

12110

04456

dung unter beträchtlichen Drucken (z. B. 10 bis 40 at) und bei sehr kurzen Induktionszeiten erfolgt (von z. B.  $\sim 10^{-3}$  sek). Will man brauchbare Resultate haben, so muß man unter vergleichbaren Bedingungen arbeiten. Störungsfrei ist dies nur möglich, wenn man das Versuchsgemisch durch adiabatische Verdichtung auf Versuchsdruck und Temperatur bringt. Als Methode zur Bestimmung von Zündtemperaturen ist dies Verfahren bekannt und

bisher der Untersuchung zugänglichen Intervall lassen sich für die einzelnen Stoffe die Induktionszeiten in Abhängigkeit von der Temperatur innerhalb der Fehlergrenzen durch eine Exponentialbeziehung darstellen:

$$\tau \approx A \exp(E/RT)$$

mit scheinbaren Aktivierungswärmen der Größenordnung  $\sim 40$  kcal.

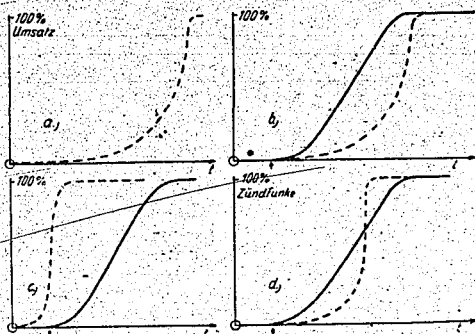


Fig. 1.

auch bereits einmal im Hinblick auf den Klopfvorgang angewandt worden<sup>1)</sup>; ohne daß aber die Arbeiten fortgesetzt worden wären.

Unsere Versuchsanordnung geht aus Fig. 2 hervor; sie besteht aus einem Versuchszyylinder, in dem ein Kolben durch Fallgewicht hineingeschlagen und im tiefsten Punkt festgehalten werden kann; unten an den Zylinder schließt sich — auswechselbar — das mit Sichtfenster versehene Reaktionsgefäß an. Verwandt wurden Reaktionsgefäße verschiedener Form — langgestreckte, mit Zündkerze am unteren Ende für Klopfversuche, für Selbstzündungsversuche meist gedrungene Reaktionsgefäße mit geringer Wärmeableitung<sup>2)</sup>.

Einige Resultate von Selbstzündungsversuchen sind in Fig. 3 zusammengestellt. Daran ist hervorzuheben: 1. Selbstzündung mit recht kurzen Induktionszeiten tritt bei allen Stoffen schon bei relativ niedrigen Temperaturen auf; 2. der Unterschied in der Selbstzündungstemperatur, auf gleiche Induktionszeit bezogen, für sehr verschieden klopfeste Stoffe, ist verhältnismäßig gering; z. B. für die die Endpunkte der Octanzahlkala darstellenden Stoffe n-Heptan und i-Octan nur etwa 100° C. 3. In dem

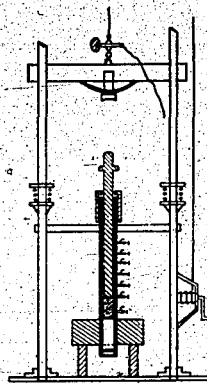


Fig. 2.

Falleapparat.

Für die (nicht ganz zu vernachlässigende) Wärmeableitung sind bisher noch keine Korrekturen an den Resultaten angebracht worden.

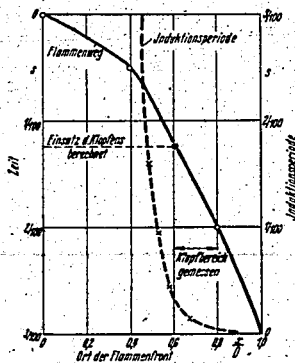


Fig. 3.

In Fig. 4 ist noch gezeigt, wie man aus dem Selbstzündungsverhalten auf das Klopfverhalten schließen kann. Die Versuche beziehen sich auf ein langgestrecktes Reaktionsgefäß, in dem wir auch unter Laboratoriumsbedingungen eine dem Klopfen analoge Verbrennung erzielen konnten. Es wurde

<sup>1)</sup> H. T. Fizard, *Proceed. N. E. Coast Engng.* 31, 381 (1921); Fizard and D. R. Pyle, *Philos. Magazine* 44, 79 (1922); *Trans. Faraday Soc.* 22, 352 (1926); *Philos. Magazine* (7) 1, 1094 (1926).

<sup>2)</sup> Für Einzelheiten vgl. W. Jost, *Schriften der Dtsch. Akademie d. Luftfahrtforschung*, Berlin, Heft 9, 1939. Ferner die demnächst in dieser Zeitschrift erscheinenden ausführlichen Berichte von H. Teichmann und H. Rögener.

04457

durch Flammenaufnahmen auf rotierendem Film festgestellt, unter welchen Bedingungen Klopfen eintritt. In der gleichen Anordnung ist dann die Abhängigkeit der Induktionszeit für die Selbstzündung (bei n-Heptan) von der Temperatur festgestellt worden (wobei sich höhere unkorrigierte Temperaturen ergaben, als gemäß Fig. 3, da hier die Wärmeableitung größer ist). Um die Selbstzündungsreaktion auf den Klopfvorgang zu beziehen, geben wir die Darstellung der Fig. 4. Hier ist einerseits (entnommen aus Aufnahmen unmittelbar vor der Klopfgrenze) aufgetragen, wie lange in jedem Augenblick die Flamme noch braucht, bis sie das ganze Reaktionsgefäß durchlaufen hat (das ist nichts anderes als eine geeignete schematische Darstellung der Flammenaufnahme auf rotierendem Film); andererseits ist für jede Stellung der Flam-

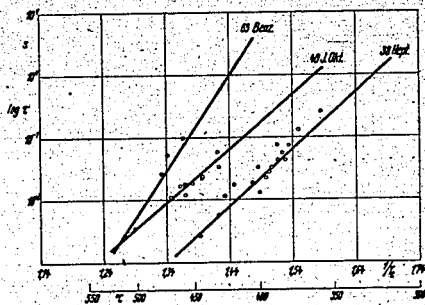


Fig. 4.

menfront aufgetragen, nach welcher Zeit das Restgemisch zünden würde, wenn seine Temperatur nicht weiter anstiege (dazu braucht man lediglich die Angaben aus den Selbstzündungsversuchen sowie eine Berechnung der Temperatur des Unverbrannten unter Berücksichtigung der Kompression durch die fortschreitende Flamme). Aus dieser Darstellung erkennt man bereits, daß sicher Klopfen eintreten muß, wenn die letztere Zeit kürzer ist als die erstere. In Wirklichkeit muß dies bereits früher der Fall sein, weil ja von jeder Stelle der Flammenfront aus das Restgemisch nicht auf konstanter Temperatur bleibt, sondern weiter komprimiert wird. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache kommt man leicht zu einer Abschätzung der Grenzen, innerhalb der das Klopfen einsetzen muß (dies ohne alle Ausnahmen über das Zeitgesetz der Reaktion) oder auch durch eine Integration (mit gewissen Annahmen über das Zeitgesetz) zu einer genaueren Berechnung des Klopfzeitpunktes. Wie Fig. 4 erkennen läßt, stimmen Versuch und Ergebnis der Rechnung innerhalb der Fehlergrenzen überein<sup>1)</sup>.

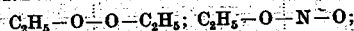
<sup>1)</sup> Für Einzelheiten der Überlegung vgl. Jost, Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung I. c.

Dies darf als ein direkter Beweis für die Richtigkeit der zugrunde gelegten reaktionskinetischen Vorstellungen gelten.

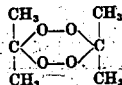
Einzelheiten über das Verhalten einer Anzahl typischer Stoffe werden in einer ausführlichen Arbeit von H. Teichmann mitgeteilt werden. Es wird z. B. gefunden, wie bereits aus Fig. 3 hervorgeht, daß die Temperaturabhängigkeit des Zündverzugs bei Benzol wesentlich größer ist als bei Paraffinen; das ist in Übereinstimmung mit der motorischen Erfahrung, wonach unter solchen Betriebsbedingungen, die höhere Temperaturen zur Folge haben, aromatische Kohlenwasserstoffe relativ zu paraffinischen schlechtere Klopf Eigenschaften zeigen. Der Versuch einer Diskussion der verschiedenen Konstantenwerte der empirischen Formel vom reaktionskinetischen Gesichtspunkt aus ist reizvoll; doch möchten wir davon absehen, solange wir nicht noch mehr Versuchsmaterial beigebracht haben.

Es sei betont, daß man mit Sicherheit sagen kann, daß die Klopfreaktion eine Kettenreaktion ist; daß es aber bisher unmöglich ist, zu entscheiden, ob die Explosion durch Kettenverzweigung oder als reine Wärmeexplosion zustande kommt oder ob schließlich eine Kombination von beiden vorliegt.

Von Versuchen mit klopfwidrigen und klopfördernden Zusätzen, die wir zur weiteren Klärung des Reaktionsmechanismus unternommen haben (und über die Herr Rögner demnächst berichten wird), sei nur soviel erwähnt: nach A. R. Ubbelohde wirken insbesondere alle solchen Zusatzstoffe klopfördernd, die an einer O—O- oder NO-Bindung in zwei Bruchstücke zerfallen können, wie z. B.:



wie zu erwarten, setzen solche Stoffe in unserer Versuchsanordnung die Induktionszeit wesentlich herab. Weiter wirken aber auch unter Umständen manche Stoffe, die nicht an einer einzelnen solchen Bindung in zwei Bruchstücke zerfallen können, stark klopfördernd, wie Acetonperoxyd, das üblicherweise formuliert wird:



Von dieser Verbindung ist bekannt, daß sie das Zündverhalten von Dieseltreibstoffen günstig beeinflusst.

Die Untersuchungen, von denen ein kleiner Ausschnitt hier geschildert worden ist, wurden mit Unterstützung der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, Berlin-Adlershof, durchgeführt, der wir dafür zu Dank verpflichtet sind.

Leipzig, Physikalisch-Chemisches Institut der Universität, Oktober 1940.

## Messung oszillierender Drucke

Indizieren raschlaufender Motoren nach der Kondensatormethode

Verfasser: Dr.-Ing. Kurt Schnauffer, Berlin

04458

V

1344-2

DK 531.787.082.72  
621.319.4

Für die konstruktive Entwicklung und für die betriebsmäßige Überwachung von Verbrennungskraftmaschinen hat sich das Indizieren als wesentlichste Meßmethode herausgebildet, da es sowohl eine wärmetechnische als auch, in Verbindung mit der effektiven Leistung, eine maschinentechnische Beurteilung der Motoren ermöglicht. Mit Hilfe von Indikatoren wird der Druckverlauf im Zylinder in Abhängigkeit vom Kolbenweg oder von der Zeit aufgenommen. Von größter Wichtigkeit ist dabei, daß man aus diesen Indikatordiagrammen außer der indizierten Leistung auch noch Einblicke in den Verbrennungsvorgang erhält.

Für langsamlaufende Motoren haben sich mechanische Indikatoren bewährt. Für die Untersuchung raschlaufender, hochbelasteter Motoren mit sehr schnellen Druckschwankungen mußten jedoch trägheitslos arbeitende Indikatoren entwickelt werden.

Die Schwierigkeiten für das Aufnahmegerät bestehen in der Aufgabe, Änderungen hoher Drücke bei hohen Temperaturen möglichst masselos in Bewegungsänderungen überzuführen. Die sich daraus ergebenden wichtigsten Forderungen zur naturgetreuen Wiedergabe der Drucke sind hohe Eigenfrequenz, geringe Massen und kleine Wege des Gerätes sowie größte Unempfindlichkeit desselben gegen hohe Temperaturen und Temperaturschwankungen.

Vom Verfasser wurde in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt ein elektrischer Indikator entwickelt<sup>3,4,5,6</sup>, der diesen Forderungen weitgehend entspricht. Er gestattet, mittels eines Oszillographen rasch verlaufende Druckvorgänge verzerrungsfrei aufzuzeichnen. Die erhaltenen Druck-Zeit-Diagramme ermöglichen die Überprüfung eines jeden einzelnen Arbeitsspiels.

Das Meßverfahren. Für die Messungen wurde das durch Riegger bekannt gewordene Verfahren der halben Resonanzkurve<sup>1</sup> verwendet, dessen Schaltung schon in dem ATM-Blatt V 132-2 in Bild 2 wiedergegeben wurde. Ein elektrischer Schwingungskreis mit konstanter Frequenz, der von einer Senderöhre mit Energie gespeist wird, ist mit einem zweiten Schwingungskreis lose gekoppelt, der am Gitter einer Gleichrichterröhre liegt. In diesen zweiten Schwingungskreis ist der elektrische Indikator in Form eines Meßkondensators als veränderliche Kapazität eingeschaltet. Eine Änderung der Kapazität des Meßkondensators verändert die Frequenz des zweiten Kreises und bewirkt eine Spannungsänderung am Gitter der Gleichrichterröhre. Der infolge dieser Änderung entstehende Anodenwechselstrom wird durch Kompensation vom Anodenruhestrom getrennt und von einer Oszillographenschleife aufgezeichnet.

Das Gebergerät. Bild 1 zeigt den für die Zylinderdruckmessungen entwickelten Geber-Kondensator. Die Teile A und B sind die Kondensatorplatten, die in den

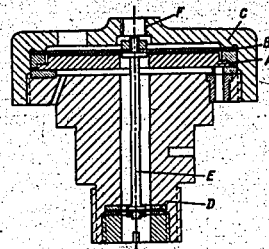


Bild 1. Geber-Kondensator

A Isolierte Kondensatorplatte, B Membranfeder, C Klemmring, D Abschlußmembran, E Verbindungsstab, F Gewinde für Hubbegrenzung.

Schwingungskreis eingeschaltet werden. Der als Membranfeder ausgebildete Teil B biegt sich unter Einwirkung des Zylinderdruckes durch, wodurch der Abstand der beiden Platten und damit die Kapazität des Geber-Kondensators geändert wird. Der Abstand der Platten beträgt 0,1 mm, die maximale Durchbiegung der Membranfeder bei einem Einspanndurchmesser von 35 mm = 0,08 mm. Teil A ist isoliert. Die Membranfeder B kann zur Aufnahme von Schwachfeder-Diagrammen ausgewechselt werden. Um die Feuegase von dem Kondensator fernzuhalten, wird der Geber am unteren Teil durch eine Hilfsmembran D abgeschlossen. Hierdurch werden konstante thermische Verhältnisse erzielt. Außerdem wird, was bei kleineren Motoren wichtig ist, der durch den Indikator zugeschaltete schädliche Raum verkleinert. Der Druck wird von der Hilfsmembran D durch einen Stift E, der sich nach unten tellerförmig vergrößert, auf die Membranfeder B übertragen. Um die stark störenden Wärmedehnungen zu vermeiden, besteht der Geber-Kondensator und der Übertragungsstift aus Invarstahl. Die Membranfeder ist eine beiderseitig geschliffene Federbandstahl-Scheibe von 0,3... 1,5 mm Stärke. Als Werkstoff für die Hilfsmembran D hat sich, bei einem wirksamen Durchmesser von 12 mm, Stahl- und geglühte Messingfolie von 0,05... 0,1 mm Stärke bewährt. Die Eigenschwingungszahl des Geber-Kondensators beträgt je nach Stärke der Membranfeder 2000... 10000 Hz. Die Anlage wird zur Vermeidung von Fehlern infolge Temperaturänderungen unmittelbar nach einer Messung mit Preßluft geicht.

ATM

Archiv für Technisches Messen

1931-T 83

04459

Der Geber hat Zündkerzengewinde und wird so nahe wie möglich am Verbrennungsraum angebaut. Es empfiehlt sich jedoch, einen schmalen Abschlußhahn zwischen Zylinder und Indikator einzubauen. Die lichte Weite des Hahnes soll, um Drosselungen zu vermeiden, 7 mm betragen.

Der Geber hat bis zu Verbrennungsdrücken von 150 at und bis zu Drehzahlen von 3000 U/min sowohl bei Zünder- als auch bei Brennermotoren einwandfrei gearbeitet. Es ist damit gelungen, auch Klopfdiagramme im Klopfzentrum aufzunehmen. Die zeitliche Drucksteigerung bei diesen Diagrammen beträgt  $\approx 20$  at in  $\frac{1}{10000}$  s.

Die Leitung, die den Geber-Kondensator mit dem Schwingungskreis verbindet, wird, um elektrostatische Beeinflussungen zu vermeiden, in einem geerdeten Metallschlauch verlegt.

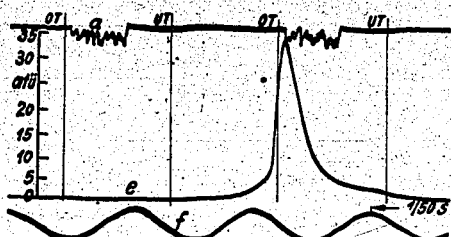


Bild 2. Zeitlicher Druckverlauf im Zylinder eines BMW Va-Flugmotors bei  $n = 1708$  U/min.

Für die Aufzeichnung wurde ein sechsschleifiger Oszillograph mit einer Papierbreite von 6 cm und einer Papiergeschwindigkeit von 1 m/s verwendet. Bei hohen Drücken oder bei hohen Drehzahlen wird die Auswertung der damit aufgenommenen Oszillogramme infolge

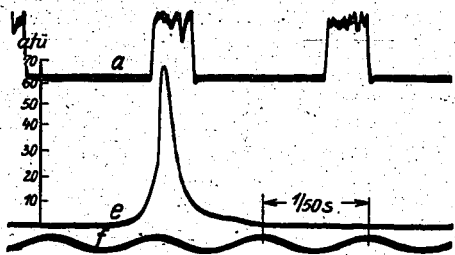


Bild 3. Zeitlicher Druckverlauf im Zylinder eines mit Strahleinspritzung arbeitenden Diesel-Flugmotors bei  $n = 1850$  U/min.

des kleinen Druck- bzw. Volumen-Maßstabes sehr ungenau. Eine Verdoppelung des Druckmaßstabes, eine Verzehnfachung des Volumen-Maßstabes durch die Verwendung des neuen Modelles des Siemens-Oszillographen ermöglicht jedoch, auch solche Oszillogramme auszuwerten.

Ergebnisse. Die Bilder 2, 3 und 4 zeigen aufgenommene Oszillogramme in  $\frac{1}{5}$  der ursprünglichen Größe. Die Lichtlinien *a* in Bild 2, 3 sind Umdrehungsmarkierungen, die für die Umzeichnung der Druck-Zeit-Diagramme in Druck-Volumen-Diagramme erforderlich

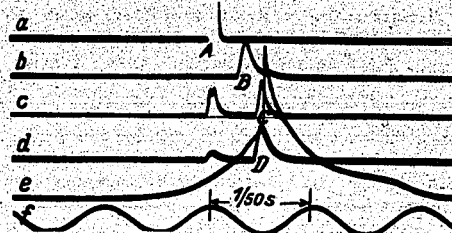


Bild 4. Zeitlicher Druckverlauf im Zylinder eines SH 13-Flugmotors während des Klopfens bei  $n = 937$  U/min.  
a Zündstrom, b, c, d Ionisationsströme, e Drucklinie, A Zündpunkt, B, C, D Flammen-Ankunftsstelle.

sind. Die Lichtlinien *e* sind Drucklinien und die Sinuslinien *f* sind Zeitmarkierungen. Alle Oszillogramme wurden bei vollbelasteten Motoren aufgenommen. Sie lassen die Arbeitsweise raschlaufender Zünder- und Brenner-Motoren sowie die während des Klopfens in einem Zündermotor bestehenden Verhältnisse gut erkennen.

Weitere Arbeiten. Obata und Yosida<sup>2</sup> benutzten für Zylinder-Druckmessungen eine Schaltungsanordnung, in der in bekannter Weise eine Senderschaltung verwendet wurde. Die Frequenz und damit die Spannung eines im Anoden- oder im Gitterstromkreis einer Röhre liegenden Schwingungskreises wird durch den Geberkondensator verändert. Die sich daraus ergebenden Stromänderungen werden verstärkt und durch eine Oszillographenschleife aufgezeichnet.

Der für die Messungen entwickelte Geber-Kondensator unterscheidet sich von dem zuvor beschriebenen durch die Anordnung der Kondensatorplatten und durch das Fehlen einer Abschlußmembran.

Die Anordnung der Kondensatorplatten ist im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Geber so gewählt, daß die Membranfeder *B* (Bild 1) dem Zylinder zugekehrt ist. Bei Druckeinwirkung verkleinert sich dadurch der Abstand der Kondensatorplatten *A* und *B*. Da dieser, um eine hohe Empfindlichkeit des Meßgerätes zu haben, sehr klein gehalten werden muß, kann infolge auftretender Druckspitzen sehr leicht Kurzschluß eintreten.

Durch das Fehlen einer Abschlußmembran ist die Membranfeder unmittelbar den heißen Verbrennungsgasen ausgesetzt. Die für eine Eichung notwendigen konstanten thermischen Verhältnisse können dadurch nur sehr schwer erreicht werden.

#### Literatur.

1. H. Rieger, Über klanggetreue Schallaufnahmen, Verstärkung und Wiedergabe. Z. f. techn. Physik 5, 1924, S. 577 ... 580.
2. Obata und Yosida, An Electrical Indicator for High-Speed Internal Combustion Engines. Report of the Aeronautical Research Institute, Tokio, Imperial University Nr. 28, Vol. 11, 14.
3. Schnauffer, Aufzeichnung raschverlaufender Druckvorgänge mittels des Verfahrens der halben Resonanzkurve. Luftfahrtforschung 6, S. 126 ... 136 und DVL-Jahrbuch 1930, S. 304 ... 314.
4. Schnauffer, Indizieren von schnelllaufenden Motoren. VDI 74, 1930, S. 1066 ... 1067.
5. Schnauffer, Das Klopfen von Zündermotoren. VDI 75, 1931, S. 455 ... 456, erweitert im DVL-Jahrbuch 1931, S. 375 ... 378.
6. Schnauffer, Untersuchung von Verbrennungsvorgängen in Zündermotoren mittels elektrischer Meßverfahren. Z. f. Flug. u. Motorluft. 22, 1931, S. 527 ... 530.

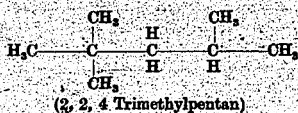
REAKTIONSKINETISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM KLOPFVORGANG. II<sup>1)</sup>

Die Selbstentzündung von Kohlenwasserstoff-Luftgemischen und das Klopfen im Otto-Motor.

Von H. Teichmann.

## Einleitung.

Eine Erhöhung des Wirkungsgrades oder der Leistung von Otto-Motoren u. a. durch Steigerung des Kompressionsverhältnisses oder der Überladung ist durch die Erscheinung des Klopfens begrenzt. Die Klopfestigkeit eines Kraftstoffes wird bezogen auf Mischungen aus n-Heptan und iso-Octan



(iso-Octan ist hochklopfest, während n-Heptan stark klopfte), die im Prüfmotor das gleiche Klopfverhalten zeigen, und durch die Octanzahl, das ist der Gehalt an iso-Octan dieser Vergleichsmischung in Volumenprozent, ausgedrückt [vgl. auch Nash und Howes<sup>2)</sup>].

Der Klopfvorgang ist am Motor selbst untersucht worden durch Registrierung des Druckverlaufes, durch photographische Flammenaufnahmen mittels Sichtfenster auf bewegtem Film<sup>3)</sup> oder auch mit Zeitlupe<sup>4)</sup>; durch elektrische Sonden, die die mit der Flamme verbundene Ionisation anzeigen [Schnauffer<sup>5)</sup>]. Diese Arbeiten zeigen, daß beim Klopfen eine enorme Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit eintritt, wobei Flammengeschwindigkeiten von 300 bis 500, evtl. auch 900 m gemessen wurden<sup>6)</sup>. Als Ausnahme wurde von Sokolik und Voinow<sup>7)</sup> eine Geschwindigkeit von 2000 m/sek. angegeben. Vergleiche hierzu<sup>8)</sup> 1). Rass-

weiler und Withrow<sup>1)</sup> konnten zeigen, daß die Klopfreaktion im Unverbrannten selber unabhängig von der Flammenfront einsetzt. Die Begleiterscheinungen des Klopfens sind Druck- und Temperaturspitzen. Hierbei werden die schon verbrannten Anteile durch Stoßwellen wieder zum Aufleuchten gebracht, wodurch auch der Wärmeübergang erhöht wird<sup>9)</sup>.

Die dem Klopfen vorausgehenden Vorgänge im noch unverbrannten Gemisch wurden untersucht, indem während des Betriebes durch entsprechend konstruierte Ventile in kurzen Zeiten dem Gasgemisch Proben entnommen wurden [vgl. u. a.<sup>10)</sup>]. Es ergab sich, daß innerhalb der Klopfzone schon vor der eigentlichen Verbrennung ein Umsatz eintritt, wobei Aldehyde und Peroxyde nachgewiesen werden konnten. Untersuchungen von Absorptionsspektren von Rassweiler und Withrow<sup>11)</sup> stehen mit diesem Ergebnis im Einklang. Insgesamt ergaben diese Untersuchungen, daß das Klopfen mit einer Vorreaktion im unverbrannten Gemischanteil zusammenhängt, deren Beeinflussbarkeit durch kleine Zusätze auf eine Kettenreaktion hinweist. Verläuft diese Vorreaktion schneller als die normale Verbrennung, so kommt es zu den beobachteten Erscheinungen des Klopfens. Die bisherigen Versuche schließen eine Identifikation des Klopfens mit einer Detonation weitgehend aus. Zum Vorangehenden vergleiche die zusammenfassenden Darstellungen<sup>12)</sup>.

Die Schwierigkeit einer laboratoriumsmäßigen Untersuchung der Klopfreaktion liegt darin, daß meistens (schon wegen des Anwärmens des Gemisches oder der Gemischherstellung) mit Zeiten gearbeitet werden muß, während deren ein Materieaustausch von und zur Wand möglich ist. Diese

<sup>1)</sup> I. vgl. W. Jost, Ztschr. Elektrochem. 47, 262 (1941); vgl. ferner: Schriften d. Deutschen Akad. d. Luftfahrtforsch. 1939, Heft 9; Naturwiss. 27, 318 (1939).

<sup>2)</sup> W. Nash und D. A. Howes, Motor Fuel Preparation.

<sup>3)</sup> Withrow und Boyd, Ind. engin. Chem. 23, 539 (1931).

<sup>4)</sup> Rassweiler und Withrow, Ind. engin. Chem. 25, 923, 1359 (1933); 25, Nr. 8 (1936).

<sup>5)</sup> Rassweiler und Withrow, S. A. E. J. 39, 297 (1936).

<sup>6)</sup> Rothrock und Spencer, NACA. Rep. Nr. 622 (1938).

<sup>7)</sup> Schnauffer, S. A. E. J. 34, 17 (1934); VDI. 75, 455 (1931); VDI-Forschungsheft 1931; Jahrbuch d. Dtsch. Versuchsanst. f. Luftf. 1931, 375.

<sup>8)</sup> Broeze, Weltpetroleumkongreß Paris 1937. Ztschr. angew. Chem. 50, 839 (1937).

<sup>9)</sup> Sokolik und Voinow, Techn. Physik USSR. 3, 803 (1936).

<sup>10)</sup> Broeze, Driel und Peletier, Schrift. d. Dtsch. A. d. L. F., Heft 9 (1939).

<sup>11)</sup> R. Duchêne, Publ. Scient. et Techn. du Ministère de l'Air 11 (1932).

<sup>1)</sup> Rassweiler und Withrow, S. A. E. J. 39, 297 (1936).

<sup>2)</sup> Ernst Schmidt, Schrift. d. Dtsch. A. d. L. F., Heft 9, 219 (1939).

<sup>3)</sup> Egerton, Smith und Ubbelohde, Phil. Trans. Roy. Soc. London 234, 433 bis 463 (1935).

<sup>4)</sup> Rassweiler und Withrow, Ind. engin. Chem. 23, 769 (1931); 24, 528 (1932).

<sup>5)</sup> Withrow und Rassweiler, Ind. engin. Chem. 25, 923, 1359 (1933); 26, 1256 (1934); 27, 872 (1935).

<sup>6)</sup> W. Jost, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, J. Springer, Berlin 1939. Schriften d. Deutschen Akad. d. Luftfahrtforsch. 1939, Heft 9. Die entsprechenden Vorträge auf der Bunsentagung 1936: Ztschr. Elektrochem. 42 (1936). H. R. Ricardo, Schnellaufende Verbrennungsmotoren. Berlin 1932. B. Lewis und G. v. Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, Cambridge 1938. M. Serruys, La Combustion, détonante dans les Moteurs à Explosion. Publ. Scientif et Techniques du Ministère de l'Aire 1937, Nr. 103.

Versuche sind daher durch Wandinflüsse mehr oder weniger stark entstellt. Die einzige Methode, die solche Einflüsse sicher zu vermeiden gestattet, ist die der Zündung durch adiabatische Verdichtung, wobei noch als Vorteil hinzukommt, daß die Wandtemperatur wesentlich niedriger als die Gastemperatur bleibt. Derartige Versuche liegen von Tizard und Pye vor!<sup>1)</sup> Die Messungen wurden in einem motorähnlichen Versuchszyylinder von 75 mm Durchmesser und 200 mm Hub vorgenommen. Der Kolben wurde im Punkte maximaler Kompression festgehalten, wobei die Dauer der Kompression  $\sim 0,14$  sek. betrug. Der Zylinder selbst konnte maximal bis zu  $180^\circ\text{C}$  geheizt werden. Die Zündung und die dazu gehörige Induktionszeit sowie die Berechnung der Temperatur erfolgten aus dem gleichzeitig aufgenommenen Indictordiagramm. Die Wärmeableitung haben die Verfasser durch besondere Versuche zu erfassen versucht. Die berechneten Temperaturen dürften im allgemeinen etwas zu niedrig ausfallen, da durch Druckmessung nur gemittelte Temperaturen bestimmt werden können. Es ergab sich eine ungefähr exponentielle Abhängigkeit der Zündverzögerung von der Temperatur, wobei n-Pentan, n-Hexan, n-Heptan, n-Octan, Cyclohexan und Benzol untersucht wurden. Daß während der Induktionsperiode nur ein geringer Bruchteil reagiert, ergibt sich daraus, daß es für den Druckabfall während des Zündverzögeres ohne Bedeutung ist, ob wirklich Zündung einsetzt oder nicht.

Für ähnliche Versuche war von Jost und Mitarbeitern eine Apparatur entwickelt worden, in der ein Gemisch nach adiabatischer Verdichtung unter motorähnlichen Bedingungen entweder mit Funkenzündung nicht klopfend oder klopfend verbrennen oder ohne Funkenzündung zur Selbstzündung kommen konnte. Es war das Ziel der vorliegenden Arbeit, diese Apparatur so weit zu verbessern, daß sie zu quantitativen Messungen verwendet werden konnte.

#### Die Apparatur.

Die Apparatur (Fig. 1) besteht aus einem stählernen Kompressionszylinder (Fig. 2), in den ein Messingkolben mit Kolbenstange aus Stahl durch ein bis 120 kg schweres Fallgewicht hineingeschlagen werden kann. Der Zylinder ist mit einem Zwischenstück verbunden [ursprünglich mittels Gewinde (Fig. 3 III), später mit einer Flanschverbindung (Fig. 2)], das seinerseits mit vier Säulen auf einer Grundplatte steht; diese ruht ihrerseits auf einem schweren Betonfundament. Das eigentliche Reaktionsgefäß ist auswechselbar unter dem Zwischenstück angesetzt; es kamen verschiedene Formen, von langgestreckten (Fig. 3 III),

verhältnismäßig engen Zylindern für Klopfversuche bis zu kurzen gedrunghenen Zylindern (Fig. 2) vom gleichen Durchmesser wie der Kompressionszylinder.

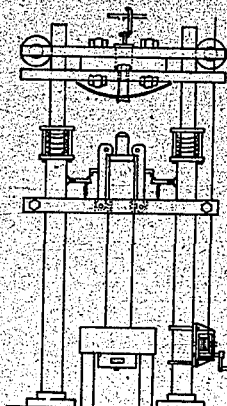
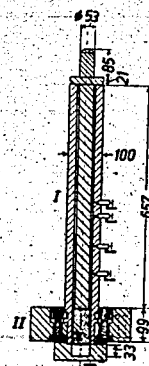


Fig. 1.

Kompressionsapparatur. In der Mitte Zylinder und Zwischenstück, darunter das Reaktionsgefäß mit Fenster.

der für Selbstzündungsversuche zur Verwendung. Das Kompressionsverhältnis ließ sich zwischen etwa 1 und 18 variieren, obwohl wegen des sonst erforderlichen zu schweren Fallgewichts praktisch nicht über 14 hinausgegangen wurde. Der Kolben wurde in seiner tiefsten Stellung durch eine Fangvorrichtung festgehalten, die in ihrer letzten Ausführungsform (Fig. 3 I) gezeigt ist. Zum Tragen und zur Führung des Fallgewichtes und für die Halterung der gesamten Apparatur waren auf der gleichen Grundplatte zwei 7 cm dicke, bis zur Decke reichende Stahlrohre angebracht (Fig. 1), die unter der Decke mit einer Platte verbunden waren. Das Fallgewicht konnte mit einer Winde gehoben werden mittels Drahtseil, das über Rollen lief. Es hing an einer als „Teufelzange“ bezeichneten Vorrichtung, von der es durch Seilzug ausgeklinkt werden konnte. Zum Abfedern des Fallgewichtes dienten einerseits zwei Schraubenfedern, die um die beiden Führungsrohre gelegt waren und von zwei weiteren Rohren mit Flanschplatten getragen wurden, andererseits eine Blattfeder unterhalb des Fallgewichtes (vgl. Fig. 1).

Fig. 2.  
Schnitt durch Zylinder I, Zwischenstück II und Reaktionsgefäß III.

<sup>1)</sup> Tizard, Proc. N. E. Coast. Engin. 31, 381 (1921).  
<sup>2)</sup> Tizard und Pye, Philos. Magazine (7) 1, 1094 (1926). Tizard, Trans. Faraday Soc. 22, 352 (1926). Tizard und Pye, Philos. Magazine 44, 79 (1922).

04462

Die ganze Apparatur konnte elektrisch geheizt werden; die Heizeinrichtungen waren vielfach unterteilt und getrennt regelbar, damit wirklich eine gleichmäßige Temperatur innerhalb der ganzen Apparatur erzielt würde; außerdem mußten alle wärmeabführenden Verbindungen, insbesondere die 4 Rohre, auf der die Apparatur stand, zusätzlich geheizt werden. Da die so erreichte Temperaturkonstanz noch nicht befriedigte, wurde später die ganze Apparatur mit doppelwandigen Messing-

Die benutzten Reaktionsgefäße hatten ein oder mehrere Glasfenster zum Photographieren der Flammenbewegung bzw. der Zündung. Außerdem war ein Gewinde für Zündkerze bzw. Piezo-Quarz zur Druckregistrierung vorgesehen (Fig. 3 III); Einzelheiten der Reaktionsgefäße gehen aus den Figuren hervor (Fig. 2, 3 III). Der Kolben zeigt (Fig. 3 II); er hat fünf Nuten für je zwei, mit versetztem Stoß eingesetzte Kolbenringe und eine zusätzliche Nut, in die mittels einer Presse eine Fett Graphitpaste gedrückt werden kann (Fig. 3 II).

Die Flammenbewegung bzw. die Selbstzündung wurden in üblicher Weise photographisch registriert mittels Film, der sich auf einer rotierenden Trommel befand; zur Zeitmarkierung wurde gleichzeitig eine mit Wechselstrom aus dem Netz betriebene Glühlampe photographiert, was eine ausreichende Genauigkeit lieferte. Außerdem mußte für Selbstzündungsversuche der Zeitpunkt des Endes der Kompression markiert werden; dazu war ein Kontakt an der Haltevorrichtung des Kolbens angebracht, durch den eine mit Gleichstrom betriebene Glühlampe ausgeschaltet wurde. Gleichzeitig war noch ein weiterer Kontakt vorgesehen, der ausgeschaltet wurde, wenn der Kolben 1 cm vor dem tiefsten Punkt angelangt war, womit die Kolbengeschwindigkeit in diesem Zeitpunkt gegeben war. Bei den Klopfversuchen wurde durch den Kolben im Augenblick maximaler Kompression der Zündfunke ausgelöst.

Zur Gemischerstellung waren verschiedene Vergaseranordnungen benutzt worden. Der wesentliche Teil ist ein T-Rohr, durch das Luft strömt, während gleichzeitig Brennstoff regelbar zuläuft, wobei zur schnelleren Verdampfung das Ganze geheizt werden kann. Der Luftstrom (meist etwa 30 l/Std.) wurde der Druckluftleitung entnommen; durch Drosselstellen und Tauchungen wurde für Konstanz gesorgt, die Strömungsgeschwindigkeit wurde mit Differentialmanometer gemessen. Zur Kontrolle der Gemischzusammensetzung dienten zwei technische Wärmeleitfähigkeitszellen, je eine vor und hinter der Versuchsanordnung, deren Ausschlag durch Verbrennung des Gemisches und Analyse im Orsat-Apparat gecheckt wurde.

#### Die Ausführung der Versuche.

Vor Versuchsbeginn wurde die Apparatur auf die gewünschte Temperatur geheizt und gewartet, bis eine gleichmäßige, konstante Temperatur erreicht war. Dann wurde der Kolben so weit gehoben, wie es dem gewünschten Verdichtungsverhältnis entsprach, und das Fallgewicht auf die nötige Höhe gebracht. Gefüllt wurde durch längeres Durchströmen des Gemisches, dessen Zusammensetzung gleichzeitig kontrolliert wurde. War das Gemisch hinreichend lange geströmt (z. B. 10 min.,

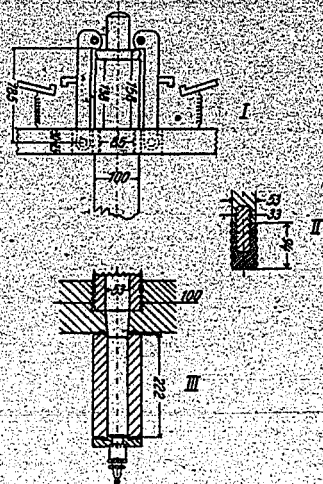


Fig. 3.

I: Auffangvorrichtung, bestehend aus zwei über die in die Kolbenstange eingelassene Haltescheibe, greifenden Hebeln. Vor dem Herabschlagen werden die Hebel auseinandergedrückt und in die auf der Figur sichtbaren Haken eingeklinkt. Beim Niedergehen des Kolbens löst die Haltescheibe diese Verbindung und starke (auf der Figur nicht eingezeichnete) Federn lassen die Hebel über die Haltescheibe der Kolbenstange schnellen.

II: zeigt den Messingkolben;

III: das langgestreckte Reaktionsgefäß (30 mm Durchmesser) für Klopfaufnahmen.

mänteln umgeben, durch die das Öl aus einem Höpplerschen Ultrathermostaten zirkulierte. In dieser Anordnung sind jedoch nur die letzten Versuchsreihen ausgeführt worden. Die Temperatur wurde an einer größeren Zahl von Punkten mit Thermoelementen gemessen. Zum Füllen von Zylinder und Reaktionsgefäß waren eine Anzahl von Gaszu- und -ableitungen vorgesehen: eine am unteren Ende des Reaktionsgefäßes, eine Anzahl weiterer in verschiedenen Höhen des Zylinders, die sämtlich mit Ventilen verschließbar waren; von den Ableitungen am Zylinder wurde jeweils die dem angewandten Kompressionsverhältnis entsprechende benutzt.

entsprechend 5 l Gas, bei einem Volumen von Reaktionsgefäß + Zylinder von maximal 1,2 l (bei dem höchsten Verdichtungsverhältnis, normalerweise weniger), so wurden Einlaß- und Auslaßventil geschlossen, Kamera und Zeitmarkierung eingeschaltet und als letztes das Fallgewicht ausgeklinkt.

#### Fehlerquellen.

Der Zweck der Selbstzündungsversuche ist, das Gemisch schnell auf eine bestimmte Temperatur zu bringen und festzustellen, innerhalb welcher Induktionszeit es bei dieser Endtemperatur zündet. Fehler treten insbesondere in der Bestimmung der Zeit und der Temperatur sowie dadurch auf, daß schon während der Kompression eine Vorreaktion stattfindet. Der letztere Einfluß läßt sich aus den Ergebnissen der Versuche abschätzen: das letzte Zentimeter Kolbenweg wird in einer Zeit von etwa  $2 \cdot 10^{-3}$  sek. zurückgelegt; dabei steigt die Temperatur noch um  $\sim 50^\circ \text{C}$  (je nach dem angewandten Kompressionsverhältnis mehr oder weniger). Einer solchen Temperatursteigerung entspricht eine Verkürzung der Induktionszeit um rund eine Zehnerpotenz. Während der Zeit für diesen Kolbenweg hat also ein Bruchteil zwischen  $1/5$  und  $1/10$  von der Umsetzung stattgefunden, wie sie bei vollendeter Kompression in der gleichen Zeit ( $2 \cdot 10^{-3}$  sek.) stattgefunden haben würde, wobei mit spezielleren Annahmen über das Gesetz der Umsetzung der Bruchteil genauer ausgewertet werden kann. Für die meisten Versuche kann angenommen werden, daß ein von der endlichen Kompressionsdauer herrührender Fehler innerhalb der Grenzen der sonstigen Versuchsfehler bleibt, wenn die Induktionszeit  $\geq 4 \cdot 10^{-3}$  sek. ist. Bei einer weiteren Herabsetzung der übrigen Fehler wird entsprechend die Kolbengeschwindigkeit zu steigern sein.

Der Fehler, der in die Zeitbestimmung bei der Auswertung der Aufnahmen eingeht, ist gegen die übrigen Fehler zu vernachlässigen [es entspricht 1 mm Film  $\sim 10^{-2}$  sek. (bei den meisten Versuchen ohne Fremdzündung)], und eine Genauigkeit der Ausmessung auf  $1/10$  mm ist ohne weiteres möglich.

Die Bestimmung der Temperatur bietet Schwierigkeiten. Verfügte man über eine sehr genaue Druckregistrierung, so könnte man daraus, unter Voraussetzung der idealen Gasgesetze, die mittlere Temperatur ermitteln, wie Tizard und Pye<sup>1)</sup> es taten. Diese mittlere Temperatur ist niedriger als die Temperatur in den zentralen, heißesten Gaspartien, die für die Zündung maßgebend sind. Da aber eine hinreichend genaue Druckregistrierung sehr schwierig ist, wegen der mit dem Aufschlagen des Gewichtes verbundenen Erschütterungen, und da insbesondere die im Handel erhältlichen Piezo-Quarz-Indikatoren keineswegs diesen Anforderungen

genügen, beschränkten wir uns darauf, die Temperatur aus dem Kompressionsverhältnis zu berechnen. Dazu gehört die Kenntnis von  $\kappa (= C_p/C_v)$ , Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und Volumen) des Gasgemisches und eigentlich die Berücksichtigung der Wärmeableitung;  $\kappa$  ist immer hinreichend genau zugänglich, während die Berücksichtigung der Wärmeableitung schwierig ist. Wir haben im folgenden alle Werte ohne Korrektur für Ableitung mitgeteilt, um Unsicherheiten daher zu vermeiden, und weil für den Vergleich der Messungen untereinander auf die Korrektur verzichtet werden kann. Die Wärmeverluste sind am größten in dem langgestreckten Gefäß, das für die Klopfversuche benutzt wurde; hier mag die Abkühlung bei längeren Induktionszeiten bis zu  $20^\circ$  betragen haben. Da die zum Vergleich herangezogenen Selbstzündungsversuche im gleichen Gefäß ausgeführt wurden, so stört auch diese Unsicherheit nicht. Bei den eigentlichen Selbstzündungsversuchen dürfte der Fehler nicht über  $15^\circ$  betragen haben. Induktionszeiten von wesentlich über  $1/10$  sek. wurden wegen der Wärmeableitung vermieden.

Die  $\kappa$ -Werte der Gemische<sup>2)</sup> lassen sich bequem genau genug berechnen; dabei ist besonders darauf zu achten, daß bei Variation der Gemischzusammensetzung (des Luftüberschusses  $\lambda$ )  $\kappa$  in einer für die Temperaturberechnung nicht vernachlässigbaren Weise sich verändert. Für stöchiometrische Gemische, die normalerweise verwendet wurden, wurde in dieser Arbeit ein für ein mittleres Temperaturgebiet und normale Kohlenwasserstoffe passender Standardwert von  $\kappa = 1,323$  benutzt [vgl. <sup>3)</sup>]. Das Rechnen mit einem Universalwert statt mit individuellen Größen hat beim Vergleich mit Klopfversuchen Vorteile, weil man dann zu deren Auswertung auch nur den gleichen Standardwert zu benutzen braucht. Der für die Selbstzündungsversuche daher rührende Fehler übersteigt nicht die bisher erreichten Fehlergrenzen; bei Variation von  $\lambda$  muß aber unbedingt die Änderung von  $\kappa$  mitberücksichtigt werden.

Ein Fehler in der Anfangstemperatur wirkt sich, je nach dem Kompressionsverhältnis, mit dem doppelten oder mehr in der Endtemperatur aus. Bei den letzten Messungen mit Ölmantel dürfte der daher rührende Fehler der Endtemperatur 2 bis  $3^\circ$  nicht überschritten haben; in den früheren Messungen mag es aber gelegentlich gut das Doppelte betragen haben.

#### Die Versuchsergebnisse.

Die Ergebnisse störungsfrei verlaufener Versuche sind in Tabelle 1 und 2 und Fig. 5 zusammengestellt. Nr. 1 bis 61 Tabelle 1 stellen die Klopfversuche dar. Die übrigen Tabellen geben Daten der Selbstzündungsversuche.

<sup>1)</sup> Tizard, *Proceed. N.E. Coast. Engin.* 81, 381 (1921).  
<sup>2)</sup> Tizard und Pye, *Philos. Magazine* (7) 1, 1094 (1926); Tizard, *Trans. Faraday Soc.* 22, 352 (1926); Tizard u. Pye, *Philos. Magazine* 44, 79 (1922).

<sup>3)</sup> Vgl. dazu Bennowitz und W. Rosner, *Zschr. physikal. Chem. Abt. B* 59, 126 bis 144 (1938).  
<sup>4)</sup> Justi, *Spezifische Wärmen, Enthalpie, Entropie und Dissoziation technischer Gase*. Springer, Berlin 1938.



In Fig. 4 ist eine Reihe charakteristischer Flammenaufnahmen zusammengestellt. Da das Flammenbild als solches weniger interessierte, wurde mit nur kleinen Filmgeschwindigkeiten gearbeitet, so daß Einzelheiten auf den meisten Aufnahmen schwer zu erkennen sind. Als Typus normaler Verbrennung mit Funkenzündung kann Nr. 60 gelten (ein stöchiometrisches Pinakolin-Luftgemisch mit verhältnismäßig niedriger Flammengeschwindigkeit). Die Bewegung der Flamme geht von links nach rechts auf dem Bilde, die des Filmes senkrecht dazu nach oben. Die Neigung der Flammenspur gibt die Flammengeschwindigkeit. Links oben im Bilde (kleines Fenster des Reaktionsgefäßes) ist gezündet worden; mit etwas steigender Geschwindigkeit breitet sich die Flamme nach rechts aus, verliert ziemlich plötzlich an Geschwindigkeit (vgl. auch Bild Nr. 36), wird dann wieder schneller, um gegen Ende der Verbrennung immer langsamer zu werden. Nach Aufnahmen von Schulze<sup>1)</sup> mit dem Thun-schen Zeitdehner dürfte es sich vielleicht bei dem ersten Knick um den Punkt handeln, wo die ursprünglich etwa halbkugelförmige Flammenfront durch eine reflektierte Druckwelle eingedrückt wird und so ein Stadium kleinster Ausdehnung durchläuft. Die Verlangsamung der Flamme gegen Ende der Verbrennung ist wohl auf die Kompression zurückzuführen. Die Leuchterscheinungen hinter der Flammenfront, die sehr deutlich die Rückwärtsbewegung der Gasteile nach Durchlaufen der Flammenfront erkennen lassen [vor der Flammenfront wird das unverbrannte Gemisch durch die fortschreitende Verbrennung komprimiert und in Richtung der Flamme fortbewegt, um nach Passieren der Flamme seine Richtung umzukehren, bis es bei beendeter Verbrennung fast den ursprünglichen Platz erreicht hat (ganz erreicht es seinen Platz nicht wieder, vgl. <sup>2)</sup>)], sind wohl zum größten Teil auf durch die Flammenfront gerissene unverbrannte Gasteile zurückzuführen [vgl. <sup>3)</sup>]. Nähert man sich der Klopfgrenze, so können je nach dem gewählten Brennstoff verschiedene Flammenbilder entstehen. Bei den paraffinischen Kohlenwasserstoffen tritt gegen Ende der Verbrennung scheinbar eine enorme Steigerung der Flammengeschwindigkeit ein, deren Folgeerscheinung eine Leuchterscheinung ist, die sich durch das ganze Reaktionsgefäß mit hoher Geschwindigkeit ausbreitet (vgl. Bild 2). Bei Alkohol (Bild Nr. 36) ist gegen Ende der Verbrennung (kurz vor der Klopfgrenze) eine Selbstzündung sichtbar (Bild 36 unten rechts), die dann aber mit normaler Flammengeschwindigkeit weiterläuft. Ganz zum Schluß steigert sich die Verbrennung noch so stark (auf dem Bilde nicht sichtbar, da das Sichtfenster nicht über die ganze Länge des Reaktionsgefäßes (unge-

Tabelle I.

Versuchs-Nr.	Stoff	Kompressionsverhältnis	abs. Ausgangstemperatur °C	abs. Endtemperatur °C	Klopfen	Flammengeschwindigkeit m/sek.
1	Heptan	1:5,5	319	553	nein	
2	stöchiometrisch	1:5,4	328	562	ja	5-7
3	"	1:5,5	328	568	ja	
14	Heptan	1:5,5	323	560	nein	
13	iso-Octan	1:6	319	570	nein	
16	{ 50:50 Volt-%	1:7	306	575	nein	5-7
11	"	1:6,3	319	580	?	
12	"	1:6,4	318	582	ja	
15	"	1:7	310	583	ja	
16	Heptan	1:6	330	590	nein	
18	iso-Octan	1:7	317	595	nein	
20	{ 25:75 Vol-%	1:6,5	326	600	nein	5-7
19	"	1:7,1	319	603	ja	
17	"	1:6,5	329	605	ja	
5	iso-Octan	1:7,7	314	610	nein	
9	stöchiometrisch	1:8	314	615	nein	
6	"	1:7,8	319	620	nein	5-7
8	"	1:7,9	321	628	ja	
10	"	1:8	324	635	ja	
22	Benzol	1:8	306	600	nein	
24	stöchiometrisch	1:8	327	640	nein	
25	"	1:8	331	649	ja	6-7
26	"	1:8	333	652	ja	
32	Alkohol	1:8	322	630	nein	
36	stöchiometrisch	1:8	327	651	nein	
34	"	1:8	334	655	ja	4-6
33	"	1:8	337	660	ja	
53	Methyläthylketon	1:8	296	580	nein	
54	"	1:8	322	630	nein	5-8
55	"	1:8	327	640	ja	
56	"	1:8	331	649	ja	
59	Pinakolin	1:6,5	300	552	nein	
68	stöchiometrisch	1:6,5	303	563	nein	1,5-3,5
60	"	1:6,5	311	571	nein	
61	"	1:6,5	316	600	nein	

fähr 22 cm) reicht (ungefähr 1 cm ist verdeckt), daß ein Aufleuchten des gesamten Volumens erfolgt. Bei größerer Auflösung (d. h. insbesondere größere Filmgeschwindigkeit) der Bilder würden die aus der Literatur bekannten, mit hoher Geschwindigkeit hin und her laufenden Stoßwellen erkennbar werden<sup>4)</sup>.

Bei den Versuchen ohne Fremdzündung liegen ähnliche Erscheinungen vor. Je kürzer der Zündverzögerung ist, um so gleichmäßiger setzt die Zündung im ganzen Volumen ein. Vergleiche Bild 80 und 50: Bild 80 zeigt die Selbstzündung eines stöchiometrischen Heptan-Luftgemisches bei einer Induktionszeit von  $3 \cdot 10^{-2}$  sek. Nachdem die Selbstzündung links im Bilde an einem Punkte, der vermutlich durch seine Temperatur ausgezeichnet war, ein-

<sup>1)</sup> Siehe Jost, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, Berlin 1939, S. 142 (dasselbe Schulze).

<sup>2)</sup> Siehe Jost, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, a. a. O., S. 147ff. und 516.

<sup>3)</sup> Withrow und Boyd, Ind. engin. Chem. 23, 539 (1931).

<sup>4)</sup> Rasseweiler und Withrow, Ind. engin. Chem. 25, 923, 1359 (1933); 29, Nr. 6 (1936).

gesetzt hat, zündet kurz darauf das ganze Volumen. Bild 50 (Cetan) mit nur  $4 \cdot 10^{-3}$  sek. Induktionszeit zeigt dies noch deutlicher: hier zündet praktisch das gesamte Gemisch an allen Stellen gleichzeitig. Es ist dasselbe Bild wie bei starkem Klopfen, abgesehen von der fehlenden normalen Flamme. Es scheint danach ein ganz kontinuierlicher Übergang von Selbstzündung mit normaler Verbrennung bis zu hartem Klopfen zu existieren.

Ganz allgemein wurde beobachtet, daß bei

Tabelle 2 (Fortsetzung)

Ver- suchs- Nr.	Stoff	Kom- pressions- verhältnis	abs. Aus- gangs- tempe- ratur °C	abs. End- tempe- ratur °C	Induk- tions- zeit $10^{-3}$ sek.
101	Alkohol	1: 8	366	717	2,52
103	stöchiometrisch	1: 8	368	721	2,25
97	"	1: 6,5	402	738	1,10
105	"	1: 6,5	403	741	1,02
106	"	1: 6,5	404	743	0,85
68	iso-Octan	1: 7,00	333	630	14,6
70	stöchiometrisch	1: 7,67	333	645	8,0
328	"	1: 9,16	320	653	6,8
327	"	1: 9,45	320	660	5,0
71	"	1: 8,45	333	663	4,7
76	"	1: 8,45	333	663	4,82
329	"	1: 10,44	320	670	3,6
326	"	1: 10,43	320	673	3,4
77	"	1: 9,58	333	690	2,25
78	"	1: 9,58	333	691	1,88
324	"	1: 11,5	320	704	1,43
325	"	1: 11,75	320	704	1,20
213	Diisobutyl- CH <sub>3</sub>	1: 9,3	349	717	6,10
212	C=CH <sub>2</sub>	1: 9,3	350	718	8,32
211	CH <sub>2</sub>	1: 9,3	356	729	3,11
223	stöchiometrisch	1: 9,3	379	776	0,46
232	stöchiometrisch	1: 9,3	342	702	13,80
225	"	1: 9,3	359	736	3,03
225	"	1: 9,3	367	752	1,47
139	Pinakolin	1: 12,0	314	702	10,81
138	stöchiometrisch	1: 12,0	321	715	8,16
136	"	1: 12,0	326	727	7,35
133	"	1: 12,0	334	743	2,63
142	"	1: 12,0	342	761	0,90
134	"	1: 12,0	347	774	1,02
177	Methyläthyl- keton	1: 8	360	704	9,65
178	stöchiometrisch	1: 8	361	707	9,72
175	"	1: 8	364	712	3,87
174	"	1: 8	375	735	1,34
175	"	1: 8	389	762	0,60
182	n-Heptan	1: 6,5	322	591	13,0
183	stöchiometrisch	1: 6,5	325	597	10,0
164	"	1: 6,5	328	604	7,1
165	2 at Ausgangs- druck	1: 6,5	342	628	2,4
166	"	1: 6,5	346	636	1,6
204	n-Heptan	1: 7,0	340	622	4,8
205	Luftüberschuß- zahl: $\lambda = 0,8$	1: 7,0	358	655	1,2
206	"	1: 7,0	360	659	1,0
207	"	1: 7,0	370	677	0,5
208	n-Heptan	1: 7,0	312	592	18,0
209	Luftüberschuß- zahl: $\lambda = 1,2$	1: 7,0	326	619	5,4
210	"	1: 7,0	332	631	3,3
211	"	1: 7,0	337	641	2,0
212	"	1: 7,0	347	659	0,95
247	iso-Octan	1: 12,0	295	657	8,0
245	stöchiometrisch	1: 12,0	297	661	6,2
249	"	1: 12,0	305	690	3,4
253	+ 0,2 Vol.-% Bleitetraäthyl	1: 12,0	313	698	2,3
254	"	1: 12,0	334	743	0,68

Tabelle 2.

Ver- suchs- Nr.	Stoff	Kom- pressions- verhältnis	abs. Aus- gangs- tempe- ratur °C	abs. End- tempe- ratur °C	Induk- tions- zeit $10^{-3}$ sek.
111	n-Heptan	1: 8,72	294	590	21,5
113	stöchiometrisch	1: 9,17	294	600	13,3
87	"	1: 6,56	332	612	7,48
110	"	1: 9,74	294	613	7,24
209	"	1: 7	327	614	7,62
112	"	1: 10,10	294	619	6,56
114	"	1: 10,28	294	623	4,45
110	"	1: 10,29	294	624	4,12
207	"	1: 7	335	630	3,39
85	"	1: 6,56	343	631	3,33
115	"	1: 10,70	294	632	3,22
118	"	1: 10,86	294	634	2,77
206	"	1: 7	340	636	2,57
116	"	1: 11,15	294	640	2,26
84	"	1: 6,56	350	644	1,83
117	"	1: 11,80	294	652	1,29
126	"	1: 12,02	294	656	1,1
205	"	1: 7	350	658	0,95
83	"	1: 6,56	366	674	0,57
124	"	1: 13,86	294	690	0,2
48	n-Cetan	1: 2,96	413	583	6,52
49	stöchiometrisch	1: 3,12	413	595	3,38
51	"	1: 3,32	413	608	1,6
52	"	1: 3,74	413	630	0,6
50	"	1: 3,80	413	632	0,4
330	Benzol	1: 6,5	369	678	11,0
331	stöchiometrisch	1: 6,5	373	685	8,32
334	"	1: 6,5	375	688	7,65
336	"	1: 6,5	381	701	4,3
338	"	1: 6,5	383	703	3,8
339	"	1: 6,5	390	717	2,02
340	"	1: 6,5	389	716	1,98
341	"	1: 6,5	396	728	1,23
342	"	1: 6,5	407	747	0,67
343	"	1: 6,5	408	749	0,57
94	"	1: 10,1	326	687	8,85
95	"	1: 10,1	330	696	5,1
191	"	1: 8	356	697	4,57
203	"	1: 8	359	703	3,68
199	"	1: 8	362	709	3,0
198	"	1: 8	370	724	1,55
194	"	1: 8	373	731	1,21
193	"	1: 8	374	733	1,13
197	"	1: 8	382	748	0,62
201	"	1: 8	385	754	0,50

Selbstzündung oder Klopfen die Leuchterscheinung wohl stärker, aber auch schneller beendet ist als bei normaler Flamme, eine Erscheinung, die entweder durch die Vorbereitung des Gemisches durch die Vorreaktion oder durch die aufstrebende Stoßwelle bedingt sein könnte und ihre Parallele im Motor darin hat, daß bei Klopfen ein Nachbrennen der Auspuffgase verschwindet [Schnauffer<sup>1)</sup>]. (Vgl. auch Bild 36 und 60.)

Die Ergebnisse von Klopfversuchen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3 gibt die Versuche an, bei denen erstmalig die für Klopfen typische Stoßwelle (s. Bild 2) auftritt, wie sie auch aus Motorenversuchen bekannt ist. Vergleicht man die in Tabelle 3 angegebenen kritischen Kompressionsverhältnisse mit den kritischen Kompressionsverhältnissen derselben stöchiometrischen Gemische in Prüfmotoren, so

Tabelle 3.

Versuchs-Nr.	Stoffgemisch (stöchiometr.)	absol. Temp. T <sub>A</sub> <sup>2)</sup>	krit. K. V. <sup>3)</sup>
2	n-Heptan	582	3,6
12	n-Heptan i-Octan	582	4,0
19	n-Heptan i-Octan 50/50 Vol.-%	603	4,24
8	i-Octan	628	5,0
25	Benzol	649	5,55
34 (33)	Alkohol	655	5,70
55	Methyläthylketon	640	5,32

Kompressionsverhältnis von 13 aber eine solche von rund 160° stattfindet. (Berechnet aus gemessenen Enddrücken bei einer Ladelufttemperatur von ~100°C.) Die gleichen Ursachen dürften für die geringe Differenz der kritischen Daten von iso-Octan gegenüber Benzol und Alkohol verantwortlich sein.

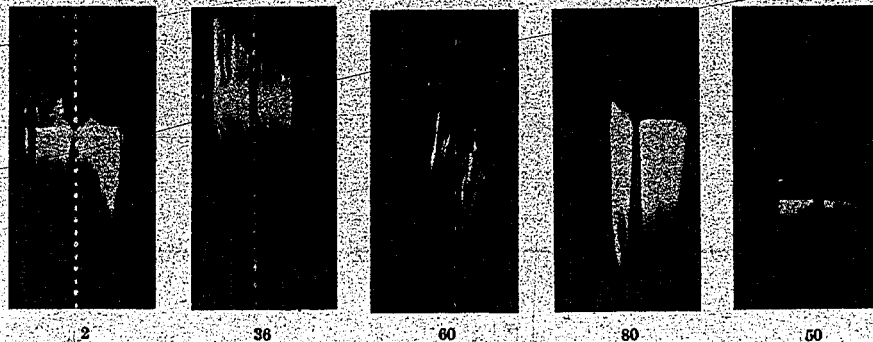


Fig. 4.

Flammenaufnahmen.

Das Flammenbild des Versuches Nr. 2 zeigt Aufnahmen an der Klopfgrenze; stöchiometrisches Heptan-Luftgemisch. Nr. 36 Aufnahmen kurz vor der Klopfgrenze; stöchiometrisches Alkohol-Luftgemisch.

Versuch Nr. 60 zeigt einen normalen Flammenverlauf von einem stöchiometrischen Pinakolin-Luftgemisch.

(Filmbewegung von unten nach oben; bei Fremdzündung liegt das Bild des Zündfunken links oben.)

Die Flammenbilder der Versuche Nr. 80, 50 zeigen Aufnahmen von Selbstzündungsversuchen mit abnehmenden Induktionszeiten.

Nr. 80 stöchiometr. Heptan-Luftgemisch ( $\tau = 3 \cdot 10^{-3}$  sek.)

Nr. 50 „ Octan-Luftgemisch ( $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$  sek.)

fällt vor allem die geringe Differenz zwischen den kritischen Werten von n-Heptan und iso-Octan bei unseren Versuchen gegenüber denen im Prüfmotor auf. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei steigendem Kompressionsverhältnis im Prüfmotor (durch Verringerung des mittleren Wandabstandes) die Wärmeableitung immer stärker ins Gewicht fällt, wie sich z. B. aus Versuchen von F. A. F. Schmidt<sup>2)</sup> an einem Prüfmotor ergibt, wo bei einem Kompressionsverhältnis von ungefähr 6 eine Temperaturabnahme durch Leitung von rund 40°, bei einem

Diese Klopfversuche wurden in der Hauptsache deshalb durchgeführt, weil ein unmittelbarer Vergleich der Selbstzündungsversuche mit dem Klopfen ermöglicht werden sollte. Die gefundene Reihenfolge der Klopfbarkeit von Heptan, iso-Octan, Benzol und Alkohol steht etwa in Übereinstimmung mit der Erfahrung am praktischen Motor.

Selbstzündungsversuche sind in Tabelle 2 und Fig. 5 zusammengefaßt. Die angegebenen Induktionszeiten wurden vom Augenblick maximaler

<sup>1)</sup> T<sub>A</sub> = die berechneten Temperaturen nach der Kompression durch den Kolben.

<sup>2)</sup> Aus T<sub>A</sub> abgeleitetes und auf eine Ausgangstemperatur von 373° abs. bezogenes Kompressionsverhältnis.

<sup>1)</sup> Schnauffer, DVL-Jahrbuch 1931, 378.  
<sup>2)</sup> F. A. F. Schmidt, Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrt-Forschung, Heft 9, 241 (1939).

Kompression an (wo der Kolben festgehalten wurde) bis zum Einsetzen der Zündung in irgend einer Stelle des Reaktionsraumes gerechnet. Hierbei ergab sich, wie schon erwähnt, daß bei immer kürzeren Induktionszeiten die Erscheinung der Selbstzündung der Erscheinung des Klopfens im unverbrannten Gemisch bei Fremdzündung immer ähnlicher wurde.

In Fig. 5 sind die Logarithmen der so erhaltenen Induktionszeiten gegen die reziproken absoluten Temperaturen  $\frac{1}{T}$  aufgetragen. Die durch die Meßpunkte gelegten Geraden erfüllen die Gleichung  $\tau = A \cdot e^{E/RT}$  ( $A$ : Konstante,  $\tau$ : Induktionsperiode,  $E$ : scheinbare Aktivierungsenergie,  $R$ : Gaskonstante).

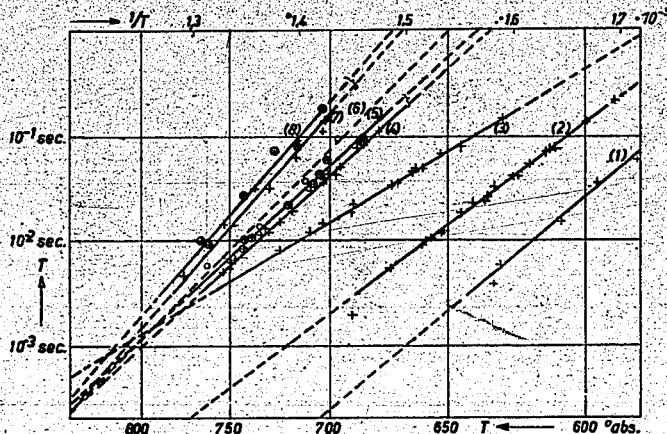


Fig. 5.

Zündverzögerung  $\tau$  (im logarithmischen Maßstab gegen  $1/T$  aufgetragen). (1) Cetan stöchiometrisch ( $\sim 35$ ); (2) n-Heptan stöchiometrisch ( $\sim 35$ ); (3) iso-Octan stöchiometrisch ( $\sim 30$ ); (4) Benzol stöchiometrisch ( $\sim 44$ ); (5) Alkohol stöchiometrisch ( $\sim 44$ ); (6) Methyl-äthylketon stöchiometrisch ( $\sim 46$ ); (7) Diisobutylen stöchiometrisch ( $\sim 50$ ); (8) Pinakolin stöchiometrisch ( $\sim 50$ ). (In Klammern scheinbare Aktivierungsenergien in kcal.)

Diese Beziehung kann als Interpolationsformel für ein nicht zu großes Temperaturgebiet gelten, in dem sich die charakteristischen Einzelschritte der untersuchten Reaktion nicht ändern. Zu der Darstellung  $\log \tau$  gegen  $\frac{1}{T}$  ist zu bemerken: für nicht zu kompliziert verlaufende Reaktionen ist sowohl für Wärmeexplosion als auch für Kettenexplosion ein annähernd exponentieller Verlauf der Zündverzögerung mit der Temperatur zu erwarten, jedoch ist dies keinesfalls ein strenges Gesetz [vgl. <sup>1)</sup> <sup>2)</sup> <sup>3)</sup>]. Da

<sup>1)</sup> Jost, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, a. a. O., S. 4 und 256ff.

<sup>2)</sup> Todes, Acta Phys. USSR, 5, 785 (1936).

<sup>3)</sup> Semenov, Ztschr. Physik 48, 571 (1923); Chain Reactions, Oxford 1935.

bisher noch keine gesicherten Beobachtungsunterlagen für eine strengere Rechnung vorliegen, ist es sinnvoll, unter Beachtung der obigen Einschränkungen mit dem einfachen Exponentialansatz zu rechnen. Die Neigung der in Fig. 5 eingezeichneten Geraden ergibt die scheinbaren Aktivierungsenergien  $E$ . Wo die Meßpunkte noch nicht sicher eine Gerade festlegen, ist ein Intervall gekennzeichnet, in das diese Gerade fallen dürfte. (Am unsichersten ist deren Lage noch für Alkohol und Pinakolin, entsprechend auch die abgeschätzten Aktivierungsenergien.) Man könnte vielleicht nach den Versuchen von Townend und Mitarb.<sup>1)</sup> annehmen, daß überhaupt keine einfache Beziehung zwischen Induktionszeit und Temperatur bestände.

Dieser Folgerung stehen aber unsere Versuche wie auch die älteren von Tizard und Pye sowie im gewissen Grade auch Erfahrungen am Motor eindeutig entgegen.

