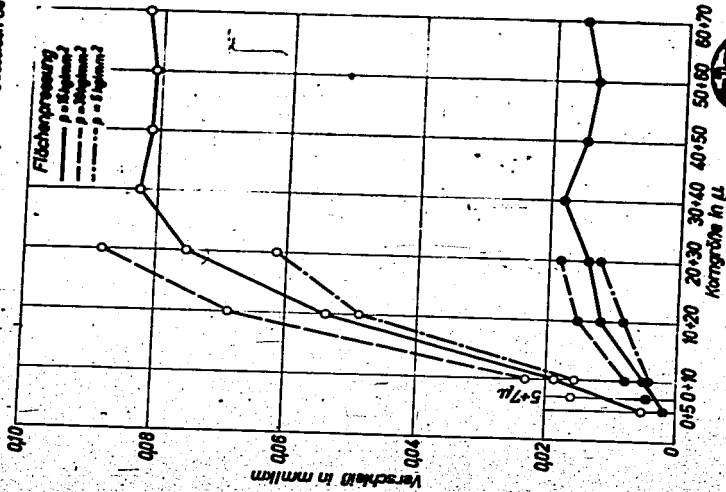


Vergleich des Verschleißverhaltens zweier Werkstoffpaarungen
bei verschiedenen Korngrößen des Verschleißmittels (Quarzsand)

Werkstoffpaarungen

- I ○—○ Kolbenlegierung EC12 gegen Zylinder-Gussisen Gz 28.8
II ●—● Koblenitig-Gussisen gegen Zylinder-Gussisen Gz 28.8



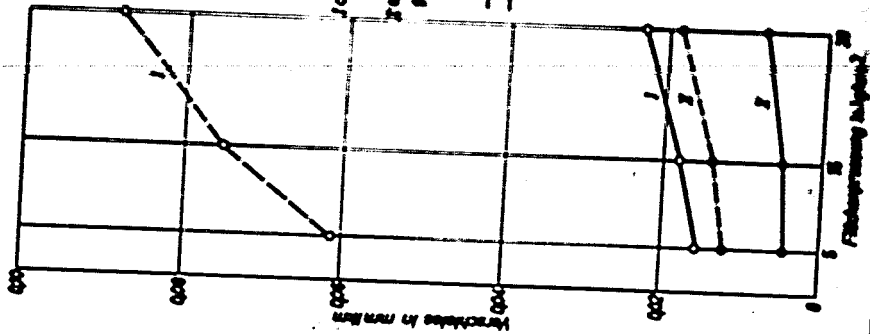
Einfluss der Flächenpressung auf den Verschleiß
bei Oberflächen

0 J 0659

Werkstoffpaarungen

- I ○ Kolbenlegierung EC12 gegen Zylinder-Gussisen Gz 28.8
II ● Koblenitig-Gussisen gegen Zylinder-Gussisen Gz 28.8

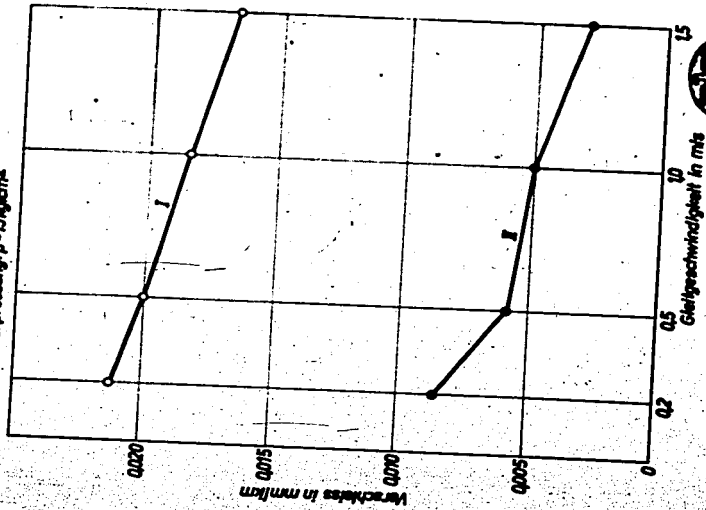
- Flächenpressung p=10N
- - - Flächenpressung p=20N



Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf den Verschleiß bei Ölschmierung

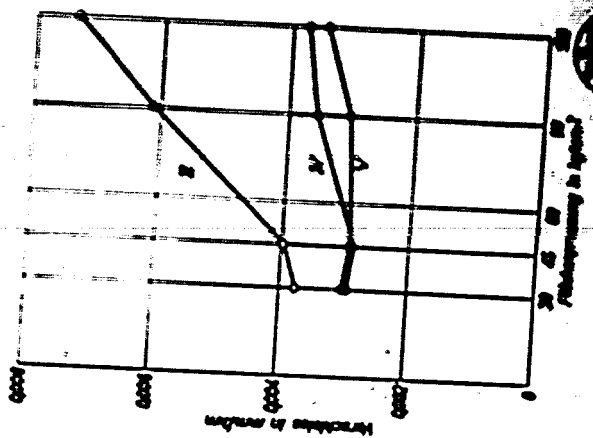
Werkstoffpaarungen

- I ○ —○— Oberflächen EG 24 gegen Zylinder-Gussstahl Gc 20,91
 - II ● —●— Oberflächen-Gussstahl gegen Zylinder-Gussstahl Gc 20,91
- Verschleißmittel Quarzsand 0,10 μ
 Flächenpressung $p = 5 \text{ kg/cm}^2$



Verschleißverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen bei Ölschmierung

- Werkstoffpaarungen**
- II ○ —○— Oberflächen gegen EG 24
 - IV ● —●— Oberflächen gegen Stahl WSt 50
 - V ● —●— Oberflächen gegen Stahl WSt 50
- Verschleißmittel Quarzsand 20-25 μ

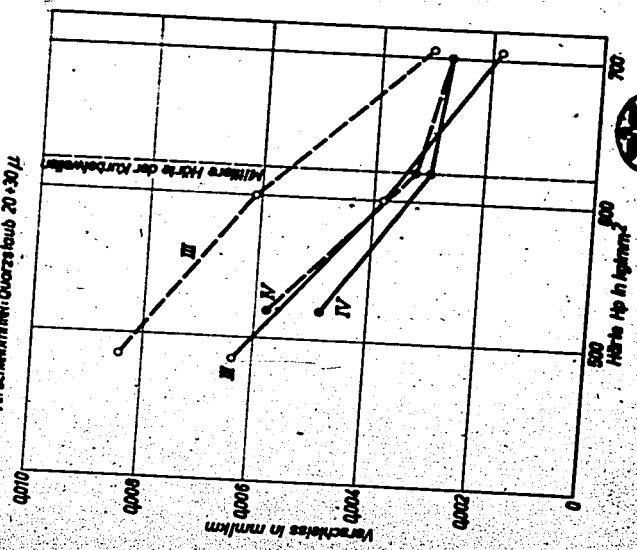


Einfluss der Härte des Werkstoffes auf den Verschleiß bei Gleitreibung

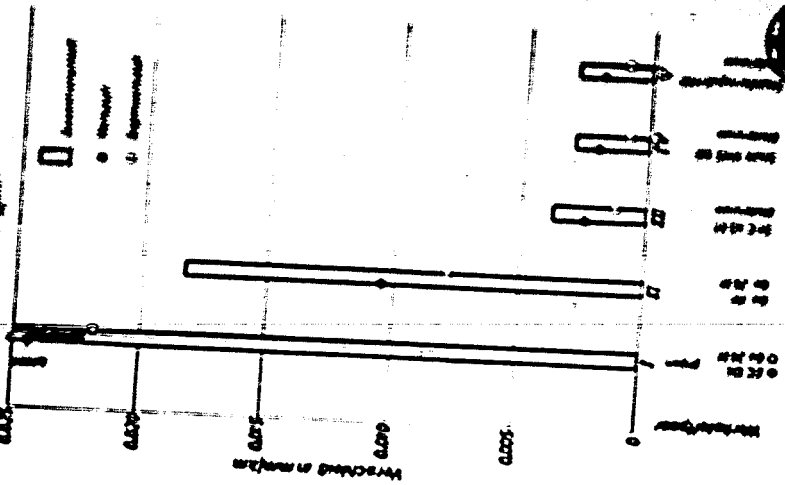
Werkstoffpaarungen:

