Epilamenreibung auch nur sehr schwer voneinander getrennt werden können.

Berlin-Adlershof, den 23. Juni 1944.

gez. Dr. v. Philippovich

## V o r s c h l ä g e

## zur Benennung der Reibungsarten und Schmierzustände

Die verschiedenen Typen der Reibung und Schmierung hat Herr Prof. Dr. Wolf in seinem Beitrag zur Schmier-technischen Tagung Dresden 1944 klar und eindeutig gekennzeichnet, so daß sich eine Ergänzung hierzu erübrigt. Diese Kennzeichnungen sind deshalb in so befriedigendem Maße zutreffend, weil sie vom Vorstellungsbild über den molekularen Aufbau der Schmierschichten ausgehen und danach die möglichen Reibungsarten und Schmierzustände herausgeschält werden. Lediglich die bisher versuchten Benennungen scheinen noch nicht durchweg zutreffend und für sich verständlich genug zu sein, und deshalb werden die folgenden, nach eingehenden Überlegungen aufgestellten Begriffsfestlegungen und Benennungen zur Stellungnahme vorgelegt bzw. zur Annahme vorgeschlagen.

Eine baldige Einigung wäre im Hinblick auf die gegenwärtige Vielfalt von Ausdrücken und Namen für die Begriffe der Schmier-technik nicht nur außerordentlich wohltuend, sondern auch der Weiterentwicklung förderlich. Denn klare Begriffe gehören zur Grundlage eines jeden wissenschaftlichen Fortschrittes.

## G r u n d b e g r i f f e

R e i b u n g ist eine Naturerscheinung, die sich dadurch äußert, daß bei der Einleitung oder Aufrechterhaltung einer gegenseitigen Gleitbewegung zweier Körper ein Widerstand zu überwinden ist, der nicht von Trägheitskräften herrührt. Häufig wird dieser Widerstand selbst als Reibung bezeichnet. Wo es jedoch die Klarheit erfordert, ist zwischen der Reibung als Erscheinung und der Reibungskraft als dem Bewegungswiderstand zu unterscheiden.

Bemerkung: Es sind Zweifel darüber geäußert worden, ob der bei der Einleitung einer Gleitbewegung zu überwindende Widerstand auch als Reibung bezeichnet werden soll oder ob diese Bezeichnung nur dem Bewegungswiderstand bei Vorhandensein einer Gleitgeschwindigkeit gebührt.

Bei Begriffsfestlegungen soll nie das Quantitative, sondern nur das qualitative maßgebend sein. Die Größe der Gleitgeschwindigkeit muß deshalb auch bei einer Begriffsfestlegung für die Reibung belanglos sein und deshalb muß der Bewegungswiderstand, auch dann, wenn die Gleitgeschwindigkeit gleich null ist, als Reibungskraft bezeichnet werden.

Je nach dem Bewegungszustand unterscheidet man Remnach Anlaufreibung und Gleitreibung.

Die gleiche physikalische Bedeutung wie Anlaufreibung haben die Bezeichnungen Reibung der Ruhe, statische Reibung, Haftreibung. Sie sind jedoch teils unständlicher und weniger anschaulich, teils aus dem fremdsprachigen Schrifttum übernommen; der Begriff „haften“ wiederum wird in Verbindung mit anderen physikalischen Erscheinungen gebraucht, so daß auch gegen seine Verwendung Bedenken erhoben wurden. Deshalb ist die Bezeichnung Anlaufreibung vorzuziehen, durch die gleichzeitig auch ausgedrückt wird, wie sich die Reibungserscheinung äußert und wie sie gemessen werden kann.

Schmierung ist eine Maßnahme, die das Herabsetzen von Reibungswiderständen und Stoffverlusten der Gleitkörper beim Reibungsvorgang durch Einbringen eines Schmierstoffes zwischen die Gleitflächen bezweckt.

Bleibt beim Schmiervorgang der chemische Aufbau der Gleitkörper und des Schmierstoffes unverändert, dann liegt rein mechanische Schmierung vor. Spielen sich jedoch beim Schmiervorgang auch chemische Vorgänge ab, ändert sich also der chemische Aufbau der beteiligten Stoffe, dann spricht man von chemischer Schmierung.

Bemerkung: Bei einer früheren Begriffsfestlegung wird als Zweck der Schmierung das Herabsetzen von "Energie- und Stoffverlusten" angegeben. Energie ist Kraft mal Weg, oder Kraft mal Geschwindigkeit (je nachdem ob eine Arbeit oder eine Leistung damit gemeint wird). Da nun durch Schmierung weder ein Weg noch eine Geschwindigkeit vermindert werden soll, sondern nur der Bewegungswiderstand, wird in der Begriffsfestlegung besser vom Herabsetzen von Reibungswiderständen und nicht von Energieverlusten gesprochen.

- 3 -

### Typen (Arten) der Reibung

Man unterscheidet zwei Hauptarten der Reibung:

- I) Die innere Reibung oder hydrodynamische Reibung, die im Innern einer Flüssigkeit zwischen den Flüssigkeitsmolekülen auftritt, und
- II) die äußere Reibung, die an der gemeinsamen Grenzfläche zweier Körper auftritt und daher auch Grenzflächenreibung genannt wird. Dabei gibt es nun zwei Möglichkeiten:

- a) Handelt es sich um völlig trockene Grenzflächen zweier fester Körper, dann wird diese Grenzflächenreibung als Trockenreibung gekennzeichnet; d.h. von fremden Stoffen frei
- b) wird die Grenzfläche von einer am festen Körper sitzenden, mindestens (gewöhnlich) monomolekularen Flüssigkeitsschicht oder Gas-schicht, der Grenzschicht, gebildet, dann soll diese Art der Grenzflächenreibung genauer als Grenzschichtreibung ist ver-  
bezeichnet werden. geben, muß
- Für diese Reibungsart wird auch die Bezeichnung Epilamen-  
reibung gebraucht. Dieses Fremdwort kann aber entlehrt werden, da überdies der Ausdruck nur für kettenförmige Moleküle paßt, die sich senkrecht zur Gleitfläche anordnen (wie die Haare einer Bürste), während eine mit scheibenförmigen Molekülen besetzte Grenzfläche nicht mehr gut mit einem Epilamen verglichen werden kann. (durch einen  
anderen  
Ausdruck  
ersetzt  
werden

#### Mischformen

Bei einem Gleitvorgang können nun verschiedene Reibungsarten nebeneinander auftreten, so daß sich ihre Erscheinungen überlagern. Man kann folgende Möglichkeiten unterscheiden (siehe auch die beigegebene Skizze):

- I, IIb) Liegt teils hydrodynamische Reibung, teils Grenzschichtreibung vor, gibt es also nirgends, ungeschmierte Gleitstellen, dann heißt diese Reibungsart (gemischte Schmierreibung). Flüssigkeitsmisch-  
reibung
- III, IIb) Die Zusammensetzung der beiden Arten von Grenzflächenreibung wird (Grenzflächenmischreibung gemischte Grenzflächenreibung) genannt. Man kann sie auch kurz bloß Grenzflächenreibung nennen. Hydrodynamische Reibung fehlt dabei gänzlich. Dieser Fall ist daher in verlässlicher Form nur beim Anlauf verwirklicht, denn nur wenn die Gleitgeschwindigkeit null ist, ist jede Art von Flüssigkeitsreibung vermieden.



- 4 -

I/IIa/IIb) Beim gleichzeitigen Auftreten aller Reibungsarten spricht man einfach von gemischter Reibung. *Prodraktion*

Bemerkung: Als Kennzeichen hydrodynamischer Reibung kann, dem Namen entsprechend, das Gebundensein an eine Schmierstoffströmung, also an eine gegenseitige Bewegung der Flüssigkeitsteilchen angesehen werden. Die hydrodynamische Reibung muß null werden, wenn das Geschwindigkeitsgefälle null wird. Diese Abhängigkeit kann durch den Newton'schen Ansatz für den Reibungswiderstand  $\tau$  je Flächeneinheit ausgedrückt werden:

$$\tau = -\eta (\dot{\gamma}, p, \dots) \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

$\frac{\Delta u}{\Delta y}$  ist das Geschwindigkeitsgefälle. Der Proportionalitätsfaktor  $\eta$ , d. i. die Zähigkeit, ist nicht nur eine Funktion der Temperatur, des Druckes und vielleicht noch weiterer Größen (z. B. des Geschwindigkeitsgefälles), sondern ist auch von molekularem Ordnungszustand abhängig. Bei freier Strömung richten sich längliche Flüssigkeitsmoleküle in der Strömungsrichtung aus. An den Grenzflächen jedoch wird die Ausrichtung durch die Grenzflächenkräfte bestimmt. Diese bewirken bekanntlich, daß sich kettenartige Moleküle senkrecht zur Grenzfläche und damit auch senkrecht zur Strömungsrichtung ausrichten. Daß die innere Reibung bei einer senkrecht zur Kettenlänge erzwungenen Strömung größer sein muß als bei freier Strömung, ist wohl einleuchtend. Für eine Messung dieser Zähigkeit senkrecht zur Moleküllänge sind allerdings derzeit weder Verfahren noch Geräte bekannt. Daß eine solche „Querzähigkeit“, die also wesentlich größer sein muß, als die normale „Längszähigkeit“, vorhanden ist, dafür gibt es genug Anzeichen.

Da der Ordnungszustand an der Grenzfläche allmählich in den laminaren Ordnungszustand der freien Strömung übergeht, wird es auch einen allmählichen Übergang von der großen „Querzähigkeit“ zur geringeren Längszähigkeit geben, so daß die in der Übergangszone herrschende „örtliche Zähigkeit“ jeden Wert zwischen den beiden erwähnten Grenzwerten annehmen kann. Wenngleich die als innere Reibung oder Zähigkeit bezeichnete Eigenschaft ihrer Größe nach in den Grenzonen zumindest bisher nicht erfassbar erscheint, so ist für sie jedenfalls kennzeichnend, daß der Bewegungswiderstand mit dem Geschwindigkeitsgefälle null wird, also dem obengenannten Newtonschen Ansatz in allgemeiner Form genügt. Man muß folglich auch den Reibungswiderstand, der bei einer nur wenige Moleküllagen starken Schmierstoffströmung auftritt, als hydrodynamische Reibung bezeichnen, sofern dieser Widerstand dem angeführten Gesetz gehorcht. Die Größe der Zähigkeit, und ob sie gegenwärtig viskosimetrisch erfaßt werden kann, ist dabei belanglos, denn wiederum kann für die Begriffsabgrenzung nur das Qualitative, nicht aber das Quantitative bestimmend sein.

## S c h m i e r u n g s z u s t ä n d e

---

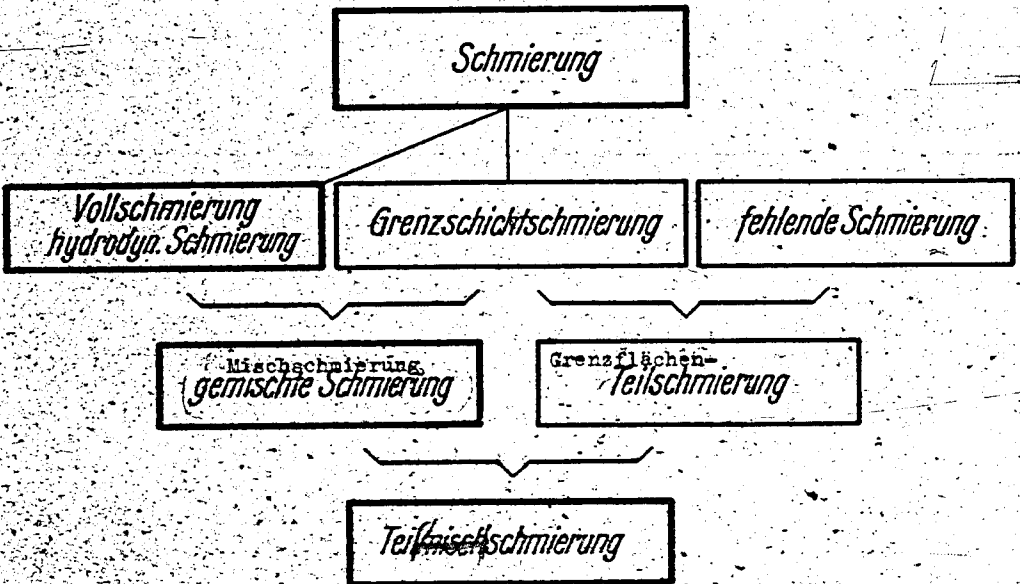
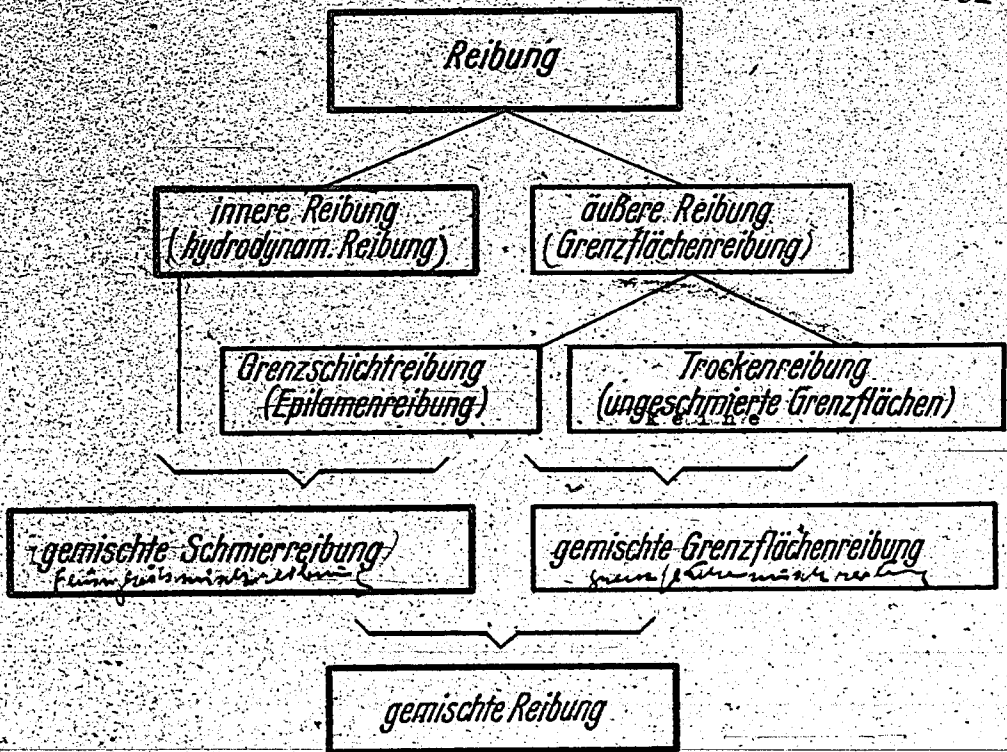
Den beiden Hauptarten der Reibung entsprechend (gibt es auch zwei) Hauptarten der Schmierung: *folgende*

- I) Die Vollschmierung oder hydrodynamische Schmierung, bei der jede Grenzflächenreibung und jeder Verschleiß ausgeschaltet ist und die daher den idealen Schmierungszustand darstellt.
- II) Da die Grenzschichtreibung in sehr wesentlichem Maße von der Art des verwendeten Schmierstoffes beeinflusst wird, ist die zweite Art der Schmierung die Grenzflächenschmierung.
- III) Als dritter Fall ist der völlige Mangel an Schmierung aufzuzählen.

Beim Schmiervorgang können zwei oder drei dieser Hauptfälle gemeinsam auftreten und in ihrer Auswirkung sich überlagern. Es sind folgende Zusammensetzungen möglich:

- I/II) Gemischte Schmierung, bei der an keiner Stelle Trockenreibung herrscht.
- II/III) Teilschmierung, bei der Teile der Gleitflächen völlig ungeschmiert sind und an allen anderen Stellen hydrodynamische Schmierung gänzlich fehlt. Es ist dies also ein Fall, der in reiner Form nur im Ruhezustand auftreten kann.
- I, II/III) Teilmischschmierung, dadurch gekennzeichnet, daß nur an einem Teil der Gleitflächen gemischte Schmierung herrscht, die anderen Teile dagegen völlig ungeschmiert sind.

Auf der beigegebenen Stammtafel der Reibungsarten und Schmierungszustände sind die in der praktischen Schmierertechnik in der Regel vorkommenden Fälle doppelt eingezeichnet.



## Bemerkungen zu den Begriffsbestimmungen

Dem von Herrn Professor Wolf gegebenen Beitrag "Begriffsbestimmungen der Schmier-technik" liegt ein Bild vom Schmiervorgang zugrunde, das gewisse Unklarheiten und Irrtümer zuläßt. Unter der kurzen Fassung der Begriffe darf die Klarheit und Eindeutigkeit des mit dem Ausdruck verbundenen Gedankens nicht leiden.

Unabhängig von der Reihenfolge führe ich aus:

- 1.) Viskosimetrische Zähigkeit ist ein bisher nicht festgelegter Begriff. Abgesehen von dem von Herrn Dr. von Philippovich betonten Pleonasmus wird jeder Unbefangene darunter "die mit einem Viskosimeter gemessene Zähigkeit" verstehen. Kapillarviskosimeter (Engler, Vogel-Ossag, Ubbelohde) messen die kinematische, Rotations- und Kugelfallviskosimeter die dynamische Zähigkeit. Die praktische Schmier-technik rechnet immer noch nach Engler-Graden, wird also die kinematische Zähigkeit  $\nu$  in Stok oder  $m^2/s$  darunter verstehen. Für die Reibung maßgebend ist aber  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$  in Poisen oder  $kg \cdot s/m^2$  also neben der "viskosimetrischen" Zähigkeit auch noch die Dichte  $\rho$ .

Die hydrodynamische Theorie der Schmiermittelreibung betrachtet die Zähigkeit im Ölband von Volumelement zu Volumelement veränderlich, auf welche Weise die Veränderlichkeit erfolgt, ist gleichgültig, auch wenn sie durch Grenzflächenkräfte bedingt ist. Die Theorie vernachlässigt ebenfalls nicht den Einfluß der Erwärmung durch innere Reibung. Damit sind im Fall der Vollschrnierung noch die spezifischen Wärmen und die Wärmeleitfähigkeiten des Schmiermittels und der begrenzenden festen Wände und die Wärmeabfuhrbedingungen der Lagerung als Ganzes für die Größe der Reibung mit von Bedeutung.