Bemerkenswert an den gefundenen Zündtemperaturen für gegebene kurze Induktionszeit (z. B.  $10^{-2}$  sek.) ist der relativ geringe Unterschied für die gesamten untersuchten Stoffe. In einem Intervall von nur  $100^\circ$  liegen alle Stoffe von n-Heptan bis Pinakolin. Diese verhältnismäßig geringe Spanne zwischen den klopfreudigsten und klopfbesten Brennstoffen ist auch nach Tizard und Pye und den vorhergehenden Klopfversuchen vorhanden (siehe Tab. 3). Im Mittel ergibt sich für die Vorreaktion im unverbrannten Gemisch eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit bei 12 bis 18° Temperatursteigerung, was einer scheinbaren Aktivierungsenergie von 30 bis 60 kcal

entsprechen würde. Verglichen mit Motorversuchen besteht Übereinstimmung darin, daß bei extremen Temperaturbedingungen die Aromaten wegen ihrer stärkeren Temperaturempfindlichkeit (größerer Aktivierungsenergie) sich relativ gegenüber paraffinischen Benzinen verschlechtern müssen (vergleiche Benzol und iso-Octan bei einem Zündverzug von  $2 \cdot 10^{-3}$  sek.). Die gestrichelten Teile der Geraden gehen über das eigentliche Meßgebiet hinaus und sind daher als unsicher zu betrachten.

In Fig. 5 steigen die Temperaturen zu einer Induktionszeit von  $\frac{1}{100}$  sek. von Cetan, einem Diesel, Vergleichskraftstoff, über n-Heptan, iso-Octan, Alkohol, Benzol, Methyläthylketon und Pinakolin,

<sup>1)</sup> Townend und Mitarb., Proceed. Roy. Soc., London (A) 141, 484ff. (1933).

Diisobutylen an, während in einem Gebiet von  $\sim 1/1000$  sek. Induktionszeit das Verhältnis der letztgenannten Stoffe gegenüber iso-Octan sich umkehrt (vgl. dazu das oben Gesagte).

Der Einfluß von kleinen Zusätzen von Bleitetraäthyl (0,2 Volumen-%) auf das Selbstzündungsverhalten wurde an stöchiometrischen n-Heptan- und iso-Octan-Luftgemischen untersucht. Der Einfluß auf n-Heptan war so gering, daß die Meßgenauigkeit der Apparatur nicht ausreichte, darüber

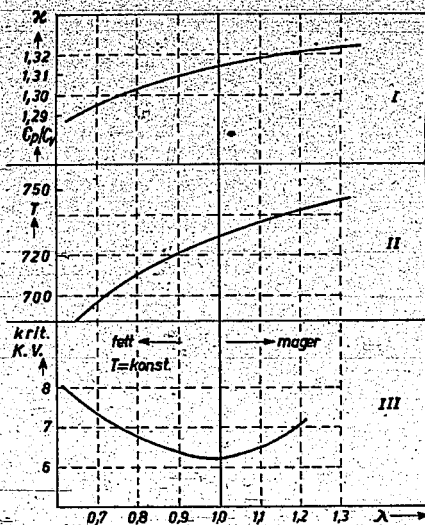


Fig. 6.

I Abhängigkeit von  $\alpha = C_p/C_v$  eines normalen paraffinischen Benzins bei einer mittleren Temperatur (575° abs.) von der Luftüberschußzahl  $\lambda$ .

II Änderung der Kompressionsendtemperatur (Kompressionsverhältnis 12,5; Ausgangstemperatur = 330° abs.) mit der Luftüberschußzahl  $\lambda$ .

III Abhängigkeit des kritischen Kompressionsverhältnisses von der Luftüberschußzahl  $\lambda$  bei einem mittleren paraffinischen Benzin, unter Berücksichtigung der Änderung von  $\alpha$  und der Verbrennungswärme.

Als Bedingung für die Klopfgrenze (kritisches Kompressionsverhältnis) wurden gleiche Maximaltemperaturen im Unverbrannten nach der adiabatischen Kompression durch den Kolben (kritisches Kompressionsverhältnis) und durch die Flamme (Einfluß der von  $\lambda$  abhängigen Verbrennungswärme) gegen Ende der Verbrennung angenommen.

Aussagen zu machen. (Auch beim Prüfmotor ist nur ein geringer Einfluß auf die Klopfestigkeit festzustellen.) Stöchiometrische iso-Octan-Luftgemische zeigten eine Verlängerung der Zündverzögerung bei Bleizusatz (siehe Tabelle 2) in Übereinstimmung mit der Erfahrung am Motor.

Eine Versuchsreihe über den Druckeinfluß auf die Selbstzündungsreaktion von n-Heptan ist ebenfalls in Tabelle 2 wiedergegeben. Bei diesen Versu-

chen wurde der Zylinder bei hoher Kolbenstellung wie üblich mit dem zu untersuchenden Gasgemisch gefüllt und anschließend das Gasgemisch durch langsames Herablassen des Kolbens auf 2 at vor-komprimiert. Erst dann wurde es durch adiabatische Kompression zur Selbstzündung gebracht. Da die Versuche mit großen experimentellen Schwierigkeiten verbunden waren, konnte nur eine Versuchsreihe durchgeführt werden. In Übereinstimmung mit den Versuchen von Tizard und Pye konnte nur ein geringer Druckeinfluß beobachtet werden, und zwar entsprach einer Druckverdopplung maximal einer Erhöhung der Reaktionsge-

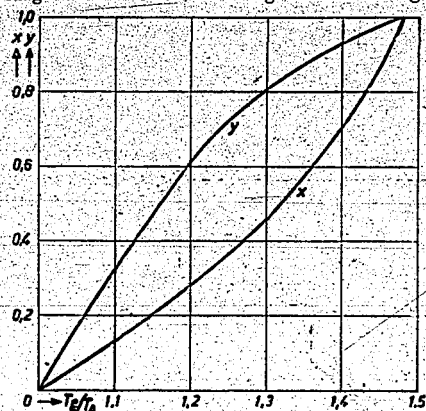


Fig. 7.

Verhältnis der Temperatur im Unverbrannten zur Temperatur vor der Verbrennung (am Ende der Kompression durch den Kolben) in Abhängigkeit von dem Umsatz ( $\alpha$ ) und der Stellung der Flammenfront im Reaktionsgefäß ( $y$ ). (Gesamtlänge des Reaktionsgefäßes (Ordinate) ist = 1.)

schwindigkeit auf etwa das Doppelte (was ungefähr einer Temperaturerhöhung von 12° äquivalent wäre). Genauere Angaben ließen sich bisher wegen der unzureichenden Meßgenauigkeit nicht erzielen.

Der scheinbare Einfluß der Brennstoff-Konzentration auf die Reaktionsgeschwindigkeit ist bemerkenswert groß (ebenfalls Tabelle 2). Dies rührt daher, daß bei Veränderung der Gemischzusammensetzung die spez. Wärme und damit das Verhältnis  $C_p/C_v = \alpha$  des Gemisches geändert wird (s. Fig. 6). Dies wird sich bei adiabatischer Kompression natürlich stark auf die Endtemperaturen im Unverbrannten auswirken (Fig. 6 II). Bei einer Änderung von ( $\lambda$  = Verhältnis Anteil Luft im Gemisch, bezogen auf die zur vollständigen Verbrennung nötige Menge)  $\lambda = 0,8$  bis  $\lambda = 1,2$  würden bei einem Kompressionsverhältnis 13 die Endtemperaturen um  $\sim 30^\circ$  ansteigen (Fig. 6 II).

Der wirkliche Einfluß [vom reaktionskinetischen Standpunkt aus läßt eine Zunahme der Brennstoffkonzentration eine Vergrößerung der Reaktions-

geschwindigkeit erwarten<sup>1)</sup>; vgl. die Versuche über langsame Oxydation — liegt also entgegengesetzt dem gemessenen scheinbaren Effekt] der Konzentration auf das Klopfverhalten ist nach Abzug dieses Temperatureffektes, ebenfalls in Übereinstimmung mit Tizard und Pye, sehr klein. Über die genaue Größe ließen sich wegen experimenteller Schwierigkeiten noch keine sicheren Aussagen machen.

#### Die Berechnung des Klopfinsatzes aus dem Selbstzündungsverhalten.

Die von der Zündkerze sich ausbreitende Flamme verdichtet bei den Versuchen mit Fremdzündung nach der Kompression durch den Kolben das

Kurve *a* auf Fig. 8 gibt als Abszisse die jeweilige Stellung der normalen Flamme (entnommen aus Aufnahmen gerade vor der Klopfgrenze) im langgestreckten Reaktionsgefäß an. Als Ordinaten sind die bis zum Durchlaufen des gesamten Reaktionsgefäßes noch notwendigen Zeiten aufgetragen worden. Aus Fig. 7 lassen sich bei bekannten Kompressionstemperaturen vor der Verbrennung [hier entsprechend Tab. 3, bei Heptan stöchiometrisch 562° abs. (Versuch Nr. 2) und bei iso-Octan stöchiometrisch 628° abs. (Versuch Nr. 8)] die zu Kurve *a* zugehörigen Temperaturen im Unverbrannten entnehmen. Trägt man zu den so berechneten Temperaturen im Unverbrannten die entsprechend Fig. 6 gemessenen Induktionszeiten ein, so erhält man Kurve *b*. Würde vom Schnittpunkt *I* der Kurven *a* und *b* an keine weitere Temperaturerhöhung mehr im Unverbrannten durch die Kompression der fortschreitenden Flamme erfolgen, so könnte Selbstzündung erst bei völliger Verbrennung (*I*) eintreten, da Flammenlaufzeit und Induktionszeit gleich lang sind. In Wirklichkeit muß Zündung natürlich früher eintreten. Erreicht die Flamme Punkt 2, so muß unter denselben Voraussetzungen schon, entsprechend der Induktionszeit im Unverbrannten, Selbstzündung bei *II* nach  $\frac{1}{100}$  sek. eintreten. Entsprechendes gilt für 3, 3', III oder 4, 4', IV.

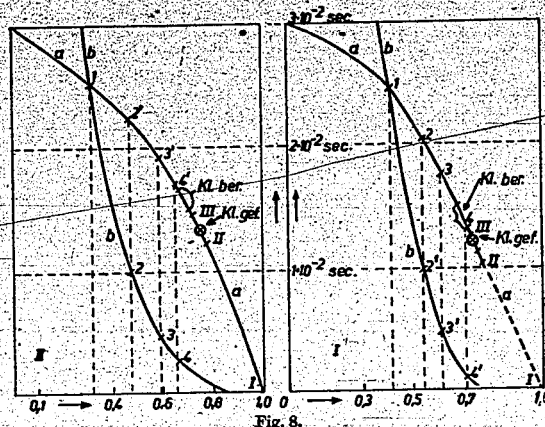


Fig. 8. Berechnung des Klopfinsatzes bei Fremdzündung aus den Zündverzugsmessungen.

I: stöchiometrisches n-Heptan-Luftgemisch (Versuchs-Nr. 2);

II: stöchiometrisches iso-Octan-Luftgemisch (Versuchs-Nr. 8).

Kurve *a* hat als Ordinate die Laufzeit der Flamme bis zur völligen Verbrennung (aus Versuchen kurz vor der Klopfgrenze). Kurve *b* hat als Ordinate die Zündverzögerung, die den jeweiligen Temperaturen im Unverbrannten entsprechen.

unverbrannte Restgas weiterhin. Da die Flammengeschwindigkeit klein ist gegenüber der Schallgeschwindigkeit, ist in jedem Augenblick voller Druckausgleich vorhanden. Bei bekannter Verbrennungswärme und spezifischer Wärme des Gemisches läßt sich die Temperatur im Unverbrannten berechnen [vgl. z. B. Damköhler<sup>2)</sup>].

Die so berechneten Temperaturen im Unverbrannten als Funktion des Umsatzes sind aus Fig. 7 zu entnehmen. Auf Fig. 7 sind als Ordinate die Procente Umsatz des eingeschlossenen Gemisches, als Abszisse das Verhältnis der jeweiligen Temperaturen im Unverbrannten zu der Ausgangstemperatur vor der Fremdzündung eingetragen.

<sup>1)</sup> Jost, a. a. O., S. 433ff.

<sup>2)</sup> Damköhler, Jahrb. d. D. L. F. II 1933, 62.

Falle eintreten müßte (Fig. 8). Der wirkliche beobachtete Klopfinsatz liegt kurz darunter. Fig. 8 II zeigt dieselbe Berechnung des Klopfinsatzes für ein stöchiometrisches iso-Octan-Luftgemisch. Daß überhaupt eine so gute Übereinstimmung möglich ist, wie sie Fig. 8 zeigt, beruht zum Teil darauf, daß Klopfversuche und Selbstzündungsversuche unter den gleichen Bedingungen ausgeführt sind und daß infolgedessen die begangenen Vernachlässigungen in beiden Fällen sich annähernd kompensieren.

Im folgenden soll noch auf einige scheinbare Diskrepanzen eingegangen werden, die zwischen dem Selbstzündungsverhalten und dem Klopfverhalten im praktischen Motor zu bestehen scheinen.

1. Eine Erhöhung der Ansaugtemperatur hat im Otto-Motor eine verhältnismäßig geringfügige Erhöhung der Klopfneigung zur Folge, im Gegensatz zu dem, was man nach dem hohen Temperaturkoeffizienten der Klopfreaktion erwarten könnte. Dies rührt daher, daß die Temperatur des unverbrannten Gemisches infolge sekundärer thermischer Effekte nicht entfernt so stark ansteigt wie die Temperatur der Ansaugluft; wie sich auch unmittelbar aus Messungen der mittleren Verbrennungsraumtemperaturen in Abhängigkeit von der Ansauglufttemperatur ergibt. Nach Philippovich<sup>1)</sup> ergibt eine Temperaturerhöhung der Ansauglufttemperaturen um 120° nur eine Erhöhung der mittleren Verbrennungsraumtemperaturen um 30°.

2. Bei Überladung ist im Gegensatz zu dem beobachteten kleinen Druckeinfluß bei Selbstzündung eine sehr starke Klopfverstärkung im Motor zu beobachten.

Es ergibt sich im Motor in erster Linie eine erhöhte Wärmeproduktion pro Volumeneinheit und damit indirekt höhere Wandtemperatur. Die Folge ist eine Erhöhung der Temperatur des Unverbrannten und damit der Klopfneigung. Der beobachtete Druckeinfluß im Motor ist daher im wesentlichen ein sekundärer Temperatureffekt.

3. Konzentrationseinfluß: Berücksichtigt man bei verschiedener Gemischzusammensetzung die durch die gleichzeitig veränderten spezifischen und Verbrennungswärmen hervorgerufenen Einflüsse auf die Temperatur im Unverbrannten, so kommt man zu einer Beziehung, wie sie in Fig. 6 III dargestellt ist. Das Kompressionsverhältnis ist so variiert, daß bei veränderter Gemischzusammensetzung gleiche Maximaltemperaturen im Unverbrannten vorliegen (als Bedingung für die Klopfgrenze). Wie Fig. 6 III zeigt, können in Übereinstimmung mit der praktischen Motorerfahrung<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Philippovich, Ztschr. Elektrochem. 42, 72 (1938).

<sup>2)</sup> Vgl. Seeber, Klopfestigkeitsprüfungen an Otto-Motoren. Rundsch. Dtsch. Technik 29 (Sept. 1938).

sowohl vermagerete wie auch überfettete Gemische bis zum Einsetzen der Zündung (Klopfen) im Unverbrannten höher komprimiert werden als ein stöchiometrisches Gemisch.

Der absoluten Berechnung des Klopfverhaltens im praktischen Motor aus dem Selbstzündungsverhalten (die grundsätzlich möglich ist) steht noch im Wege, daß wir bisher über genaue Kenntnis der Temperaturen im unverbrannten Gemisch im Motor in Abhängigkeit von den möglichen Variablen noch nicht verfügen.

#### Zusammenfassung.

1. Es ist eine Apparatur entwickelt worden zur laboratoriumsmäßigen Untersuchung der Verbrennung in adiabatisch verdichteten Brennstoff-Luftgemischen.

2. In dieser Apparatur wurde einerseits mit Funkenzündung der Klopfvorgang studiert mittels photographischer Flammenregistrierung, andererseits wurden Induktionszeiten für die Zündung durch adiabatische Verdichtung ohne Fremdzündung bestimmt.

3. In dem der Messung zugänglichen Intervall lassen sich die gefundenen Induktionszeiten darstellen durch  $\tau = Ae^{E/RT}$ . Die gefundenen Werte der Aktivierungsenergien liegen sämtlich zwischen ~ 30 bis 55 kcal.

4. Es konnte die Identität von Selbstzündungs- und Klopfreaktion aufgezeigt werden.

5. Scheinbare Widersprüche mit dem Verhalten im Motor können behoben werden.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Rahmen eines Herrn Prof. Dr. W. Jost erteilten Forschungsauftrages der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt durchgeführt; wir möchten ihr auch an dieser Stelle unseren Dank für ihre Unterstützung aussprechen.

Leipzig, Physikalisch-chem. Institut der Univ., Abteilung für angewandte physikalische Chemie.

2140

K. Schnauffer  
379

04471

## Das Klopfen von Zündermotoren<sup>1)</sup>

Von Kurt Schnauffer.

251. Bericht der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, E. V. Berlin-Adlershof.  
Motoren-Abteilung.

*Die Untersuchung der Klopferscheinungen von Zündermotoren ist in den letzten 12 Jahren, insbesondere durch die sich allgemein durchsetzende Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses und durch die Verwendung synthetischer Benzine, ein wichtiges Gebiet der motorischen Forschung geworden. Trotz zahlreicher Untersuchungen ist es jedoch bisher noch nicht gelungen, das Wesen des Klopfens einwandfrei festzustellen. Die DVL hat mittels von ihr entwickelter elektrischer Meßverfahren Untersuchungen über das Klopfen durchgeführt, deren Ergebnisse mitgeteilt werden.*

Das Klopfen, das an einem scharfen metallischen Geräusch zu erkennen ist, wurde früher auf das Aneinanderstoßen metallischer Motorenteile zurückgeführt. In letzter Zeit setzt sich mehr und mehr die Ansicht durch, daß die Klopföne durch die plötzliche Verbrennung eines restlichen Gemischteiles entstehen. Diese Vermutung konnte durch die Untersuchungen der DVL bestätigt werden. Hierbei wurde erstmalig einwandfrei festgestellt, daß das Klopfen durch das gleichzeitige Entflammen eines restlichen Gemischteiles hervorgerufen wird.

Eine der für die Versuche verwendeten elektrischen Meßanordnungen, die die verzerrungsfreie Aufzeichnung raschverlaufender Druckvorgänge gestattet, ist in einer früheren Arbeit<sup>2)</sup> eingehend beschrieben worden. An Hand von Oszillogrammen wurde ihre Verwendungsmöglichkeit insbesondere bei der Erforschung und Beurteilung von Verbrennungsvorgängen in Zündermotoren gezeigt.

Ein anderes für die Versuche erforderliches elektrisches Meßverfahren, das gestattet, die Flammenbewegung und Flammenausbreitung in Zylindern raschlaufender Verbrennungskraftmaschinen während des Laufes zu verfolgen, wurde in einer weiteren Arbeit<sup>3)</sup> angegeben.

Letztgenanntes Meßverfahren beruht auf der seit langem bekannten physikalischen Erscheinung, daß eine Gasstrecke durch Flammen ionisiert wird, so daß eine Spannung, die an die Elektroden der Gasstrecke angeschlossen wird, im Augenblick des Flammendurchtrittes einen Strom liefert. Der Strom steuert mittels einer Hochfrequenzschaltung eine Oszillographenschleife, die infolge der Ionisierung bei der Flammenankunft einen Ausschlag gibt. Der Augenblick, der Flammenankunft wird damit in einem Oszillogramm zeitlich festgelegt. Als Gasstrecke wurden normale Zündkerzen verwendet. Mit diesem Meßverfahren wurden in der DVL während der letzten zwei Jahre außer den Klopferscheinungen die Verbrennungsgeschwindigkeiten und die Wirbelgeschwindigkeiten in raschlaufenden Zündermotoren untersucht und ihre Beeinflussung durch die Wirbelung, das Mischungsverhältnis, das Verdichtungsverhältnis usw. bestimmt.

Die durchgeführten Klopfuntersuchungen erstrecken sich auf die Ermittlung des zeitlichen Druckverlaufes während einiger Arbeitsspiele und die Aufzeichnung der Flammenausbreitung im Zylinder während dieser Spiele mittels der beiden angeführten Meßverfahren. Alle Unter-

suchungen wurden an einem luftgekühlten Sh 13-Flugmotorenzylinder der Firma Siemens & Halske A.-G. durchgeführt. Der Zylinder, der auf dem kleinen Einzylinder-Prüfstand der DVL aufgebaut war, hat einen Durchmesser von 105 mm und einen Hub von 120 mm. Abb. 1 zeigt den Verbrennungsraum des Zylinders. Die Kerze mit der Zündstelle A dient zur Entzündung des Gemisches. Die Kerzen 2, 3 und 4 mit den Meßstellen B, C und D sind die zu ionisierenden Gasstrecken, die zusammen mit der Kerze 1 die Ermittlung der Flammenausbreitung und der im Verbrennungsraum herrschenden Verbrennungsgeschwindigkeit gestatten.

Gemessen wird der Augenblick der Ankunft der Flammenfront an diesen Meßstellen. Er wird im Oszillogramm jeweils durch eine scharfe Ablenkung der betreffenden Lichtlinie gekennzeichnet. Da der Zündaugenblick mittels einer anderen Schaltanordnung ebenfalls durch eine scharfe Lichtlinienablenkung bezeichnet wird, so erhält man auf dem abrollenden Oszillographenstreifen jeweils die Zeitstrecken, die die Flamme zum Durchlaufen der einzelnen Entfernungen zwischen den Meßstellen gebraucht hat. Es ergeben sich für die Gesamtstrecke von 130 mm Verbrennungszeiten von 0,005 bis 0,01 s, für die Teilstrecken daher Zeiten in der Größenordnung von 0,001 s. Gleichzeitig aufgenommene Stimmgabelschwingungen ermöglichen, diese Zeiten genau zu messen. Da man die Entfernungen der Meßstellen kennt, so erhält man aus den Entfernungen und den entsprechenden Zeiten die jeweiligen mittleren Verbrennungsgeschwindigkeiten.

Abb. 2 zeigt ein Oszillogramm, auf dem man die Ausbreitung der Flammenfront bei nicht klopfendem Betrieb sehen kann. Die Ablenkungen der Linien a, b, c und d bezeichnen die Ankunft der Flammenfront an den dazugehörigen Meßstellen. Man sieht sehr gut, wie die Flamme, ausgehend von der Zündstelle A, nacheinander die Meßstellen B, C und D passiert. Die Auswertung des Oszillogrammes ergibt, wie Abb. 2 zeigt, mit fortschreitender Flamme eine geringe Verkleinerung der Brennzeiten, d. i. ein kleines Ansteigen der Verbrennungsgeschwindigkeit.

Die auf dem Oszillogramm nicht bezeichneten kleinen Ablenkungen der Lichtlinien c und d sind Ausschläge durch

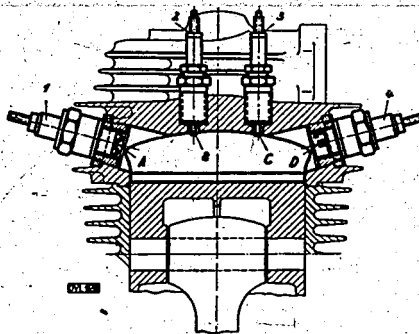


Abb. 1. Verbrennungsraum des Sh 13-Flugmotorenzylinders.  
1 Zündkerze  
A Zündstelle  
2, 3 u. 4 Zündkerzen zur Messung der Flammenankunft  
B, C u. D Meßstellen

<sup>1)</sup> Der Bericht faßt eine gleichlautende Veröffentlichung in der Z. Vdl Bd. 75 (1931), Nr. 15, S. 455/59 und einen auf der ord. Mitgliederversammlung der WGL in Kiel am 20. 8. 1931 über den gleichen Gegenstand in erweiterter Form gehaltenen Vortrag zusammen.

<sup>2)</sup> K. Schnauffer, Aufzeichnung rasch verlaufender Druckvorgänge mittels des Verfahrens der halben Resonanzkurve. Luftfahrtforschung Bd. 6 (1930), Nr. 4, S. 128/136, und DVL-Jahrbuch 1930, S. 304/314.

<sup>3)</sup> K. Schnauffer, Verbrennungsgeschwindigkeiten von Benzin-Benzol-Luftgemischen in Zündermotoren; der Technischen Hochschule Berlin überreichte Dissertation.



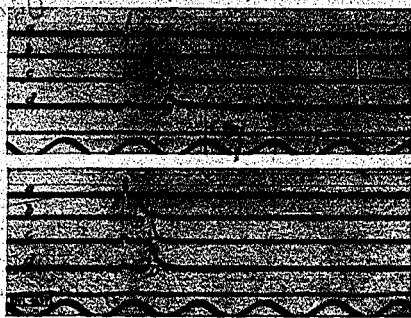


Abb. 2 und 3. Oszillogramme zur Ermittlung der Verbrennungsgeschwindigkeiten.  
Oben: Bei nichtklopfendem Betrieb; unten: bei klopfendem Betrieb.  
a Zündströme, A Zündpunkte  
b, c, d Ionisationsströme, B, C, D Flammenankunftspunkte

Induktionsströme, die durch die Zündung hervorgerufen werden. Sie können durch geeignete Verlegung des Zündkabels beliebig verstärkt oder, wie die Lichtlinie  $\delta$  zeigt, ganz zum Verschwinden gebracht werden. Sie liegen naturgemäß genau senkrecht unter der Ablenkung der Zündlinie und würden aufgezeichnet, um die Oszillogramme leichter auswerten zu können.

Wählt man Verdichtungsverhältnis und Frühzündung so, daß die Temperatur des Gemischrestes die Zündtemperatur des verwendeten Brennstoffes erreicht, so tritt Klopfen durch gleichzeitiges Entflammen dieses noch im Zylinder vorhandenen Gemisches ein. Aus dem Oszillogramm Abb. 3 kann man die Verhältnisse bei klopfendem Betrieb ersehen. Während bei den Arbeitsspielen nach Abb. 2 die Flammenfront an den Meßstellen nacheinander ankommt, tritt beim Klopfen die Flamme gleichzeitig an den räumlich getrennten Meßstellen C und D auf. Das entspricht einer unendlich

großen Verbrennungsgeschwindigkeit auf der Strecke C D. Während also bei klopfreier Verbrennung eine scharf begrenzte Flammenfront jeweils die unmittelbar vor ihr liegenden Gemischteile zur Entflammung bringt, so daß man von einem stetigen Wandern der Flammenfront reden kann, erfolgt beim Klopfen, wie die Aufnahmen erkennen lassen, die Entzündung des Gemischrestes an allen Stellen gleichzeitig. Durch Verschieben der Meßstelle C oder durch weitgehendes Unterteilen der in Frage kommenden Zone kann man die Lage der Flammenfront beim Einsetzen des Klopfstoßes bestimmen. Damit erhält man die Gemischmenge, die gleichzeitig zur Entflammung kommt, und damit einen Maßstab für das Klopfen an sich. Auch aus der senkrechten Drucksteigerung könnte diese Restmenge ermittelt werden. Infolge der stark erhöhten Dissoziation von  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  ist jedoch die erstgenannte Meßart vorzuziehen.

Man kann bei einem gegebenen Verbrennungsraum und einem bestimmten Brennstoff den Beginn des Klopfens weitgehend durch das Mischungsverhältnis, durch die im Motor herrschende Wirbelung und durch die Frühzündung verändern. Je nach der bei Beginn der Selbstzündung noch vorhandenen Gemischmenge und je nach dem Mischungsverhältnis des Gemisches tritt das Klopfen mehr oder weniger heftig auf. Alle diese Einflüsse lassen sich durch das angegebene Meßverfahren, besonders bezüglich Heftigkeit und Zeit des Klopfens, verhältnismäßig einfach verfolgen. So klopft z. B. beim Verdichtungsverhältnis 6:1 und  $25^\circ$  Frühzündung ein Brennstoff-Luftgemisch von theoretisch richtiger Zusammensetzung etwa  $25^\circ$  hinter dem Totpunkt bedeutend heftiger als bei  $40^\circ$  Frühzündung ein Brennstoff-Luftgemisch mit der Luftüberschusszahl 0,6, das bereits bei  $15^\circ$  hinter dem Totpunkt klopft. Auch die gemessenen Verbrennungs- und Wirbelgeschwindigkeiten\*) ergeben bezüglich des Klopfens wertvolle Fingerzeige.

Die Klopfuntersuchungen wurden ergänzt durch Aufnahmen des zeitlichen Druckverlaufs im Zylinder. So zeigt Abb. 4 den bereits bekannten Druckverlauf im Zylinder bei nichtklopfendem Betrieb, Abb. 5 den Verlauf bei klopfendem Betrieb. Sehr gut ist die fast senkrechte Drucksteigerung infolge des Klopfens, d. i. die unmittelbare Um-

setzung der Energie, zu erkennen. Punkt A ist der Zündpunkt, Punkt D der Zeitpunkt der Ankunft der Flamme an der Meßstelle D (Abb. 1). Bei Betrachtung des Ionisationsstromes erkennt man ferner, daß bei nichtklopfendem Betrieb dauerndes Nachbrennen bis nach dem Öffnen des Anlaßventils auftritt; bei klopfendem Betrieb findet dagegen die Energieumsetzung so rasch und restlos statt, daß unmittelbar nach dem Klopfen keine Flamme mehr im Verbrennungsraum vorhanden ist.

Einen endgültigen Beweis für die sich in letzter Zeit immer mehr durchsetzende Ansicht, daß das Klopfen durch das gleichzeitige Entflammen eines Gemischrestes hervorgerufen wird, bringt Abb. 6;

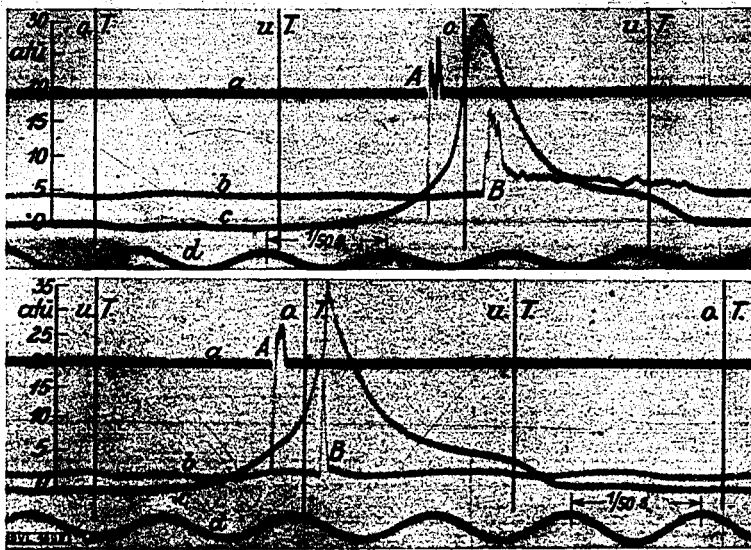


Abb. 4 und 5. Zeitlicher Druckverlauf im Zylinder.  
Oben: Bei nichtklopfendem Betrieb; unten: bei klopfendem Betrieb.  
a Zündströme, b Ionisationsströme, c Drucklinien, d Zeitmarkierungen, A Zündpunkte, B Flammenankunftspunkte

\*) Vgl. Anm. \*)

hier fallen der unmittelbare Druckanstieg und das gleichzeitige Auftreten einer Flamme an den Meßstellen C und D zeitlich zusammen. Das kann aber nur bei gleichzeitiger Entflammung des letzten Teiles der Zylinderfüllung der Fall sein. Das Klopfen setzt ziemlich genau bei der Meßstelle C ein. Dabei werden rd. 50 vH der Zylinderfüllung gleichzeitig entflammt.

Die Drucklinie zeigt kurz vor dem Klopfen eine gewisse Verbrennungsverzögerung. Diese sehr deutlich ausgeprägte Verzögerung unmittelbar vor Einsetzen des Klopfstoßes läßt auf gewisse chemische Umsetzungen innerhalb des Gases schließen; genauere Erkenntnisse müssen jedoch erst weitere Versuche bringen.

Bei den Versuchen konnte außerdem festgestellt werden, daß es nicht gleichgültig ist, an welcher Zylinderstelle der Druck während des Klopfens gemessen wird. Die Druckmessungen an der Klopfstelle ergeben einen steileren Druckanstieg und höhere Drücke als die Druckmessungen, die in der Nähe der Zündkerze, also weit vom Klopfzentrum entfernt, durchgeführt wurden. Auch meßtechnisch machten sich dabei wesentliche Unterschiede bemerkbar, indem in der Nähe der Zündkerze sämtliche Klopfauftnahmen ohne Störungen aufgenommen werden konnten, während bei den Aufnahmen im Klopfzentrum sehr oft die Hilfsmembran des Indikators durchschlagen wurde. Dies zeigt, daß während des Klopfens im Zylinder wesentliche Druckunterschiede bestehen. Erst nach der Ankunft der sich mit Schallgeschwindigkeit fortbewegenden Druckwelle an der Zündstelle ist der während der normalen Verbrennung stets herrschende Druckausgleich wieder hergestellt. Aus diesen Versuchen ist auch zu ersehen, daß alle Aufnahmen von Indikatoren und alle Klopfmessungen mit Beschleunigungsgeräten (Springstab-Indikator usw.), die nicht im Klopfzentrum, also auf dem letzten Teile des Verbrennungsweges, eingebaut sind, falsch sind.

Es sei noch angeführt, daß bei heftigem Klopfen die Ausdehnung des klopfenden Gemischrestes so groß ist, daß eine negative Flammgeschwindigkeit eintritt, daß also z. B. an der ersten Meßstelle, nachdem die Flammenfront vorbeigestrichen ist, nach dem Klopfen erneut eine Flamme

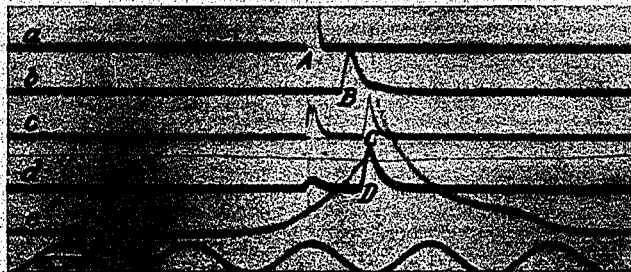


Abb. 6. Oscillogramm zur Ermittlung der Verbrennungsgeschwindigkeiten und zeitlicher Druckverlauf im Zylinder bei klopfendem Betrieb. a Zündstrom, b, c, u. d. Ionisationsströme, e Drucklinie, A Zündpunkt, B, C, u. D Flammenankunftspunkte.

auftritt. Die Abb. 7 zeigt eine derartige Aufnahme. Die Lichtlinie b zeigt an der Stelle B die erstmalige Ankunft der Flamme und an der Stelle B' die erneute Ankunft der Flamme an der Meßstelle B nach dem Klopfen. Durch die Ausdehnung des durch das Klopfen unmittelbar verbrennenden Gemischrestes tritt eine negative Geschwindigkeit der Flammenfront, also ein Zurückschlagen, ein. Dieses Zurückschlagen bis zur Meßstelle B konnte nur bei sehr heftigem Klopfen, d. h. bei der gleichzeitigen Entzündung von 50 vH und mehr des gesamten Gemisches beobachtet werden.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis brachten die Versuche bezüglich der Art des Klopfens. Aus den Druckaufnahmen kann man ersehen, daß man vier verschiedene Klopfarten unterscheiden kann, die dem Geräusch nach nur etwas verschieden sind, die sich ihrem Wesen nach jedoch voneinander unterscheiden.

Neben der bisher beschriebenen Klopferscheinung, die charakterisiert ist durch einen gewissen Verbrennungsverzögerung mit nachfolgendem senkrechten Druckanstieg (im Augenblick des Klopfens) gibt es noch ein Klopfen, das durch Frühzündungen hervorgerufen wird. Entzündet sich an einer heißen Zylinderstelle das Brennstoffluftgemisch längere Zeit vor dem normalen Zündaugenblick, so treten, wie die Abb. 8 zeigt, durch die zusätzliche starke Kompression des brennenden Gemisches im Druck-Zeit-Diagramm ebenfalls sehr steile Drucksteigerungen auf. Die Folge ist, wie auch die folgende Abb. 9, die das umgezeichnete Druckvolumen-Diagramm darstellt, erkennen läßt, ein starker Leistungsabfall und, infolge der den hohen Temperaturen ausgesetzten großen Wandflächen, eine starke Überhitzung des Zylinders. Das Klopfgeräusch ist nicht so scharf metallisch, sondern dumpfer als das normale.

Eine andere Art des Klopfens kann durch zu große Wirbelgeschwindigkeiten entstehen. Die Verbrennungsgeschwindigkeit und damit die Energieumsetzung kann durch eine sehr große Wirbelung so gesteigert werden, daß eine Art Klopfen eintritt. Der Druckanstieg im Druck-Zeit-Diagramm ist dabei sehr steil, es tritt jedoch weder ein Verbrennungsverzögerung, noch eine senkrechte Drucksteigerung

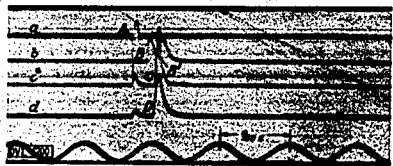


Abb. 7. Oscillogramm zur Ermittlung der Verbrennungsgeschwindigkeiten bei klopfendem Betrieb. a Zündstrom, b, c, u. d. Ionisationsströme, e Drucklinie, A Zündpunkt, B, B', C, u. D Flammenankunftspunkte.

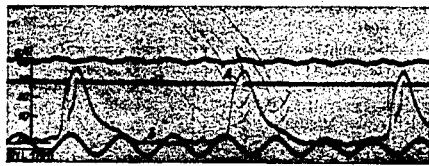


Abb. 8. Zeitlicher Druckverlauf im Zylinder bei Glühzündungen. a Zündstrom, b Drucklinie, A Zündpunkt.

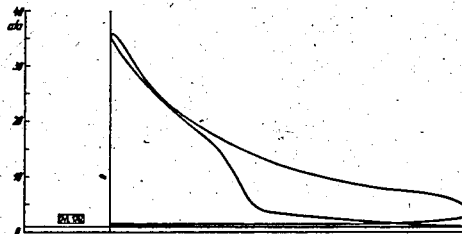


Abb. 9. Druck-Volumendiagramm bei Glühzündungen. (Abb. 8.)

auf. Das Klopfen klingt dumpf und nicht so scharf und hart wie beim richtigen Klopfen. Diese Klopfart tritt besonders bei Turbulenzköpfen leicht auf, da hier durch die heftige Verwirbelung große Verbrennungsgeschwindigkeiten auftreten. Ricardo bezeichnet diese Klopfart mit rauhem Gange und gibt als Grenze für die Unschädlichkeit desselben eine Drucksteigerung von  $4 \text{ kg/cm}^2$  je Grad Kurbelwinkel an.

Eine vierte Art von Klopfen, die der soeben beschriebenen sehr ähnlich ist und sich von ihr nur durch die Entstehungsursache unterscheidet, stellt sich ein, wenn der Motor längere Zeit geklopft hat. Der sehr harte Klopfen wird dann wieder weicher und leiser. Die Druckzeitnahmen zeigen einen Druckverlauf wie der zuvor beschriebene. Die Drucksteigerung ist sehr steil, jedoch ohne Verbrennungsverzögerung und ohne senkrecht zu sein. Die Meßstellen für die Verbrennungsgeschwindigkeit zeigen dabei, wie die Abb. 7 erkennen läßt, daß zunächst die Flamme ganz normal von A über B nach C läuft, daß dann aber, ehe sie die Meßstelle C erreicht, ihr eine zweite Flamme von D aus entgegenkommt. Ehe also von der Meßstelle C aus das Restgemisch gleichzeitig entzündet werden kann, ist es vorher bereits normal verbrannt. Das läßt sich so erklären, daß infolge des Klopfens der Verbrennungsraum sehr heiß wird; die Wandtemperatur jedoch nicht so hoch wird, daß vor dem Zündaugenblick eine Entzündung durch Glühzündung eintreten kann. Erst nach erfolgter Zündung und nachdem der restliche Gemischteil durch die brennenden Gase höher verdichtet wurde, wird an einigen heißen Wandstellen die Zündtemperatur des Gemisches erreicht. Die Flamme schreitet also, von diesen heißen Stellen ausgehend, der bereits bestehenden Flamme entgegen. Die Energieumsetzungsgeschwindigkeit je Grad Kurbelwinkel steigt, ein richtiges Klopfen mit unmittelbarer Energieumsetzung tritt jedoch nicht ein. Alle vier Klopfarten lassen sich durch die verwendeten Meßverfahren sehr gut voneinander unterscheiden.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß durch die unmittelbare Energieumsetzung starke Temperatursteigerungen auftreten. Diese erzeugen stärkere Ionisationsströme. Die von verschiedenen Forschern beim Klopfen festgestellte erhöhte Ionisation ist in der Hauptsache auf diese erhöhten Temperaturen zurückzuführen. Die Vergrößerung des Ionisationsstromes kann, wie in der DVL festgestellt werden konnte, verschiedene hundert vH betragen.

Infolge dieser Abhängigkeit des Ionisationsstromes von der Flammentemperatur ist es mit dem Meßverfahren auch möglich, durch die Aufnahme des Ionisationsstromes Temperaturmessungen vorzunehmen. Man ist damit in der Lage, relative Vergleichswerte der während der Verbrennung und während des Ausschubvorganges herrschenden Temperaturen zu erhalten. Da die Abhängigkeit des Ionisationsstromes vom Druck, von der Luftfeuchtigkeit usw. noch nicht geklärt werden konnte, sind absolute Temperaturmessungen noch nicht möglich.

Bei den Untersuchungen konnten gleichzeitig Aufschlüsse über die sich hauptsächlich der Expansionslinie überlagernden Druckschwingungen gewonnen werden. Frühere Untersuchungen hatten gezeigt, daß diese Schwingungen besonders heftig bei klopfendem Betriebe auftreten, so daß normale Indikatoren kein richtiges Bild des beim Klopfen auftretenden Druckverlaufes ergaben. Man nahm ursprünglich an, daß die Schwingungen Massenschwingungen des aufzeichnenden Indikators seien. Später glaubte man, daß es Druckwellen seien, die eine Eigentümlichkeit des Klopfens seien und die im Zylinder hin- und herpendelten. Abb. 4, 5 und 6 zeigen nun, daß es sehr wohl möglich ist, mit einem genügend trägheitsfrei arbeitenden Druckmesser Klopfstöße aufzunehmen, ohne daß diese sich überlagernden Schwingungen auftreten. Die Versuche zeigten, wie auch an anderer Stelle festgestellt wurde<sup>4)</sup>, daß diese Druckschwingungen nur von den Einbauverhältnissen des

Indikators abhängen, d. h. von der Länge der Zwischenleitung, die sich zwischen Zylinder und Indikator befindet. Die störenden Schwingungen sind Druckausgleichsschwingungen innerhalb dieser Zwischenleitung, die sich mit Schallgeschwindigkeit bewegen. Bei kurzen Zwischenleitungen ist die Frequenz sehr hoch, die Intensität gering, bei langen Leitungen ist die Frequenz entsprechend geringer und die Intensität höher. Wird der Indikator unmittelbar in die Zylinderwand eingebaut, so treten diese sich dem Druckdiagramm überlagernden Druckschwingungen nicht mehr auf. Bei der Indizierung von raschlaufenden Motoren ist es daher wichtig, den Indikator so nahe als möglich am Verbrennungsraum anzubringen.

Es sei noch angeführt, daß bei den verwendeten Meßverfahren alle Vorgänge im Oszillographen als ständiges Bild erscheinen, so daß man alle Veränderungen während der aufeinanderfolgenden Arbeitsspiele, als auch den Beginn des Klopfens gut erkennen und verfolgen kann.

#### Zusammenfassung der Ergebnisse.

Die bisherigen Ergebnisse der Versuche kann man folgendermaßen zusammenfassen:

1. In einem Zündermotor erfolgt bei nicht klopfendem Betrieb die Verbrennung so, daß, ausgehend von der Zündkerze, eine Flammenfront mit etwa gleichbleibender Geschwindigkeit durch den Verbrennungsraum läuft. In der unter 3) angeführten Arbeit wurden eingehende Untersuchungen darüber angestellt.
2. Bei klopfendem Betrieb wird der letzte Teil des hochverdichteten Gemisches nach Erreichung der Selbstzündungstemperatur gleichzeitig entzündet.
3. Durch die gleichzeitige Entzündung eines größeren Gemischteiles mit unmittelbarer Energieumsetzung treten hohe Temperatur- und Drucksteigerungen auf.
4. Die Energieumsetzung erfolgt so unmittelbar, also mit einer so großen Geschwindigkeit, daß starke örtliche Druckunterschiede auftreten, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausgleichen.
5. Bei normaler Verbrennung herrscht infolge der geringen Verbrennungsgeschwindigkeit von etwa  $25 \text{ m/s}$  stets Druckausgleich.
6. Die Heftigkeit des Klopfens hängt von der beim Beginn des Klopfens noch im Verbrennungsraum befindlichen unverbrennten Gemischmenge und von deren Zusammensetzung (Mischungsverhältnis) ab.
7. Als Maßstab für das Klopfen kann man die im Klopfzentrum gemessene unmittelbare Drucksteigerung oder bei Beachtung des Mischungsverhältnisses die gleichzeitig zur Entzündung gelangende Gemischmenge wählen.
8. Infolge der starken örtlichen Druckunterschiede während des Klopfens ist es nicht gleichgültig, an welcher Stelle im Verbrennungsraum der Zylinderdruck gemessen wird. Er muß im Klopfzentrum gemessen werden. (Bei motorischen Vergleichsversuchen zur Beurteilung der Klopf-eigenschaften von Kraftstoffen ist besonders auf diesen Punkt zu achten, wenn man bei Verwendung von verschiedenen Motoren gleichwertige Ergebnisse erhalten will.)
9. Es gibt neben dem Hauptklopfen noch drei Abarten des Klopfens, die durch Druckaufnahmen leicht voneinander unterschieden werden können.
10. Beim Klopfen entstehen durch die erhöhten Temperaturen erhöhte Ionisationsströme. Ihre Vergrößerung kann verschiedene hundert vH betragen.
11. Bei nichtklopfendem Betrieb tritt dauerndes Nachbrennen bis zum Öffnen des Auspuffes auf (Auspuffflamme). Bei heftig klopfendem Betrieb erfolgt die Verbrennung so rasch und so vollständig, daß kein Nachbrennen auftritt (Fehlen einer Auspuffflamme).
12. Ist die gleichzeitig zur Entzündung kommende Gemischmenge sehr groß, so tritt infolge der Wärmeausdehnung des brennenden Gemischrestes eine starke negative Flammenfrontgeschwindigkeit auf.

<sup>4)</sup> E. J. Martin und D. F. Carls, Rapidly Fluctuating pressures measured electrically by indicator combined with spark plug. Automot. Ind., Bd. 62, (1930), Nr. 7, S. 230/237.

## Messung von Glühzündungstemperaturen in raschlaufenden Zündermotoren

Von KURT SCHNAUFFER VDI, Berlin-Adlershof

Es wird ein Meßverfahren angegeben, das genaue Glühzündungstemperaturen von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen in einem laufenden Motor auf 5° C genau zu messen. Unter Glühzündungstemperatur eines Kraftstoff-Luft-Gemisches ist dabei die Temperatur zu verstehen, die eine in der Verbrennungsraum eingebaut Glühkerze haben muß, um das Kraftstoff-Luft-Gemisch im Motor in der kurzen für die Entzündung zur Verfügung stehenden Zeit entzünden zu können. Es wurde eine Glühkerze entwickelt, die allen Anforderungen genügt. Die Ergebnisse, die gleichzeitig einen Überblick über die für die Entzündung von Benzin-Benzol-Gemischen benötigte Aktivierungsenergie geben und damit Rückschlüsse auf das Klopfverhalten der Kraftstoffe zulassen, zeigen die Abhängigkeit der Glühzündungstemperatur von der Kraftstoffart, von der Gemischvervielfachung (Drehzahl), vom Verdichtungsverhältnis, von der Drasselstellung des Motors, von der Zylinderbauart und von der Größe des Reagensteils der Frischgase. In einem luftgekühlten Einzylindermotor, Bauart Siemens Sh 15, wurden Glühzündungstemperaturen bis zu 875° C und in einem wassergekühlten sechszylindrigen Flugmotor, Bauart Bayerische Motoren Werke A.-G. V. a. bis zu 970° C gemessen.

Frühgase entzünden sich nicht beim Einströmen in einen Zylinder an dem glühenden Auspuffventil, die eine Temperatur von 800° erreichen können, obgleich die Entzündungstemperaturen von Benzin, in einem Zündpunktprüfer gemessen, bei einer dem Verdichtungsverhältnis im Motor entsprechenden Luftdichte 330° beträgt. Daraus folgt, daß die Entzündungstemperaturen im Motor über 800° liegen müssen, und die sogenannten Glühzündungen erst bei noch höheren Temperaturen der Auspuffventile auftreten.

Um die Entzündungstemperaturen genauer als durch Messungen der Auspuffventiltemperaturen bestimmen zu können, hat Löhner<sup>1)</sup> vorgeschlagen, Glühzündungen durch einen in den Zylinderraum eingeschraubten Kupferstift von 15 mm Dmr. zu erzeugen, der durch eine Heizwicklung zusätzlich erwärmt werden könnte. Wird die Temperatur des Stiftes bei normal laufendem Motor allmählich gesteigert, so müssen bei vorübergehendem Kurzschließen des Zündfunken Glühzündungen eintreten, und zwar in der Nähe des oberen Totpunktes. Ihr Auftreten sollte durch das Gehör festgestellt werden. Die mittlere Temperatur des Glühstiftes wurde durch ein Thermoelement gemessen. Versuche dieser Art führten ebenfalls zu den obigen Ergebnissen, wonach die Entzündungstemperaturen im laufenden Motor in der Größenordnung von 800° bis 900° liegen.

Im Rahmen der in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) durchgeführten Untersuchungen über die Verbrennungsvorgänge in raschlaufenden Zünder- und Brennermotoren, von denen bisher die Arbeiten über die Klopferscheinungen<sup>2)</sup> und über die Verbrennungsgeschwindigkeiten<sup>3)</sup> in raschlaufenden Zündermotoren veröffentlicht worden sind, wurden im Jahre 1930 ebenfalls Versuche über die Ermittlung der Entzündungstemperatur der verschiedenen Kraftstoff-Luft-Gemische in einem laufenden Motor durchgeführt, über die in folgendem berichtet werden soll.

Bei den Untersuchungen über die Verbrennungsgeschwindigkeiten<sup>4)</sup> hatte sich herausgestellt, daß Benzin und Benzol ungefähr die gleiche Verbrennungsgeschwindigkeit besitzen, obgleich fast alle bekannten Einflüsse die Verbrennung von Benzin beschleunigen müßten. Versteht man unter Aktivierungsenergie die von einem Kraftstoff benötigte Energiemenge, die ihm zur Einleitung der Verbrennung zugeführt werden muß, so wurde daraus gefolgert, daß die für das Erreichen der Entzündungstemperatur nötige Aktivierungsenergie von Benzin (durch nicht abschätzbare Einflüsse), gleich oder fast gleich derjenigen von Benzol sein mußte. Die Aktivierungsenergien der Kraftstoffe konnten jedoch bisher weder ihrer Größe nach noch im Vergleich zueinander

bestimmt werden. Ein Verfahren, mit dem diese Aktivierungsenergien wenigstens im Vergleich zueinander gemessen werden können und womit zugleich die Richtigkeit der obigen Annahme überprüft werden kann, besteht in der Messung der Entzündungstemperaturen von Benzin und Benzol in einem laufenden Motor mit Hilfe einer regelbaren Heizvorrichtung. Da, wie im folgenden gezeigt wird, der stets schwer zu erfassende Zeiteinfluß auf eine Energieübertragung oder Energieumwandlung bei diesem Verfahren durch den gleichförmigen, sehr raschen Lauf des Motors fast beseitigt ist und der geringfügige Einfluß, der noch besteht, für alle Kraftstoffe bei ein- und derselben Drehzahl völlig gleich ist, ist es so möglich (nur durch die Betrachtung der Energiequelle), vergleichende Werte für die Aktivierungsenergie in erster Annäherung richtig zu erhalten. Außerdem können durch diese Messungen weitere Einblicke in das Verhalten der Kraftstoffe im Motor, insbesondere auch bezüglich ihrer Klopfneigung, gewonnen werden, da die Aktivierungsenergie durch ihre Verbindung von Entzündungstemperatur und Zündverzögerung der Kraftstoffe die Verhältnisse richtig wiedergibt, denen die Kraftstoffe im Motor ausgesetzt sind und die ihr Klopfverhalten mit bestimmen.

In einem laufenden Motor hat man grundsätzlich zwei verschiedene Entzündungstemperaturen zu unterscheiden. Die eine ist die Temperatur, die ein Kraftstoffmolekül selbst besitzen muß, um weiter verbrennen zu können. Die andere ist die Temperatur, die eine Zündquelle haben muß, um einem Kraftstoffmolekül in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit die zu einer Zündung erforderliche Energiemenge übertragen zu können. Die erstere, die „Entzündungstemperatur“ des Kraftstoff-Luft-Gemisches, unterscheidet sich, wie Versuche in einer Verdichtungszündmaschine<sup>5)</sup> zeigten, auch im Motor nicht oder nur wenig von der in einem Zündpunktprüfer bei gleichen Luftdichteverhältnissen ermittelten Entzündungstemperatur. Sie beträgt z. B. für Benzin 330°. Die zweite, die Temperatur der Zündquelle, bei der sich das Brennstoff-Luft-Gemisch entzündet, liegt wesentlich höher, da der ebenfalls in der Verdichtungszündmaschine festgestellte große Zündverzögerung der Kraftstoffe große Übertemperaturen der Zündquelle erfordert. Diese Temperatur, die also außer der „Entzündungstemperatur“ einen zusätzlichen Temperaturanteil zur Überwindung des Zündverzögerung enthält und die in der vorliegenden Arbeit gemessen und verglichen werden soll, ist die niedrigste Temperatur, die ein in einem Verbrennungsraum eingebauter glühender Körper (als Zündquelle) haben muß, um im laufenden Motor ein Kraftstoff-Luft-Gemisch entzünden zu können. Sie wird im folgenden im Gegensatz zu der physikalischen Entzündungstemperatur mit „Glühzündungstemperatur“ bezeichnet. Aus den eingangs erwähnten Temperaturen der glühenden Auspuffventile von 800° ersieht man, daß diese Glühzündungstemperaturen ganz wesentlich über der Entzündungstemperatur des Gemisches liegen müssen.

<sup>1)</sup> F. Gesell, Rechnerische und experimentelle Untersuchungen über Wärmebeherrschung und Leistungssteigerung in luftgekühlten Flugmotoren-Zylindern. Diss. T. H. Berlin 1928, S. 18.

<sup>2)</sup> J. Tisserand, F. Schellie, Über Zündpunkte und Verbrennungsvorgänge im Dieselmotor. Halle (Saale) 1924, S. 65.

<sup>3)</sup> K. Löhner, Untersuchungen zur Bestimmung der Zündtemperaturen im Motor. Diss. Versuchsanst. Luftf. Bericht Df. 71/1.

<sup>4)</sup> K. Schnauffer, Das Klopfen von Zündermotoren. In: dtsoh. Versuchsanst. Luftf. 1931, S. 375; vergl. a. K. Schnauffer, Z. Bd. 76 (1931) S. 423.

<sup>5)</sup> K. Schnauffer, Verbrennungsgeschwindigkeiten von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen in raschlaufenden Zündermotoren. Dieselmotoren V. Berlin 1931, S. 127.

<sup>6)</sup> H. T. Tisserand u. D. E. Pao, Ignition of Gases by Sudden Compression. Philos. Mag., Lond., 1926, Bd. 1, S. 1094.

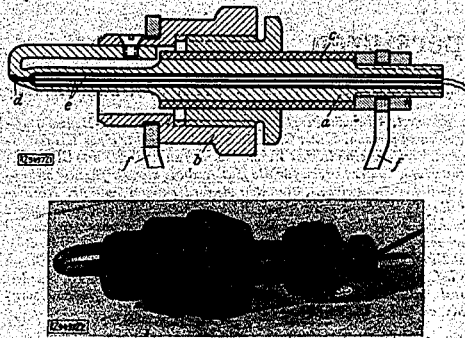


Abb. 1 und 2. Glühkerze (Schnitt).  
 a verlängerte Mittelelektrode  
 b Kerzenmasse  
 c Isolation  
 d Thermoelement  
 e Quarzröhren  
 f Strom- und-abführungen

Das Meßverfahren

Die Glühzündungstemperaturen wurden mit Hilfe eines in den Verbrennungsraum eingebauten glühenden Körpers, Abb. 1 und 2, bestimmt, der für die Erzeugung der Glühzündungen entwickelt wurde. Die Mittelelektrode einer normalen Zündkerze aus Ventilstahl ist verlängert und in scharfem Bogen zur Zündkerzenmasse zurückgeführt. Legt man an die Mittelelektrode und die Kerzenmasse eine Spannung, so wird das zwischen beiden liegende Verbindungsstück zum Glühen gebracht und entzündet nach Erreichen einer entsprechenden Temperatur das Kraftstoff-Luft-Gemisch. Den Heizstrom liefert ein Transformator, der primärseitig sehr feinstufig geregelt werden kann. Die Temperatur des glühenden Verbindungsstückes wird durch das in seine Umblegung eingetete Platin-Platinrhodium-Element von 0,2 mm Draht-Dmr. gemessen.

Dieses Gerät zum Messen von Glühzündungstemperaturen, das bei allen Messungen stets einwandfrei arbeitet, hat folgende besonderen Vorteile:

1. Sehr geringe Wärmekapazität;
2. unmittelbare Heizung, also keine gesonderte Heizwicklung;
3. durch starke Ströme rasches Erreichen hoher Temperaturen;
4. Temperaturen sehr gut regelbar;
5. sehr geringe Wärmeverluste durch Leitung;
6. es zeigt die Temperatur der heißesten Stelle an;
7. stets gleichbleibende Wärmeübergangsverhältnisse infolge der Zunderfreiheit des Stahles bis zu 1100° und
8. alle erhaltenen Meßwerte sind gut reproduzierbar.

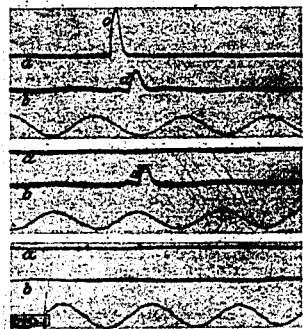


Abb. 3 bis 5. Oszillogramme zur Veranschaulichung der Zündverhältnisse.  
 a Zündstrom  
 b Ionisationsstrom  
 c Augenblick der elektrischen Zündung  
 d Auftreten einer Flamme an der Meßsonde

Bei den mit diesem Gerät durchgeführten Messungen wurde zunächst die elektrische Zündung mit einem Magnetschalter kurzzeitig ausgeschaltet und das Auftreten von Glühzündungen mit dem Gehör festgestellt. Da das zu lange Ausschalten der elektrischen Zündung durch den Magnetschalter Meßgenauigkeiten ergab, wurde dieser durch einen Klingelknopf ersetzt und die Zündung durch ganz kurzes Daraufklopfen ausgeschaltet. Bei den weiteren Versuchen stellte sich dann heraus, daß das Wesentlichste an dem gesamten Meßverfahren zur Ermittlung der Glühzündungstemperatur in einem laufenden Motor der fehlerfreie Nachweis ist, ob bei den einzelnen Arbeitsspielen des Motors bei abgestellter Zündung eine Verbrennung wirklich stattgefunden hat oder nicht. Hierzu reicht das Gehör nicht aus.

Erst durch die Verwendung des „Ionisationsverfahrens zur Untersuchung von Verbrennungsvorgängen“, das das Auftreten einer Flamme an einer bestimmten Zylinderstelle anzeigt, gelang es, eine Zündung einwandfrei nachzuweisen. In Verbindung mit dem Druckknopf-Ausschalter für die Zündung konnte so die Meßgenauigkeit sofort von 100°C auf etwa 5°C verbessert werden. Auf der Mattscheibe eines Oszillographen wird die Zündung und das Vorhandensein einer Flamme im Verbrennungsraum nachgewiesen. Durch diese Anordnung erhält man einen genauen Überblick über die sich abspielenden Vorgänge.

Auf den Oszillogrammen, die die Vorgänge auf der Mattscheibe wiedergeben, Abb. 3 bis 5, ist die Linie a der Zündstrom, die Linie b der Ionisationsstrom. Bei eingeschalteter elektrischer Zündung müssen stets zwei Ausschläge c und d zu sehen sein, Abb. 3, da sowohl eine elektrische Zündung als auch eine Verbrennung erfolgt. Schaltet man die elektrische Zündung aus, so muß der Ausschlag c fortfallen, Abb. 4 und 5. Der Ausschlag d kann nun entweder weiterhin auftreten, Abb. 4, das bedeutet: die Temperatur der Glühkerze ist, so hoch, daß

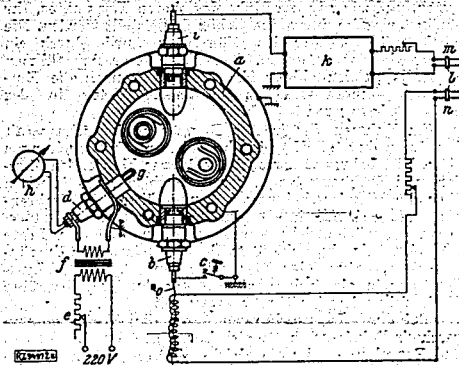


Abb. 6. Versuchsanordnung und Schaltbild.

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| a Versuchszylinder  | g Glühkerze mit Thermoelement |
| b Zündkerze   | h Millivoltmeter              |
| c Klingelknopf zum Kurzschließen der elektrischen Zündung | i Meßsonde                    |
| d Glühkerze   | k Verstärker                  |
| e Regelwiderstand   | l Oszillographenschleifen     |
| f Transformator   | m Flammenschwel               |
|   | n Zündungsnachweis            |
|   | o Zündkabel                   |

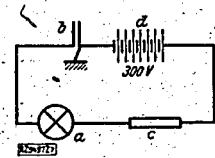


Abb. 7. Vereinfachte Schaltung zur Messung der Zündverhältnisse.  
 a Glühlampe  
 b Meßsonde  
 c Widerstand  
 d Batterie

eine Verbrennung durch Glühzündung erfolgt, oder er fällt ebenfalls fort, Abb. 5, dann ist die Glühzündungstemperatur noch nicht erreicht, und eine Entzündung findet nicht statt. Bei der geringen thermischen Trägheit der unmittelbar geheizten Glühkerze ist es leicht, durch kleine Änderungen des Regelwiderstandes die Grenze zwischen den beiden Ausschlägen genau zu bestimmen. Die diesem Grenzzustand entsprechenden Temperaturen der Glühkerze, das sind die „Glühzündungstemperaturen“, konnten so bei allen Versuchsreihen auf  $5^{\circ}\text{C}$  genau gemessen werden. Abb. 6 zeigt ein Schalt-schema der gesamten Meßanordnung.

Zur Vereinfachung des gesamten Versuchsaufbaus wurde noch ein zweites Flammen-Nachweisverfahren entwickelt und erprobt, das sich ebenfalls bestens bewährt hat. Es verbindet mit dem Fortfall des nicht überall zur Verfügung stehenden Oszillographen noch den Vorteil äußerster Einfachheit, da keine Verstärkeranordnung für den Ionisations- und den Zündstrom gebraucht wird. An Stelle der Oszillographenschleifen werden höchstempfindliche Glimmlampen zur Anzeige verwendet. Diese leuchten beim Einsetzen der elektrischen Zündung oder beim Eintreffen einer Flamme an den Elektroden der Meßsonde auf. Das Auge muß bei diesem Nachweisverfahren lediglich unterscheiden, ob zwei, eine oder gar keine Lampe aufleuchtet. Die Glimmlampe, Abb. 7, liegt mit der Meßsonde (die den Schalter zum Ein- und Ausschalten darstellt), einem Widerstand und einer Spannungsquelle in Reihe. Da die Aufbauzeiten des Glimmlichtes weit unterhalb der zu registrierenden Zeiten liegen, arbeitet auch dieses Verfahren vollständig trägheitsfrei. Abb. 8 zeigt das Anzeigergerät.

**Meßergebnisse**

Es muß bei den Ergebnissen darauf hingewiesen werden, daß man mit dem vorstehend beschriebenen Verfahren nur Relativwerte der Glühzündungstemperaturen erhält, die von der Form und der Größe des verwendeten Glühgerätes abhängen. Wie die Ergebnisse jedoch zeigen, konnten aus dem gegenseitigen Verhalten dieser Relativwerte in den einzelnen Versuchsreihen reiche Erkenntnisse gesammelt werden. Die Versuche wurden an der kleinen Einzylinder-Prüfstandanlage der DVL an einem luftgekühlten Flugmotorenzylinder, Bauart Siemens Sh 13, und an einem wassergekühlten Zylinder eines sechszylinderigen BMW V a-Flugmotors durchgeführt.

**Einfluß der Kraftstoffart**

Um Vergleichswerte für die Aktivierungsenergien der einzelnen Kraftstoffarten zu erhalten, wurden bei Vollastbetrieb die Glühzündungstemperaturen von einem guten Fliegerbenzin, Benzol und einem Gemisch 1 kg : 1 kg aus beiden in Abhängigkeit von der Drehzahl, d. h. in Abhängigkeit von der im Zylinder herrschenden Verwirbelung bestimmt. Die Ergebnisse, Abb. 9, bestätigen die bei den Verbrennungsgeschwindigkeits-Messungen aufgestellte Vermutung, daß sich die Aktivierungsenergien von Benzin und von Benzol nur wenig voneinander unterscheiden, insofern als im gesamten Vollast-Drehzahlbereich die Glühzündungstemperaturen bei Absoluttemperaturen von rd.  $840^{\circ}$  um nicht mehr als  $40^{\circ}$ , das sind um 5%, voneinander abweichen. Aus dem Vergleich dieser Werte ist es leicht erklärlich, daß die Verbrennungsgeschwindigkeiten beider Kraftstoffe im laufenden Motor nicht sehr verschieden sind. Demgegenüber betragen die Entzündungstemperaturen nach dem Zündpunktprüfer bei der im Motor vorhandenen Luftdichte für Benzin  $330^{\circ}$  und für Benzol  $670^{\circ}$ . Es ergeben sich also Unterschiede von  $340^{\circ}$ , das sind über 100%.

<sup>1)</sup> Die erhaltenen Werte ließen sich jeweils so gut reproduzieren, daß Abweichungen der Meßpunkte von den Schaulinien, Abb. 9 bis 13, um mehr als  $5^{\circ}\text{C}$  von mir mehr auf Änderungen des Mischungsverhältnisses oder dergl. als auf ungenaue Messungen zurückgeführt werden. Welche Bedeutung einer Meßgenauigkeit von  $5^{\circ}\text{C}$  gegenüber einer von  $100^{\circ}\text{C}$  zukommt, ersieht man aus den Abb. 9 bis 13. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, daß sich die Glühzündungstemperaturen sowohl innerhalb der verschiedenen Brennstoffarten als auch innerhalb weiter Vollastdrehzahlbereiche nur um 20 bis  $50^{\circ}\text{C}$  voneinander unterscheiden. Eine nur um etwas verringerte Meßgenauigkeit würde unter diesen Umständen Gesetzmäßigkeiten der Glühzündungstemperaturen nicht mehr erkennen lassen.

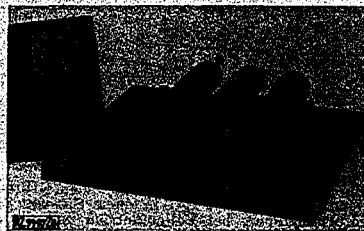


Abb. 8. Glimmlampen-Anzeigergerät.

Um die erhaltenen Schaulinien, Abb. 9, die bis zu einer Drehzahl von  $n = 900$  U/min reichen, bis zur Drehzahl null, d. h. also bis auf die in Zündpunktprüfern erhaltenen Werte der Entzündungstemperatur, extrapolieren zu können und damit einen stetigen Vergleich zwischen den Glühzündungstemperaturen und den Entzündungstemperaturen zu erhalten, mußten noch einige Zwischenwerte festgelegt werden. Es wurden daher noch Messungen beim Durchdrehen des vorher auf Betriebstemperatur gebrachten Motors von Hand durchgeführt, und zwar etwa bei einer Drehzahl von  $n = 75$  U/min. Beachtlich ist dabei, wie Abb. 9 zeigt, das zwanglose Einpassen dieser behelfsmäßig ermittelten Werte der Glühzündungstemperatur in den Gesamtverlauf der Schaulinien. Man erkennt sehr gut die auch bei kleinen Drehzahlen für eine Zündung erforderlichen großen Übertemperaturen der Zündquelle. Wie die bei  $n = 75$  U/min ermittelten Zwischenwerte verdeutlichen, tritt erst bei Drehzahlen unterhalb von  $n = 200$  U/min eine wesentliche Senkung der Übertemperatur ein.