- III) Bleibronze gegen StC4581
- IV) Bleibronze gegen St08MS15

Flächenpressungen
 - - - $p = 20 \text{ kg/cm}^2$
 - - - $p = 80 \text{ kg/cm}^2$
 - - - Verschleiß mit Quarzstaub $20 \times 30 \mu$



Verschleißverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen bei gleichen Versuchsbedingungen
 Werkstoffpaarung: Quarzstaub $20 \times 30 \mu$
 Flächenpressung: $p = 20 \text{ kg/cm}^2$



Nur zum Dienstgebrauch im Geschäftsbereich des Empfängers

S F I

000662

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 71

über

Vergleichende Versuche an Lagerschalen-Werkstoffen

Bearbeiter: Assistent Arno Döring

Verfaßt beim

Laboratorium für Schmierforschung an der Technischen Hochschule
Dresden

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebrook VDI

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Verschuß zu halten.

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

000663

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 71

Über

Vergleichende Versuche an Lagerschalen-Werkstoffen

Bearbeiter: Assistent Arno Döring

Verfaßt beim

Laboratorium für Schmierforschung an der Technischen Hochschule
Dresden

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Ver-
schluß zu halten.

Professor Dr.-Ing. Heidebrock
Laboratorium für Schmierforschung
Technische Hochschule Dresden

Vergleichende Versuche an Lagerschalen-Werkstoffen

Die Untersuchungen wurden zu einem erheblichen Teil mit Unterstützung des "Forschungsrates für das Kraftfahrzeugwesen" beim Reichsverkehrs-Ministerium durchgeführt. Für diese Unterstützung spreche ich auch an dieser Stelle meinen Dank aus.

Dresden, im Mai 1939.

gez. Heidebrock.

Inhaltsangabe

	Seite
Einleitung	1
I. Das Wesen der Grenzreibung	2
II. Der Versuchsplan	5
III. Die Versuchsergebnisse	9
1. Einzel-Versuche	9
2. Versuchs-Vergleiche	17
IV. Physikalische Deutungen	21
Schrifttum	24

Hierzu als Anlage: Blatt 1 bis 27

Einleitung

Die Richtigkeit der sogenannten hydrodynamischen Lagertheorie ist auch in der neueren Zeit durch zahlreiche Untersuchungen bestätigt (1, 2, 3, 4, 5, 6). *)

Dieselbe gestattet, im Bereich der eigentlichen Flüssigkeitsreibung die Betriebsverhältnisse eines Lagers hinsichtlich Tragfähigkeit, Öldruck, Reibungsarbeit, Temperatur mit hinreichender Genauigkeit vorausbestimmen. Dabei ist bekannt, daß die Betriebssicherheit des Lagers (Abb. 1) in der Hauptsache bestimmt wird durch den sogenannten engsten Lagerspalt, der dadurch entsteht, daß unter dem Einfluß der auf ihn wirkenden Kräfte der Zapfen - im Öl schwimmend - eine Verlagerung im Sinne der Drehung um einen Winkel α_0 (Verlagerungswinkel) erfährt und dadurch an der engsten Stelle mehr oder weniger nahe an die Schale herangedrückt wird.

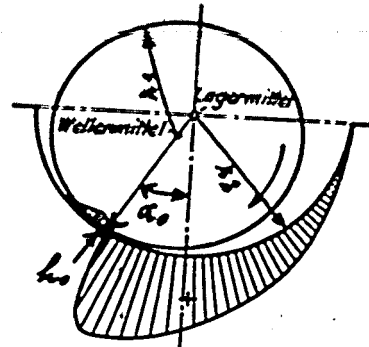


Abb. 1

Unter der Annahme einer völlig glatten Oberfläche von Zapfen und Schale und einer idealen, unelastischen Zylinderform derselben könnte die Tragfähigkeit der Zapfen zu gewaltigen Lasten gesteigert werden, da dieselbe umgekehrt proportional dem Quadrat des Lagerspiels anwächst. Nach einer vom Verfasser entwickelten vereinfachten Berechnungsmethode läßt sich die Tragfähigkeit eines halbzyklindrischen Gleitlagers ausdrücken durch eine Formel:

$$f(\alpha_0) = \alpha_0^3 \cos \alpha_0 = \frac{6 \eta U r_1^2}{c^2 \cdot P/b} \cdot J_0 \cdot f,$$

worin α_0 den Verlagerungswinkel, η die Zähigkeit kg sec/cm^2 , U die Zapfengeschwindigkeit in cm/sec , r_1 den Zapfenhalbmesser (cm), P/b die äußere Last in kg/cm und

$$c = 1/2 \left(\frac{r_1 r_2 - r_1^2}{r_2} \right) \text{ cm}$$

die sogenannte "Schmiegunszahl" bedeutet, die bei den üblichen Lagerspielen $= (r_2 - r_1) / 2 = \delta / 2$ gesetzt werden kann. Der Wert J_0 stellt das - in normalen Fällen konstante - Integral einer trigonometrischen Funktion des Tragwinkels dar und kann $J_0 = 0,098$ gesetzt werden. Der Reduktionsfaktor $f = \sim 0,67$ soll den Einfluß der endlichen Lagerlänge l zum Ausdruck bringen, sofern $l \sim d$. Genaue Untersuchungen über den Einfluß der letzteren sind noch wenig vorhanden; eine ausführliche Versuchsreihe darüber befindet sich in Arbeit.

*) Die Zahlen in den Klammern () beziehen sich auf das Schriftumsverzeichnis am Schluß des Berichtes.

Die oben angegebene Formel gibt - unter der Annahme ideal glatter Oberflächen, völliger Formstetigkeit und Rundheit - die Möglichkeit, die Größe des Verlagerungswinkels mit hinreichender Genauigkeit zu berechnen. Aus der Beziehung

$$h_0 = \delta (1 - \cos \alpha_0)$$

ergibt sich dann die Weite des engsten Spaltes.

Der Wert dieser Berechnungsmethode, über die an anderer Stelle berichtet werden wird, liegt darin, daß man den Einfluß der verschiedenen Faktoren v , U , r_1 , σ und der Last auf die Spaltweite größenordnungsmäßig sogleich übersehen kann. Will man also z.B. eine Motorwelle für eine Belastung von 300 kg/cm^2 bei einer gegebenen Drehzahl von $n = 3000$ und einem Durchmesser von 60 mm im Zapfen berechnen, so bleibt als wählbare Größe nach der obigen Gleichung nur die Zähigkeit des Schmierstoffes und die Schmiegezahl σ , d.h. das Lagerpiel zur freien Verfügung des Konstrukteurs. Wegen der quadratischen Abhängigkeit ist die letztere Größe von besonderer Wichtigkeit. Man kann also bei gegebener Verminderung des Lagerpiels, d.h. Vergrößerung des Öldrucks bis auf 500 kg/cm^2 und darüber steigern. Hierbei ergeben sich aber engste Spaltweiten h_0 in einer Größenordnung von 1μ ($=1/1000 \text{ mm}$) und darunter. Diese liegen noch unter der Größenordnung der kleinsten Unebenheiten, die bei feinsten Bearbeitungen (Läppen, Diamantdrehen usw.) zu erzielen sind. Die Spitzen der Unebenheits-Gebirge nähern sich einander so sehr, daß von einer gleichmäßigen Schichtströmung als Voraussetzung für die sogenannte reine Flüssigkeitsreibung nicht mehr gesprochen werden kann (Abb. 2). Der Zapfen arbeitet vielmehr im Bereich der sogenannten "Grenzreibung", zum mindesten in der Gegend des engsten Spaltes. Auf diesen kommt es aber in erster Linie an.