- 2.) Bei der Typ II soll die Reibung durch reine Grenzflächenreibung verursacht werden. Gegen diese von HARDY stammende Auffassung lassen sich sehr ernste Bedenken nicht vermeiden.  
Die
- 3.)/von den Normaldrücken herrührenden inneren Spannungen aus elastischen und plastischen Verformungen der Oberflächen sowie Kräfte für das Heraustrennen von Teilchen beim Verschleiß werden als Träger der Reibung nicht mit in Betracht gezogen, obwohl sie vorhanden und sogar in Wirklichkeit die Ursachen der Reibung sind, wenn größere Schmiermittelmengen fehlen.
- 4.) Angaben wie: "Dafür Eigenschaften der Schmiermittelschicht und der festen Werkstoffe sollten ~~bestanden~~ unterbleiben, wenn nicht eine einzige von den in Betracht kommenden Eigenschaften genannt wird. Vorlagen zu Begriffsbestimmungen sollten derartig unvollkommene Angaben nicht enthalten.

- 5.) Was ist unter Kohäsionskräften zwischen den festen Grenzkörpern zu verstehen? Als Kohäsion bezeichnet man die inneren Kräfte, die den Zusammenhang der Moleküle eines Körpers bewirken. Gemeint sind hier wohl Adhäsionskräfte. Sie werden beim Fressen beobachtet, sind also für den Reibungsvorgang im Betrieb einer Maschine ohne Belang. Kohäsionskräfte äußern sich in gleicher Weise wie im zweiten Absatz unter Ziffer 3 erwähnt.
- 6.) Für die links vom Reibungsminimum der Stribeck-Kurve mit abnehmender Drehzahl (bzw.  $\eta_w/\dot{p}$ ) ansteigenden Werte der Reibungszahlen  $\mu$  bemerkt Herr Wolf, es sei eine "unmittelbare physikalische Zuordnung nicht mehr möglich und sinnvoll". Das ist eine völlig unverständliche Behauptung, denn die hydrodynamische Theorie erfaßt auch diesen Ast der Stribeck-Kurve nicht nur dem Wesen nach, sondern auch in erster Näherung zahlenmäßig richtig. Da diese Überlegungen trotz ihrer Einfachheit weitesten Kreisen unbekannt zu sein scheinen, werden sie als Anlage in kurzer Fassung mitgeteilt. Diese Bemerkung ist sachlich unbegründet und lenkt die Forschung in unfruchtbare Bahnen.

## Anlage

### Der Verlauf der Reibungszahl im Gebiet der Mischreibung nach der hydrodynamischen Theorie

Die hydrodynamische Theorie der Schmiermittelreibung wird als geeignet angesehen, für mittlere Geschwindigkeiten und mittlere Belastungen über den Verlauf der Reibungszahl zutreffende Aussagen zu machen. Für hohe Gleitgeschwindigkeiten wurde diese Sigmung zeitweise bezweifelt (Versuche der General Electric Co., Mitteilung von Duffing 1928), doch sind Stimmen in dieser Richtung nicht wieder laut geworden. Dagegen ist man sich vielfach einig darüber, daß die hydrodynamische Theorie bei geringen Gleitgeschwindigkeiten und schweren Belastungen nicht anwendbar sei. Maßgebend ist für das, was schwer oder leicht, langsame oder schnelle Bewegung bedeutet, nicht der betreffende Wert selbst, sondern beim Zapfenlager die Ähnlichkeitsgröße

$\omega \sqrt{p}$ ,  $\eta$  = dynamische Zähigkeit in  $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,  $\omega$  = Winkelgeschwindigkeit in  $\text{sec}^{-1}$  und  $\bar{p} = P/B \cdot D$  = mittlerer Flächendruck in  $\text{kg}/\text{m}^2$ , wenn P die Gesamtlast in kg, B die achsiale Breite der Gleitfläche in m und  $D = 2r$  den Wollendurchmesser in m bezeichnet. Die Kenngröße  $\eta \omega \sqrt{p}$  wird auch Gümbelsche Zahl genannt.

Betrachtet wird von der Stribeck-Kurve, die die Reibungszahl  $\mu$  als Funktion von  $\eta \omega \sqrt{p}$  wiedergibt, der links von Minimum liegende Ast, der von dem Wert  $\mu_0$ , der Reibungszahl in der Ruhe mit guter Näherung linear bis in die Nähe des Minimums abfällt, wie es viele Versuche zeigen.

Links von Minimum im Gebiet der Mischreibung wird nicht mehr die gesamte Last P von Flüssigkeitsdrücken getragen, sondern nur der Anteil  $P_{fl}$ , während der Rest  $P_{\text{nicht fl}}$  irgendwie von den festen Flächen aufgenommen wird. Wie das geschieht, ist für diese Betrachtung ohne Belang, Tatsache ist nur folgendes: Wenn ohne oder nur mit ganz geringen Schmiermittelmengen gefahren wird, so bleibt unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit die Reibungszahl konstant (Versuche von Willi Büche bis zu 5 m/s), und zwar nahezu gleich der der Ruhereibung  $\mu_0$ . Wir dürfen daher annehmen, daß von dem nicht von Flüssigkeitsdrücken getragenen Lastanteil ein Reibungswiderstand

$$W_{\text{nicht fl}} = \mu_0 P_{\text{nicht fl}} = \mu_0 (P - P_{fl}) \quad (1)$$

herrührt. Die Schubspannungen in der Flüssigkeit verursachen ebenfalls einen Anteil  $W_{fl}$ , so daß der Gesamtwiderstand bei Mischreibung

$$W_{\text{misch}} = W_{fl} + W_{\text{nicht fl}}$$

ist. Durch  $P$  dividiert folgt die Reibungszahl

$$\mu_{\text{misch}} = \frac{1}{P} \mu_0 (P - P_{fl}) + W_{fl} = \mu_0 - \frac{1}{P} (\mu_0 P_{fl} - W_{fl}) \quad (2)$$

Die Betrachtung werde jetzt auf den Lagerzapfen vom Halbmesser  $r$  und der Achsausdehnung  $B$  beschränkt. Es bezeichne  $\lambda = s/r$  das relative,  $s$  das radiale Lagerspiel und  $h_0$  die geringste Schmier-schichtdicke. Mit guter Näherung kann für kleine  $h_0$ , also auch wenn Zapf- und Schale sich schon mit den Rauigkeitsspitzen berühren, der Verlauf der Schmier-spalthöhe  $h$  als parabolisch verändert angesehen werden. Für  $P_{fl}$  und  $W_{fl}$  liefern dann die Gleichungen 157, 158 und 163 im Gümbel-Everling auf S. 116/117

$$P_{fl} = 2,33 \frac{\mu_0 r^2}{h_0} \cdot b \quad \text{und} \quad W_{fl} = 4,5 \mu_0 r b \sqrt{\frac{r}{h_0}}$$

Setzt man das in Gl. 2 ein, so folgt

$$\mu_{\text{misch}} = \mu_0 - \frac{2,33 \mu_0 B}{P} \left( \frac{2,33 \mu_0 r}{h_0} - 4,5 \sqrt{\frac{r}{h_0}} \right)$$

oder

$$\mu_{\text{misch}} = \mu_0 - \frac{2,33 \mu_0 B}{P} \cdot r \left( \frac{1,16 \mu_0}{h_0} - \frac{2,25}{\sqrt{r h_0}} \right) \quad (3)$$

In der Klammer stehen Werte, die konstant oder in erster Näherung konstant sind, wie  $\mu_0$  und  $h_0$ . Die geringste Schmier-schichtstärke  $h_0$  hängt von der Rauigkeit der Flächen ab und ist von einem gewissen Wert von  $P_{\text{nicht fl}}$  an erst nahezu unveränderlich, nämlich wenn die festen Flächen sich bis zu einem solchen Betrag genähert haben, daß die elastischen Formänderungen die Spaltweite bestimmen und nicht mehr die Drücke in der Schmierflüssigkeit.

Der Schnittpunkt der durch Gl. 3 gegebenen Kurve mit der für eine Fließreibung in der Nähe des Reibungsminimums

$$\mu_{fl} = \text{konst} \quad (4)$$

gibt den Wert des Minimums. Allerdings etwas zu klein, da  $h_0$  in diesem Bereich sich wegen des aufschwimmenden Zapfens zu vergrößern beginnt und einen allmählichen Übergang der  $\mu$ -Kurve von Gl. 3 nach Gl. 4 liefert. Eine entsprechend vertiefte Betrachtung der hydro-

dynamischen Theorie wird auch diese Zusammenhänge verfolgen lassen. Die zahlenmäßige Überprüfung der Gl. 3 hat Gumbel auf S. 181/182 seines Buches vorgenommen, soweit es an Hand der damals vorliegenden Versuche möglich war. Da die Schmierforschung der letzten zwei Jahrzehnte diese Überlegungen völlig ignorierte, sind auch keine weiteren Versuche mehr in dieser Richtung ausgewertet worden.

Gl. 3 und 4 zeigen auch die nur wenig verstandene Tatsache, daß ein zähes Öl rechts vom Minimum die Reibung vergrößert und links vom Minimum verkleinert.

Die hydrodynamische Theorie gestattet also, den gesamten Verlauf der Stribeck-Kurve in physikalisch einwandfreier Weise und zahlenmäßig hinreichend genau zu verfolgen.

Eine weitere Näherung wurde vom Verfasser 1936 gegeben<sup>4)</sup>, wenn die Erwärmung und die damit zusammenhängende Abnahme der Tragfähigkeit der Schmierschicht mit in Betracht gezogen wird. Öle mit "gleicher Zähigkeit" können danach verschiedenen Verlauf der Reibungszahl je nach der Verschiedenheit der thermischen Eigenschaften zeigen.

Damit ist aber noch längst nicht das abgeschlossen, was die hydrodynamische Theorie zur Frage der Mischreibung zu sagen hat.

<sup>4)</sup> Hydrodynamische Theorie und halbflüssige Reibung, Öl und Kohle  
Bd. 12 (1936) S. 943/946.



Schmierung als Grenzflächenvorgang

Unter bestimmten Voraussetzungen (kleine Gleitgeschwindigkeit, große Last) läßt sich ein Schmierzustand herstellen, bei dem die Reibung meßbar nicht mehr durch die Zähigkeit (als Kontinuumseigenschaft) beeinflußt wird. Es herrscht die Wirkung der Grenzflächenkräfte zwischen dem Werkstoff und Schmierstoff vor, die Schmierung ist dann ein Grenzflächenvorgang. Es wurde schon bei früherer Gelegenheit mitgeteilt, daß sich unter solchen Voraussetzungen die Konstitutionsmerkmale eines Schmiermittels gesetzmäßig in der Reibung und in der Werkstoffabtragung äußern, z.B. Einfluß der Kettenlänge und endständigen Gruppe des Schmiermittelmoleküls auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibung und auf die Werkstoffabtragung. Hierbei müssen allerdings zunächst Schmierstoffe von der Betrachtung ausgeschlossen werden, bei denen eine chemische Veränderung der metallischen Gleitfläche eintritt (wie z.B. bei druckfesten Zusätzen). Es wurde weiterhin schon gezeigt, daß die Temperatur als Einflußgröße bei Grenzschmierungs-Untersuchungen wesentlich wichtiger ist als die Last, da sie den Ordnungszustand der adsorbierten Schmiermittelschicht beeinflußt, während der für die Beanspruchung der adsorbierten Schicht maßgebende wirkliche Druck nach Holm nahezu von der Last unabhängig ist. Die Erkenntnisse über den Temperatureinfluß wurden bei weiteren Vergleichs-Untersuchungen verschiedener gesättigter Fettsäuren bestätigt. Es besteht offenbar ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen der Haftfestigkeit der adsorbierten Schmiermittelschicht einerseits und der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibung sowie der Werkstoffabtragung bei Grenzschmierung andererseits. Bei ergänzenden Untersuchungen an verschiedenen Estern (Dr. Zorn) konnte festgestellt werden, wie sich die Säure- oder Alkoholkomponente des Esters auf sein Grenzschmierungsverhalten auswirkt. Ähnliche Untersuchungen wurden über den Einfluß anderer Konstitutionsmerkmale, wie Doppelbindung und Isomerie durchgeführt.

Vorstehende Erkenntnisse ergeben zusammen mit dem Ordnungszustand der Schmiermittelschicht die Möglichkeit, aus dem jeweiligen Aufbau des Schmiermittelmoleküls auf das zu erwartende Reibungsverhalten bei Grenzschmierung zu schließen.

Noch vielmehr als bisher muß jedoch der Werkstoff mitbeachtet werden. Messungen mit chemisch einheitlichen Stoffen bestimmten Aufbaues an verschiedenen Metallen zeigen, daß sich die Konstitutionsmerkmale bei der Untersuchung der einzelnen Metalle grundsätzlich verschieden auswirken. Offenbar wird der Ordnungszustand der adsorbierten Schmiermittelschicht durch den Gitter- und Gefügebau des Werkstoffes sehr unterschiedlich beeinflusst. Eine optimale Haftfestigkeit dürfte entscheidend davon abhängen, in welchem meßbaren Verhältnis der adsorbierten Schmiermittelschicht und die Gitterkonstante des Metalls stehen. Die Existenz eines Randfeldes führt außerdem zwanglos zu einer Erklärungsmöglichkeit über den Gefügeeinfluß von Metall-Legierungen. Die neueren Untersuchungen der Reichsanstalt berücksichtigen diese Fragen, Meßergebnisse liegen jedoch noch nicht vor.

Wie eingangs gesagt, gelten die vorstehenden Überlegungen zunächst nur für Schmierstoffe, die keine chemischen Veränderungen der metallischen Gleitfläche ergeben. Sie haben jedoch auch für die sogenannten druckfesten Zusatzstoffe Bedeutung, da man von ihnen zusätzlich eine gewisse Grenzflächenaktivität verlangt. Sie sollen sich möglichst schnell an der durch Abrieb frisch erzeugten Metallfläche anreichern, um dort z.B. die gewünschte Sulfid- oder Phosphidschicht zu erzeugen. Druckfeste Zusatzstoffe mit großer Grenzflächenaktivität dürften die geforderte Wirkung bereits bei kleinsten Konzentration ergeben. Es ist zu überprüfen, ob die unterschiedliche Grenzflächenaktivität druckfester Zusatzstoffe in ähnlich gesetzmäßiger Weise zum Ausdruck kommt, wie dies oben geschildert wurde.

Zum Problem der Ruhereibung (2. Teil)

Anlaufreibung, bei verschiedenen Temperaturen gemessen, gibt in Form gut reproduzierbarer Größen den Grenzwert aller im Lager vorkommenden Reibungswerte an und deutet auf einen stark wechselnden Verlauf des Kräftespiels zwischen Werkstoff und Öl im Bereiche außerordentlich dünner Schmiermittelschichten hin. Daher wird Anlaufreibung über einen großen Temperaturbereich gemessen, und zwar bis zur beginnenden Verdampfung des Schmierstoffes (250°).

Veränderungen der Adhäsion zwischen den gleitenden, geschmierten Metallen durch beginnende Schmierstoffalterung oder Zersetzung machen sich u.a. schon im Gebiete der gemischten Reibung bemerkbar. Sehr deutlich sichtbar aber werden Veränderungen im Gebiete sehr kleiner Gleitgeschwindigkeiten, am KWI-Versuchsstand beim Anlauf beobachtet und meßtechnisch ausgewertet ( $v = 1/40\ 000\ \text{mm/sek}$ ). Darüber hinaus wird die Anlaufreibung entscheidend beeinflusst durch das "Stick-slip"-Verhalten der Kombination Welle-Schmierstoff-Lagermetall. Dieses Stick-slip-Verhalten ist wahrscheinlich in geringerem Maße eine Folge der Oberflächenrauigkeit und der Dämpfung, sondern mehr eine Folge der Oberflächenbeanspruchung der Metalle auf Scheerung durch den zwischengelagerten zweidimensionalen, quasikristallinen Schmierstoff-Film hindurch, wobei Haftung der Metalle sehr plötzlich und in großen Bereichen entsteht (ähnlich dem Heidebroek'chen "Kontakt"); eine Eigenschaft, die erhalten bleibt trotz größter Dämpfung der Meßorgane. Die sehr großen Scheerbeanspruchungen beim Anlauf (bei der Loslösung der Welle vom Lager) führen allmählich neben einer Überbeanspruchung der Oberflächenpartien zu feinsten Risbildung, ja sogar zu Fließerscheinungen an der Oberfläche der Lagerschale; sie sind dadurch unmittelbar in Zusammenhang mit einer späteren Entstehung groben Verschleißes und Fressens zu setzen. Letztere Eigenschaft der Werkstoffpaarung, d.h. die Neigung zur Legierungsbildung, wird durch die Art des Schmiermittels verschiedenartig beeinflusst, so, daß in einem Falle das Lagermetall, im anderen Falle die Welle angegriffen werden kann. Da die Probleme der Reibung geschmierter Oberflächen auch bei sehr kleinen Gleitgeschwindigkeiten mit der Verschleißfrage zusammenhängen, können diese nur dann befriedigend gelöst werden, wenn Verschleißbeobachtungen laufend über das gesamte

Gebiet der gemischten Reibung gemacht werden. Dabei stellt sich heraus, daß es im Auslauf Gleitgeschwindigkeitsbereiche gibt, die eine wechselnd starke Erzeugung von metallischem Abrieb zeigen. Die ersten diesbezüglichen Versuche lassen vermuten, daß diese Erscheinungen u.a. auch mit der Wärmeleitfähigkeit der gepreßten dünnen Schmiermittelschichten in Zusammenhang stehen, die im Versuch einer stetig steigenden Temperatur ausgesetzt sind. Anhaltspunkte über die chemische Veränderung dieser dünnen Schmierstoffschichten gibt die Vermessung der Grenzflächenspannung gegen Wasser. Da die Oberflächenbeschaffenheit der reibenden Metallteile auf die Reibungs- und Verschleißvorgänge von Einfluß ist, ergibt sich die Notwendigkeit, hinsichtlich der mechanisch-technologischen Vorbehandlung der reibenden Flächen Vereinbarungen zu treffen (Basismessflächen). Sollen

- 1.) völlig glatte oder sollen aufgeraute Oberflächen verwendet werden (PTT bzw. Junkers-Wieland-Lager) oder
- 2.) durch "individuelle Politur" eingelaufene Oberflächen mit Beilby-Schicht oder
- 3.) sollen zur Erzielung maximaler Schmierstoff-Haftverhältnisse die Gleitmetalle unter dem jeweiligen Öl als Schutzflüssigkeit abgedreht und diamantet werden,

Alle Probleme der Haftfestigkeit von Öl an Metall hängen unmittelbar mit obigen Fragen zusammen. Darüber hinaus ist zu beachten, daß die Haftfestigkeit maßgebend beeinflusst wird von der Eigenschaft der Werkstoffe, mit dem jeweiligen Schmiermittel eine mehr oder minder tiefe, lackartige Einlaufschicht zu bilden. Erst eine Vereinbarung hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit der gleitenden Metalle kann die Brücke bilden zur betriebstrennen Laboratoriumsmessung der Schmierstoffe im Hinblick auf Reibung, Verschleiß und Alterung.