Man ersieht außerdem aus den Schaulinien, daß in der Tat ein glühendes Auspuffventil mit einer Temperatur von  $860^{\circ}$  bei der Verwendung geeigneter Brennstoffe die einströmenden Frischgase nicht zu entzünden braucht.

Weiterhin ist aus den Ergebnissen, Abb. 9, zu ersehen, daß die Glühzündungstemperaturen von Kraftstoffgemischen aus Benzin und Benzol in Übereinstimmung mit entsprechenden Versuchen in Zündpunktprüfern<sup>2)</sup> zwischen den Glühzündungstemperaturen von Benzin und Benzol liegen. Soweit es die Meßgenauigkeit von  $5^{\circ}$  zuläßt, kann man sogar annehmen, daß die Glühzündungstemperaturen von Brennstoffgemischen sich verhältnismäßig ihrer prozentualen Anteile an Benzin und Benzol verhalten.

**Einfluß der Gemischverwirbelung**

Außerdem ist aus Abb. 9 zu ersehen, daß die Glühzündungstemperaturen aller untersuchten Kraftstoffe mit sinkender Drehzahl, d. h. mit sinkender Gemischverwirbelung abnehmen, und zwar in dem praktisch in Frage kommenden Meßbereich ziemlich linear mit der Drehzahl.

<sup>2)</sup> Schäfer, Neuere Anschauungen über motorische Entzündungs- und Verbrennungsvorgänge. Jb. schiffbautechn. Ges. Bd. 59 (1922) S. 151.

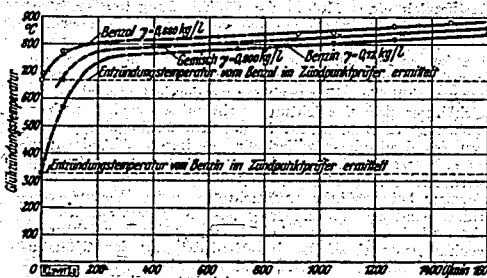


Abb. 9. Glühzündungstemperaturen verschiedener Kraftstoffarten bei Vollastbetrieb. Ermittelt an einem Siemens Sh 13-Flugmotorenzylinder. Verdichtungsverhältnis  $\epsilon = 5:1$ .

04478

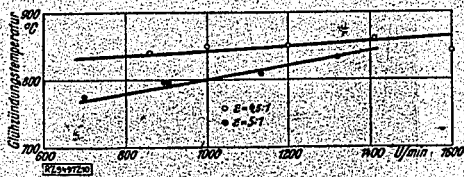


Abb. 10. Glühzündungstemperaturen eines Kraftstoff-Luft-Gemisches ( $\gamma = 0,775 \text{ kg/l}$ ) in einem Siemens Sh 13-Flugmotorenzylinder bei Vollastbetrieb und verschiedenen Verdichtungsverhältnissen.

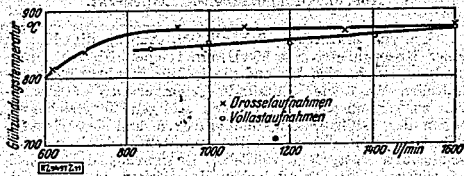


Abb. 11. Glühzündungstemperaturen eines Kraftstoff-Luft-Gemisches ( $\gamma = 0,775 \text{ kg/l}$ ) in einem Siemens Sh 13-Flugmotorenzylinder bei Vollast- und Drosselbetrieb. Verdichtungsverhältnis  $\epsilon = 4,5:1$ .

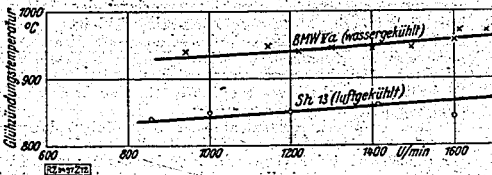


Abb. 12. Glühzündungstemperaturen von Kraftstoff-Luft-Gemischen ( $\gamma = 0,780 \text{ kg/l}$ ) in einem wassergekühlten BMW Va-Flugmotorenzylinder und einem luftgekühlten Sh 13-Flugmotorenzylinder.  $\epsilon = 5:1$ .

Das läßt sich aus der jeweils veränderten Verwirbelung, die im Zylinder herrscht, und den sich daraus ergebenden Wärmeübergangsverhältnissen für ein Brennstoffteilchen zwanglos erklären. In diesem Zusammenhang sei auf die ganz ähnlichen Verhältnisse bei der Bestimmung der Verbrennungsgeschwindigkeit eines Kraftstoffgemisches hingewiesen. Auch da ergab sich infolge der veränderten Wirbelung eine fast lineare Abhängigkeit von der Drehzahl.

#### Einfluß des Verdichtungsverhältnisses

Die Versuchsreihen, die der Klärung des Einflusses des Verdichtungsverhältnisses auf die Glühzündungstemperaturen dienen, wurden so durchgeführt, daß bei Vollastbetrieb eines Motors die Glühzündungstemperaturen eines Kraftstoffgemisches bei den Verdichtungsverhältnissen  $4,5:1$  und  $5:1$  bestimmt wurden. Wie zu erwarten ist, zeigen die Ergebnisse, Abb. 10, eine starke Abhängigkeit der Glühzündungstemperatur vom Verdichtungsverhältnis. Der geringer werdende Unterschied bei Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses zwischen Verdichtungs-Endtemperaturen und Entzündungstemperaturen des Gemisches bedingt eine geringere Aktivierungsenergie zur Entzündung des Gemisches. Dieser Einfluß wird noch dadurch verstärkt, daß die Entzündungstemperatur bei erhöhter Luftdichte<sup>9)</sup> sinkt. Weitere Einflüsse sind die Veränderung des Restgasanteils an der Gesamtladung, wodurch bei Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses ebenfalls eine Erniedrigung der Glühzündungstemperatur eintritt, und außerdem die sich ändernde Wärmetönung, woraus sich höhere Zylindertemperaturen und auch wieder geringere Glühzündungstempe-

peraturen ergeben. Die Glühzündungstemperaturen unterscheiden sich daher bei Verdichtungsverhältnissen von  $4,5:1$  und  $5:1$  im Mittel um  $40^\circ$ .

#### Einfluß der Drosselstellung

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Glühzündungstemperaturen eines Kraftstoffgemisches bei Drosselbetrieb bestimmt. Aus Abb. 11, in der die Werte im Vergleich zu den entsprechenden Volleistungsaufnahmen aufgetragen sind, ersieht man, daß die Glühzündungstemperaturen in einem großen Drehzahlbereich vollständig unabhängig von der Motordrehzahl und stets größer als die Vollastwerte bei der entsprechenden Drehzahl sind. Diese Ergebnisse können darauf zurückgeführt werden, daß durch die geringere Wärmetönung des Zylinderinhalts bei Drosselbetrieb sowohl die Entzündung erschwert, als auch in geringem Maße etwa durch die verringerte Temperatur der Zylinderwandungen die Temperatur des Kreisprozesses herabgesetzt wird. Außerdem besteht die Möglichkeit, daß die Gemischverwirbelung im Zylinder bei Drosselbetrieb mit abnehmender Drehzahl nicht wesentlich abgenommen hat. Durch die Bestimmung der Gemischverwirbelung sollen in weiteren Versuchen die einzelnen Einflüsse genauer festgestellt werden.

#### Einfluß der Zylinderbauart

Da im Flugmotorenbau sehr große Zylinderreihenheiten gebräuchlich sind, sollte durch Versuche an einem BMW Va-Zylinder geklärt werden, ob die mit der gleichen Glühkerze in diesem großen Zylinder ermittelten Glühzündungstemperaturen wesentlich von denen in kleineren Zylindern abweichen. Die Versuche wurden bei Vollastbetrieb mit einem Benzin-Benzol-Gemisch durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß die Glühzündungstemperaturen in diesem Zylinder noch um fast  $100^\circ$  höher liegen als die, welche unter gleichen Verhältnissen im Sh 13-Zylinder ermittelt wurden. Sie betragen  $940^\circ$  bis  $970^\circ$ . Der Grund für diese starke Erhöhung ist voraussichtlich in den verschiedenen Einlaßgeschwindigkeiten der Frischgase und damit in den verschiedenen Wirbelgeschwindigkeiten des Zylinderinhalts zu suchen. Während der Sh 13-Zylinder bei einer Drehzahl von  $n = 1600 \text{ U/min}$  eine mittlere Einlaßgeschwindigkeit von  $49 \text{ m/s}$  besitzt, hat der BMW Va-Zylinder bei der gleichen Drehzahl eine solche von  $77 \text{ m/s}$ .

Ein wesentlicher Einfluß kann aber auch daher rühren, daß die Messungen am Sh 13-Zylinder an einem Einzylindermotor mit geradem Ansaugrohr durchgeführt wurden, während die Messungen am BMW Va-Zylinder an einem betriebsmäßigen Flugmotor mit einer doppelt gewinkelten Ansaugleitung, die zwei Vergaser hatte, stattfand. Durch die Wechselwirkung der beiden Vergaser und durch die starken Krümmungen muß das Gemisch im BMW Va-Zylinder wesentlich stärker verwirbelt sein als im Sh 13-Zylinder. Ein weiterer Grund ist noch in den verschieden großen Zylindertemperaturen des BMW Va- und des Sh 13-Motors zu erblicken. Der BMW Va-Motor hat wassergekühlte Zylinder und dadurch sicherlich wesentlich geringere Oberflächentemperaturen als ein luftgekühlter Zylinder. Die Ergebnisse entsprechen daher den Erwartungen.

#### Einfluß des Anteils der Frischgase an Abgasen

Die Versuche, die den Einfluß des Restgasanteils des Gemisches auf die Glühzündungstemperaturen klären sollten, wurden durchgeführt, um auch Einblick über die Verhältnisse bei Höhenmotoren oder bei mit Ausspülung arbeitenden Motoren zu erhalten. Bei beiden Motorbauarten wird der Anteil der Restgase, entweder durch Aufladung oder durch Ausspülung, ganz wesentlich herabgesetzt. Da für die Versuche weder ein Höhenprüfstand noch eine Vorrichtung zum Ausspülen der Zylinder zur Verfügung stand, durch die man die Versuchsbedingungen den tatsächlichen Verhältnissen hätte anpassen können, würde folgender Ausweg gewählt. Anstatt den Anteil der Restgase zu verkleinern, wurde dieser vermehrt. Eine Extrapolation der erhaltenen Glühzündungstemperatur-Werte in das Gebiet verminderten Rest-

<sup>9)</sup> K. Neumann, Z. Bd. 70 (1926) S. 1076.

gesamt sollte dann einen Überblick über die zu erwartenden Abhängigkeiten verschaffen.

Die Versuche wurden so durchgeführt, daß ein Teil der Abgase dem Frischgas wieder zugesetzt wurde, nachdem sie zuvor gut rückgekühlt worden waren. Durch eine in die Rückführungsleitung eingebaute Askania-Gasuhr wurde der jeweilige Anteil festgestellt. Leider war eine vollständige Rückkühlung der Abgase nicht möglich. In Abb. 13 wurden zum Vergleich die zu den Glühzündungstemperaturen gehörenden Frischgastemperaturen mit eingezeichnet. Den Eintragungen wurde die Annahme<sup>10)</sup> zugrunde gelegt, daß bei dem Verdichtungsverhältnis  $\epsilon = 5:1$  nach Schluß der Ventile der Zylinderinhalt 10% Abgase enthält.

Die Abhängigkeit der Glühzündungstemperaturen von dem anteiligen Gehalt der Frischgase an Abgasen ist verhältnismäßig stark. Sie wäre noch etwas größer, wenn es gelungen wäre, die zugesetzten Abgase so weit rückzukühlen, daß die Ansaugtemperatur nicht verändert worden wäre.

Die Extrapolation in das Gebiet geringerer Abgasanteile zeigt, daß bei Überlademotoren die Glühzündungstemperatur und damit die zu einer Entzündung erforderliche Aktivierungsenergie allein schon durch den veränderlichen Abgasanteil wesentlich verkleinert wird. Rückschlüsse auf die Klopfneigung und die Verbrennungsgeschwindigkeiten bei diesen Verhältnissen sollen in einer weiteren Arbeit behandelt werden. Diese Versuche über die Veränderung des Abgasanteils wurden ergänzt durch Versuche, bei denen den Frischgasen Kohlenäure beigesetzt wurde, Abb. 13.

#### Zusammenfassung

Als Ergänzung zu den Untersuchungen über die Verbrennungsgeschwindigkeiten von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen werden Messungen der Glühzündungstemperaturen in raschlaufenden Zündermotoren durchgeführt. Mit Hilfe einer heizbaren Glühkerze, die für die Messungen entwickelt wurde, und eines Verfahrens zum Nachweis der Glühzündungen gelingt es, die Glühzündungstemperaturen von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen in Motoren auf  $5^\circ\text{C}$  genau zu messen. Bei den Messungen wird die Glühkerze, deren Temperatur mittels eines Platin-Platinrhodium-Thermoelements angezeigt wird, in einen Zylinderkopf eingebaut und während des Laufes eines Motors so lange geheizt, bis sie den Zylinderinhalt entzündet. Durch kurzzeitiges Ausschalten der elektrischen Zündung und durch die Beobachtung der Zünd- und Verbrennungsvorgänge mittels elektrischer Meßverfahren kann jeweils die niedrigste Temperatur der Glühkerze, bei der noch mit Sicherheit eine Entzündung stattfindet, d. i. die Glühzündungstemperatur des Kraftstoffgemisches, bestimmt werden.

Angaben werden über die Verbesserung der Meßgenauigkeit des Verfahrens von etwa  $100^\circ$  auf  $5^\circ$  gemacht.

<sup>10)</sup> A. Hansen, VDI-Forsch.-Heft Nr. 844 Tafeln 19 u. 14.

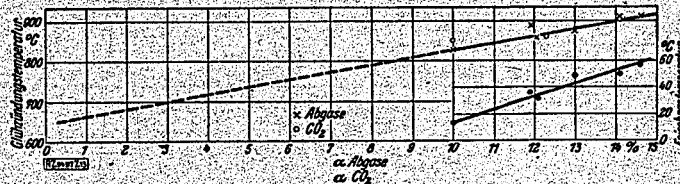


Abb. 13. Glühzündungstemperaturen von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen in einem Sh 13-Flugmotorenzylinder bei Vollast in Abhängigkeit vom Gehalt der Zylinderfüllung an Abgasen und an  $\text{CO}_2$ .

$$\alpha = \frac{G_E + G_{R_2}(\text{CO}_2)}{G^*}$$

$G_E$  im Zylinder verbliebene Restgase kg/Hub

$G_{R_2}(\text{CO}_2)$  wieder zugeführte Abgase ( $\text{CO}_2$ ) kg/Hub

$G^*$  ideale Füllung kg/Hub

Die Untersuchungen zeigten:

1. Die Glühzündungstemperaturen von Benzin und von Benzol in einem Motor unterscheiden sich untereinander nur um etwa 5%, während Entzündungstemperaturen, im Zündpunktprüfer gemessen, Unterschiede von über 100% ergeben.
2. Hieraus und, da bei einer bestimmten Drehzahl in erster Annäherung die Glühzündungstemperatur ein Maß für die Aktivierungsenergie eines Kraftstoffes ist, folgt, daß die Aktivierungsenergien von Benzin und von Benzol ebenfalls nur sehr wenig voneinander verschieden sind.
3. Die Glühzündungstemperatur von Benzin ist unter gleichen Versuchsbedingungen niedriger als die von Benzol.
4. Die Glühzündungstemperaturen von Kraftstoffgemischen, die Benzin und Benzol enthalten, liegen zwischen den Glühzündungstemperaturen von Benzin und von Benzol.
5. Die Glühzündungstemperatur der Benzin-Benzol-Luft-Gemische nimmt bei Vollastbetrieb mit steigender Drehzahl zu, und zwar im Betriebsdrehzahlbereich fast linear mit der Drehzahl.
6. Die Glühzündungstemperaturen von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen sind vom Verdichtungsverhältnis des Motors abhängig. Die Änderung des Verdichtungsverhältnisses von 4,5:1 auf 5:1 ergab z. B. eine Veränderung der Glühzündungstemperaturen von  $860$  auf  $830^\circ$ .
7. Die Glühzündungstemperaturen von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen sind bei ein und derselben Drehzahl bei Drosselbetrieb höher als bei Vollastbetrieb.
8. Die Glühzündungstemperaturen der Benzin-Benzol-Luft-Gemische sind je nach der Zylinderbauart verschieden. Sie betragen unter Verwendung einer Glühkerze nach Abb. 2 bei dem untersuchten luftgekühlten Siemens Sh 13-Zylinder bei Volldrehzahl im Mittel  $860^\circ$ , bei dem wassergekühlten BMW V a-Zylinder  $970^\circ$ .
9. Die Glühzündungstemperaturen von Benzin-Benzol-Luft-Gemischen hängen verhältnismäßig stark vom Abgasanteil des Zylinderinhalts ab. B 9497



04480

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh.

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 567

Die schmiertechnische Untersuchung von elf Flugmotorenölen.

Übersicht: Die Prüfung der elf Flugmotorenöle wurde an fünf verschiedenen Geräten vorgenommen, wobei verschiedene Metalle und Legierungen zur Anwendung kamen. In einigen Fällen wurde trotz grosser Verschiedenheit der Geräte sehr gute Übereinstimmung erzielt, so dass Schlüsse auf die Verhältnisse der Praxis wohl gestattet sein dürften. Eine für alle Werkstoffpaarung gültige Gütereihenfolge lässt sich nicht angeben, jedoch ist solches möglich, wenn man einzelne Metallpaarungen herausgreift.

Abgeschlossen am: 20.4.1944 / Ho.

Bearbeiter: Dipl. Ing. R. Halder

*Halder*

Die vorliegende Ausfertigung enthält

- 9 Textblätter
- 1 Tabelle
- 20 Bildblätter

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 19. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

POOR COPY

9

Die schmiertechnische Untersuchung von elf Flugmotorenölen.A) Zweck der Versuche:

Es sollten elf von der Erprobungsstelle der Luftwaffe in Rechlin über sandte Flugmotorenöle hinsichtlich ihrer Schmierwirkung untersucht werden. Gleichzeitig sollte bei dieser Gelegenheit ein Vergleich zwischen den Ergebnissen an den einzelnen Prüfgeräten durchgeführt werden.

B) Versuchsanordnung und -Durchführung

Folgende Geräte wurden verwendet:

1. Almen - Violandmaschine

Die Beschreibung und Bedienungsweise des Gerätes kann aus der Literatur entnommen werden. Die Prüfung erfolgte zunächst an den Originalprüfelementen, also an Lagern und Wellen aus ungehärtetem Stahl. Ferner an selbstgefertigten Lagern aus Aetern VL 22 und Leichtmetall (Mühle 124) unvergütet und mit Wellen aus ungehärtetem Silberstahl. Bei der Versuchsdurchführung wurde die Betriebsanleitung sorgfältig gelesen. Man erhält als Ergebnis dieser Versuche die Reibungskraft am Wellenumfang in Abhängigkeit von der Belastung, und daraus eine Reibungszahl, ausserdem die Belastung, bei der Fressen eintritt. Fressen beobachtet man jedoch nur bei Originallagern, da die hier gewählte Werkstoffpaarung <sup>Stahl</sup> auf Stahl (ungehärtet) gegen Fressen besonders empfindlich ist.

2. Drahtreibungsprüfgerät

Dieses Gerät ist eine Weiterentwicklung der in Bericht Nr. 512 beschriebenen Kettenapparatur. Am Grundprinzip der Maschine hat sich dabei nichts geändert. Anstelle der Prüfkette aus Tombak trat ein Draht von 0,5 mm Stärke. Verwendet wurden Drähte aus Eisen, Kupfer, Messing und Aluminium. Die in der ursprünglichen Ausführung benötigte Waage, wurde durch ein schweres Pendel mit Öldämpfung ersetzt. Die Versuchsdurchführung ist ebenfalls dieselbe geblieben. Die Messungen erfolgten bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 0,84 m/sek und bei einer Belastung des Drahtes von 400 g. Nähere Beschreibung des neuen Gerätes ist aus einem demnächst erscheinenden Bericht zu entnehmen.

### 3. Einschliffapparatur

Dieses Gerät ist in Bericht Nr. 542 näher beschrieben. Es wurden für jedes Öl und jeden Werkstoff mit einer Hartmetallscheibe 3 Einschliffe bei einer Belastung von 16 kg erzeugt. Ausser den Scheiben aus Hartmetall kamen solche aus gehärtetem Stahl zur Anwendung. Diese Stahlscheiben wurden in einem Sandstrahlgebläse auf gleiche Oberflächenrauigkeit gebracht. Während des Versuches nimmt die Rauhigkeit dieser Scheiben schnell ab, so dass die nacheinander erzielten Einschliffe nicht von gleicher Länge werden, sondern ständig abnehmen. Die Prüfung eines Schmierstoffes erfolgte an jedem Werkstoff mit zwei Scheiben, wobei mit jeder Scheibe drei Einschliffe erzeugt wurden.

### 4. Verschleißmaschine

Nähere Beschreibung des Gerätes findet sich im Bericht Nr. 518. Bei den vorliegenden Versuchen wurden Verschleißstifte aus Schweisseisendraht und als Lauffläche abgestrahlten Stahlbändern verwendet. Die Belastung betrug 10 kg. Alle übrigen Versuchsdaten wurden aus den früheren Versuchen beibehalten. Die Verschleißprüfung erfolgte in Abhängigkeit von der Temperatur.

### 5. Vierkugelmachine

Der Aufbau des Gerätes ist aus der Literatur bekannt und ist ausserdem in Bericht Nr. 486 näher beschrieben. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden keine Stahlkugeln, sondern Kugeln aus Gußeisen angewendet. Stahlkugeln mögen wohl für die Prüfung von Getriebe- und Waffenölen die geeigneten Prüfelemente darstellen, für die Untersuchung von Motorenölen kommen sie kaum in Frage. Dagegen lässt vielleicht die Prüfung mit Gußeisenkugeln gewisse Schlüsse auf den Kolbenringverschleiß zu, denn auch im Motorzylinder läuft Gußeisen auf Gußeisen bzw. auf ungehärtetem Stahl. Es wurden Läufe von einer Minute Dauer bei einer Belastung von 150 kg durchgeführt. Die Prüfung erfolgte bei Raumtemperatur. Gemessen wurden an den drei unteren Kugeln die Durchmesser der Verschleißkalotten.

### 6. Geplante Fortsetzung der Versuche

Ausser diesen fünf Geräten ist noch ein weiteres in Vorbereitung. Dabei läuft bei zunehmender Belastung ein ebener Ring aus hartem Stahl mit seiner Stirnfläche auf einer ebenen Platte aus Lagerwerkstoff. Die Prüfung dieser Öle damit soll einem weiteren Bericht vorbehalten bleiben. Soweit es die Umstände erlauben, ist ausserdem beabsichtigt sowohl an Drahtreibungsprüfgerät als auch an der Wielandmaschine vor allem Lagermetalle wie Bleibronze, Thermit, usw. ferner Zinn, Zink, Silber und Blei bei der Prüfung zur Anwendung zu bringen.

Die geprüften Schmierstoffe besitzen folgende physikalische Daten:

Gruppe	Überschreibung	Zähigkeit c St			V <sub>3</sub>	n	w <sub>p</sub>
		20° C	50° C	100° C			
I	SS 607	394	62,0	10,4	77	3,74	2,29
	SS 707	310	58,5	10,65	97	3,36	1,94
	SS 807	203	52,0	10,0	99	3,57	1,91
II	SS 903	865	152,8	24,5	114	3,06	1,30
	SS 960	930	141,3	20,9	101	3,33	1,87
	SR-01	955	142,0	21,9	107	3,26	1,80
	Rotring D	885	127,8	18,8	95	3,4	1,94
III	SS 1593	187,7	46,6	9,98	124	3,26	1,40
	Synth.-Einkl. Öl	96,8	25,8	6,91	130	3,30	1,43
	ASB	1000	143,1	21,1	100	3,30	1,87
	SS 960+3% KSB	907	132,2	20,3	104	3,33	1,87

Aus Gründen der übersichtlicheren Darstellung der Versuchsergebnisse, wurden die Schmierstoffe in 3 Gruppen unterteilt. Gruppe I und II enthalten Kohlenwasserstofföle natürlicher und synthetischer Herkunft, die Gruppe III Öle mit Zusätzen zur Verbesserung des Schmierverhaltens.

### C) Versuchsergebnisse

#### 1. Beurteilung der Meßgrößen

Bevor auf die Ergebnisse in den einzelnen Geräten näher eingegangen wird, ist es erforderlich, zunächst über die Bewertung der einzelnen Meßgrößen klar zu werden. Solange es sich um die Bestimmung einer Reibungszahl bei Grenz- oder Hinzureibung handelt, wie etwa bei der Almen-Wielandmaschine oder beim Drahtreibungsgerät, macht die Bewertung der Schmiermittel keine Schwierigkeit. Man wird eine niedrige Reibungszahl stets als positives und eine hohe als negatives Kriterium der Schmierleistung betrachten.

Essentlich verwickelter liegen die Dinge beim Verschleiß. Man muss hier zwei Verschleißvorgänge unterscheiden, nämlich Verschleiß bei Pressen und Verschleiß, der einem stetigen Metallabtragen gleich kommt.

-/-

Fressen tritt vor allem auf, wenn gleiche oder ähnliche Werkstoffe aufeinander laufen und ist eine Folge hoher Temperatur an der Metalloberfläche. Hohe Drehzahlen begünstigen daher diesen Vorgang. Fressen an Gleitflächen führt zu schwerwiegenden Schäden, daher muss man ein Öl dann günstig bewerten, wenn es instande ist, das Fressen möglichst zu verhindern. Falls dieses jedoch nicht vermeidbar ist, soll der Verschleiß an der Freßstelle möglichst klein sein. Ölprüfmaschinen, die solche Effekte zeigen, sind die Almen-Wielandmaschine und die Vierkugelmachine. Eine hohe Freßbelastung in der Almen-Wielandmaschine wird man also als günstig bewerten müssen; ebenso ein kleiner Verschleißdurchmesser an den Kugeln der Vierkugelmachine.

Diese Verhältnisse lassen sich jedoch nicht auf die andere Verschleißform übertragen. Metallabtrag erhält man besonders dann, wenn die beiden Prüfelemente in ihrer Härte stark verschieden sind. Begünstigt wird die Metallabtragung durch erhöhte Rauigkeit des Schleifkörpers, also des härteren Teiles der Prüfelemente. Unter solchen Verhältnissen arbeitet die Verschleißmaschine und die Rinschliffapparatur. Es konnte festgestellt werden, dass gerade die Schmierstoffe, die instande sind, ein Fressen weitgehend zu verhindern, den grössten Metallabtrag ergeben. Dies gilt nicht nur für Höchstdrucköle, wo mit grosser Wahrscheinlichkeit mit chemischen Vorgängen gerechnet werden muss, sondern auch für reine Kohlenwasserstoffe und Esteröle. Diese Gesetzmässigkeit, über die später berichtet werden wird, ist bei Verwendung einheitlicher Substanzen deutlich zu beobachten, wird aber bei legierten Ölen, wie sie hier zur Prüfung vorliegen, stark verwischt. Des weiteren lässt sich feststellen, dass unter gewissen Voraussetzungen hoher Metallabtrag mit niedriger Reibungszahl Hand in Hand gehen. Bedenkt man ferner, dass gerade die Öle, die in der Praxis als gute Schmierstoffe bekannt sind, wie z.B. Pflanzenöle, sehr hohen Metallabtrag ergeben, so erscheint es richtig, den Metallabtrag an geschmierten Flächen bei der Beurteilung des Öles positiv zu bewerten. Vielleicht kann man aber auch annehmen, dass sich für jeden Schmiervorgang ein gewisses Optimum des Metallabtrages angeben lässt, darüber hinaus ein grosser Metallabtrag mehr Nachteile als Vorteile bringt. Ob ein solches Optimum vorhanden ist und wo es liegt, ist nach dem bisherigen Stand der Schmierstoffforschung noch ungeklärt. Es wird daher bei der folgenden Betrachtung angenommen, dass hoher Metallabtrag auf ein schmiertechnisch günstiges Verhalten des Öles schliessen lässt.

## II. Ergebnisse an den einzelnen Geräten

### 1. Almen-Wielandmaschine

#### a) Originallager: (Blatt 1 bis 3)

Die sich ergebenden Unterschiede kommen vor allem in verschieden hoher Freßbelastung zum Ausdruck. Auffallend ist das günstige Verhalten von SS 607 gegenüber

POOR  
COPY 9

SS 607 und SS 707 ( Blatt 1 ). Bemerkenswert ist ferner die hohe Pressbelastung, die mit Rotring P erzielt wurde (Blatt 2). Ein so günstiges Ergebnis war bisher mit Rotring Richöl der verschiedensten Lieferungen noch nie erreicht worden. Aus der Erfahrung mit der Almen-Fielandmaschine ist bekannt, dass kleinste Mengen gewisser polarer Substanzen s.B. Olakure u.a. die Pressbelastung stark heraufsetzen können. Es scheint, dass auch im Falle des Rotrings die hohe Pressbelastung auf Spuren solcher Stoffe zurückzuführen ist.

ASM ( s. Blatt 3 ) liefert überraschenderweise ein nicht sehr günstiges Ergebnis. Die Wirkung von 2% KSE in Mischung mit SS 960 ist beträchtlich ( s. Blatt 2 und 3 ).

b) Lager aus Aeterna VL 22 ( Blatt 4 bis 5 )

c) Lager aus Leichtmetall ( Blatt 7 bis 9 )

Lager aus Aeterna und Leichtmetall ergaben kein Fressen; eine Beurteilung der Schmierstoffe ist daher nur nach der Reibungszahl möglich. Die Streuung hält sich dabei in mässigen Grenzen, lediglich bei SS 1995 und beim synth. Kiri.Öl ( Blatt 6 ) treten mit Aeterna grössere Streuungen auf. Mit Lagern aus Aeterna lassen sich Unterschiede noch leidlich erkennen, während bei Leichtmetall solche nur schlecht zu beobachten sind. Bei Aeternalagern ist die Reibungszahl grösseren Schwankungen unterworfen. Gewissen Schmierstoffen wie s.B. SS 903, ASM und SS 607 lassen mit steigender Belastung ein starkes Fallen der Reibungszahlen erkennen. Leichtmetalllager ergeben demgegenüber annähernd gleichbleibende Reibungswerte.

## 2. Brantreibungsprüfgerät ( Blatt 10 bis 15)

Für Eisen, Kupfer und Messing liegen die Reibungszahlen fast ausnahmslos zwischen 0,12 und 0,19, für Aluminium jedoch wesentlich höher, etwa zwischen 0,2 und 0,3.<sup>+</sup>

Da sich die Reibungskurven häufig überschneiden, ist eine Bewertung der Schmierstoffe nicht immer ganz einfach. Die einzelnen Meßpunkte wurden der Übersichtlichkeit halber weggelassen. Um trotzdem ein Bild über die Streuung zu erhalten, mögen folgende Angaben genügen. Am geringsten ist die Streuung bei Eisen und Kupfer, sie beträgt etwa 5%, bei Messing etwa 8% und bei Aluminium 8 bis 12%. Die Grösse der Streuung ist wie bei allen Schmierfähigkeitsgeräten auch von Öl zu Öl verschieden. Die gemessenen Unterschiede zwischen den einzelnen Schmierstoffen treten bei Eisen und Kupfer am wenigsten in Erscheinung, während Messing und Aluminium stärkere Unterschiede erkennen lassen.

3. Einschliffapparatur ( Blatt 16 und 17 )

Die Versuche an der Einschliffapparatur mit der Hartmetallscheibe zeigen besonders interessante Ergebnisse ( Blatt 16 ). Besonders auffallend ist das Verhalten von synth. Einlauföl und SS 1593. Diese beiden Schmierstoffe geben beispielsweise mit Rotguß sehr geringen und mit Leichtmetall sehr hohen Abrieb. Zwischen der Metallabtragung auf Stahl und auf Gußeisen besteht kein Zusammenhang. Interessant ist ferner ein Vergleich zwischen den Ergebnissen, die mit einer Hartmetallscheibe und mit Scheiben aus Stahl ( Blatt 17 ) erhalten wurden. Bei Versuchen gegen Leichtmetall und gegen Stahl wurden in beiden Fällen fast gleiche Gütereihenfolgen der Schmierstoffe erzielt. Eine Ausnahme macht jedoch Rotguß. Hier zeigen besonders synth. Einlauföl und SS 1593 stark gegensätzliches Verhalten. Es ist zu vermuten, dass diese auffallende Erscheinung folgende Ursache hat. Rotguß neigt bei diesen Versuchen stark zu Metallauftrag, der sich besonders bei den etwas rauheren Stahlscheiben störend bemerkbar macht. Es läuft dann also gegen Ende des Versuches nicht Stahl auf Rotguß, sondern Rotguß auf Rotguß. Es ist kaum anzunehmen, dass unter solchen Verhältnissen noch ein stetiger Metallabtrag zustande kommt, vielmehr dürfte man hier wohl Pressen zwischen Rotguß und Rotguß annehmen. Die Ergebnisse mit Stahlscheibe auf Rotguß sind daher etwas zweifelhaft, sie sollen aber trotzdem wie die übrigen bewertet werden.

4. Verschleißmaschine (Blatt 18 und 19 )

Die Öle der Gruppe I und II geben bei geringer Streuung nur sehr kleine Unterschiede ( Blatt 18 ). In Gruppe III ist der Metallabtrag wesentlich größer, auch die Streuung nimmt höhere Werte an. SS 1593 und synth. Einlauföl fallen durch besonders hohen Abrieb auf. Da hier weiches Eisen auf rauhen, gehärteten Stahlflächen läuft, liegen die Verhältnisse des Metallabtrages vor, so dass die Ergebnisse der Gruppe III als günstig bewertet werden müssen.

5. Vierkugelmachine ( Blatt 20 )

Während es sich bei den Versuchen an der Verschleißmaschine um Metallabtrag handelt, hat man es an der Vierkugelmachine mit Verschleiß zu tun, der unter Erscheinungen des Fressens vor sich geht. Es ist daher nicht verwunderlich, dass gerade die Gruppe III hier den geringsten Verschleiß ergibt, im Gegensatz steht zu den Ergebnissen an der Verschleißmaschine. Die Streuung hält sich in erträglichen Grenzen, obwohl die Gleichmäßigkeit der Gußeisenkugeln etwas zu wünschen übrig lässt. Eine Ausnahme machen die Versuche mit Rotring D und SS 960. Für diese beiden Öle scheinen die Versuchsbedingungen gerade in einem Streubereich zu liegen.

POOR  
COPY

9

III. Zusammenfassung der Ergebnisse.

Aus der Fülle von Versuchsergebnissen ist es schwer, sich über das schmier-technische Verhalten der einzelnen Öle ein Bild zu verschaffen. Um sich alle Ergebnisse gleichzeitig vergegenwärtigen zu können, wurde daher ein Punktsystem eingeführt. Die Zahl der Punkte ( von 1 bis 10 ) steht in direktem Verhältnis zu der Güte des Schmierstoffs. Dadurch wird eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse ermöglicht, aus der man entnehmen kann, in welcher Reihenfolge und in welchem Abstand die Schmierstoffe zueinander stehen. Die Tabelle auf Blatt 21 gibt die Bewertung nach Punkten wieder, und zwar zunächst getrennt nach den einzelnen Apparaten und Werkstoffen. In der Zusammenfassung der Ergebnisse wurden die arithmetischen Mittel der Punktbewertung für gleiche oder ähnliche Metalle und Legierungen ermittelt. Bei widersprechenden Ergebnissen wird dabei der in den einzelnen Apparaten erzielte Unterschied verwischt, während bei Übereinstimmung der Unterschied besonders hervorgehoben wird. Man kann daher mit gewisser Sicherheit folgende Schlüsse ziehen:

In der Gruppe I verhält sich gegenüber Leichtmetall und Aluminium SS 607 besser als SS 707 und SS 807; dieses Ergebnis wird in sämtlichen Geräten bestätigt. Andererseits schneidet bei Verwendung von Kupfer-Zinklegierungen SS 807 besser ab als SS 607 und 707. Dasselbe gilt für Eisen und Stahl, wenn das Ergebnis damit zwar nicht ganz so überzeugend ist. SS 707 zeigt nur mit Bleibronze günstige Werte, wobei jedoch zu bemerken ist, dass aus dem einen Versuch noch kein endgültiger Schluss gezogen werden kann.

In der Gruppe II bleiben SS 960 und MP-Öl durchwegs hinter SS 903 und Rotring B zurück. Lediglich bei Leichtmetall tritt eine kaum merkliche Verschiebung zu Gunsten von SS 960 und MP-Öl ein.

Die ganze Gruppe III zeichnet sich durch ihr günstiges Verhalten gegen Eisen, Stahl und Gußeisen aus. Ganz besonders gute Ergebnisse erzielen SS 1593 und synth. Einl.Öl mit Leichtmetall. Die Überlegenheit zeigt sich gleichmäßig in allen Geräten.

Die beiden anderen Schmierstoffe ASM und SS 960 + 2% KSE weisen demgegenüber bei Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen günstiges Verhalten auf. Auch hier kann mit den Ergebnissen aller Geräte Übereinstimmung festgestellt werden mit Ausnahme der Versuche in der Einschliffapparatur Stahl auf Rotguß (Spalte 10), die bereits auf Seite 7 einer Kritik unterzogen wurden.

Man kann also feststellen, dass es Schmierstoffe gibt, die an Leichtmetallen besonders günstige Wirkung zeigen und solche, die mit Kupfer und Kupferlegierungen vor allem hervorstechen. Zu den ersten gehören SS 1593, synth. Einlauf Öl



und SS 607, zu den letzteren ASM, SS 960 + 2% KSE und etwas weniger ausgeprägt SS 807. Der Vergleich zwischen SS 960 und SS 960 + 2% KSE gibt die Möglichkeit, die Wirkung eines Zusatzes festzustellen. Man erkennt deutlich eine wesentliche Verbesserung durch KSE bei Verwendung von Eisen, Gusseisen, Stahl, Kupfer und Kupferlegierungen. Bei Anwesenheit von Aluminium oder Aluminiumlegierungen ist der Zusatz wirkungslos, jedoch nicht schädlich.

Die Versuche haben also gezeigt, dass es trotz der grossen Verschiedenheit der einzelnen Geräte möglich ist, eine gewisse Übereinstimmung der Ergebnisse zu erzielen. Dabei ist es selbstverständlich erforderlich zwischen den einzelnen Werkstoffen oder Werkstoffgruppen eine Trennung durchzuführen.

Aus der Tatsache, dass gerade gänzlich verschiedene Geräte zu der gleichen Beurteilung der Schmierstoffe führen, kann man folgern, dass der Syrup von Prüfgerät zur Praxis weniger gewagt ist. Bei der vorliegenden Untersuchung ist die Übereinstimmung nicht in allen Teilen erfüllt. Es ist jedoch zu hoffen, dass durch Ausweitung der Meßbereiche durch weitere Angleichung der Werkstoffpaarung auf diesem Gebiet noch eine Verbesserung möglich ist.

POOR  
COPY

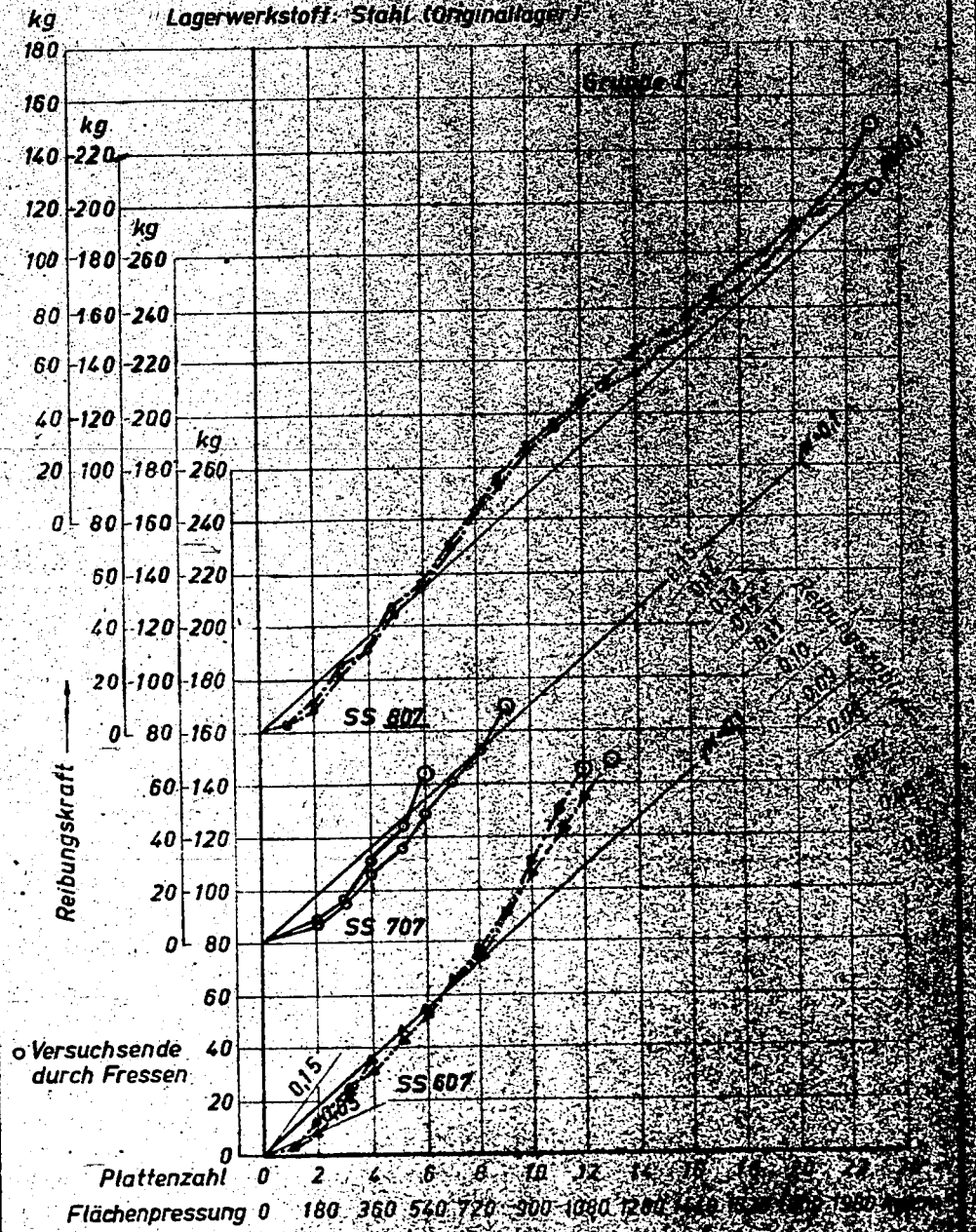
9

Techn. Prüfstand  
Oppau

04489

### Versuche in der Wielandmaschine

Lagerwerkstoff: Stahl (Originallager)



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rheln

Zum Bericht Nr. 112 vom 20. 1. 1925

POOR  
COPY

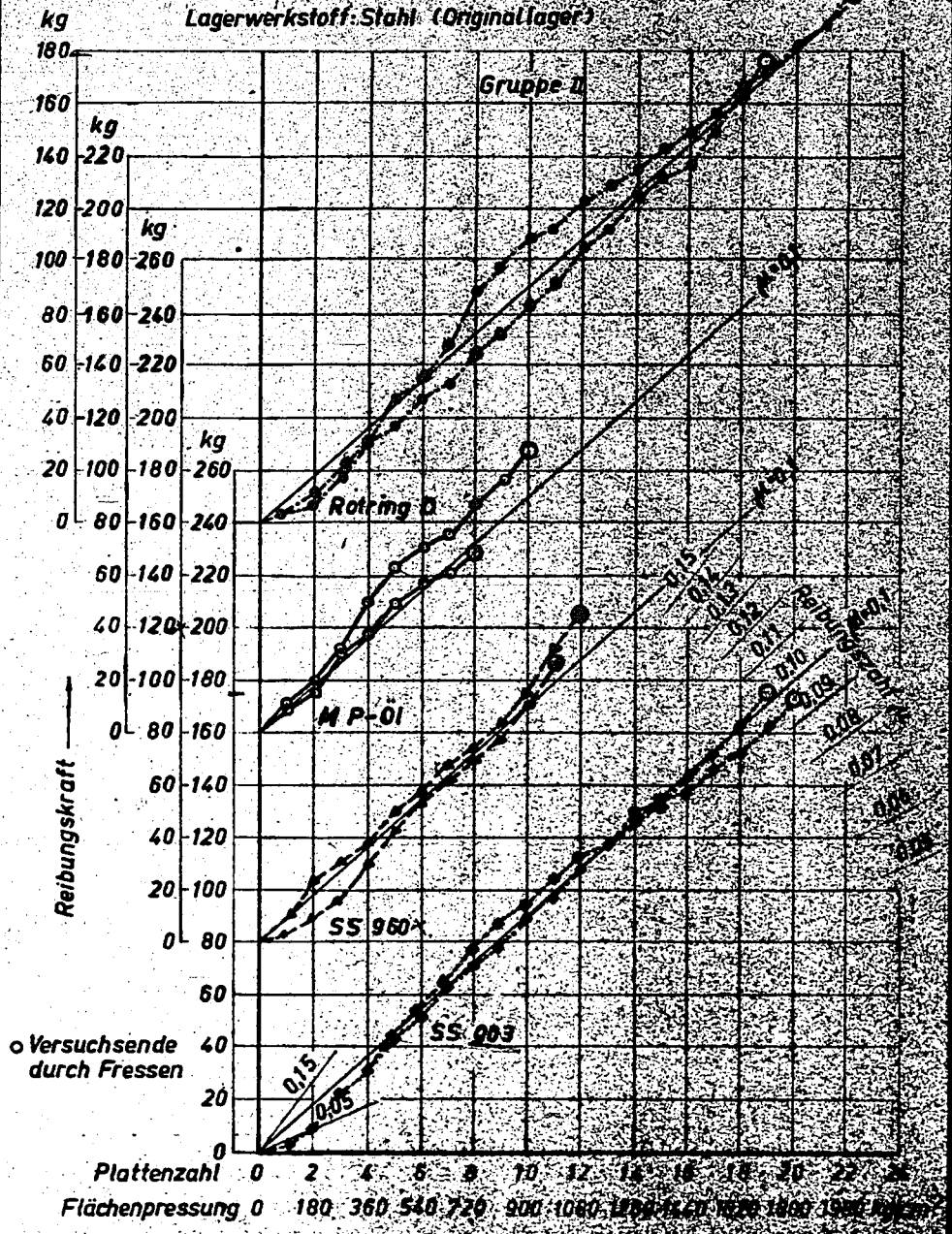
9

P  
C

04490

### Versuche in der Wielandmaschine

Lagerwerkstoff: Stahl (Originallager)



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 107 vom 11. 11. 1927

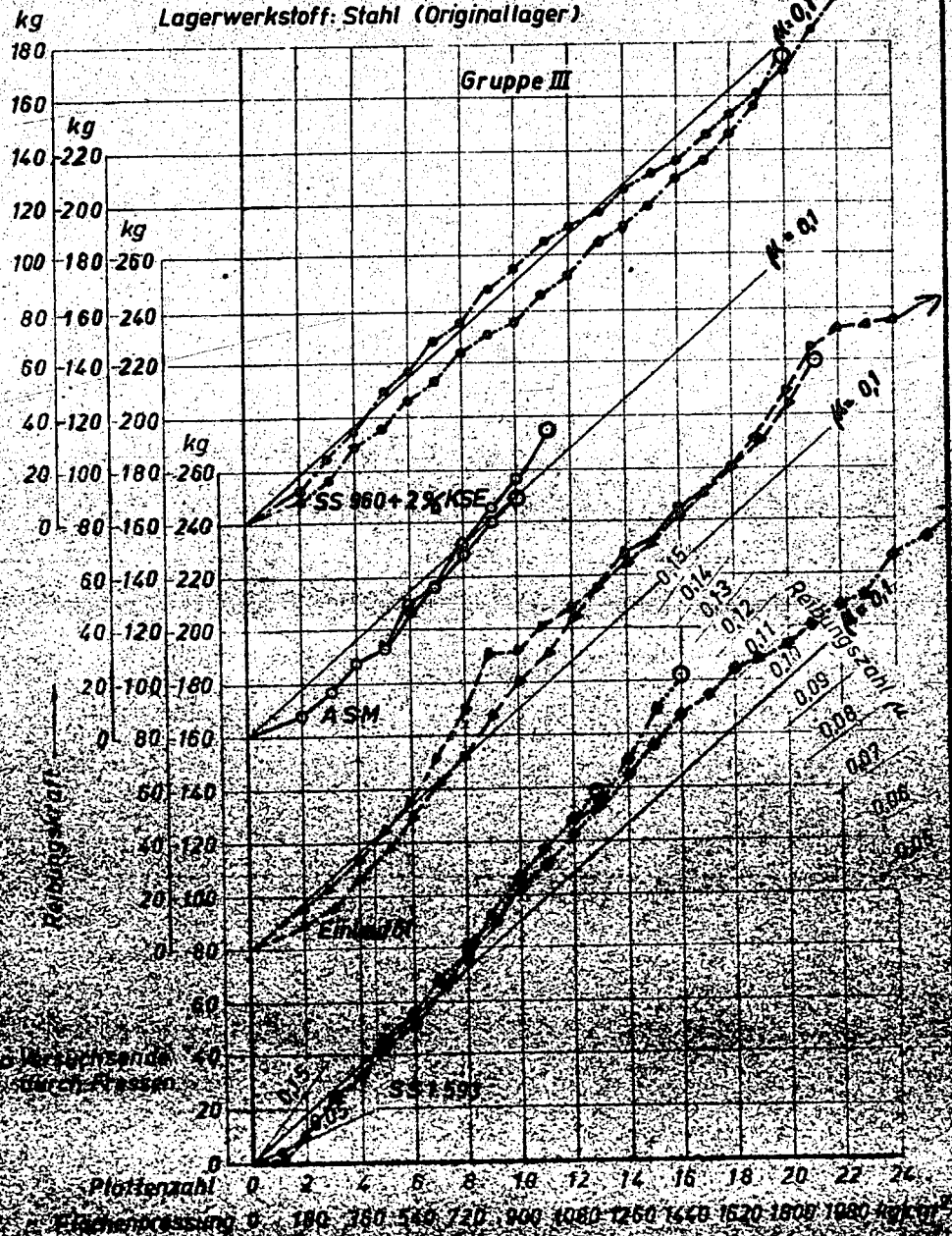
POOR  
COPY 9

Techn. Prüfstand  
Oppau

Blatt 3  
04491

### Versuche in der Wielandmaschine

Lagerwerkstoff: Stahl (Originallager)