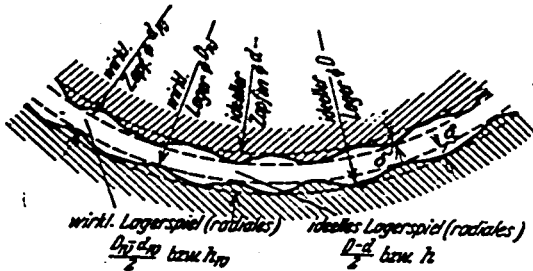


Abb. 2

I. Das Wesen der Grenzreibung

Über das Wesen der Grenzreibung und die darin auftretenden Reibungsverhältnisse liegen bisher noch wenig Forschungen vor. Das ist insofern verwunderlich, als die übergroße Mehrzahl aller Zapfen in diesem Gebiet arbeiten und nur verhältnismäßig wenige im Gebiet reiner Flüssigkeitsreibung. Aber auch von diesem müssen viele beim Anfahren und Stillsetzen durch ein Grenzreibungsgebiet dann hindurchlaufen, wenn die Belastung der Zapfen auch bei niedriger Drehzahl bestehen bleibt.

Es muß ausdrücklich betont werden, daß dieses Gebiet der Grenzreibung noch nichts mit "trockener" oder "halbtrockener"

Reibung zu tun hat, dabei also etwa eine "trockene" oder "metallische" Berührung der Reibkontakte eintritt. Die Haftfähigkeit (Adsorption) der aktiven Kohlen-Wasserstoff-Molekül-Gruppen der ölartigen Schmierstoffe an den metallischen Flächen ist so groß, daß sie mit rein mechanischen Mitteln überhaupt nicht überwunden werden kann, sondern nur chemisch. Die leider immer wieder in Schrifttum anzutreffende Ansicht, daß durch Anlegen einer Spannung und Aufleuchten einer Lampe der "metallische Kontakt" nachweisbar sei, beruht auf unhaltbaren physikalischen Vorstellungen und beweist lediglich, daß die Dielektrizitätskonstante des Schmierstoffes in den engen Lagerpalten stark veränderlich ist.

Die Länge der Öl-moleküle liegt im allgemeinen um 1 bis 2 Zehnerpotenzen unter 1μ . Es können also bei Spaltweiten von 1μ und darunter noch viele Moleküllagen übereinandergeschichtet sein.

Bis zu welcher Grenze herab der Ansatz von Newton

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

Gültigkeit behält bzw. wie der Begriff der "Zähigkeit" als absoluter physikalischer Größe zu deuten ist, ist Gegenstand der physikalisch-chemischen Forschung. Davon hängt die Frage ab, bis zu welchen Spaltweiten herab die hydrodynamische Lagertheorie überhaupt noch eine rechnungsmäßige Kontrolle gestattet, die schon durch die Unebenheiten der Oberfläche bei enger Spaltweite erheblich gestört wird.

Es wird also kaum möglich sein, mit der hydrodynamischen Lagertheorie und den von ihr befruchteten Vorstellungen die Vorgänge im Gebiet der Grenzreibung zu erklären. Dagegen treten die physikalisch-chemischen Grundbegriffe des eigentlichen Schmiervorganges immer mehr in den Vordergrund. Dieser kann nämlich nicht nur durch die bekannte hydrodynamische Drucksteigerung der Schmierflüssigkeit durch Keilwirkung beeinflusst werden, sondern durch die physikalischen Beziehungen des dreiteiligen Elementes: Welle - Schmierstoff - Lagerschale. Diese beeinflussen sich gegenseitig dadurch, daß die an der Oberfläche der Welle auftretenden freien Valenzen der Molekularkräfte eine dielektrische Polarisation (Dipole) in den C-H-Molekülen des Schmierstoffes induzieren und diesen dadurch irgend eine besondere Art von Orientierung erteilen, daß aber eine gleichartige Wirkung auch von dem Werkstoff der Lagerschale ausgeht und somit die "Tragfähigkeit" eines Schmierfilms nicht vom Schmierstoff allein, sondern nur von seiner Affinität zum Wellen-Werkstoff und zur Lagerschale mitbestimmt wird.

Die im Gebiet der Grenzreibung auftretenden engsten Spaltweiten von 1μ und darunter lassen erwarten, daß derartige physikalische Wirkungen bei dieser Größenordnung der Spalte meßbar werden. Arbeitet man also im Gebiet der Grenzreibung mit Lager- und Schmierstoff immer konstant erhält und nur den dritten, d.h. die Lagerschale verändert, so muß der physikalische Einfluß der verschiedenen Schalen-Werkstoffe deutlich gemacht werden können, und zwar zunächst in seiner Gesamtwirkung. Ob dieselbe von weiteren Einflüssen noch bestimmt wird (Struktur der Oberfläche, kristallin, amorph usw.), kann zunächst natürlich nicht entschieden werden (siehe unten!).

Die Wichtigkeit dieser Überlegungen beruht sich mit bekannten Erfahrungen der Praxis. Es liegen für die verschiedenen, für Lagerschalen üblichen Werkstoffe in den technischen Handbüchern eine Menge Erfahrungszahlen vor. Nach diesen schwankt die zulässige Flächenpressung p [kg/cm^2] etwas zwischen den Grenzen von 2 bis 300 kg/cm^2 . Durch die zahllosen neuen Legierungen, wie Kleibronzen, Zinkbronzen, Legierungen mit Aluminium, Kadmium usw. schwillt das Schrifttum über die verschiedenen Lagerwerkstoffe ungebührlich an; ebenso die Zahl der mehr oder weniger erfolgreichen Versuche, sie in die Praxis einzuführen. Für die älteren dieser Legierungen bestehen in der Praxis typische Belastungszahlen, z.B. für Gußeisen $p = 5 \text{ kg/cm}^2$, Gußbronze (Rotguß) $p = 40 \text{ kg/cm}^2$ usw.

In den vor kurzem erschienenen Buch von R. Kühnel "Werkstoffe für Gleitlager" (Berlin, Springer 1939) sind diese Werte auch für eine ganze Reihe neuartiger Werkstoffe zusammengestellt, und zwar für die einzelnen Werkstoffgruppen von darin besonders erfahrenen Fachmännern.

Nirgends - weder in der Praxis, noch in solchen Veröffentlichungen - findet man auch nur einen Versuch der Antwort auf die Frage: "Warum haben Gußeisen, Bronze, Weißmetall usw. eine so verschiedene Tragfähigkeit", d.h. welche Einflüsse geben dabei den Ausschlag?" Es werden lediglich statistisch die Ergebnisse nebeneinander gestellt. Diese sind aber in den allermeisten Fällen Untersuchungsbedingungen aufgenommen worden sind. Es kann unter diesen Umständen nicht wunder nehmen, wenn der Versuch, z.B. die zinnhaltigen Lagermetalle durch Al- oder Mg-Legierungen zu ersetzen, die zinnhaltigen kostenintensiven Pehlschlägen geführt hat. Diese werden noch vermehrt durch die große Zahl der Kunstharz-Preßstoffe, die an sich als Lagerschalen-Werkstoff eine immer größere Bedeutung gewinnen, aber andererseits auch immer wieder das Versuchsfeld für alle möglichen zwecklosen Stoff-Mischungen bilden. Meistens ergibt dann erst ein kostspieliger Betriebsversuch die Grenzen der Brauchbarkeit.

Das Bedürfnis ist also sehr groß, aus der Methode der rein statistischen und unorientierten Vergleichsversuche zu wirklich systematischen und richtungsweisenden Untersuchungen zu gelangen. Hierzu erscheint das Arbeiten im Gebiet der Grenzreibung nach dem Vorstehenden aussichtsvoll, weil bei dieser die Möglichkeit besteht, die Eigenschaften des Lagerwerkstoffs herauszuarbeiten, sofern es gelingt, die übrigen Faktoren des Dreistoff-Elementes: Welle - Schmierstoff - Schale praktisch konstant zu halten und die hydrodynamischen Wirkungen weitgehend zurückzudrängen. Hierzu ist es gemäß der obigen Gleichung zweckmäßig, den Zustand der Grenzreibung durch kleine Zapfengeschwindigkeiten und große Belastungen herbeizuführen. Dies schließt nicht aus, daß auch bei sehr hohen Lasten und gleichzeitig hohen Zapfengeschwindigkeiten grenzreibungsähnliche Zustände entstehen können. Diese bieten aber der experimentellen Untersuchung weit größere Schwierigkeiten.