Die Bedeutung der Ruhereibung für den  
Elektromaschinenbau

Reibungsvorgänge bei drehender Bewegung lassen sich an elektrischen Maschinen verhältnismäßig leicht und genau verfolgen. Aus der Bestimmung der zu- und abgeführten elektrischen Leistung, z.B. in der Kreisschaltung zweier gleicher Maschinen durch Spannungs- und Strommessung, sind sowohl die Gesamtverluste als auch ihre Teile: Eisen- und Kupferverluste einerseits, sowie Luft und Lagerreibung andererseits, erfaßbar. Die schnell veränderlichen Vorgänge beim Anfahren und beim Abstellen lassen sich durch oszillographische Messungen beobachten. Damit kann man sowohl die Anlaufreibung als auch die Zwischenstufen bis zur reinen Flüssigkeitsreibung erfassen. An Hand von Beispielen bei Blindleistungsmaschinen, Einankerumformern, Synchronmotoren und Wasserkraftgeneratoren wird gezeigt, daß insbesondere der Anlaufreibung eine erhebliche Bedeutung zukommt, und daß ihre Minderung zu bemerkenswerten Vereinfachungen an elektrischen Maschinen führen kann. Im einzelnen kann gesagt werden:

~~Bei Einankerumformern und Synchronmotor-Generatoren, die von der Synchronseite her angefahren werden sollen, kann die Verminderung der Ruhereibung eine Verkleinerung oder sogar den Wegfall des Anwurfaggregates möglich machen. Dasselbe gilt für Ilgnerumformer, wenn die Anfahrzeit nicht beschränkt ist. Pumpspeichersätze, die aus einer Turbine, einer Pumpe und einem Motor bzw. Generator bestehen, die daher eine verhältnismäßig große Ruhereibung haben und infolgedessen nur von der Turbinenseite aus angefahren werden können, könnten bei Herabsetzung der Ruhereibung ohne Benutzung der Turbine von der Motorseite aus anlaufen, wenn ihre Anfahrzeit es erlaubt.~~

Man wäre dann nicht daran gebunden, eine ausreichende Wasserreserve zum Anwerfen bereitzuhalten, oder die einzelnen Maschinen durch Schaltkupplung zu verbinden. Der Prüffeldbetrieb, Schleuderproben und ähnliche Laufversuche wäre eine Verringerung der Ruhereibung sehr von Nutzen. Eine Herabsetzung der gesamten Anlaufzeit eines Maschinensatzes tritt durch Verminderung der Ruhereibung praktisch nicht ein, da die Ruhereibung unmittelbar nach dem Ingangsetzen so schnell abfällt, daß eine nennenswerte Energiesparnis gegenüber der ohnehin

- 2 -

aufzuwendenden kinetischen Energie ins Gewicht fällt. Je schärfer im Laufe der Entwicklung die Bedingungen hinsichtlich schneller Betriebsbereitschaft sein werden, desto mehr wird der Wert der Herabsetzung der Ruhereibung zurücktreten, da dann die Beschleunigungsdrehmomente mehr und mehr anwachsen und diese dann stets auch ausreichen werden, um ein unvermindertes Ruhereibungsmoment zu überwinden. Ob in den Fällen, in denen jetzt Drucköhlentlastung vorgesehen wird, diese Einrichtung bei Verminderung der Ruhereibung durch andere Schmiermittel wird wegfallen können, wird nicht nur von der Reibungszahl, sondern auch von den Notlaufeigenschaften abhängen; denn die Drucköhlentlastung vermindert ja nicht nur die Reibungszahl, sondern schützt auch die Laufflächen bei den noch niedrigen Gleitgeschwindigkeiten im Anfang des Anlaufs bzw. am Schluß des Auslaufs.

Da die Anlaufzeit infolge ausreichend großer verfügbarer Drehmomente meist bedeutend kürzer ist als die Auslaufzeit, bei der nur die geringen Reibungswiderstände die kinetische Energie der umlaufenden Massen aufzehren müssen, ist der Auslauf in dieser Hinsicht meist gefährlicher als der Anlauf. Man hat daher auch eigens zur Vernichtung dieser Energie Auslaufbremsen vorsehen müssen, um die Laufzeit mit schlecht geschmierten Laufflächen bei Schleichdrehzahlen auf ein für die Lager ungefährliches Maß abzukürzen.

Über das Wesen der Reibung zwischen festen Körpern1.) Geschichtlicher Überblick

1699. G. AMONTONS trägt der Pariser Akademie die Ergebnisse seiner Versuche vor, deren wesentliche Ergebnisse sind, daß der Reibungswiderstand proportional der Pressung, unabhängig von der Größe der Berührungsfläche und für alle Körper, womit Versuche angestellt wurden, beinahe gleich groß und ungefähr  $1/3$  der Pressung ist. Die Ergebnisse erregten bei den Mitgliedern der Akademie großes Aufsehen, da man vorher gemeint hatte, die Reibung wachse wie die Berührungsfläche.
1699. H. DE LA HIRE wiederholt daher die Experimente mit Hölzern von verschiedenen Seitenflächen und versucht, das Verhalten aus der physikalischen Beschaffenheit der Körperoberflächen zu erklären. Durch Annahme des Ineinandergreifens der Unebenheiten und elastischer Verbiegungen oder Zerstörungen der Oberflächenrauigkeiten bei Verschiebung ergibt sich die Unabhängigkeit der Reibung von der Größe der Berührungsfläche.
1700. A. PARENT nimmt für die geometrische Form der Oberflächenrauigkeiten Halbkugeln von gleichem Durchmesser an und bestimmt durch Anwendung des Gleichgewichtes auf der schiefen Ebene die sich so ergebende Kraft zur horizontalen Verschiebung =  $1/\sqrt{3} \sim 1/3$  des Normaldruckes.
1710. G.W. LEIBNITZ schließt sich der Auffassung DE LA HIREs an, daß die Reibung durch das Ineinandergreifen der Rauigkeiten entsteht.
1734. DESAGULIERS führt erstmalig die Adhäsion als teilweise Ursache der Reibung mit ein, die um so stärker wirkt, je inniger die Körper mit den Flächen sich berühren. Durch größere Politur oder Anwendung von Schmiere werde zwar die Reibung geringer, aber die Anziehungskraft nehme zu, so daß der Gesamtwiderstand derselbe bleibe.
1739. P. MUSSCHENBROEK schließt sich der Auffassung von DE LA HIRE und LEIBNITZ über die Ursachen der Reibung an, lehnt aber die Gleichheit der Reibungszahl für verschiedene Körper ab, weil die Figur der kleinen Erhabenheiten und der Vertiefungen zwischen denselben, wie der Augenschein lehrt, nicht bei allen Körpern gleich, sondern sehr verschieden sei.
1748. L. EULER sieht als Ursache der Reibung das Ineinandergreifen der Berührungsflächen an, die er sich als sehr kleine schiefe Ebenen vorstellt.
1785. S. VINCE veröffentlicht eine große Anzahl von Versuchen, die den Anteil der Adhäsion an der Reibung zeigen sollen. Harte Körper werden mit verschiedenen rauhen Papieren beklebt und aus den entstehenden Bewegungen geschlossen, daß der Anteil der Adhäsion an der Größe der Reibung im Zustand der Bewegung etwa  $1/3$  war, während sie beim ruhenden Körper nahezu den gesamten Betrag ausmachte.

1785. C.A. COULOMB führt bei der Auswertung seiner in großem Maßstab ausgeführten umfangreichen Versuche die Adhäsion mit ein. Da sie mit der Fläche zunimmt, und unabhängig von der Pressung ist, werden die Abweichungen von den zum Normaldruck proportionalen Werten der Adhäsion zugeschrieben. Für die Oberflächen der Hölzer nimmt COULOMB eine Bedeckung mit kleinen elastisch biegsamen Fasern an, welche borstenartig vorstehen und sich nach jeder Richtung gleichmäßig biegen lassen, während die Oberfläche der Metalle aus eckigen oder kugeligen Unebenheiten bestehen, die hart und unbiegsam sein sollen. Damit erklärt COULOMB die Verschiedenartigkeit seiner Versuchsergebnisse.
1804. J. LESLIE sieht eine unveränderliche Oberflächenrauigkeit als Ursache der Reibung für ungeeignet an, weil beim Hinwegziehen des einen Körpers über den anderen auf eine Erhebung eine Vertiefung folgt, so daß die vorher aufgewandte Arbeit hinterher wiedergewonnen wird und die Summe im Mittel Null ist. Noch weniger könne die Adhäsion den Ursprung der Reibung erklären, da sie als eine Kraftäußerung anzusehen ist, die auf der gemeinschaftlichen Berührungsfäche beider Körper senkrecht steht. LESLIE führt die Reibung auf die Kräfte bei unaufhörlichen Formänderungen der sich berührenden Flächen zurück. Beim Fortgleiten übereinander haben sie das Bestreben sich jeweils bestens einander anzupassen, was jedoch erst nach sehr langer Zeit erreicht wird. Der Grad der Anpassung ist daher jeweils unvollkommen und beim Fortgleiten übereinander ist es so, als ob der Körper dauernd eine schiefe Ebene bergauf gezogen werden müsse. Der gleitende Körper mache unaufhörliche erfolglose Anstrengungen zu steigen, denn in demselben Augenblick, wo er die Gipfel der Erhöhungen erreicht hat, sinken sie unter der Last ein, und die angrenzenden Vertiefungen steigen als Erhöhungen empor und bilden eine neue Reihe von Widerständen, die ebenso überstiegen werden müssen.
1832. A. MORIN wiederholt die COULOMBSchen Versuche in noch größerem Maßstab und mit größerer Sorgfalt und findet keinen Einfluß der von COULOMB beobachteten Adhäsion.
1837. A.F.W. BRIX wertet Versuche COULOMBS in Bezug auf den Anteil der Adhäsion aus und findet ihn sehr klein. Die Kritik LESLIES ist bekannt, darauf wird nicht eingegangen.
1864. K.L. LANDSBERG betrachtet die Grenzflächenkräfte im Zusammenhang mit den Erscheinungen des Fressens.
1886. O. REYNOLDS spricht auch von Grenzflächenwirkungen als teilweise Ursache der Reibung und findet es bemerkenswert, daß die Beobachtungen von TOWER ohne Zuhilfenahme weiterer Hypothesen durch Anwendung der hydrodynamischen Gleichungen geklärt werden kann.
1918. LORD RAYLEIGH untersucht die Ruhereibung von kleinen Dreifußchen aus Glas und Messing und findet sie größer bei Vorhandensein einer größeren Menge, als bei einem dünnen Überzug der Unterstützungsflächen mit dem Schmiermittel.
1919. W.B. HARDY versucht die von LORD RAYLEIGH beobachtete Erscheinung zu klären. Er wendet bei seinen Versuchen ein Reinigungsverfahren an, das vorwiegend im Reiben der Flächen mit den Fingerspitzen unter einem Strahl der Wasserleitung besteht, wodurch es möglich ist, die gemessenen Ruhereibungswerte leicht zu verdoppeln. Es handelt sich also nicht um ein objektives Reinigungsverfahren. Trotzdem werden die gemessenen Reibungsziffern vierstellig (1) -3-



angegeben. Aus seinen Versuchen leitet HARDY folgende hypothetischen Vorstellungen ab:

- 1.) Polierte Flächen sind molekular glatt.
- 2.) Die Ruhereibung rührt nicht von den Oberflächenrauigkeiten her.
- 3.) Ursache der Ruhereibung sind die Grenzflächenkräfte; auf die Gleitreibung bei Bewegung haben diese Kräfte keinen Einfluß.
- 4.) Die Ruhereibung ist exakt proportional zum Flächendruck.
- 5.) Für die Verminderung der Ruhereibung ist in erster Linie das Molekulargewicht des betreffenden Stoffes maßgebend. - Eine Verminderung der Ruhereibung wird auch als Schmierwirkung bezeichnet, was sonst nur für die Gleitreibung bei Bewegung üblich ist.

1920. I. GÜBEL kritisiert die Rauigkeitshypothese und führt die LESLIEsche Annahme der fortlaufenden Formveränderungen der Oberflächen zu einer physikalisch befriedigenden Klärung der Reibung zwischen festen Körpern durch.

1939. BIKERMANN und RIDEAL prüfen durch Versuche, ob die Ruhereibung durch teilweises Verschweißen der Körper entsteht, was aus der Vorstellung der Grenzflächenwirkungen zu folgern wäre. Das Ergebnis ist negativ.

## 2.) Folgerungen

- a) Zur Erklärung der Reibungserscheinungen ist die Kenntnis der Oberflächenform unbedingt erforderlich. Hypothesen darüber genügen nicht.
- b) Bei Reibungsversuchen muß die Gestalt der Flächen ausgemessen oder wenigstens genau beschrieben werden. Ergebnisse ohne Angabe der Oberflächenform und der Rauigkeit sind stets mit einem großen Unsicherheitsfaktor behaftet.
- c) Besonders zu beachten ist die erstmalig von LESLIE gewonnene Erkenntnis, daß die Resultierende aus den Grenzflächenkräften senkrecht auf der Oberfläche steht und keine tangentielle Komponente hat. Die Reibung ist aber eine reine Tangentialkraft und hat keine Normalkomponente.
- d) Die von DESAGULIERS eingeführte Adhäsion ist eine rein hydrodynamische Erscheinung, da er sich auf das zeitweise Aneinanderhaften von zwei ebenen Platten beruft.

07096

- 4 -

- e) Die von HÄRTEL aufgestellte Behauptung, polierte Flächen seien molekular glatt, ist durch die Erfahrung nicht bestätigt. Auch polierte Flächen sind noch rauh.
- f) Der Beweis, warum molekular glatte Flächen bei gegenseitiger Berührung eine reine Tangentialkraft liefern sollen, ist von HARDY nicht erbracht. Zwei miteinander auf Gitterabstand in Berührung gebrachte Kristallflächen würden sich wie ein ganzer Kristall verhalten, also nicht die Reibungserscheinungen liefern, sondern eine Kaltverschweißung.
- g) Diese Betrachtungen legen nahe, daß durch Grenzflächenwirkungen unmittelbar die Reibungserscheinungen zwischen festen Körpern nicht verursacht werden können.

Über neue Erkenntnisse in der Verschleißfrage

Früheren Untersuchungen der Reibung entnehmen wir einige grundsätzliche Erkenntnisse<sup>1)</sup>.

Die wirkliche Kontaktfläche  $F$  ist im allgemeinen mit einem mittleren Druck  $\bar{p}$  belastet, der in der Nähe der höchsten Druckgrenze, der sogenannten Härte  $H$  des weicheren Kontaktgliedes liegt. Meistens gilt nämlich:

$$\frac{H}{2} < \bar{p} < H. \quad (1)$$

Also kann man die wirkliche Kontaktfläche berechnen als:

$$F = \frac{P}{\bar{p}} = \frac{P}{\mathcal{L}H}, \quad (2)$$

wo  $\frac{1}{2} < \mathcal{L} < 1$  ist.

Die Reibungskraft  $P_r$  ist proportional zur wirklichen Kontaktfläche und die spezifische Reibungskraft:

$$\psi = \frac{P_r}{F} \quad (3)$$

ist etwa gleich der Scherfestigkeit eines festen Körpers. Im Falle der metallisch reinen Einmetallkontakte<sup>2)</sup>, so wie man sie im Vakuum zwischen ausgeglühten Kontaktgliedern erhalten kann, ist  $\psi$  gleich der Scherfestigkeit des betreffenden Metalles, d.h. in der Kontaktfläche haften die Kontaktglieder aneinander, als wären sie dort verschweißt. Auch wenn die beiden Kontaktglieder aus verschiedenen Metallen bestehen, haften sie annähernd wie verschweißt. Kontakte mit Fremdhäuten haften weniger stark aneinander und  $\psi$

1) Vergl. R. Holm: "Die technische Physik der elektrischen Kontakte". Springer, Berlin 1941 (im folgenden mit HK bezeichnet) S 33 - 37, sowie die vertrauliche Mitteilung Nr.9 über die Sitzung vom 4.3. 1943, S.14.

2) Kontaktmetall normal (vielkristallinisch)

- 2 -

wird hier meistens bedeutend kleiner als zwischen Metallen.

Für die Reibungszahl

$$\mu = \frac{F_r}{P} = \frac{\psi}{P}, \quad (4)$$

wo  $p$  die Kontaktlast bedeutet, gilt etwa:

|  | reinen Metallflächen | oxydbedeckten Flächen | epilamenge-schmierten Flächen |
|--|----------------------|-----------------------|-------------------------------|
|--|----------------------|-----------------------|-------------------------------|

|         |           |           |           |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| $\mu =$ | 1,6...0,8 | 0,7...0,3 | 0,2...0,1 |
|---------|-----------|-----------|-----------|

Anschließend an die Erkenntnis der Größe  $\psi$  ergibt sich eine atomistische Erklärung der Reibungsarbeit: Atome oder Atomgruppen der Kontaktglieder werden beim Gleiten aus ihren Gleichgewichtslagen gezerrt und bald wieder losgelassen, wobei sie ihre Verzerrungsenergie als Wärme auspendeln. Die Reibungsarbeit ergibt sich etwa proportional zu der Anzahl der Atomtreffer, d.h. proportional zu dem Produkt der wirklichen Kontaktfläche  $F$  mit dem zurückgelegten Weg  $s$ <sup>1)</sup>.

Der Verschleiß von Körnern muß damit anfangen, daß nicht nur die ursprüngliche Kontaktfläche, sondern auch eine in das eine Kontaktglied verlegte Fläche als Gleitflächen dient. Sind nun beide Flächen metallisch, so braucht durch ihr gemeinsames Auftreten keine Änderung von  $\psi$  oder  $P_r$  zu entstehen. Das schließliche Abbröckeln der Körner kostet wenig Arbeit<sup>2)</sup>, und es ergibt sich, daß der Verschleiß in einem rein metallischen Kontakt nicht notwendig zu einer Veränderung von  $\mu$  zu führen braucht. Anders verhält sich meistens ein Kontakt mit Fremdschicht. Wenn diese durch den Verschleißvorgang verletzt wird, so entstehen metallische Kontaktstellen mit

1) Über den Zusammenhang mit der Coulombschen Reibung siehe HK, S. 186.