POOR  
COPY

9

P  
C

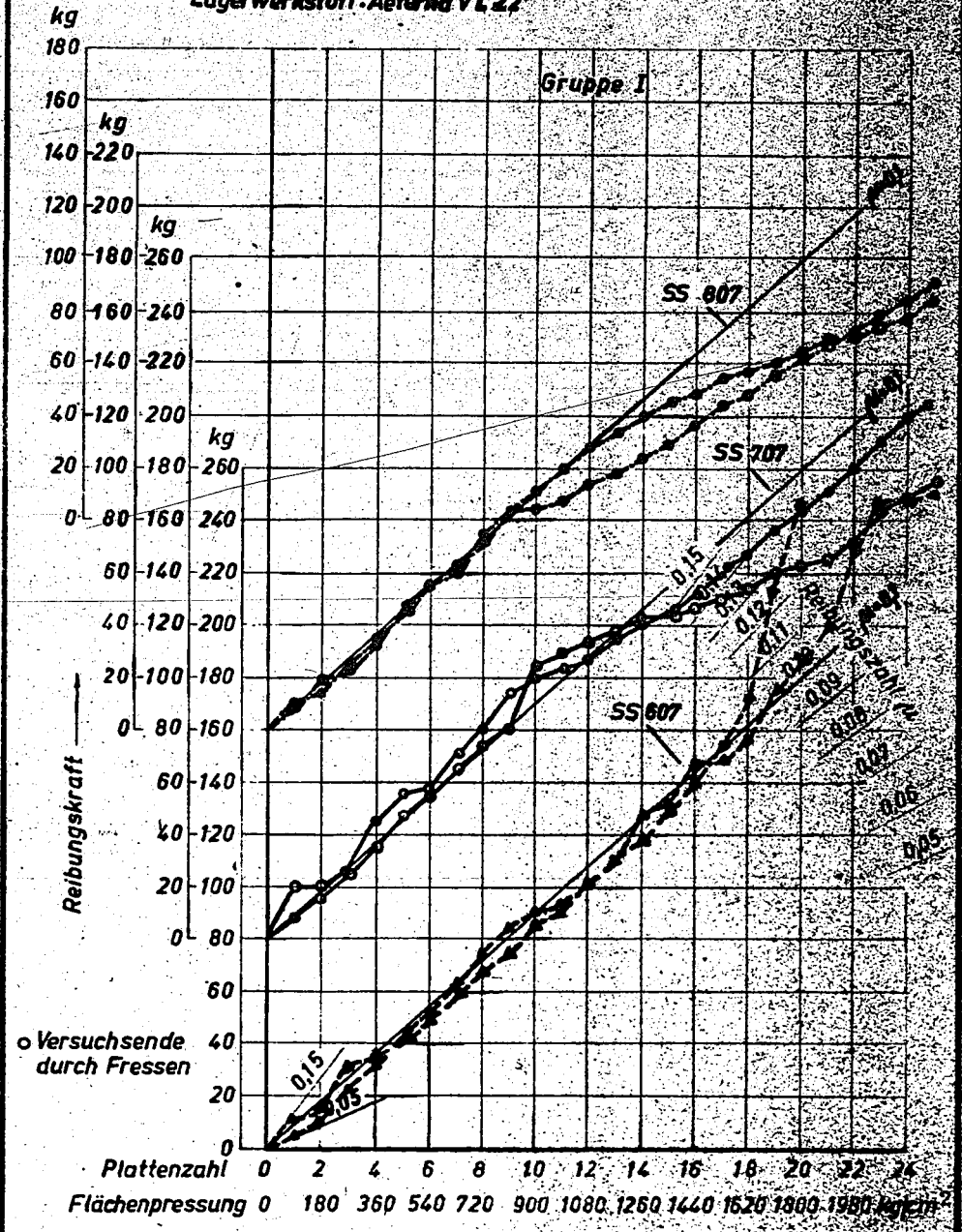
Techn. Prüfstand  
Oppau

Blatt 4

### Versuche in der Wielandmaschine

04492

Lagerwerkstoff: Aeterna VL 22



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.44

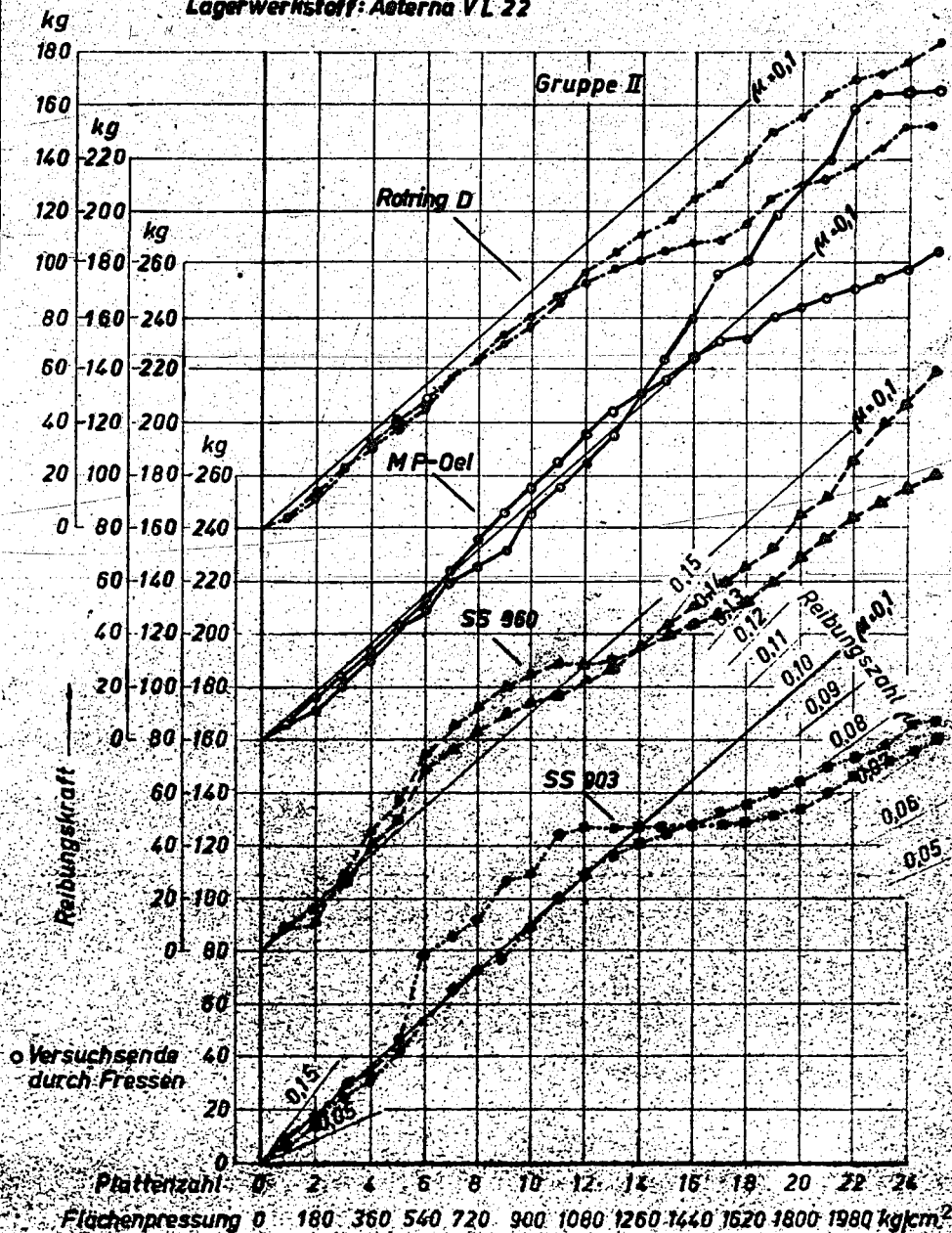
T.P.S. 1000

POOR COPY 9

04493

### Versuche in der Wielandmaschine

Lagerwerkstoff: Aeterna VL 22



I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.44

T Pr S 3629

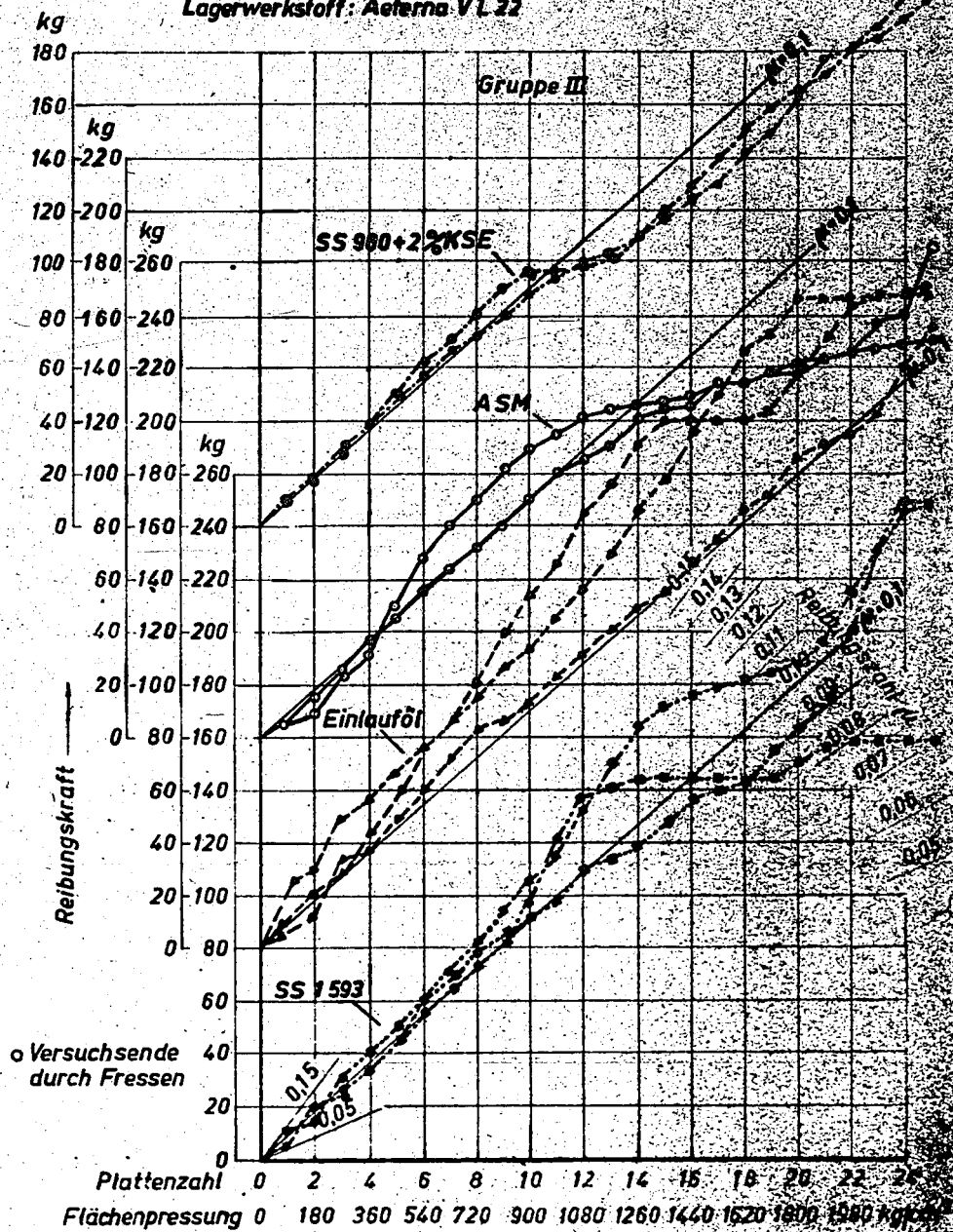
POOR  
COPY 9

PO  
CO

04494

### Versuche in der Wielandmaschine

Lagerwerkstoff: Aeterna-VL 22

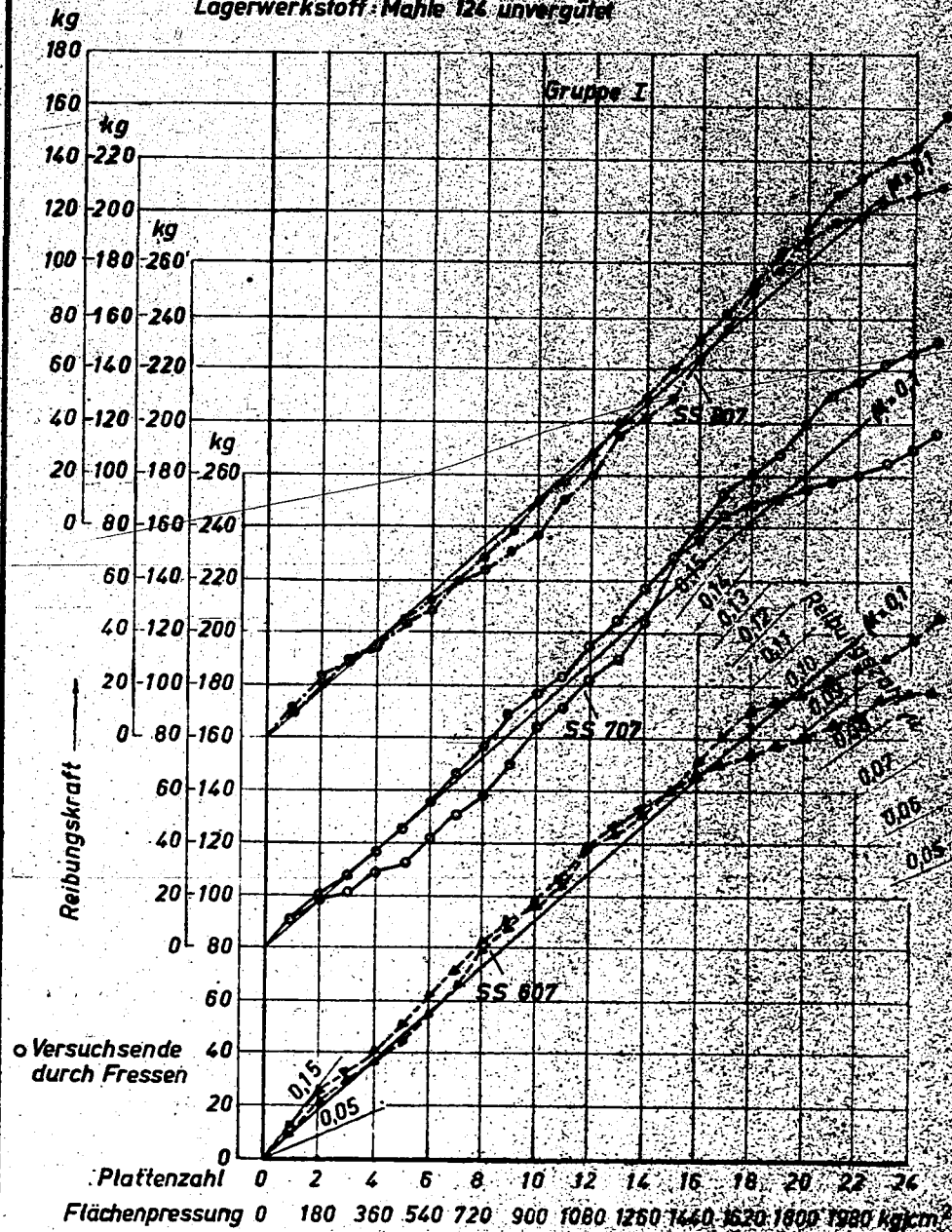


POOR  
COPY 9

04495

### Versuche in der Wielandmaschine

Lagerwerkstoff: Mahle 126 unvergütet



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.44

T. Pr. S. 2631

POOR  
COPY

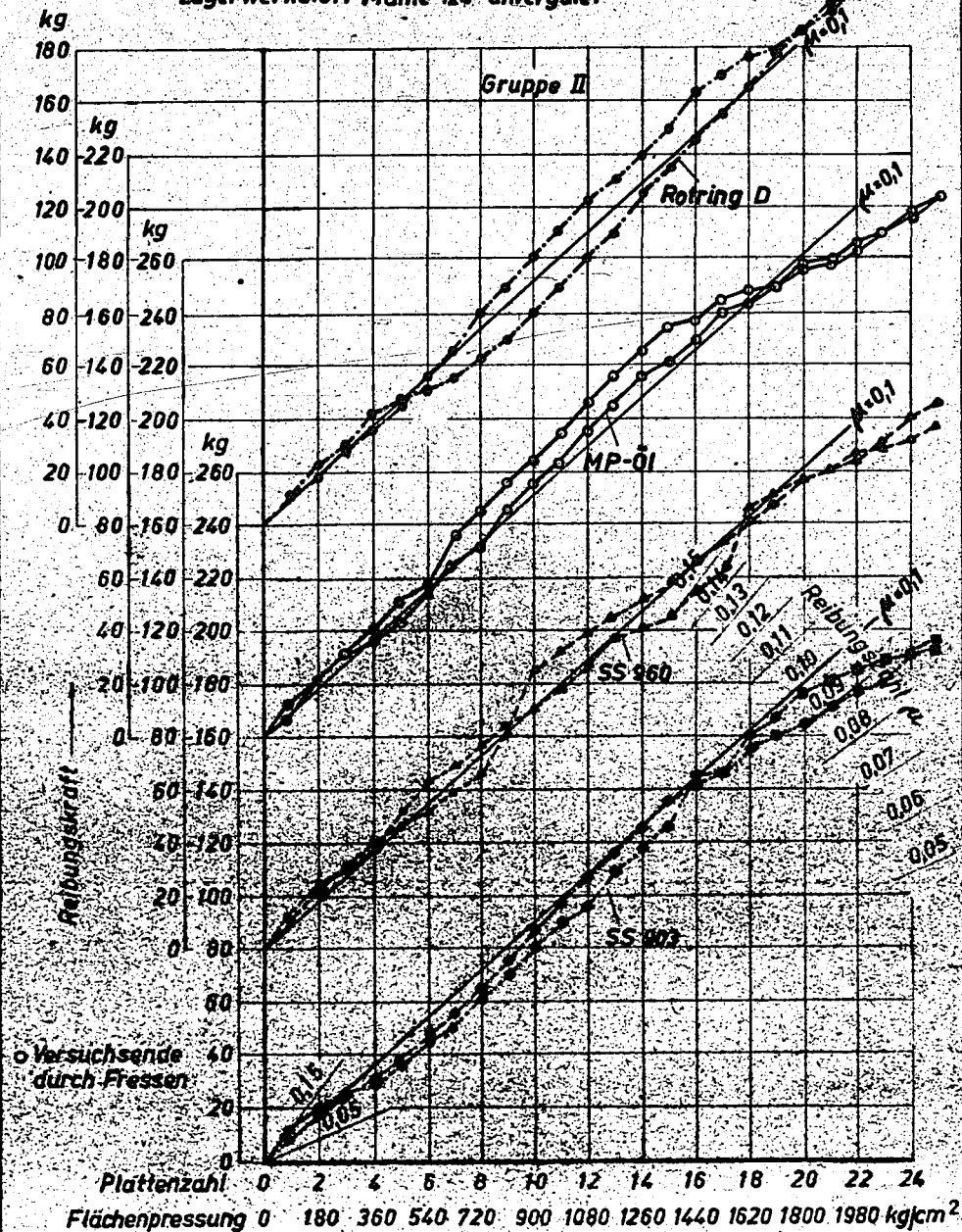
9



04496

### Versuche in der Wielandmaschine

Lagerwerkstoff Mahle 124 unvergütet



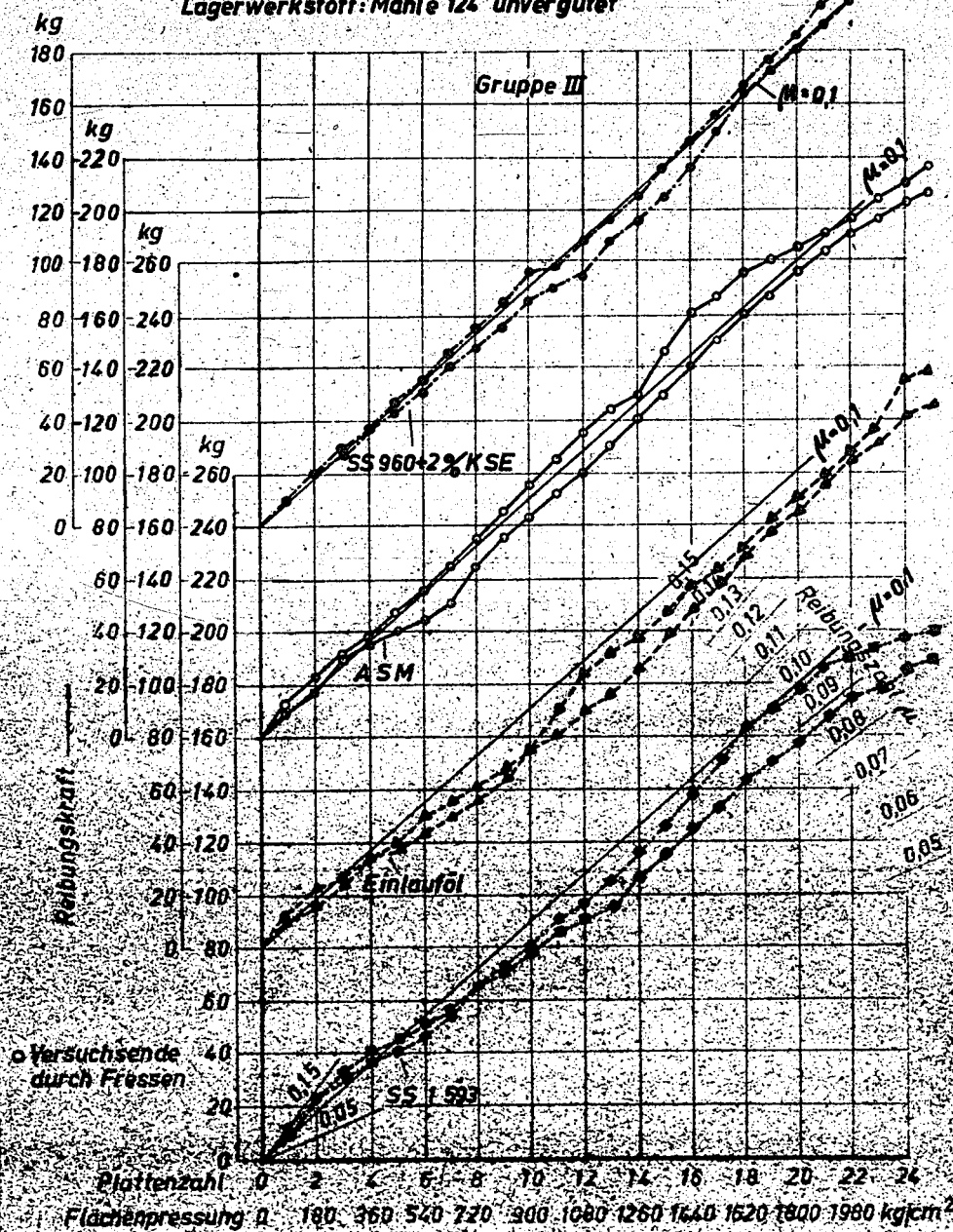
POOR  
COPY

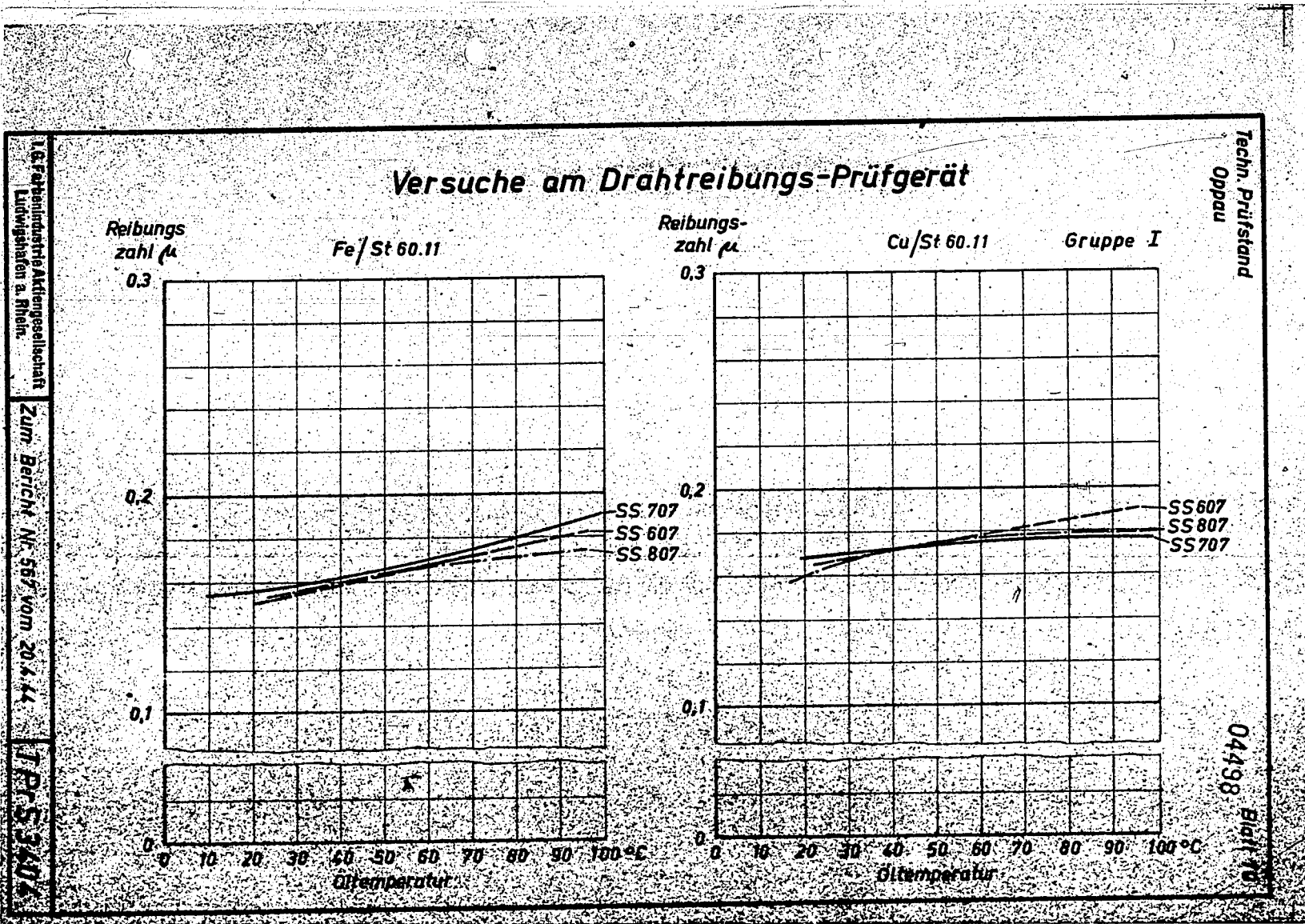
9

04497

### Versuche in der Wielandmaschine

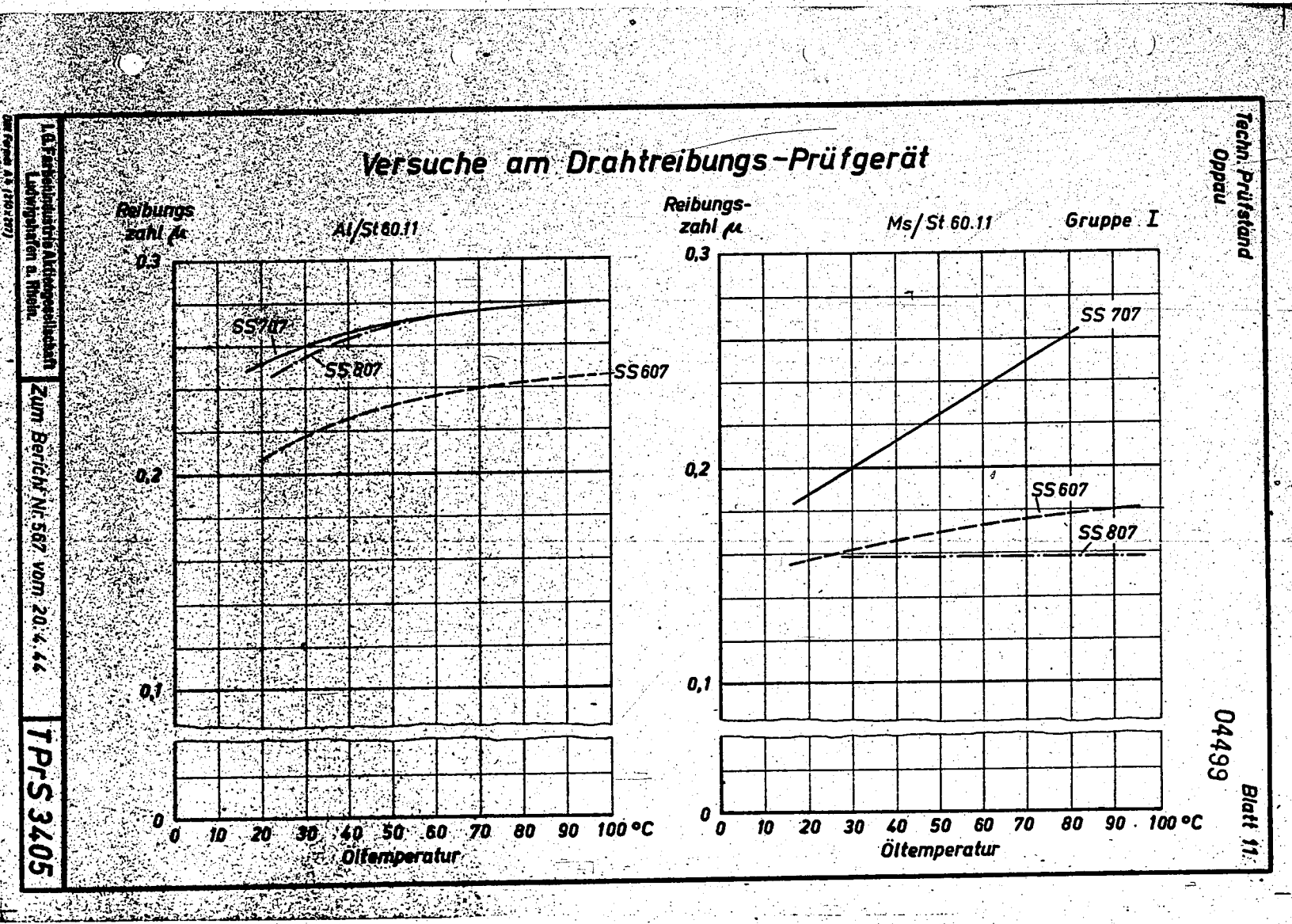
Lagerwerkstoff: Mahle 124 unvergütet





I.G. Fabrikindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.  
Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.44  
TPRS 3405  
Blatt 10

POOR  
COPY 9



I.G. Fachindustrielle Aktiengesellschaft  
 Ludwigshafen a. Rhein.  
 Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.44  
 TP/S 3405

Techn. Prüfstand  
 Oppau  
 04499  
 Blatt 11

I.G. Fachindustrielle Aktiengesellschaft  
 Ludwigshafen a. Rhein.  
 Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.44  
 TP/S 3405

POOR  
 COPY  
 9

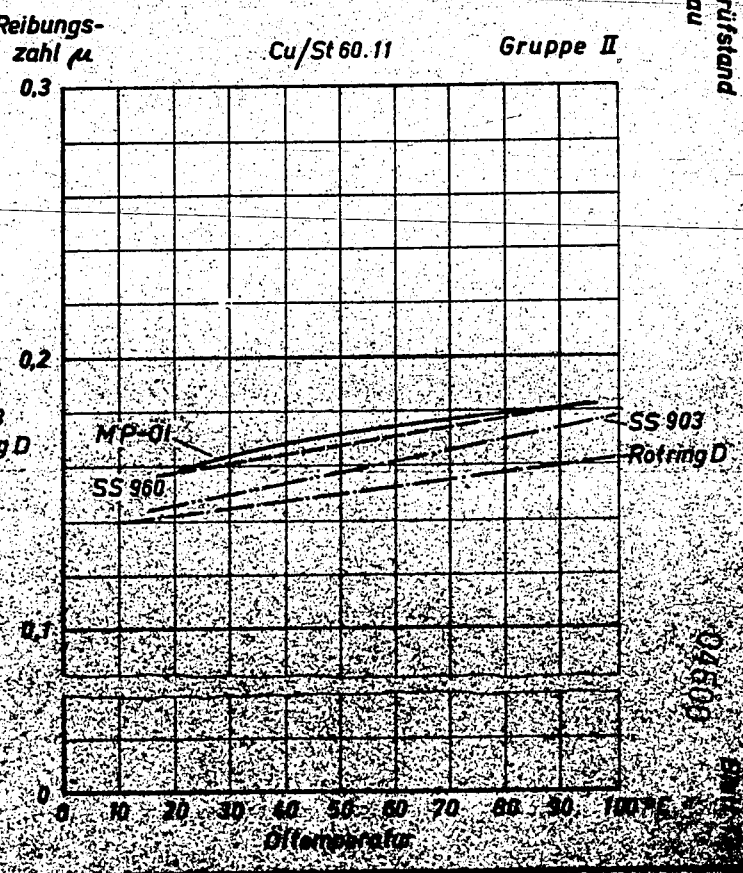
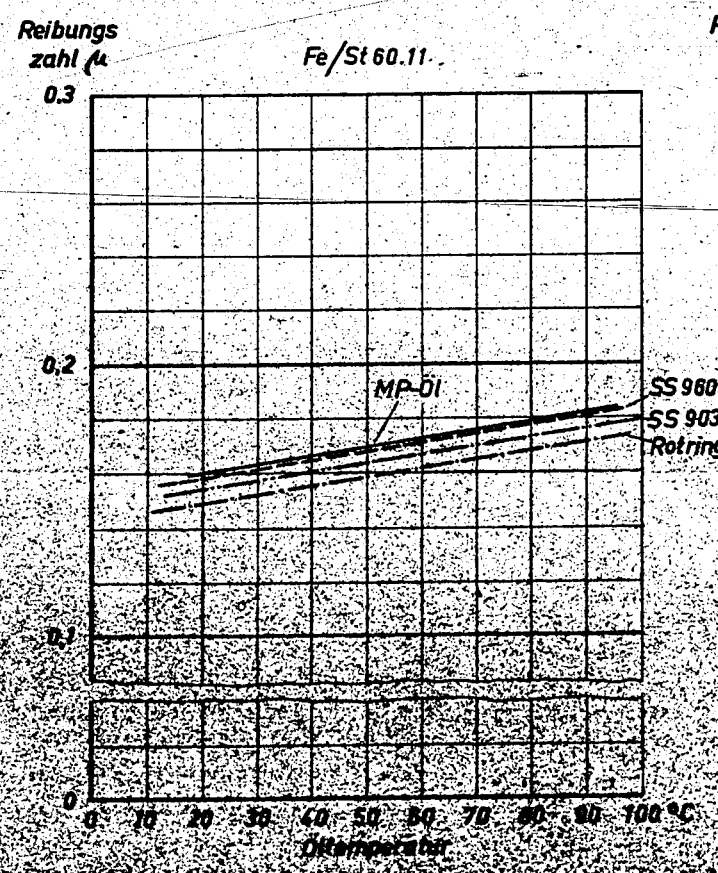
I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.  
DN Form 44 (10x27)

Zum Bericht N. 567 vom 20. 6. 44

TPS 3401

### Versuche am Drahtreibungs-Prüfgerät

Techn. Prüfstand  
Oppau



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.  
DN Form 44 (10x27)

Zum Bericht N. 567 vom 20. 6. 44

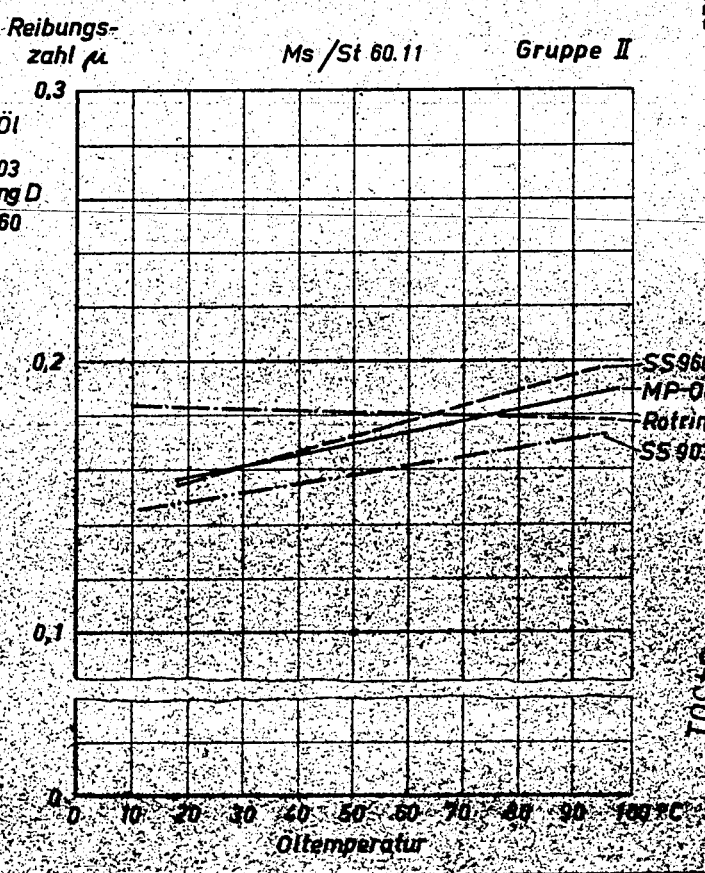
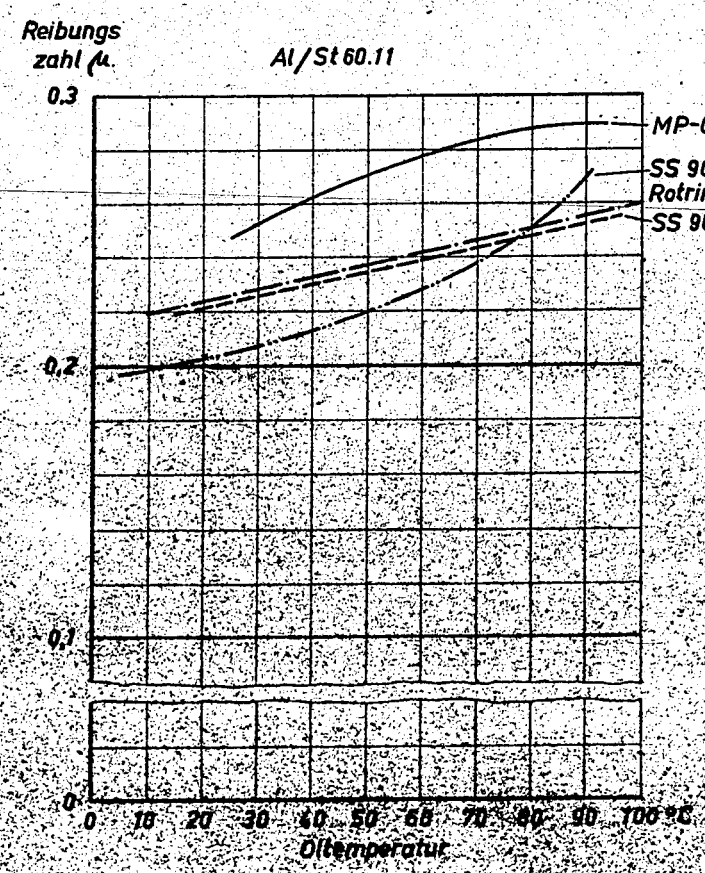
TPS 3401

Techn. Prüfstand

DIN Form A 4 (10x17)  
I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.  
Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.41  
TPFS 3401

### Versuche am Drahtreibungs-Prüfgerät

Techn. Prüfstand  
Oppau



04501

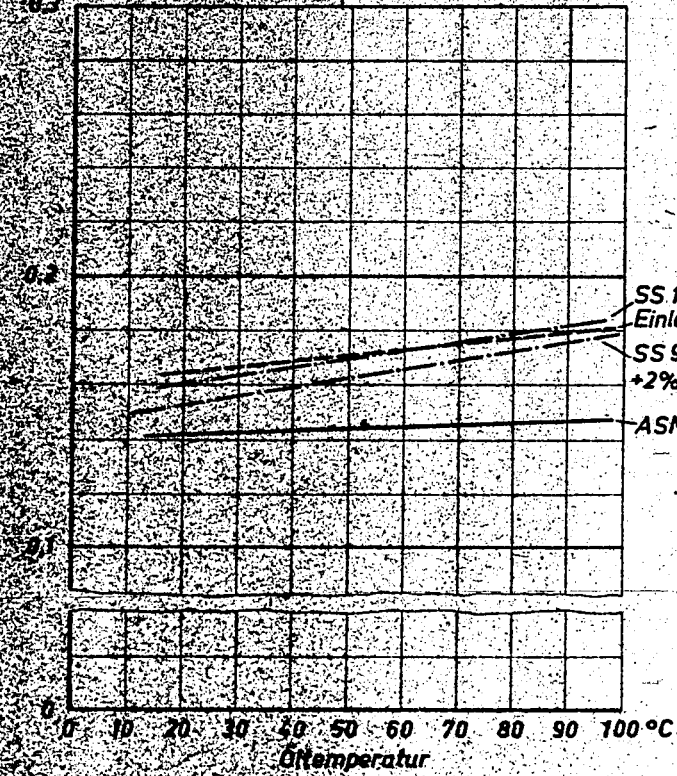
I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.  
Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.41  
TPFS 3402

POOR COPY 9

# Versuche am Drahtreibungs-Prüfgerät

Reibungs-  
zahl  $\mu$

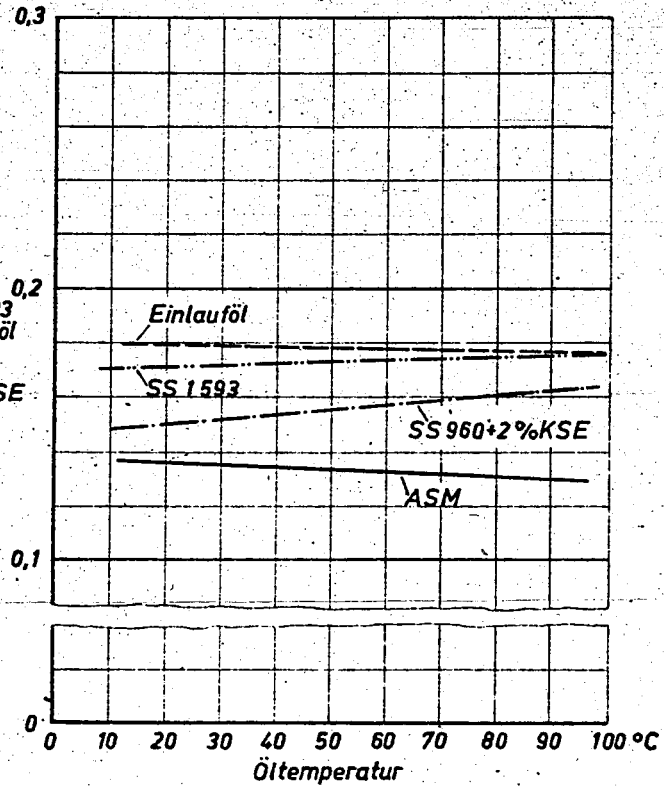
Fe/St 60.11



Reibungs-  
zahl  $\mu$

Cu/St 60.11

Gruppe III



Techn. Prüfstand  
Oppau

04502 Blatt 14

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
 Ludwigshafen a. Rhein.  
 Zum Bericht Nr. 587 vom 20.4.44  
 TP/S 3402

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
 Ludwigshafen a. Rhein.  
 Zum Bericht Nr. 587 vom 20.4.44  
 TP/S 3402

### Versuche am Drahtreibungs-Prüfgerät

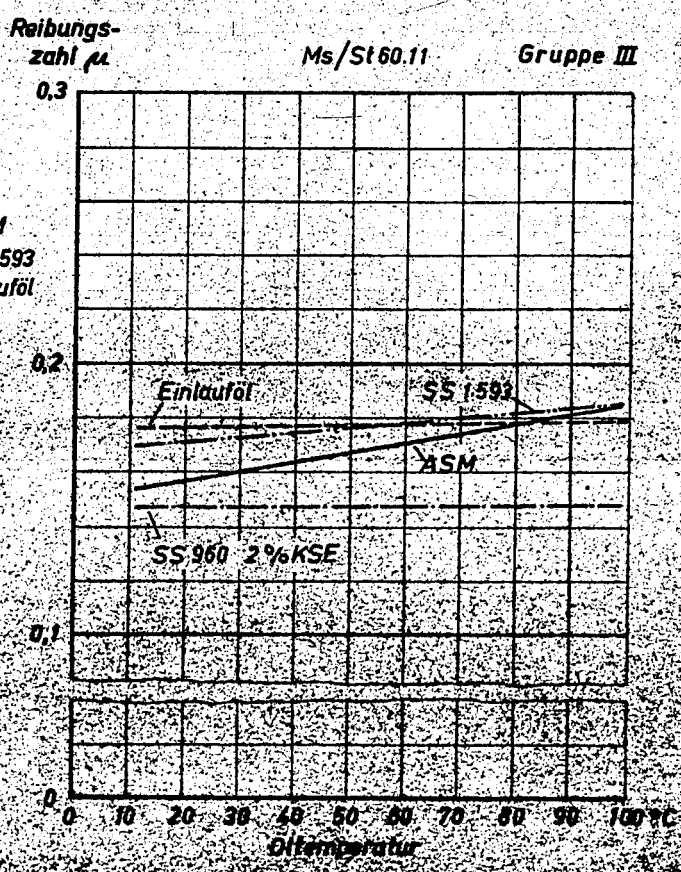
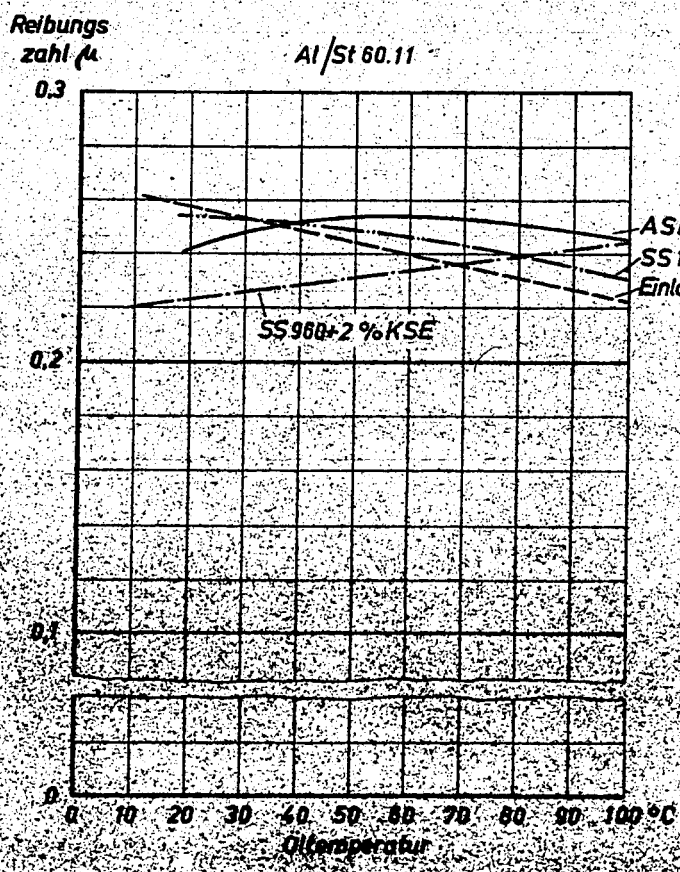
I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
 Ludwigshafen a. Rhein.  
 (Patent 41 (1928/29))

Zum Bericht Nr. 567 vom 20. 4. 1931

P.S. 3409

Techn. Prüfstand  
 Oppau

04509  
 Blatt 1





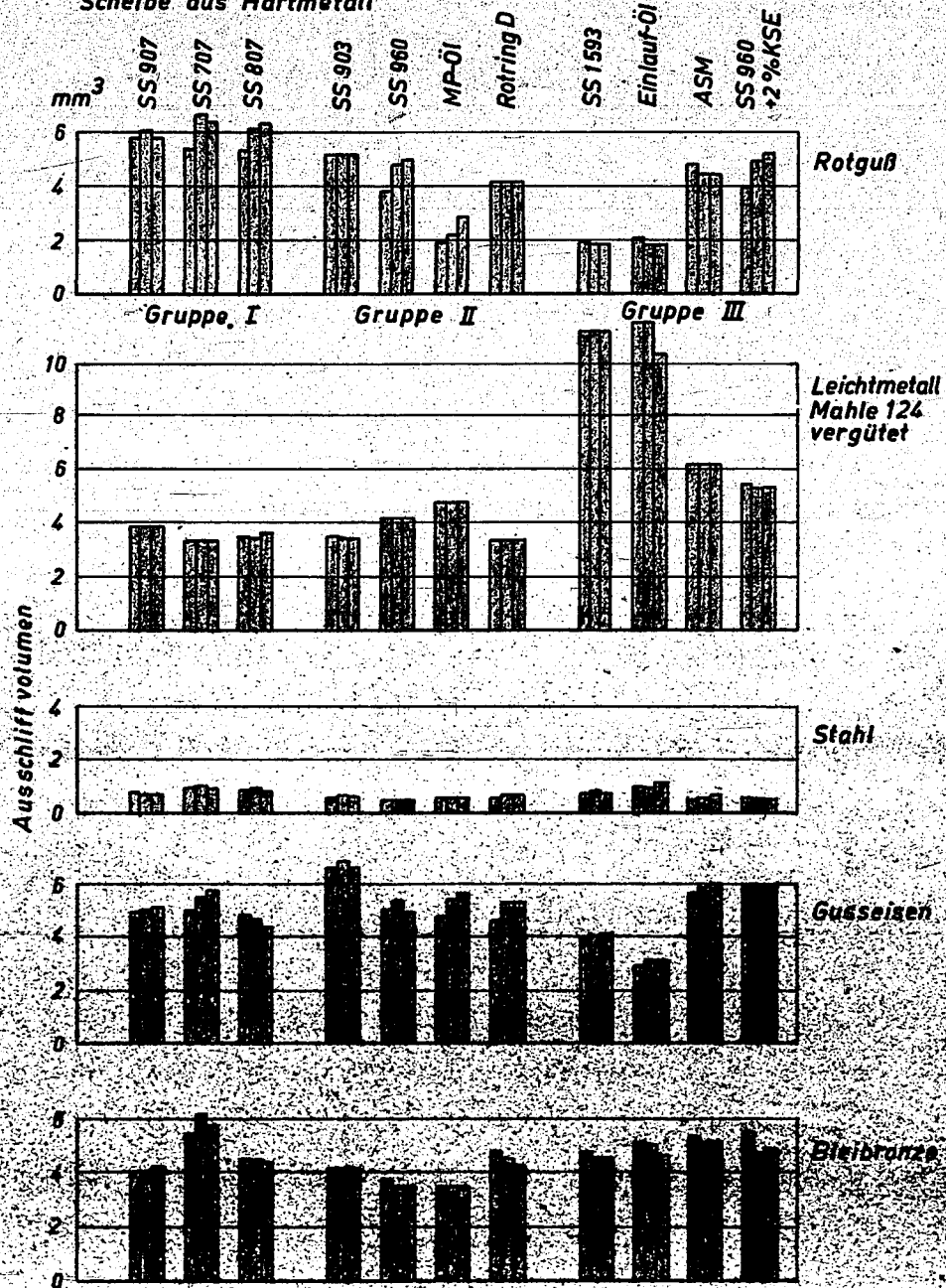
Techn. Prüfstand

Blatt 16

### Oppau Versuche in der Einschliffapparatur

Versuchsdauer 10 Min., Belastung 16 kg, n = 210 U/min  
Scheibe aus Hartmetall

04504



I.B. Fachbereich für Arbeitsschutz  
Lehrstuhl für Arbeitsschutz

Zum Bericht Nr. 567 vom 20. 1. 66

TPrS 3634

POOR  
COPY

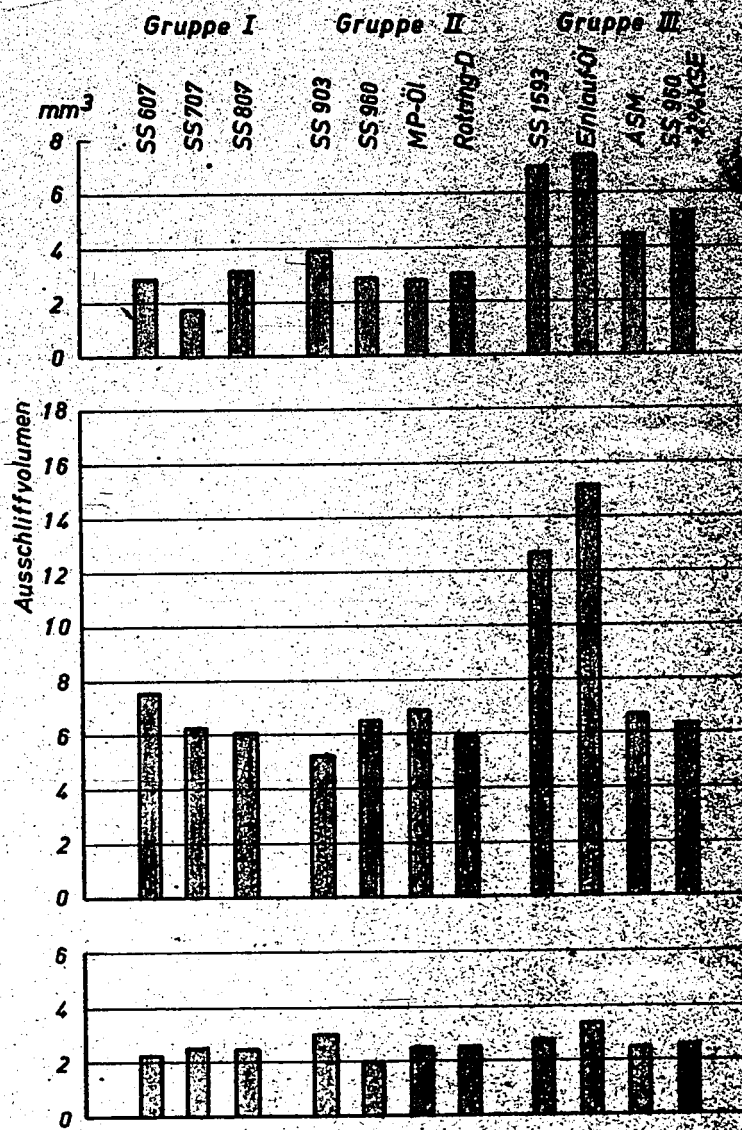
9

Techn. Prüfstand  
Oppau

### Versuche in der Einschliffapparatur

Versuchsdauer 10 min, Belastung 16 kg, Drehzahl 2100/min

Die Werte stellen Mittelwerte dar aus 2 Versuchsreihen zu je 3 Versuchen. Für jede Versuchsreihe wurde eine neue Scheibe aus Stahl verwendet



1/114 23000 11. 42

L. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen am Rhein

Zum Bericht Nr. 567 vom 20. 4. 44

1945 3615

POOR  
COPY

9

P  
O

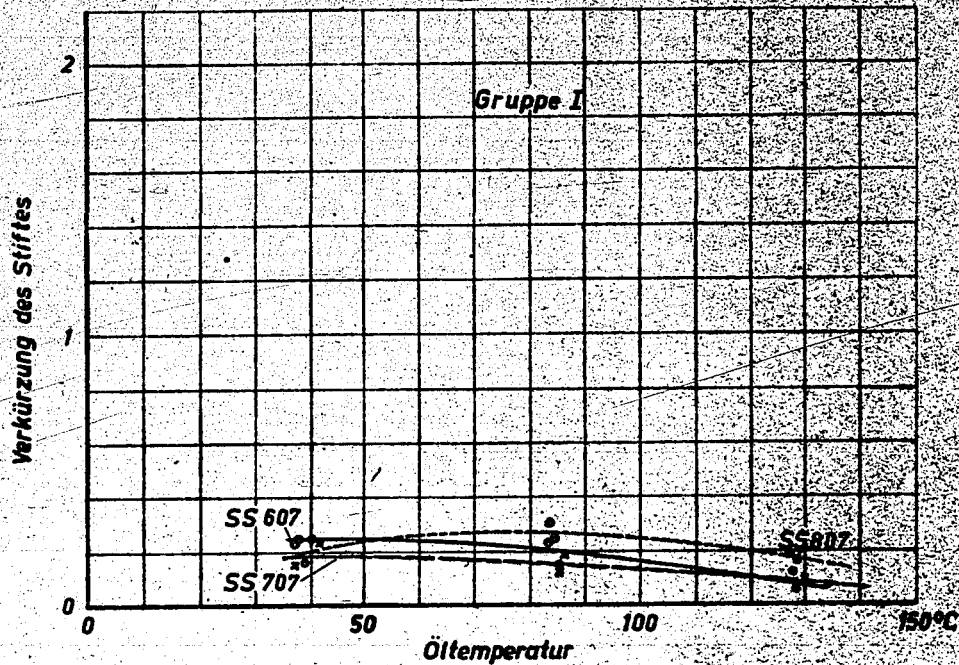
Techn. Prüfstand  
Oppau

Blatt 12

### Versuche in der Verschleißmaschine 04506

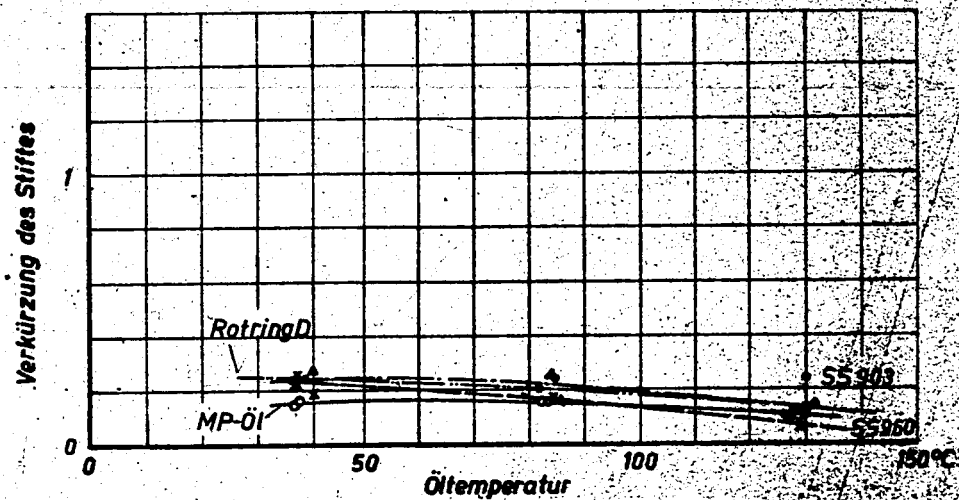
Versuchsdauer: 20 min  
spez. Flächendruck: 142 kg/cm<sup>2</sup>  
Material des Stiffes: Eisen aus Schweißdraht

mm Bild



Versuchsdauer.....h  
spez. Flächendruck.....kg/cm<sup>2</sup>  
Material des Stiffes.....

mm Bild



I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rh.

Zum Bericht Nr. 567 vom 20. 4. 44

TP 5 3636

POOR  
COPY

9

Techn. Prüfstand  
Oppau

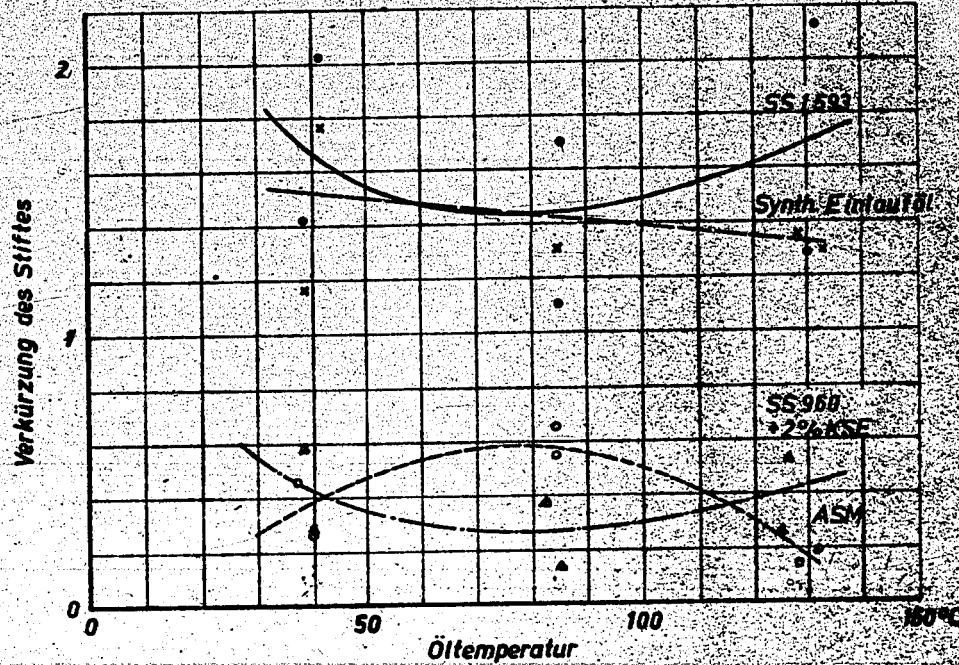
Blatt 19

### Versuche in der Verschleißmaschine

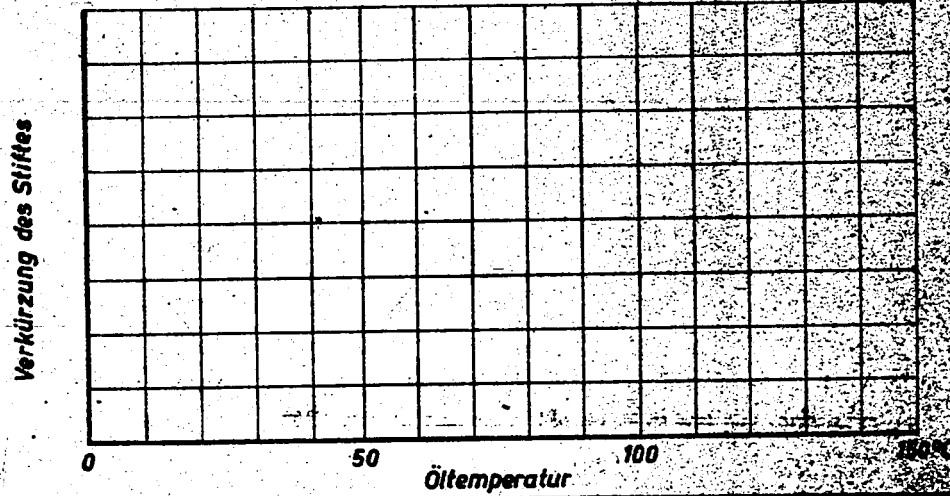
04507

Versuchsdauer: 20 min  
spez. Flächendruck: 142 kg/cm<sup>2</sup>  
Material des Stiftes: Eisen aus Schweißdraht

mm Bild



mm Bild



Versuchsdauer: ..... h  
spez. Flächendruck: ..... kg/cm<sup>2</sup>  
Material des Stiftes: .....

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rh.

Zum Bericht Nr. 567 vom 20.4.44

TPFS

POOR  
COPY

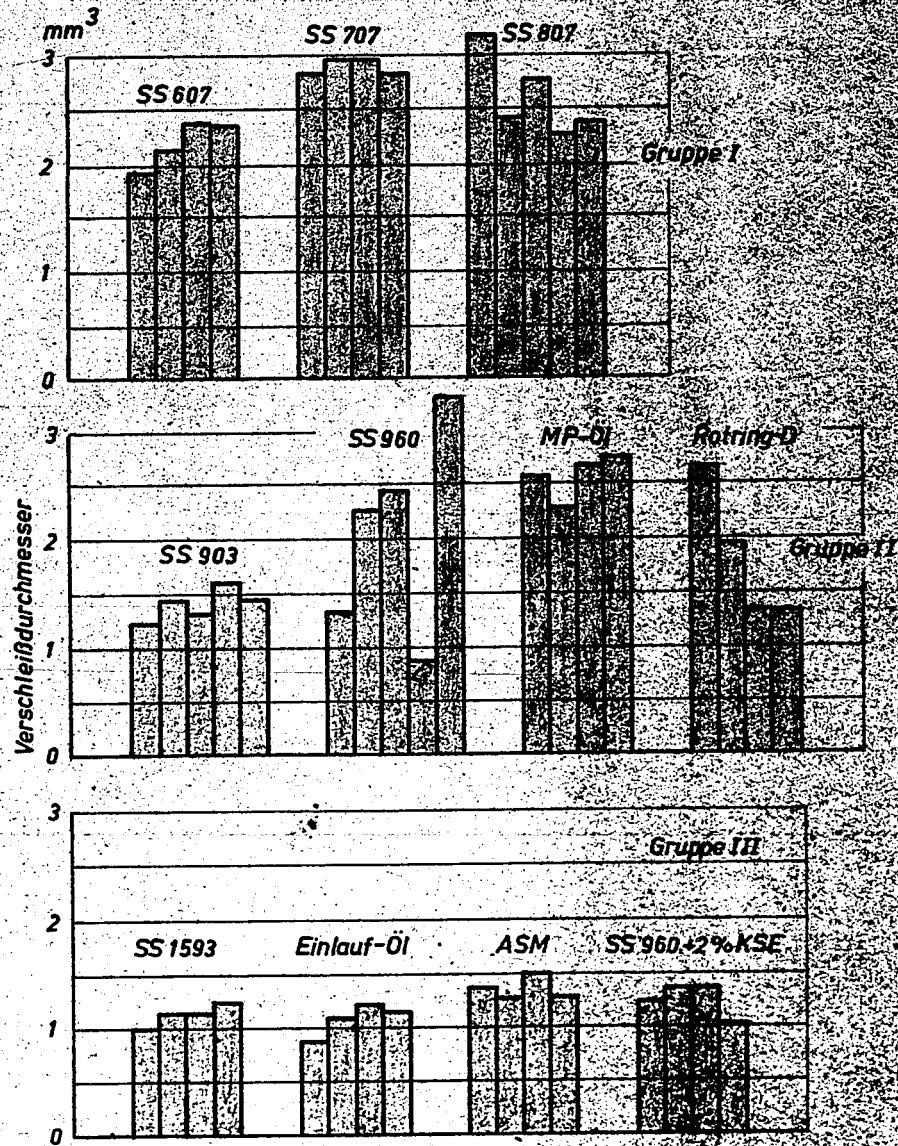
9

Techn. Prüfstand  
Oppau

### Versuche in der Vierkugelmachine

Material der Kugeln: Gußeisen, Belastung: 150 kg  
Drehzahl: 1500 U/min, Versuchsdauer: 1 min

Bericht Nr.  
04508



1/1/16 25000 17. 42.

L. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen am Rhein

Zum Bericht Nr. 567 vom 20. 4. 44

IPS 3638

POOR  
COPY

9

04509

Tabelle.

Spalte Nr.	Öl	Almen-wielandmasch			Drahtreibung- prüfgerät				Einschliffapparatur							Verschleiß- maschine	4-Kugel- maschine	Zusammenfassung der Ergebnisse						
		Lager aus			Draht aus				Stahlscheibe gegen			Hartmetallscheibe gegen						Arithm. Mittel aus Spalte:						
		Stahl	Aeterna	Leichtmet.	Eisen	Kupfer	Messing	Aluminium	Stahl	Rotguß	Leicht- metall	Stahl	Gußeisen	Rotguß	Bleibronze	Leicht- metall	Eisen auf gehärtetem Stahl	Gußeisen auf Gußeisen	2,5,9,12,17 Eisen, Stahl	13,18 Gußeisen	6 Kupfer	3,7,10,14 Aeterna, Messing, Rotguß	15 Blei- bronze	4,8,11,16 Aluminium Leichtme- tall
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Gruppe I	SS 607	4	3	5	5	3	4	5	5	3	6	5	5	7	4	4	1	4	3,6	4,5	3	4,25	4	5,0
	SS 707	2	6	4	4	4	1	2	4	1	4	6	5	7	8	3	1	2	3,4	3,5	4	3,75	8	3,25
	SS 807	6	8	4	5	4	7	2	4	3	4	5	4	7	5	3	3	3	4,6	3,5	4	6,25	5	3,25
Gruppe II	SS 903	6	7	6	5	5	5	3	5	4	3	4	8	6	4	3	2	7	4,4	7,5	5	5,5	4	3,75
	SS 960	4	6	5	4	4	3	5	3	3	4	3	5	5	3	4	1	5	3,0	5,0	4	4,25	3	4,5
	MP-Öl	3	5	5	4	4	4	2	4	3	5	4	5	2	3	5	1	3	3,2	4,0	4	3,5	3	4,25
	Rotring D	6	7	4	6	6	5	5	4	3	4	4	5	4	5	3	2	5	4,4	5,0	6	4,75	5	4,0
Gruppe III	SS 1593	5	4	6	4	4	4	8	4	8	9	4	4	2	5	10	9	8	5,4	6,0	4	4,5	5	8,25
	Synth. sinl. Öl	5	2	6	4	5	5	9	6	9	10	6	3	2	6	10	8	8	5,8	5,5	4	4,0	6	8,75
	ASM	3	7	4	8	9	6	6	4	5	5	4	6	5	6	6	5	7	4,8	6,5	8	5,75	6	3,75
	SS 960+2%KSE	7	6	4	5	6	8	5	4	6	4	4	6	5	6	5	5	8	5,0	7,0	5	6,25	6	4,5

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh. 04510

### Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 537

Die Prüfung von Schmierstoffen in Kleinapparaturen

hinsichtlich Schmiereignung

(Vortrag, gehalten anlässlich der Sitzung der Schmier-  
ölkommision im Technischen Prüfstand Oppau am 26.2.43)

Übersicht: Es werden die Geräte, die zur Prüfung des Schmierver-  
haltens im Technischen Prüfstand Verwendung finden, beschrieben.

Die Apparate zur Messung von Reibungszahlen bei Grenzreibung führen  
zu einer befriedigenden Übereinstimmung in der Beurteilung der Schmier-  
stoffe. Bei den Verschleissmessungen sind die Ergebnisse sehr stark  
von den Betriebsverhältnissen abhängig, vor allem von der Art des ver-  
wendeten Werkstoffes, von der Temperatur und der Rauigkeit der Ober-  
flächen; daher ist eine einheitliche Beurteilung hinsichtlich des Ver-  
schleissverhaltens von Schmierstoffen sehr schwierig. Bei einer Reihe  
von Estern kann zwischen Reibungszahl und Verschleiss unter gewissen  
Versuchsbedingungen ein Zusammenhang gefunden werden. Demnach ergeben  
Öle mit geringem Verschleiss hohe Reibungszahlen und umgekehrt.

Zur Prüfung von Hochdruckschmiermitteln werden die Vierkugelmachine  
und die Almen-Wielandmaschine verwendet. Bei diesen Geräten wird der  
Vorgang des Fressens erfasst. Diese Versuche an den beiden Apparaten  
führen zu widersprechenden Ergebnissen.

Abgeschlossen am: 8. März 1943 Gr.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. R. Halder

Die vorliegende Ausfertigung 13 enthält

17 Textblätter

4 Bildblätter

#### Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 13. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf  
weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

04511

Bericht Nr. 537 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 2

Die Prüfung von Schmierstoffen in Kleinapparaturen  
hinsichtlich Schmiereignung

Die raschen Fortschritte der Technik haben zur Folge, dass an die Betriebsstoffe, wie z.B. das Schmieröl immer höhere Anforderungen gestellt werden. Der gegenwärtige Krieg steigert noch die Ansprüche nach Menge und Güte und bringt gleichzeitig erhöhte Schwierigkeiten in der Rohstoffbeschaffung mit sich. Die Aufgaben, denen sich der Ölohemiker gegenüber sieht, sind daher nicht immer einfacher Natur und er bedarf zur Lösung dieser Probleme einer geeigneten Untersuchungsmöglichkeit seiner Produkte.

Zweck dieses Vortrages soll sein, Ihnen zu zeigen, in welcher Weise im Technischen Prüfstand Schmierstoffprüfungen durchgeführt werden. Besonders soll dabei die Untersuchung in Kleinapparaturen hinsichtlich Schmiereignung in den Vordergrund gestellt werden.

Bei der Prüfung der Schmiereignung eines Schmierstoffes muss man sich zunächst über die verschiedenen Schmierzustände im Klaren sein. Am anschaulichsten können diese an einem belasteten Gleitlager verfolgt werden. Bild 1 zeigt schematisch den Verlauf der Lagerreibungszahl in Abhängigkeit von der Wellendrehzahl bei Verwendung von drei verschiedenen Ölen gleicher Zähigkeit. Man erkennt, dass bei grossen Drehzahlen und sonst gleichen Verhältnissen die drei Öle gleiche Reibungszahlen ergeben. Lager und Welle sind dabei durch eine verhältnismässig dicke Schmierschicht voneinander getrennt, die imstande ist, den gesamten Lagerdruck aufzunehmen. Die Welle schwimmt sozusagen auf dem Öl, wobei die Exzentrizität von Welle und Lager nur gering ist. Wenn es möglich wäre, die Drehzahl bis ins Unendliche zu steigern, so würde die Welle konzentrisch im Lager laufen und die Schmierschicht würde in diesem Zustand ihre grösstmögliche Stärke erreichen. Senkt man dagegen die

POOR COPY 10



04512

Bericht Nr. 537 des Techn.-Prüfstandes Oppau, Seite 3

Drehzahl, so nähert sich die Welle immer mehr dem Lager. Gleichzeitig fällt die Lagerreibungszahl ab, bis zu einem Umkehrpunkt, der auch Ausklinkpunkt genannt wird. Von da ab steigt die Reibungszahl sehr rasch bis zu einem Höchstwert bei  $n = 0$  an, wobei in diesem Zustand die Welle nunmehr auf dem Lager aufsitzt. Der Umkehrpunkt ist von besonderer Bedeutung. Rechts davon, also bei höheren Drehzahlen, haben wir es mit dem Zustand der Vollschrnerung zu tun. Es gelten nur die Gesetze der Hydrodynamik, wobei kein Verschleiss auftritt. Die Höhe der Reibungszahl  $\mu$  richtet sich bei gleichen mechanischen Verhältnissen, also bei gleichem Flächendruck, bei gleicher Drehzahl und bei gleicher Gestaltung des Lagers nur nach der Zähigkeit des Schmiermittels. Daher geben Öle gleicher Zähigkeit ungeachtet ihrer sonstigen chemischen oder physikalischen Eigenschaften gleiche Reibungszahlen. In der Gegend des Ausklinkpunktes trennen sich die Reibungskurven und gehen eigene Wege. Hier beginnt die Schmierfähigkeit des Öles sich bemerkbar zu machen, die dann im Gebiet der Grenzreibung voll zur Wirkung kommt. Die Zähigkeit ist im Zustand der Grenzreibung ohne Einfluss. Im Gebiet der Mischreibung oder Teilschrnerung, also in der Gegend des Ausklinkpunktes, bestehen Vollschrnerung und Grenz-schrnerung nebeneinander. Beim Zustand der Grenzschrnerung haben sich Welle und Lager soweit genähert, dass die Metallflächen nur mehr durch wenige Ölmoleküllschichten voneinander getrennt sind. Die Schmierwirkung wird also um so besser sein, je fester diese vom Metall absorbierten Schichten an der Oberfläche haften und so einen Schutz derselben bilden.

In der Praxis wird man immer bestrebt sein, bei möglichst geringen Reibungszahlen im Gebiet der Vollschrnerung zu arbeiten und dabei der Sicherheit halber von Umkehrpunkt etwas entfernt zu bleiben. Die Möglichkeit hierzu ist durchaus vorhanden. Durch günstige bauliche Ausbildung der Lagerschalen und besonders durch entsprechende Wahl der Ölviskosität hat man es in der Hand, einen möglichst günstigen Bereich aufzusuchen (Bild 2). Das Gebiet der Teil- und Grenzschrnerung kann aber nie ganz vermieden werden. Bei jedem Anfahren und jedem Abstellen werden diese Schmierzustände durchlaufen; auch

POOR  
COPY 10

8

Bericht Nr. 537 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 4

Q

alle Schwingbewegungen und alle hin- und hergehenden Bewegungen spielen sich besonders an den Totpunkten im Bereich der Grenzschmierung ab und führen zu Verschleiss. Bei solchen Vorgängen kommt es auf die Schmierfähigkeit des Öles an, daher ist es notwendig, sich mit ihrer Messung zu befassen.

8

Bei der Schmierstoffprüfung kann man grundsätzlich zwei verschiedene Wege beschreiten. Man verwendet entweder eine Maschine, die dem praktischen Fall weitgehend nahe kommt oder man baut eigene Prüfgeräte, die messtechnisch besonders günstig gestaltet sind. Im ersten Fall würde man z.B. ein Getriebeöl an Zahnrädern prüfen, ein Waffenöl an einem Maschinengewehr, ein Torpedoöl an einer Torpedomaschine, ein Schneidöl auf einer Drehbank usw. Versuche dieser Art benötigen grossen Aufwand an Material und Arbeitskraft, sind häufig sehr zeitraubend und führen nicht immer zu einwandfreien Ergebnissen, da diese oft durch unkontrollierbare Einflüsse verwischt werden. Ausserdem wird man durch solche Versuche schwerlich näheren Einblick in das Wesen der Schmierung erhalten; sie besitzen aber den grossen Vorteil, dem praktischen Fall gleich oder zum mindesten sehr nahe zu kommen.

8

Im anderen Fall der Schmierstoffprüfung verwendet man Geräte die relativ einfach sind, deren Prüfelemente in gleichbleibendem Zustand leicht beschafft werden können, die nur geringen Aufwand erfordern und leicht zu bedienen sind. Man erhält damit in verhältnismässig kurzer Zeit gut wiederholbare Messergebnisse. Nachteilig ist dabei, dass man gezwungen ist, sich vom praktischen Fall ziemlich weit zu entfernen, sodass eine kritiklose Übertragung der Ergebnisse vom Prüfgerät auf den praktischen Fall häufig etwas gewagt erscheint und zu falschen Bewertungen führen kann. Im Techn. Prüfstand kamen bisher beide Arten der Schmierstoffprüfung zur Anwendung; in den letzten Jahren wurde jedoch auf die Entwicklung von Kleinapparaturen, also von Geräten der zweiten Art, besonderer Wert gelegt, da nur auf diese Weise eine Grundlage in der Schmierstoffprüfung geschaffen werden kann.

04514

Bericht Nr. 537 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 5

Die Geräte kann man nach ihrem Verwendungszweck in drei verschiedene Gruppen unterteilen:

- 1.) in Geräte zur Messung von Reibungszahlen bei Grenzreibung,
- 2.) zur Messung des Verschleisses,
- 3.) zur Feststellung der fressverhindernden Wirkung von Schmierstoffen.

Man könnte daran denken, die Messung einer Reibungszahl bei Grenzreibung in einer Lagermaschine mit normalen Lagern, z.B. Kurbelwellenlagern, durchzuführen. Man würde Kurven erhalten nach Bild 1 und 2. Der Sprung vom Gerät zur Praxis wäre hier, wenigstens für diesen Fall, sehr klein. Diesem Vorteil stehen aber erhebliche Nachteile gegenüber. Im Gebiet der Grenzreibung tritt Verschleiss auf und im Zusammenhang damit Erscheinungen, die eine einwandfreie Messung erschweren. Man muss also entweder auf solche Messungen verzichten und nur im Gebiet der Teilschmierung arbeiten, oder man ist gezwungen, häufig Erneuerungen des Lagers vorzunehmen mit all seinen unangenehmen und messtechnisch ungünstigen Begleiterscheinungen. Wichtig ist, dass der Zähigkeitseinfluss weitgehend ausgeschaltet wird. Es kann vorkommen, dass Unterschiede in der Schmierwirkung festgestellt werden, die sich dann lediglich als Zähigkeitsunterschiede herausstellen. Wenn im Gebiet der Teilschmierung gearbeitet wird, ist diese Gefahr sehr gross. Bild 2 zeigt dies in besonders anschaulicher Weise.

Das Gebiet der Grenzreibung, in dem gemessen werden soll, ist für Kleinapparaturen besser zugänglich als für grosse Lagermaschinen. Daher benützen wir im Technischen Prüfstand besonders Geräte mit leicht zu beschaffenden Prüfelementen. Die Anordnungen, die wir verwenden, sind in Bild 3 schematisch dargestellt. In dem einen Gerät ist eine Kette auf einer Bogenlänge von  $180^\circ$  um eine langsam laufende Rolle aus Stahl geschlungen und wird an einem Ende belastet. Kette und Rolle sind in das Prüföl getaucht, das elektrisch beheizt werden kann. Die Rolle hat das Bestreben, die Kette in ihrer Drehrichtung mitzunehmen und zwar umso kräftiger, je geringer die Schlüpfrigkeit bzw. je grösser die Reibung zwischen Rolle und Kette be-

04515

Bericht Nr. 537 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 6

findlichen Schmierstoffes ist. Die auftretenden Reibungskräfte können mit Hilfe einer Waage gemessen und daraus die Reibungszahlen errechnet werden. Das zweite Gerät, die Almen-Wieland-Maschine, verwendet als Prüfelemente eine Welle mit 6,3 mm  $\phi$  und dazu zwei Lagerschalen. Das Ganze ist in Öl getaucht und wird nun stufenweise durch Auflegen von Gewichten belastet. Die sich drehende Welle versucht die beiden Lager in der Drehrichtung mitzunehmen. Diese Umfangskraft wird an einer Waage für jede Belastungsstufe gemessen und daraus die Reibungszahl errechnet. Für jeden Versuch werden neue Prüfelemente verwendet.

Die dritte Anordnung ist aus dem Bedürfnis entstanden, zur Vermeidung von grösseren Streuungen Prüfelemente zu verwenden mit möglichst einwandfreien Oberflächen und die gleichzeitig den Vorteil der einfachen Beschaffung besitzen. Es werden hier normale Kugellagerkugeln aus Stahl benützt, die in kegelförmigen Bohrungen aus verschiedenem Metall laufen. Aus der Grösse des Drehmoments, mit der die Scheibe mitgenommen wird, lässt sich die Reibungszahl bestimmen. Für jeden Versuch wird eine neue Scheibe und eine neue Kugel verwendet. Die einmal benützten Scheiben können durch Überschleifen wieder gebrauchsfähig gemacht werden.

Einige Ergebnisse mit diesen drei Geräten sollen in den folgenden Bildern gezeigt werden. Aus Bild 4 erkennt man den Verlauf der Reibungszahl für Eismaschinenöl in Abhängigkeit von der Temperatur nach Versuchen in der Kettenmaschine. Der Versuchsstoff 19 gibt Werte, die um rund 10 bis 15% niedriger liegen. Die Mischung beider Öle gibt jedoch keinen Mittelwert zwischen den beiden Kurven, sondern liegt sogar noch tiefer. Derartige Mischungseffekte sind des öfteren zu beobachten. Auch mit Ölsäure als Zusatzmittel erhält man ähnliche Effekte. Dieses Gerät scheint besonders für die Prüfung von Fettungsmitteln zur Herstellung von Schneidölen geeignet zu sein. Es wurden drei synthetische Fettungsmittel und Rüböl in einer Menge von 5% dem Eismaschinenöl zugemischt. Die Prüfung in der Kettenmaschine führte zu den im Bild dargestellten Ergebnissen. Die Praxis bewertete diese Fettungsmittel in der Reihenfolge der hier gemessenen Reibungszahlen; also Fettungsmittel C besser als B und dieses besser als A und am besten Rüböl.

-7-

Bericht 1

Demnach  
wissen B  
aus den  
auftrete  
bei den  
der bei  
ist wohl  
zuführen  
Bildung  
Bei der  
Mischung  
der Temp  
Rüböl, b  
lich, ob  
Versuchs  
auf die

neben di  
nicht di  
aus Silb  
jedoch e  
vermeid  
der Bela  
mit gro  
Die Reib  
der Kett  
noch nic  
Gerät. I  
auch dar  
ser bew  
in das C  
die besa

Dennach scheinen die Reibungszahlen, wie sie hier gemessen werden, ein gewisses Bewertungsmaßstab für Schneidöle darzustellen. Weitere Ergebnisse aus den drei Geräten zeigt Bild 5. Man erkennt hieraus besonders, dass die auftretenden Unterschiede sehr beträchtlich sein können. Bemerkenswert ist bei den Versuchen in der Kettenmaschine das Verhalten des Schwefel-Esters, der bei etwa  $55^{\circ}\text{C}$  ein Minimum ergibt. Das Fallen des linken Kurvenastes ist wohl auf eine mit der Temperatur zunehmenden chemischen Aktivität zurückzuführen; das dann folgende Ansteigen hat vielleicht seine Ursache in der Bildung einer Sulfidschicht mit der sich die Tombakette allmählich überzieht. Bei der Mischung von E 515 mit S-Ester kann man wieder einen deutlichen Mischungseffekt feststellen. Die meisten Schmierstoffe ergeben einen mit der Temperatur ansteigenden Verlauf der Reibungskurve. Eine Ausnahme macht Rüböl, bei dem die Reibungszahl mit zunehmender Temperatur fällt. Es ist fraglich, ob tatsächlich die Temperatur die Ursache ist, es scheint vielmehr die Versuchsdauer, also die Zeit, von starkem Einfluss zu sein, eine Erscheinung, auf die später noch hingewiesen werden wird.

Zum Vergleich mit den Ergebnissen aus der Kettenmaschine sind daneben die Ergebnisse der Wielandmaschine gezeigt. Es wurden für diese Versuche nicht die Originallager, sondern Lager aus Bronze (Aeterna VL 22) mit Wellen aus Silberstahl verwendet. Die Prüfung erfolgt bei Raumtemperatur, wobei jedoch ein allmählicher Anstieg der Temperatur infolge der Lagerreibung nicht vermeidbar ist. Die Kurven stellen den Verlauf der Reibungszahl bei zunehmender Belastung dar. Man erhält mit diesen 6 Ölen eine Reihenfolge, wie sie auch mit grosser Annäherung in der Kettenmaschine zwischen  $20^{\circ}$  und  $40^{\circ}$  erzielt wird. Die Reibungszahlen aus der Wielandmaschine liegen jedoch alle niedriger als die der Kettenmaschine. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Wielandmaschine noch nicht ganz soweit im Gebiet der Grenschmierung arbeitet als das andere Gerät. Die Zähigkeit spielt also noch eine gewisse Rolle. Dies zeigt sich z.B. auch darin, dass das zähflüssige Rizinusöl im Gebiet niedriger Belastung besser bewertet wird als Rüböl. Mit zunehmender Belastung kommt das Lager tiefer in das Gebiet der Grenschmierung, der Zähigkeitseinfluss tritt zurück und die bessere Schmierwirkung des Rüböls macht sich bemerkbar.