Ein weiterer Grund, die Versuchsarbeiten in der geschilderten Richtung voranzutreiben, liegt in den neueren grundlegenden Arbeiten der physikalischen Chemie, die sich mit der Struktur der Flüssigkeiten allgemein und der zähen Flüssigkeiten im besonderen befassen und aus denen sich allmählich auch für den Ingenieur bestimmte neuzeitliche Vorstellungen über den physikalischen Inhalt des

Schmiervorgangs entwickeln. Die Arbeiten von Debye, Hückel (7), Talsassen, K. L. Wolf, Kyropoulos u. a. in Deutschland, von Finckh, Bowden, Blok, Trillat im Ausland, von denen die letzteren vor allen in dem Bericht über die Londoner Schmierstagung (6) ihren Niederachlag gefunden haben, lassen immer mehr erkennen, daß den molekular-physikalischen Eigenschaften der in Frage kommenden Stoffe und den Erscheinungen der dielektrischen Polarisation der Moleküle ein entscheidender Einfluß zukommt, wobei auch die Oberflächenstruktur von Bedeutung ist. Diese Arbeiten, die reine Grundlagenforschung darstellen, befinden sich aber noch im Anfangsstadium, und es wird noch geraume Zeit vergehen, bis daraus für den Techniker greifbare, zahlenmäßige Unterlagen resultieren. Sie werden in einem auf meine Anregung ins Leben gerufenen Arbeitsausschuß beim VDI zunächst im kleineren Kreise verfolgt und durch eigene Beiträge der beteiligten Mitarbeiter ergänzt. Auch in Frankreich hat sich ein solcher Ausschuss gebildet, in dem mit dem größten wissenschaftlichen Aufwand die vorliegenden Fragen teils von der Seite der kinetischen Gastheorie, teils unmittelbar aus der Quanten-Mechanik in höchst geistvoller Weise diskutiert werden (11). Die Einstellung der Forscher dazu ist verschieden, je nachdem die Flüssigkeiten mehr als kondensierte Gase oder als quasikristalline Körper aufgefaßt werden (8).

Demgegenüber muß es Aufgabe der technischen Wissenschaft sein, die Anwendbarkeit dieser neuen Erkenntnisse zu verfolgen und zu versuchen, in technischen Methoden und Maßgrößen vorläufige Ergebnisse zu erzielen, die in der gleichen Richtung laufen und neben der exakten Forschung der Physiker für die dringenden Tagesaufgaben der Praxis Anhaltspunkte geben. Aus diesem Grunde ist den vorliegenden Versuchen ein weiterer Rahmen gegeben, und sie mußten daher über die ursprüngliche Aufgabe der Untersuchung einzelner bestimmter Werkstoffe hinaus auf eine größere Zahl und große Verschiedenartigkeit ausgedehnt werden. Es mußten vor allem die von den Metallen strukturell so sehr abweichenden Kunststoffe einbezogen werden.

II. Der Versuchsplan

Die Methoden und der Umfang der hier zu behandelnden Versuche wurden entwickelt bei der Untersuchung verschiedener Kunstharz-Lagerstoffe, über die bereits früher berichtet wurde (9). Die dabei erzielten Erfahrungen führten zu folgendem Versuchsschema. Auf einer für diesen Zweck konstruierten einfachen Lagerprüfmaschine nach Blatt 1 werden vollzylindrische Versuchsbuchkörper von 60 mm Bohrung und 40 mm Länge in einen massiven Lagerkörper aus Stahl eingepreßt und in der üblichen Weise durch ein Hebelwerk mit der Übersetzung 1:100 durch Gewichte belastet. Das Drehmoment der Reibung am Lagerkörper wird wie üblich an einer Gewichtswaage mit einer Genauigkeit von ± 5 v.H. gemessen. Der regelbare Antrieb erfolgt von einem Leonard-Satz über ein Riemenvorgelege; die Drehzahlen können von etwa 50 bis 500 U/min entsprechend einer Zapfengeschwindigkeit von 0,15 bis 1,57 m/s verändert werden, die Belastungen von 0 bis 200 kg/cm^2 , bezogen auf die Projektion $l \cdot d$ der belasteten Schalenhälfte. Die Welle besteht aus Stahl 70 und ist sauber geschliffen. Es wurde bei allen Versuchen stets die gleiche Welle benutzt, da kein Verschleiß eintrat.

Das Öl, Marke B O S der Rhenania-Ossag, bleibt stets das gleiche, ebenso die Eintrittstemperatur mit 30° . Die durch eine Ölpumpe zugeführte Ölmenge wird stets auf $12 \frac{1}{h} = 0,2 \frac{1}{min}$ durch Verändern des Zuflußdruckes eingeregelt, damit stets möglichst gleichartige Strömungsverhältnisse im Lager erzielt werden. Diese Menge entspricht etwa dem Ölverbrauch eines normalen Lagers gleicher Abmessungen mit Umlaufschmierung. Der Ölneinritt erfolgt durch eine Bohrung und eine Lagenut kurz vor der Stelle der höchsten Belastung.

Das Lagerpiel aller Buchsen wird gleichmäßig auf $0,25 \text{ mm}$ gehalten (Durchmesser-Spiel). Nur bei dem hochwertigen Weichmetall mußte das Spiel aus den weiter unten erörterten Gründen auf $0,35 \text{ mm}$ vergrößert werden.

Die Temperatur wird außer an der Eintritts- und Austrittsstelle im Ölfilm selbst durch ein Thermoelement gemessen. Dieses wird kurz vor dem Punkt der höchsten Belastung durch eine Bohrung der Lagerschale eingeführt, so daß seine Kontaktstelle im Ölstrom liegt. (Messungen, bei denen die Bohrung nicht bis in den Schmierfilm reicht oder das Meßinstrument im Werkstoff liegt, ergeben kein richtiges Bild der Temperatur!)

Die Temperatur-Zähigkeits-Kurve des Öles ist in Blatt 2 wiedergegeben; sie zeigt, daß es in dem Versuchsbereich wichtig ist, die Eintrittstemperatur genau konstant zu halten. Die Temperaturwerte und Reibungszahlen werden bei verschiedenen Belastungen und Drehzahlen gemessen und in Diagrammen über der Zapfengeschwindigkeit aufgetragen (siehe unten!).

Die zulässige maximale Grenzbelastung bzw. "Tragfähigkeit" des betreffenden Werkstoffes wird aus dem Verlauf der Temperaturkurve ermittelt. Als höchste zulässige Belastung gilt diejenige, bei der die Temperaturkurve noch innerhalb des Versuchs-bereichs ($v = 1,57 \text{ m/s}$) in einen Beharrungszustand von nicht mehr als etwa 70° übergeht. Diese Grenze wurde gewählt, um diejenigen Kunstharz-Lagerschalen in den Vergleich einbeziehen zu können, deren Wärmebeständigkeit bei etwa 100° nachläßt, und mit Rücksicht darauf, daß die Temperaturen an der nicht zugänglichen Stelle der höchsten Belastung (Öldruck!) noch etwas höher sind als an der Meßstelle. In manchen Fällen äußert sich aber die Grenze der Tragfähigkeit auch dadurch, daß bei einer bestimmten Belastung der Werkstoff bei geringen Drehzahlen ohne unzulässige Temperatur-Erhöhung zu fressen beginnt.