2) Vergl. den erwähnten vertraulichen Bericht Nr. 9. Die Abschätzung in diesem Bericht ist allerdings, wie Prof. Smekal bemerkt hat, insofern fehlerhaft, als die Verzerrungsarbeit beim Abbröckeln nicht mitgezählt wurde; d.h. die Abbröckelarbeit je Höcker wurde zu klein angesetzt. Nun wurden aber die Basisflächen der Höcker um Zehnerpotenzen zu groß angesetzt (die Abtrennung der Körner ist eine ziemlich seltene Erscheinung). Die beiden Fehler heben sich weitgehend auf und das Resultat bleibt bestehen, daß das Abbröckeln eine kleine Rolle für die Reibungsarbeit spielt.

vergrößertem  $\mu$ . Der Verschleiß, aber nicht sein Betrag, gibt sich darum in einer Veränderung von  $\mu$  kund.

Die Tafeln I und II stellen Verschleißmessungen an eingelaufenen Gleitkontakten zusammen. Es handelt sich zum größten Teil um im Forschungslaboratorium der Siemenswerke mit sehr einfachen Apparaten ausgeführte Messungen. Ein auf einem Rade aufgespannter Draht schloß gegen einen Klotz<sup>1)</sup>, dessen Druckkraft (Kontaktlast) gegen den Draht durch Gewichte bestimmt war.

Die rot unterstrichenen Angaben stammen von anderen Forschern<sup>2)</sup>. Wir werden finden, daß sie sich gut an die Messungen des Forschungslaboratoriums anreihen, und dies ist sehr wichtig, weil es ein Zeichen dafür ist, daß die zusammengestellten Resultate nicht an eine bestimmte Apparatur gebunden sind.

Die direkten Meßzahlen sind nicht in die Tafeln eingetragen, sondern der besseren Übersicht wegen auf einheitliche Umstände reduzierte Zahlen. Wir leiten zunächst die Reduktionsformel her. Der Läufer mag den Weg  $s$  zurücklegen, während seine Oberflächenatome  $N$  Treffer mit Atomen des anderen Kontaktgliedes erfahren. Dabei mögen  $n$  Atome abgerieben werden. Wir suchen den Quotienten  $D = \frac{n}{N}$ . Die wirkliche Berührungsfläche  $F$ <sup>3)</sup> habe die mittlere Breite  $b$  und die mittlere Länge  $l$ . Sie beträgt also  $F = lb$  und enthält  $\frac{lb}{a^2}$  Atome, wenn  $a$  ein mittlerer Atomabstand ist, während der Läufer die Fläche  $F$  überfährt, erfährt jedes seiner Atome in Mittel  $\frac{1}{a}$  Treffer. Auf dem Weg überfährt der Läufer  $\frac{s}{a}$  solche Fläche wie  $F$  und die ganze Anzahl der Atomtreffer wird:

$$\frac{lb}{a^2} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{s}{a} = \frac{lbs}{a^3} = N.$$

Das dabei verschlissene Volumen sei  $V$ . Es enthält  $n = \frac{V}{a^3}$  Atome. Schließlich ergibt sich also:

- 1) Der Klotz wurde manchmal durch eine Drahtspirale ersetzt, deren Windungen senkrecht zu dem auf dem Rade gespannten Draht standen. Der Verschleiß änderte sich hierdurch nicht wesentlich.
- 2) W. Bondi, Beiträge zum Abnutzungsproblem, Berlin:VDI-Verlag 1927.  
R. Mailänder u. K. Dies, Techn. Mitt. Krupp, Essen 1942  
E. Siebel u. R. Robitzsch, Verschleißerscheinungen bei gleitender trockener Reibung, Berlin:VDI-Verlag 1941.
- 3) Bekanntlich ist die wirkliche Berührungsfläche oft um Zehnerpotenzen kleiner als die scheinbare.

- 4 -

$$D = \frac{n}{N} = \frac{V}{Lbs} = \frac{V}{Fs},$$

und wenn  $F = \frac{P}{H}$  eingesetzt wird (vergl. die Gl. (2) und (1))

$$D = \frac{VH}{Ps} \quad (5)$$

oder  $V = D \cdot \frac{Ps}{H} \quad (6)$

Wenn D konstant ist, so drückt Gl. (6) eine als erste Annäherung plausible Beziehung des D zu P, s und H aus. Wir erwarten eine gewisse Konstanz von D, eine Zahl, die jetzt in lauter meßbaren Größen ausgedrückt worden ist und sich in der Größenordnung  $10^{-5}$  ergibt. Diese Größenordnung ist wenig anschaulich. Darum ist es vorteilhaft, D durch eine andere Größe  $\sigma'$  zu ersetzen, welche die anschauliche Anzahl der je Läuferpassage verschlissenen Atomschichten darstellt<sup>1)</sup>.  $\sigma'$  ist zwar nicht streng einheitlich mit D verbunden, jedoch mit einer hier ausreichenden Annäherung. Für Metalle wird  $\sigma' \approx 10^{-5} D$  (und für Graphit:  $\sigma' \approx 1,5 \cdot 10^{-5} D$ ), also gerade die Zahl, welche in den Tafeln I und II eingetragen wurde. Wir unterscheiden zwei Hauptarten des Verschleißes:

- I) Verschleiß in Atomen oder kleinen Atomgruppen. Kennzeichen:  $10^{-5} D < 1$ .  
 II) Verschleiß hauptsächlich in Körnern. Kennzeichen:  $10^{-5} D > 1$ .

Die Art II hat zwei Untergruppen: A) Mäßiger Verschleiß. Ein Kennzeichen:  $10^{-5} D$  ist unabhängig von P und bleibt meistens weit unterhalb von 100.

B) "Pressen". Kennzeichen: Große Streuung;  $10^{-5} D$  groß.

Es ist einleuchtend, daß die Herleitung der Reduktionsformel zunächst mit Rücksicht auf die Verschleißart I ausgeführt wurde. Es ist aber ein empirisches Resultat, daß sie am genauesten für die Art II A gilt, wie wir bald näher auseinandersetzen werden.

Bevor wir zur Diskussion der Tafeln übergehen, müssen wir einige weitere Eigenschaften der Verschleißarten besprechen. Zur Verschleißart I gehört eine einigermaßen ruhige Bewegung, aber für die Art II ist bezeichnend, daß die Oberfläche des weicheren Kontaktgliedes zu Wellen geknetet wird. Damit hängt zusammen ein Zittern der Schleifbewegung etwa von der Art, wie sie Bowden und Mitarbeiter rein gezüchtet haben<sup>2)</sup>.

1) Vergl. HK, S. 200.

2) Siehe HK, § 35.

In den Wellen findet eine ungleichmäßige Verfestigung des Stoffes statt, so daß streng genommen die ursprüngliche Härte nicht eine so dominierende Rolle spielt wie nach der Formel (5). An welchen Wellenteilen die Körner abgetrennt werden, ist experimentell noch nicht festgestellt. Jedenfalls verliert nicht jede Welle ein Körnchen bei jeder Läuferpassage, sondern die Abtrennung der Körner ist eine recht seltene Erscheinung. Ein Weg von 1000 Körnerdurchmessern gleich mehreren Wellenlängen kann zwischen zwei Abtrennungen liegen. Das Zittern scheint darauf zu beruhen, daß der Läufer gewisse Augenblicke an einer metallischen Stelle klebt, nach einer gewissen Verspannung sich losreißt und nun mit weniger Reibung über wesentlich oxydierte Flächen weggleitet. Denn, wenn Oxyd gasz fehlt (in  $H_2$  oder im Vakuum), wird der Verschleiß klein und die Bewegung verhältnismäßig ruhig.

#### Diskussion der Tafel I.

Eine beträchtliche Konstanz von  $D$  tritt zutage, siehe die Spalten für Fe-, Cu- und Ag-Drähte gegen die harten Klötze aus Stahl und Glas. Sowohl der Stahl wie das Glas werden zwar angegriffen (Ausnahme: der Kontakt gegen Weichsilber), aber ein beträchtliches Haften scheint nicht zustande zu kommen, am Stahlklotz vermutlich deshalb nicht, weil eine Sauerstoffhaut sich dort recht gut regeneriert.  $\mu$  hält sich dem Oxyd entsprechend etwa bei dem Wert 0,5.

Gegen den weichen Silberklotz wird der Verschleiß größer und  $\mu$   $\approx 1$ . Mit gleichen Metallen auf beiden Seiten erhält man meistens Fressen. Die Verletzungen sind hier auf beiden Seiten gleich wahrscheinlich, so daß beide Kontaktglieder reichlich metallische Stellen für das Haften zur Verfügung geben.

Das Al gegen Ag wenig verschleisst, dürfte bedeuten, daß die harte Oxydhaut des Al nur schwer von Ag verletzt wird und sich außerdem äußerst schnell regeneriert. Das Zink benetzt alle Klötze und setzt sich auf ihnen ab wie der Bleistiftstrich auf Papier. Nachher wird der Verschleiß des Zn groß. Man muß ihn wohl doch zur Art II A rechnen, weil  $D$  konstant bleibt.

Der unterste Teil der Tafel I zeigt den schon erwähnten kleinen Verschleiß in Wasserstoffatmosphäre.

Die Tafel II enthält einige Sonderfälle. Zuerst ein Fall des Fressens, der behoben wird, wenn Wasserdampf reichlich anwesend ist. Das Wasser

07102

- 6 -

schmiert den Kontakt. Der Kontakt Fe gegen WM 80 greift wenig das Fe an und ist wenig abhängig von der Feuchtigkeit der Luft. Ein Kontakt repräsentiert die Epilamenschmierung und zeigt, daß diese nicht ganz den Verschleiß weghält, vergl. HK § 39. Schließlich sind Versuche mit Elektrographitbürsten angeführt, und zwar, um hervorzuheben, wie außerordentlich klein bei ihnen der Verschleiß ist. Er liegt ja mindestens um 4 Zehnerpotenzen tiefer, als wir sonst gesehen haben, vor allen Dingen, wenn Graphit gegen Graphit schleift.



Tafel I

10<sup>5</sup> für das weichere Kontaktglied

in Luft

Drahtmetall und dessen Härte in kg/mm<sup>2</sup>

| Klotz-Metall und dessen Härte in kg/mm <sup>2</sup> | P<br>g                    | Fe<br>150   | Cu<br>60                 | Ag<br>48          | Ag weich<br>28 | Al<br>27      | Zn<br>24 |
|---|---------------------------|-------------|--------------------------|-------------------|----------------|---------------|----------|
| Stahl   | 15000                     | 2,6         |                          |                   |                |               |          |
| 620   | 4500<br>1100<br>100<br>15 | 2<br>4<br>4 | 3,6<br>6,8<br>3,4<br>3,0 | 0,8<br>0,9<br>1,2 | 0,2            | 64<br>66      | 184      |
| Glas<br>130   | 100<br>15                 | 1,5<br>2,4  | 6,8<br>6,6               | 0,8               |                | 98            | 200      |
| Ag<br>90  | 100<br>15                 |             | 18<br>32                 | 20<br>34          | 12<br>34       | 6...18<br>3,4 | 160      |
| <u>in Wasserstoff</u>                               |                           |             |                          |                   |                |               |          |
| Stahl   | 120                       | 8           | 6                        |                   |                | 26            |          |
| Ag  | 120                       |             | 2                        |                   |                | 56            |          |

## T a f e l I I

## Abnutzung in stromlosen Schleifkontakten

## Sonderfälle

| Nr. | Kontaktstoffe                             | Härte in<br>kg/mm <sup>2</sup> | P<br>in<br>g | $\frac{1}{10^D}$    | Bemerkungen                          |
|-----|---|--------------------------------|--------------|---------------------|--------------------------------------|
| 1   | Fe gegen Fe                               | 150                            | 100          | 900                 | in trockener Luft                    |
| 2   | Fe gegen Fe                               | 150                            | 100          | 6                   | in feuchter Luft                     |
| 3   | Fe<br>gegen<br>Wm 80                      | 100                            | 150          | 3                   | in <i>trockener</i><br>feuchter Luft |
|     |   | 30                             |              | 12                  |                                      |
| 4   | Fe<br>gegen<br>WM 80                      | 100                            | 150          | 0,3                 | in feuchter Luft                     |
|     |   | 30                             |              | 10                  |                                      |
| 5   | Fe gegen Fe<br>mit Epilamen               | 150                            | 1000         | 0,4                 | mit<br>Epilamen                      |
| 6   | Elektrographit<br>gegen<br>Cu             | 14                             | 500          | $10 \cdot 10^{-4}$  |                                      |
|     |   | 80                             |              | $1 \cdot 10^{-4}$   |                                      |
| 7   | Elektrographit<br>gegen<br>Elektrographit | 14                             | 500          | $0,3 \cdot 10^{-4}$ |                                      |

07105

Verschleißversuche mit verschiedenen Schmierölen  
an einem Vierkugel-Ölprüfgerät bei Belastungen unterhalb  
der Freßgrenze

An dem von Boerlage entwickelten Vierkugel-Ölprüfgerät werden üblicherweise die Belastungen bestimmt, bei denen die vom zu bewertenden Öl bedeckten Prüfkugeln fressen oder miteinander verschweißen. Die im Vortrag hauptsächlich behandelten Versuche wurden dagegen im Belastungsgebiet unterhalb des Beginns von Freßerscheinungen gefahren. Als Maßwert wurde jeweils die Größe der Verschleißkalotten an den Kugeln ermittelt.

Untersucht wurden vier Schmierstoffe von fast gleicher Viskosität, um deren Einfluß möglichst auszuschalten. Ein reines Mineralöl (Rotring-Eichöl) und ein fast reines Fettöl (Kompressol weiß); sowie als Vertreter handelsüblicher Schmieröle, welche Zusätze enthalten, ein Hochdruck-Getriebeöl (Shell-HDL) und ein Hypoid-Getriebeöl (Shell-Hypoid).

Die Ergebnisse dieser Verschleißversuche lassen erkennen, daß eine summarische Bewertung der Verschleißverhinderungseigenschaften eines Öles für den gesamten Belastungsbereich nicht möglich ist. Bei niedrigen Belastungen ist das Fettöl wesentlich besser als das Mineralöl und wird nur vom Hochdruck-Getriebeöl noch etwas übertroffen. Das Hypoid-Getriebeöl ergibt den höchsten Verschleiß. Im Gebiet höherer Belastungen hat sich das Verhältnis von Fettöl zu Mineralöl umgekehrt und das Fettöl bringt den stärkeren Verschleiß. Das Hochdrucköl zeigte bei weitem die besten, dagegen das Hypoidöl die sehr mäßigen verschleißverhindernden Eigenschaften unter diesen Prüfbedingungen.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit den 2 1/2-Sek-Freßbelastungen und den Schweißpunktbestimmungen aus Prüfungen der gleichen Öle zeigt, daß eine Ölbeurteilung an demselben Prüfgerät und mit den gleichen Prüfkörpern bereits vollkommen verschieden<sup>aus-</sup>fallen kann, entsprechend der Wahl des Prüfverfahrens oder der Meßgröße. Diese Bewertungen könnten

noch vermehrt werden um solche aus Reibungsmessungen an den gleichen oder ähnlich gebauten Vierkugel-Prüfgeräten. Kein Wunder, daß andere Werkstoffe, Oberflächenrauigkeit usw. noch unterschiedlichere Beurteilungen ergeben können, ganz abgesehen von den Ergebnissen aus Schmierstoffuntersuchungen an den zahllosen übrigen vorhandenen Prüfgeräten mit ihren völlig anderen Konstruktionen und Prüfbedingungen.

Aus diesem Tatbestand ist zu folgern, daß die Bedeutung von Prüfgeräten und die Übertragbarkeit von Ergebnissen zu beschränken ist auf die Gebiete und die genau zu kennzeichnenden Fälle des praktischen Betriebes, bei denen die in den Geräten auftretenden Bedingungen ebenfalls oder zumindest ausschlaggebend vorhanden sind. Mit dem besprochenen Verschleiß-Prüfverfahren ist es vielleicht möglich, am Vierkugel-Gerät auch die verschleißverhindernden Eigenschaften von Schmierstoffen für Zahnradgetriebe mit niedrigen und hohen Flächenpressungen zahlenmäßig beurteilen zu können.

07107

Reibungsmessungen am Vierkugel-Windradgerät  
der DVL im außerhydrodynamischen Gebiet

Die Bezeichnung "außerhydrodynamische Schmierung" ist für das Gebiet gewählt worden, dessen Gesetzmäßigkeiten noch nicht bekannt sind. Hydrodynamische Einflüsse unzugänglicher bzw. nicht faßbarer Art, Eigenschaften von Filmen in molekularen Größenordnungen, chemische Umsetzungen in der Schmiergrenzschicht usw. gehören hierher. Die vorgeschlagenen Begriffe "Grenz- oder Epilamenschmierung" und streng genommen auch "Misch- oder Teilschmierung" <sup>+</sup>), wobei noch weitgehendere Unterteilungen dankbar wären, haben vorläufig - solange ihre Gesetzmäßigkeiten nicht eindeutig bekannt sind - nur theoretisches Interesse, da sie experimentell nicht exakt realisierbar bzw. erkennbar sind.

Es wurde versucht, mit Hilfe einer geeigneten und sehr empfindlichen einfachen Anordnung die Schmiervorgänge in Abhängigkeit von  $v$   $c$   $r$   $s$   $c$   $h$   $i$   $e$   $n$   $e$   $n$  Einflüssen zu beobachten. Die gewählte Art der Schmierstelle - drei Kugeln als Führungslager, eine Kugel als Gleitkörper - ergibt insbesondere bei frischen Kugeln zwangsläufig ein gleichzeitiges Arbeiten im Gebiete aller möglichen Schmierphasen (z.T. auch der bekannten hydrodynamischen). Praktisch und vorherrschend zur Auswirkung treten jedoch nur jene Schmiervorgänge, die einen hohen Gleitwiderstand ergeben; es ist dann nur die jeweilige effektive Last eine andere. Dies trifft mehr oder weniger auch für andere Prüfeinrichtungen, schon durch die Rauigkeit der Oberfläche, zu. Die gewonnenen Integralwerte beinhalten also in verschiedenen Ausmaß einzelne diskrete Schmierzustände hohen Reibungswiderstandes. Der Zweck dieser Mitteilung ist also nicht, zu den bereits in großer Zahl vorliegenden Geräten ein neues hinzuzufügen, um entsprechend seiner spezifischen Eigenart diskrete Schmier- bzw. Reibungszustände, Verformungswiderstände usw. mehr oder weniger reproduzier<sup>bar</sup> zu züchten

<sup>+</sup>) Der Ausdruck "Teilschmierung" sollte sinnvoller für wirkliche Teilschmierung verwendet werden, also überall dort, wo Trockenreibung auftritt.

und daraus allgemeine unmittelbare Beziehungen zwischen Gerät und praktischem Schmierverhalten aufzustellen, wie dies oft gehandhabt wird.