04517

Bericht Nr. 537 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 8

Die dritte Anordnung: Kugel auf Prüfscheibe ergibt ebenfalls interessante Ergebnisse. Man erhält hier die Reibungszahl abhängig von der Zeit. Während E 515, E 426 und Rizinusöl ihre Reibungszahl während der Versuchsdauer von 1 Stunde nur wenig ändern, tritt bei S-Ester bzw. Zusatz von S-Ester ein rascher Anstieg mit nachfolgendem Abfallen auf. Vielleicht spielt hier die Korrosion eine gewisse Rolle. Interessant ist auch der Verlauf der Reibungszahl für Rüböl, die von Anfang an fällt. Vermutlich macht sich hier der starke Verschleiss, der ein gutes Einlaufen zur Folge hat, bemerkbar. Die Ähnlichkeit des Kurvenverlaufes zwischen diesem Versuch und dem der Kettenmaschine ist bemerkenswert, sodass die Vermutung, es könne auch bei der Kettenmaschine ein Einfluss der Zeit vorhanden sein, nicht von der Hand zu weisen ist.

Wie man aus diesen Versuchen sieht, kann man nicht für ein Öl eine bestimmte Reibungszahl angeben. Die Werte, die in den verschiedenen Geräten gemessen werden, gleichen sich nie. Das liegt an der Verwendung verschieden gestalteter Prüfelemente, am Werkstoff, an der Temperatur, an der angewandten Gleitgeschwindigkeit usw. Man kann also bestenfalls Gütereihenfolgen angeben und darf schon froh sein, wenn darin eine gewisse Übereinstimmung erzielt wird.

Die Bedeutung der in den drei Geräten gemessenen Reibungszahlen muss richtig eingeschätzt werden. Die Tatsache der Verringerung des Widerstandes gleitender Maschinenteile infolge geringen Reibungszahlen bei Grenzreibung spielt an sich höchstens in gewissen Ausnahmefällen eine Rolle; meistens ist diese so erzielte Verringerung der Verlustleistung belanglos. Geringe Reibungszahlen bei Grenzreibung sind jedoch insofern von Bedeutung, als vermutlich zwischen Haftvermögen und Reibung im Grenzgebiet ein gewisser Zusammenhang besteht. Man darf wohl annehmen, dass ein Öl mit kleinen Reibungszahlen, wie z.B. Rizinusöl oder Rüböl in stande ist, auch unter ungünstigen Verhältnissen gleitende Metallflächen zu schützen. Mit der Reibungsmessung allein kann man die Eignung eines Schmierstoffes noch nicht in vollem Umfange beurteilen. Es müssen auch Verschleissmessungen herangezogen werden.

04518

Bericht Nr. 537 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 9

Man muss grundsätzlich zwei Verschleissarten unterscheiden. Im einen Fall haben wir es mit einem langsamen und stetigen Abtragen von Material zu tun, wobei glatte Metallflächen entstehen; im anderen Fall erfolgt der Verschleiss bei Fressen, sodass starke Riefenbildung auftritt und der betreffende Maschinenteil schnell unbrauchbar wird. Zunächst soll die erste Verschleissart besprochen werden.

Für solche Versuche wurde im Technischen Prüfstand eine Verschleissmaschine gebaut, die nach folgendem Prinzip arbeitet (Bild 6). Zwei auf einer Welle sitzende Trommeln werden durch einen Motor über ein Untersetzungsgetriebe und eine Pleuelstange in drehschwingende Bewegung versetzt. Die Trommeln sind mit polierten und gehärteten Stahlbändern bespannt, die als Reibflächen dienen. Die Verschleisstücker, die als zylindrische Stifte aus verschiedenem Material ausgebildet sind, werden von unten gegen die Stahlbänder gedrückt und über einen Hebel belastet. Reibfläche und Verschleisstück sind in das Prüföl getaucht, das über ein Ölbad durch elektrische Heizschlangen auf gleichbleibender Temperatur gehalten wird. Die Verkürzung des Stiftes infolge des Verschleisses kann am Belastungshebel mit Hilfe einer Mikrometernuhr gemessen werden. Bei einer Umdrehungszahl von 81/min ergeben sich in der Minute 162 Hübe, wobei die mittlere Gleitgeschwindigkeit 22,3 cm/sec beträgt. Ein Ergebnis aus diesen Versuchen zeigt Bild 7. Es wurden hier dieselben 6 Öle wie sie aus der Prüfung in den Reibungsapparaturen bekannt sind, untersucht. Als Verschleisstift wurden in einem Fall weiches Eisen, in anderen Fall Aeterna VL 22 verwendet. Besonders interessant ist der Verschleiss der Eisenstifte (Bild rechts). Mit Rüböl wird dabei ein Verschleiss erzielt, der mit mehr als 2 mm in 20 Stunden mit Abstand den grössten Wert erreicht. Rizinusöl ergibt ähnlich hohe Verschleisszahlen, aber erst bei Temperaturen über 65°C. Dagegen zeigt E 426 gerade umgekehrtes Verhalten mit hohem Verschleiss bei niedriger Temperatur und mit geringem Verschleiss bei hoher Temperatur. Interessant ist ferner, dass der S-Ester ganz ähnlichen Verlauf zeigt wie E 515, während die Mischung beider Produkte sich ganz anders verhält. Der eben erwähnte gleiche Verlauf der Verschleisskurven von S-Ester und E 515 ist nur ein scheinbarer. Dies gilt vor allem im Gebiet über 100°. Beim Ausbau der Maschine zeigte sich nämlich, dass bei 130°C bei S-Ester

nicht der Verschleissstift in dem Masse gekürzt worden ist, wie die Messuhr anzeigte, sondern dass das wesentlich härtere Band mit einer Stärke von 0,2 mm bis auf eine papierdünne Schicht abgenützt war. Hier handelt es sich zweifellos nicht mehr um einen rein physikalischen, sondern in der Hauptsache wohl chemischen Vorgang. Anscheinend unterliegt das gehärtete Band in stärkerem Masse der Korrosion als das weiche Eisen des Verschleissstiftes. Bei E 515 wie bei allen bisherigen zahlreichen Versuchen zeigte sich am Stahlband überhaupt kein nennenswerter Abrieb. Nur am Stift konnte ein messbarer Verschleiss festgestellt werden.

Dieselben Öle wurden nun unter genau denselben Bedingungen, jedoch mit Stiften aus Aeterna VL 22, auf ihr Verschleissverhalten geprüft. Aeterna VL 22 besteht nach einer spektroskopischen Analyse in der Hauptsache aus Kupfer (51%) und Zink (42%), es enthält in geringen Mengen Mangan (2%), Aluminium (2%), Eisen (0,7%), Zinn (0,6%), Silizium (0,5%), Blei (0,4%) und Nickel (0,3%). Die Ergebnisse daraus zeigt wiederum Bild 7 (links). Man erkennt, dass mit nebenstehenden Verschleissresultaten, die mit Eisen erzielt wurden, gar kein Zusammenhang besteht. S-Ester oder Zusätze desselben ergeben besonders bei hoher Temperatur bedeutenden Abrieb. Dies ist wohl auf die hohe chemische Affinität des Schwefels zu Kupfer zurückzuführen. Der Abrieb bei Verwendung von Rüböl ist hier mässig, ebenso von Rizinusöl wenigstens unter 120°C. Auch bei diesen Schmierstoffen führt also ein Wechsel des Werkstoffes zu ganz anderen Ergebnissen. Die Versuche zeigen also, dass bei Verschleissprüfungen der Werkstoff eine sehr bedeutende Rolle spielt und dass man Ergebnisse, die mit dem einen Werkstoff erzielt wurden, nicht auf einen anderen übertragen kann. Weiter kann man aus diesen Versuchen schliessen, dass geringe Reibungszahlen nicht gleichzeitig geringen Verschleiss zur Folge haben. Man kann häufig gerade das Gegenteil beobachten, wie z.B. im Falle des Rüböls.

In Bild 8 sind nochmals Ergebnisse dargestellt, die mit denselben Werkstoffen und unter den gleichen Bedingungen wie im vorhergehenden Bild erhalten wurden. Geprüft wurden 4 Öle, die nach ihrer Zähigkeit zu den Flug-

motoren  
Flugmot  
ebenfal  
Das Bil  
anderen  
anderen  
tritt.  
liche A  
ses mit  
wie z.B  
4 Ölen  
blässe b  
Ergebn  
die aus  
wurde e  
che von  
rauer  
sehr ho  
vorerst  
Alterun  
den Füll

des Ver  
sicht a  
Schmier

ein wei  
zeigt,  
Hartmet  
Scheibe  
in der  
bei jed



motorenölen gehören. K 7 ist ein Mineralöl, SS 902 F 25 ist ein synthetisches Flugmotorenöl mit Esterzusatz, LK 2200 ein wasserlösliches Versuchsöl, M 620 ebenfalls ein Versuchsöl, das weder im Wasser noch in Bensen löslich ist. Das Bild lässt erkennen, dass sich der Übergang von einem Werkstoff auf den anderen bei K 7 und M 620 nur sehr wenig auswirkt, im Gegensatz zu den beiden anderen Schmierstoffen, bei denen eine Umkehrung im Verschleissverhalten eintritt. Nicht nur die Anwendung verschiedener Werkstoffe bringt eine wesentliche Änderung in der Bewertung der Schmierstoffe hinsichtlich des Verschleisses mit sich, sondern es genügen schon Veränderungen der Versuchsbedingungen, wie z.B. der Rauigkeit der Gleitflächen. Es wurden Versuche mit denselben 4 Ölen durchgeführt, wobei Bänder zur Anwendung kamen, die im Sandstrahlgebläse behandelt wurden und hier eine gewisse Rauigkeit erhalten haben. Die Ergebnisse sind in Bild 9 dargestellt und zum Vergleich damit gleichzeitig die aus den Versuchen mit glatten Bändern angeführt. Bei den glatten Bändern wurde eine Versuchsdauer von 20 Stunden und bei den rauhen Bändern eine solche von 20 Minuten eingehalten. Hier fällt besonders auf, dass bei Verwendung rauher Gleitflächen K 7 einen sehr geringen und M 620 und SS 902 F 25 einen sehr hohen Abrieb ergibt. Die Ursache dieser unterschiedlichen Bewertung ist vorerst noch nicht bekannt. Sie liegt nicht, wie man annehmen könnte, in der Alterung des Öles begründet, die durch die verschiedene Versuchszeit in beiden Fällen natürlich verschieden gross ist.

Aus dieser kurzen Darstellung ist zu ersehen, dass das Problem des Verschleisses bei Schmierung noch nicht gelöst ist und dass grösste Vorsicht am Platze ist, wenn man auf Grund von Verschleissmessungen einen Schmierstoff bewerten will.

Um diese Frage noch gründlicher erforschen zu können, haben wir ein weiteres Gerät zur Vornahme von Verschleissmessungen gebaut. Wie Bild 10 zeigt, wird dabei eine feststehende Walze gegen eine umlaufende Scheibe aus Hartmetall gedrückt, die durch tropfenweise Ölzufuhr geschmiert wird. Die Scheibe hinterlässt auf der Trommel nach einer bestimmten Versuchszeit, die in der Regel 10 Minuten beträgt, einen Einschliff von bestimmter Länge, der bei jedem Öl verschieden gross ist. Drehzahl der Scheibe und Belastung der

Walze können je nach Bedarf gewählt werden. Die Einschliffe werden mit Hilfe eines Messmikroskopes ausgemessen und dann aus ihrer Länge das ausgeschliffene Volumen errechnet. In Bild 11 sind einige Ergebnisse mit diesem Gerät dargestellt. Es wurden 14 Öle bei einer Belastung von 20 kg, bei 210 U/min und einer Versuchsdauer von 10 Minuten geprüft, wobei Walzen aus verschiedenem Werkstoff zur Anwendung kamen. Die Schmierstoffe wurden nach den Ergebnissen, wie sie auf der Stahlwalze erzielt wurden, geordnet. Rüböl mit dem grössten Einschliff steht an letzter Stelle. Führt man denselben Versuch mit Gusseisen durch, so zeigen sich erhebliche Verschiebungen, Rüböl bleibt zwar noch an letzter Stelle, dagegen rückt der S-Ester auf die erste. Bei Rotguss wird der grösste Einschliff mit BH 4 erzielt, was stark im Gegensatz steht mit dem Ergebnis bei Verwendung von Stahl. Rizinusöl tritt hier ebenfalls durch grösseren Verschleiss hervor, ebenso wiederum Rüböl. LK 2200 steht mit dem kleinsten Einschliff an erster Stelle. Die grössten Unterschiede zwischen den einzelnen Ölen zeigt sich bei Leichtmetall. Hier fallen besonders LK 2200 und M 620 durch sehr starken Einschliff auf, dann folgen S-Ester und SS 902 F 25. Bei Lagermetall -Zinn-Bleilegierung- wirkt sich anscheinend besonders der S-Gehalt verschleisserhöhend aus. Die niedrigsten Werte ergeben hier M 620 und LK 2200. Dieses Bild zeigt also sehr anschaulich, wie verschieden das Verhalten der Schmierstoffe gegenüber den einzelnen Metallen sein kann. Wie weit solche Versuche nun für die Praxis ausgewertet werden können, bedarf noch der Untersuchung. Man könnte sich aber vorstellen, dass man aus der Grösse der Einschliffe auf die Verwendbarkeit als Schneidöl Schlüsse ziehen kann. Demnach wäre für Stahl und Gusseisen Rüböl ein ausgezeichnetes Schneidöl, was ja auch tatsächlich der Fall ist. Für Rotguss wäre dann BH 4, für Leichtmetall M 620 oder LK 2200 besonders geeignet.

Diese Einschliffapparatur ist auch aus anderen Gründen interessant. Anlässlich der Prüfung zahlreicher Ester vom Werk Leuna konnte beobachtet werden, dass die in der Kettenmaschine gemessene Reibungszahl mit der Grösse der Einschliffe auf der Stahltrommel in gewissen Zusammenhang steht. In Bild 11 sind 35 synthetische Ester je durch einen Punkt dargestellt, ebenso Rüböl und Knochenöl. Man erkennt, dass diese Punkte alle in einen gewissen

Bereich zu liegen können, der sich in langgestreckter, schmaler Form vom Gebiet hoher Reibungszahl aber kleinen Verschleisses herunterzieht in das Gebiet niedriger Reibungszahl und grossen Verschleisses. Eine gewisse Gesetzmässigkeit ist also zweifellos vorhanden. Man kann sich diese Erscheinung vielleicht so erklären: Gutes Haftvermögen sichert das Vorhandensein einer schützenden, reibungsverringern Öl-schicht und führt zu niedrigen Reibungszahlen. Dieses Haftvermögen des Schmierstoffes scheint dabei aber so gross zu sein, dass bei einer starken Scherbeanspruchung der Öl-schicht sich nicht das Öl vom Metall, sondern Metall von Metall löst. Dieses Abtragen von Werkstoffteilen dürfte gleichzeitig dazu beitragen, die Rauigkeit der Oberfläche zu verringern, ein rasches Einlaufen gleitender Metallflächen zu bewirken und so die Reibungszahl weiterhin auf niedrige Werte zu verbessern.

Bei den bisher geschilderten Versuchen tritt ab und zu eine Erscheinung auf, die hier nicht unerwähnt bleiben soll. In der Verschleissmaschine beobachtet man, dass bei Verwendung von Aeterna- oder Messingstiften auf glatten Stahlbändern der Werkstoff von den Stiften an die Gleitfläche wandert und dort einen ausserordentlich festhaftenden Überzug bildet. Es gleiten dann zwei gleiche Metalle aufeinander, was sehr hohen Verschleiss des Stiftes zur Folge hat. Auch an der Wielandmaschine beobachtet man einen ähnlichen Effekt. Hier übersieht sich besonders bei Verwendung von wasserlöslichen Produkten die Welle mit einer dünnen Bronzeschicht, wobei sehr hohe Reibungszahlen gemessen werden. Die Ursache dieser Erscheinung beruht wahrscheinlich auf einem elektrolytischen Vorgang. Beobachtungen dieser Art wurden übrigens nicht nur an Versuchegeräten, sondern auch in der Praxis gemacht, z.B. an Lagerzapfen eines Kardangelenkes bei Kraftwagen.

So viel soll gesagt sein über die Verschleissprüfung bei langsamen Metallabtrag. Wie bereits erwähnt, ist noch gefährlicher der Verschleiss bei Fressen. Fressen tritt ja vor allem da auf, wo gleicher Werkstoff oder Werkstoff etwa gleicher Härte aufeinander laufen, wie etwa bei Zahnrädern. Prüfungen solcher Art wird man also in erster Linie bei Getriebeölen, also bei Hochdruckschmierölen, vornehmen.

04523

Bericht Nr. 557 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 14

Der Technische Prüfstand verwendet für diese Untersuchungen die Wielandmaschine, die bereits oben genannt wurde. Jedoch werden hierzu nicht Bronzelager, sondern Lager aus sehr weichem Einsatzstahl und Wellen aus ungehärtetem Werkzeugstahl (Originallager) verwendet. Der Versuch wird genau so durchgeführt wie bei der Messung der Reibungszahl. Es werden solange stufenweise Belastungsgewichte aufgebracht, bis Fressen eintritt, was sich durch plötzlichen starken Ausschlag der Reibungsanzeige und häufig durch Abreißen der Welle äußert. Man erhält so die Belastung, bei der das Schmiermittel infolge Fressens des Lagers versagt. Dieser so erhaltene Wert ist allerdings nicht besonders gut wiederholbar, da hier kleine Unebenheiten in der Oberfläche das Fressen stark begünstigen bzw. verzögern können.

Ein weiteres Gerät, das für solche Prüfzwecke verwendet wird, ist die Vierkugelmaschine. Der Technische Prüfstand besitzt hiervon eine nach eigener Konstruktion und eine von der Rhenania-Ossag gebaut. Die Maschine des Technischen Prüfstandes ist in Bild 13 dargestellt. Die vier Kugeln besitzen einen Durchmesser von  $1/2''$  und sind so angeordnet, dass die Mittelpunkte einen Tetraeder bilden. Die unteren 3 Kugeln sind in einen Kugelhalter eingespannt, der becherförmig ausgebildet ist und zur Aufnahme des Öles dient. Die obere Kugel ist am unteren Ende der senkrechten Welle befestigt, die durch einen Elektromotor über einen Riemenantrieb in Drehung versetzt wird. Um das Öl bei verschiedenen Temperaturen prüfen zu können, ist der Kugelhalter mit einer elektrischen Heizwicklung versehen. Die Messung dieser Temperatur geschieht mit einem Thermoelement, das zwischen den drei Kugeln von unten in das Öl hineinragt. Zur Messung des auf die drei unteren Kugeln übertragenen Drehmoments ist der Kugelhalter gegen einen Indikator abgestützt, der die in jedem Augenblick übertragene Kraft aufschreibt. Das Bild 14 zeigt das Gerät in Ansicht.

Die Versuchsdurchführung kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Man arbeitet entweder mit gleichbleibender Belastung, wobei die Zeit bis zum Fressen gemessen wird oder mit einem von 0 ansteigenden Gewicht und stellt fest, bei welcher Belastung Fressen eintritt. Die am häufigsten angewandte Methode ist die der ersten Art. Man bringt dabei von vorneherein eine bestimmte, während des Versuches gleichbleibende Belastung auf, schaltet dann den Motor ein und stoppt die Zeit, die verfließt, bis Fressen eintritt,

was durch einen plötzlichen, starken Ausschlag am Indikator angezeigt wird. Der so erhaltene Fressverzug kann auf diese Weise bei verschiedener Belastung oder auch bei verschiedenen Temperaturen ermittelt werden. Ergebnisse nach dieser Versuchsmethode zeigt Bild 15. Es wurden verschiedene Zusätze zu einem synthetischen Schmierstoff (TP 57) geprüft und zwar Thioisobutenol (Schwefelprodukt T), Tetrachlorkohlenstoff und Ölsäure. Die Wirkung der beiden ersten Stoffe ist sehr beträchtlich, der Fressverzug steigt zum Teil auf das vier- bis fünffache des reinen Öles. Dagegen ist die Wirkung der Ölsäure gering. Leider besteht zwischen der Vierkugelmachine und der Almen-Wielandmaschine keine Übereinstimmung der Ergebnisse. Diese Tatsache beweist besonders Bild 16. Auf der Almen-Wielandmaschine ergab Ölsäure kein Fressen der Lager, während mit M 469, einer org. Chlorverbindung, bei  $1710 \text{ kg/cm}^2$  die Fressbelastung erreicht war und der Versuch aus diesem Grunde abgebrochen werden musste. Ganz anders verhalten sich diese Stoffe in der Vierkugelmachine. Die Zeit bis zum Beginn des Fressens liegen bei Ölsäure je nach Belastung zwischen 0,8 und 2,5 Sekunden, für M 469 etwa bei der 10-fachen Zeit. Es muss allerdings erwähnt werden, dass bei M 469 das Fressen wesentlich schärfer und unter Hinterlassung einer grossen und stark zerrissenen Verschleissfläche an den Berührungspunkten der Kugeln erfolgt. Interessant sind auch die Ergebnisse nach Bild 17. Ein Zusatz von 0,5% Benzoesäure zu Gargoyle-Motorenöl erhöht die Belastung, bei der Fressen eintritt, nach Versuchen in der Almen-Wielandmaschine um etwa das  $2\frac{1}{2}$ -fache. Derselbe Zusatz ist aber in der Vierkugelmachine vollkommen wirkungslos. Diese unterschiedlichen Ergebnisse sind auf die verschiedenen Versuchsbedingungen zurückzuführen. Die Vierkugelmachine arbeitet bei Drücken und mit Geschwindigkeiten, die rund 10- bis 20 mal höher liegen als bei der Almen-Wielandmaschine. Eine grosse Rolle spielt zweifellos auch das Material; im einen Fall dienen als Prüfelemente ausserordentlich harte Stahlkugeln, im anderen Fall Wellen und Lager aus ungehärtetem Stahl.

Man kann die Vierkugelmachine in derselben Anordnung auch als Verschleissmaschine verwenden. Ein solches Prüfverfahren benützt die Rhenania-Ossag für die Untersuchung von Getriebeölen. Die Maschine der Rhenania-Ossag ist der des Technischen Prüfstandes in Aufbau und Anordnung weitgehend ähnlich, wenn auch in der Ausführung einiger Teile gewisse Unterschiede bestehen. Nach

dem Verfahren der Rhenania-Ossag lässt man bei einer bestimmten Belastung die Maschine 1 Minute laufen und ermittelt hierauf den Durchmesser der Verschleissfläche, die an jeder der drei unteren Kugeln entsteht. Dieser Versuch wird bei verschiedenen Belastungen durchgeführt, sodass man so für jedes Öl entsprechende Verschleiss-Belastungskurven erhält. Diese Versuche können nicht bis beliebig hohe Drücke fortgesetzt werden, da von einer bestimmten Belastung an an den Berührungsstellen der Kugeln so hohe Temperaturen entstehen, dass ein gegenseitiges Verschweissen der Kugeln eintritt. In Bild 18 sind die Ergebnisse von 6 Ihnen bereits bekannten Ölen dargestellt. Wie man sieht, zeichnen sich vor allem S-Ester in reinem und in Mischung mit anderem Schmierstoff aus. Man erzielt damit nicht nur kleine Verschleissdurchmesser, sondern erhält diesen Verschweisspunkt erst bei sehr hohen Belastungen. Interessant ist, dass sich Schmierstoffe wie Rüböl und Rizinusöl nach dieser Prüfmethode in keiner Weise hervorheben.

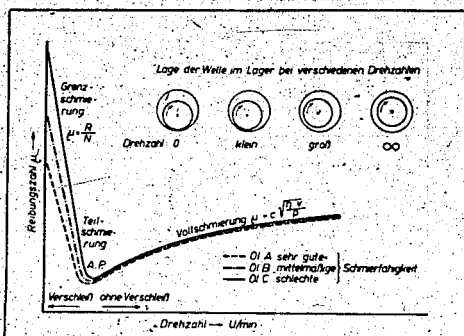
Das Heereswaffenamt hat dieses Prüfverfahren in die Lieferbedingungen für Getriebeöle aufgenommen. Es wird darin verlangt, dass dieses Verschweissen bei einem Lauf von 1 Minute Dauer erst über 200 kg Belastung erfolgen darf. Von den im Bild angeführten Ölen würde also nur S-Ester und E 515 + 10% S-Ester dieser Forderung genügen. Die Beanspruchung des Öles nach dieser Methode ist ausserordentlich hoch und es erscheint zweifelhaft, ob eine Prüfung auf diese Art mit dem praktischen Fall in Beziehung zu bringen ist. Es besteht auch kein Zusammenhang zwischen dem Fressverzug, wie er an der Maschine des Technischen Prüfstandes gemessen wird und den Ergebnissen nach der Methode der Rhenania-Ossag. Dies geht aus Bild 19 hervor. Ein Flugmotorenöl SS 970 R zeigte nach beiden Methoden wie erwartet kein Hochdruckverhalten. Ein Zusatz (EHS) in der Menge von 2% verlängerte den Fressverzug zum Teil um mehr als das Doppelte. Dagegen zeigte die Messung der Verschleissdurchmesser keine merkliche Wirkung des Zusatzes. Der Schweisspunkt konnte von 150 auf 200 kg erhöht werden. Zum Vergleich damit sind die Ergebnisse mit einem Wintergetriebeöl der Wehrmacht angeführt. Nach der einen Methode kommen die Ergebnisse dem zusatzfreien SS 970 R nahe, nach der Methode der Rhenania-Ossag liegt dieses Öl am besten. Frühzeitiges Fressen bedingt also nicht in allen Fällen gleichzeitig hohen Verschleiss. Es kommt also nicht nur darauf an, dass nach einer bestimmten Zeit Fressen erfolgt, sondern wie dieses Fressen vor sich geht und welche Spuren es hinterlässt.

Technisc  
verhalte  
scheiden  
Die Prüf  
führen,  
keit bes  
mehrere  
zahlreic  
über das  
kann nur  
fahrunge

04526

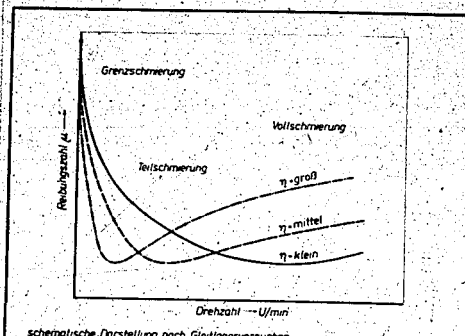
Bericht Nr. 537 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 17

Damit habe ich Ihnen einen kurzen Überblick gegeben über die im Technischen Prüfstand z.Zt. verwendeten Geräte zur Untersuchung des Schmierverhaltens von Ölen. Die Beanspruchung der Schmierstoffe sind dabei sehr verschieden und dementsprechend auch die sich zeigenden Effekte und Ergebnisse. Die Prüfung eines Öles nur in einem Gerät kann wohl zu einer Beurteilung führen, die aber nur in einem eng begrenzten Gebiet der Beanspruchung Gültigkeit besitzt. Erweitert man die Untersuchung, so wie es hier geschieht, auf mehrere Geräte, so erhält man von dem Gesamtbild ein Mosaik, in dem aber noch zahlreiche Steine fehlen; mit anderen Worten, es ist heute noch nicht möglich, über das Schmierverhalten eines Stoffes erschöpfende Auskunft zu geben. Man kann nur Teilgebiete erfassen und versuchen, diese gegenseitig und mit den Erfahrungen der Praxis in Zusammenhang zu bringen.



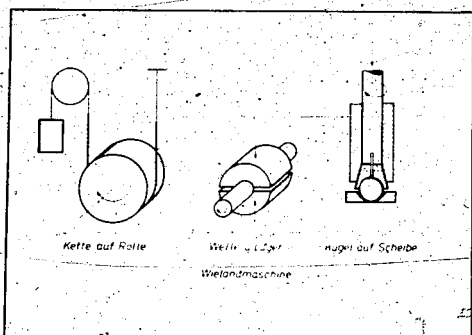
**IG** Schmierzustände im Gleitlager bei 3 Ölen gleicher Viskosität  
Lehrstuhl für Tribologie a. Nr. 1942  
Techn. Prüfstand Oppau 1180

Bild 1



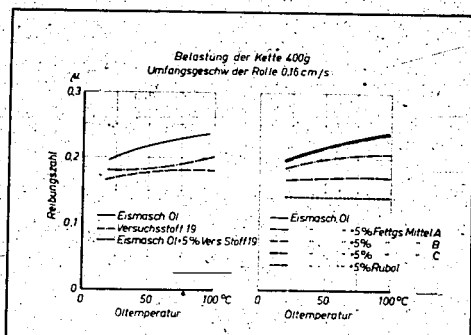
**IG** Reibungszahlen für Öle gleicher Schmierfähigkeit aber verschiedener Zähigkeit  
Lehrstuhl für Tribologie a. Nr. 1942  
Techn. Prüfstand Oppau 1195

Bild 2



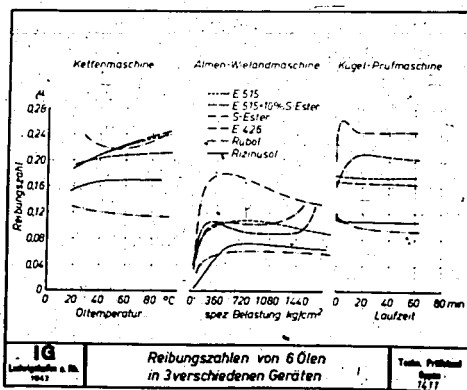
**IG** Anordnungen für Reibungsmessungen  
Lehrstuhl für Tribologie a. Nr. 1942  
Techn. Prüfstand Oppau 1205

Bild 3



**IG** Reibungsversuche in der Kettenmaschine  
Lehrstuhl für Tribologie a. Nr. 1942  
Techn. Prüfstand Oppau 1207

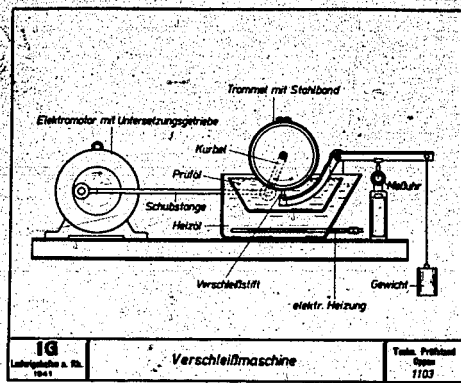
Bild 4



**IG** Reibungszahlen von 6 Ölen in 3 verschiedenen Geräten  
Lehrstuhl für Tribologie a. Nr. 1942  
Techn. Prüfstand Oppau 1217

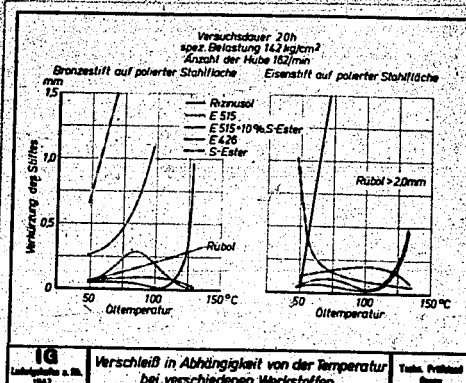
Bild 5





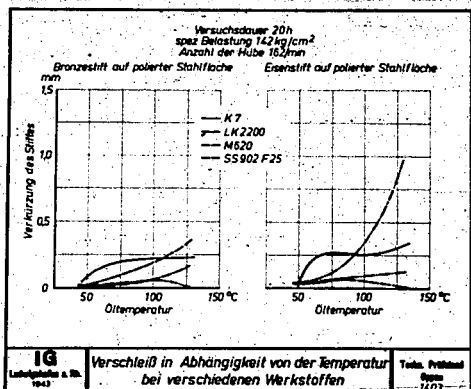
IG  
Ludwigshafen a. Rh.  
1943  
Verschleißmaschine  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1103

Bild 6



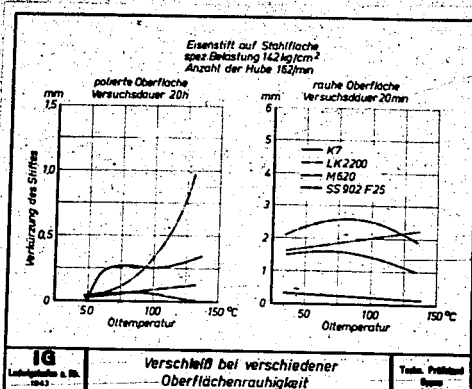
IG  
Ludwigshafen a. Rh.  
1943  
Verschleiß in Abhängigkeit von der Temperatur  
bei verschiedenen Werkstoffen  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1102

Bild 7



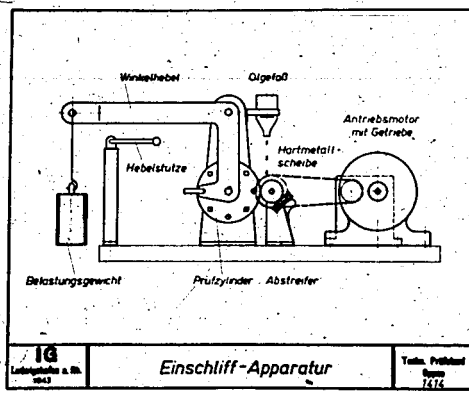
IG  
Ludwigshafen a. Rh.  
1943  
Verschleiß in Abhängigkeit von der Temperatur  
bei verschiedenen Werkstoffen  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1101

Bild 8



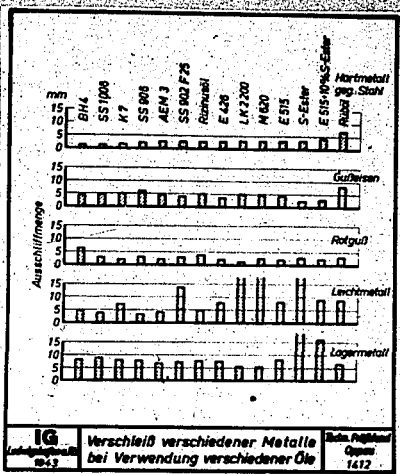
IG  
Ludwigshafen a. Rh.  
1943  
Verschleiß bei verschiedener  
Oberflächenrauigkeit  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1104

Bild 9



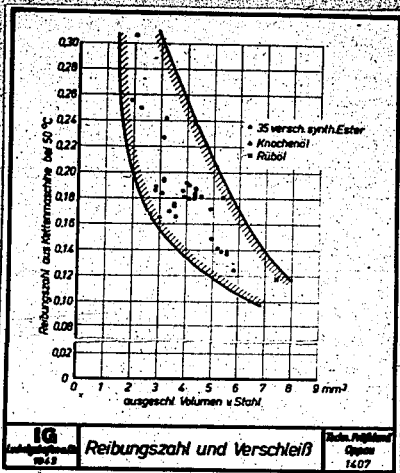
IG  
Ludwigshafen a. Rh.  
1943  
Einschliff-Apparatur  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1416

Bild 10



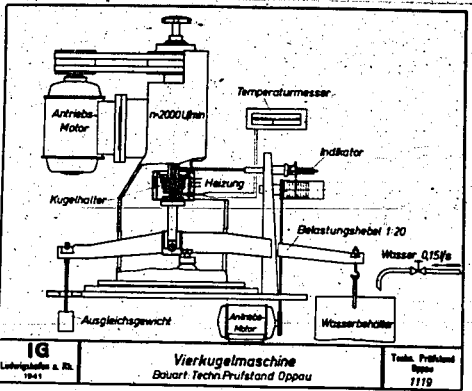
IG Verschleiß verschiedener Metalle bei Verwendung verschiedener Öle  
Lehrbuch Nr. 1412

Bild 11



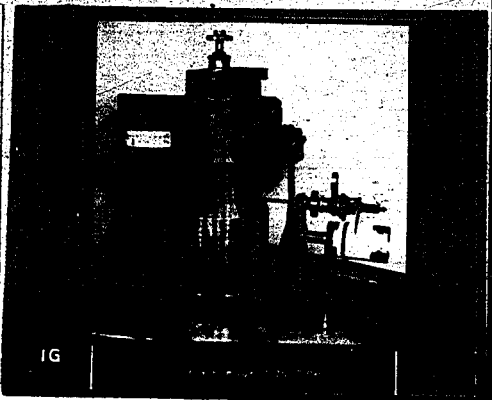
IG Reibungszahl und Verschleiß  
Lehrbuch Nr. 1417

Bild 12



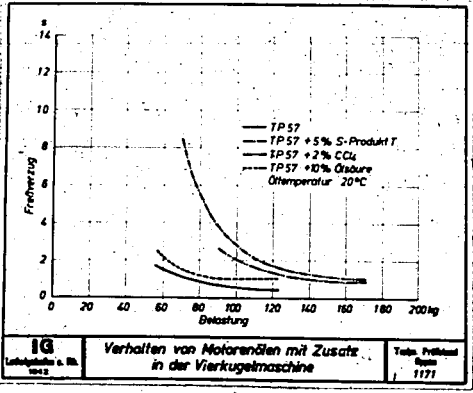
IG Vierkugelmachine Bauart Techn. Prüfstand Oppau  
Lehrbuch Nr. 1419

Bild 13



IG

Bild 14



IG Verhalten von Motorenölen mit Zusatz in der Vierkugelmachine  
Lehrbuch Nr. 1171

Bild 15

POOR COPY 10

POOR COPY

Techn. Prüfstand  
Ossag

04530

Blatt 2

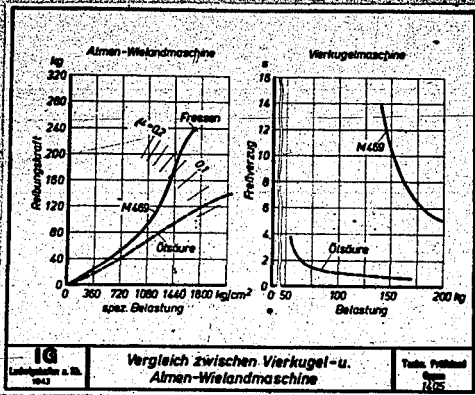


Bild 16

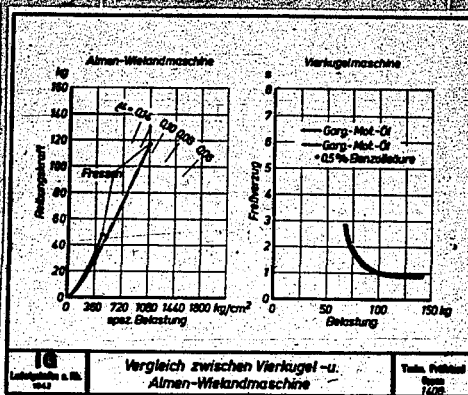


Bild 17

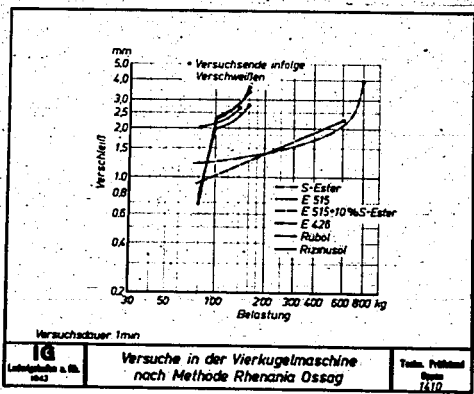


Bild 18

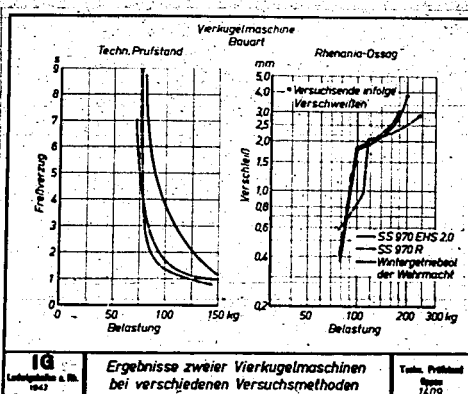


Bild 19

I. G. Farbenindustrie AG  
Ludwigshafen a. Rh.

Zeitschrift Nr. 576 vom 9.3.53

TRIS 2881

POOR  
COPY 10

**Forschungsinstitut  
für Flug- und Kraftwagenmotoren**

04531

der Technischen Hochschule München  
**Professor Dr. Ing. K. Schnauffer**

Auftraggeber: BMW - Flugmotorenbau G.m.b.H. München,  
Abtlg.: Vorentwicklung

Auftragszeichen: BMW - Bestellung Nr. 290 759 In 11

Vorbericht

Einfluss der umlaufenden Schmierölmenge  
auf das Klopfverhalten des Motors.

Der Bericht umfaßt: <sup>5</sup> 7 Seiten und <sup>3</sup> 6 Abbildungen

Bearbeiter:

*Burkart*

(Burkart)



Institutsleiter:

i.V. *K. Morghen*

(Dr.-Ing. K. Morghen)

München, den 20. August 1942.

Verteiler:

EMF 834

EZV (2 x )

I.G. Hochdruck-  
Versuch

I.G. Techn.  
Prüfstand

FFKM

Geheim-Nr. 125

7 te Ausfertigung von 7 Ausfertigungen

Aufgabe:

Es soll der Einfluss der im Kurbelgehäuse des BMW - 801 E.Z.M. umlaufenden Schmieröl- bzw. der davon abhängigen Spritzölmenge auf das Klopfverhalten des Motors untersucht werden.

Ergebnis:

Am BMW - 801 - E.Z.M. wurden die Klopfgrenzen von 5 verschiedenen Versuchskraftstoffen (47/42 bis 51/42) ermittelt. Der Gesamt-Schmierölauf betrug dabei 850 l/h, im Kurbelgehäuse schätzungsweise 250 l/h. Nach Abänderung der Schmierstoffführung im Motor (siehe PFKM - Bericht Nr. 117) und der damit verbundenen Verringerung des Schmierölaufes auf 420 l/h, also etwa 50 %, wurden die gleichen Kraftstoffe unter den gleichen Versuchsbedingungen nochmals gefahren. Die umlaufende Ölmenge im Kurbelgehäuse betrug dabei etwa 60 l/h. Ein Vergleich der Ergebnisse (Abb. 1) zeigt, daß beim zweiten Versuch eine Erhöhung der Klopfgrenzlage um durchschnittlich 0,4 ata eingetreten war. Die Anordnung der abgeänderten Schmierstoffführung ließ eine Nachahmung des früheren Zustandes (mit 850 l/h Ölumlaufl) nicht mehr zu. Es wurde deshalb versucht, die im Kurbelgehäuse umlaufende Schmierölmenge durch Verstellen des Öldruckes vor Motor zu erhöhen bzw. zu verringern, um die eingetretene Erscheinung genauer untersuchen zu können. Die unter diesen Bedingungen ermittelten Klopfkurven mit C3 - Kraftstoff und einer Ladelufttemperatur von 160° C streuen stark, (Abb. 2) wobei die Kurve mit 90 l/h Ölumlaufl eine Höchstlage aufweist. Da die Klopfneigung sich gleichzeitig in der Reihenfolge der Versuche erhöhte, kann ein Einfluss der Laufzeit gleichfalls in Erscheinung getreten sein. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden deshalb die Untersuchungen mit einem anderen Zylinder

04533

- 2 -

und Kolben wiederholt. Die Ergebnisse (Abb. 3) zeigen auch hier eine Bestätigung der Klopfgrenze bei einem Schmierölumlauf von etwa 90 l/h. Um irgendwelche Einflüsse der Laufzeit (Alterungserscheinungen) deutlich zu machen, wurden die Versuche nunmehr in der aufgesetzten Reihenfolge gefahren. Die Vergleichskurven haben normale Lage, besonders Veränderungen des Zylinders und Kolbens waren demnach nicht eingetreten. Lediglich die Spannung des ersten und zweiten Kolbenringes hatte nachgelassen.

Die Ergebnisse von zwei weiteren Versuchsserien mit Ladelufttemperaturen von 80° und 100° C sind aus den Abb. 4 und 5 ersichtlich. Eine Streuung bzw. Veränderung der Lage ist hier nicht festzustellen. Schließlich wurden die Versuche mit C3 - Kraftstoff und 160° Ladelufttemperatur nochmals gefahren. (Abb. 6) Die dabei eingetretene Streuung ist offensichtlich, jedoch geringfügiger. Die in Kv. Nr. 988 aufgezeichneten Streupunkte deuten auf plötzlich eingetretene starke Erhöhung der Klopfneigung hin.

#### Folgerung:

Die Veränderung der Spritzölmenge im Kurbelgehäuse, abhängig von der jeweiligen Schmieröl-Umlaufmenge, erbrachte bei Klopfrenz-Untersuchungen mit Ladelufttemperaturen von  $t_L = 160^\circ \text{C}$  starke Streuungen in der Lage der Klopfkurven. Bei gleichen Untersuchungen mit Ladelufttemperaturen von  $t_L = 80$  und  $100^\circ \text{C}$  konnten Abweichungen der Kurven untereinander nicht festgestellt werden. Bei Versuchsserie II wurde die Spritzölmenge schätzungsweise um 70 bis 75 % der Versuchsserie I verringert, bei den Ver-

POOR  
COPY

11

P  
C

versuchsreihen III bis VII konnte die umlaufende Ölmenge im Kurbelgehäuse durch Verstellen des Ölbrückes vor Motor nur etwa in den Grenzen von 105 bis 70 l/h verändert werden, d. i. etwa 30 %. In zwei Fällen wurde durch gleichzeitiges Erhöhen der Öltemperatur eine Umlaufmenge von etwa 135 l/h erreicht. Auf Grund der vorliegenden Ergebnisse kann eine einwandfreie Beurteilung eines grössermässigen Einflusses der umlaufenden Schmierölmenge auf das Klopfverhalten des Motors vorläufig nicht abgegeben werden. Die Tatsache jedoch, dass allein eine Veränderung der Umlaufmenge um etwa 35 l/h, bei Ladelufttemperaturen von 160° C, starke Streuungen in der Klopfgrenzlage ergaben, die ausserhalb von möglichen Messfehlern liegen, berechtigt zu der Annahme eines solchen Einflusses.

Inwieweit derselbe direkter oder indirekter Natur ist, müssen weitere Untersuchungen ergeben. Verschiedene bisher durchgeführte Ölverbranchmessungen über mehrere Laufstunden hinweg ergaben Werte, die zwischen 5 und 10 g/Psh schwankten. Von der Tatsache ausgehend, dass der grösste Teil dieser Menge in den Verbrennungsraum eintritt, kann, je nach der Intensität der Vermischung dieses Öles mit dem Kraftstoff - Luftgemisch in Form von Öldampf, eine Minderung der Klopfestigkeit hervorgerufen werden. (Siehe auch BMW - Kraftstoffbericht Nr. 27: Abnahme der Klopfestigkeit von Otto - Flugkraftstoffen bei Schmierölzusatz.) Dem Ergebnis der Versuchsreihen III und IV zufolge, wonach bei einer Umlaufmenge von 90 l/h im Kurbelgehäuse eine Bestlage der Klopfgränze erreicht wurde, lässt die im folgenden angeführten Vermutungen naheliegend erscheinen:

- 1.) Die im Verbrennungsraum vorherrschende Temperatur bringt das eingedrungene Schmieröl oder einen Teil desselben während des Ausströmens aus Verdampfen und senkt durch Vermischen mit dem Kraftstoff-Luftgemisch die Klopfestigkeit desselben. Der Grad dieser Umestzung ist bei hohen Ladelufttemperaturen ( $160^{\circ}$ ) und niedrigen anlässigen Ladendrüken offensichtlich höher als bei niedrigen Ladelufttemperaturen (z.B.  $80^{\circ}$ ) und höheren Ladendrüken.
- 2.) Die Menge des in den Verbrennungsraum eingedrungenen Öles ist ihrerseits abhängig:
  - 1.) vom Kolbenspiel
  - 2.) vom Spannungszustand der Kolbenringe
  - 3.) von der Lage der Kolbenringstösse
  - 4.) von der Menge des Spritzöles im Kurbelgehäuse.

Für die Versuchsdauer ist das Kolbenspiel als unveränderlich anzunehmen, während sich die Spannung der Kolbenringe über die Zeit einer Versuchsserie (4 bis 5 Versuchsstunden) merkbar ändern kann. Eine ungünstige Lage der Kolbenringstösse ermöglicht einen zeitweise verstärkten Öleintritt in den Verbrennungsraum, der wiederum von der Menge des anfallenden Spritzöles abhängig ist.

- 3.) Die bei den Versuchsserien III und IV aufgetretene Erhöhung der Klopfneigung bei einer Ölumlaufrmenge kleiner als  $90 \text{ l/h}$ , ist vermutlich auf eine verringerte Kolbenkühlung zurückzuführen. Da der Temperaturzustand des Kolbens in erster Linie von den jeweiligen Versuchsbedingungen abhängt, kann die für eine normale Kolbenkühlung erforderliche Spritzölmenge nur als Mittelwert eines in weiteren Grenzen gehaltenen Belastungs- bzw. Temperaturbe-



reiches bestimmt werden.

- 4.) Diese Umstände erfordern, nach Bestätigung obiger Versuchsergebnisse, die Ermittlung einer Schmieröl-Umlaufmenge, die einerseits eine ausreichende Kolbenkühlung ermöglicht, andererseits die Spritzölmenge in den Grenzen hält, die einen verstärkten Öleintritt in den Verbrennungsraum unterbinden.

Unter Zugrundelegung der bisherigen Untersuchungen sollen zur Klärung der aufgetretenen Erscheinungen weitere Versuche etwa in folgender Richtung durchgeführt werden:

- 1.) Durch zusätzliche Einspritzvorrichtungen soll das umlaufende Schmieröl bzw. das Spritzöl in beliebiger Menge geregelt werden können, um u.a. auch den seinerzeitigen hohen Ölumlaufl des Motors Nr. 8 wieder zu erreichen. Dabei soll der Kolben durch direkten Ölstrahl verschieden stark gekühlt werden können, um die Einwirkung der Kolbentemperatur auf die Klopfestigkeit zu ermitteln. Vermutlich wird hierdurch auch das Betriebsverhalten der Kolbenringe wesentlich beeinflusst werden.
- 2.) Anhand genauer Schmieröl - Verbrauchsmessungen soll nachgewiesen werden, in welchem Masse die Klopfelgenschaft des Motors mit dem Ölverbrauch direkt in Beziehung gebracht werden kann.
- 3.) Durch Verwendung festgestellter Kolbenringe soll die Möglichkeit einer ungünstigen Ringtosslage und damit ein abnormal starker Öleintritt in den Verbrennungsraum unterbunden werden.

Ausführung:

Die Klopfkurven wurden nach dem Abhörfahren ermittelt. Als normale Klopfstücke wurden 5 - 10 Klopfstücke angenommen. Die Zylinder und Kolben waren bei Beginn der Messungen bereits mehrere Stunden gefahren worden; zu jeder Versuchsserie wurden neue Kolbenringe verwendet. Die unlaufende Schmierölmenge wurde durch Verstellen des Öldruckes vor Motor verändert, und druckseitig mittels Ovalradzähler bestimmt. Die Öltemperaturen vor Motor betragen durchschnittlich 75 - 80° C. Nach Beendigung der Versuchsserien waren in den meisten Fällen die ersten beiden Kolbenringe ohne Spannung und das Auslassventil leicht undicht. Zur Schornung der Kolben wurde nur der untere Teil der Klopfkurven gefahren. Nach Durchführung der Versuchsserie I wurde das Motergehäuse Nr. 8 gegen Nr. 9 ausgetauscht. Die Messeinrichtungen blieben für die Dauer der Untersuchungen unverändert.

POOR  
COPY

11

P  
C

04538

- 7 -

Kennwerte des Versuchsmotors:

Prüfmotor	BMW-801-N.1. Grangabstand
Zylinder Nr.	150, 226, 227.
Kolben Nr.	154, 259, 262.
Einspritzdüse	Bosch DC 22 A 60 H 13
Zündkerze	Bosch IM 240 ET 6

Versuchsbedingungen:

Verdichtungsgrad	$\varepsilon$ = 6,5 bzw. 7,25
Zünderstellung	= 30 bzw. 25 Gr. KV v.o.
Luftüberschusszahl	$\lambda$ = veränderlich
Ladelufttemperatur	$t_1$ = 80, 100 und 160° C
Drehzahl	$n$ = 2200 U/min
Kühlluftstau	$P_{ku}$ = 200 mm W.S.
Ladedruck	$p_2$ = veränderlich bis zur Klopfgrenze

Kraftstoff:

Bezeichnung	Flugkraftstoff C 3
Eing. Nr.	Vergleichskraftstoff B 4
Dichte bei 20° C	64/42 und 3/41
theor. Luftbedarf	775 und 720 kg/m <sup>3</sup>
	14,28 und 14,85 kg/kg.

Schmierstoff:

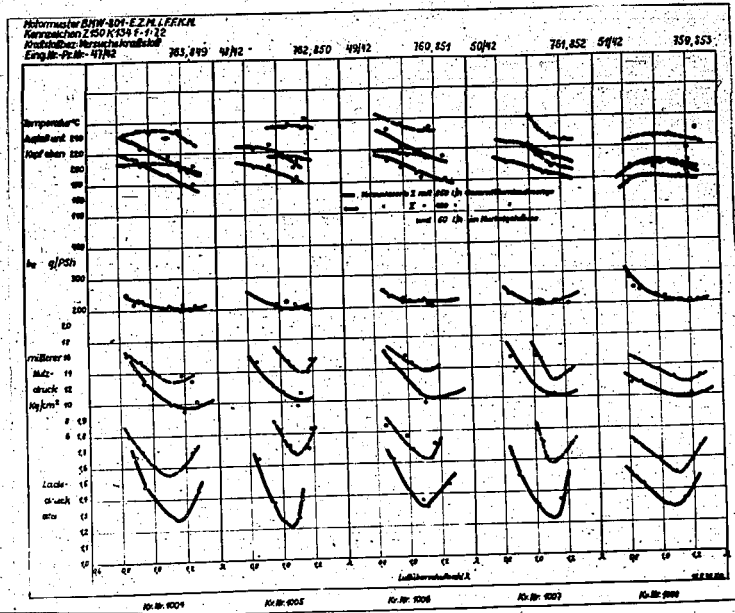
Bezeichnung	Grünring
Eing. Nr.	22/41
Dichte bei 20° C	884 kg/m <sup>3</sup>

POOR  
COPY

11

PO  
CO

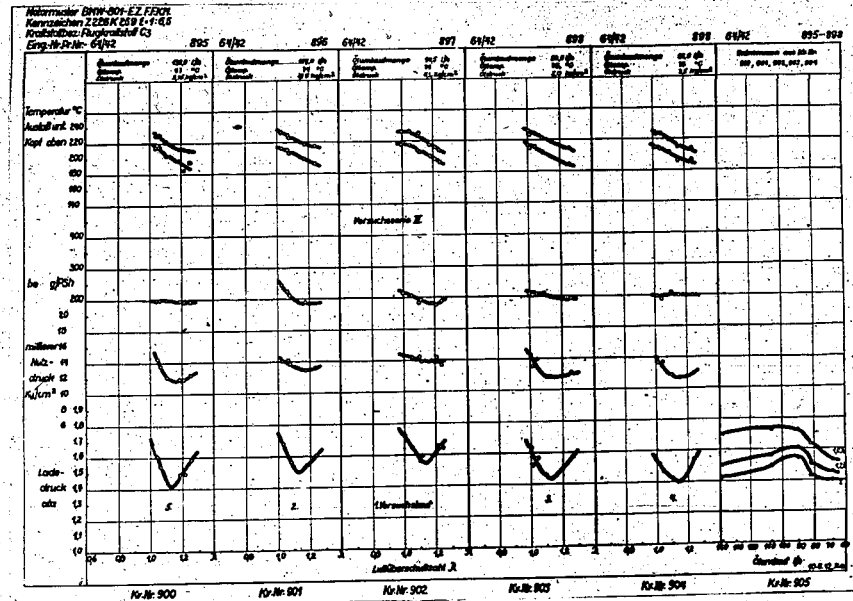
04539



**Abb. 1.** Erhöhung der Klopfgrenzen nach Verringerung der umlaufenden Gesamt-Schmierölmenge von 850 l/h auf 420 l/h. Ladelufttemp. 160°C.

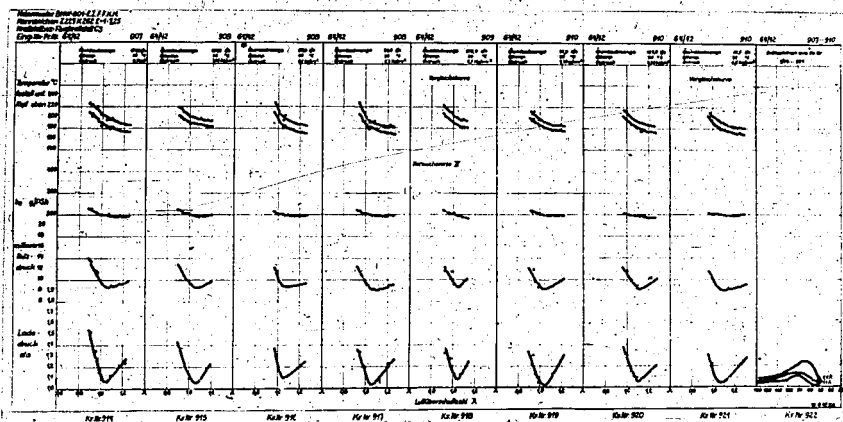
Abb.

04540



**Abb.2.** Streuung von Klopfgrenzkurven bei Veränderung der umlaufenden Schmierölmenge im Kurbelgehäuse. Ladelufttemp. 160°C.

04541



**Abb.3.** Streuung von Klopfgrenzkurven bei Veränderung der umlaufenden Schmierölmenge im Kurbelgehäuse. Ladelufttemp. 160°C.

04542

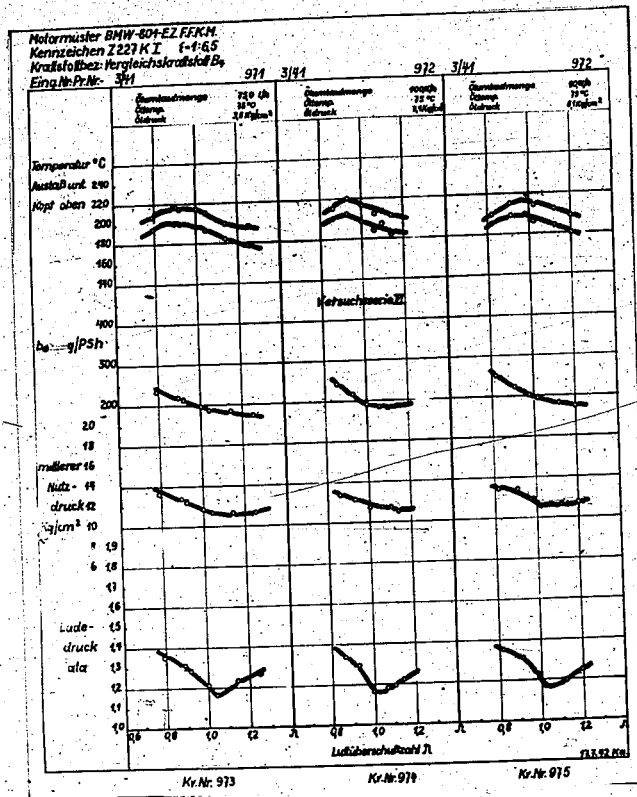


Abb.4. Klopfgrenzkurven bei Veränderung der umlaufenden  
 Schmierölmengen im Kurbelgehäuse bei einer Ladelufttemp.  
 von 100°C. (Keine merkliche Streuung.)

POOR  
COPY

11

P  
C

04543

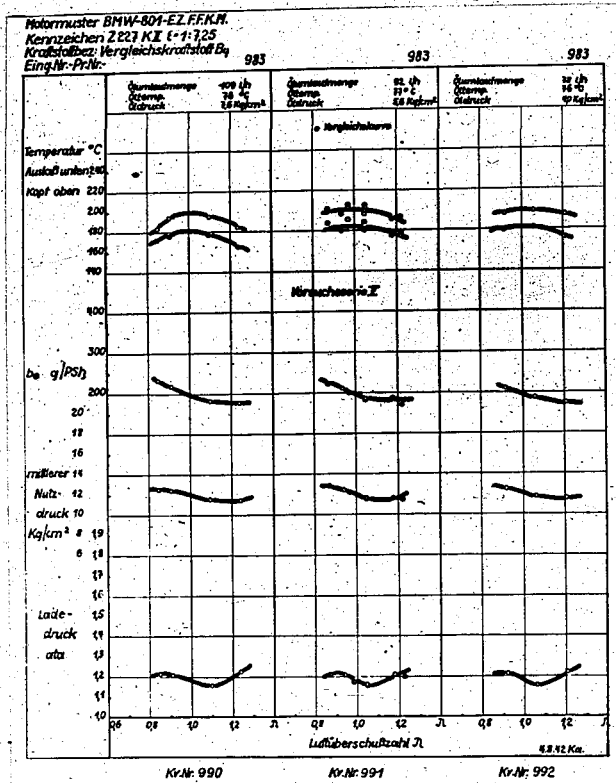


Abb.5. Klopfgrenzkurven bei Veränderung der umlaufenden Schmierölmengen im Kurbelgehäuse bei einer Ladelufttemp. von 80°C. (Keine Streuung)



04544

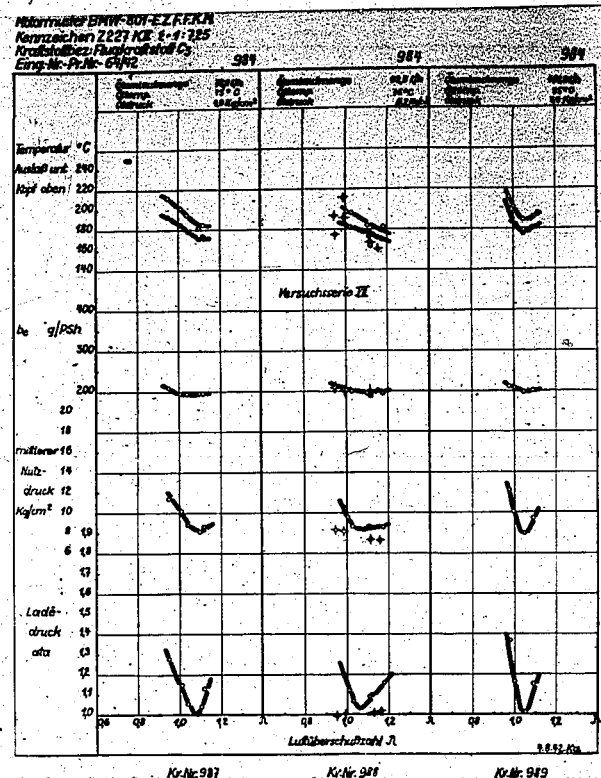


Abb. 6. Streuung von Klopfgrenzkurven bei Veränderung der umlaufenden Schmierölmenge im Kurbelgehäuse bei einer Ladelufttemp. von 160°C. (Geringe Streuung)

Auftragszettel

Der Bericht

München,

04545

**Forschungsinstitut**  
**für Flug- und Kraftwagenmotoren**  
der Technischen Hochschule München  
**Professor Dr. Ing. K. Schnauffer**

**Auftraggeber:** BMW - Flugmotorenbau A.G. Abtlg. Vorentwicklung  
**Auftragszeichen:** BMW - Bestellung Nr. 290 759 Lu 11  
SS Az. 66 p 12 LC 3 Nr. 1662 IV/41 v. 24.9.40.

Untersuchung der Verschmutzung eines Schmierstoffes  
Rotring L 45 mit Hilfe von Dauerläufen an einem  
BMW-801-E.Z.M. bei Betrieb ohne und mit Schmier-  
stoff-Schleuder.

Der Bericht umfaßt: 9 Seiten und 12 Abbildungen

Bearbeiter:

*Rückert*



Institutsleiter:

*H. G. Weber*

München, den 17. VII. 1942.

Geheim-Nr. 115

7 te Ausfertigung von 7 Ausfertigungen

POOR  
COPY 12

PO  
CO

Aufgabe:

An einem BMW-801-Einzylinder-Motor sollte durch Dauerläufe ermittelt werden, ob bei Verwendung einer Schmierstoff-Schleuder:

1. Die Gesamtverschmutzung im Schmierstoff-Kreislauf verringert werden kann.
2. Die Zeit bis zum Differenzdruckanstieg an Enscht-Siebfiltern mit 0,05 mm Maschenweite zunimmt.
3. Die Zeit bis zum Ringstecken infolge von Abscheidungen von Fremdstoffen aus dem Schmierstoffkreislauf verlängert wird.

Ergebnis:

In 2 Dauerläufen an einem BMW-801-Einzylinder-Motor wurden bei einer Leistung von  $N=120$  PS, einer Drehzahl von 2400 U/min. und einer Ladelufttemperatur  $t_{L=130^{\circ}}$  mit Flugkraftstoff C 3 und Schmierstoff Rotring L 45. Versuche ohne und mit Schmierstoff-Schleuder gefahren. Die Gesamtverschmutzung erreichte ohne Schleuder nach 31 Laufstunden rund 0,6 %. Der Anstieg des Differenzdruckes am Enscht-Siebfilter begann nach der 19. Laufstunde und erreichte nach 28 Laufstunden 2 atü. (Abb.1). Bei der Wiederholung dieses Dauerlaufes mit Schleuder unter sonst gleichen Bedingungen d.h. mit dem gleichen Zyl. und Kolben, aber neuen Ringen wurde nur eine Laufzeit bis zum Leistungsabfall von 21 Stunden gemessen (Abb.2). Die Kolbenringe waren zu dieser Zeit noch lose, hatten aber vermutlich infolge Verformung des Kolbens während des 1. Dauerlaufes stark an Spannung verloren. Die Gesamtverschmutzung betrug nach der 21. Laufstunde 0,3 %. Die in der Trommel der Schleuder abgeschiedene Menge fester Rückstände betrug 0,3 Gewichtsprozent der insgesamt benutzten Schmierstoffmenge. Bis zu dieser

Zeit konnte an Nichtfilter kein Druckunterschied gemessen werden. Im 1. Dauerlauf waren die Nichtschalen mit einer starken Schicht belegt, während im 2. Dauerlauf nur eine geringfügige Verschmutzung zu erkennen war, die Nichtschalen waren vollkommen durchsichtig (Abb. 3). Infolge des vorzeitigen Leistungsabfalles konnte nicht festgestellt werden, ob durch Betrieb der Zentrifuge und die Entfernung von irgend welchen Stoffen, (Gesamtverschmutzung, Asphalt, Asche oder dergl.), die Zeit bis zum Ringstoßen verlängert wird. 2 Wiederholungsläufe mit Zentrifuge waren aus betrieblichen Gründen (Ventilbruch bzw. Kurbelwellenbruch) erfolglos, bzw. wurden vorzeitig abgebrochen. Es wurden lediglich die entnommenen Schmierstoffproben des 4. Dauerlaufes analysiert und mit den Werten des 2. Laufes verglichen (Abb. 5). Das Gutachten über die Schmierstoffanalysen, die im chemisch-technologischen Institut und Versuchslaboratorium für Mineralöle der T.H. München, Prof. A.W. Schmidt durchgeführt wurden, ist im Anhang als Fotokopie beigelegt.

#### Folgerung:

Da das betriebliche Verhalten des Grauguss-Einzylinder-Motors bei Dauerläufen mangels ausreichender Versuchsanlagen noch nicht genügend bekannt ist, sind diese Ergebnisse nur als Vorversuche zu betrachten. Es ergeben sich damit für die Bearbeitung der vorliegenden Fragen folgende weitere Aufgaben.

1. In Dauerläufen am Einzylinder-Versuchsmotor müssten bei genau bekannten Betriebsbedingungen und vor allen Dingen genau bekannten Schmierstofflauf-Mengen im Kurbelgehäuse weitere vergleichende Dauerläufe, mit und ohne Zentrifuge gefahren werden.
2. Der Drehzahleinfluss der Schmierstoff-Schleuder bezügl. der Ermittlung einer bestmöglichen Reinigungswirkung ist zu untersuchen. Es ist zu prüfen, ob auch Stoffe entfernt werden, die in ihrem spezifischen Gewicht verhältnismäßig wenig von demjenigen des Schmierstoffes abweichen z.B. auch Asphalt.

04548

- 3 -

3. Bei diesem Demeril-Lauf kann durch Verwendung entsprechender Siebfilter die Wirkungsweise der Schmierstoff-Schleuder verfolgt werden.
4. Durch die vergleichenden Untersuchungen, mit und ohne Schmierstoff-Schleuder, soll bei einer möglichst hohen Versuchsgenauigkeit der Nachweis erbracht werden, dass die Zeit bis zum Festgehen der Kolbenringe infolge Entfernung irgendwelcher Stoffe aus dem Schmierstoffkreislauf verlängert werden kann.
5. Zur Erklärung der in vorgenannten Untersuchungen gefundenen Ergebnisse sind gleichartige Messungen an den Vollmotoren notwendig, selbstverständlich sind die Betriebsbedingungen der Zylinder-Motoren auf diejenigen der Vollmotoren abzustimmen.