Vor jeder Messung, die nur im Beharrungszustand erfolgen kann und daher zeitraubend ist, wurde jede Versuchsbuchse mehrere Stunden mit geringen Belastungen eingefahren. Während der Versuche wurden, namentlich an den Grenzbereichen, die Buchsen wiederholt ausgebaut, um festzustellen, ob bereits Änderungen der Oberflächen-Struktur (Freß-Stellen) zu erkennen waren. Der Beginn dieser Erscheinungen konnte übrigens am Lauf der Maschine ohne weiteres durch starke Schwankungen und typische Geräusche sofort wahrgenommen werden.

Da nur "verschleißfreie" Versuche zum Vergleich gestellt werden sollten, waren auch hierdurch die Grenzbelastungen bzw. Geschwindigkeiten bestimmt. Dies gilt insbesondere beim Arbeiten an der unteren Geschwindigkeitsgrenze ($v = 0,15 \text{ m/sec}$). Bei

dieser ist stets die Gefahr eines plötzlichen Anwachsens der Reibungszahl gegeben. Ein Herabgehen unter diese Grenze war aus betriebstechnischen Gründen nicht möglich. Die Verhältnisse im Gebiet kleinster Geschwindigkeiten sollen Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, sobald die räumlich gänzlich unzulänglichen Verhältnisse des Laboratoriums dies gestatten.

Die Laufflächen der Versuchsbuchsen mußten so übernommen werden, wie sie von den Lieferfirmen bzw. Werkstätten angeliefert wurden. Auf möglichstste Glätte wurde hingewirkt, jedoch weisen die einzelnen Buchsen darin Unterschiede auf (siehe unten!). Die Versuche ergeben indessen, daß diesen Zustand kein entscheidender Einfluß auf das Ergebnis innewohnt. Außerdem gibt es leider bis z. Zt. noch kein einwandfreies Verfahren, das die Abbildung bzw. Messung der Rauigkeiten einer Oberfläche unterhalb der Größenordnung von 2μ zerstörungsfrei gestattet. Weder mit dem Lichtschnitt-Verfahren von Zeiss-Schmalz noch dem Tastverfahren von Kiese-wetter kann man in das Innere der Buchsen gelangen. Messungen nach der Methode von Pethen (Kondensator-Methode) ließen sich bisher nur auf metallische Körper anwenden; sie lassen noch keinen exakten Vergleich zu. Hierbei ist außerdem zu beachten, daß vor allem bei Feinstbearbeitung (Diamantdrehen) die erzielte Glättung der Oberfläche - die einem Verschleißvorgang entspricht - nicht nur vom Bearbeitungsverfahren abhängt, sondern die Oberflächenstruktur vielmehr eine Funktion der physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs (kristalline, amorphe oder quasiamorphe Struktur) darstellt. Nähere Angaben darüber erfolgen bei der Besprechung der Einzelversuche.

Eine Übersicht über die untersuchten Werkstoffe zeigt die Tafel Blatt 3. Dieselbe umfaßt vier Kunstharz-Lagerbuchsen bekannter Firmen, und zwar aus der Phenol-Gruppe je eine formgepreßt mit regelloser Textilfüllung, eine vorgepreßt und gehärtet mit geschichteter (gewickelter) Textilfüllung, auf der Drehbank bearbeitet, eine aus füllstofffreiem Gießharz sowie eine gleiche mit sehr fein verteiltem Silicium-Carbid gemischt.

In der metallischen Gruppe wurden untersucht:

- ein Sondergußeisen (Lagerguß, stark graphithaltig),
- normale Lagerbronze GBZ 14,
- Zinkbronze (Glycometall), in Gußeisen-Stückschale
- Zinnbronze (Weichmetall mit 80 % Sn) desgl.

ferner

- 2 Al-Legierungen, davon eine mit Al-Stüttschale mit aufgetragener Laufschrift aus Sonderlegierung,
- eine weitere aus durchgehend gleichem Metall (Hauptbestandteil Al mit 99,98 % Reinheitsgrad).

Nebenherlaufende Versuche mit Holz-Lagerschalen (Lignostone) ergaben schon bei Belastungen unter 15 kg/cm^2 ein völlig negatives Resultat; sie sind nicht mit aufgenommen.

Die Ergebnisse der Versuche sind für jeden Werkstoff einzeln in einem Diagramm (Blatt 5 u. f.) aufgetragen und in graphischen Übersichten zusammengestellt.

Schon bei diesen Versuchsreihen ergaben sich so charakteristische Unterschiede der einzelnen Werkstoffe, daß eine Erklärung aus den bekannten Eigenschaften der Festigkeit (E-Modul, Brinell-Härte, metallographische Struktur usw.) nicht gefunden werden konnte, sondern nur in den eingangs angedeuteten physikalischen Vorgängen. Es wurden daher noch weitere Versuchsmethoden angefügt, und zwar:

1. Härtebestimmung bzw. Schmierunfähigkeit

Die Methoden zur Härtebestimmung sind leider für Metalle in anderer Weise genormt als für Kunstharz-Preßstoffe. Um einen für alle untersuchten Stoffe gleichartigen Wert wenigstens qualitativ zu ermitteln, wurden sämtliche Stoffe nach dem Verfahren von Martens auf dem Schopper-Apparat mit einer Kugel von 5 mm und 100 kg Belastungsdruck geprüft. Ein solcher Apparat wurde von dem Laboratorium von Prof. Sachsenberg freundlichst zur Verfügung gestellt. Die Versuche wurden jeweils bis zur Beendigung des Kriechvorgangs, d.h. bis zu 10 Minuten Belastungsdauer, durchgeführt. Auf eine Umrechnung der Eindruck-Tiefen in absolute Zahlen wurde verzichtet, vielmehr nur die Eindruck-Tiefen als Vergleichswert in die Diagramme aufgenommen.

2. Physikalischer Gleitwiderstand der Öl-schicht bei unbelastetem Lager

Um die Frage zu klären, wie weit die oben angedeuteten molekular-physikalischen (dielektrischen) Zustände in der Schmier-schicht auf das verschiedenartige Verhalten der einzelnen Werkstoffe einen Einfluß haben könnten, wurde die in Blatt 4 wiedergegebene Versuchseinrichtung behelfsmäßig aufgebaut.

Ein Stück Welle aus gleichem Stahl (St 70), wie bei der Lagerprüfmaschine und auf gleiches Maß ($60 \pm 0,01$) geschliffen, wurde an einem 0,2 mm dünnen Silberdraht senkrecht und frei be-rollen aufgehängt. Der Draht läuft über zwei große Aluminium-rollen mit Kugellagerung und trägt am anderen Ende eine Schale zur Aufnahme der Gewichte.

Die Versuchslager-Buchsen werden ebenfalls senkrecht auf einer festen Platte am gleichen Gestell aufgebaut und so zentriert, daß ihre Achse genau in der Achse des Drahtes liegt. An die vor-handene Ölbohrung der Buchsen wurde die Ölpumpe der Lagerprüfma-schine angeschlossen und ein gleichmäßiger Ölstrom mit sanftem Druck (0,5 bis 1 at) und der gleichen Temperatur von 30° zugeführt, so daß der Spalt zwischen Buchse und Welle stets mit einem gleichmäßigen Ölfilm gefüllt ist, der oben und hauptsächlich unten herabtropft. Die durchfließende Ölmenge wurde wieder auf 12 l/h eingeregelt.

Unter den Lagerbuchsen wurde ein geeichtes Ölgefäß aufge-stellt; dieses dient zum Auffangen des Öles und zur Messung der Ölmenge. Die Beweglichkeit der Welle wurde durch zwei Anschläge so begrenzt, daß sie einen senkrechten Hub von 200 mm in den Buchsen gleitend auf und ab bestreichen kann. Zur Messung wird die Welle in die unterste Stellung gebracht und nun soviel Ge-wichte in die am Draht hängende Schale gelegt, daß die Aufwärts-bewegung bis zum oberen Anschlag stets in der gleichen Zeit (rd.