Ein Gerät, welches mit Aussicht zur Klärung von Schmierungsfragen vom Standpunkt der Reibung herangezogen werden kann, muß bei verschiedenen Temperaturen schnell und genau reproduzierbar geringste Reibungsänderungen durch praktisch interessierende Schmierstoffe aufzeigen.

Da die vorliegenden Geräte aus verschiedenen Gründen keinen besonderen Anreiz für Untersuchungen der beabsichtigten Art gaben, wurde das im Prinzip aus der Abb. 1 im Schema ersichtliche Gerät gebaut, welches zu den genannten Eigenschaften den Vorteil der Einfachheit der Konstruktion und Bedienung und der leichten Beschaffbarkeit und Auswechselbarkeit gleichmäßiger Schmierstellen besitzt. Es besteht aus drei in einer Ebene fest angeordnete Kugeln 1,2,3 (deren Dritte in der Abbildung nicht sichtbar ist), die das Führungslager vorstellen. Eine vierte Kugel 4 dient als Gleitkörper. Es handelt sich hier um eine "Dreipunktberührung"<sup>8)</sup>, die hohe spezifische Drücke und eine gute Reproduzierbarkeit der Schmierstellen bei großer Glattheit erlaubt. Die Druckverteilung in der Schmierstelle ist bei frischen Kugeln sehr verschieden - bedingt durch die Hertz'sche Abplattung - entsprechend einem Schmier spalt in der Praxis bzw. jeder realen Oberfläche. Die drei unteren Kugeln sind symmetrisch in einem Napf/angeordnet, der sich innerhalb eines Thermostaten 6 befindet. Die vierte Kugel 4, welche mit einem Windrad 7 versehen ist, läuft frei durch das Gegenlager 8 lose geführt im erwähnten Dreikugellager. Das Windrad 7 ist radial symmetrisch gefräst, durch zentrisch aufbringbare Gewichtsscheiben beliebig belastbar und wird durch zwei radial symmetrisch angeordnete Düsen 9 mit Luft angetrieben. Mittels eines Strömungsmessers oder eines Manometers kann der Luftstrahl so geregelt werden, daß entsprechend dem zu überwindenden Widerstand das Laufrad 7 einschließlich der Kugel 4 beispielsweise gerade in einer gleichmäßig langsamen Bewegung gehalten werden kann. Die Reibung im Gegenlager ist dabei vollkommen vernachlässigbar. Um das Rad in Bewegung zu setzen, ist zusätzlich eine von Hand aus mit einem Gummiball zu bedienende (in der Zeichnung nicht dargestellte Düse) vorgesehen. Die Messung wird praktisch so durchgeführt, daß durch Änderung der Strömungsgeschwindigkeit um 0,2 ltr./Min der gerade noch nicht gleichmäßig laufende Rotor (er soll etwa nach einer langsamen Umdrehung stehen

bleiben) in gleichmäßige Bewegung versetzt wird (verfolgt werden 2 - 3 volle Umdrehungen).

Folgende Fragen und Einflüsse wurden grundsätzlich untersucht:

Einfluß der:

- 1.) Reinigung der Schmierstellen
- 2.) Gleichmäßigkeit der Kugeloberflächen
- 3.) Änderung der geometrischen Form der Schmierstellen während der Messung (Verschleiß)
- 4.) Schmierfilmstärke
- 5.) Gasatmosphäre
- 6.) Änderung der Oberflächenstruktur der Schmierstelle durch den Schmierstoff
- 7.) Gleitart des Rotors
- 8.) Oberflächenrauigkeit des Werkstoffes, dazu kommen die unmittelbar gesuchten Größen
- 9.) Einfluß des Schmierstoffes
- 10.) Einfluß der Belastung
- 11.) Einfluß der Temperatur
- 12.) Einfluß der Art des Werkstoffes

(Punkt 12 ist nur der Vollständigkeit wegen angeführt, die Untersuchungen hierüber konnten noch nicht in Angriff genommen werden).

Es wird gezeigt, daß aus den durchgeführten Untersuchungen insbesondere der Punkte 4, 6, 9, 10 und 11 nennenswerte Ergebnisse erzielt wurden.





Beitrag für die Besprechung des Schmierstoff-  
ausschusses beim VDI.

M. Pfender, ABG/FI

Bericht über einige Verschleissversuche mit der  
Kantenanschliffprobe bei ungeschmierter und ge-  
schmierter Reibung.

Der Verschleiss eines Gleitlagers hängt neben dem Werkstoff-  
einfluss im wesentlichen von dem Schmierzustand ab, der zwischen  
Wellen- und Lageroberfläche vorhanden ist. Er sinkt bei reiner  
Flüssigkeitsreibung auf Werte, die vernachlässigbar klein sind ge-  
genüber den Werkstoffabtragungen, die bei Mischreibung, also min-  
destens teilweise ungeschmierter Reibung, eintreten. Diese beim La-  
gerlauf, beim Anfahren und Stillsetzen der Maschine vorzüglich  
auftretende Gleitart bestimmt fast ausschliesslich den Verschleiss  
des Lagers, wenn man vom trockenen Zustand bei völligem Oelmangel  
absehen will. Man hält nun eine Werkstoff-pärung für Welle und La-  
ger für besonders geeig-net, wenn diese mindestens zeitweise vorhan-  
dene Mischreibung unschädlich für Welle und Lager bleibt und mög-  
lichst rasch in eine reine Flüssigkeitsreibung übergeht. Abgesehen  
von Einflüssen des Schmiermittels, der Lagerbelastung, der Anfangs-  
rauhigkeit und der Gleitgeschwindigkeit wird der Verlauf dieses Vor-  
ganges auch davon abhängen, wie rasch die örtlich hervorragenden  
oft vom Schmierfilm freien kleinen Bezirke soweit abgeschliffen  
sind, bis bei vergrößerter Tragfläche und vermindertter Rauigkeit  
ein beständiger Schmierfilm zustande kommen kann.

Bei Versuchen sucht man, diese Grenze entweder durch stu-  
fenförmige oder stetig wachsend aufgebrachte oder abgenommene Be-  
lastung zu erfassen. Bei dem grossen Einfluss der Temperatur auf  
die Zähigkeit und Tragfähigkeit des Schmierfilmes und auf die Be-  
ständigkeit des Werkstoffes bedeutet aber die Aenderung der Gesamtlast  
eine störende und unliebsame Aenderung der Versuchsbedingung. Um  
dieser Schwierigkeit aus dem Wege zu gehen, wurde bei den Verschleiss-  
versuchen mit der Kantenanschliffprobe nach Bild 1 a die wirksame  
Gesamtlast  $P$  gleichgehalten, während die zunächst an die Quetsch-  
grenze der z.B. würfelförmigen Proberreichende Flächenpressung  $p$  mit  
fortschreitendem Verschleiss  $- \Delta h$  verhältnissgleich abnimmt. Bringt  
man die Kantenprobe in Linienberührung an die gekrümmte Wellen- oder  
ebene Scheibenoberfläche heran, so kann man über eine einfache Win-  
kel- Formabhängigkeit der Probe, die zweckmässigerweise eine einfa-  
che geometrische Gestalt (Quader, Würfel ( $a^2$ ), Kegel) hat, die mit  
zunehmenden Verschleiss  $- \Delta h$  sinkende Flächenpressung

$$p = \frac{P}{F} = \frac{P}{a \cdot 2 \Delta h}$$

ermitteln. Es ist dabei zweckmässig, den Verschleiss  $- \Delta h$  mit aus-  
reichender Genauigkeit in Abhängigkeit von der Laufzeit oder dem  
zurückgelegten Gleitweg  $s$  zu messen, da die Zuordnung der Werte  $- \Delta h$ ,  
 $p$  und  $s$  auch einen, wenn auch groben Vergleich mit den Vorgängen  
beim Abtragen der Rauigkeitsspitzen zulassen.

Rein Überlegungsmässig war nach Bild 1 b zu erwarten, dass  
z.B. bei trockener Reibung der Verschleiss  $- \Delta h$  bei der anfänglich  
hohen Flächenpressung  $p$  gross ist; bei wachsendem Gleitweg  $s$  und

mit dem Verschleiss sinkender Pressung  $p$  verzögert er sich mehr und mehr, sodass ein parabelförmiger Verlauf der Höhenabtragung von der Form  $\Delta h = s^x$  mit  $x < 1$  erwartet werden kann. Man würde dann feststellen, dass die Verschleissneigung  $-\Delta h / \Delta s$  oder die Verschleissgeschwindigkeit  $-\Delta h / \Delta t$  als die auf die Längen- ( $\Delta s$ ) oder Zeiteinheit ( $\Delta t$ ) bezogene Höhenabtragung ( $-\Delta h$ ) bei hohen Flächenanpressungen (1) grösser ist als bei niedriger Flächenpressung (2).

Nach Untersuchungen an vielen Stellen darf angenommen werden, dass wenigstens unter gleichmässigen Bedingungen bei trockener Reibung der Verschleiss dem Gleitweg verhältnissgleich ist. Eigene Versuche mit der in Bild 1 c dargestellten Probenform liessen, wenn man von der grösseren Verschleissneigung beim Einlauf (Formeinschliff) absieht, die gleiche Abhängigkeit erkennen. Man wäre also nach diesen Ergebnissen berechtigt, beliebige aber sich stetig ändernde Zwischenwerte  $p$  der Kantenanschliffprobe der entsprechenden Verschleissneigung  $-\Delta h / \Delta s$  zuzuordnen und sich dabei vorzustellen, dass jeder Zuordnung der in Bild 1 d dargestellten Art ( $-\frac{\Delta h}{\Delta s} = f(p) = \alpha$ ) ein stationärer Vorgang nach Bild 1 c (z.B.  $-\Delta h / \Delta s$ , bei  $p_1$ ) entspricht.

Ohne den mit dem Ausspannen und Wechseln der Proben, der Unterbrechung des Versuches oder mit veränderter Last verbundenen und nicht immer überprüfbareren Einflüssen unterworfen zu sein, könnte demnach die Kantenanschliffprobe Aufschluss über wichtige Vorgänge beim Verschleissvorgang geben. In einigen Beispielen sollen daher kurz einige damit gewonnene Ergebnisse aus Verschleissversuchen ohne und mit Schmierung beschrieben werden.

Eine aus 65 % Cu- und 27 % Zn-Pulver mit 6 % C (Graphit) bestehende Metallprobe, die durch Mischen der Pulver, Pressen, Sintern und Nachpressen bei Sintertemperatur gewonnen wurde, zeigt im Trockenauf auf einer im Einsatz gehärteten Welle bei einer Anpresskraft  $P$  das in Bild 1 e dargestellte Verschleissverhalten  $-\Delta h = f(s)$ . Der hohen anfänglichen Flächenpressung  $p$  bei noch kleinem  $-\Delta h$  entspricht die grosse Anfangssteilheit der parabelähnlichen Kurve, deren Ableitungswerte (die durch graphische Differenzierung gewonnenen Werte sind als gefüllte Kreisflächen angegeben)  $\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta s}$  gleich in Abhängigkeit von der jeweiligen, über die Beziehung  $p = f(\Delta h)$  bedingten Flächenpressung  $p$  aufgetragen ist. Bei der Beurteilung dieser Kurve ist es zweckmässig, darauf zu achten, dass sie dem Versuchsablauf entsprechend aus dem Gebiet hoher Flächenpressung und Verschleissgeschwindigkeit kommend nach einem Punkt in der Nähe des Achsenkreuzes ( $p = 0$ ;  $\alpha = 0$ ) hinstrebt. Ihr gekrümmter Verlauf zeigt nun deutlich den wachsenden Einfluss der steigenden Flächenpressung auf die Verschleissneigung dieser Metallprobe.

Die ausgeprägte Parabelform der Kurve  $-\Delta h = f(s)$  versprach in der doppellogarithmischen Darstellung eine noch klarer erkennbare Gesetzmässigkeit. Zwei Beispiele von Messingproben der gleichen Grundzusammensetzung ohne und mit Aluminium-Zusatz und mit 8 % Graphitbeimengung sind in Bild 2 in dieser Art wiedergegeben. Man sieht, dass die Reihe der Versuchspunkte bei logarithmischer Auftragung in einer geraden Linie liegen, deren Neigung durch bestimmte Exponentengrössen gekennzeichnet sind und die in diesem Falle Kennzeichnungswerte für das Verschleissverhalten der beiden Proben darstellen. Dass die mit Aluminium legierte Probe grösseren Verschleiss aufweist, ist wahrscheinlich dadurch bedingt, dass bei der etwas sauerstoffhaltigen Sinteratmosphäre das Aluminium oxydierte und die beobachtete Kiefenbildung der Welle, die ihrerseits wieder verschleissfördernd wirkte, auf die eingeschlossenen harten Aluminiumoxyde zu-

rückzuführen ist. Die Verschiedenheit der Exponenten (Gabelung der Kurven) weist darauf hin, wie unterschiedlich bei längerer Beanspruchungsdauer die bei gleichem Verschleiss -  $\Delta h$  zurückgelegten Gleitwege sein können.

Einige dieser Versuche ohne und mit Schmierung wurden nach der in Bild 1 b, d und e geschilderten Art ausgewertet und die Verschleissneigung  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Flächenpressung  $p$  nun ebenfalls in doppellogarithmischen Koordinaten dargestellt. Nach der Kenntnis, der bei gleichbleibender Pressung  $p$  geradlinigen Abhängigkeit des Verschleisses vom Gleitweg (Bild 1 c) und der Geraden in Bild 2 überrascht es nicht mehr, dass beim Trockenlauf auch diese Beziehung durch gerade Linien zum Ausdruck kommt. Wieder ist der Unterschied der beiden Messingproben ohne und mit Aluminium-Gehalt zu erkennen. Ein als Bremswerkstoff empfohlener Rotguss mit Blei-Gehalt zeigt einen sehr starken Einfluss der Flächenpressung auf die Verschleissneigung.

Wie gross aber der Einfluss einer auch nur mageren Docht-schmierung mit kaum fühlbarem Schmierfilm auf der Welle auf die bei gleicher Flächenpressung sich einstellende Verschleissneigung ist, zeigt die rechte Kurvengruppe und im besonderen die der gleichen Probe. (Ms 63 + 8 % G) zugeordneten und dick ausgezogenen Linien. Danach geht der Verschleiss beim Vorhandensein sogar einer mangelhaften Schmierung im Bereich technisch verwendbarer Pressungen ( $p = 10 - 300 \text{ kg/cm}^2$ ) um 3 bis 4 Grössenordnungen zurück.

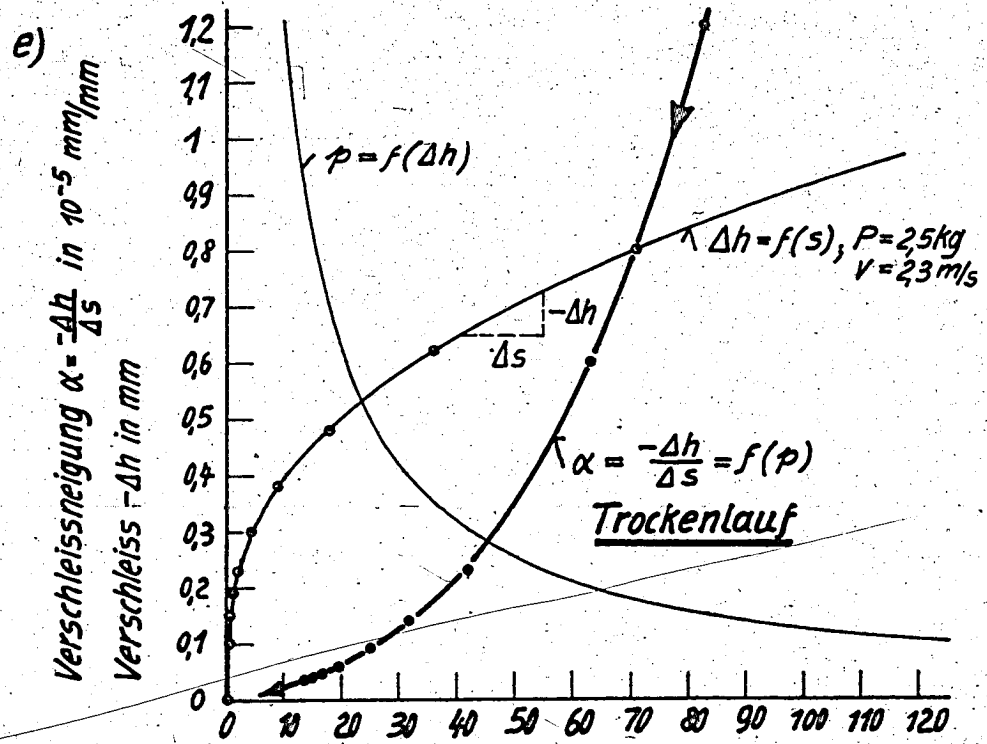
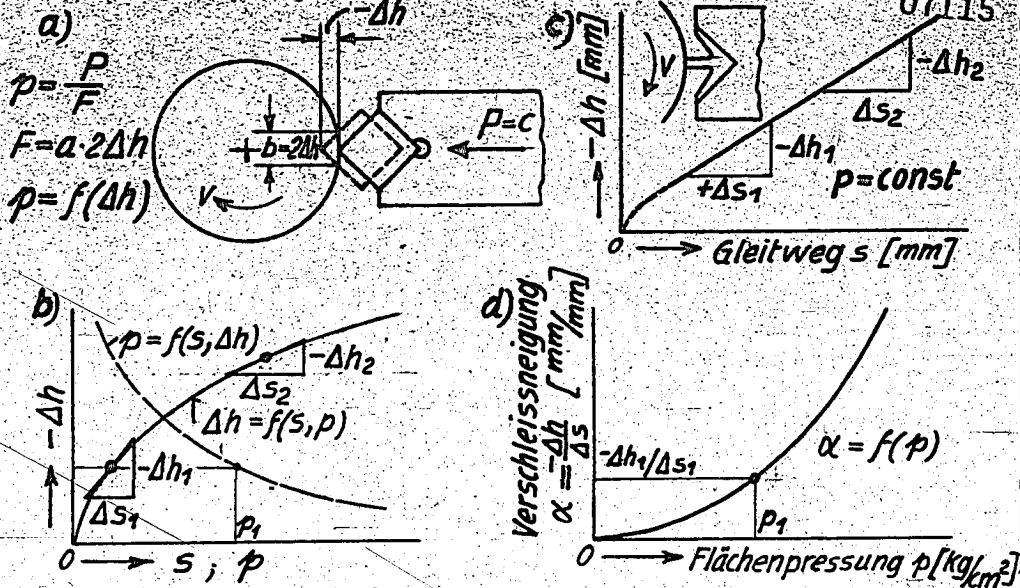
Bei den beiden ebenfalls auf pulvermetallurgischem Weg hergestellten Zinkproben fällt weiter auf, dass sie in der Darstellung nicht mehr geradlinig verlaufen, sondern über Knick oder Krümmung einem Grenzwert der Flächenpressung  $p$  zustreben, unterhalb dessen beim Vorhandensein eines Schmierfilmes ein nennenswerter Verschleiss nicht mehr stattfindet. Deutlicher noch als bei diesen Proben ist die Erscheinung nach Bild 4 bei einer Probe gleicher Art aber mit 3 % Graphit-Zusatz erkennbar. Beim Versuch nimmt der Verschleiss -  $\Delta h$  (rechte Darstellung) zunächst in der gewohnten Weise zu. Nach einiger Laufzeit von etwa 400 Sekunden weicht die Kurve von der anfänglichen Geraden ab und biegt bei den vorliegenden Versuchsbedingungen in einen Grenzwert für -  $\Delta h \approx 1,8 \text{ mm}$  ein. Die in diesem Fall als Verschleissgeschwindigkeit -  $\Delta h / \Delta t$  abgeleitete Verschleissgrösse zeigt in Abhängigkeit von der Flächenpressung  $p$  (linke Darstellung) die gleiche Abweichung. Offenbar gilt für den oberen Ast der Kurve eine andere Gesetzmässigkeit für das Verschleissverhalten als für den unteren Ast. Man wird kaum fehlgehen, wenn man annimmt, dass dieser Knick den "Ausklippunkt" darstellt, an dem der Schmierfilm in der Lage ist, die Last  $F$  aufzunehmen, ohne wie vorher wenigstens teilweise noch auf das metallische Tragen der Gleitflächen angewiesen zu sein. Ob aus dieser Erscheinung Möglichkeiten zur Prüfung von Schmiermitteln abgeleitet werden können, müssten weitere Untersuchungen noch zeigen. Bei sorgfältig geeichten Proben und Wellenmaterial scheinen Aussichten zu bestehen.