#### VERSUCHSVERFAHREN.

Die Konstruktion des Motors und der Hilfsapparate, sowie die Versuchsbedingungen für beide Demeril-Läufe sind nachstehend aufgeführt. Abb. 6 gibt das Leistungsbild des 1. Demeril-Laufes wieder. Der Motor zeigte während der gesamten Laufzeit, die sich über 4 x 8 Stunden erstreckte, ein normales Verhalten. Die Gemischeinstellung wurde so gewählt, dass der Motor während einer durchschnittlichen Klopfschlagzahl von 3-4 Schlägen pro Minute auflies. Um eine Zerstörung des Siebfilters zu vermeiden, wurde der Lauf nach Erreichen eines Differenzdruckes von  $2,8 \text{ kg/cm}^2$  in der 29. Laufstunde kurzzeitig unterbrochen und der Filtereinsetz ausgewechselt. Der Schmierstoffdruck vor Motor war dabei schliesslich bis auf  $3 \text{ kg/cm}^2$  gesunken (Abb. 1). Bei Festgehen der Kolbenringe nach 31,5 Stunden wurde der 1. Lauf beendet, um eine Beschädigung des Kolbens zu verhindern. Abb. 7 zeigt das Kolbenbodenbild nach dem Ausbau. Ring 1 war ohne Spannung, Ring 2 in der Ringnute festgeklemmt. Die Siebeinsätze wiesen eine dichte zusammenhängende 1 bis 1,5 mm starke Schmutzschicht mit folgenden Zusammensetzungswerten auf: Gesamtverschmutzung 34,50 %, Asphalt 1,89 %, Asche 9,68 % (hauptsächlich  $\text{PbO}_2$ ). Die Veränderung des Schmierstoffes gibt Tafel 2 wieder. Das Absinken des Flammpunktes von 220 auf

POOR  
COPY 12

04549

153<sup>o</sup> deutet auf einen Kraftstoffdurchschlag hin. Auf dem Kolbenboden (Abb. 7) war ein starkes Spritzbild zu erkennen.

Beim 2. Dauerlauf, der sich über 3 x 7 Stunden erstreckte, wurde die Schmierstoff-Schleuder eingeschaltet (Abb. 8). Von Anfang an wurde eine anormale Drosselentwicklung im Ansaug, stärkeres Klopfen aus dem Kurbelgehäuse und gleichseitig erhöhter Kraftstoffverbrauch festgestellt. Dabei wurde der Motor mit fetterem Gemisch betrieben, um die nun erhöhte Klopfschlagzahl zu vermindern. (Leistungsdiagramm Abb. 9). Dieses Verhalten war offensichtlich auf eine zeitweise ungünstige Ringstellung und einen dadurch veranlassenden Öleintritt in den Verbrennungsraum zurückzuführen. Nach einem Leistungsabfall von 6-7%, wurde der 2. Lauf nach insgesamt 21. Stunden beendet. Beide Ringe waren ohne Spannung, Ring 2 nur leicht festgeklemmt. Das frühzeitige Festgehen der Ringe dürfte in Kräftigerdehnungen des Kolbenringmaterials zu suchen sein, was durch eine bereits am Ende des 1. Dauerlaufes eingetretene Kolbenverförmung verursacht, zumindest aber beschleunigt wurde. Auf dem Kolbenboden und in den Nuten wurde reichlicher Ölkohle- und Rußbelag festgestellt, zudem war der gesamte Kolben stark verölt (Abb. 10). Die während der Versuche entnommenen Schmierstoffproben wurden im Institut für chemische Technologie und Versuchslaboratorium für Mineralöle der T.H. München, Professor A. V. S c h n i d t auf Gesamtverschmutzung, Asphalt und Aesche untersucht. Der anormale Anstieg der Gesamtverschmutzung und der Aesche bei Probe 5 im Verlauf des 1. Dauerlaufes auf 130% und 850% (!) des BBKlaufes kann nur durch Aufnahme einer Schmutzmenge in Ölkühler bedingt sein, da zwischen beiden Entnahmestellen nur der Ölkühler und Ölbehälter liegt. Während der übrige Schmierstoffkreislauf gestäubert worden war, war eine Reinigung des Ölkühlers nicht erfolgt. Der Ruß von Frischöl verursachte im weiteren Verlauf der Kurve eine starke Verminderung der percentualen Schmutzmenge. Vermutlich

POOR  
COPY 12

P  
C

war nach etwa 15 Stunden eine völlige Verainchung dieser  
 zusätzlicher Schmutzmenge mit dem uniaufenden Schmier-  
 stoff erfolgt, da nach dieser Zeit der Durchlauf wie-  
 der als normal anzusprechen ist. Die Einzelergelisse  
 der Schmierstoffuntersuchungen sind aus Tafel 1 ersicht-  
 lich. Das Ergebnis des 2. Durchlaufes mit Schleuder zeigt  
 Abb. 2. In der Schmierstoffschleuder wurden bei 70 kg  
 eingefüllter Schmierstoffmenge eine Schmutzmenge von  
 0,551 kg, d.h. 0,7% abgetrennt. Davon waren 12,3 %  
 Asche und zwar hauptsächlich  $Fe_2 O_3$ , also Abrieb der  
 Frischwerkteile. Wie aus Tafel 2 hervorgeht, war eine  
 Veränderung der Schmierstoffeigenschaften nicht eingetre-  
 ten. Die Senkung der Viskosität der Ölprobe 9 auf 2,98  
 bzw. 3,08 ° E gegen 3,15 ° E des Frischöls ist eben-  
 falls auf Kraftstoffdurchschlag zurückzuführen, werauf  
 auch wieder die Vinderung des Flammpunktes von 220°C  
 auf 205 bzw. 208°C, sowie das auf dem Kolbenboden klar  
 erkennbare Spritzbild hinweist (Abb. 10). Ein Vergleich  
 nach 21 Laufstunden ergibt beim 2. Lauf eine Senkung  
 der Gesamtverschmutzung um 54 % der 1. Laufes, während  
 der Aschegehalt um 25 % vermindert wurde. Der Asphalt-  
 anteil blieb in beiden Versuchen etwa gleich, d.h. sein  
 spezifisches Gewicht war gleich dem des Schmierstoffes  
 und konnte durch die Schleuder nicht angetrennt wer-  
 den. Abb. 11 zeigt den Filtereinatz mit 9 Stück Siebein-  
 sätzen, Abb. 12 die verwendete handelsübliche Schmier-  
 stoff-Schleuder.

04551

**TABLE I****Einzelergebnisse der Ölprobenuntersuchung****1. Durchlauf.**

Probe	% Gesamtverschm.		% Asphalt		% Asche	
	Vorlauf	Rücklauf	Vorlauf	Rücklauf	Vorlauf	Rücklauf
Frischöl	0,100		0,021		0,007	
1	0,147	0,121	0,037	0,041	0,012	0,009
2	0,156	0,122	0,033	0,022	0,016	0,018
3	0,251	0,133	0,032	0,080	0,019	0,019
4	0,360	0,221	0,197	0,057	0,036	0,024
5	0,702	0,303	0,434	0,058	0,034	0,037
6	0,263	0,240	0,063	0,028	0,018	0,026
7	0,453	0,398	0,126	0,063	0,044	0,040
8	0,303	0,489	0,066	0,038	0,033	0,038
9	0,306	0,334	0,066	0,083	0,033	0,038
10	0,660	0,640	0,104	0,056	0,062	0,060

Probe aus Restmenge (Notversuchf Ölleitungen)	0,720	0,129	0,066
---	-------	-------	-------

**2. Durchlauf**

Probe	% Gesamtverschm.		% Asphalt		% Asche	
	Vorlauf	Rücklauf	Vorlauf	Rücklauf	Vorlauf	Rücklauf
Frischöl	0,065		0,017		0,004	
1	0,122	0,143	0,037	0,033	0,009	0,015
2	0,165	0,160	0,039	0,036	0,015	0,017
3	0,170	0,173	0,043	0,041	0,015	0,021
4	0,180	0,176	0,046	0,048	0,019	0,023
5	0,208	0,204	0,058	0,062	0,020	0,023
6	0,232	0,209	0,039	0,063	0,022	0,027
7	0,223	0,263	0,052	0,072	0,023	0,031
8	0,267	0,270	0,062	0,072	0,023	0,033
9	0,293	0,266	0,038	0,033	0,026	0,036

POOR  
COPY 12



04552

Tafel 3

Vergleich der Schmierstoffeigenschaften von Frischöl und der Ölprobe aus Reibung (Motorschiff, Ölleitungen)

1. Dauerlauf

	Frishöl	Probe aus Reibung
$d_{20}$	0,862	0,871
Viskosität bei 15°C	102 <sup>°E</sup>	117 <sup>°E</sup>
"    "    30°C	18,5 <sup>°E</sup>	18,8 <sup>°E</sup>
"    "    100°C	3,15 <sup>°E</sup>	3,17 <sup>°E</sup>
Steilheit (m)	3,14	3,16
Visk.Polhöhe	1,65	1,67
Flammpunkt	220°C	187°C

2. Dauerlauf

	Frishöl	Probe 9	
		Vorlauf	Rücklauf
$d_{20}$	0,862	0,864	0,865
Viskosität bei 20°C	102 <sup>°E</sup>	100 <sup>°E</sup>	100 <sup>°E</sup>
"    "    30°C	18,5 <sup>°E</sup>	17,2 <sup>°E</sup>	17,6 <sup>°E</sup>
"    "    100°C	3,15 <sup>°E</sup>	2,98 <sup>°E</sup>	3,08 <sup>°E</sup>
Steilheit (m)	3,14	3,20	3,17
Visk.Polhöhe	1,65	1,70	1,67
Flammpunkt	220 °C	205 °C	208 °C

POOR  
COPY 12

04553

Table 1**Kinematikergebnisse des 4. Durchlaufes.**

Probe: % Gesamtverschm.	% Asphalt		% Sand	
	Vorlauf	Nachlauf	Vorlauf	Nachlauf
1	0,085	0,085	0,046	0,048
2	0,104	0,102	0,051	0,059
3	0,125	0,148	0,052	0,074
4	0,187	0,207	0,069	0,081
5	0,244	0,257	0,089	0,098
6	0,205	0,216	0,080	0,068
7	0,239	0,276	0,101	0,077
8	0,204	0,220	0,100	0,095
9	0,289	- -	0,119	- -

Werte des Versuchsmotors:

Prüfmotor

Zylinder Nr. 22

Kolben Nr. 154

Kraftstoffförderpumpe

Einspritzpumpe

Einspritzdüsen

Pumpeventil

Zündmagnet

Zündkerzen

Temperaturmessung:

an Zylinder

des Schmierstoffes, der)

Ansaug- u. Kuhlluft )

Ladedruck und Einlassventil

Wirkdruck an den Messblenden)

Stau-Druck vor Motor )

Grangustand

Zehg. Nr. 801 300 042

Zehg. Nr. 9 - 801 - 243 - 018

DIN - Benzinmotor H13

Bosch P. 2. 1/100 V 635

Bosch E 22 A 60 H 13

Bosch

Bosch Z. M 4 A R

Bosch D 240 E T 6

Thermoelemente: Eisen-Konstantan

Widerstands- und

Flüssigkeitsthermometer

Hg - U - Rohr

U - Rohr (Wasser)

Kennwerte der Schmierstoff-Schleuder:

Westphalia - Separator:

Type KOC - 1215

Trommel - Nr.

360205

Drehzahl n

8000 U/min.

POOR  
COPY 12

04554

Versuchsbedingungen

Verdichtungsgrad	$\epsilon = 1 : 7,25$
Eindeinstellung	Konstant $30^\circ$ v.o.z.
Luftüberschusszahl	$\lambda = 0,95$
Ladelufttemperatur	$t_0 = 150^\circ\text{C}$
Ladedruck	$P_2 = 1,5 \text{ kg/cm}^2$
Drehzahl	$n = 2400 \text{ U/min.}$
Kühllufttem. v. Motor	$T_{Kl} = 200 \text{ mm v. S.}$
<u>Schmierstofftemperatur</u>	
vor Motor	$75 - 80^\circ\text{C}$
nach Motor	etwa $105^\circ\text{C}$
<u>Kraftstoff</u>	Flugkraftstoff C 3
King.Hr.	54/42
Spez.Gew.	$0,775 \text{ kg/L.}$
<u>Schmierstoff</u>	Rotring L 43

POOR  
COPY 12

04555

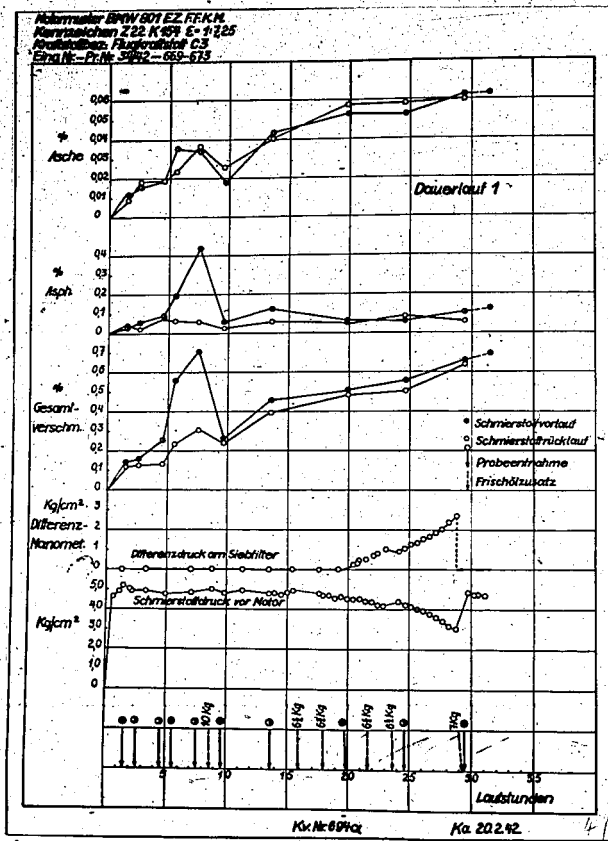


Abb.1. Verschmutzungsunahme des 1. Dauerlaufes

04556

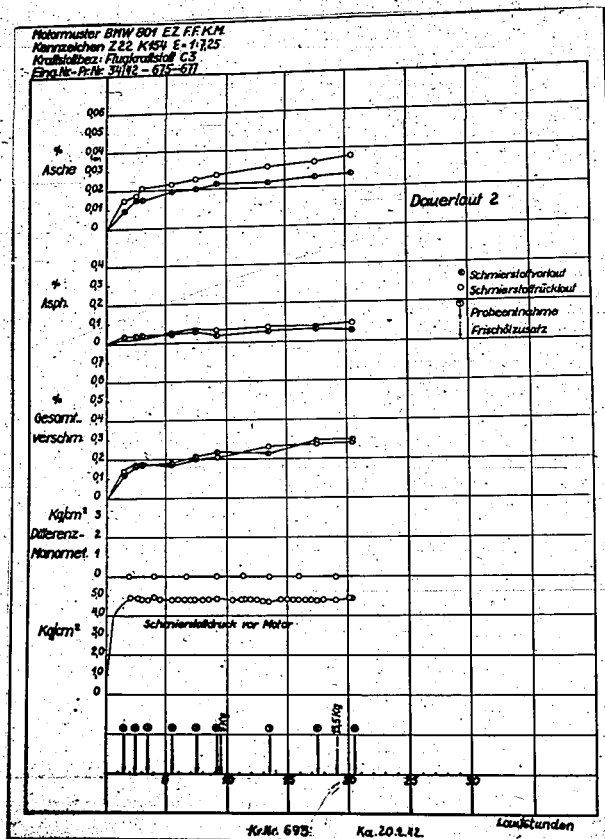
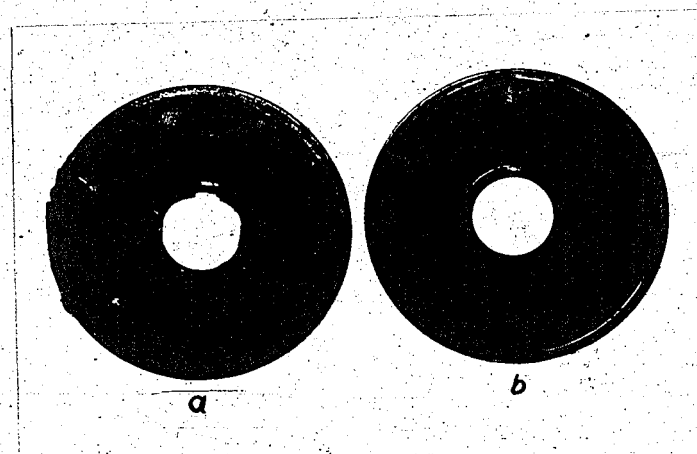


Abb.2. Verschmutzungszunahme des 2. Dauerlaufes

POOR  
COPY 12

P  
C

04557



**Abb.3. Siebeinsätze des Knecht-Siebfilters  
nach den Dauerläufen**

- a.) 1. Dauerlauf**
- b.) 2. Dauerlauf**

04558

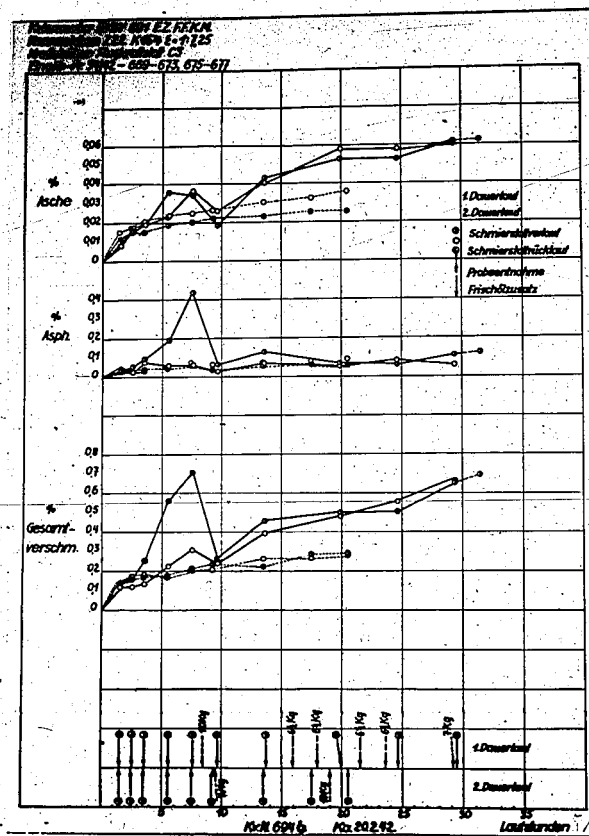


Abb.4. Vergleich der Verschmutzungsunahme des 1. und 2. Dauerlaufes

04559

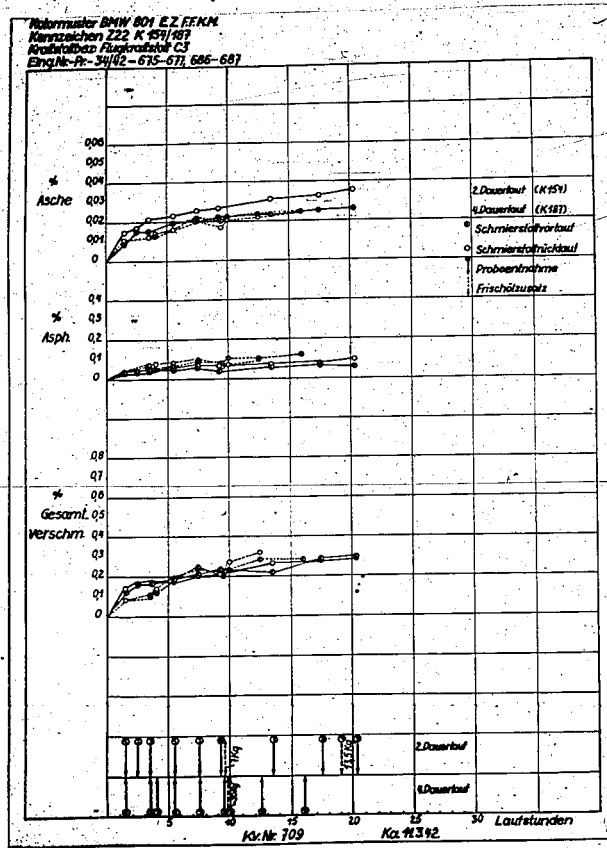


Abb.5. Vergleich der Verschmutzungsunahme des 2. und 4. Dauerlaufes



04560

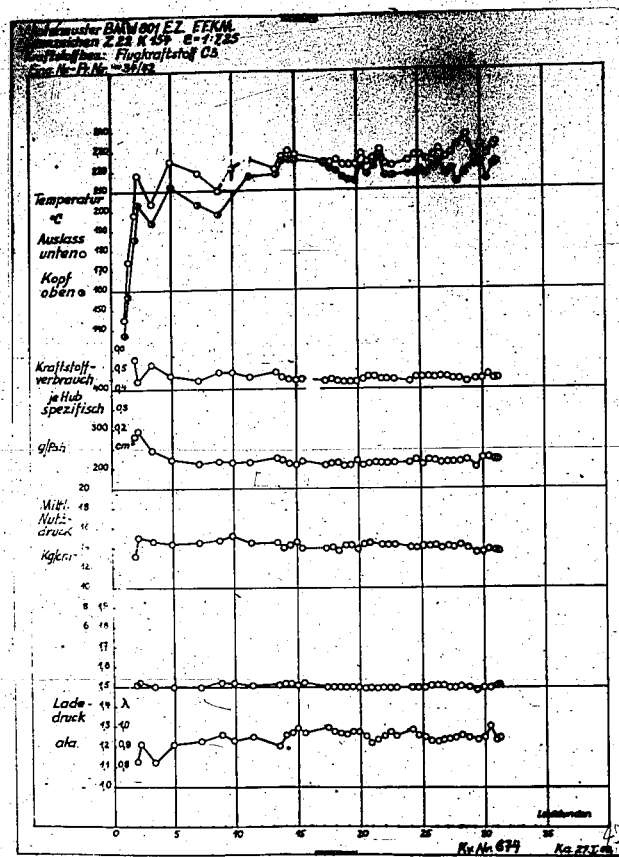


Abb. 6. Leistungsbild des 1. Dauerlaufes

POOR  
COPY 12

PO  
CO

04561

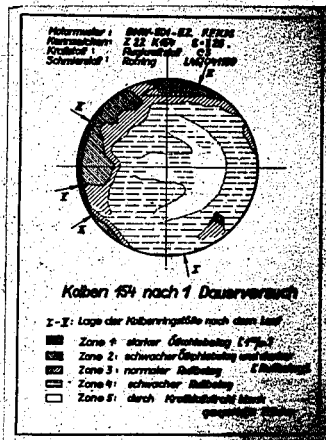
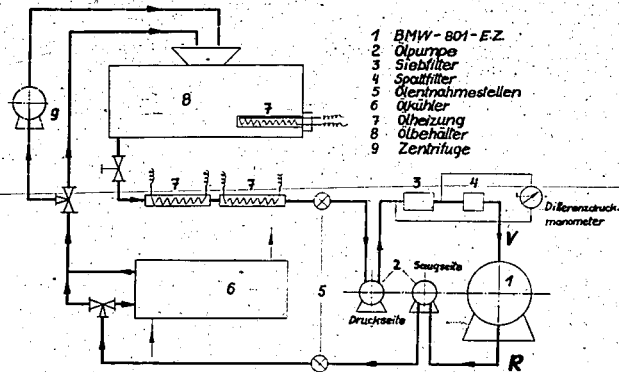


Abb.7. Kolbenbild nach dem 1. Dauerlauf



Schmierstoffkreislauf des BMW-801-E.Z.P.

Abb.8. Schaltschema des Schmierstoffkreislaufes

04562

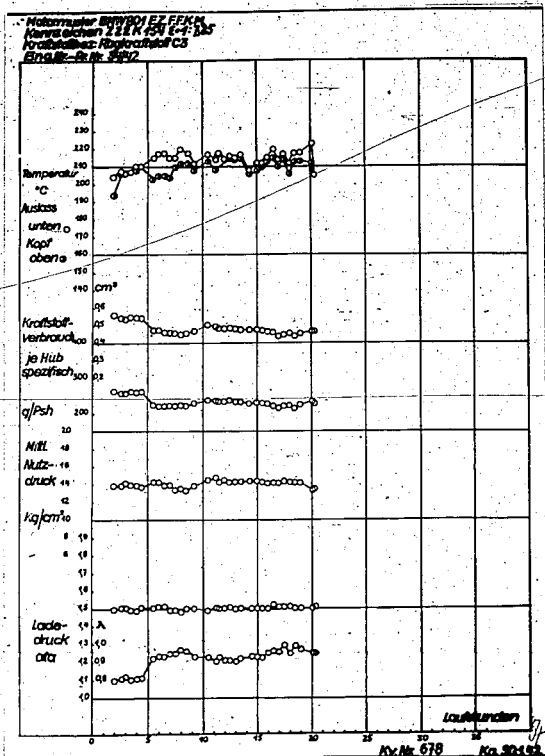


Abb. 9<sup>2</sup> Leistungsbild des 2. Dauerlaufes

POOR  
COPY 12

04563

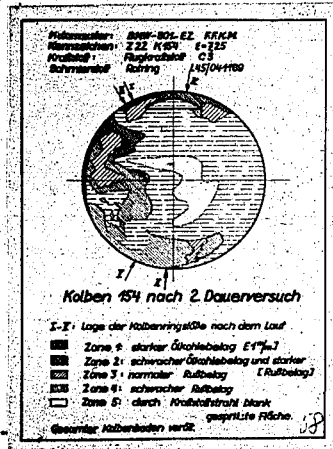


Abb.10. Kolbenbild nach dem 2. Dauerlauf

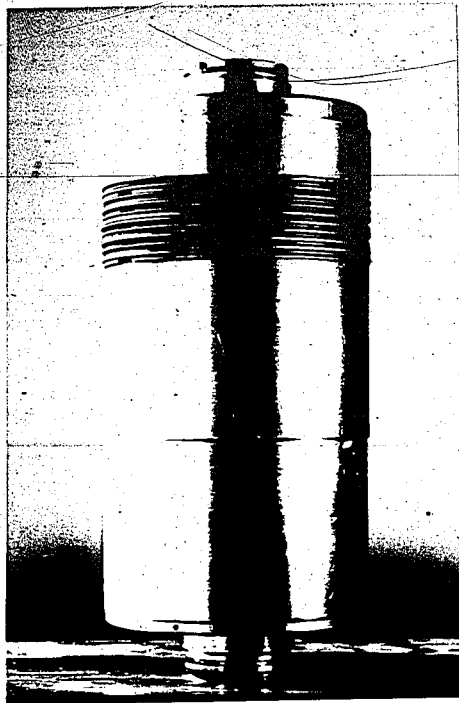


Abb.11. Filtereinsatz in Knecht-Siebfilter

04564

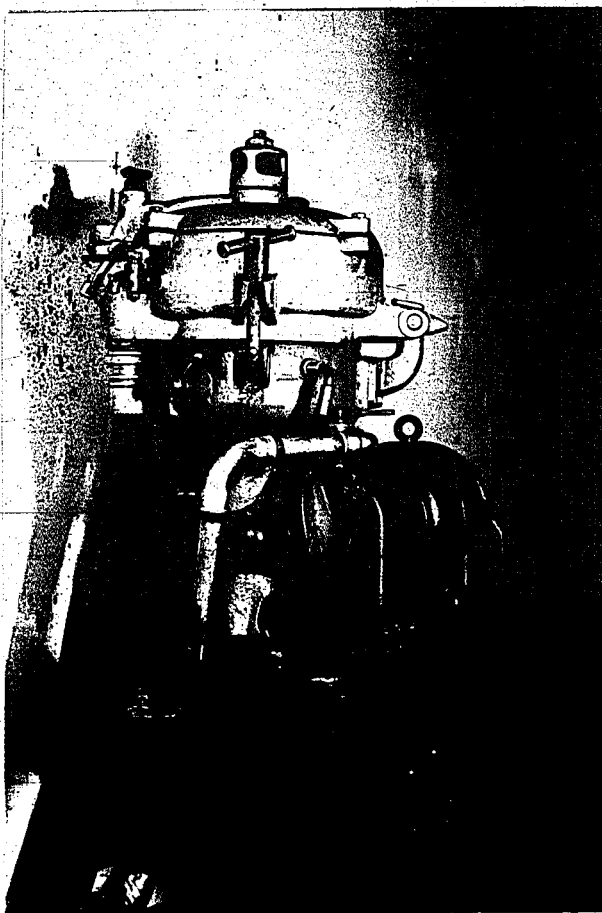


Abb.19. Schmierstoff-Schleuder

Institut

An  
Ins  
Kre  
Tec  
Mün  
Pas

Zu  
lau  
Ver  
Rot  
(Je  
zu  
suc  
Asp

Dur  
Abr  
dur  
bra

Una  
hat  
bra  
wer  
tre  
ner  
Für  
3  
bes

Die  
bet  
feh

Die  
lic  
suc  
dex  
Zig  
neu  
ni  
ent  
in  
Öl

POOR  
COPY 12

P  
C

04565

**Institut für Chemische Technologie der Technischen Hochschule  
Versuchslaboratorium für Mineralöle**

Vorstand: o. Prof. Dr.-Ing. A.W. Schmidt  
München

An das  
Institut für Flug- und  
Kraftwagenmotoren der  
Technischen Hochschule

München 54  
Pasingstr. 111

Walter-von-Dyck-Platz 1  
Eingang 8. I. Stock, Zimmer 917/918  
Fernruf 5201/276  
Postcheckkonto München 2830

Den 7. März 1942  
Br. B. Nr. AWS/M

Zu den vergleichenden Schmieröluntersuchungen eines Versuchs-  
laufes an einem BMW 801 E.Z. M. ist folgendes zu bemerken:

Verwendet wurde für die Versuche ein Schmieröl, bezeichnet  
Rotring L 45. Während des Versuchslaufes wurden einzelne Proben  
(jeweils 400 cm) entnommen, um durch diese Proben in der Lage  
zu sein, den Verlauf der Versuche zu kontrollieren. Die Unter-  
suchungen erstreckten sich auf die Ermittlung der Asche, des  
Asphaltes und der Gesamtverschmutzung.

Durch die Aschebestimmung sollte die fortschreitende mechanische  
Abnutzung von Kolben, Kolbenring und Zylinderwand erfaßt werden,  
durch die Bestimmung des Asphalts sollte die fortschreitende Ver-  
braucherscheinung des Schmieröles erfaßt werden.

Unsere schon vor 10 Jahren durchgeführten Versuche in Breslau  
haben uns damals gezeigt, daß auf diese Art und Weise der Ver-  
brauchsgrad des Motors wie des Öles ziemlich gut dargestellt  
werden kann. Sofern keine anormalen Verbraucherscheinungen auf-  
treten, muß sich bei den Untersuchungen ergeben, daß die gemesse-  
nen Werte auf einer Kurve zu liegen kommen, die etwa einer E-  
Funktion ähnelt. Wenn man unsere Ergebnisse, die in Abb. 1, 2 und  
3 zusammengefaßt sind, betrachtet, so ergibt sich durchaus eine  
Bestätigung dieser Voraussage.

Die bei Dauerlauf 1 für den Schmierstoff auftretende Abweichung  
bei den Proben Nr. 4 und 5 wurde von uns von vornherein als eine  
fehlerhafte Probenahme angesprochen.

Die Rücksprache mit den Herren der BMW ergab durchaus die Mög-  
lichkeit, daß unsere Annahme richtig ist. Bei den anderen Unter-  
suchungen zeigte sich in jedem Falle die eigenartige Einstellung  
der oben erwähnten Kurvenfunktion. Diese Tatsache ist neben der  
Eigenart des Verlaufes auch gleichzeitig eine Kontrolle der Ge-  
nauigkeit der Analysenwerte, denn, wenn unsere Analysenwerte  
nicht auf der Kurve liegen würden, so würde das andeuten, daß  
entweder ein Fehler in der Analyse vorliegt oder daß die Probe  
in irgendeiner Form nicht den tatsächlichen Betriebszustand des  
Öles wiedergibt.

Bl. 2

POOR  
COPY 12

P  
C

Institut für Flug- und Kraftfahrzeugbau: 2 zum Brief vom: 7.3.1942  
 wagenmotoren

Was die Wirkungsweise der zwischengeschalteten Zentrifuge anbelangt, so läßt der Vergleich von Dauerlauf 1 mit Dauerlauf 2 und 4 erkennen, daß die Herausnahme der verschmutzenden oder zu beanstandenden Teile aus dem Schmieröl durch die Zentrifuge in weit größerem Maße erfolgt als durch das Filter. Diese Verbesserung tritt besonders bei der Bestimmung der Gesamtverschmutzung und der Asche in Erscheinung.

Die für den Asphalt gefundenen Werte sind bei beiden Versuchsanordnungen annähernd gleich. Um nun den Nachweis zu liefern, daß diese Erkenntnis nicht eine einmalige zufällige Erscheinung ist, war es für uns außerordentlich interessant, noch eine zusätzliche Versuchsreihe mit Zentrifuge untersuchen zu können. Die Übereinstimmung der Werte von Asche, Gesamtverschmutzung und Asphalt der beiden Versuchsfahrten mit Zentrifuge ist überraschend gut, so daß aus dieser Tatsache geschlossen werden darf, daß die verbessernde Wirkungsweise der Zentrifuge nicht ein zufälliges Ergebnis des zweiten Dauerversuches war, sondern daß damit zu rechnen ist, daß bei Verwendung einer Zentrifuge anstelle eines Ölfilters tatsächlich diese verbesserte Abscheidung der Schmutzbestandteile auftritt.

Es war nun außerordentlich interessant, festzustellen, ob durch diese Maßnahme das in dem Kreislauf sich befindliche Öl nicht letzten Endes schmiertechnisch durch die Einschaltung der Zentrifuge ungünstig beeinflusst wurde. Aus diesem Grunde haben wir analysenmäßig das Öl vor Gebrauch mit dem Öl, das den zweiten Dauerlauf hinter sich hatte, verglichen. Diese Analyseergebnisse haben wir in folgender Tabelle einander gegenüber gestellt:

	Frischöl	Ölprobe Nr.9 nach dem zweiten Dauerlauf	
		Vorlauf	Rücklauf
Flammpkt.	220°C	205°C	208°C
d <sub>20</sub>	0.862	0.864	0.865
Visk.20°C	102°E	100°E	100°E
" 50 "	18.5°E	17.2°E	17.6°E
" 100 "	3.15"	2.98"	3.08"
Visk.Steilh.	3.14	3.20	3.17
VP.	1.65	1.70	1.67

Der Vergleich dieser Analysendaten miteinander ergibt die Tatsache, daß kaum ein Unterschied zwischen diesen Ölproben besteht.

Institut für Chemische Technologie und Versuchslaboratorium für Mineralöle 04567

Institut für Flug- und Kraftabsetzungsblatt: 3 zum Brief vom: 7.3.1942  
Wegemotoren

Vergleicht man nun Frischöl und gebrauchtes Öl bei Versuch 1 miteinander (ohne Zentrifuge), dann ergibt sich ein wesentlich anderes Bild. Die bei diesen Untersuchungen erhaltenen Werte sind in nachfolgender Tabelle einander gegenübergestellt:

	Frischöl	Restöl aus Motorsumpf, Ltgn., Ölbehälter. 1. Dauerlauf
Flammpkt.	220°C	183°C
d <sub>20</sub>	0.862	0.871
Visk. 15°C	102 °E	113 °E
" 50 "	18.5 "	18.8 "
" 100 "	3.15 "	3.17 "
Visk. Steilh.	3.14	3.16
VP.	1.65	1.67

Die Tatsache, daß der Flammpunkt von 220 auf 183°C herabgesunken ist, deutet darauf hin, daß bei diesem Versuch der Durchschlag des Kraftstoffes erheblich stärker gewesen sein muß, als im Dauerlauf 2. Die Erhöhung der Viskosität und des spezifischen Gewichtes ist auf den höheren Verschmutzungsgrad, wie nachstehende Daten ergeben, zurückzuführen.

Gesamtverschmutzung	0.720%
Asphalt	0.129 "
Asche	0.066 " (hauptsächlich Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

Als Zusatzuntersuchung zum Dauerlauf 1 wurde noch der auf dem Sieben haftende Rückstand untersucht. Dabei wurden folgende Werte gefunden:

Gesamtverschmutzung	34.50
Asphalt	1.89
Asche	9.68 (hauptsächlich Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

*M. Schmidt*

o. Prof.

POOR  
COPY 12



**Forschungsinstitut  
für Flug- und Kraftwagenmotoren**

04568

der Technischen Hochschule München

**Professor Dr. Ing. K. Schnauffer**

**Auftraggeber:** BMW - Flugmotorenbau G.m.b.H. München,  
Abtlg.: Vorentwicklung

**Auftragszeichen:** BMW - Bestellung Nr. 290 759 Lu 11

Einfluss des Auslassventiles auf das  
Klopferverhalten des BMW-801-E.Z.Motors.

Der Bericht umfaßt: 5 Seiten und 3 Abbildungen

Bearbeiter:

*Burkart*

(Burkart)

Institutsleiter:

*G. Weber*

(Dr.-Ing. G. Weber)

München, den 10. April 1943

Verteiler:

EMF 834

EZV (2 x)

FFKM

Geheim-Nr. 131

6 te Ausfertigung von 6 Ausfertigungen

POOR  
COPY 13

04569

**Einfluss des Auslassventiles auf das Klopfverhalten des  
BMW- 801 - E.Z. Motors.**

Aufgabe:

Es soll der Einfluss der Dichtigkeit des Auslassventiles auf das Klopfverhalten des BMW - 801- E.Z. Motors ermittelt werden.

Ergebnis:

Bei der Ermittlung der Klopfgrenzen von C 3 - Kraftstoffen am BMW - 801 - E.Z.M. wurde nach Beendigung der Versuche regelmäßig festgestellt, dass das Auslassventil stark undicht war. Die bereits früher ausgesprochene Vermutung, dass der hierdurch stark aufgeheizte Ventilteller wesentlichen Einfluss auf das Klopfverhalten des Kraftstoffes im Motor hat, fand durch die aufgeführten Versuche ihre Bestätigung. (Abb. 1). Zu Beginn des ersten Versuchslaufes war das Auslassventil bereits stark undicht. Das beim folgenden Versuch sorgfältig eingeschiffene Ventil hatte offensichtlich eine Verbesserung der Klopfgrenzlage zur Folge. Es war nach Versuchsbeendigung praktisch noch als dicht anzusprechen. Das Ergebnis des dritten Versuches zeigt eine Verschlechterung der Klopfgrenzlage während des Betriebes. Die Kurve wurde dabei im niederen Leistungsbereich begonnen. Nach Erreichen des höchsten Leistungspunktes wurde der Versuch zur Überprüfung des angefallenen Ergebnisses in entgegengesetzter Richtung durchgeführt. Die Lage dieser Kurve deckt sich mit der ersten, bei der das Auslassventil stark undicht war. Eine Überprüfung nach dem Versuch bestätigte die Undichtigkeit des Ventiles.

Eine Betrachtung des Temperaturverlaufes an den Klopfgrenzen, lässt erkennen, dass das Undichtwerden des Auslassventiles eine Zunahme der Temperatur an der Meßstelle "Kopf oben" zur Folge hatte. Das gleichzeitige Absinken der Temperaturen "Auslass unten" und "Auspuff" ist dabei auf die Leistungsabnahme durch Erhöhung der Klopfneigung zurückzuführen. (Abb. 2)

Zur Schonung des Kolbens wurden die Klopfgrenzen nur bis zu einer Leistung von etwa  $p_{me} = 16.5 \text{ kg/cm}^2$ , bei einem  $b_e = 230 \text{ g/Psh}$

POOR  
COPY

13

ge  
zu  
wi  
Ei  
li  
di  
e  
ho  
Au  
A  
st  
Ur  
ka  
tu  
wi  
ka  
Di  
zu  
ze  
Üb  
we  
Fol  
Be  
sc  
be  
Au  
be  
al  
fr  
ka  
st  
Ei  
ni  
AL

P  
C

04570

gefahren, um sämtliche geplanten Vergleichsversuche durchführen zu können. Zur Erhärtung der Ergebnisse, bzw. zur Feststellung, wie weit das Auslassventil bei sehr hohem Kraftstoffverbrauch Einfluss auf die Klopfgrenze hat, wurden mit verschiedenen Zylindern weitere Versuche angesetzt. (Abb. 5). Hierbei wurden die Zylinder 226 und 301 mit mehr oder weniger undichtem, der Zylinder 225 mit praktisch vollkommen dichtem Auslassventil geführt. Im Gebiet höchster Leistung trat bei letzterem jedoch eine Kolbenzerstörung ein, sodass nur ein Vergleich im Bereich hohen Kraftstoffverbrauches vorliegt. Demnach ist durch dichtes Auslassventil eine Verbesserung der Klopfgrenze um etwa  $\Delta p_m = 0,5 - 0,6 \text{ kg/cm}^2$  zu erzielen. Die übrigen Ergebnisse streuen unter sich ebenfalls im Bereich von  $\Delta p_{me} = 0,5 \text{ kg/cm}^2$ . Unter Berücksichtigung der nicht immer möglichen genauen Einhaltung der Betriebsbedingungen, wie Drehzahl, Ladelufttemperatur, Klopfzahl, sind die angefallenen Ergebnisse durchaus als wiederholbar anzusprechen, wobei die Streuung von  $\Delta p_{me} = 0,5 \text{ kg/cm}^2$  praktisch als noch zulässige Toleranz anzusehen ist.

Die den Kurven in Abb. 5 zugehörigen Temperaturwerte konnten zur vergleichswisen Beurteilung der Ergebnisse nicht herangezogen werden, da eine Störung in der Temperaturmessanlage eine Überholung und Neueichung derselben zwischen den Versuchen notwendig machte.

Folgerung:

Bei undichtem Auslassventil strömt ein Teil der Verbrennungsgase schon während des Expansionshubes in den Auspuffstutzen. Hierbei findet eine starke Aufheizung des Ventilstellers statt. Die Aufbereitung des frischen Verbrennungsgemisches wird dadurch beschleunigt, d.h. die vor Zündung anlaufenden Vorreaktionen, also Zerfall der Moleküle in Radikale und Bildung von klopfreudigen Peroxyden, finden in stärkerem Ausmass statt. Bekanntlich nimmt die Stärke der Vorreaktionen mit fetterem Kraftstoff-Luftgemisch wieder ab. Dies bestätigt den geringeren Einfluss des undichten Ventils im Gebiet hohen gegenüber dem niederen Kraftstoffverbrauches.

Als Kriterium für das Undichtwerden des Auslassventiles während

- 3 -  
04571

des Betriebes kann das Ansteigen der Temperatur "Kopf oben" angesprochen werden. Diese Meßstelle liegt dicht neben dem Ventil-sitzring, der in ähnlichem Maße wie der Ventilsteller, stärker aufgeheizt wird. Diese Erscheinung kann jedoch, bei verschiedenen Zylindern und zeitlich verschiedenen Versuchen, wie am Temperaturverlauf in Abb. 1 und 2 ersichtlich, auch nur bedingt zur Beurteilung des Ventilzustandes herangezogen werden, da andere Faktoren wie Veränderungen der Kolbenringenspannungen, Verkockungserscheinungen am Kolben, usw. gleichfalls den Wärmezustand des Zylinders beeinflussen. Eine Temperaturzunahme bei "Kopf oben" mit einer gleichzeitigen Temperaturabnahme der Abgase und bei "Auslass unten", wie sie bei der Wiederholung des 3. Versuches auftrat, lässt mit grosser Sicherheit auf eine Veränderung der Ventildichtigkeit mit gleichzeitiger Leistungsabnahme durch Verlagerung der Klopfgrenze schliessen. (Dieser Versuch ist in den Abb. 1 und 2 als gestrichelte Kurve wiedergegeben und wurde vom Gebiet hoher Leistung in Richtung niedriger Leistung gefahren).

Zusammenfassung:

Die Dichtigkeit des Auslassventiles hat wesentlichen Einfluss auf das Klopfverhalten des Motors. Er ist im Gebiet geringeren Kraftstoffverbrauches grösser als im Gebiet hohen Kraftstoffverbrauches, wo er die zulässige Streugrenze von  $\Delta p_{me} = 0,5 \text{ kg/cm}^2$  nur wenig überschreitet. Bei Kraftstoffverbräuchen von  $b_e = 230$  bis  $210 \text{ g/Psh}$ , also im Gebiet der Dauer- bzw. Sparleistung beträgt der Unterschied in der Klopfrenzlage bereits etwa  $\Delta p_{me} = 1,0 - 2,0 \text{ kg/cm}^2$ .

Durchführung:

Die Versuche wurden an einem BMW - 801 - E.Z. Graugussstand durchgeführt. Bei den ersten Versuchen (Abb. 1) wurde der Kühlstaudruck entsprechend den Daten des Vollmotors geändert. Es wurden bei den festgelegten Versuchsbedingungen,  $n = 2400 \text{ U/min}$ ,  $t_1 = 150^\circ \text{ C}$ , Zündpunktlage  $30^\circ \text{ v.o.T.}$ , immer zuerst die Leistungspunkte bei den Ladedrücken von  $p_1 = 1,15, 1,30, 1,45$  und  $1,65 \text{ ata}$  und den entsprechenden Kraftstoffverbräuchen  $b_e = 200, 230, 250$  und  $270 \text{ g/Psh}$  eingestellt, um so eine Gewähr für den nor-

POOR  
COPY 13

mal  
Ver  
pun  
kei  
sch  
hie  
15  
Str  
sch  
tat  
Bei  
sta  
zur  
be  
Zyl  
fer  
Vent  
Hier  
Druc  
gebl  
der

P  
C

04572

malen Zustand des Zylinders und des Triebwerks zu haben. Durch Vermagerung des Gemisches wurde dann der entsprechende Klopfpunkt erreicht. Der Dichtigkeitsgrad des Auslassventiles hatte keinen Einfluss auf die Lage der Leistungspunkte. Die Klopfschläge wurden durch Körperschall in den Messraum geleitet und hier durch Abhören gezählt. Normales Klopfen wurde mit 5 bis 15 Schläge pro Minute angenommen.

Streupunkte, wie sie in Abb. 3 auftraten, wurden nach Klopfschlagzahl, Drehzahl und Ladelufttemperatur beurteilt, der tatsächliche Verlauf der Klopfkurve entsprechend eingezeichnet. Bei den in Abb. 3 dargestellten Klopfgrenzen wurde ein Kühlstadruck von  $p_{KH} = 400$  mm W.S. gewählt, um die Klopfkurve bis zur höchstmöglichen Leistung, im vorliegenden Fall bei  $b_e = 270$  bis  $300$  g/Psh, durchführen zu können.

Zylinder und Kolben wurden nach jedem Versuchslauf überholt, ferner Kolbenringe, Düse und Kerzen erneuert. Die Prüfung der Ventildichtigkeit erfolgte jeweils vor und nach dem Versuch. Hierzu wurde der Auslasstutzen mit Kraftstoff gefüllt und mit Druckluft von etwa 10 atü von innen gegen den Sitz des Ventiles geblasen. Die Menge der durchtretenden Luft wurde zum Maßstab der Ventildichtigkeit gewählt.

POOR  
COPY 13

04573

- 6 -

Kennwerte des Versuchsmotors:

Prüfmotor BMW-801-l.z. Graugussstand  
 Zylinder Nr. 6009, 225, 226, 501  
 Kolben Nr. 369, 124, 260, 365  
 Einspritzdüse Bosch DE 22 A 60 M 13  
 Zündkerzen Bosch DM 240 MT 6

Versuchsbedingungen:

Verdichtungsverhältnis  $\epsilon = 1,725$   
 Zündstellung  $30^\circ$  K.W. v.o.T.  
 Luftüberschusszahl  $\lambda =$  veränderlich  
 Ladelufttemperatur  $t_l = 130^\circ$  C  
 Drehzahl  $n = 2400$  bzw.  $2200$  U/min  
 Kühllufttemperatur  $\rho_{Lu} = 200, 250, 275, 320$  bzw.  $400$   
 Ladedruck  $p_L = 1,15, 1,30, 1,45$  mm W.S.  
 $1,65$  bzw. veränderlich bis zur Klopfgrenze

Kraftstoff:

Bezeichnung Flugkraftstoff C 3  
 Eing. Nr. 4.10.  
 Dichte bei  $20^\circ$  C  $\gamma = 752$  kg/m<sup>3</sup>  
 theor. Luftbedarf  $G_{min} = 14,42$  kg/kg

Schmierstoff:

Bezeichnung Gränring  
 Eing. Nr. 22/41  
 Dichte bei  $20^\circ$  C  $\gamma = 884$  kg/m<sup>3</sup>

°C  
 220  
 240  
 200  
 190  
 180  
 170  
 160  
 Kopf oben  
 b<sub>e</sub>  
 260  
 250  
 240  
 230  
 220  
 210  
 200  
 190  
 180  
 170  
 160  
 g/psch

POOR COPY 13

04574

Lage von Klopfgrenzen bei verschiedenen Betriebszuständen des Auslassventils am BMW-801-EZ-Motor.

Flugkraftstoff  $C_3$  Z 6009 K 369 Pr. Nr. 1150 1. Versuch  
 Drehzahl  $n = 2400$  U/min " " " " 1151 2. "  
 Ladelufttemp.  $t_L = 130^\circ C$  " " " " 1153 3. "  
 Zündpunkt  $30^\circ$  K.W. v.o.T.  
 Verdichtung  $\epsilon = 1:7,25$   
 Kühlstau  $P_{Kü} = \text{veränderlich}$

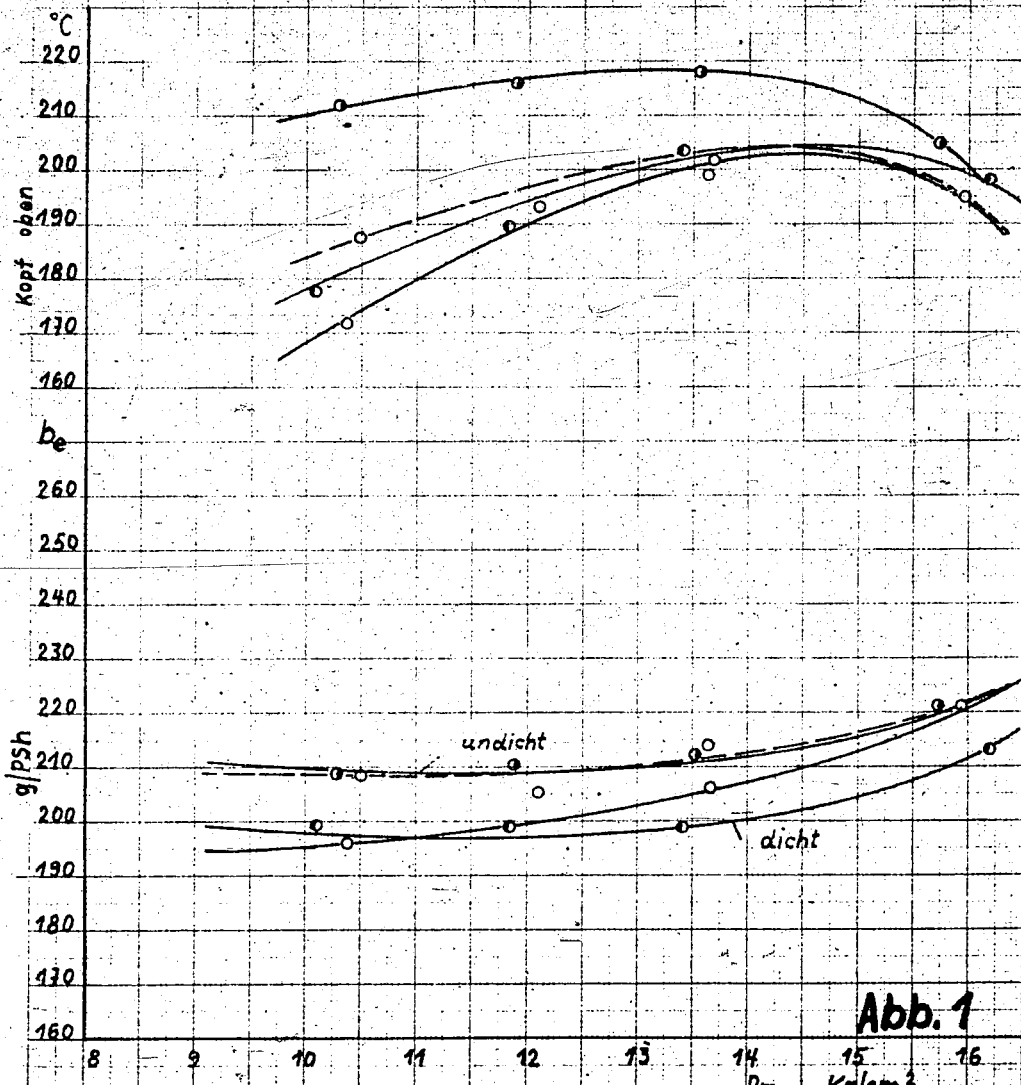


Abb. 1

Forschungsinstitut f. Flugmotoren  
 T.H. München

F.F.K.M. 42.43 Ka.

Kv. Nr. 1178

POOR COPY 13

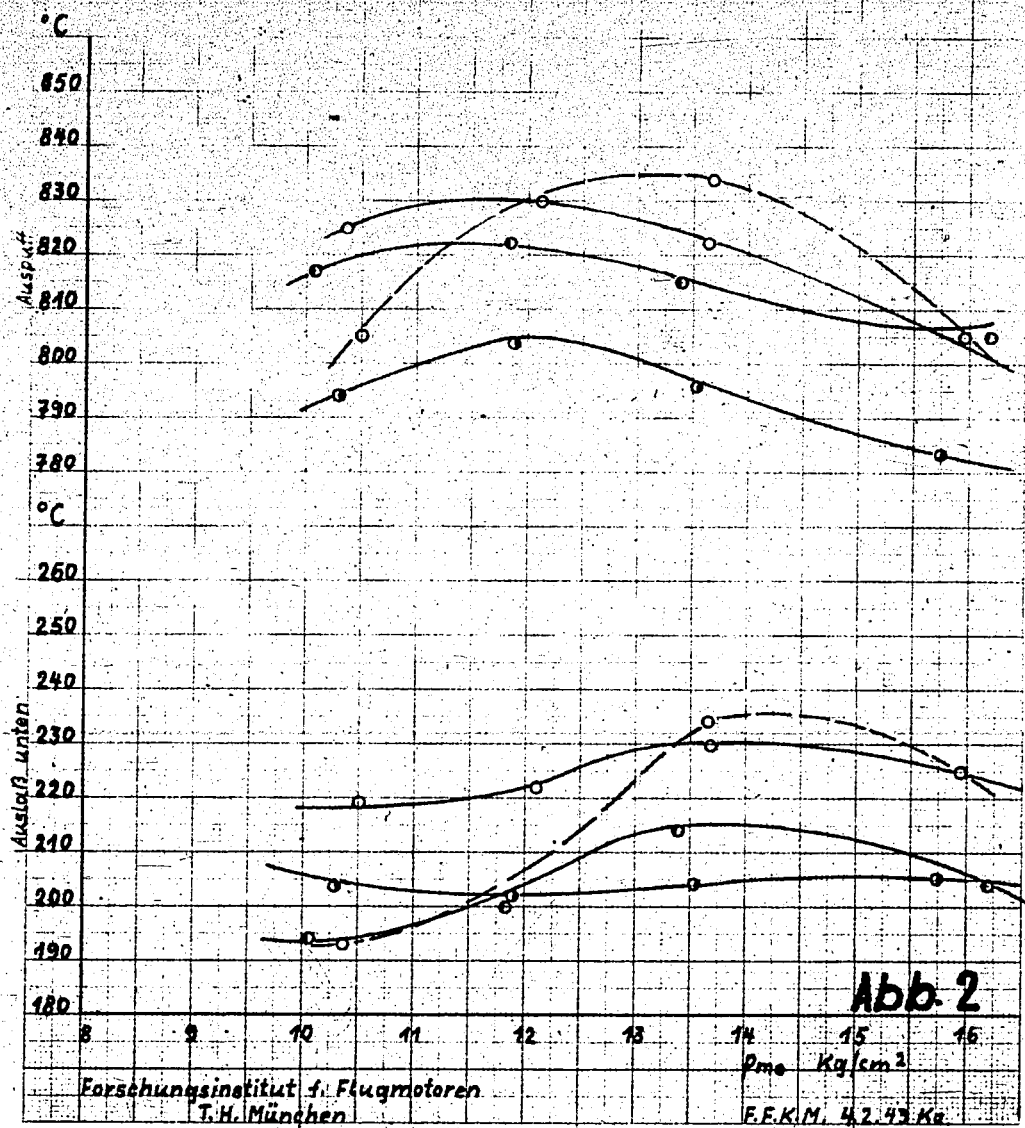
°C  
 850  
 840  
 830  
 820  
 810  
 800  
 790  
 780  
 °C  
 260  
 250  
 240  
 230  
 220  
 210  
 200  
 190  
 180  
 8  
 For

P  
 C

04575

### Lage von Klopfgrenzen bei verschiedenen Betriebszuständen des Auslaßventils am BMW-801-E.Z. Motor.

Flugkraftstoff $C_8$	Z 6009	K 369	Pr. Nr. 1150	1. Versuch
Drehzahl $n$	2400 U/min		1151	2.
Ladelufttemp. $t_L$	130°C		1155	3.
Zündpunkt	30° K. W. v. T.			
Verdichtung $\epsilon$	1,25			
Kühltau	$p_{Kü.}$ veränderlich			



Klopf

$b_0$   
g/psch

390
380
370
360
350
340
330
320
310
300
290
280
270
260
250
240
230
220
210
200
190
180

Forsch

POOR COPY 13

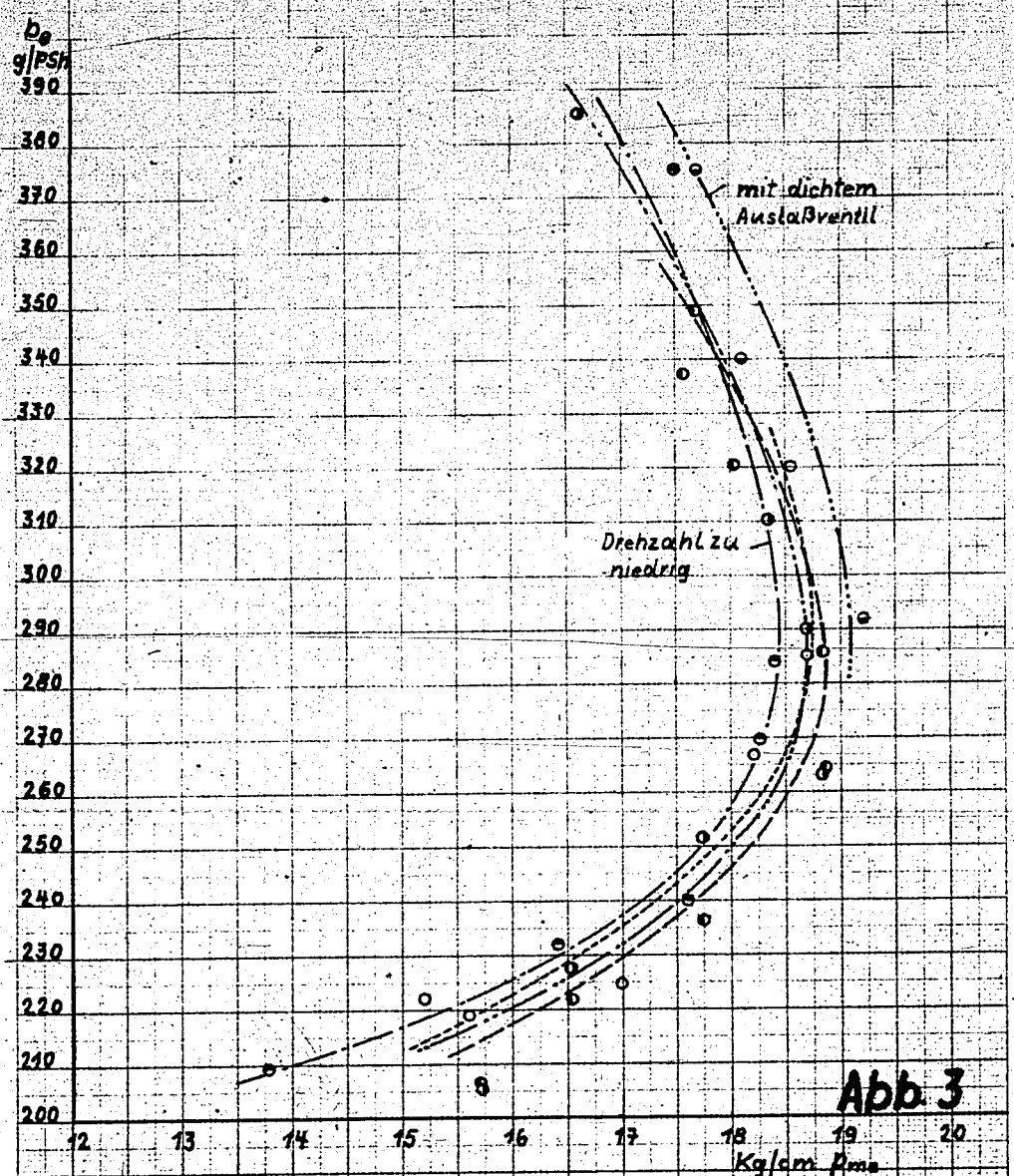
P C



04576

**Klopfgrenzen mit verschiedenen Zylindern am BMW-801-EZ.M**

Flugkraftstoff C3		2 226 K 260	Pr. Nr. 1131
Drehzahl n	2200 U/min		
Ladelufttemp. $t_L$	130°C	2 301 K 365	1170
Zündpunkt	30° K.W. v.o.T.	2 226 K 260	1181
$P_{\text{Lu}}$	400 mm W.S.	2 225 KE 124	1194
Verdichtung $\epsilon$	1.725		



**Abb 3**

Eorschungsinstitut f. Flugmotoren  
T.H. München

F.F.K.M. 1.4.43. Ka

Kv. Nr. 1132

POOR COPY 13

I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh.

04577

**Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau  
Nr. 505**

Erfahrungen bei Schmierstoff-Prüfläufen  
auf Ringsteckverhalten

(Vortrag, gehalten anlässlich der Schmieröltagung der  
DVL in Berlin am 7./8. Mai 1942)

Übersicht:

Es wird ein Überblick über den Stand der motorischen Schmierölprüfung im Einzylinder BMW 132 N gegeben und insbesondere die Mängel des Verfahrens aufgezeigt. Trotz vieler ungeklärter Einflüsse, die in ihrer Gesamtheit zum Teil grosse Streuungen der Messgenauigkeit verursachen, ist das Verfahren als Schmierölprüfung brauchbar. Es werden einige Möglichkeiten zur evtl. Verbesserung des Verfahrens aufgezeigt, sowie Einflüsse der Temperaturen und Betriebsbedingungen auf die Laufzeit angegeben.

Abgeschlossen am: 1. Juli 1942 Gr.

Die vorliegende Ausfertigung 4 enthält

Bearbeiter: Dipl. Ing. W. Lauer

21 Textblätter

3 Bildblätter

**Verteiler**

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1		RLM, Abt. GL/A-M			
2		Fl. Oberstabsing. Mücklich			
		St. stelle Rechlin			
		Dipl. Ing. Giessmann			
3		Dir. Dr. Sauer, Leuna			
4		Dr. Zorn, Leuna			
5		Dir. Dr. Müller-Cunradi			
6		Dr. Wietzel			
7		Obering. Penzig			
8		Dipl. Ing. Halder			
9		Dipl. Ing. Lauer			
10		Techn. Prüfstand			

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 10. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelteilen vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

POOR  
COPY 14

04578

Erfahrungen bei Schmierstoffprüfläufen auf Ringstecken

von Dipl.-Ing. W. Lauer

Techn. Prüfstand Oppau, I.G. Farbenindustrie A.G. Ludwigshafen/Rh.

Die motorische Schmierstoffprüfung steht, wie auch die ganze Schmierstoffforschung, heute noch in der Entwicklung. So ist auch die Untersuchung von Schmierölen hinsichtlich ihrer Rückstandsneigung im Motor bzw. die Prüfung des Ringsteckverhaltens noch weit davon entfernt ein Messverfahren zu sein, wie etwa die ungleich einfachere und genauere Bestimmung des Überladeverhaltens von Kraftstoffen. Viele Faktoren, wie die Temperatur, Kraftstoffe, Ersatzteillieferungen usw., einige auch noch völlig unbekannt, wirken bei der Rückstandsbildung mit und beeinflussen die Ergebnisse in einer für die geforderte Messgenauigkeit wenig befriedigenden Weise. Die Schwierigkeit, eine ausreichende Genauigkeit der Laufzeit von etwa  $\pm 10$  v.H. zu erzielen, lässt sich am besten an einem Vergleich mit Laboratoriumsprüfungen von Schmierölen ermesen. Dort beträgt trotz einfachster und gut zu beherrschender Prüfbedingungen, wie z.B. beim Verkokungstest die Messgenauigkeit nur etwa  $\pm 15$  v.H.

Es ist deshalb eine wenig dankenswerte Aufgabe, einen Überblick über das bisher in der Schmierölerprobung Erreichte zu geben, da über die Ergebnisse von Versuchsgrundsätzlicher Art bis heute nur wenig Positives zu sagen ist. Trotzdem sind wir der Aufforderung der DVL nachgekommen, über unsere Erfahrungen bei Ringsteckversuchen zu berichten, und ich glaube, dass ein Überblick über diese Erfahrungen auch bei zum Teil negativen Ergebnissen in dem einen oder anderen Falle Anstoss sein kann zu neuen Anregungen und Erkenntnissen. In diesem Sinne sollen diese Ausführungen ein Beitrag sein zu einer Zusammenarbeit bei der Erforschung der Schmierstoffprobleme sein.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein

04578/125

DIN-Formular A-9 (12/50-127)

04579

- 1.) Übersicht über die Durchführung der Prüfläufe sowie die Anlage unter besonderer Berücksichtigung der Temperaturüberwachung.
- 2.) Das Versuchsende, sowie Massnahmen zur besseren Erkennbarkeit (Versuche mit freien Ringnuten usw.)
- 3.) Die Laufzeiten und ihre Reproduzierbarkeit
  - a) bei Schöl
    - a) Streuungen über verschiedene Zeiträume (Abhängigkeit von Windrichtung, Ersatzteillieferung usw.)
    - b) Streuungen bei verschiedenen Zylindern und zwar des Mittelwertes sowohl, als auch der einzelnen Läufe, Prüfung einzelner Zylinder auf verschiedenen Motoren, Streuungen der Zylindertemperaturen (Kerzenringe) bei gleicher Richttemperatur
    - c) Abhängigkeit der Laufzeit von der Gesamtlaufzeit des Zylinders, dem Kolbenspiel, dem Kolbenringspiel und festem Ringteil in Prozent
    - d) Die Laufzeit abhängig von den Zylindertemperaturen (Scheiteltemperatur) bei Einspritzpumpe, bei Vergaser. Verschiedene Neigung der Temperaturkurve, Höherliegen der Laufzeitkurve bei Vergaserbetrieb.
  - b) bei Ölen verschiedener Herkunft: Laufzeit, Streuungen grösser als bei Rotring, bedingt durch längere Absolutlaufzeit bzw. instabiles Verhalten von Zusätzen usw.
- 4.) Laufzeit und Rückstandsbildung
  - a) Ausbaubefunde
  - b) Zusammenhang der Rückstandsbildung mit den Analysenwerten der Neu- und Gebrauchöle
  - c) Verschlammungsneigung von Ölen, ihre Untersuchung im Motor (Opel-Versuche und BMW-Versuche)
- 5.) Einflussgrössen, die noch nicht bekannt sind.
  - a) Ringnuttemperatur
  - b) Ölumlau im Stern bzw. Schleuderölmenge am Kolben. (Abhängigkeit des Öl drucks und damit der Schleuderölmenge von dem Laufspiel des Kurbelzapfens und Verluststelle an den Ölzuführungsringen), Ölverbrauch.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

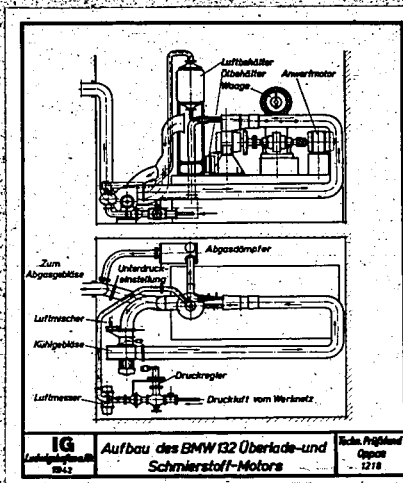
DIN-Formel A 4 (10/1297)

04579/16

04580

Bevor ich zum eigentlichen Thema komme, darf ich Ihnen vielleicht zuerst eine kurze Übersicht über die Durchführung der Ringsteckversuche beim Technischen Prüfstand geben.