4,8 sec), d.h. also mit gleicher Durchschnittsgeschwindigkeit (einschließlich der für die übrige kurze Beschleunigungsperiode erforderlichen Zeit) zurückgelegt wurde. Die Größe der jeweils aufgelegten Gewichte ergibt also ein Maß für den bei den einzel-nen Werkstoffen erforderlichen Energieaufwand zur Überwindung der Flüssigkeitsreibung.

Diese Versuche erfordern ein ziemliches Einfühlungsvermögen, wenn zu große Streuung vermieden werden soll. Sie wurden jeweils so oft wiederholt, bis sich ein einigermaßen zuverlässiger Mittelwert ergab. Sie haben also zunächst auf große quantitative Genauigkeit keinen Anspruch. Die Unterschiede bei den einzelnen Werk-stoffen sind aber trotzdem so auffallend und charakteristisch, daß qualitativ der Einfluß der physikalischen Affinitäten eindeutig zu Tage tritt. Da alle übrigen Versuchsfaktoren bei allen Werk-stoffen stets genau die gleichen waren, kommt in der Verschieden-heit der Ergebnisse die Wirkung der verschiedenen Affinität der Werkstoffe untereinander und zum Öl rein und überraschend zum Aus-druck.

Die Ergebnisse wurden in den weiter unten beschriebenen Dia-grammen den eigentlichen Lagerversuchen mit belasteter Schale ge-genübergestellt. Sie sollen später mit verfeinerten Meßmethoden erweitert werden.

Über die technologisch-mechanischen Eigenschaften der unter-suchten Werkstoffe (Zug- und Druckfestigkeit, Biegefestigkeit, E-Modul, Wärmeleitfähigkeit usw.) wurden keine Versuche ange-stellt. Mittelwerte darüber sind in den bekannten Taschenbüchern genügend vorhanden.

III. Die Versuchsergebnisse

1. Einzel-Versuche Diagramme Blatt 5 ff.

Werkstoff K₂. Diagramm-Blatt 5.

Es handelt sich um einen Kunstharz-Preßstoff Type L₅ der Firma Gebr. Nowack A.-G., Bautzen.

Die Buchse ist auf Fertigmaß formgepreßt und besitzt eine schöne, glatte, glänzende Oberfläche aus reinem Harz, in der Text-tilfasern (regellos geschichtet) nicht hervortreten. Das Aus-pressen auf genaues Endmaß 60,25 mm begegnete erheblichen preß-technischen Schwierigkeiten, hervorgerufen durch die geteilte Do-sierung der Preßmasse. Die Buchse ist daher nicht ganz homogen in ihrer Zusammensetzung und etwas konisch; infolgedessen trat bei Überlastung das Fressen immer an einer Seite der Buchse auf. Die Belastbarkeit erreicht mittlere Werte, wie sie auch bei ähn-lichen Preßstoffen auftreten; nach einmal erfolgter Überlast (Blocken) erscheint der Stoff verändert und ergibt nicht mehr die gleichen Meßwerte wie vorher.

Werkstoff K₄. Diagramm-Blatt 6.

Es handelt sich um das bekannte, mit "Gerohlex" be-zeichnete Fabrikat der H. Römmler A.G., Spremberg. Das Harz ge-

hört zur Phenolgruppe und ist mit geschichteten (gewickelten) Textilgewebe aus Baumwolle durchsetzt, als Dichtung gepreßt und ausgehärtet. Das Endmaß ist durch Drehen mit Hartmetall (Widia) hergestellt. Die Oberfläche, aus der die Textilstoffe fuhrbar hervortreten, zeigt den etwas rauhen Charakter dieser Art Preßstoffe.

Die Versuche ergeben im Versuchsbereich den konstanten Verlauf der Reibungszahl; diese ist somit geschwindigkeitsunabhängig. Nur unterhalb $v = 0,157$ m/s zeigt sich bei höheren Belastungen ein leichter Anstieg der Reibungszahl. Es sind also gute Notlaufeigenschaften vorhanden.

Die Temperaturkurve zeigt bereits bei 50 kg/cm^2 einen steilen Anstieg. Bei höheren Belastungen reicht die Versuchslänge von 12 l/h nicht aus, um die Reibungswärme abzuführen; die Temperatur zeigt in der Richtung auf wachsende Geschwindigkeit noch bei $v = 1,57$ m/sec steigende Tendenz. Man kann wohl, wie frühere Versuche zeigen, höhere Belastungen (bis 100 kg/cm^2) erzielen, muß aber dann die Ölmenge zwecks besserer Wärmeabfuhr steigern. Bei der vorliegenden Ölmenge, die mit einem Druck von 1 at zugeführt werden mußte, um den stets gleichen Wert von 12 l/h zu erreichen, sind 50 kg/cm^2 als Vergleichshöchstbelastung anzusehen. Die Wärmeleitfähigkeit ist im Vergleich zu Metall sehr gering und hält sich in den bekannten Grenzen; die Brinellhärte wird von der Firma mit 30 bei 20° und 25 bei 60° angegeben.

Der Werkstoff schrumpft im heißen Öl bei den vorliegenden Temperaturen sichtlich; die Bohrung zeigte sich nach Ausbau um $0,1 \text{ mm}$ erweitert. Gelegentliche kurzzeitige Überlastungen bis auf 170° bringen keine strukturelle Änderung des Stoffes hervor; nach erfolgter Entlastung zeigten sich die Meßwerte unverändert. Das ist zweifellos eine für die Betriebsfähigkeit wichtige Eigenschaft.

Werkstoff K₃. Diagramm-Blatt 7.

K₃ ist ein reines Giesharz (Edelharz), Marke "Dekorit F" der Firma Dr. F. Raschig G.m.b.H., Ludwigshafen. Die Zusammensetzung ist nicht bekannt. Es gehört zur Phenolgruppe und ist ohne Füllstoff gegossen und langsam ausgehärtet.

- Zugfestigkeit rd. 1000 kg/cm^2
- Biegefestigkeit $1300 - 1400$ "
- Härte nach Brinell rd. 1050 "
- spezifisches Gewicht rd. $1,25$ "
- Schlagbiegefestigkeit (Normalstab) . . . $23 - 26$ "

Frühere Versuche, in längeren Zeitabständen wiederholt, über die bereits berichtet wurde (10), zeigen, daß der Stoff praktisch ohne Quellung oder Schrumpfung arbeitet. Die mit Hartmetall feingedrehte Oberfläche zeigt hervorragende Glätte, tiefblaue, glasklare Farbe.

Die Tragfähigkeit steigt in der zulässigen Temperaturgrenze bis auf rd. 130 kg/cm^2 ; die Reibungszahlen liegen vergleichsweise niedrig und verlaufen über der Geschwindigkeit nahezu konstant mit

der Neigung zum Ansteigen bei kleinen Geschwindigkeiten. Die Temperaturen liegen sehr niedrig und zeigen flachen Anstieg; dagegen ist nach den früheren Versuchen die Wärmebeständigkeit bereits bei rd. 90 bis 100° unsicher. Es treten bei Überhitzung plastische Formänderungen und Sprünge auf, wobei auch die Struktur des Werkstoffes sich zu ändern scheint. Die Meßergebnisse sind dann nicht mehr reproduzierbar.

In den Temperaturgrenzen bis etwa 70° zeigt sich dieses füllstofffreie Kunstharz in seinen Laufeigenschaften weit überlegen, gleichen Ölmengen bzw. Kühlung vorausgesetzt. Wenn bei textilgedrehten Kunstharzen höhere Tragfähigkeitszahlen genannt werden, dann nur unter anderen Kühlungsverhältnissen. Beim Dekorit scheint die außerordentliche glatte Oberfläche, die ebenso wie der Bruch eine glasartige, d.h. amorphe Beschaffenheit aufweist, bei den guten Laufeigenschaften stark mitzusprechen. Es wird sich empfehlen, diesen Werkstoff weiter zu erforschen. Für hochbeanspruchte Lager erscheint vorläufig seine Wärmebeständigkeit noch unzureichend.

Werkstoff K₃. Diagramm-Blatt 8.