Soll die Annahme zutreffen, dass unter und über der Knickstelle, also bei einer Krümmung der Kurven -  $\Delta h = f(s)$ , verschiedenartige Reibverhältnisse vorliegen müssen, weil sich sonst das in diesen Bereichen verschiedenartige Verschleissverhalten nicht erklären

lässt, so muss sich das auch in dem Reibbeiwert als der auf die Anpresskraft  $P$ -bezogenen Mitnahmekraft  $Q$  äussern. Die an der noch nicht völlig ausgerüsteten Vorrichtung durchgeführten Versuche, erlaubten zwar die unmittelbare Messung der Reibmitnahme nicht, sie konnte aber nach Bild 5 wenigstens qualitativ in der gemessenen mittleren Probentemperatur im Schwerpunkt des Würfels dargestellt werden. Aus zwei Verschleissversuchen mit einer Probe aus Sondermessing, die nacheinander auf einer harten und mit einer anderen Kante auf einer weichen Welle lief, wurden die beiden oberen Verschleisskurven gewonnen. Die eine (gestrichelt, harte Welle) zeigt einen hohen Anfangsverschleiss, der zuerst allmählich nachlässt (Abweichung von der Geraden) und bei einer ziemlich ausgeprägten Verschleissgrösse (oder Flächenpressung) schnell auf nahezu Null abfällt (wagerechter Verlauf der Kurve). Die Probe auf der weichen Welle (ausgezogen) zeigt dagegen geringeren Anfangsverschleiss, der aber auch nur langsam abnimmt und zögernd in den Nullwert (Horizontalverlauf) einmündet. Mit dem höheren Anfangsverschleiss und der dadurch bedingten Verschleissleistung wäre eine stärkere Wärmeentwicklung also auch eine Temperaturerhöhung der Probe zu erwarten, die wenigstens z.T. in den Wärmestrom eingeschaltet ist. Diese höhere Temperatur müsste dann mit fortschreitendem Abweichen von der Geraden absinken und nach dem Einmünden in die Wagerechte wegen des dann fast allein wirkenden Schmierfilmes auf einem niedrigen Werte gleich bleiben. Der Verlauf der gestrichelten Temperaturkurve, die unten rechts dargestellt ist, unterstützt diese Vermutung. In der gleichen Weise kann der Zusammenhang zwischen Verschleissverhalten und Probentemperatur beim Versuch mit der weichen Welle aufgedeckt werden. Dem allmählicheren Uebergang entspricht ein weniger ausgeprägter Temperaturunterschied und der nach grossem Gleitweg noch anhaltende Verschleiss drückt sich in dem erhöhten und unruhigen Temperaturverlauf aus. So kann dieses Ergebnis wenigstens als eine grobe Bestätigung der Annahme einer entweder plötzlich oder allmählich wirksam werdenden und nicht mehr auf metallische Berührung angewiesenen Ölfilmgleitung aufgefasst werden.

Einige Beispiele, die aus Versuchen dieser Art stammen, sind daher zum Schluss noch in Bild 6 a und b für Zink- und Messingproben zusammengestellt. Proben, die auf pulvermetallurgischem Wege erzeugt wurden und mit verschiedenen hohen Graphitzusätzen versehen sind, werden mit den massiven Proben verglichen. Es zeigt sich, dass ausgeprägte Grenzbelastungen erkennbar werden, bei denen für die Mehrzahl der Proben die Verschleissneigung plötzlich nach Null geht. In einigen Fällen, und zwar auffallenderweise bei beiden Massivproben ist dieser Uebergang mit einem vorübergehend gesteigerten Verschleiss verbunden. Ob dies durch eine Art "Rubbeln" bedingt ist, das über die oszillographische Aufnahme der Reibmitnahme und des Anpressdruckes festgestellt werden sollte, konnte wegen der inzwischen erfolgten Zerstörung der Apparatur nicht mehr nachgewiesen werden. Dass aber die Zinkprobe mit 10% C-Gehalt nicht einmal sehr geringen Beanspruchungen gewachsen war, lag in der ausserordentlich geringen Festigkeit und der hohen Brüchigkeit des Probenwerkstoffes begründet, der sich wegen dieser schlechten Eigenschaften nur mühsam zu der gewünschten Würfelform bearbeiten liess.

Es besteht die Absicht, diese Vorversuche später mit einer neu hergestellten Prüfeinrichtung fortzusetzen, da die bisherigen Ergebnisse zu einer Wiederaufnahme der Untersuchungen ermutigen.



Welle: ECN35hart    Gleitweg  $s$  in  $10^6$  mm oder in km

Probe: Ms 63+6%Cr    Flächenpressung  $p$  = in  $\text{kg/cm}^2$   
 gepresst u. gesintert

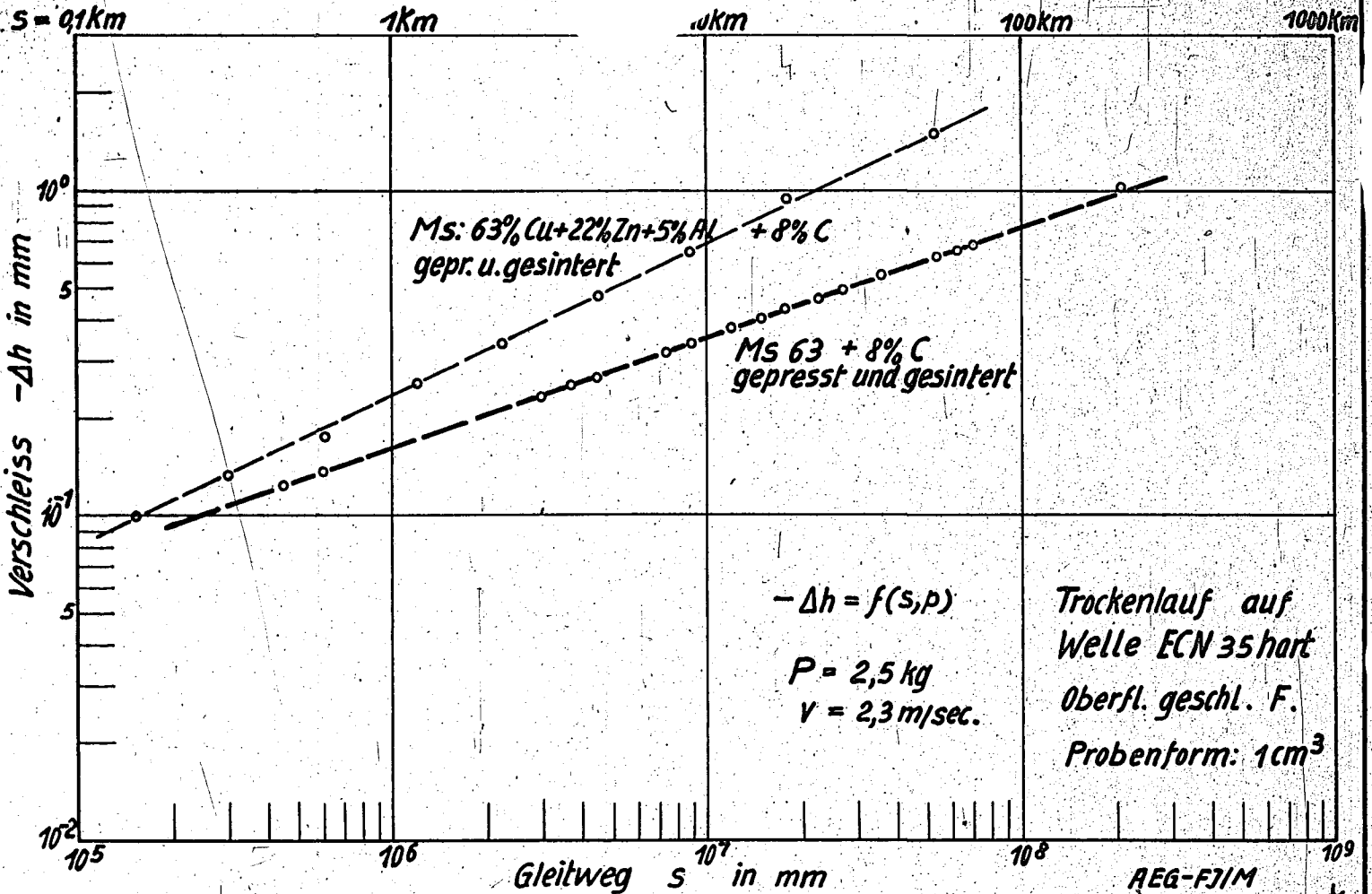
REG-FJM  
 26.7.44

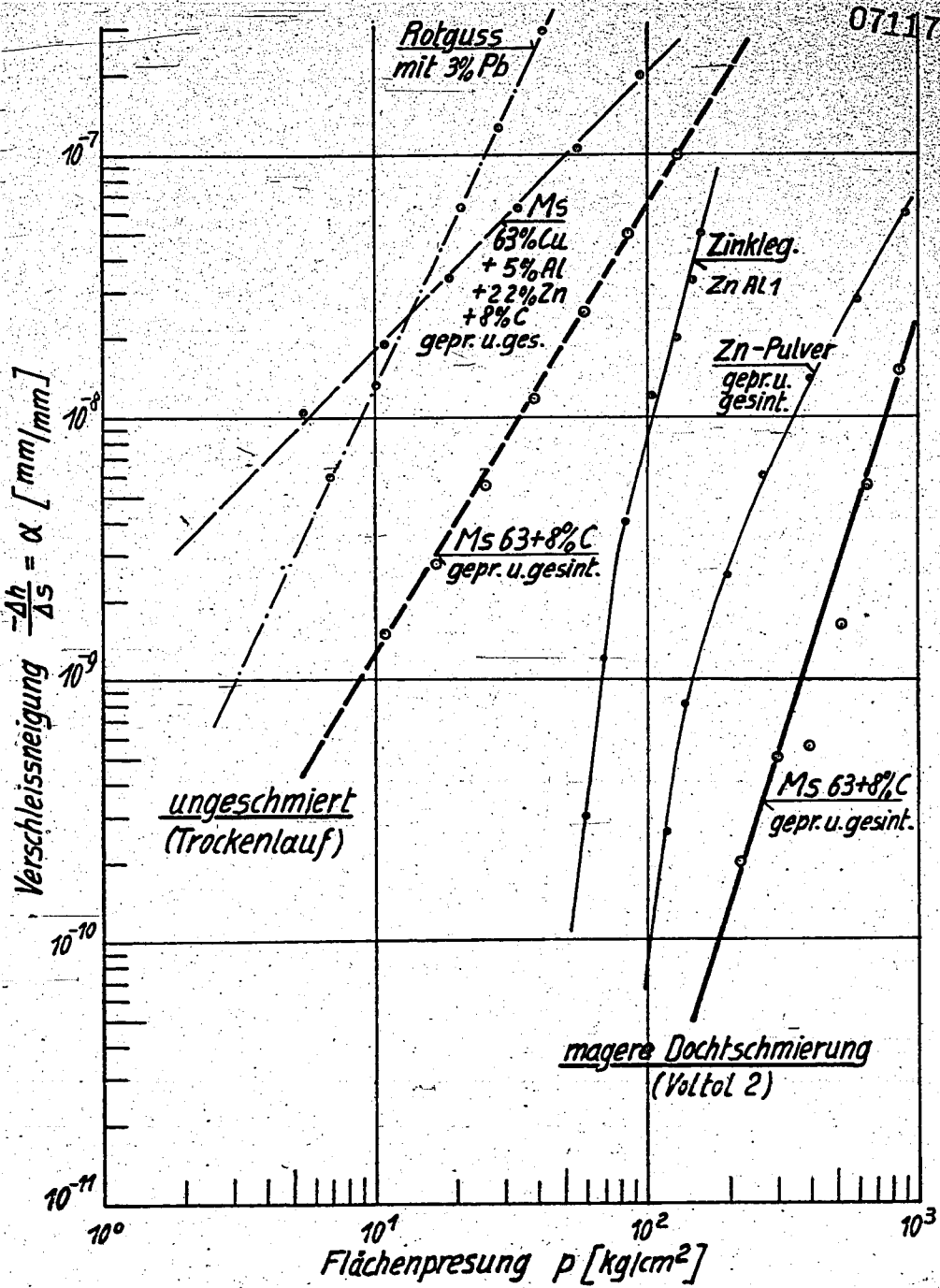
Verschleissversuch mit der Kantenanschliffprobe

Bild 1

Bild 2

Verschleissversuche mit der Kantenananschlißprobe





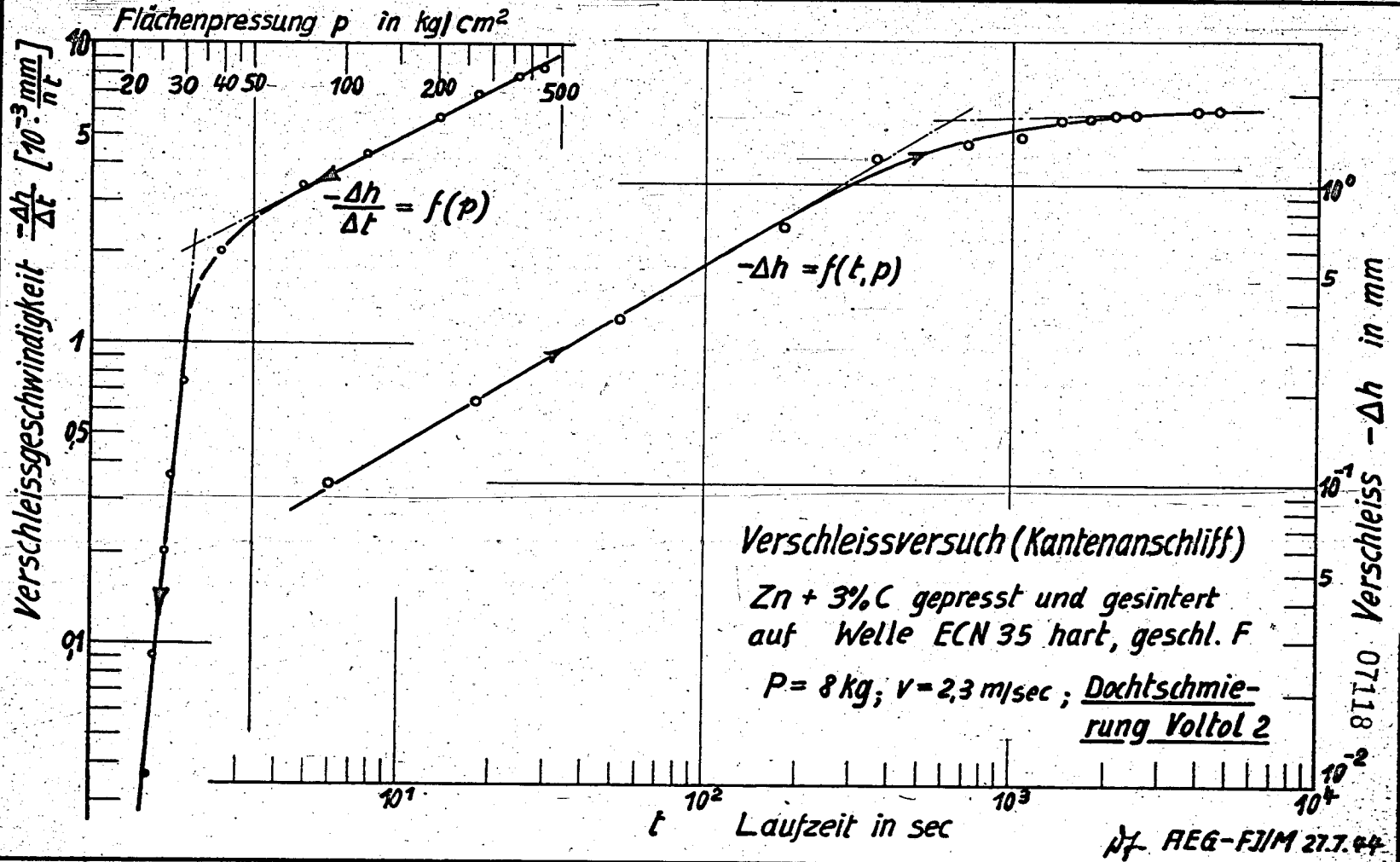
Abhängigkeit der Verschleissneigung von der Flächenpresung  
(Kantenanschliffprobe)