Die Bedingungen unter denen die Läufe durchgeführt werden, sind wohl allgemein bekannt, sodass sich hier eine Aufzählung von Einzelheiten erübrigt. Es soll lediglich nochmals die Genauigkeit der Regelung des Motors und der Temperaturen besprochen werden, da diese, wie bekannt, von grösstem Einfluss auf die Versuchsdauer sind. Die gesamte Anlage zeigt schematisch folgendes Lichtbild:



Der Motor mit Bremse und den Zusatzvorrichtungen befindet sich in einem schalldichten Raum, während die Bedienanlage durch Beobachtungsfenster von diesem getrennt in einem für mehrere Prüffelder gemeinsamen Bedienungsgang aufgestellt ist. Die Leistungsmessung erfolgt in üblicher Weise durch eine Wasserbremse mit Schnellwaage, sowie elektromagnetischen Stichtrehzähler. Der Bremswasserdruck

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DN-Formal A 4 (20 x 27)

10471/15

I.G. Farben  
Ludwigshafen

DN-Formal A 4 (20 x 27)

04581

wird mittels Druckregler gleichgehalten, was einen ruhigen Stand der Anzeige zur Folge hat. Die Ablesegenauigkeit des Drehmoments beträgt dadurch  $\pm 100$  g bei 30 kg Belastung, d.h. 0,32%. Die Bedienungseinrichtungen gestatten eine Einstellung des Kraftstoffverbrauchs mittels Pumpenregelung auf  $\pm 0,5$  Vol-%, was im Hinblick auf den auch mit der Temperatur stets etwas schwankenden gewichtsmässigen Verbrauch hinreichend erscheint. Die Auspuffgase werden mit einem Unterdruck von 180 - 200 mm WS von einem Gebläse abgesaugt, das auch die Absaugung der vom Zylinder kommenden erhitzten Kuhlluft übernimmt. Die Kuhlluft selbst wird mit einem zweiten Gebläse erzeugt, wobei die Kuhllufttemperatur durch eine Mischvorrichtung auf  $20^{\circ}$  konstant gehalten wird. Diese arbeitet derart, dass die vom Kühlgebläse angesaugte Luft mittels Regelschieber teils aus dem Raum, teils aus einem Zweigstrom des Heissluftstromes vom Zylinder entnommen werden kann. Die Ansaugluft für den Motor wird vorgewärmt und auf  $40^{\circ}\text{C}$  gehalten. Diese Vorwärmung erfolgt durch eine im Ansaugdämpferbehälter angebrachte elektrische Heizung, verbunden mit elektrischem Feinregler. Eine solche Regelung arbeitet auf  $\pm 0,5^{\circ}$  genau, was sich ebenfalls auf eine gleichbleibende Leistung der Maschine günstig auswirkt. Die Temperaturüberwachung erfolgt teils mit Widerstandsthermometern für die Luft- und Schmierstofftemperaturen, teils mit Thermoelementen für die Zylindertemperaturen. Die Thermoelemente sind auf  $0,1^{\circ}\text{C}$  genau geeicht und gestatten in Verbindung mit den verwendeten Instrumenten eine Regelung auf  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Die Versuche wurden früher nach der Temperatur des Auslasskerzenraumes als Richttemperatur gefahren. Die Unsicherheit des Zustandes der Kerze, sowie Änderungen der Lage und Form der Kerzenringelemente infolge mehrmaligen Ausbaues liessen die im Scheitel des Zylinders veranordnete Messstelle geeigneter erscheinen, zumal Ausfälle der letztgenannten bzw. Fehlanzeigen nur etwa den

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN-Formal A 6 (170 x 237)

2047/18

I.G. Farben

DIN-Formal

04582

zehnten Teil von denjenigen der Kerzenringelemente betragen. Zur Sicherheit ist die Messtelle im Scheitel neuerdings als Doppелеlement ausgebildet, sodass stets beim Ausfall der einen noch eine Ersatzmesstelle vorhanden ist. Bei sachgemäßer Anbringung der Elemente bestehen dabei nur Unterschiede von höchstens  $1^{\circ}\text{C}$ , was hinsichtlich der Schwierigkeit von Temperaturmessung an angeströmten Körpern als ziemlich genau angesehen werden kann. Die Schmierstofftemperatur wird wie die der Luft durch eine elektrische Heizung ebenfalls mittels Feinregler in bekannter Weise auf  $120^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}$  am Öleingang gleichgehalten.

Zur Überwachung der genauen Einhaltung der Ringtemperatur sowie des spezifischen Verbrauchs ist die Messtelle im Scheitel und die der Abgastemperatur mit einem Temperaturschreiber verbunden. Es ist dadurch die objektive Beurteilung der Prüfläufe, besonders da dieselben in Schicht gefahren werden, erleichtert.

Im folgenden sehen Sie noch zwei Aufnahmen der Anlage.



IG Gesamtsicht der Schmierstoff-Prüfanlage

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Luftfahrzeugen & Rhein.

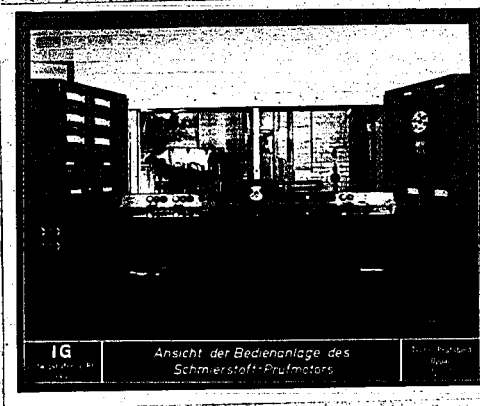
DM-Formul. A 4. (170 x 177)

04582/19

04583

Wir haben für unseren Neuaufbau diese Anordnung der vom Prüfaggregat schallisolierten Bedienanlage gewählt, um für das Versuchspersonal, das diese Versuche in zwölfstündiger Tag- und Nachtschicht fährt, eine weitgehende Lärm- und Geruchsbesse-  
tigung zu erzielen. Sie sehen in diesem Bild nochmals den Prüfmotor mit abgenommenen Luftschacht und die verschiedenen Zusatzeinrichtungen. Der Anwerfmotor, die Wasserbremse auf dem Bild verdeckt durch die Tachowage, links den Druckregler für das Bremswasser und rechts oben den Ansaugluft-Ausgleichbehälter mit eingebauter elektrischer Heizung. Im Vordergrund rechts ist der als hoher schlanker Behälter ausgebildete Öltank zu erkennen. Die Ölverbrauchsmessung erfolgt bei uns volumemässig, weshalb eine langgezogene Form des Behälters hinsichtlich der Standablesung günstig ist.

Das nächste Bild zeigt die Bedienanlage.



Bis auf das Anfahren und die jede Stunde vorzunehmende Schmierstoffverbrauchsmessung können alle Vorgänge von hier aus überwacht bzw. geregelt werden.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DNV-Format A 4 (210 x 297)

B-477-120

I.G. Fa

DNV-Format

200. 11. 48



04584

Die Voraussetzung für die Beurteilung eines Ringsteckversuchs ist die eindeutige Erkennbarkeit des Versuchsendes. Rund 1500 Prüfläufe am Technischen Prüfstand boten Gelegenheit die bis vor einige Zeit noch recht unsicheren Kennzeichen für das Versuchsende, wie sie Durchblasen und Leistungsabfall darstellen, zu beobachten. Es wurden deshalb im Laufe der Zeit zahlreiche Massnahmen zur Verbesserung dieser Erscheinung geprüft. Ich möchte über diese Versuche etwas ausführlicher berichten, da meines Erachtens das Versuchsende bei einigen Prüfstellen noch wenig charakteristisch zu sein scheint.

Bei Versuchsende sollen die in der Ringnut entstandenen Rückstände den Ring festhalten und zwar so, dass ein Durchblasen in Verbindung mit Leistungsabfall auftritt. Damit nun ein deutlicher Leistungsabfall vorhanden ist, soll der Abfall des mittleren Arbeitsdrucks infolge Durchblasen gross sein. Dieser Abfall ist nun im allgemeinen umso grösser je höher der feste Anteil des Rings wird. Im Hinblick auf einen möglichst hohen Querschnitt für den Gasdurchtritt wäre also ein vollkommen fester Ring hier der Bestwert. Wie aus folgendem hervorgeht, ist dies aber für die genaue Erfassung der Laufzeit ungünstig. Es kann nämlich wie mehrfach beobachtet, der Ring so fest werden, dass sich der Hauptanteil der Ölkohle im Nutgrund bildet und der Ring nach aussen gedrückt wird. In diesem Falle dichtet er trotz Festbrennens weiter und ein solcher Lauf kann noch Stunden weitergeführt werden ohne dass Durchblasen oder Leistungsabfall auftritt. Ein Versuchsende zeigt sich in diesen Fällen meistens erst dann an, wenn durch eine Störung im Temperaturgleichgewicht der Kolben oder die Laufbüchse eine geringe Formänderung erleidet und dann das endgültige Durchblasen auslöst. Diese Anschauung wird unterstützt durch die Tatsache, dass die Er-

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DN-Formul. A 4 (212a/217)

21/21

Copyright © 1938, I.G. Farben

I.G. Far

DN-Formul. A

04585

soheinung besonders bei solchen Läufen auftritt, die ein ausgezeichnetes Temperaturgleichgewicht über die Versuchszeit haben, d.h. fast keinerlei Nachregulierung der einmal eingestellten Temperatur erfordern. Es ist deshalb, wie wohl auch bei anderen Versuchsstellen angestrebt wird, wünschenswert, dass ein Versuchsende sich bei einem höchstens 80 bis 90% festen Ring anzeigt. Macht man nämlich die Voraussetzung, dass von Beginn des Festwerdens bis zum vollkommenen Festsitzen des Rings nur eine kurze Zeit vergeht, so würde der Fehler bei Bewertung zweier Läufe mit verschiedenem Anteil des ersten Ringes nicht zu gross sein. Bei einem auf dem ganzen Umfang festen Ring ist dagegen eine Beurteilung, bei welcher Zeit das Festwerden eintrat, schwierig, wenn nicht unmöglich.

Die zur Verbesserung der Anzeige für das Festwerden vorgenommenen Massnahmen sollen im folgenden kurz aufgezählt werden.

Eine Erscheinung, von der man annimmt, dass sie das Festbrennen des Ringes beeinflusst, ist das mehr oder weniger starke Drehen desselben während des Laufs, wie es sich in störenden periodischen Schwankungen des Gasdurchtritts aussert. Bereits im Anfang unserer Versuche mit dem EMW 132 und auch wieder in letzter Zeit wurden, um diesen Einfluss der Ringdrehung bzw. -stellung auf das Festwerden zu untersuchen, Läufe mit arretierten Ringen gefahren. Die Versuche zeigten in einigen Fällen kürzere Laufzeiten als mit freien Ringen, in anderen jedoch längere. Die Streuungen waren aber in allen Fällen gegenüber normaler Ringanordnung gleich gross, sodass diese Ausführung keine Verbesserung brachte. Sie hat ausserdem noch den Nachteil, dass man sich mit arretierten Ringen vom praktischen Betrieb des Motors entfernt und wurde deshalb wieder aufgegeben.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DM-Formal A 4 (270x277)

Ap 47/22

I.G. Farbenindustrie  
Ludwigshafen a. Rhein.

DM-Formal A 4 (270x277)

04586

Eine Massnahme zur Verbesserung des Durchblasens stellt das Weglassen einzelner Kolbenringe dar. Versuche mit derartigen Anordnungen hatten folgende Ergebnisse:

Lässt man nur den ersten Ring und den Ölabetreifring in ihren Nuten, so ist die seitliche Führung des Kolbens zu gering, die Ringe brechen und es tritt von Anfang des Versuchs an ein so hoher Gasdurchtritt auf, dass unter den Druckspitzen des Diagramms, die durch kurzzeitige Störung des Schmierfilms entstehen, kein Versuchsende festzustellen ist. Als weiterer Nachteil ergeben sich Kolbenfresser infolge örtlicher Überhitzungen durch dauernden Gasdurchtritt. Diese Ausführung war also nicht brauchbar.

Lässt man den ersten und dritten Ring in ihrer Nut und bohrt die zweite Ringnut für den Gasdurchtritt an, so bessern sich zwar die oben erwähnten Erscheinungen, eine Überhitzung des ersten Rings sowie gelegentliche Kolbenfresser treten aber auch in diesem Falle auf.

Eine wirkliche Verbesserung ohne die erwähnten Nachteile liess sich durch Wegnahme nur des dritten Rings erreichen. Die Nut des fehlenden Rings wird in diesem Fall um den Gasdurchtritt ins Gehäuse zu erleichtern, mit vier auf den Umfang des Kolbens verteilten 3 mm Löchern versehen. Vorteilhaft ist bei dieser Ausführung noch die Stossücke des zweiten Rings nicht zu klein zu nehmen, damit auch für den Gasdurchtritt eine Möglichkeit gegeben ist. Diese Anordnung ergab ein, abgesehen von wenigen Fällen, sehr gut erkennbares Versuchsende bei Festwerden des ersten Rings, wobei durch die Dichtwirkung des zweiten Rings noch ein genügender Schutz gegen Überhitzung der Ringpartie vorhanden ist.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein

Op 471/23

DIN-Formul. A 4 (210 x 277)

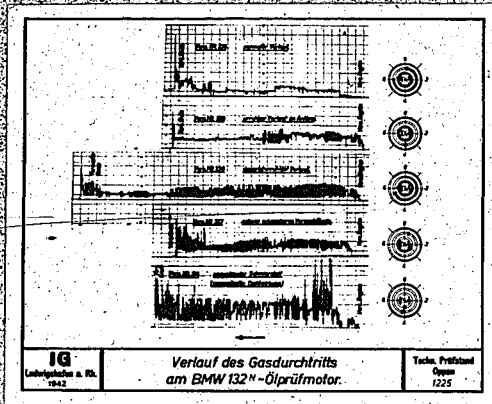
I.G. Far

DIN-Formul

32. 11. 03

04587

In folgenden Bild sehen Sie einige Gasdurchtrittskurven, wie sie üblicherweise auftreten.



Der Druckverlauf wird dabei mit Ringwaage und Schreiber gemessen und ist von rechts nach links zu lesen. Die drei oberen Bilder stellen den in den meisten Fällen erhaltenen Verlauf der Kurve mit deutlich erkennbarem Druckanstieg dar.

Das vierte Bild gibt den Druckanstieg bei anscheinend längerer Dauer des Festwerdens. Der Durchblase-  
druck steigt unter Schwankungen dauernd an, die Leistung fällt dabei zuerst unmerklich und erreicht dann nach einer gewissen Zeit den Grenzwert von 2% Leistungsabfall.

Das fünfte Bild stellt den Druckverlauf eines Schmierstoffs mit mangelhafter Schmierwirkung dar. Diese Form tritt vor allen Dingen bei Stoffen auf, die bei hohen Temperaturen zerfallen, wobei der erste Ring nicht genügend Öl erhält und infolgedessen dauernd Gas durchlässt. Wie aus den Diagrammen hervorgeht, ist diese Gasdurchtrittsmessung ziemlich eindeutig, weshalb die zuletzt beschriebene Ringanordnung auch bis heute beibehalten wurde. Sie gestattet in fast allen Fällen ein gutes Erkennen des Versuchsendes.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN-Format A 4 (210x297)

04587/24

04588

Wenn auch damit das Versuchsende eindeutig beschreibbar ist, so zeigt die Laufzeit selbst bei gleichem Schmierstoff und Erfüllung aller Bedingungen, wie genaue Einhaltung der Temperaturen, normalen Ausbaubefund usw., leider noch gewisse Unterschiede.

Wenn nun diese Versuchserfahrungen in vielen Fällen keine unmittelbare Anwendung in Richtung einer Verbesserung der Versuchsgenauigkeit gestatten, so sollen diese Fälle doch in folgenden mit angeführt werden.

So suchten wir zu ergründen, worauf die in verschiedenen Zeitabschnitten wechselnden Laufzeitstreuungen für Bohring zurückzuführen sind. Wir haben deshalb die Läufe verschiedener Zeiträume entsprechend den verschiedenen Lieferungen von Zylindern, Kolben und Ringen miteinander verglichen. Eine Beziehung war jedoch hierbei nicht erkennbar. Wir haben aufgrund einer allerdings vagen Vermutung, dass Einflüsse der Ansaugluftzusammensetzung bei diesen Streuungen mitspielen, die Windrichtung und Windstärken über längere Zeiträume mit den entsprechenden Laufzeiten für Eichöl verglichen.

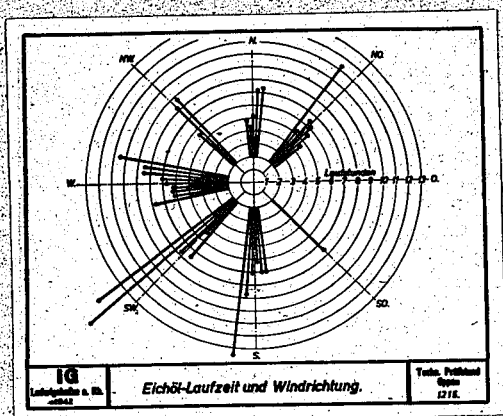
Die Möglichkeit, dass geringe Beimischungen, wie sie in einem Werk chemischer Erzeugnisse ohne weiteres in der Luft vorhanden sind, das Ringstecken im Motor verändern können, ist gegeben, wenn man die während eines zehnstündigen Laufes umgesetzte Luftmenge von rund 2000 kg ins Verhältnis setzt zu der entsprechend geringen Ölumlaufrmenge von 8 bis 10 kg. Diese Möglichkeit besteht umso mehr, als durch die Entwicklung synthetischer Schmierstoffe die Wirksamkeit homöopathisch kleiner Mengen sogenannter Inhibitoren auf die Laufzeit bekannt ist. Auch in diesem Fall lässt sich jedoch kein Zusammenhang erkennen.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

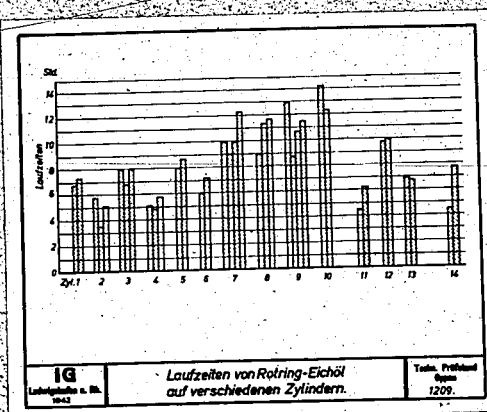
DIN-Formul. A 4 (240x297)

0471/25

04589



Ein Punkt, der besser erfasst werden konnte, ist das unterschiedliche Verhalten einzelner Zylinder bezüglich Laufzeiten und Temperaturen. Das nächste Bild zeigt eine Zusammenstellung solcher Läufe.



Man erkennt daraus, dass bei verschiedenen Zylindern verschiedene Mittelwerte für Rotring Eichöl erhalten werden. Die dargestellten Läufe sind aus Versuchsreihen auf vier verschiedenen Motoren zusammengestellt, wobei jeweils nur solche Reihen verwendet wurden, die als Kontrollversuche zwei oder mehr Rotringläufe enthalten. Eine zusätzl-

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN Formel A 4 (270.2 257)

04571/26

Carl Schilling & Sohn, Chem.

I.G. Farbe  
Lu

DIN Formel A 4

POOR  
COPY

14

POO  
COP

04590

lich vorgenommene Prüfung inwiefern das benutzte Prüfaggregat die Laufzeit bei gleichem Zylinder beeinflussen kann, ergab nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Motoren. So erhielt man z.B. für Rotring-Nichel mit dem gleichen Zylinder auf Motor 1 sieben Stunden, auf Motor 3 sechs Stunden 50 Min. und auf Motor 4 wieder sieben Stunden. Ein anderer Zylinder hatte die sehr kurze Laufzeit von nur 4 Stunden 55 Minuten auf Maschine 1, wobei eine Prüfung auf Maschine 4 vier Stunden 30 Minuten ergab, ein dritter Zylinder lief auf Maschine 4 acht Stunden 40 Minuten und auf Maschine 2 wieder 8 Stunden 15 Minuten. Wenn auch die letztgenannten Werte in ihrer Übereinstimmung etwas günstig erscheinen, so ist daraus doch zu schließen, dass die grossen Unterschiede der einzelnen Zylinder nicht von verschiedenen Motoren herrühren. Andererseits dürften aber die noch vorhandenen Unterschiede verschiedener Läufe mit gleichem Zylinder auf andere Einflüsse zurückzuführen sein.

Einen weiteren Beweis für das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Zylinder erhält man, wenn man die Kersenringtemperaturen verschiedener Läufe bei gleicher Scheiteltemperatur aufträgt.

Fall 2 (12.10)

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN Formst. A 4 (270 x 237)

04590/2

I.G. Farben  
L

DIN Formst. A 4

200 11. 08

POOR  
COPY

14

04591

In dieser Darstellung sind die Bereiche, in denen sich die Temperaturen der Einlass- und Auslasskerze bewegen, als schraffierte Flächen dargestellt. Die Länge der Fläche ist ein Mass für die Anzahl der Versuche mit den einzelnen Zylindern. Neben den stark abweichenden Mittelwerten der Zylinder fällt noch die Streuung innerhalb der Versuchsreihe auf. Letztere dürfte auf die mangelhafte Messgenauigkeit von Kerzenringelementen zurückzuführen sein. Man erkennt jedoch aus dieser Darstellung, dass die Zylinder auch bezüglich der Temperaturverteilung stark voneinander abweichen. Einer praktischen Anwendung dieser Erkenntnisse steht aber auch in diesem Fall entgegen, dass kein Zusammenhang zwischen hohen Temperaturen und kurzen Laufzeiten bzw. umgekehrt, besteht. Zusammenfassend dürfte aber hiermit bewiesen sein, dass Unterschiede in der Rotringlaufzeit einzelner Zylinder auch von einem unterschiedlichen Temperaturzustand der Prüfzylinder herrühren können. Es ist deshalb anzustreben, die Temperaturbezugstelle näher an die Ringpartie zu verlegen, d.h. entweder die Temperatur der Laufbüchse in Höhe des oberen Umkehrpunktes zu messen, oder, falls eine Entwicklung einer für Dauerbetrieb geeigneten Kolbentemperaturmessung gelingt, diese anzuwenden.

Bedingt durch die vorhin erwähnten Streuungen ist es dann auch schwierig sonstige Einflüsse, wie Kolbenspiel, Ringspiel, Ringstellung usw. zu erfassen. Führt man nämlich solche Auswertungen bei den Läufen mehrerer Zylinder durch, so geht die beträchtliche Streuung zwischen den einzelnen Zylindern mit ein und macht das Ergebnis unklar. Will man diese Versuche an einem Zylinder und Kolben vornehmen, so ist für die Erfassung jeder Grösse eine ganze Versuchsreihe nötig. Die Durchführung einer Vielzahl solcher Reihen bei einer Stelle ist heute aus Gründen des Arbeitsaufwandes nicht möglich. Soweit man bei der Auswertung den ersten Weg

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

Dr.-Formel A 9 (170127)

Dr. 471/28

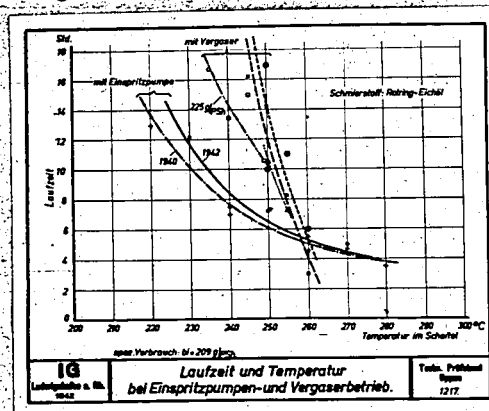


04592

beschreibt, ergab sich als Erfahrung aus einer grossen Anzahl von Versuchen: 1.) Das Kolbenspiel hat, falls nicht zu grosse Unrunde auftreten, praktisch keinen Einfluss auf die Laufzeit. 2.) In gleicher Weise ist der Einfluss der Ringnutbreite und damit des Höhenspiels des Ringe von nur geringem Einfluss. Lediglich bei zu weiter Ringnut wird eine mehr oder weniger starke Laufzeitzunahme beobachtet.

Ein weiterer Punkt soll hier ebenfalls erwähnt werden. Bei den einzelnen Läufen ist der feste Teil des oder der Ringe verschieden gross und unterschiedlich in seiner Lage. Es liegt nun nahe, hier eine Abhängigkeit der Laufzeitverlängerung vom ersten Festwerden bis zu vollkommen festem Ring zu suchen. Wir haben einige Versuchsreihen, die mehrere Rotringläufe enthielten, auch nach dieser Richtung auszuwerten versucht. Leider ist auch in diesem Falle kein klarer Zusammenhang zu erkennen, da die einzelnen Kurven teils eine fallende, teils eine steigende Tendenz haben. Die Erfahrung bestätigt, dass in den weitaus meisten Fällen ein Festwerden des ersten Ringes auf der Einlassseite beginnt und die Laufzeit etwas abnimmt, wenn dabei der Ringstoss sich auf dieser Seite befindet.

Eine der wichtigsten Einflussgrössen auf die Laufzeit ist, wie schon mehrfach erwähnt, die Temperatur des Zylinders bzw. der einzelnen Messtellen. Wir haben, um die Beziehung zwischen beiden festzustellen, mehrere Versuchsreihen gefahren, von denen zwei in einem zeitlichen Abstand von zwei Jahren aufgenommen, das folgende Bild zeigt.



I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rh.

04592/29

04593

Beide Kurven fallen ziemlich genau zusammen und zeigen einen dauernden fallenden Verlauf mit steigender Temperatur.

Wir haben darüberhinaus anschliessend an die geplante Umstellung der Schmierstoffprüfmotoren auf Vergaserbetrieb einige Zylinder auf ihr Temperaturverhalten bzw. ihre Laufzeitabhängigkeit bei Vergaserbetrieb untersucht. Die Ergebnisse, die ebenfalls mit aufgetragen sind, zeigen folgende markante Erscheinung: Die Temperatur-Laufzeitkurven sind bei Vergaserbetrieb wesentlich steiler als bei Betrieb mit Einspritzpumpe. Dies ist insofern bemerkenswert, als damit bei uns zum ersten Male Kurven erhalten wurden, die in ihrer Steilheit den von der DVL gefundenen ähneln. Ich möchte hierbei darauf hinweisen, dass die DVL die einzige Stelle ist, die bisher N-Zylinder mit Vergaserbetrieb gefahren hat. Aus einer weiteren Reihe mit höherem spezifischem Verbrauch geht noch hervor, dass die Laufzeit bei Vergaserbetrieb auf die Gemischeinstellung empfindlich anspricht. Wir werden diese Ergebnisse nochmals überprüfen, es dürfte sich aber bei ihrer Bestätigung die Durchführung von Prüfläufen mit Vergaserbetrieb nicht empfehlen, da bei einer solchen steilen Temperaturempfindlichkeit eine noch wesentlich grössere Streuung der Laufzeiten bei Vergaserbetrieb zu erwarten sein wird. Es müsste also anschliessen an diese Versuche, die vielleicht am besten noch von einer anderen Stelle durchgeführt werden, eine nochmalige Entscheidung über den Betrieb des Motors mit Einspritzpumpe oder Vergaser getroffen werden. Da die DVL bereits Erfahrungen bzw. Einrichtungen für den Betrieb mit N-Zylindern besitzt, wäre es vielleicht am zweckmässigsten, diese Versuche dort vorzunehmen.

Leider gestattet die Zeit nicht, auf diesen wichtigen Punkt näher einzugehen, ich würde es jedoch begrüessen, wenn eine eingehende Besprechung in der Diskussion stattfinden könnte.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DWI-Formul. A 4 (110, 237)

10477/34

04594

Ist nun, wie gesagt, die Streuung der Laufzeit bei Rotring Stöhl schon zu groß, so ist besonders bei Dies die lange Laufzeit erzielen, d.h. Mischungen mit synthetischen Schmierstoffen, die absolute Strenge noch größer. In diesem Falle ist es schwierig, die Härtehaftigkeit von Zusätzen, die eine Verbesserung der Rückstandsbindung erreichen sollen, nachzuweisen. Die unsere Erfahrungen ergaben, sind es oft ganz geringe Beimischungen von nur Bruchteilen eines Prozent, die die Laufzeit oft um 50% mehr und mehr heraufsetzen. Dabei ist es in vielen Fällen gerade eine ganz bestimmte Menge dieses Zusatzes die Wirkung am besten, während mehr oder weniger schnell einen starken Rückgang der Leistung herbeiführt. Eine genaue Bestimmung der richtigen Menge ist hier nur mit Ausprobieren möglich. Es kann leicht durch einen unglücklichen Zusammentreffpunkt die Wirkungsmenge als zu klein oder zu groß festgestellt werden. Die Laufzeit als Beurteilungsgrundlage für diese Schmierstoffe.

Außer der Laufzeit ist bei der Beurteilung eines Motorschmierstoff, wenn man von reinen Ringstücken absieht, auch noch das allgemeine Aussehen der Maschine nach dem Lauf, insbesondere das Kolbens und Zylinders, ein wertvolles Hilfsmittel. Es ist deshalb auch bei allen Prüfungen auf Ringstücken der Anbauhof üblich, ebenso ist es verhältnismäßig, wenn man versucht, diesen Befund mit der Laufzeit in Beziehung zu bringen. Beim Technischen Prüfstand wird deshalb bei den meisten Läufen eine Gewichtsbestimmung der Ölmenge von Kolbenboden sowie von 1. Ring und der 1. Ringnut vorgenommen. Dabei ergibt sich, dass zwar bei Rotringläufen die Ölmenge des 1. Rings der Laufzeit einigermaßen verhältnismäßig ist, dass aber die Rückstände am Kolbenboden sehr stark schwanken. Man erhält bei Rotring am Ring bei 8<sup>00</sup> Stunden Laufzeit im Mittel etwa 2 gr, während beim Kolbenboden das Gewicht zwischen etwa 0,7 und 1,5 gr schwankt.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhod.

DIN-Formul. A 4 (120 + 127)

I.G. Farbenindustrie  
Ludwigshafen a. Rhod.

DIN-Formul. A 4 (120 + 127)

POOR  
COPY 14

04595

Wertet man die Rückstände bei Ölen synthetischer Zusammensetzung aus, so werden die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Es gibt Öle, bei denen die Ringpartie auch nach langen Laufzeiten fest sauber ist, während der Boden ziemlich Rückstand zeigt und umgekehrt. Man kann daraus wohl auf ein unstabiles Verhalten der Rückstandsbildung in Abhängigkeit von der Temperatur schliessen, im gesamten betrachtet, lässt sich jedoch nur in den Fällen, wo ein derartiges Verhalten des Schmierstoffes aus anderen Prüfungen, wie z.B. dem Verdampfungstest, bekannt ist, eine eindeutige Feststellung treffen. Ebenst ist bei Mineralölen mit Zusätzen von mehr als den bei Inhibitoren angewandten Mengen, wie z.B. stark geschwefelten Ölen, meistens ein vom normalen Ausbaubefund abweichendes Rückstandsbild festzustellen. In diesen Fällen ergibt dann die Vollanalyse oft den gewünschten Aufschluss.

Damit kommt man zu einem weiteren Punkt: Die Beziehung zwischen Laufzeit und Analyse des Schmierstoffes.

Betrachtet man bei verschiedenen Schmierstoffen, die, obwohl aus gleichem Grundstoff, auf Grund der Weiterverarbeitung und Behandlung verschiedene Laufzeiten erzielen, die Analysen der Neuöle, so sind in den wenigsten Fällen besondere Merkmale festzustellen. Überhaupt keine Anhaltspunkte erhält man aber bei gleichen Ölen die mit Inhibitorzusätzen behandelt wurden. Auch die Alterungsteste ergeben in diesem Fall keine Unterschiede, die grösser sind als die Messgenauigkeit analytischer Messungen. Trotzdem unterscheiden sich solche Öle in der Laufzeit oft ganz beträchtlich.

Die einzige Untersuchung, bei der bisher eine gewisse Übereinstimmung der Werte gefunden wurde, ist der Conradsontest. Aber auch hier beschränkt sich nach unseren Erfahrungen die Übereinstimmung auf einheitlich aufgebaute Schmierstoffe, wie z.B. paraffinbasierte Öle.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN-Formel A 4 (170-177)

Dr. 471/32

I.G. Farbenindustrie  
Ludwigshafen

DIN-Formel A 4 (170-177)

04596

Nicht viel günstiger liegen die Verhältnisse bei der Analyse der Gebrauchöle. Es können zwar aus der Viskositätsänderung Rückschlüsse auf die im Motorbetrieb zu erwartende Ölverdickung gezogen werden, Prüfungen auf feste Fremdstoffe, Verseifung und Asphaltgehalt aber lassen nur selten eine Übereinstimmung mit dem Ringsteckverhalten bzw. der Laufzeit erkennen. Trotzdem sind diese Analysendaten für die Beurteilung des Dauerverhaltens in Flugmotoren notwendig. Bei diesen ist ja nicht nur die Ringsteckneigung, sondern auch andere Erscheinungen, wie Verschmutzung des Triebwerks und der Hilfsantriebe, oder in besonderen die Schlammbildung für die Brauchbarkeit und Güte eines Schmierstoffs massgebend.

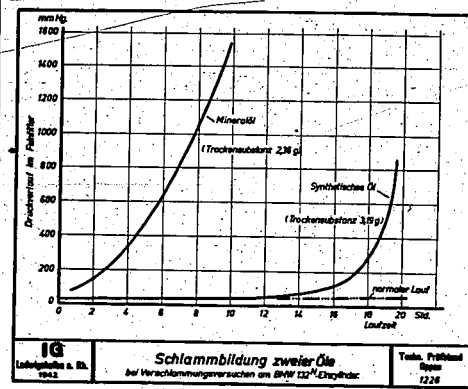
Damit kommt man zu einer Erscheinung im Dauerverhalten von Schmierstoffen, die ich noch erwähnen möchte, und zwar die allgemeine Rückstandsbildung.

Die Erfahrung in Bezug auf diese Rückstandsbildung zeigt zwischen Zylinder und Vollmotor bisher nur eine bedingte Übereinstimmung. Schmierstoffe, die sich z.B. im Einzylinder gut verhalten, ergeben zwar in den seltensten Fällen im 100-Stunden-Lauf des Vollmotors Rückstandsbildung an Kolben und Ringen. Umgekehrt ist es jedoch ohne weiteres möglich und wurde auch mehrfach beobachtet, dass Schmierstoffe trotz kurzer Laufzeit im Einzylinder ein günstiges Verhalten im Vollmotor zeigten. Insbesondere aber ist im Vollmotor vor allem beim Flugbetrieb die erwähnte Schlamm-bildung gewisser Öle ein Umstand, der in seinen Ursachen noch wenig erforscht ist. Eine Untersuchung in grösserem Umfang scheitert in erster Linie daran, dass diese Verschlammung, wie bekannt, am Prüfstand sehr selten, im Einzylinder aber überhaupt nicht zu beobachten war. Wir haben Untersuchungen vorgenommen um den Begriff des Motorschlammes zu definieren. Eine Vollanalyse solcher im Motor gefundener Schlämme ergibt

04597

keine Anhaltspunkte für das Messen des Schlammes bzw. die Stoffe, die hauptsächlich bei der Bildung beteiligt sind. Auch hier muss also der praktische Motorversuch Maßstab für die Verschlammungseigung der Schmieröle sein. Unsere Versuche in dieser Richtung hatten insofern einen Anfängerefolg, als es uns gelungen ist eine Schlamm Bildung auch im Einzylinder - motor zu beobachten.

Die Ergebnisse einiger dieser Versuche zeigt das folgende Bild:



Der Schlamm wird bei dieser Versuchsanordnung der Einfachheit halber nicht durch eine Zentrifuge, sondern durch ein Feinfilter abgeschieden. Die Ordinate der Darstellung zeigt den Druckverlust am Filter, hervorgerufen durch Zusetzen und ist in mm Hg eingeteilt.

Die untere flache Kurve wurde mit einem synthetischen Schmierstoff unter normalen Betriebsbedingungen erhalten. Die darüberliegende Kurve stellt den Druckverlauf für den gleichen Schmierstoff bei besonderen Bedingungen dar und als dritten Kurvenzug sieht man links den Verlauf bei einem unter denselben Bedingungen gefahrenen Mineralöl. Die Reproduzierbarkeit der Kurven wurde durch einige Kontrollversuche nachgeprüft und scheint zufriedenstellend. Eine

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN-Formel A 4 (210 x 297)

04776/34

04598

endgültige Bewertung kann erst aufgrund eines Vergleichs der gefundenen Ergebnisse mit der Praxis erfolgen, die allerdings einige Zeit in Anspruch nehmen werden.

Kann in dem bisher Gesagten ein Überblick über die bis jetzt gemachten Erfahrungen gegeben wurde, so sollen im folgenden noch einige Bedingungen erwähnt werden, die vielleicht zu einer wirklichen Verbesserung der Versuchsgenauigkeit führen können.

Zunächst verspricht, da die Temperaturen des Zylinders ja nie ein genaues Mass für den an der Bildungsstelle der Ölkohle herrschenden Temperaturzustand geben können, die Messung der wirklichen Ringmitttemperatur eine Verbesserung der Messgenauigkeit, Wir beschäftigen uns mit diesen Versuchen, ich darf aber in diesem Punkte auf die ausführlichen und interessanten Ausführungen von Herrn Glaser verweisen.

In zweiter Linie wird nun die Temperatur der Ringpartie von der Ölkühlung, d.h. der an die Ringe gelangenden Ölmenge wesentlich mit bestimmt. Diese wird einen umso grösseren Einfluss haben, da sie ja auch massgebend ist für die zur Umwandlung in Ölkohle an die Ringe gebrachte Substanz. In dieser Richtung dürfte also die genaue Bestimmung bzw. noch besser Einhaltung einer konstanten Schleuderölmenge im Sterngehäuse eine Verbesserung bringen. Unsere Erfahrungen bestätigen dies insofern, als bei neu überholten Maschinen, wo die Spiele zwischen Kurbelzapfen und Pleuellager bzw. Pleuellager und Kurbelwangen ziemlich gering waren, die ersten Läufe bei ganz geringer Rückstandsbildung lange Laufzeiten erzielten. Es besteht dabei die Vermutung, dass es eine günstige Ölmenge gibt, bei der die Laufzeit ein Minimum erreicht, d.h. dass gerade

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN-Formal A 0 (170x217)

04598/3

I.G. Farb

DIN-Formal A

POOR  
COPY 14

04599

soviel Öl an die Kolbenringe gelangt, als auf Grund der herrschenden Umsetzungsgeschwindigkeit in Ölkohle umgebildet werden kann. Eine Vergrößerung dieser Menge müsste theoretisch eine erhöhte Kühlwirkung des Schmieröls und damit eine längere Laufzeit ergeben, eine Verminderung dieser Menge würde weniger Öl als umgesetzt werden kann, an die Ringe gelangen lassen, was im gleichen Sinne eine Verlängerung der Laufzeit bedeuten würde. Wir beschäftigen uns z.Zt. mit derartigen Versuchen, können aber leider noch keine Ergebnisse vorlegen, da das Verfahren noch nicht ganz zur Zufriedenheit arbeitet. Es dürfte aber gerade in dieser Richtung eine Erweiterung unserer Erkenntnisse möglich sein, zumal sich auch andere Stellen mit dieser Frage befassen und so eine nutzbringende Zusammenarbeit erfolgen kann.

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft  
Ludwigshafen a. Rhein.

DIN-Format A 4 (250 x 377)

04599

Ab  
Be

Nr.



I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft Ludwigshafen a. Rh. 04600

**Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau**  
Nr. 548

Schmierstoffprüfung durch Verschleissmessung  
(Vortrag gehalten am 29. Juni 1943 vor der  
Arbeitsgruppe "Schmierstechnik" des Fachaus-  
schusses für Maschinenelemente des VDI)

Übersicht: Es wird gezeigt, dass die Beurteilung eines Schmier-  
stoffes durch Verschleissmessungen weitgehend vom Werkstoff ab-  
hängig ist. Eine Veränderung der Werkstoffpaarung kann eine be-  
trächtliche Verschiebung in der Gütereihenfolge der Schmierstof-  
fe hervorrufen.

Zwischen dem stetigen Metallabtrag und dem Verschleiss bei Fres-  
sen ist streng zu unterscheiden. Es scheint, dass hoher Metallab-  
trag eine gewisse Sicherheit bildet gegen die Zerstörung der  
Oberfläche gleitender Metallteile durch Fressen. Aus diesem Grund  
ist Metallabtrag bis zu einem gewissen Grade als günstig zu be-  
werten.

Abgeschlossen am: 29. Juni 1943 Gr.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. R. Halder  
*MM Halder*

Die vorliegende Ausfertigung 20 enthält

13 Textblätter

3 Bildblätter

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger

Dieser Bericht ist unser Eigentum, alle Rechte aus dem Urheberrechtsgesetz vom 19. 6. 1901 stehen uns zu. Der Inhalt darf weder im Ganzen noch in Einzelheiten vervielfältigt oder dritten Personen ohne unsere ausdrückliche Genehmigung mitgeteilt werden.

Schmierstoffprüfung durch Verschleissmessung

(Vortrag, gehalten am 29. Juni 1943 vor der Arbeitsgruppe  
"Schmiertechnik" des Fachausschusses für Maschinenelemente  
des VDI)

Der Schmierstoff hat die Aufgabe Energie- und Stoffverluste zu vermeiden oder wenigstens herabzumindern. Der Leistungsverlust kann durch Wahl einer bestimmten Zähigkeit auf ein gewisses Mass beschränkt werden. In den seltensten Fällen wird es erforderlich sein, aus Gründen des Leistungsverlustes auf das Grenzflächenverhalten der Schmierstoffe Rücksicht zu nehmen. Dagegen geht der Stoffverlust unter den Bedingungen der Grenz- und Teilschmierung vor sich. Daher muss sich eine gewissenhafte Schmierstoffprüfung mit den Stoffverlusten bei diesen Schmierzuständen befassen.

Der Technische Prüfstand beschäftigt sich schon seit einer Reihe von Jahren mit Versuchen, die bewusst darauf abgestellt waren, die Vorgänge zu studieren, die eintreten, wenn die verschleisslose Schmierung versagt. Der heutige Stand dieser Versuche soll im folgenden kurz geschildert werden.

Als Versuchsgesät dient eine Maschine wie sie im Prinzip in Bild 1 (1107) dargestellt ist. Zwei auf einer Welle sitzende Trommeln werden durch einen Motor über ein Untersetzungsgetriebe und eine Pleuelstange in drehschwingende Bewegung gesetzt. Die Trommeln sind mit polierten und gehärteten Stahlbändern bespannt, die als Reibfläche dienen. Die Verschleissstücke, die als zylindrische Stifte aus verschiedenem Material ausgebildet sind, werden von unten gegen die Stahlbänder gedrückt und über einen Hebel belastet. Reibfläche und Verschleissstück sind in das Prüföl getaucht, das über ein Ölbad durch elektrische Heisschlangen auf gleichbleibender Temperatur gehalten wird. Die Verkürzung des Stiftes infolge des Verschleisses kann am Belastungshebel mit Hilfe einer Mikrometeruhr gemessen werden. Die Umdrehungszahl an der Kurbel beträgt 81 pro Minute; daraus ergeben sich 162 Hiebe pro Minute bei einer mittleren Gleitgeschwindigkeit von 22,3 cm/sec. Es ist zu vermuten, dass bei einer solchen Bewegung an den Totpunkten Grenzreibung herrscht und in der Mitte flüssige oder

04602

Bericht Nr. 548 des Techn.-Prüfstandes Oppau, Seite 3

halbflüssige Schmierung vorhanden ist. Zu dieser Annahme kommt man durch Messung des Kontaktwiderstandes. Es konnte mit Hilfe der Braun'schen Röhre festgestellt werden, dass an den Totpunkten Kurzschluss und in der Mitte ein Widerstand vorhanden ist, der stärkeren Schwankungen unterworfen ist und kurzzeitig den Wert unendlich erreicht. Mit diesem Gerät wurden nun eine Reihe von Ölen untersucht und dabei zwei verschiedene Werkstoffe angewandt.

Bild 2 (1402) zeigt einige Ergebnisse bei Verwendung von glatten und gehärteten Stahlbändern und von Verschleisstiften aus Aeterna VL 22. Dieses Material besteht in der Hauptsache aus Kupfer (51%), Zink (42%) und enthält geringe Mengen von Mangan, Aluminium, Eisen, Zinn, Silizium, Blei und Nickel. Das Bild lässt erkennen, dass bei Verwendung dieses Werkstoffes (im Bild mit Bronze bezeichnet) S-haltige Produkte sehr hohen Abrieb ergeben. Beim Übergang auf einen anderen Werkstoff wie z.B. Eisen (Schweisseisendraht) ergeben sich ganz andere Verhältnisse. Mit Rüböl wird dabei ein Abrieb erzielt, der mit mehr als 2 mm in 20 Stunden mit Abstand den grössten Wert erreicht.

Rizinusöl ergibt ähnlich hohe Verschleisszahlen, aber erst bei Temperaturen über 65°C. Dagegen zeigt E 426 gerade umgekehrtes Verhalten mit hoher Metallabtragung bei niedriger Temperatur und mit geringem bei hoher Temperatur.

Interessant ist, dass der S-Ester ganz ähnlichen Verlauf zeigt wie E 515, während die Mischung beider Produkte sich ganz anders verhält. Es liegt hier offenbar ein Mischungseffekt vor. Die Verschleisskurve des S-Esters ist hier gezeichnet auf Grund der Messung an der Mikrometeruhr. Tatsächlich stellte sich bei der Nachprüfung heraus, dass der aus weichem Eisen bestehende Stift einen kaum nachweisbaren Verschleiss zeigte und dass dagegen bei Temperaturen über 100°C das harte Band mit einer Stärke von 0,2 mm bis auf eine papierdünne Schicht abgenutzt war. Ein solches Verhalten wurde in dieser Masse bisher nur bei diesem S-Ester beobachtet. Im Verlauf der weiteren Ausführungen wird nochmals darauf eingegangen. In Bild 3 (1403) sind nochmals Ergebnisse dargestellt, die mit denselben Werkstoffen und unter den gleichen Bedingungen wie im vorhergehenden Bild erhalten wurden. Geprüft wurden 4 Öle, die nach ihrer Zähigkeit zu den Flugmotorenölen gehören. K 7 ist ein Mineralöl, SS 902 F 25 ist ein synthetisches Flugmotorenöl mit Esterzusatz, LK 2200 und

04603

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 4

M 620 zwei Versuchsöle, die nicht mineralölöslich sind. Das Bild lässt erkennen, dass sich der Übergang von einem Werkstoff auf den anderen bei K 7 und M 620 nur sehr wenig auswirkt, im Gegensatz zu den beiden anderen Schmierstoffen, bei denen eine Umkehrung im Verschleissverhalten eintritt. Diese Versuche wurden alle mit glatten, polierten Stahlbändern, also mit praktisch gleicher Rauigkeit, durchgeführt. Um den Einfluss der Rauigkeit zu studieren, wurden nun Stahlbänder, die vorher einer Behandlung in Sandstrahlgebläse unterzogen wurden und eine Rauigkeit von rd.  $10 \mu$  erhalten hatten, als Reibfläche verwendet. Eine Widerstandsmessung ergab im ganzen Bereich Kurzschluss, sodass man Grenzreibung annehmen kann. Da der Abrieb dabei, wie erwartet, sehr hoch lag, wurde die Versuchsdauer auf nur 20 Minuten festgesetzt. Die mit diesen 4 Ölen erzielten Ergebnisse sind weniger temperaturabhängig und daher eindeutiger (Bild 4 - 1404); ausserdem verschieben sich gegenüber der Verwendung glatter Gleitflächen die Ergebnisse hinsichtlich Reihenfolge sehr beträchtlich. Interessant ist vor allem, dass K 7, das reine Kohlenwasserstofföl, mit einem sehr geringen Abrieb sich stark von den 3 übrigen Schmierstoffen, die Sauerstoff enthalten, heraushebt. Bei Verwendung glatter Bänder liegt dagegen K 7 verhältnismässig hoch. Diese Verschiebung dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bei Verwendung rauher Bänder das Gerät tiefer im Gebiet der Grenzreibung arbeitet als bei glatten, wo -wenigstens in der Gegend des Geschwindigkeitsmaximums- Teilschmierung, z.T. auch Vollschmierung, vorhanden ist.

Um die Frage des Metallabriebes noch näher untersuchen zu können, haben wir ein Gerät gebaut, das in seiner Art keine Neuerung bedeutet<sup>+)</sup>, für die Zwecke der Schmierstoffprüfung jedoch kaum verwendet worden ist. Wie Bild 5 (1414) zeigt, wird dabei eine feststehende Walse gegen eine unlaufende Scheibe aus Hartmetall gedrückt, die durch tropfenweise Ölzufuhr geschmiert wird. Die Scheibe hinterlässt auf der Trommel nach einer bestimmten Versuchszeit, die in der Regel 10 Minuten betrug, einen Einschliff von bestimmter Länge, der bei jedem Öl verschieden gross ist. Drehzahl der Scheibe und

<sup>+) Skoda-Sawinmaschine</sup>

04604

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 5

Belastung der Walse können je nach Bedarf gewählt werden. Die Einschliffe werden mit Hilfe eines Messmikroskops ausgemessen und dann aus ihrer Länge das ausgeschliffene Volumen errechnet. In Bild 6 (1412) sind einige Ergebnisse mit diesem Gerät dargestellt. Es wurden 14 Öle der verschiedensten Zusammensetzung bei einer Belastung von 20 kg bei 210 U/min (Umfangsgeschwindigkeit 33 cm/sec) und einer Versuchsdauer von 10 Minuten geprüft, wobei Walzen aus verschiedenem Werkstoff zur Anwendung kamen. Die Schmierstoffe wurden nach den Ergebnissen, wie sie auf der Stählwalze erzielt wurden, geordnet. Rüböl mit dem grössten Einschliff steht an letzter Stelle. Führt man denselben Versuch mit Gusseisen durch, so zeigen sich erhebliche Verschiebungen, Rüböl bleibt zwar noch an letzter Stelle, dagegen rückt der S-Ester auf die erste. Bei Rotguss wird der grösste Einschliff mit RH 4 erzielt, was stark im Gegensatz steht mit dem Ergebnis bei Verwendung von Stahl. Rizinusöl tritt hier ebenfalls durch grösseren Verschleiss hervor, ebenso wiederum Rüböl. LK 2200 steht mit dem kleinsten Einschliff an erster Stelle. Die grössten Unterschiede zwischen den einzelnen Ölen zeigt sich bei Leichtmetall. Hier fallen besonders LK 2200 und M 620 durch sehr starken Einschliff auf, dann folgen S-Ester und SS 902 F 25. Bei Lagermetall einer Zinn-Bleilegierung wirkt sich anscheinend besonders der S-Gehalt verschleiss-erhöhend aus. Die niedrigsten Werte ergaben hier M 620 und LK 2200. Dieses Bild zeigt also sehr anschaulich, wie verschieden das Verhalten der Schmierstoffe gegenüber den einzelnen Metallen sein kann. Es ist dabei zu erwähnen, dass die Einschliffe nicht in allen Fällen ein metallisch blankes Aussehen besitzen, sondern häufig eine rötliche, graue bis schwarze Färbung zeigen. Die Folgerung, dass es sich bei dem Metallabtrag zum Teil um chemische Vorgänge handelt, ist naheliegend. Wie weit solche Versuche für die Praxis ausgewertet werden können, bedarf noch der Untersuchung. Man könnte sich z.B. vorstellen, dass man aus der Grösse der Einschliffe auf die Verwendbarkeit als Schneidöl Schlüsse ziehen kann. Darnach wäre Rüböl für Stahl und Gusseisen ein ausgezeichnetes Schneidöl, was ja auch tatsächlich der Fall ist.

04605

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 6

Von Wichtigkeit dürfte bei diesen Versuchen vor allem die Tatsache sein, dass das Auflösungsvermögen sehr beträchtlich ist und dass die gemessenen Unterschiede wesentlich grösser sind als bei Reibungsmessungen. Solche Untersuchungen über Metallabtragungen bei Schmierung sind nicht ohne Zusammenhang mit den bei der Schmierstoffbeurteilung üblicherweise gemessenen Grössen, wie z.B. einer Reibungszahl. Anlässlich der Prüfung zahlreicher synthetischer Ester vom Werk Leuna konnte beobachtet werden, dass die in einem Reibungsmesser (Kettenmaschine) festgestellten  $\mu$ -Werte mit der Grösse der Einschliffe auf der Stahltrommel in gewissen Zusammenhang stehen. In Bild 7 (1407) sind die Ergebnisse mit 35 synthetischen Estern und dazu Rüböl und Knochenöl je durch einen Punkt dargestellt. Man erkennt, dass diese Punkte alle in einen gewissen Bereich zu liegen kommen, der sich in langgestreckter, schmaler Form vom Gebiet hoher Reibungszahl, aber kleiner Metallabtragung, herunterzieht in das Gebiet niedriger Reibungszahl und grossen Abriebs. Es ist wahrscheinlich, dass diese hier beobachtete Gesetzmässigkeit noch deutlicher in Erscheinung tritt, wenn beide Messungen mit gleichem Werkstoff und unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden könnten.

Die beiden hier geschilderten Geräte messen nur eine Form des Verschleisses, nämlich die stetige, nur in mikroskopisch kleinen Teilchen sich vollziehende Abtragung des Werkstoffs. Sie tritt hauptsächlich dann auf, wenn sich die Werkstoffpaarung durch grosse Härteunterschiede auszeichnet. Laufen gleiche Werkstoffe oder Werkstoffe von ungefähr gleichen Härten aufeinander, so tritt eine wesentlich gefährlichere Form des Verschleisses ein, nämlich Verschleiss bei Fressen.<sup>+)</sup>

<sup>+) S. Anton Eichinger: Verschleiss metallischer Werkstoffe  
Mitteilungen aus dem KWI-für Eisenforschung zu Düsseldorf</sup>

Bericht

Bei d

Geräte

Erach

mäss

hiers

zwei

neutr

halte

(1420

von d

schle

anste

und m

ist a

Zeite

schli

nehab

bemex

nochm

denen

und 3

ergit

ringe

gegen

reite

Stahl

also

wurde

härte

an h

04606

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppan, Seite 7

Bei der laufenden Untersuchung zahlreicher Schmierstoffe in verschiedenen Geräten konnte immer wieder beobachtet werden, dass zwischen diesen beiden Erscheinungsformen des Verschleisses ein Zusammenhang besteht. Diese Gesetzmässigkeit soll anhand von 3 Schmierstoffen näher erläutert werden. Es wurde hierzu ausgewählt Rüböl und der oben bereits genannte Schwefelester, also zwei Öle, die sehr entgegengesetztes Verhalten zeigen, ferner als dritter, neutraler Schmierstoff, K 7, ein Mineralöl.

Diese drei Schmierstoffe wurden zunächst hinsichtlich ihres Verhaltens bei langsamem Metallabtrag besonders gründlich geprüft. Bild 8 (1420) zeigt den Abrieb eines Eisenstiftes aus weichem Eisen in Abhängigkeit von der Laufzeit bei Verwendung rauher, gehärteter Stahlbänder bei zwei verschiedenen Temperaturen. Rüböl zeigt dabei einen fast geradlinigen, steil ansteigenden Kurvenverlauf, d.h. der Abrieb am weichen Eisen ist sehr gross und mit der Zeit fast gleichbleibend. Die Glättung des rauhen Stahlbandes ist also gering. Demgegenüber nimmt bei S-Ester die Stiftverkürzung in der Zeiteinheit sehr schnell ab, woraus man auf eine starke Glättung am Band schliessen muss, die auch tatsächlich schon durch blossen Augenschein wahrnehmbar ist. K 7 zeigt weder einen starken Abrieb am Eisenstift, noch eine bemerkenswerte Veränderung am harten Stahlband. In Bild 9 (1418) links sind nochmals die Ergebnisse der 20 Stundenläufe mit glatten Bändern und verschiedenen Temperaturen für diese drei Schmierstoffe zusammengestellt (s. Bild 2 und 3). Auch bei dem hauptsächlich im halbflüssigen Gebiet verlaufenden Zustand ergibt Rüböl mit weichem Eisen hohen Abrieb, K 7 und S-Ester einen sehr geringen. Letzterer wiederum zeigt sein stark verschleissförderndes Verhalten gegenüber gehärtetem Stahl und zwar vor allem bei hoher Temperatur. Wie bereits eingangs erwähnt, war bei Temperaturen über 100°C das 0,2 mm starke Stahlband beinahe völlig durchgeschauert. Der Abrieb am harten Stahlband ist also ungleich grösser als am Weicheisenstift. Zur Kontrolle dieser Ergebnisse wurde ein weiterer Versuch durchgeführt, wobei ein gehärteter Stift mit ungehärtetem Band gepaart wurde. Wie erwartet, trat hier der weit grössere Abrieb am harten Stift auf.

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 8

Die Ergebnisse aus der Prüfung an der Einschleifapparatur sind im gleichen Bild 9 (1418) rechts dargestellt. Als Werkstoff wurde ungehärteter Kohlenstoffstahl verwendet. Hier stellt sich die gleiche Reihenfolge ein, wie bei den Versuchen in der Verschleissmaschine mit rauhen Bändern (s. Bild 8 1420), allerdings nur in den ersten 10 Minuten, solange die Stahlbänder annähernd ihre ursprüngliche Rauigkeit besitzen und nicht wie bei S-Ester stark geglättet sind.

Diese Abriebversuche geben also in ihrer Gesamtheit über die drei Schmierstoffe folgendes Bild. Rühöl erzeugt gegenüber ungehärtetem Stahl und weichem Eisen bei allen Temperaturen mit Abstand den grössten Verschleiss. Gegenüber gehärtetem Stahl tritt dieses Angriffsvermögen stark in den Hintergrund. Bei S-Ester liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt. Der Abrieb von gehärtetem Stahl ist besonders bei hoher Temperatur wesentlich stärker als an weichem Eisen. K 7 verhält sich gegenüber allen Stahl- und Eisensorten ziemlich neutral. Es ist nun interessant, wie sich die so charakterisierten Öle in den verschiedenen Prüfmaschinen hinsichtlich des Verschleisses bei Fressen verhalten. Diese Untersuchung wurde an drei Geräten vorgenommen und zwar an der Almen-Wielandmaschine, dem Faalex-Ölprüfer und der Vierkugelmaschine. Die Prüfbedingungen sind bei diesen Apparaten so auf den Werkstoff der Prüfelemente abgestimmt, dass bei Verwendung der meisten Öle ein Fressen beobachtet werden kann. Bei der Almen-Wielandmaschine wird zur Herstellung der Prüflager weicher Einsatzstahl (etwa 150 Vickershärte) und für die Welle ungehärteter Werkzeugstahl (etwa 170 Vickershärte) verwendet (s. Bild 10 - 1415). Da diese Werkstoffpaarung leicht zum Fressen neigt, kommt die Almen-Wielandmaschine mit verhältnismässig geringen Drücken aus. Die Faalexmaschine, die zwei Stahlarten mit grösseren Härteunterschieden verwendet, benötigt höhere Flächenpressungen. Die grösste spezifische Belastung tritt an der Vierkugelmaschine auf, wobei zu bemerken ist, dass dieser nach der Hertz'schen Formel errechnete Druck vermutlich gar nicht vorhanden ist, da die Quetschgrenze dabei überschritten wird. Die Vierkugelmaschine arbeitet auch bei sehr hoher Gleitgeschwindigkeit, sodass auch mit hoher thermischer Belastung an den Schmierstellen gerechnet werden muss.



04608

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfatandes Oppau, Seite 9

In diesen drei Geräten wurden die drei Schmierstoffe geprüft. Bei der Almen-Wielandmaschine wird die Belastung stufenweise gesteigert, bis Fressen eintritt. Mit Rüböl konnte bis zum Erreichen der Höchstlast der Maschine kein Fressen beobachtet werden (Bild 11 - 1416). Dagegen trat bei S-Ester und K 7 frühzeitig Fressen ein. Man findet also, dass der Schmierstoff, der mit ungehärtetem Stahl und weichem Eisen sehr grossen Abrieb ergibt, bei der Beanspruchung der Wielandmaschine im Stande ist, das Fressen zu verhindern. Es scheint, dass hier die Ähnlichkeit der verwendeten Werkstoffe ausschlaggebend ist. Prüft man nach dem gleichen Verfahren in der Falxmaschine, so machen sich dabei die härteren Prüfelemente bemerkbar. Man beobachtet eine Verschiebung der Ergebnisse zu Gunsten des S-Esters und zu Ungunsten des Rüböls, das hier bereits ein Fressen der Prüfelemente ergibt, während bei S-Ester ein solches ausbleibt. Bei diesem Schmierstoff kann man an den noch unversehrten Prüfelementen auch erkennen, dass der Verschleiss an den harten Prüfbuchsen den der Welle wesentlich übersteigt. Dies ist eine Bestätigung der an der Verschleissmaschine gefundenen Ergebnisse. Die Untersuchung wurde nunmehr auch an der Vier-Kugelmaschine durchgeführt, wobei die Methode, der sich das Heereswaffenamt zur Prüfung der Getriebeöle bedient, angewandt wurde. Es wird hier nicht eine Fressbelastung ermittelt, sondern man stellt fest, wie gross der durch das „Fressen“ verursachte Materialverschleiss ist. Hierzu werden bei verschiedener Belastung 1 Minutenläufe durchgeführt und darnach der Durchmesser der Verschleisskalotten an den 3 unteren Kugeln gemessen. Von einer bestimmten Belastung an kann die Wärmeentwicklung an den Berührungsstellen so stark ansteigen, dass Verschweissen der Kugeln eintritt. Verschleiss - durchmesser und Schweissbelastung werden als Mass für die Gesignetheit eines Hochdrucköls betrachtet (Bild 12 - 1417). Nach diesem Verfahren wird S-Ester ausgezeichnet bewertet, während Rüböl stark abfällt und sich nur wenig besser verhält als K 7. Man sieht also auch hier, dass hoher Metallabtrag mit einer günstigen Bewertung beim Fressen Hand in Hand geht.

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 10

Man könnte sich nun auf den Standpunkt stellen, dass die verschiedene Bewertung der drei Schmierstoffe, wie sie in den drei Geräten gefunden wurde, gar nicht eine Folge des verschiedenen Werkstoffes ist, sondern auf die verschiedenen Versuchsbedingungen, wie Gleitgeschwindigkeit, Flächendruck und als Folge davon die Temperatur, die sich auf verschiedene Höhen einstellt, zurückzuführen ist. Bis zu einem gewissen Grade ist diese Annahme auch richtig. Dass aber der Werkstoff dabei einen wesentlich stärkeren Einfluss ausübt, sollen die folgende Versuche zeigen, die unter mechanisch gleichen Bedingungen durchgeführt wurden, bei denen die einzige Veränderliche der Werkstoff ist.

Verwendet man bei den eben geschilderten Versuchen in der Vierkugelmachine an Stelle der normalen, handelsüblichen Kugeln mit rd. 800 kg/mm<sup>2</sup> VH solche von rd. 400 kg/mm<sup>2</sup>, wie sie uns von den Deutschen Kugellagerfabriken hergestellt wurden, so erwartet man nach dem bisher Gesagten eine Verschiebung zu Gunsten des Rüböls. Wie das Bild 12 (1417) zeigt, tritt diese auch tatsächlich -wenigstens unter 150 kg- ein. Noch stärker macht sich diese veränderte Bewertung bemerkbar bei Verwendung von Gusseisen -kugeln. Hier bleibt Rüböl selbst bei Belastungen bis zu 400 kg noch überlegen. Einen tieferen Einblick in die Vorgänge während dieser 1-Minutenläufe vermitteln diese Verschleissdurchmesser jedoch nicht. Man zieht hier am besten die Reibungsdiagramme heran, aus denen interessante Schlüsse gezogen werden können (Bild 13 - 1419). Man erkennt aus Diagramm oben links, dass z.B. bei K 7, normalen Kugeln und 20°C Öltemperatur nach knapp einer Sekunde die Reibungszahl stark ansteigt, ein Zeichen, dass Fressen eingetreten ist. Dieser Zustand dauert hier etwa 20 Sekunden, dann fällt die Reibungszahl stark ab und verläuft von da an unverändert und gleichmässig in einer Parallelen zur Grundlinie. Bei Rüböl ist das Diagramm ähnlich, nur ist die Zeit bis zum Fressen etwas länger und die Fressdauer geringer. Bei Schwefelester kann ein eigentliches Fressen nur in schwachen Ansätzen festgestellt werden. Die bei diesem Öl in allen anderen Geräten beobachtete hohe Reibungszahl macht sich auch hier bemerkbar. Das Zustandekommen dieser Rei-

bungsverhältnisse kann man sich, wie folgt erklären. Im Augenblick des Versuchsbeginns stellt sich halbflüssige Reibung ein, die jedoch nicht aufrecht erhalten werden kann. Die Dauer dieses Reibungszustandes hängt ab vom Grenzflächenverhalten des Schmierstoffs, aber auch von der Zähigkeit (s. Bericht Nr. 486).

Mit Beginn des Fressens wird die Temperatur an der Schmierstelle stark ansteigen. Das führt

1. zu einer Steigerung der chemischen Aktivität,
2. zu einer Veränderung der Werkstoffe, zum mindesten an der Oberfläche und
3. zu einer Veränderung des Schmierstoffs.

Diese 3 Faktoren wirken zusammen, sie führen eine Beendigung der Periode des Fressens herbei und leiten den Vorgang über in stetigen Metallabtrag. Für K 7 dauert diese Zeit verhältnismässig lange, d.h. es sind wesentlich höhere Temperaturen erforderlich als bei Rüböl. Das ist auch schon an der Tatsache erkenntlich, dass bei Rüböl keine blauen Anlauffarben an den Kugeln feststellbar sind im Gegensatz zu K 7. Bei Rüböl genügt also schon eine geringe Temperatursteigerung, um an den Gleitflächen wieder einen tragbaren, wenn auch nicht den idealen Schmierzustand herzustellen. Bei dem chemisch sehr wirksamen S-Ester genügt schon die geringe Anlaufzeit der ersten Sekunden, um die für einen stetigen Metallabtrag erforderliche Temperatur zu erzeugen. Der Metallabtrag dürfte in diesem Fall im wesentlichen ein chemischer Vorgang sein.

Die durch das Fressen hervorgerufene Temperatursteigerung und die in Zusammenhang damit erfolgende Veränderung von Werk- und Schmierstoff kann künstlich dadurch gefördert werden, dass von vorneherein ein anderer Werkstoff oder eine höhere Temperatur angewandt wird. So geben z.B. die Kugeln mit  $400 \text{ kg/mm}^2$  VH mit K 7 eine etwa um  $1/3$  kürzere Fressdauer. Bei Rüböl bleibt das Fressen überhaupt aus, daher die günstige Beurteilung nach Bild 12 (1417). Einen ähnlichen Effekt erhält man auch durch Anwendung höherer Ausgangstemperaturen. Die Zeit bis zum Beginn des Fressens wird zwar verkürzt,

04611

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 12

ebenso aber auch in sehr beachtlicher Masse die Fressdauer. Diese Versuche an den verschiedensten Maschinen haben also gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen Metallabtrag und dem Verschleiss bei Fressen tatsächlich vorhanden ist. Solange eine Schmierstoff-Werkstoffkombination unter den herrschenden Bedingungen die Bildung von Metallabtrag in genügender Masse zulässt, solange wird ein Fressen der Gleitflächen verhindert. Diesen Vorgang kann man vielleicht wie folgt erklären: Wie bereits angedeutet, scheint der Metallabtrag in erster Linie auf chemischen Vorgängen zu beruhen. Es bildet sich unter der Einwirkung des Öls bei den durch die Reibung bedingten Temperaturen an den Gleitflächen eine Schutzschicht aus, die leicht und schnell beseitigt wird, aber ebenso schnell wieder entsteht. Solange dieser Vorgang aufrecht erhalten bleibt, wird ein Fressen der Metallflächen vermieden. Hoher Metallabtrag ist also als günstig zu bewerten; jedoch wird man auch hier eine gewisse Grenze, ein Optimum, annehmen müssen. Der Metallabtrag wird vermutlich dann in der günstigsten Höhe liegen, wenn er bei allen vorkommenden Betriebsbedingungen gerade so hoch liegt, dass ein Gleiten ohne Fressen gesichert ist.