Der Werkstoff stellt ein Giesharz (Edelharz) ähnlich der Marke Dekorit dar und entstammt wie dieses der Firma Dr. F. Raschig G.m.b.H., Ludwigshafen. Er ist mit sehr fein gemahlenem Pulver von Silicium-Carbid (in der Feinheit von $20\ 000$ Maschen auf 1 cm^2) durchsetzt. Genaue Zusammensetzung und Herstellung sind nicht bekannt. Trotz der bekannten Härte des Füllmaterials zeigt der Stoff einen eher weichen Charakter, mit glatter Oberfläche von grauem, fettigen Aussehen. Die Wärmeleitfähigkeit scheint durch die metallische Beimischung größer zu sein als bei dem Werkstoff Dekorit; ihre absolute Größe wurde noch nicht gemessen. Dagegen ist die Wärmebeständigkeit eher noch geringer und die Neigung zu plastischer Verformung noch größer. Bei steigenden Belastungen besteht Neigung zum Klocken.

Die Reibungszahlen sind von gleicher Größenordnung wie bei K₃; die Höchstbelastung konnte aber nur auf 50 kg/cm^2 gesteigert werden bei einer Höchst-Temperatur von rd. 57° . Bei höheren Belastungen wurde der Werkstoff plastisch verformt und schrumpft plötzlich. Seine meßbare Härte unter dem Schopper-Apparat liegt dabei etwa zwischen derjenigen von K₄ und K₂.

Trotz des besonders harten Füllstoffes wurde die Welle niemals angegriffen; auch nicht bei einem Trockenlauf von 30 sec bei 33 kg/cm^2 Belastung. Die Ursache hierzu dürfte in der außerordentlich feinen Verteilung des Füllstoffes liegen.

Werkstoff Ge. Diagramm-Blatt 9.

Gubeisen für Lagerzwecke, Marke "Feinguß" der Firma Meier & Weichelt, Eisen- und Stahlwerke, Leipzig.

Das Eisen hat folgende Zusammensetzung:

C	Graphit	geb. C	Si	Mn	P	S
3,44	3,36	0,08	3,29	0,52	0,4	0,076

Die Oberfläche war sauber bearbeitet und an sich glatt. Durch den starken Graphitgehalt hat sie indessen ein fleckiges und nicht ganz porenfreies Aussehen.

Die mehrfach wiederholten Lagerversuche ergeben nur eine sehr geringe Tragfähigkeit und schlechte Notlaufeigenschaften. Die Kurven der Reibungszahl liegen an sich niedrig (um 0,015), zeigen aber bei abnehmender Geschwindigkeit schon frühzeitig einen steilen Anstieg und daher Neigung zum Pressen. Höhere Belastungen als $16,7 \text{ kg/cm}^2$ konnten nicht aufgebracht werden, auch diese nur herab bis zu $v = 1,0 \text{ m/sec}$. Dabei liegen die Temperaturen kaum höher als 45° , temperaturmäßig hätte also eine weit höhere Belastbarkeit erwartet werden können. Umgekehrt zeigt die Buchse bei dem unbelasteten Gleitversuch in der hängenden Anordnung einen auffallend großen Gleitwiderstand.

Das Ergebnis entspricht den Erfahrungen der Praxis, daß man gußeisern Laufflächen im allgemeinen nicht höher als etwa 5 bis 10 kg/cm^2 belasten soll. Es widerlegt auch die vielfach vertretene Auffassung, daß der starke Graphitgehalt oder die porige Oberfläche den Schmiervorgang günstig beeinflussen müsse. Davon ist hier nichts zu merken. Bei Belastungen von rd. 25 kg/cm^2 trat starkes Pressen ein; das ausströmende Öl zeigte sich braun gefärbt, es hatte sich also scheinbar Graphit gelöst.

Bei entsprechend weitem Lagerpiel und hoher Drehzahl kann man natürlich einen Zustand voller Flüssigkeitsreibung erzielen. Dabei riskiert man aber beim jedesmaligen Durchfahren der Grenzreibungszone unter Last das Pressen der Welle, wie die Versuche an der großen Lagerprüfmaschine des Instituts deutlich erkennen lassen.

Hinsichtlich mechanischer Festigkeit und Härte steht das untersuchte Gußeisen an der Spitze aller Werkstoffe, in der Tragfähigkeit als Lager ganz am Ende. Das ist ein eindrucksvoller Beweis für die Tatsache, daß andere physikalische Eigenschaften die Tragfähigkeit bestimmen, nämlich die Fähigkeit, im Kontakt mit dem Werkstoff der Welle und dem Schmierstoff eine ausreichende Orientierung der Molekülgruppen des Schmierstoffs zu bewirken.

Gußeisen besitzt diese Fähigkeit nur in sehr geringem Maße. Daher kann von seiner Verwendung für höher beanspruchte Lager nichts erwartet werden.

Werkstoff GBz. 14. Diagramm-Blatt 10.

Lagerbronze 14 (Zinnbronze) in handelsüblicher Zusammensetzung (14 % Sn).

Der Werkstoff-Abguß wurde von einer Handelsgießerei bezogen und in der Hochschule bearbeitet. Eine genaue Analyse liegt nicht vor; es kam nur darauf an, eine der viel benutzten üblichen Lagerbronzen mit einzubeziehen.

Die Belastungsfähigkeit ist schon bei rd. 70 kg/cm^2 begrenzt; es lassen sich hier die kleinen Geschwindigkeiten nicht mehr ausfahren. Unterhalb $v = 0,5 \text{ m/sec}$ steigen die Reibungswerte steil an. Die Notlaufeigenschaften sind also in diesem Gebiet nicht günstig.

Dagegen liegen die Temperaturen durchweg sehr niedrig, ohne daß dadurch aber die Tragfähigkeit günstig beeinflusst wird. Diese wird vielmehr dadurch begrenzt, daß schon bei kleineren Geschwindigkeiten der Beginn des Pressens sich durch eingendes Ton ankündigt. Die praktische Belastungsgrenze liegt kaum höher als rd. 30 bis 40 kg/cm^2 .

Werkstoff W M B. Diagramm-Blatt 11.

Der Werkstoff stellt eine handelsübliche Zinkbronze dar, die unter dem Namen Motor - Glyco 3 in Handel ist. Eine genaue Analyse liegt nicht vor; die Zusammensetzung dürfte etwa sein:

6 bis 9 % Sn, 84 bis 86 Zn, Rest Cu, Al und P.

Der Abguß wurde aus dem Handel bezogen und in der Hochschule bearbeitet (gußeiserne Stützschaale mit Ausguß).

Die erzielbaren Höchstlasten reichen nur bis rd. 50 kg/cm^2 ; der Versuch mit 70 kg/cm^2 konnte mit kleinen Geschwindigkeiten nicht unter $v = 0,8 \text{ m/sec}$ ausgefahren werden, da der Stoff begann, sich plastisch zu verformen. Die Reibungszahlen verlaufen bei den niedrigeren Belastungen sehr stetig; die Temperaturen gehen nicht über 50° hinaus. Die Belastungsgrenze wird also nicht durch die Höchsttemperatur bei $v = 1,57 \text{ m/sec}$, d.h. der größten Geschwindigkeit bestimmt, sondern durch den Beginn des Pressens bei geringer Geschwindigkeit. Im Bereich derselben ist also Vorsicht bei Belastungen von 50 kg/cm^2 geboten. Öldrucksteigerung bei Beginn der Verformung erweist sich als wirkungslos.

Werkstoff W M 80. Diagramm-Blatt 12.

Dieser Werkstoff hat die übliche Zusammensetzung eines hochzinnhaltigen Weißmetalls (Zinnbronze) mit 80 % Zinngehalt, Rest Blei und Antimon. Das Metall wurde von einer Handels-Gießerei geliefert und in der Hochschule auf genaues Maß und glatte Lauffläche bearbeitet. Eine genaue Analyse liegt nicht vor. Das Weißmetall wurde in der üblichen Weise in eine gußeiserne Stützschaale eingegossen.