Wellenwerkstoff: ECN 35 hart  
Gleitgeschwindigkeit  $v = 2,3 \text{ m/s}$

REG-FJ/M  
25.7.44. *df*

Bild 3

Bild 4

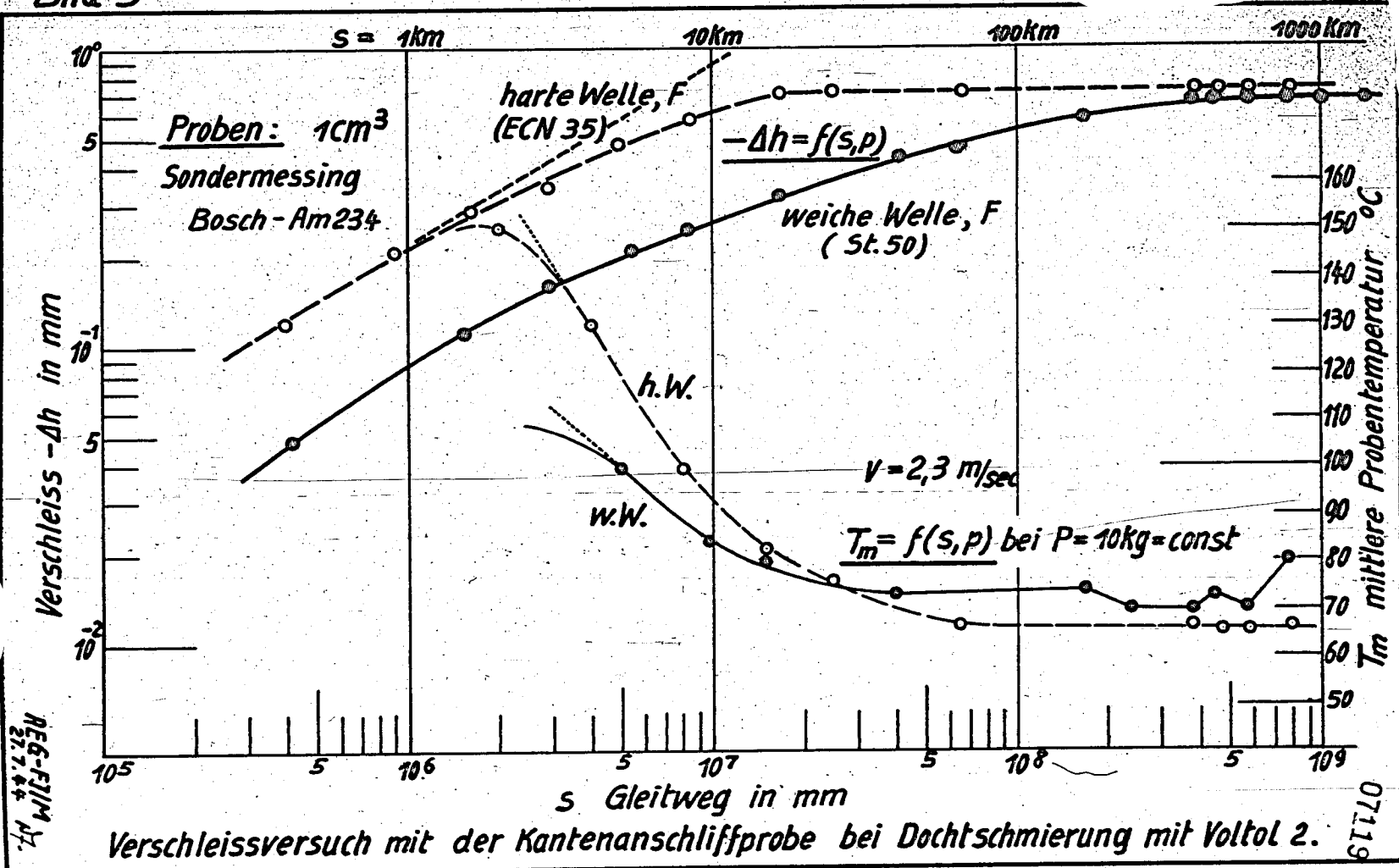


04 704 A 2000 5 44 E 1000 Gg/ndf/duen/BAB



Schub 7104 A, 10000, 4, 4, E 1000 Gepefil durch BIV.

**Bild 5**



**Bild 6**  
**Verschleissversuch (Kantenanschliffprobe)**

Welle: ECN35 hart, geschliffen F;  $P=10\text{ kg}$ ;  $v=2,3\text{ m/sec}$

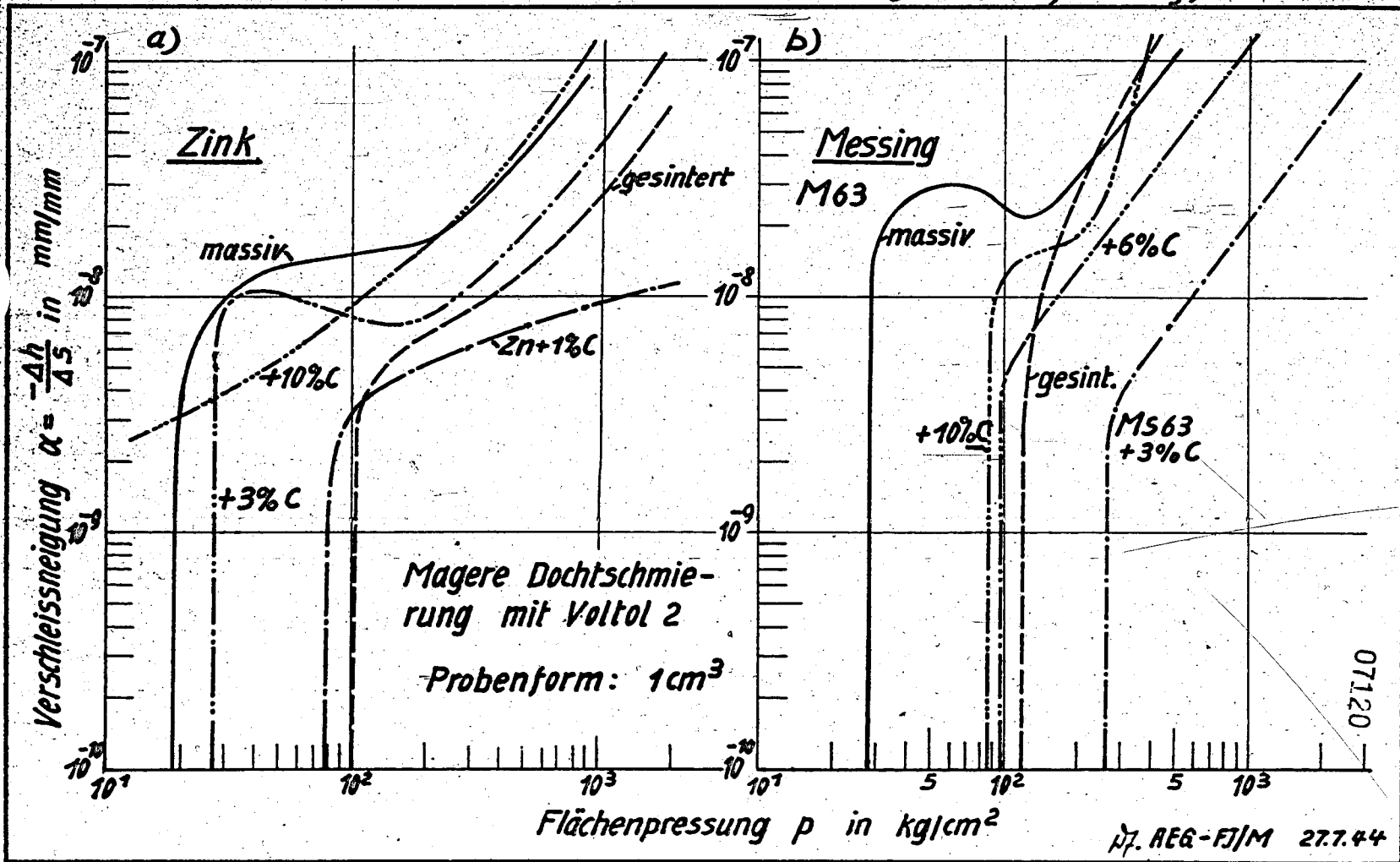


Photo-Nr. 26

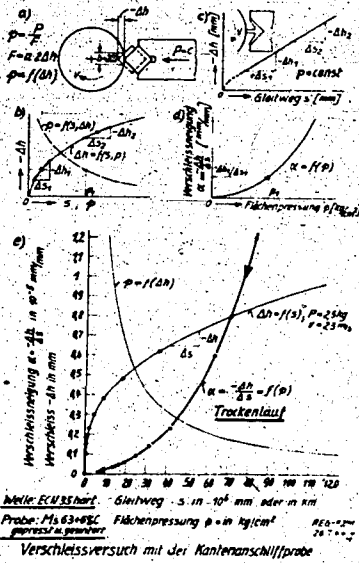


Abb. 1

Photo-Nr. 27

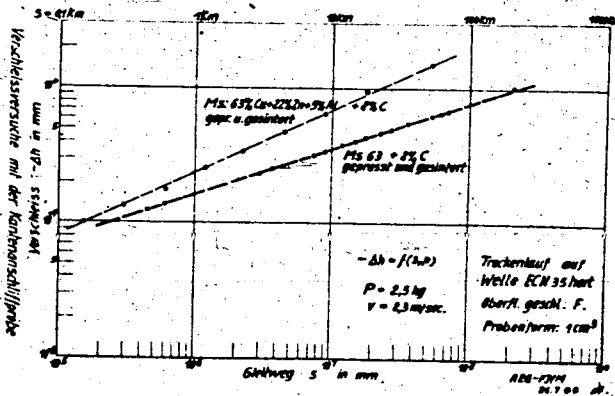


Abb. 2



Photo-Nr. 30

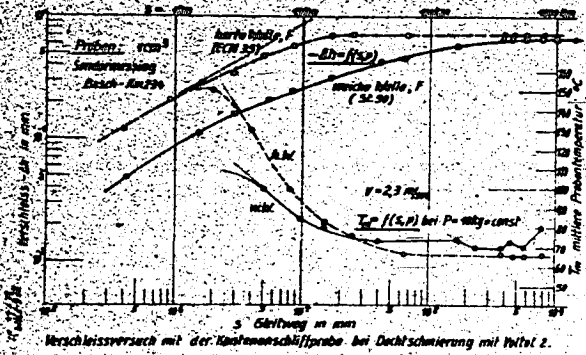


Abb. 5

Photo-Nr. 31

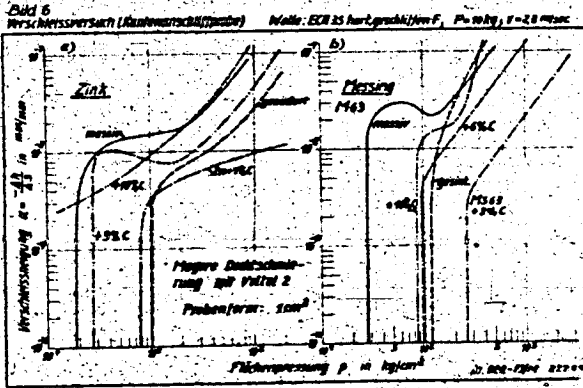


Abb. 6

Beitrag zur Schmier-technischen Tagung  
Dresden 1944

Dr. Seelich

Zur Frage der Bekämpfung des Schäumens von Schmierölen

Schaumbildung wird bei allen Ölen immer dann auftreten, wenn im Öl gelöste Gase (vor allem  $\text{CO}_2$ ) infolge eines starken Druckabfalles in größeren Mengen frei werden, z.B. bei raschem Anstieg von Flugzeugen in größeren Höhenlagen; ebenso auch in Flugmotoren, kurz nach dem Start, wenn - wie es bei "Kaltstart" üblich ist - dem Öl Treibstoff zugesetzt worden war und dieser verdampft.

Abgesehen davon gibt es aber Öle, die wenig schäumen und andere, die stark schäumen, oder, genauer gesagt, solche, deren Schaum wenig stabil ist, und andere mit relativ stabilem Schaum. Für die Leichtigkeit der Schaumbildung ist die Grenzflächenspannung Öl/Gasphase maßgebend; die viel wichtigere Stabilität der Schäume wird durch andere Faktoren bedingt. Erfahrungsgemäß ist die Voraussetzung für Schaumbeständigkeit die Ausbildung von Adsorptionsschichten von relativ großer Festigkeit oder Zähigkeit. Die in Ölen vorhandenen polaren Verbindungen, wie z.B. höhere Fettsäuren, kommen für eine Bildung derartiger Schichten nicht in Frage, da dieselben an der Grenzfläche eines polaren Lösungsmittels gegen eine Gasphase nicht adsorbiert werden. Wie die Theorie erwarten ließ, erniedrigen derartige Stoffe nicht die Grenzflächenspannung an der Grenzfläche eines apolaren Öles gegen Luft, noch bewirken sie für sich allein eine Änderung der Schaumcharakteristik.

Es wurde nun bereits vor längerer Zeit festgestellt, daß Öltropfen auf einer Metallplatte, welche mit einer Adsorptionsschicht polarer Moleküle bedeckt ist, nicht notwendigerweise spreiten, sondern meist einen positiven Randwinkel zeigen. Ob Spreiten eintritt oder nicht, hängt augenscheinlich von der jeweiligen Struktur dieser Adsorptionsschicht ab und erst sekundär von deren Unterlage. Wenn sich aber bei der beschriebenen Versuchsanordnung ein positiver Randwinkel ausbildet, dann muß ein solcher zwangsläufig auch bei in Öl befindlichen

- 2 -

Luft- oder Gasblasen auftreten, an der Grenzfläche gegen einen mit einer analogen Adsorptionsschicht bedeckten festen Körper. Damit ist aber die Voraussetzung gegeben, daß - wie bei den üblichen Flotationsvorgängen - feste Teilchen an Gasblasen adsorbiert werden. Die polaren Stoffe wirken dann als "Sammler".

Die experimentelle Prüfung dieser Annahmen führte zu folgenden Ergebnissen:

Leitet man durch ein Kohlenwasserstofföl, welches frei von polaren Verbindungen ist, Luft, so bilden die aufsteigenden Luftblasen einen relativ unstabilen Schaum. Der Zusatz von polaren Verbindungen (höhere Fettsäuren u. Alkohole) beeinflusst weder die Blasengröße noch die Schaumstabilität.

Metall- oder Kohlepulver wird bei Abwesenheit polarer Stoffe nicht an den Luftblasen adsorbiert und beeinflusst nicht die Schaumbildung oder Schaumstabilität. Damit Adsorption der festen Teilchen eintritt, muß ein "Sammler" zugegen sein. Als Sammler wirkt z.B. Stearinsäure, nicht aber die ungesättigte Ölsäure. Bei Gegenwart geringer Mengen an Stearinsäure werden die Luftblasen von den festen Teilchen umhüllt; diese Teilchen stabilisieren die Gasblasen und es entsteht dichter Schaum von großer Haltbarkeit. Damit erscheint die Bedeutung der Anwesenheit fester Teilchen (Metallischer Abrieb, Ölkohle usw.) für die Schaumbildung und für die Schaumstabilität erwiesen, ebenso aber auch die Bedeutung der physik.-chemischen Struktur der vorhandenen polaren Verbindungen.

Versuche sind im Gange, um die Abhängigkeit des Sammlereffektes, bzw. der Schaumbildung, von der Anwesenheit und Struktur polarer Verbindungen festzustellen und um nachzuprüfen, in welchem Maße dieser Effekt durch verschiedene Zusätze, wie z.B. durch Zugabe ungesättigter Fettsäuren beeinflusst bzw. verhindert werden kann.

Beitrag zur Schmier-technischen Tagung      Dipl.-Ing. Halder  
Dresden 1944

Beobachtungen bei Verschleiß- und  
Reibungsversuchen

Auf Grund von Versuchen über Metallabtrag konnte festgestellt werden, daß sich durch Veränderung der Rauigkeit nicht nur die Menge des gemessenen Abriebes verändert, sondern daß hierbei in der Gütereihenfolge eine Verschiebung eintreten kann. Weiterhin wird gezeigt, daß zwischen Metallabtrag und Fressen ein Zusammenhang besteht. Je größer der Metallabtrag, desto geringer ist die Neigung zum Fressen.

Versuche mit Schmierstoffzusätzen zu Motorenölen lassen erkennen, daß der Zusammenhang zwischen Praxis und Versuch in Prüfgeräten nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen befriedigend ist. Außer der Anwendung annähernd gleicher Werkstoffe scheint besonders die Einschaltung einer der Praxis entsprechenden Temperatur Grundbedingung für eine gute Übereinstimmung zu sein.



**Praktische Bestätigung zur Grenzflächentheorie  
aus dem Kolbenmaschinenbau durch die Wasser-Grafit-Schmierung.**

Kurze Inhaltsangabe.

Einleitung:

Es wird Bezug genommen auf die Ausführung von Herrn Dr. Vogelponl über Wasser-Grafit-Schmierung und die bisher vorliegenden praktischen Ergebnisse bekannt gegeben.

Um diese Ergebnisse besser beurteilen zu können, wird die Wasser-Grafit-Mischung in Bezug auf gewollte Schmiereigenschaften und auf bisher verwendete Zusammensetzung erläutert.

Es wird auf die Forderungen an einen guten Schmierstoff eingegangen und zwar:

- 1.) Herabsetzung der Reibung auf ein Minimum.
- 2.) Zuverlässige Wärmeabführung.
- 3.) Vermeidung jeglicher schädlicher Einflüsse.

Bei der WG-Schmierung sollen diese Forderungen erfüllt werden:

- Zu 1) durch Grafit in kolloidaler Form.
- Zu 2) durch Wasser als reines Destillat oder Kondensat.
- Zu 3) einmal durch Zusatz von Bohrröl bezw. entsprechendem Austauschstoff H<sub>2</sub>O oder Natrium-Nitrit, Antiferrit usw. das andere Mal durch Grafit selbst.

Zusätzlich soll der geringe Fettgehalt des Bohrröles die Haftfähigkeit des Grafites erhöhen.