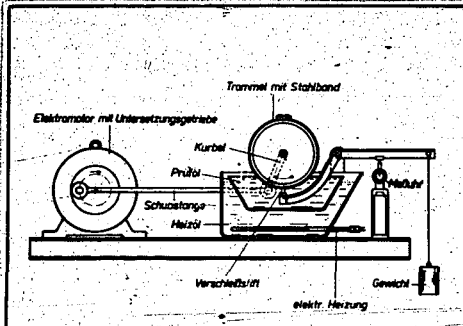
Aus diesen Versuchen geht ferner hervor, dass überall da, wo Verschleiss stattfindet, das Metall eine sehr bedeutsame Rolle spielt. Der Einfluss der Versuchsbedingungen, wie Gleitgeschwindigkeit, Flächenpressung und Temperatur an der Gleitstelle, ist zweifellos vorhanden. Der Einfluss des Werkstoffes ist jedoch mindestens ebenso bedeutsam als der der Versuchsbedingungen. Es erscheint daher nicht angängig, Versuchsergebnisse aus verschiedenen Prüfmaschinen zu vergleichen und dabei nur die Versuchsbedingungen, wie z.B. Flächendruck und Temperatur als die Faktoren anzusehen, die eine Verschiebung der Schmierstoffbewertung hervorrufen können. Eine Bewertung von Prüfmaschinen nach Flächendruck und Temperatur ist erst dann berechtigt, wenn annähernd gleiche Werkstoffe zur Anwendung kommen.

Da letzten Endes durch die Prüfmaschine das Verhalten der Schmierstoffe in der Praxis untersucht werden soll, muss auf jeden Fall die Forderung gestellt werden, zum mindesten auf dem Gebiet der Werkstoffe der zur Anwendung kommenden Prüfelemente Angleichung an die Praxis zu suchen. Es ist zweifellos falsch, z.B. die Prüfung von Getriebeölen an Elementen aus weichem Stahl oder Eisen vorzunehmen, mögen auch die sonstigen Bedingungen noch so gut mit denen der Praxis übereinstimmen.

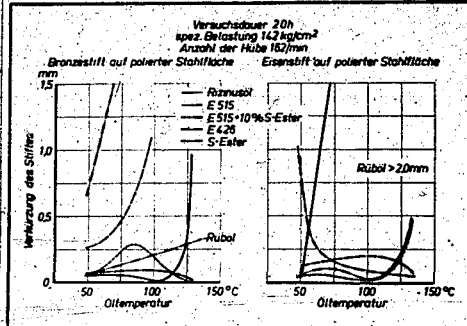
04612

Bericht Nr. 548 des Techn. Prüfstandes Oppau, Seite 15

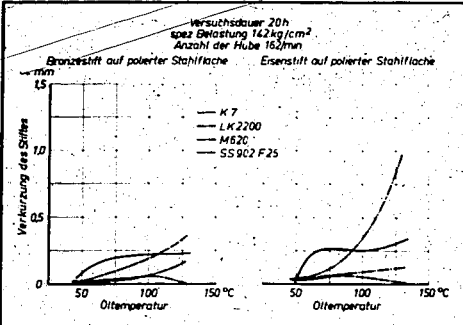
Die Versuche haben ferner gezeigt, dass es möglich ist, die einzelnen Ergebnisse der verschiedensten Prüfmaschinen in eine gegenseitige Beziehung zu bringen. Es ist beabsichtigt, auf diesem Gebiet noch weiter zu arbeiten, da wir hoffen, dabei einen tieferen Einblick in die Vorgänge der Schmierung zu erhalten. Wenn es gelingt, von einem Prüfgerät zum anderen einen solchen Kontakt herzustellen, dass man aus den Ergebnissen von einem oder zwei Geräten die der übrigen voraussagen kann, dann wird auch der Übergang vom Versuchsgerät zur Praxis nicht mehr schwer sein.



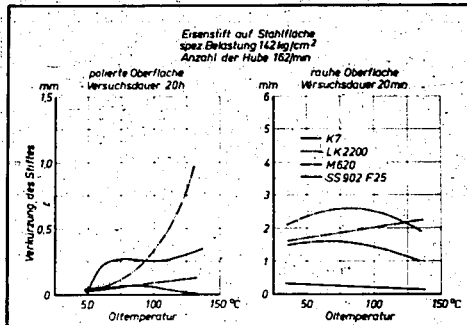
IG  
Lehrplatt Nr. 1043  
Verschleißmaschine  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1102



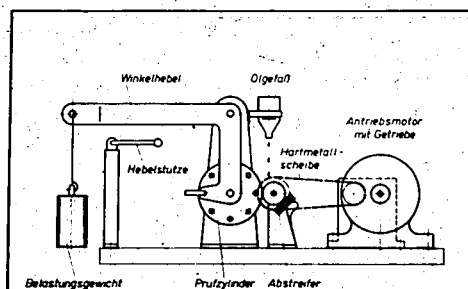
IG  
Lehrplatt Nr. 1043  
Verschleiß in Abhängigkeit von der Temperatur  
bei verschiedenen Werkstoffen  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1102



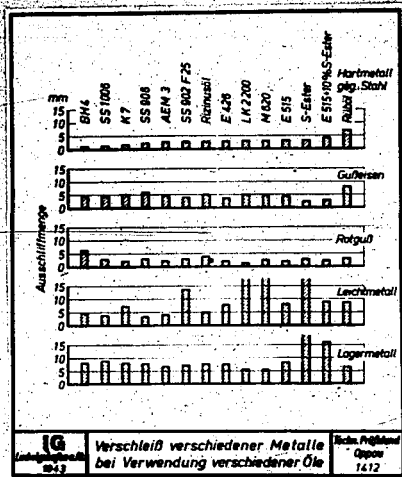
IG  
Lehrplatt Nr. 1043  
Verschleiß in Abhängigkeit von der Temperatur  
bei verschiedenen Werkstoffen  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1102



IG  
Lehrplatt Nr. 1043  
Verschleiß bei verschiedener  
Oberflächenrauigkeit  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1102

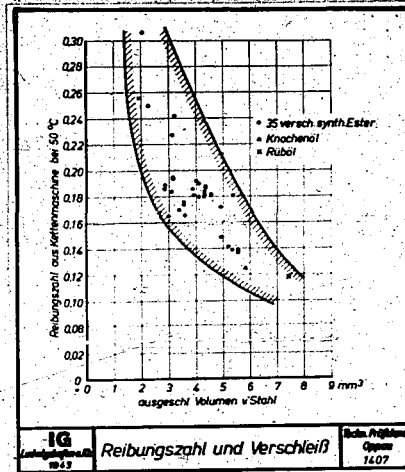


IG  
Lehrplatt Nr. 1043  
Einschliff-Apparatur  
Techn. Prüfstand  
Oppau  
1102



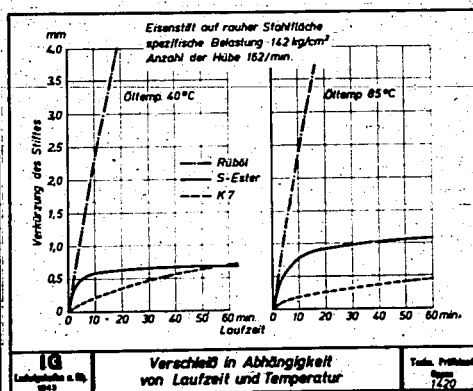
IG Versleiß verschiedener Metalle bei Verwendung verschiedener Öle  
Techn. Prüfstand Oppau 1412

6



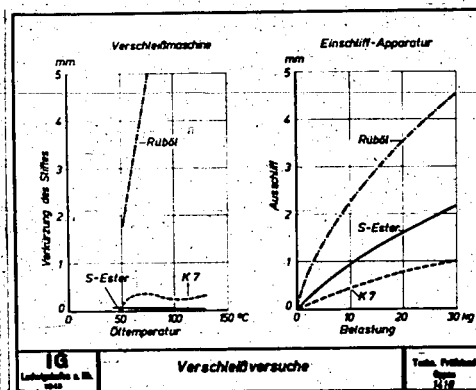
IG Reibungszahl und Versleiß  
Techn. Prüfstand Oppau 1407

7



IG Versleiß in Abhängigkeit von Laufzeit und Temperatur  
Techn. Prüfstand Oppau 1420

8



IG Versleißversuche  
Techn. Prüfstand Oppau 1417

9

Techn. Prüfstand  
Oppau

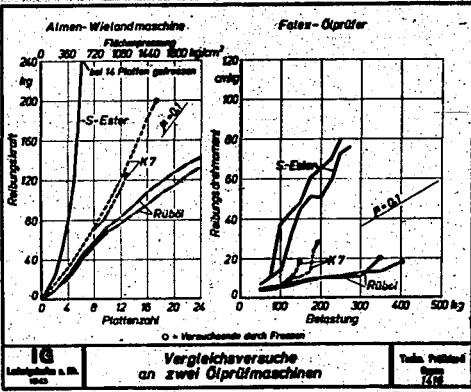
Blatt 3  
04615

Versuchsbedingungen	Einheit	Vierkugel-Maschine	Fates-Öprüfer	Almen-Wieland-Maschine
Drehzahl	U/min	1450	330	200
Gleitgeschwindigkeit	cm/sec	55,7	704	6,8
Prüfelemente:				
WHärte d. ruh. Teile	kg/cm <sup>2</sup>	750-850	730-850	~150
WHärte d. bew. Teile	kg/cm <sup>2</sup>	750-850	240-300	~170
Durchschnittlicher spez. Flächendruck	kg/cm <sup>2</sup>	40000	10000	2000

**IG** Drei Prüfmaschinen für Hochdruck-Schmiermittel im Vergleich  
Lithographische u. B. 1943

Techn. Prüfstand  
Oppau  
147

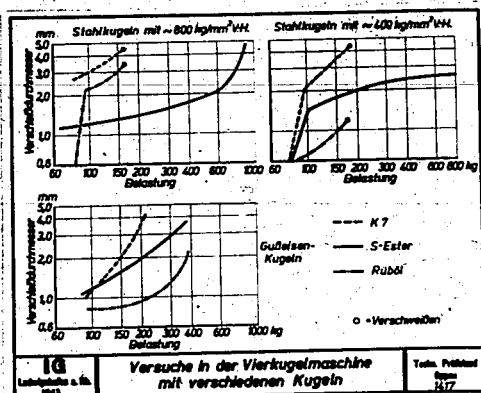
10



**IG** Vergleichsversuche an zwei Ölprüfmaschinen  
Lithographische u. B. 1943

Techn. Prüfstand  
Oppau  
148

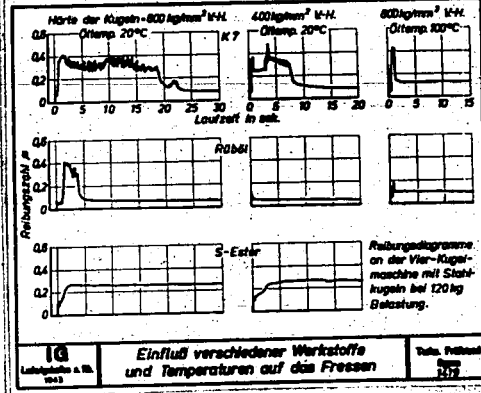
11



**IG** Versuche in der Vierkugelmaschine mit verschiedenen Kugeln  
Lithographische u. B. 1943

Techn. Prüfstand  
Oppau  
147

12



**IG** Einfluß verschiedener Werkstoffe und Temperaturen auf das Fressen  
Lithographische u. B. 1943

Techn. Prüfstand  
Oppau  
147

13



04616

Beitrag zur außerhydrodynamischen Schmierung.

I. Mitteilung

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

Gliederung:

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

Der Beitrag umfaßt:

29 Seiten Text  
1 Zahlentafel  
2 Abb.  
1 Kurvenblatt

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

Der Bearbeiter:

  
I. Morghen

Berlin-Adlershof, den 1. September 1944

BSf 230/7,1

DM 1364 (55) 0610

2.1. NOV. 1944

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

Die Bezeichnung "außerhydrodynamische Schmierung" ist für das Gebiet gewählt worden, dessen Gesetzmäßigkeiten noch nicht bekannt sind. Hydrodynamische Einflüsse unsugänglicher bzw. nicht fassbarer Art, Eigenschaften von Filmen in molekularen Dicken an Grenzflächen, chemische Umsetzungen in der Schmiergrenzschicht usw. gehören hierher. Die vorgeschlagenen Begriffe<sup>1)</sup> "Grenz- oder Epilamenschmierung" und streng genommen auch "Misch- oder Teilschmierung"<sup>++)</sup>, wobei noch weitgehendere Unterteilungen denkbar wären, haben, solange ihre Gesetzmäßigkeiten nicht eindeutig bekannt sind, nur theoretisches Interesse, da sie experimentell nicht exakt realisierbar bzw. erkennbar sind. Grenzschmierung im definierten Sinne wäre z.B. an zwei aufeinanderliegenden, gegenseitig parallel verschiebbaren, vollkommen (atomar) ebenen Flächen, die mit Moleküllagen Schmiermittel bekannter Zahl belegt sind, denkbar. Es bleibt dann allerdings die Frage offen, wie lange diese Flächen beim Aufeinandergleiten atomar eben bleiben würden.

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

1) A.v.Philippovich, "Abgrenzung häufig verwendeter Begriffe der Schmierung", Zeitschrift des VDI, Bd.86, S.408 (1942)

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

++) Wie später gezeigt wird, sind bei Schmierstoffen mit Viskositäten zwischen 150 und 4000 cSt bei 20°C hydrodynamische Einflüsse praktisch nicht feststellbar.

im verschiedenen Ausmaß einzelne diskrete Reibungszustände hohen Reibungswiderstandes;

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

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

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

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

$$U = \sigma \cdot \omega - \tau \frac{d\sigma}{d\tau} \cdot \omega \dots \dots \dots 1),$$

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

Dupré <sup>2)</sup> stellte für die beim Aneinanderbringen zweier Flüssigkeiten pro cm<sup>2</sup> gemessene Arbeit die Beziehung auf:

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

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

wob  
die  
Ver  
anz  
che  
Gre  
gle  
aus  
der  
Sch  
such  
Die  
Flü  
cher  
str  
bezw  
setz  
ver  
Das  
zend  
dem  
che  
Karb  
Flü  
ist  
ener  
bei  
ange  
(in  
+) H  
a  
(S B  
3) W  
G  
++) :

wobei  $\sigma_1$  die Oberflächenspannungen der Flüssigkeiten,  $\sigma_2$  die Grenzflächenspannung an der Berührungsstelle derselben sind. Versucht man diese Beziehung unmittelbar für den Verschleiß<sup>3)</sup> anzuwenden, so bedeutet jetzt  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  (s. S. 7) die Grenzflächenspannung des Materials gegen den Schmierstoff und  $\sigma_3$  die Grenzflächenspannung im Schmierstellenmaterial selbst, die gleich Null ist. Daraus folgt:

$$A = 2\sigma_3 \quad (4)$$

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

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

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

+) Hier wäre die Voraussetzung, daß die Loslösung der Teilchen aus der Schmierstelle auswirkungsmäßig unter gleichzeitiger Benetzung durch den Schmierstoff erfolgt, was vorstellbar ist.

3) W. v. Engelhardt, Nachrichten der Akademie der Wissenschaften Göttingen, 1942, Heft 2.

++) Siehe jedoch auch S. 7 oben, u. a. m.

proportional der Grenzflächenenergie. Diese Arbeit gibt erstmalig quantitative Angaben über Schleifhärte in Abhängigkeit von verschiedenen Flüssigkeiten. Fraglich ist jedoch der gleichbleibende Feinheitsgrad des Abschliffes; es ist nach dem vorstehend Gesagten naheliegend, daß die resultierende "Härte" des Schleifkörpers auch auf eine verschiedene *A b t r a - g u n g s f o r m* (Größe und Art der herausgerissenen Teilchen) zurückzuführen sein kann.<sup>4)</sup> Dies ergäbe dann die früher erwähnte vom Schmierstoff abhängige Oberflächenstruktur der Gleitbahn. Der entstehende Abrieb, der qualitativ und quantitativ verschieden ist, kann mit dem im Öl gelösten Sauerstoff oder anderen chemisch wirksamen Stoffen reagieren und zu neuen Stoffen führen. Reibung und Verschleiß werden durch diese Vorgänge mitbestimmt.

Zu den hier interessierenden Eigenschaften dünnster Filme sei an folgendes erinnert: Bringt man Endmaße (feinstpolierte ebene Flächen), auf welche eine Spur Flüssigkeit aufgebracht ist, fest zusammen, so sind sie nurmehr mit Gewalt zu trennen. Die Ursache dieses Phänomens ist noch nicht klargelegt; zur Diskussion<sup>5)</sup> steht als primärer Einflußfaktor dies: Die Schmiermittelmoleküle bedecken die beiden Flächen und ordnen sich an ihnen entsprechend den Fixpunkten der Atomgitter der beiden Metalle. Die mechanische Arbeit, gerechnet auf ein  $\text{cm}^2$ , die aufzuwenden ist, um sie von der Grenzfläche zu trennen, ist wieder gegeben durch die Gleichung (2), wobei jetzt  $\sigma$  die Oberflächenspannung der Schmierstelle,  $\sigma_s$  des Schmierstoffes,  $\sigma_{sc}$  der Grenzflächenspannung, Schmierstelle:Schmierstoff bedeutet.<sup>6)</sup>

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

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

5) s.a. Baggett, Proc. Roy. Soc. A 86, 25, 1911

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

untereinander, die ZerreiBfestigkeit<sup>7)</sup> von Flüssigkeiten entspricht also gröBenordnungsmäßig derjenigen der Festkörper. Sie kommt dann zur Auswirkung, wenn sich die einzelnen Flüssigkeitsmoleküle gegenseitig nicht verschieben können, sondern unmittelbar voneinander getrennt werden, wie dies mehr oder weniger bei raschesten Zugbeanspruchungen oder dann der Fall ist, wenn die Beweglichkeit der Flüssigkeitsmoleküle gehemmt ist, wie dies an festen Grenzflächen über wenige Moleküllagen Flüssigkeit der Fall ist. Die ZerreiBfestigkeit läßt sich z.B. ebenfalls aus der Dupré'schen Gleichung berechnen. Man kommt wieder zur Gleichung 3), wobei jedoch  $\sigma$  die Oberflächenspannung bedeutet.

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

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

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

$$K = \eta \frac{dv}{dz} \dots \dots \dots 4)$$

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

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

7) J. Meyer, Abhandlungen der Deutschen Bunsengesellschaft Nr. 6, 1911. K.L. Wolf, Chemie 55, 295 (1942)  
 8) s. Plattengerät von Heidebroek u. Petsch, Forsch. Ing. Wes. Bd. 12, Nr. 2, S. 74/87  
 +) Bei monomolekularer Schicht zwischen 2 gleichen festen Flächen ist zu bedenken, daß diese an beiden Grenzflächen - im Falle eines symmetrischen Kohlenwasserstoffes sogar gleich fest - haften. Für Scherbeanspruchung folgt aus den oben angeführten Verhältnissen das Auftreten einer Verzerrungsarbeit. (Verz. Arb. b. tribockener Reibung s. z. B. Holm: "Die techn. Physik d. elektr. Kontakte")

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

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

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

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

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

++) erscheint demnächst

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

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

#### II. Gerät für Untersuchungen im außerhydrodynamischen Gebiet.

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

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



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

### III. Meßergebnisse.

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

+) Gebr. Haake, Medingen bei Dresden

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

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

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

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

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

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

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

Gewicht des Rotors in g	resultierende Last in g	l Luft/min	$\mu$
(50) <sup>+++</sup>	61,2		0,103
(150)	180		0,100
250	306	26,0	0,101
500	612	36,3	0,106
750	920	42,7	0,104
1000	1225	48,2	0,105

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

Ein niedrig viskoses Kohlenwasserstofföl H 16 mit 324 cSt benötigt bei 20°C und 250g Rotorgewicht auf gleiche Kugeln bezogen ebenfalls 26,0 l/min. Ein "aktives" Synthese-Öl der DVL mit 1970 cSt gab bei 20°C folgende Werte:

Gewicht des Rotors in g	l Luft/min	$\mu$
250	20,1	0,060
500	26,3	0,061
750	35,1	0,066
1000	39,7	0,065

Die Messungen wurden auf  $\pm 0,1$  l/min genau<sup>\*)</sup> durchgeführt.

Daraus ist zu entnehmen, daß 10-fache Viskositätsherabsetzung im angeführten Beispiel praktisch keine Änderung des Reibungskoeffizienten bewirkt. Eine konstitutionsmäßige Änderung des Schmierstoffes ergibt eine Herabsetzung des  $\mu$ -Wertes von 0,101 auf 0,060. Eine Druckabhängigkeit scheint ebenfalls nicht vorhanden zu sein. Verschleiß ist schon nach kürzester Laufzeit des Rotors als Laufspur - durch Anhauchen der kalten Kugel - sichtbar zu machen und an Verschleißflächen bei den unteren Kugeln festzustellen. Die angeführten Beispiele zeigen, daß das Gerät tatsächlich in dem gewünschten Gebiet arbeitet. Die Genauigkeit und das Auflösungsvermögen des Gerätes sind groß, es erscheint also vorerst einmal geeignet, das hier interessierende Schmiergebiet zu untersuchen.

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

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

Dazu kommen die unmittelbar gesuchten Einflüsse von:

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

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

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

1) Reinigung der Schmierstellen:

Die im Handel erhältlichen Kugellager-Kugeln<sup>\*)</sup> sind ein-  
gefettet und mechanisch durch Staub usw. verunreinigt. Sie werden  
mit einem mit Alkohol-Äther benetzten Tuch sorgfältig abgewischt,  
in den Tiegel samt Klemmring und Einspannmutter des Rotors ge-  
legt, die Klemmringschraube gerade so angeschraubt, daß sie  
nicht abfällt, dann ein kleiner Trichter, dessen scharfe Kanten  
abgeschmolzen wurden, bis auf den Boden des Tiegels gesetzt und  
letzterer mittels einer Drahtschlinge unter einem Rückfluskkühler,  
der auf einem Lang-Weithalskolben eingeschliffen ist, befestigt.  
Extrahiert wird unter starkem Rückfluß mit einem Gemisch von  
2) Teilen Äther und 1 Teil Methylalkohol. Zur Bindung saurer  
Schmierstoffbestandteile werden einige Plätzchen Kaliumhydroyd  
in den Siedekolben getan. So werden auch die im Tiegel fest ein-  
gespannten Kugeln ohne Lageänderung derselben gereinigt. Die Ku-  
gel des Rotors muß dann nach oberflächlicher Säuberung durch Ein-  
tauchen in ein frisches Äther-Alkohol-Gemisch und längerem Ab-  
spülen mittels einer Tropfflasche gereinigt werden. Die so behan-  
delten Teile werden 5 min bei 50°C im Trockenschrank erwärmt und  
noch warm in einem Vakuumexsikkator (ohne CaCl<sub>2</sub>) durch 3maliges  
Evakuieren und Lüften getrocknet.

Reibungsverhalten ohne Schmierstoffauftragung bei 20°C:

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

\*) Vereinigte Kugellagerfabriken A.-G., Schweinfurt

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

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

Schmierstoff	l/min	
83/43	24,6	Die Messungen wurden möglichst kurz ausgeführt, um einen Einlaufvorgang zu vermeiden. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,1$ l/min ( $\pm 0,001 \mu$ ).
133/43	23,7	
83/43	24,6	
133/43	23,7	

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

2) Gleichmäßigkeit der Kugeloberflächen einer Lieferung.

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

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

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

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

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

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

Daraus folgt, daß im allgemeinen vor einer Messung neue  
 Kugeln (mit einem möglichst indifferenten lagerbeständigen Koh-  
 lenwasserstofföl) geeicht werden müssen. Die so erhaltenen Rei-  
 bungswerte, bezogen auf den Eichwert, sind mit genügender Nähe-  
 rang unmittelbar miteinander vergleichbar.

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

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

$$r^3 = 0,34 \cdot (0,4082 \cdot P) \cdot \frac{d}{E} \quad (\text{wobei } E \text{ mit } 2,2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{ angenommen wurde})$$

$$d = 0,007958 \cdot \sqrt[3]{P} \quad [\text{cm}]$$

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

Rotorgewicht g	ungef. Durchmesser der Schmierstellen mm	ungef. durchschn. spez. Drückg kg/cm <sup>2</sup>
50	0,03	2900
250	0,05	5200
500	0,06 <sub>3</sub>	6500
1000	0,08	8100

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

+) Der Durchmesser der Kugeln soll auf  $\pm 0,0005$  mm übereinstimmen.

Schmierstelle bei bester Schmiegun<sup>g</sup>. Die Gleitfläche der Gleitkugeln ist etwa 250 mal<sup>+</sup>) so groß wie die der festen Kugeln, was beim Verschleiß zu berücksichtigen ist. Die Gleitgeschwindigkeit ist bei der Normalmessung etwa 5 mm/sek.

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

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

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

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

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

Hier näher auf diese Verhältnisse einzugehen, ist bei dem geringen zur Zeit vorliegenden Material - insbesondere von niedrigst molekularen Schmierstoffen - noch verfrüht.<sup>\*)</sup>

4) Schmierfilmdicke.

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

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

Schmierstoff	Visk. $\eta_{St}(20^\circ C)$	Voller Fiegel l/min	Kugeln benetzt l/min	Unterschied l/min
423/40	892	25,5	25,5	0
Speedwell	1044	23,1	22,9	- 0,2
SS IV DVL	1970	20,4	19,7	- 0,7
H 140	3863	25,9	25,3	- 0,6
H 16	324	25,2	25,3	+ 0,1

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



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

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

a) Bintauchen in verdünnte Lösungen.

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

Schmierfilm aus 0,25%iger Lösung.

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	2	8	10	14	20	30	100
1/min b. 423/40	28,5	28,5	28,5	28,5	27,3 <sup>*)</sup>		29,5	29,5		26,3 <sup>*)</sup>
1/min b. Speedwell	25,5	25,5	25,5	25,5	26,5	29,5	36,5	39,5	45,5	

gemessen in Luft: (Versuch 3, 4)

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	2	8	10	14	20	80	100
1/min b. 423/40	27,5	27,5	27,5	27,5	26,1 <sup>*)</sup>		27,5	27,5	25,5 <sup>*)</sup>	27,5
1/min b. Speedwell	25,5	25,5	25,5	26,5	28,5	30,5	33,5	46,5		

Schmierfilm aus 0,10%iger Lösung.

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

Schmierfilm aus 0,05%iger Lösung.

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	2	4	8	14	20	30
1/min b. 423/40	28,5	29,5	29,5	29,5	28,5	29,5	30,5	34,5	>52
1/min b. Speedwell	26,5		30,5	31,5	35	>50			

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

Gemessen in Luft: (Versuch 9)

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	2	4	8	14
l/min b. 423/40	29,5	29,5	29,5	29,5	31,5	40,5	>52

Schmierfilm aus 0,01%iger Lösung.

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	1,5
l/min b. 423/40	341	39,5	42,5	>50
l/min b. Speedwell	351	39	43,5	>50

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

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

Folgende Werte wurden bei normaler Meßmethode erhalten;  
Rotorgewicht 250 g, 20°C, Stickstoff:

Zahl der Umdrehungen	3-5	15	50	80
l/min b. 423/40 aus 0,3%iger Lsg.	27	28	28	28

(Eichwert d. Kugeln mit 423/40: 26,7 l/min)

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

Zahl der Umdrehungen	3-5	15	50	80	
1/min b. 423/40 aus 0,15%iger Lsg.		25,7	steigt rasch		
1/min b. Speedwell aus 0,4%iger Lsg.	23,3	25,2	27	32	steigt rasch
	(Sichwert d. Kugeln m. Speedwell: 22,9 1/min)				

Zahl der Umdrehungen	1/3	2/3	3/3	2-5	
1/min b. Speedwell aus 0,05%iger Lsg. und mit 423/40 benetzt	Messmeth. wie S. 12		normale Messmethode		
	26,5	26,5	26,5	25,5!!	
	(Nacheichung d. Kugeln m. 423/40: 25,7 1/min)				
1/min b. 423/40 aus 0,05%iger Lsg. und mit Speed- well benetzt					24,6!!

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

Die Zentrifugenmethode dürfte insbesondere zur Prüfung von Kugellagerfetten geeignet sein.

#### 5) Gasatmosphäre

Der Einfluß des Luftsaauerstoffes bei dünnsten Schmierfilmen wurde eben gezeigt; die Filme wurden in Gegenwart von Luft etwas rascher zerstört als unter Stickstoff. Untersucht wurde noch der Einfluß verschiedener Gase bei benetzten Kugeln und zwar wurden immer dieselben Kugeln mit Schmierstoff 423/40 versehen, je 15 min lang unter Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxidatmosphäre belassen und dann gemessen. Unterschiede konnten nur bei Einwirkung der Kohlensäure (Abnahme des Reibungswertes um 0,2 1/min) festgestellt werden, aber nur innerhalb der Fehlergrenze.

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

04635

6) Änderung der Oberflächenstruktur der Schmierstelle durch das Schmiermittel.

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

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

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

Schmierstoff	83/43	H 426	83/43 +)
1/min	25,1	26,5	26,2
		27,9	25,1 nach 2 1/2 min Einlauf ++)

Ein Abwischen der Schmierstellen vor der üblichen Reinigung mit einem Baumwolltuch bringt hier keine Änderung.

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

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

Einlaufverhalten eines stark gefetteten Öles (Speedwell):

Einlaufzeit in min ++)	1	2	3	4	5
1/min	22,7	23,4	23,3	23,7	23,7
1/min	23,5	23,9	23,9	24,3	24,1
1/min	23,3	23,5	23,9	24,3	24,9

Die Werte sind also sehr schlecht reproduzierbar;

+) 83/43 selbst zeigt nur geringes Einlaufverhalten (der Wert steigt nach 60 Umdrehungen von 25,3 auf 25,5 1/min)

++) Eine Minute entspricht etwa 15 bis 20 Umdrehungen. Unter Einlauf bzw. Einlaufverhalten wird immer die Ausbildung einer dem Schmierstoff entspr. eigenen Gleitbahn verstanden, gekennzeichnet durch das Reibungsverhalten.

04636

Günstiger diesbezüglich verhält sich s.B. H 426 (Bater):

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

Das Kohlenwasserstofföl 423/40:

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

Der Schmierstoff SS IV DVL:

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

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

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

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

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

Schmierstoff	1/min	Schmierstoff	1/min
83/43	25,1 (Eichwert)	H 8	26,3 (Eichwert)
H 426	28,1	H 426	28,3
	3,0 Differenz		2,0 Differenz
83/43	25,3 (Eichwert)	Der Differenzwert 3,0 entspricht	
H 8	26,3	die Summe der Differenzwerte	
	1,0 Differenz	2,0 und 1,0.	

7) Gleitart des Rotors.

Der Rotor kommt bei schnellerem Lauf insbesondere bei dünnen und dünnsten Ölen sehr leicht in eine mit singendem Geräusch<sup>10)</sup> verbundene Bewegung, die wesentlich niedrigere Werte ergibt als wirkliches Gleiten. Diese Bewegungsart wurde bei allen Messungen vermieden, indem der Rotor z.B. bei Trockenläufen unter Verzicht auf Genauigkeit kurze Wegstrecken ganz langsam gleiten gelassen wurde; diese Messungen sind im vorliegenden Bericht besonders gekennzeichnet, da sie mit der Normalmessung nicht unmittelbar verglichen werden können.

8) Oberflächenrauigkeit des Werkstoffes.

Die Oberflächenrauigkeit wurde durch Ätzen der Kugeln mit Salzsäure erhalten.

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

Schmierstoff	l/min	$\mu$	( $\mu$ b. glatten Kugeln etwa)
423/40	29,7	0,137 (Eichwert)	( 0,101 )
SS IV-DVL	27,0	0,110	( 0,060 )
		0,027 Differenz	( 0,041 Differenz )

Einlaufverhalten von SS IV-DVL:

Einlaufzeit in min	1	2	3	5	7
l/min	27,2	27,2	27,2	26,8	26,2 (Einebnung)

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

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

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

Das Auflösungsvermögen glatter Kugeln ist größer als bei rauhen.

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

04638

- 23 -

## 9) Einfluß des Schmierstoffes.

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

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

Schmierst. (KW-Basis)	H 8	H 16	H 32	H 68	H 140	83/43	423/40	133/43	224/35
cSt b. 20°C	145	324	759	2355	3863	898	892	730	1281
Eichwert m. 423/40 l/min	25,3	24,9	25,3	25,7	25,3	25,3	25,3	24,9	24,9
l/min n. Einlaufzt. in min*)	25,3	25,1	25,3	25,3	25,1	25,3	25,3	24,0	24,1
1	25,3	25,1	25,1	25,3	25,1	25,3	25,3		24,1
2		25,3	25,1	25,3	25,1	25,3	25,3		24,1
3		25,7	25,1	25,3	25,1	25,3	25,3		24,3
5		25,7	25,3	25,3	25,1	25,5	25,3		

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

POOR  
COPY

16

Schmierst. (aktive St.)	H 426	Speed-well	Kompr. 183/39	SS IV DVL	Ab.+++ Ester	ASM 18/39	Hypoid 358/42	HDL 357/42
cSt b. 20°C	137	1044	1096	1970	3600	1104	927	942
Eichwert m. 423/40 l/min	25,1	25,1	26,1	26,1	25,8	25,3	25,3	25,1
l/min n. Einlaufzeit in min	26,5	22,3	25,1	20,3	27,2	26,0	25,3	25,1
1	28,1	22,9	25,1	20,3	27,2		25,1	25,1
2	27,9	23,5	25,1	20,3	27,2		25,1	25,1
3	27,9		25,5	20,3	27,2		25,1	25,1
5			25,5	20,3	27,0	26,3	25,1	25,1

Zusammenstellung der aus obigen Meßwerten ohne Einlauf ermittelten Reibungskoeffizienten:

Schmierst. (KW-Basis)	H 8	H 16	H 32	H 68	H 140	83/43*)	133/43*)	224/38
cSt b. 20°C	145	324	359	2355	3865	898	730	1281
$\mu^{**}$	0,110	0,105	0,101	0,098	0,100	0,101	0,094	0,095

Schmierst. (aktive St.)	H 426	Speed-well	Kompr. 183/43	SS IV DVL	Ab.+++ Ester	ASM 18/39	Hypoid 358/42	HDL 357/42
cSt b. 20°C	137	1044	1096	1970	3600	1104	927	942
$\mu$	0,114	0,079	0,094	0,060	0,114	0,106	0,101	0,101
$\mu$ (Höchstwert nach Einlauf)	0,129	0,09						

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

Schmierst.	Spind. 81 160/38	Perhydrochrysen	Bism. 81 159a/38	Knochen 81	Cetan	Ceten	Äthylalkohol
cSt b. 20°C	142	85,7	30,8	30,2	4,47	4,55	1,52
$\mu$	0,127	0,137	0,125	~0,17	~0,461	0,125!>0,7	

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



Zu erwähnen ist noch, daß manche Öle einige Tage an den Kugeln belassen, eine Senkung von 0,2 bis 0,6 l/min des Reibungswertes ergeben. Aktive Zusätze wirken sich bei 20°C wenig aus, so zeigte ein ZN-Öl (15/43) mit 26,1 l/min nach Zusatz von 2% SS IV DVL eine Herabsetzung des Reibungswertes nur auf 25,4 l/min. 2% Olsäure, dem gleichen Öl zugesetzt, ergab eine Erniedrigung des Reibungswertes um 0,4 l/min.

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

aus den Beispielen ist zu entnehmen:

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

10) einfluß der Belastung.

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

Schmierstoff	Belastung g	l/min	$\mu$
H 16	250	25,1	0,097
	500	35,1	0,099
	1000	47,8	0,103
155/43	140	19,7	0,100
	250	25,7	0,100
	500	36,1	0,104
	1000	48,5	0,107
SS IV DVL	50	9,	0,055
	100	14,1	0,055
	200	19,5	0,054
	250	21,7	0,055

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

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

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

11) Einfluss der Temperatur.

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

Auf Seite 24 wurden die Reibungskoeffizienten verschiedener Schmierstoffe bei 20°C gezeigt. Aus folgendem ist zu ersehen, daß sich deren relative Höhe schon bei Temperaturen von 80°C ändern kann; Rotorgewicht 50 g, 80°C, Stickstoff, benetzte Kugeln.

Schmierstoff	423/40 358/42	Hypoid	H 140	H 32	Compressol 183/39	Speed- well
bst b. 80°C	36,5	30,0	112	40,05	38,0	60,0
Eichwert m. 423/40 1/min	14,1	14,7	14,1	14,3	14,5	13,9
1/min n. Ein- laufzeit in min	14,1	14,5	13,9	14,9	13,9	13,9
1	14,3	14,1	13,9	14,5	13,7	13,9
2	14,1	14,1	13,9	14,5	13,7	13,9
3	14,1	14,1	13,9	14,5	13,5	13,9
5	14,0	14,1	13,9	14,5	13,7	13,9

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

Schmierstoff:	ASM	ASM	SS IV DVL	SS IV DVL
Eichwert m. 83/43 1/min	11,6	11,5	12,5	12,5
1/min	10,9	10,7	11,7	11,6

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

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

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

Schmierstoff	83/43	83/43	ASM 99b/42	133/43	SS IV DVL	SS IV DVL
1/min b. °C						
80	11,8	11,1	10,5	11,4		10,6
60					9,3	
40					8,1	
20	9,6	8,9	9,1	10,2	7,3	7,5

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

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

12) Einfluß des Werkstoffes.

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

IV. Zusammenfassung und Folgerungen.

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

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

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

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

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

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

Das Reibungsverhalten ist nicht nur auf der vorgebildeten, sondern auch auf der unter Einwirkung des Schmierstoffes (verschiedene Verschleißarbeit/cm<sup>2</sup>) beim Einlauf resultierenden Gleitbahn zu verfolgen.

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

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

Auf Grund der in der Arbeit gebrachten Vorklärung der die Schmierung beherrschenden Einflußfaktoren wird jetzt insbesondere eingehend untersucht: Schmierstoffe verschiedenster Viskosität und Art, um daraus Zusammenhänge zwischen Reibung und Verschleiß zu suchen - dahingehend, daß einerseits die Fähigkeit verschiedener Stoffe zwei Flächen im außerhydrodynamischen Gebiet zu trennen (Molgröße, zwischenmolekulare Kräfte im Schmierfilm an der Grenzfläche a.u.m.), andererseits die Verschleißarbeit/cm<sup>2</sup> (unmittelbar und mittelbar) unter dem Einfluß verschiedener Stoffe als zwei getrennte, aber gleichzeitig wirkende Faktoren betrachtet werden. \*) Abhängigkeit dieser Faktoren von chemischen und physikalischen Eigenschaften der Schmierstoffe und Werkstoffe der Schmierstellen. Dann Temperaturverhalten und Verhalten dünner Schmierstofffilme. Die in der Einleitung gebrachten allgemeinen Betrachtungen werden weiter als Arbeitshypothesen verwendet und - soweit zutreffend - zu belegen versucht.

\*) Niedrigere Verschleißarbeit/cm<sup>2</sup> gibt unter gleichen Verhältnissen näheren Verschleiß. Gute Schmierseignung: niedrige Verschleißarbeit/cm<sup>2</sup>, aber bei hoher außerhydrodynamischer Tragfähigkeit des Schmierstoffes.

VP  
m  
Viskosität in cSt bei 20°C  
Spez. Grav. bei 20°C  
Eingangs-Nr.  
Bezeichnung des Öles

POOR COPY 16

04645

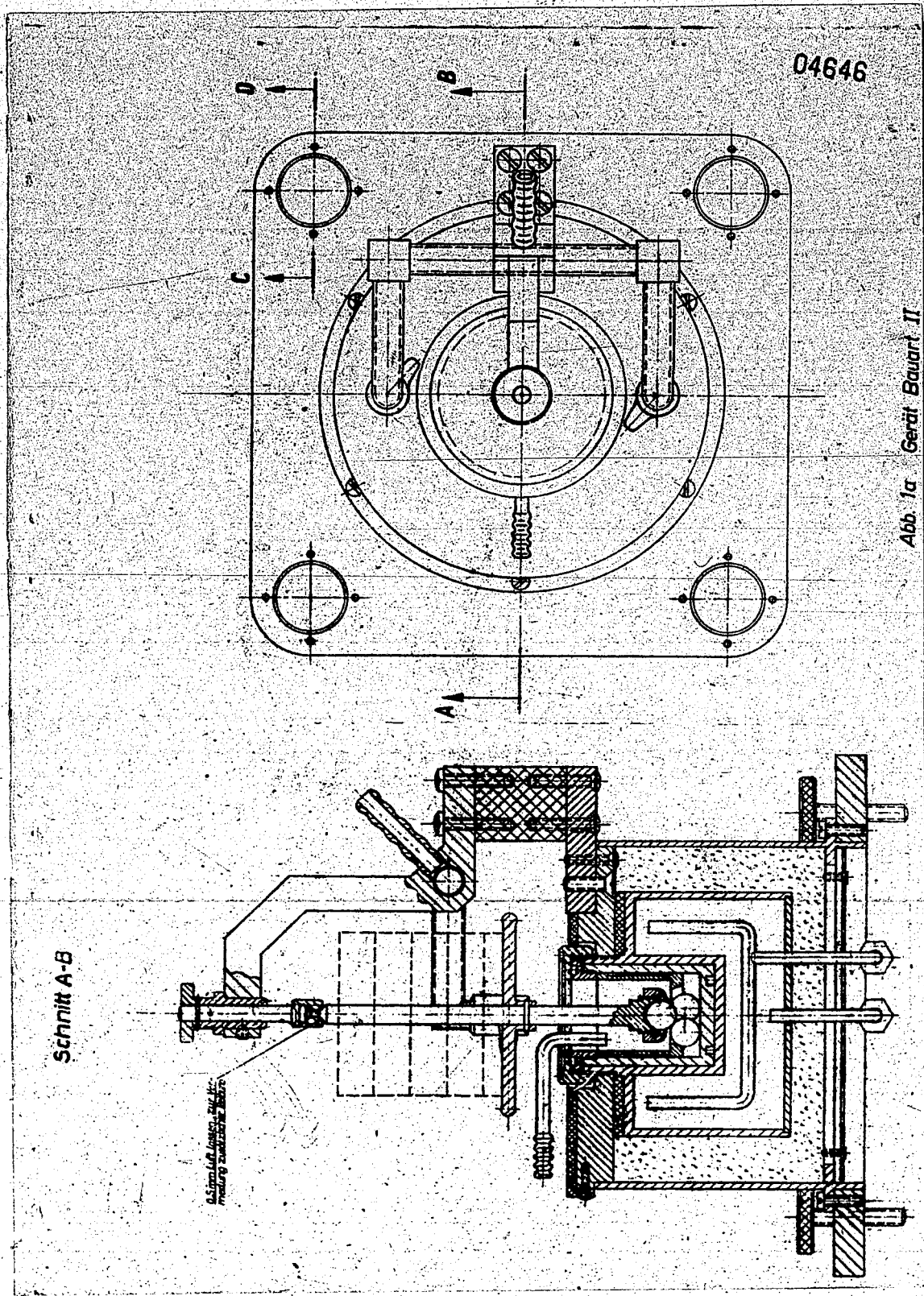
1 30

Bezeichnung des Öles	Eingangs-Nr.	Spez. Gew. b. 20°C	Viskosität in cSt bei 50	η	VP
H 8	249/43	0,841	145,5	3,42	1,51
H 16	249/43	0,851	324	3,18	1,52
H 32	250/43	0,853	759	3,13	1,62
H 68	251/43	0,854	2355	2,98	1,66
H 140	252/43	0,861	5865	3,00	1,74
H 426	253/43	0,948	127,5	3,80	2,08
Grünring	224/38	0,865	1261	3,21	1,74
Rotring	83/43	0,869	898	3,44	2,02
Rotring	133/43	0,874	815	3,32	1,83
Rotring	423/40	0,892	892	3,36	1,89
Speedwell	—	0,960	1044	2,82	1,41
Kompressor	183/39	0,959	1096	3,18	2,10
ASK	18/39	0,917	1104	3,29	1,87
ASW	99/42	0,922	1051	3,42	2,00
Hypoidöl	358/42	0,927	927	3,76	2,41
HDL	357/42	0,932	942	3,74	2,50
Kompressoröl	52/44	0,912	828	3,62	2,24
SS IV DWL-Syntheseöl	—	0,942	1970	3,94	3,13
Abietinsäuremethylester	—	1,038	7349	201,4	
Russisches Spindelöl	160/38	0,898	142	22,7	
Ziemaaschinenöl	159a/38	0,886	30,8	9,1	
Ferhydrochryson	—	0,984	85,7	16,2	
Knochenöl	Shell P 31	0,860	30,2	9,08	
Ceten	—	0,770	4,47	2,36	
Ceten	—	0,793	4,55	2,39	
Athylalkohol	—	0,789	1,52	0,89	

Die Viskositäten der H-Öle beziehen sich auf Angaben der I.G. und wurden nicht kontrolliert, da eine Änderung für vorliegende Arbeit unwesentlich ist. Außerdem seien die H-Öle einschneidend alterungsabhängig bedingt - Versessungszahlen Versuche mit reinen Stoffen sind beabsichtigt.

Schnitt A-B

POOR COPY



POOR  
COPY

16

PO  
CO

04647

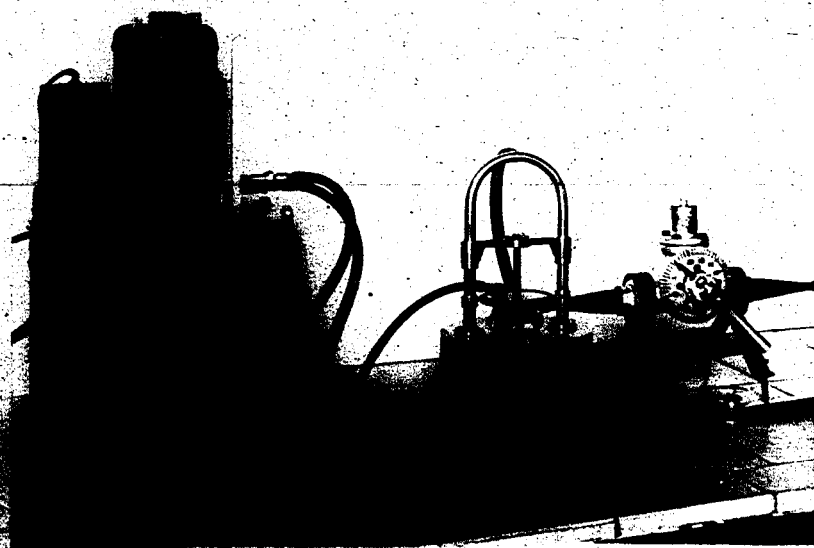
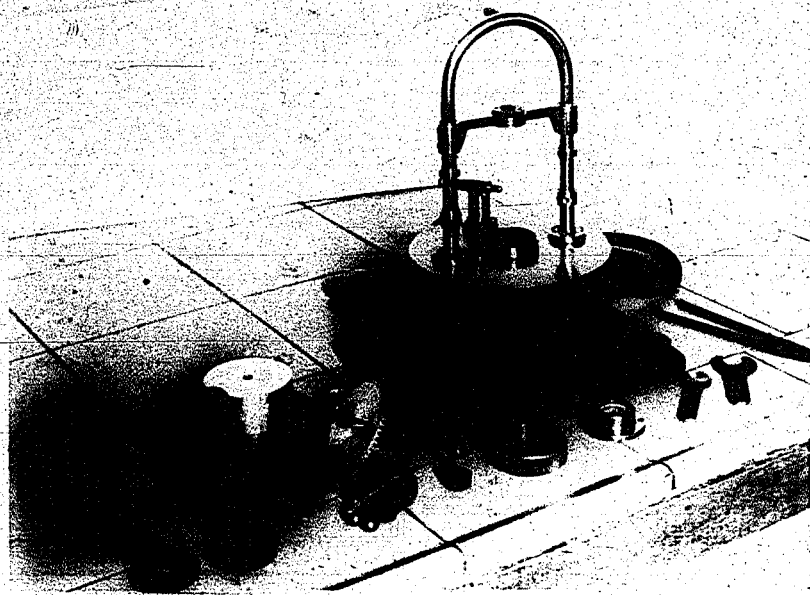
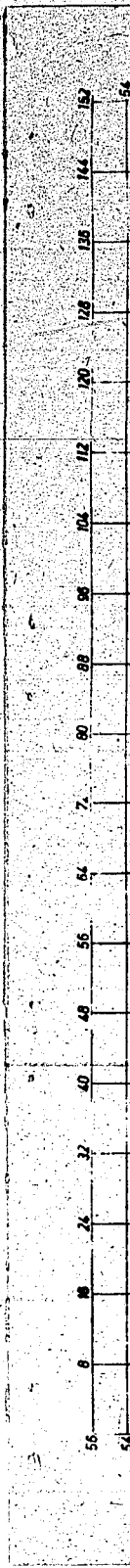


Abb. 1b Gerät Bauart I

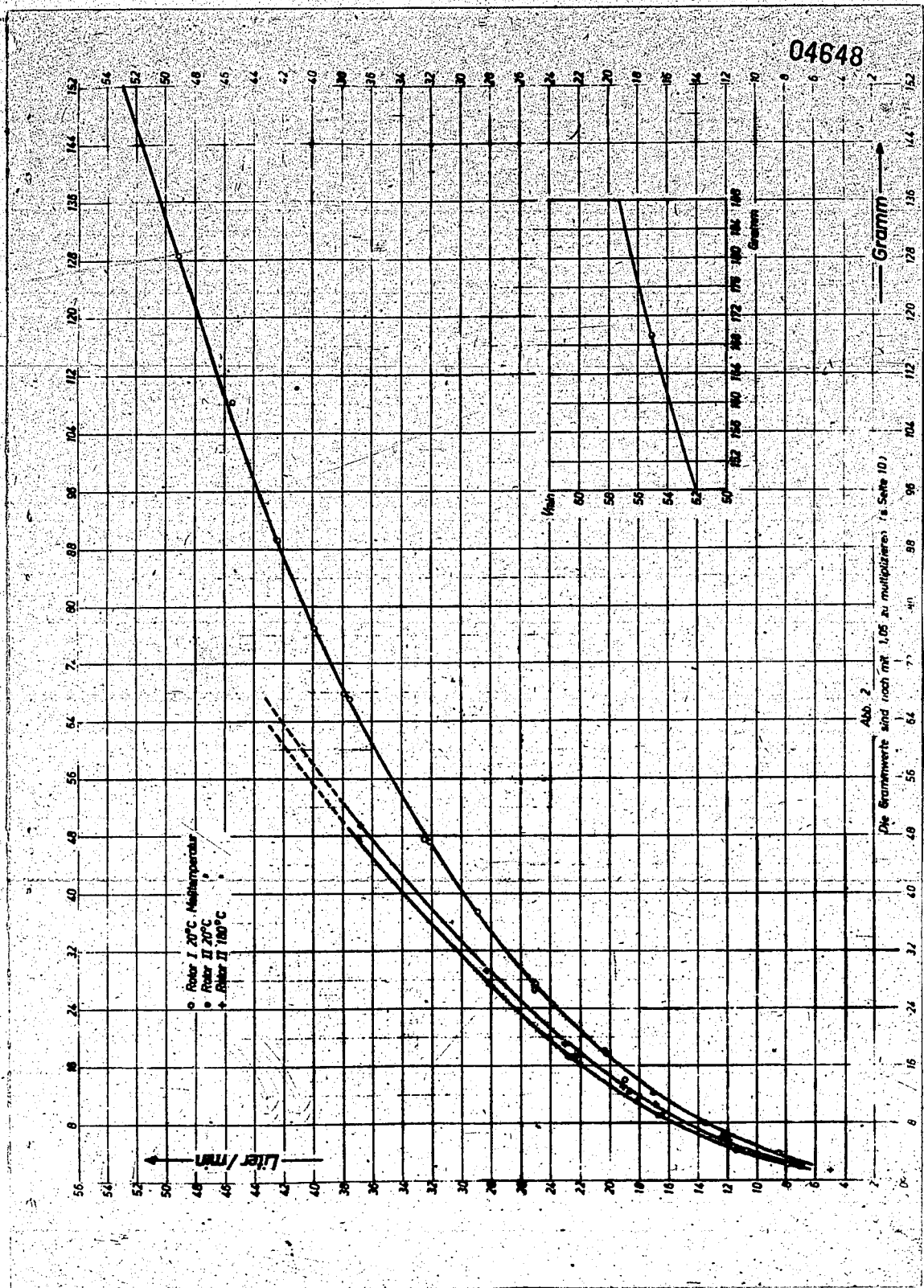


POOR  
COPY

16

PO  
CO





POOR COPY 16

POOR COPY

UM 1364

04649

Verteiler:

1. Forschungsführung
2. ZWB
3. DVL/WS
4. OKL - Chef TLB/M II
5. OKH-Heereswaffenamt Wa Prüf 6
6. F'Stelle Rechlin, Fl.Oberstabsing. Giessmann
7. F'Stelle Travemünde
8. CTR, Dr. Hoack
9. PTR, Dr. Kluge
10. KWI f.physik-Chem.u.Elektrochem., Berlin-Dahlem, Prof.Thiessen
11. KWI f.physik-Chem.u.Elektrochem., Berlin-Dahlem, Dr.Bartel
12. KWI f.Eisenforschung, Düsseldorf, s.Zt.Clausthal,  
Dipl.-Ing. Eichinger
13. KWI f.Strömungsforschung, Abt.Reibungsforschung, Berlin,  
Dr. Vogelwohl
14. MPA, Berlin, Prof. Siebel
15. T.H. Berlin, Inst.f.Braunkohlen- u.Mineralölforschung,  
Prof. Heinsie, s.Zt.Eislingen/Wttbg. (Südöl G.m.b.H.)
16. T.H. Dresden, Prof. Heidebroeck
17. T.H. Graz, Prof. Klemenčič
18. Universität Halle, Prof. Wolf
19. T.H. München, Prof. Kadner
20. T.H. München, Prof. Peppler
21. T.H. Stuttgart, Prof. Glocker
22. T.H. Stuttgart, Prof. Wewerka
23. T.H. Stuttgart, MPA, Dr. Bröckstedt
24. T.H. Stuttgart, FKFS, Dr. Haupp
25. T.H. Stuttgart, Gaggenau, Dr. Seemann
26. Junkers Dessau, OMW/Wefo-Süd, Dr. Müller
27. Kugelfischer Schweinfurt, Dr. Kohaut
28. Cuyppers & Stalling, Dresden, Dr. Cuyppers
29. Ammoniakwerk Merseburg, Dr. Zorn
30. Deutsche Erdöl A.G., Berlin, Dir.Dr. Schick
31. Intava, Hamburg
32. I.G.Farbenindustrie, Hochdruckhydrierung, Ludwigshafen,  
Dir.Dr. Pier
33. I.G.Farbenindustrie, T.P. Oppau, Dipl.-Ing. Halder
34. Rhenania-Ossag, ZMI, Hamburg, Obering. Rössig
35. Inst.f.Uhrentechnik, Prof. Sewig, Dresden
36. T.H. Wien, Prof. Suida
37. Universität Straßburg, Inst.f.Freib- u.Schmierstoffe, Dr.Harms
38. Daimler-Benz A.G., Dipl.-Ing. Anders
39. AEG, Dr. Pfender
40. Siemens, Dr. Holm
41. Märkische Seifenindustrie, Witten/Ruhr, Dr. Imhaus
42. DVL/K
43. DVL/BS
44. VDE, Dipl.-Ing. Kraft
- 45.
- 46.
- 47.
- 48.
- 49.
- 50.
- 51.
- 52.
- 53.
- 54.
- 55.

POOR  
COPY

16

UM 1049

04650

**Geheim!**Verteiler:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Forschungsführung   | 40. Intava                                 |
| 2. ZWB   | 41/42. I.G. Farben, Oppau und Ludwigshafen |
| 3. WS  | 43. Ruhrchemie                             |
| 4. RIM-GL/C-E 3  | 44. Rhenania-Ossag                         |
| 5. " -GL/A-M II (Bayer)  | 45. Ammoniakwerk Merseburg                 |
| 6. OKH   | 46. Olex                                   |
| 7. " -Heereswaffenamt Wa Prüf 6 (Oberstlt. Fichtner)               | 47. Nerag                                  |
| 8. OKM Hauptamt f. Kriegsschiffbau (Reg. Amtmann Harms)            | 48. Gewerkschaft M. Stinnes                |
| 9. OKM-FEP   | 49. Wintershall A.-G.                      |
| 10/11. E-Stelle Rechlin<br>1x Dr. Gießmann E 3 o)                  | 50/55. Vorrat                              |
| 12. E-Stelle Travemünde  |  |
| 13. Deutsche Akademie  |  |
| 14/15. LFA-Schmidt u. Sekr.  |  |
| 16. FKFS   |  |
| 17. Prof. Lindner  |  |
| 18. " Schnauffer   |  |
| 19. " Triebnigg  |  |
| 20. " Jost   |  |
| 21. " List   |  |
| 22. Inst. f. Braunkohle u. Mineralölforschung, Dr. Marder, TH Bln. |  |
| 23. Prof. Pischinger   |  |
| 24. DVL-Inst. W  |  |
| 25/26. - " BS  |  |
| 27. -FF  |  |
| 28. -Inst. D 2   |  |
| 29. LKS-Holfelder  |  |
| 30. Argus  |  |
| 31. BMW-München  |  |
| 32. BMW-Berlin   |  |
| 33. Daimler-Benz   |  |
| 34. Hirth-Motoren  |  |
| 35. Klöckner Humboldt Deutz  |  |
| 36/37. Junkers Motoren   |  |
| 38. MAN  |  |
| 39. Maybach Motoren  |  |

Nachbestellungen sind zu richten an:

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

Dies ist ein geheimer Gegenstand im Sinne des § 88 Reichsstrafgesetzbuch (Fassung vom 24. April 1926). Missbrauch wird nach den Bestimmungen dieses Gesetzes bestraft, sofern nicht andere Strafbestimmungen in Frage kommen.

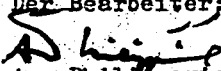
Schwefelgehalt und Schmiereignung von Flugmotorenölen.

Übersicht: Die Beschaffungsöle weisen merkliche Unterschiede ihrer Eigenschaften auf, die sich praktisch bei Grenzbeanspruchungen schmiermäßig auswirken können. Eine wesentliche Ursache dafür ist nach den bisherigen Versuchen der Schwefelgehalt, dem in Zukunft erhöhte Beachtung zu schenken ist. Es wäre ein Minimalgehalt an Schwefel festzulegen, solange es kein anderes brauchbares Maß der Schmiereignung im Grenzreibungsgebiet gibt. Die bisherigen Ergebnisse mit Ölprüfmaschinen bedürfen der Ergänzung. Vollmotoren-bezw. Flugversuche sind zur Bestätigung der geäußerten Ansicht erforderlich.

- Gliederung:
- 1) Die Rolle der Schmiereignung bei der Schmierung
  - 2) Schwefelgehalt u. chemisch-physik#Eigenschaften der untersuchten Flugmotoren-Beschaffungsöle, sowie einiger anderer Öle
  - 3) Schmierverhalten der untersuchten Öle
  - 4) " , Schwefelgehalt u. andere Eigenschaften
  - 5) Anwendung von Schwefelverbindungen in Schmierölen
  - 6) Zusammenfassung und Folgerungen

Der Bericht umfaßt: 12 Bl. Text  
4 Zahlent.  
3 Abb.

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

Der Bearbeiter:  
  
A. v. Philippovich

Berlin-Adlershof, den 28. Juli 1943  
BSf 392/2.1  
UM 1049 (55) 0508.

25. Aug. 1943

1) Die Rolle der Schmiereignung bei der Schmierung.

Im letzten Jahre haben sich zunehmend Lagerstörungen in Motoren verschiedener Bauart gezeigt, die von den Flugzeughaltern vielfach auf ungenügende bzw. schlechtere Qualität des Schmieröles zurückgeführt wurde. In einem Bericht der DVL (BSf 392/1), sowie in einer Zusammenfassung der Versuchsergebnisse für den Chef für Flugsicherheit vom 15.1.43 wurden bereits die verschiedenen Störmöglichkeiten besprochen. Dabei wurde darauf hingewiesen, daß unmöglich alle Lagerstörungen durch eine einzige ölbedingte Ursache erklärt werden können. Immerhin war nicht von der Hand zu weisen, daß einige Störungen tatsächlich auf unzureichende Qualität des Schmieröles zurückgeführt werden können.

Ausgangspunkt für die Untersuchung war die Tatsache, daß zwar eine ganze Reihe von Anforderungen an das Schmieröl gestellt werden, daß sich aber nur ein geringer Anteil davon unmittelbar auf das praktische Schmierverhalten bezieht. So gibt es keine Festlegung der Schmiereignung, der Neigung zur Schaumbildung und der Alterungsneigung, obwohl in den BVM zwei verschiedene Alterungsverfahren festgelegt sind. Eine Zusammenstellung der in geltenden Lieferbedingungen geforderten Prüfungen gibt folgendes Bild:

In den jetzigen Lieferungsbedingungen vorgesehene Prüfungen

Brechungsindex bei 20°C	Flammpunkt
Spez.Gewicht b. 20°C	Brennpunkt
Zähigkeit	Neutralisationszahl
Polhöhe	Verseifungszahl
Richtungskonstante m	Verdampfungstest n.Noack
Viskositätsindex	Conradsonverkokung
Stockpunkt	Aschegehalt
	Hartasphalt
	Wassergehalt

Die Sicherung einwandfreier Schmierung wird durch Erfüllung zweier Hauptbedingungen gewährleistet: einwandfreie Versorgung der Schmierstelle mit dem Öl und genügende Schmiereignung des Öles unter den Betriebsbedingungen. Abgesehen von

konstruktiv bedingten Voraussetzungen für die Ölzufuhr zur Schmierstelle müssen rein stofflich folgende Anforderungen erfüllt werden: richtige Zähigkeit, Freiheit von suspendierter Luft (Gas) bezw. geringe Neigung zur Schaumbildung und endlich geringe Neigung zur Bildung fester Rückstände. Störungen infolge ungenügender Zufuhr des Schmieröles zum Lager treten je nach der Ursache unter verschiedenen Bedingungen ein, die sich allerdings betriebsmäßig überdecken können: Zu hohe Zähigkeit wird vor allem im Winter beim Start vorkommen, wenn kein Kaltstart angewendet wird; Bildung größerer Mengen fester Rückstände, die die Ölleitung verstopfen, durch übermäßige Beanspruchung des Öles (lange Betriebszeit oder hohe Temperaturen), schlecht raffinierten Kraftstoff, endlich durch Ausfällung gelbster oder suspendierter Teile infolge Zumischen von Frischöl (anderer Art); Schäumen bei hohem Ölumlaufl, geringen Außendrücken (großen Höhen). Auf Grund von entsprechenden Versuchen kann man in Störungsfällen oft solche Ursachen ausschalten, die zur Erklärung nicht in Frage kommen.

Genügende Schmiereignung ist ein recht schwankender Begriff. Eine zahlenmäßige Festlegung für Anforderungen ist bisher noch nirgends gelungen, und zwar vor allem deshalb, weil sie nur in einem komplexen Vorgang erfolgen kann, bei dem sich neben dem Öl selbst noch Werkstoffe und konstruktive Gestaltung auswirken. Da aber diese beiden von Versuch zu Versuch nur sehr schwierig gleichgehalten werden können, schwanken auch Messungen desselben Öles bei der Wiederholung des Versuches. Die Schmiereignung soll im wesentlichen das Verhalten des Öles beim Übergang von der vollkommenen oder teilweisen hydrodynamischen zur Grenzschmierung kennzeichnen, bei der hydrodynamische Einflüsse nicht mehr vorhanden sind; gerade dieser Übergang ist aber sehr schwer reproduzierbar zu fassen, weil die Unterschiede der Öle im Schmierverhalten meist viel geringer sind als die Streuungen der Versuchsergebnisse infolge schlecht eingehaltener Versuchsbedingungen.

Man muß deshalb auch mit der Auswertung solcher Messungen recht vorsichtig sein, um keine Fehlschlüsse zu ziehen; dies umso mehr als die Übertragung der Versuchsergebnisse von einer Prüfmaschine auf die Verhältnisse des Flugmotors

fast nie ohne weiteres zulässig ist, weil die Versuchsbedingungen von den praktisch herrschenden zu sehr abweichen. Alle diese Schwierigkeiten sind der Grund, warum sich bis auf den heutigen Tag von den vielen Ölprüfmaschinen keine einzige allgemein durchgesetzt hat, sodaß auch in den Flugmotorenölanforderungen keine Grenzwertlegung der Schmiereignung erfolgte. Bis etwa vor einem Jahr waren Störungen infolge ungenügender Schmiereignung im Flugmotor unbekannt, und es bestand keine dringliche Notwendigkeit für solche Messungen. Dem dringenden Wunsch nach einer solchen Prüfmöglichkeit wird aber in Zukunft Rechnung zu tragen sein. Zusammenfassend läßt sich sagen: Unterschiede der Schmiereignung verschiedener Öle (auch gleicher Zähigkeit) können sich praktisch auswirken, wenn man in das Gebiet der Grenzreibung kommt. Weil dies aber vielmehr werkstoffmäßig und konstruktiv bedingt ist als ölseitig, ist auch eine Erfassung dieser Unterschiede der Öle wohl nur als eine Teilerklärung für die auftretenden Schmierstörungen aufzufassen.

Wenn man zur Charakteristik des praktischen Schmierverhaltens die Eigenschaften von Frischölen verwendet, muß man berücksichtigen, daß schon eine sehr kurzzeitige Beanspruchung im Motor vor allem die physikalischen Eigenschaften der Öle grundlegend - meist in einer schmiertechnisch günstigen - Richtung verändern kann. Ebenso, wie eine richtige Analyse nur auf Grund einwandfreier Probenahme durchgeführt werden kann, weil selbst die beste Analyse bei falscher Probenahme zu Fehlschlüssen führt, muß die chemisch-physikalische Prüfung der Schmiereigenschaften von Ölen den Zustand berücksichtigen, in dem sich die Öle in dem Motor oder der Maschine auswirken. Da die Ölveränderung im Motor laufend geschieht, ist es zweifellos schwer, einen wirklich brauchbaren, d.h. maßgeblichen Grad der Ölveränderung festzulegen; solange keine weiteren Anhaltspunkte vorliegen, wird man sich begnügen müssen, mittels einer einfachen reproduzierbaren Methode eine thermisch-oxydative Alterung bestimmten Ausmaßes anzuwenden, wie z.B. die 12-stündige Air-Ministry-Alterung. Es ist vorgesehen, auch für die Prüfung des Schmierverhaltens außer dem Frischöl selbst derart verändertes Öl zu verwenden.

Die Schmiereignung im Gebiet der Grenzreibung wird durch verschiedene Größen beeinflusst. Die Zähigkeit spielt definitionsgemäß keine Rolle. Dagegen wirken sich Molekulargröße, Gehalt an aktiven Schmierstoffmolekülen und Art und Zustand der Metallfläche wesentlich aus. Als Molekulargewicht (das für die Molekulargröße kennzeichnend sein möge) kann man bei Schmierölen nur einen Mittelwert annehmen, der aber keinen Anhaltspunkt für die größten im Öl vorhandenen Moleküle gibt. Es wird notwendig sein, die Zusammenhänge durch Kathodenvakuumdestillation oder durch eine andere geeignete Trennung weiter zu klären. Die Aktivität der Schmierstoffmoleküle ist bedingt durch Konstitution der Kohlenwasserstoffe, Anwesenheit polarer Gruppen und Art der im Molekül vorhandenen Elemente. Die Bedeutung der Konstitution wird sich wegen der möglichen Isomeren vor allem bei den Kohlenwasserstoffen auswirken, aber gegenüber dem Einfluß polarer Gruppen und verschiedener Elemente im Molekül zurücktreten. Als polare Gruppen kommen besondere Sauerstoff- und Schwefelverbindungen in Frage. Sauerstoffverbindungen sind im ursprünglichen Frischöl nur in geringem Ausmaß vorhanden, wie sich aus Elementaranalysen ergibt, die meist für Kohlenstoff und Wasserstoff einen an 100 grenzenden Wert ergeben. Während der Verwendung im Motor wird aber das Öl oxydiert und bildet eine Reihe polarer Verbindungen.

2) Schwefelgehalt und chemisch-physikalische Eigenschaften der untersuchten Flugmotoren-Beschaffungsöle, sowie einiger anderer Öle.

Die Eigenschaften der Beschaffungsöle, sowie der anderen untersuchten Öle zeigen die Zahlentafeln 1, 2 und 3.

Um den Abschluß des Berichtes nicht zu verzögern, wurde darauf verzichtet, sämtliche Kennwerte zu bestimmen; die fehlenden Angaben werden zu einem späteren Zeitpunkt ergänzt werden, soweit dies notwendig ist.

Zu den Untersuchungen ist zu bemerken: Die beiden praktisch verschieden beurteilten Öle 67/43 und 83/43 zeigten nach