Auswertung:

A) Erfahrungen mit den Grundstoffen der WG-Schmierung:

- 1.) Grafit muß praktisch rein sein und unbedingt kolloidalen Charakter haben, sonst Absetzungen und Ausflockungen.
- 2.) Wasser soll möglichst reines Destillat oder Kondensat sein. Besonders schädlich wirkt Säure. PH-Werte unter 6,5 sind auf jeden Fall zu vermeiden, da einmal die Stabilität des kolloidalen Grafites zerstört, das andere Mal das Bohrröl wie jedes andere Öl zersetzt wird. Alkalien sind weniger schädlich, zusätzlich ein pH-Wert bis zu 8. Kesselsteinbildner dürfen nicht vorhanden sein, da Wasser verdunstet. Verdunstungsmenge bei einer etwa 900 PS-Dampfmaschine 3-4 Liter stündlich bei einer Gesamtfüllung von 700-800 Liter.

- 3.) Da es sehr viel Bohrröl auf dem Markt gibt, die Versuche aber vorläufig nur mit Bohrröl Shell M 2 durchgeführt worden sind, wird vorläufig nur diese Ölsorte eingesetzt. Versuche laufen auch mit dem Austauschstoff H<sub>2</sub>O der IG-Parben mit Erfolg.

**B) Erfahrungen bei der Umstellung von Maschinen, insbesondere bei der Entölung:**

Größter Wert ist auf weitgehendste Entölung der umzustellenden Maschine zu legen. Wenn diese durch Öffnen sämtlicher Lager und Auswaschen mit Benzin und Benzolen nicht möglich ist, dann hat sich bisher folgende Reinigungsmethode am zweckmäßigsten erwiesen:

- 1.) Die Maschine wird durch Öffnen des Ablaufes von dem an der tiefsten Stelle angesammelten Öl befreit.
- 2.) Durch Ausblasen mit Druckluft werden Ölleitungen, Öltaschen usw. weitgehendst ausgeblasen.
- 3.) Durch stundenlanges Spülen mit heißem Wasser, das im Verhältnis 3 zu 1 P. 3 zugesetzt erhält (Temperaturen möglichst 60-80°) wird versucht, die letzten Spuren des alten Maschinöles zu beseitigen.
- 4.) Durch kräftiges Durchspülen mit reinem heißem Wasser muß das P 3 aus der Maschine entfernt werden.
- 5.) Mit einer WG-Mischung wird dann mehrere Stunden lang beim langsamen Drehen der Maschine ein Vorgrafitieren durchgeführt.
- 6.) Dieses Vorgrafitieren wird verstärkt durch langsames Einlaufen der Maschine.

**C) Bisher versuchsweise umgestellte Maschinen mit Angabe der Lagerwerkstoffe und Lagerbelastungen:**

- 1.) Liegende Einzylinder-Kolbenschieber-Dampfmaschine im Werk Borsig. Versuchsdauer etwa 1 Jahr, Laufzeit etwa 650 Stunden.
- 2.) Gleiche Maschine unter Aufsicht des Herrn Ober-Studienrat Bouché in der Beuthschule Berlin. Versuchsdauer etwa 8 Monate. Versuch mußte wegen Fliegerschaden abgebrochen werden. Maschine hat über 2 1/2 Millionen Umdrehungen gemacht.
- 3.) Gleiche Maschine unter Aufsicht von Herrn Dr. Vogelpohl in der Technischen Hochschule Berlin, jedoch nur mit etwa 1/2 Drehzahl. Versuchsdauer etwa 1 Jahr. Betriebsstunden etwa 400.
- 4.) Liegende Einzylinder-Schieber-Maschine in der Beuthschule, die von Tropfölschmierung auf Umlaufschmierung umgestellt wurde. Versuchsdauer etwa 4 Wochen, mußte wegen Fliegerschaden unterbrochen werden.
- 5.) Liegende Einzylinder-Kolbenschieber-Dampfmaschine im Rud. Virchow-Krankenhaus, umgestellt am 8.1.44 hat dann den normalen Betrieb bei voller Belastung während der Heizungsperiode durchgeführt. Versuchsdauer etwa 4 Monate. Betriebsstunden: 630.
- 6.) SO<sub>2</sub>-Kompressor im Rud. Virchow-Krankenhaus. Versuchsdauer etwa 3 Wochen. Betriebsstunden etwa 50. Versuch mußte abgebrochen werden, da SO<sub>2</sub>-Dämpfe in das Wasser traten und die Stabilität der Mischung verminderten.

- 7.) Div. Umwälzpumpen bzw. Gassauger im Gaswerk Mariendorf. Von Tropfölschmierung auf Umlaufschmierung umgestellt. Seit etwa 4 Monaten wird normaler Betrieb mit langzeitigen Unterbrechungen durchgeführt.
- 8.) Stehende Verbund-Kapsel-Dampfmaschine in der Staatlichen Ingenieurschule Magdeburg. Versuchszeit etwa 14 Tage. Laufzeit etwa 50 Stunden. Versuch musste unterbrochen werden, da Maschine nur während der Heizungsperiode läuft.
- 9.) Liegende Zweikurbel-Verbund-Ventil-Dampfmaschine im Wasserwerk Tiefwerder. Dauer des Versuches etwa 1 Monat. Laufzeit etwa 150 Stunden. Versuch musste abgebrochen werden, da sich Ölleitungen der Maschine verstopften, und zwar durch mangelhafte Entölung. Maschine ist vorläufig wieder auf Ölschmierung umgestellt, da sie dringend gebraucht wird. Versuche werden im Herbst dieses Jahres fortgesetzt.
- 10.) Liegende Zweikurbel-Verbund-Ventil-Dampfmaschine im Wasserwerk Lichtenberg. Versuch läuft seit etwa einem Monat. Durch die Umstellung auf Ölemulsionsschmierung für die Zylinder ist seit etwa 2 Wochen eine Unterbrechung des Betriebes dieser Maschine erfolgt.
- 11.) Liegende Einzylinder-Ventil-Dampfmaschine bei den Rüttgerwerken Erkner. Maschine hat nach gründlicher Entölung den gesamten geforderten Kraftbedarf des Werkes übernommen. Läuft seit Mitte Juni mit kurzen Unterbrechungen 20 Stunden täglich. Maschine hat nach der Umstellung auf WG-Schmierung im Gegensatz zu den anderen Maschinen durch Brandschaden nicht gelitten.
- 12.) Div. Vakuumpumpen und Kompressoren der Firma Schering. Versuch läuft seit etwa 2 1/2 Monaten. Maschinen werden täglich eingesetzt und laufen unter den normalen Betriebsanforderungen.
- 13.) Werkzeugmaschine (Drehbank) bei den Argus-Motorenwerken mit kleinstem Spindellagerspiel (etwa 0,05 mm). Maschine ist über das Einlaufen nicht hinausgekommen, da mehrmals Lager sich festsetzten. Grund: mangelhafte Entölung der Maschine und wahrscheinlich für die WG-Schmierung zu kleines Lagerspiel.
- 14.) Werkzeugmaschine (Drehbank) bei der Firma Rheinmetall-Borsig. Versuch läuft seit etwa 3 Monaten bei täglich 10-stündigem Betrieb.

D) Bisher vorliegende Erfahrungen an den umgestellten Maschinen:

- 1.) Maschinen 1) - 5) sind ohne Schwierigkeiten angefahren und im Betrieb gelaufen. Bei der Maschine 3) wurde versuchsweise HÖ eingesetzt, das seit etwa 6 Wochen ebenfalls anstandslos arbeitet.

Es wird kurz auf die einzelnen in der Maschine befindlichen Lager eingegangen, wobei auch der Erfolg bei schwingenden Zapfen, z.B. Kreuzkopfszapfen, Achsreglerzapfen usw. besonders erwähnt wird.

Bei Maschine 5) wurde nach etwa 3-monatiger Betriebszeit festgestellt, dass Ölleitungen zum Excenter verstopft waren.

Grund, der durch Ausbau und Analyse im Laboratorium festgestellt wurde, war, daß Maschinenöl in diesen Leitungen war. Es wurde fernerhin festgestellt, daß Richtmeister diese Leitungen nicht gereinigt hatten.

- 2.) Maschine 6). Hier wurde die Erfahrung gemacht, daß Säure bei der WG-Schmierung ausserordentlich gefährlich ist. Es ergibt sich somit eine gewisse Einschränkung in dem Gebrauch der WG-Schmierung.
  - 3.) Umstellung 7) hat bisher, obwohl lange Betriebsunterbrechungen aus Betriebsgründen notwendig waren, keine Schwierigkeiten gebracht.
  - 4.) Umstellung 8) ist besonders interessant, da es ein Schnellläufer ist. Nach einer gewissen Zeit zeigte sich Verstopfung des Ölfilters. Festgestellt wurde, daß auch hier die Entölung nicht genügend durchgeführt wurde. Im allgemeinen kann man auf Filter verzichten, besonders dann, wenn bei Druckumlaufschmierung ein grösserer Sammelbehälter vorhanden ist.
  - 5.) Umstellung 9) brachte den ersten Warmläufer. Es zeigte sich, daß gerade bei der WG-Schmierung sich rechtzeitig Warnmerkmale beim Versagen der Schmierung einstellen,
    - a) Temperatur der Lager nimmt langsam zu. Dauer bis zum Freisen etwa 20 Betriebsstunden.
    - b) Zu grosser Ölinhalt in der WG-Schmierung macht sich durch Austritt von Paste bzw. Nudeln an den Lagerstellen rechtzeitig bemerkbar.
    - c) Die sonst so gefürchteten Freier von Gußeisen auf Gußeisen wirken sich wesentlich harmloser aus als bei Ölschmierung.
  - 6.) Umstellung 10), 11) und 12). Die Maschinen sind bisher anstandslos gelaufen.
  - 7.) Umstellung 13) war ein Vorversuch, um festzustellen, ob auch die Schmierung für Werkzeugmaschinen geeignet ist. Von eigentlichen Erfahrungen kann man noch nicht sprechen. Hier müssen die Versuche noch fortgesetzt werden. Diese Umstellung steht im Gegensatz zu der Erfahrung der Umstellung 14) Werkzeugmaschine bei Borsig.
  - 8.) Umstellung 14) läuft bis heute, allerdings ist das Spindel-lagerspiel grösser als bei den Argus-Motorenwerken. Geschätzt wird etwa 0,1 mm. Anfangs waren Roststellen an den Zahnrädern zu bemerken. Die Korrosionen wurden aber ganz erheblich geringer als noch Natrium-Nitrit zugesetzt wurde.
- B) Allgemeine Erfahrungen mit den verschiedenen Schmierungssystemen und mit der Verdunstung des Wassers.
- Festgestellt wurde, daß das Schmiermittel eine bestimmte Fließgeschwindigkeit haben muß, damit zuverlässig Verstopfungen vermieden werden. Verwendung von Tropföthern bekannter Ausführung machen wegen des Nadel-Ventiles Schwierigkeiten, daher wurden bisher sämtliche Maschinen mit Tropfschmierung

ausgebaut auf Umlaufschmierung, bei der möglichst kleine Durchlässe in den Leitungen vermieden werden müssen. Über die Verdunstungsmenge liegen noch keine einwandfreien Zahlen vor. Im allgemeinen kann man, wie der Fall Rütgerswerke Erkner gezeigt hat, bei einer 800-pferdigen Maschine mit einer Verdunstung von 3-4 Litern in der Stunde rechnen.

Wichtig ist die Ergänzung, die in einer möglichst schwachen Konzentration eingesetzt werden muß, um eine Anreicherung des Grafites und des Bohróls zu vermeiden. Es werden nachfolgend die Zusammensetzungen des Schmiermittels bekannt gegeben:

a) für das Eingrafitieren:

- 100 Teile Wasser-Destillat oder Kondensat,
- 1 Teil Hydro-Kollag 300 A,
- 1 Teil Bohról Shell M 2,

b) für die ersten 50 Betriebsstunden Ergänzung mit

- 100 Teile Wasser-Destillat oder Kondensat,
- 0,5 Teile Hydro-Kollag 300 A,
- 0,5 Teile Bohról Shell M 2.

c) Für den weiteren Betrieb sind die Zusätze immer weiter herabzusetzen. Im Falle Rütgerswerke Erkner betragen die Zusätze nach etwa 100 Betriebsstunden nur noch

- 100 Teile Wasser-Destillat oder Kondensat,
- 0,125 Teile Hydro-Kollag 300 A,
- 0,125 Teile Bohról Shell M 2.

Feststellung der Konzentration des laufenden Gemisches durch Farbproben, wobei darauf hingewiesen wird, daß man sich nicht ängstlich an den Zusatz zu halten braucht, daß andererseits aber eine Überschmierung, also in diesem Falle ein zu hoher Prozentsatz Bohról und Hydro-Kollag gefährlich werden kann.

Der Versuch Schering und weiterer nicht gewollter Versuch haben bewiesen, daß bei guter Eingrafitierung der Maschine mit einer Mischung, die nahezu den Charakter des reinen Wassers hat, gefahren werden kann.

E) Zusammenfassung und Schluß:

Wie bei jeder neuen Erfindung so muß auch bei der WG-Schmierung, da sie noch verhältnismäßig jung ist, mit Rückschlägen gerechnet werden. Die etwa zwei Dutzend jetzt umgestellten Maschinen beweisen aber, daß man der WG-Schmierung auf jeden Fall erhöhte Beachtung schenken muß. Ob man bei dieser Art der Schmierung noch von einer hydraulischer Schmierung sprechen kann, wird angezweifelt, da die Druckfestigkeit des Wassers wesentlich geringer ist als bei Öl und da auch die Schmierung selbst bei kurzen Schwingbewegungen bisher von Erfolg gewesen ist.

Es werden zum Schluß ausgebaute Lager aus der Maschine Technische Hochschule zur Beurteilung des Erfolges gezeigt.

Über die Tragfähigkeit des Gleitlagers  
bei hohen Geschwindigkeiten

Es ist üblich, die Belastbarkeitsgrenze eines Lagers oder eines Lagerwerkstoffes in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit darzustellen. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die erreichbar größte Lagerpressung  $P_m$  zunächst an, erreicht dann einen Größtwert und sinkt schließlich bei weiterer Steigerung der Gleitgeschwindigkeit wieder ab.

Wenn man von einem gesicherten Betriebszustand, also von einem Punkt unterhalb der Tragfähigkeitsgrenzkurve ausgeht, dann kann man diese Grenzkurve auf zwei verschiedenen Wegen erreichen:

- 1.) Man hält die Gleitgeschwindigkeit konstant und steigert die Belastung. Die Schmierfilmstärke wird dabei immer kleiner bis Grenzflächenreibung auftritt und das Lager wegen der übermäßigen Entwicklung von Reibungswärme versagt.
- 2.) Man hält die Belastung unverändert, während die Drehzahl gesteigert wird.

Aus dem durch zahlreiche Versuche gefundenen Verlauf der Kurve geht hervor, daß bei einer bestimmten Drehzahl oder Gleitgeschwindigkeit ebenfalls die Grenze der Tragfähigkeit erreicht wird. Mit diesem Fall wollen wir uns im folgenden beschäftigen.

Solche Grenzlastkurven mit abfallendem Verlauf bei hohen Gleitgeschwindigkeiten wurden von verschiedenen Forschern und mit den verschiedensten Lagerwerkstoffen gefunden, und man versucht, dies damit zu erklären, daß die Ölzähigkeit und damit die hydrodynamische Tragfähigkeit des Schmierfilms wegen der steigenden Temperatur rascher abnimmt, als sie infolge der hohen Drehzahl zunimmt.

Wenn man jedoch die Verhältnisse zahlenmäßig mit Hilfe der hydrodynamischen Schmiertheorie untersucht, kommt man zu einem gegenteiligen Ergebnis, und zwar findet man, daß sich die Zunahme der Gleitgeschwindigkeit auf die hydrodynamische Tragfähigkeit stärker auswirkt, so daß im Endergebnis  $P_m$  mit der Gleitgeschwindigkeit stets wächst. Dies widerspricht offensichtlich den durch praktische Lagerversuche gefundenen Ergebnissen. Im Hinblick auf die praktische Bedeutung ist eine Aufklärung am Platze.

Eine Untersuchung der Strömungsverhältnisse beim Öleintritt in den Schmierspalt ergab, daß das Öl an der Eintrittsstelle höchstens auf eine durch den hier herrschenden Überdruck bestimmte Geschwindigkeit beschleunigt wird. Ist nun die Umfangsgeschwindigkeit des Zapfens größer als die Öleintrittsgeschwindigkeit, dann wäre wegen der Ejektorwirkung an dieser Stelle Unterdruck zu erwarten, wenn nicht durch Hohlraumbildung und Schaumentwicklung, sowie durch das Mitreißen von Luft das Auftreten von Unterdruck unterbunden wird. Jedenfalls wird in dem Fall, in dem die Umfangsgeschwindigkeit größer als die Öleintrittsgeschwindigkeit ist, das Öl nicht rasch genug nachströmen. Der Schmierspalt wird nicht zur Gänze mit Öl gefüllt, der Umfang des Zapfens eilt gewissermaßen dem Ölteilchen davon und der Schmierfilm kann sogar abreißen. Durch diese Erscheinungen leidet die hydrodynamische Tragfähigkeit, und zwar in umso stärkerem Maße, je höher die Drehzahl ist, und das ist als Grund für die Abnahme der Lagerbelastbarkeit anzusehen.

Diese nachteiligen Erscheinungen kann man hintanhalten, wenn man die Ursachen erkannt hat, und zwar ist es erforderlich, das Öl auf die Umfangsgeschwindigkeit des Zapfens, zweckmäßigerweise durch Aufwendung eines entsprechenden Öldruckes, zu beschleunigen. Diese Überlegungen gelten natürlich sinngemäß auch für Spurgleitlager.

Das Versagen von Lagern bei hohen Drehzahlen kann aber auch auf eine andere Ursache zurückgehen. Wenn nämlich der Zapfen vornehmlich durch Gewichtskräfte belastet wird, kann er in eine Lage geraten, in der zwischen Belastung und Schmierfilmdruck kein stabiles, sondern nur labiles Gleichgewicht herrscht. Diese Erscheinungen wurden schon vor längerer Zeit durch Stodola und Hummel festgestellt, sie sind aber wenig bekannt und deshalb erscheinen Lagerstörungen dieser Art häufig unerklärlich. Auch in diesem Falle kann Abhilfe geschaffen werden, wenn man die Ursachen der Störungen einmal erkannt hat. Durch ein Lager einfacher Bauart kann der Zapfen in eine stabile Gleichgewichtslage gezwungen werden, so daß er selbst im unbelasteten Zustande nicht in die als Labilitätsgebiet erkannten Lagen geraten kann.