Bei Aufnahme der Versuche zeigte sich sofort, daß mit dem normalen Öldruck die vergleichsmäßige Ölmenge von 12 l/h nicht durchzubringen war. Der Werkstoff braucht sehr lange Einlaufzeit. Auch bei gesteigertem Öldruck (bis zu 3 at) gelang es unter den vorliegenden Versuchsbedingungen nicht, mehr als einige Öltröpfchen hindurchzudrücken, trotzdem die Abmessungen und das Lagerpiel die gleichen waren, wie bei den anderen Buchsen. Dadurch trat die Gefahr unzulässiger Erwärmung ein. Um die Versuche unter den gleichen Geschwindigkeits-Verhältnissen durchführen zu können, wurde daher das Durchmesserspiel von $0,25 \text{ mm}$ auf $0,35 \text{ mm}$ vergrößert; damit wurde es möglich, die normale Ölmenge von 12 l/h , allerdings bei erhöhtem Zuflußdruck, aber bei 30° Eintrittstemperatur durchzuleiten, also gleichartige Strömungsverhältnisse zu erzeugen.

Die gemessenen Reibungswerte liegen vergleichsweise niedrig und verlaufen ohne Abhängigkeit von der Geschwindigkeit konstant. Die Temperaturkurve verläuft bis zu Belastungen von 134 kg/cm² flach und unterhalb 70°. Da die Belastungsfähigkeit damit nicht erschöpft schien und die Buchse noch keinerlei Spuren von Anfräsung aufwies, wurde die Belastung auf 175 kg/cm² erhöht. Dabei erreichte die Temperatur bei flachem Verlauf einen Höchstwert von 60° bei der Höchstgeschwindigkeit von v = 1,57 m. Diese Temperatur erscheint für Weißmetall unbedenklich; es wurde daher der Wert von 175 kg/cm² als höchste Tragfähigkeit in die Vergleiche eingesetzt. Die Buchse zeigte nach Ausbau nur einige kleine blanchierten Stellen (Laufspiegel), die auf eine Veränderung der ursprünglichen Oberflächenstruktur hindeuten. Die Belastungen wurden daher nicht weiter gesteigert, da nur verschleißfreie Versuche zum Vergleich gestellt werden sollten.

Das eigenartige Verhalten dieses Werkstoffes zeigt sich auch aus dem in Blatt 13 zum Vergleich gestellten Wert der Ölzuflußdrücke gegenüber der Belastung, wobei erstere besonders genau gemessen wurden. Um die Vergleichsmenge von 12 l/h durchzubringen, mußte der Öldruck mit wachsender Belastung von 1,4 at bis auf nahezu 2,5 at erhöht werden. Erst bei der Höchstlast kommt man - wohl auf Grund der bei der erhöhten Temperatur gesunkenen Zähigkeit - wieder mit 2 at aus. Dabei mag auch die mit wachsender Geschwindigkeit zunehmende hydrodynamische Drucksteigerung eine Rolle spielen und den Übergang in das Gebiet der vollen Flüssigkeitsreibung andeuten.

Der vollkommen stetige und von der Geschwindigkeit unabhängige Verlauf der Reibungszahlen erweist die guten Notlaufeigenschaften des Metalls. Demgegenüber erscheint die Tatsache auffallend, daß das Lager mit dem normalen Spiel von 0,25 mm überhaupt zu wenig und mit dem erweiterten Spiel von 0,35 mm die gemischte Menge von 12 l/h Öl nur mit erhöhtem Druck annimmt. Daß hieran nur dielektrische, von der physikalischen Struktur des Werkstoffes abhängige Wirkungen, nicht aber die Versuchsbedingungen ursächlich beteiligt sind, kann keinem Zweifel unterliegen. Hierüber wird noch bei dem Vergleich der Versuche gesprochen werden.

Diese Erscheinung würde sich natürlich bei höherer Öltemperatur, d.h. geringerer Zähigkeit ändern bzw. erst bei anderen Spaltweiten bemerkbar werden. Sie schließt auch keineswegs aus, daß bei hohen Drehzahlen mit engeren Spaltweiten und noch höheren Temperaturen gefahren werden kann. Dabei hätten sich aber kaum die so charakteristischen Eigenschaften des Werkstoffes herausarbeiten lassen wie bei diesen Versuchen im Gebiet der Grenzreibung.

Werkstoff A S. Diagramm-Blatt 14.

Die Buchse besteht aus der bekannten Sonderlegierung KS 280 / 411 der Firma Karl Schmidt, Neckarsulm. Sie besitzt eine Stützschaufel aus hartem Material:

Legierung KS 280: 21 % Si, Rest Al,

und eine aufgebrauchte Laufschiene von rd. 1,5 mm Dicke aus der Legierung KS 411, nämlich:

1 * Fe, 1 Sb, 2 Mn, 1 Cr, 0,5 Ti, Rest Al.

Der Werkstoff der Stützschaufel besitzt hohe Festigkeit und geringe Wärmeausdehnung, die Laufschiene geringere Härte. Mit dieser Verbundwirkung sucht man, der größeren Wärmeausdehnung des Aluminiums zu begegnen, die bei festgehaltenem Außenmaß, d.h. veränderter Formänderung zu schädlicher Verringerung des Lagerspiels führen kann. Die Laufschiene zeigt ein mattes und leicht raues Aussehen. Störende Wirkungen dieser Art konnten nicht beachtet werden. Die Versuche ergeben vielmehr eine sehr hohe Tragfähigkeit (bis zu 134 kg/cm²) und durchaus flache Temperaturkurven nicht über 70°. Dagegen liegen die Reibungszahlen zahlenmäßig ziemlich hoch (über 0,02), verlaufen aber völlig konstant bis zur unteren Grenzgeschwindigkeit und beweisen damit gute Notlauf-Eigenschaften. Die hohe Wärmeleitfähigkeit äußert sich in der niedrigen Lage der Temperaturkurven, obwohl die höheren Reibungszahlen einer größeren Reibungsarbeit entsprechen.

Bei der höchsten Belastung (p = 134 kg/cm²) konnte die Geschwindigkeit nicht unter v = 0,5 m/sec gesenkt werden; bei sehr kleinen Geschwindigkeiten ist es also geboten, mit der Belastung nicht zu sehr an die Höchstgrenze heranzugehen.

Werkstoff A L. Diagramm-Blatt 15.

Die Buchsen sind von den Vereinigten Aluminium-Werken A.-G., Lautawerk, geliefert und haben folgende Zusammensetzung:

Zn	Cu	Mg	Al (99,99 %)
5	0,8	0,5	Rest

Der wesentliche Bestandteil ist also hochreines Al. Die physikalischen Werte werden wie folgt angegeben:

Zugfestigkeit	12,3	kg/mm ²
Streckgrenze (0,2 %)	6,9	"
Dehnung	8	%
Brinellhärte	35,5	kg/mm ²
E-Modul	7050	"

Die diamantgedrehte Oberfläche zeigt spiegelnden Glanz und außerordentliche Glätte. Eine besondere Laufschiene ist nicht aufgebracht, die Buchse vielmehr aus homogenem Material gegossen. Störende Erscheinungen infolge Spaltverengung durch Temperatureinflüsse wurden nicht wahrgenommen. Die Belastung kann bis knapp 134 kg/cm² gesteigert werden, ohne daß die Temperatur bei v_{max} über 70° steigt. Dagegen findet diese Belastung bei v = 0,24 m/sec nach unten ihre Begrenzung durch Freßerscheinungen. Bis zur Belastung von 66 kg übersteigen die Temperaturkurven nicht 55° und liegen sehr flach; es ist also auch über einen größeren Geschwindigkeitsbereich keine unzulässige Erwärmung zu erwarten.

Die Reibungswerte sind bei diesem Werkstoff in besonderem Maße lastabhängig. Für die Belastung p = 16,7 kg/cm² geht die

Reibungszahl mit abnehmender Geschwindigkeit die unter 0,01 herunter, liegt bei $p = 33 \text{ kg/cm}^2$ schon bei 0,02 und bei höheren Belastungen bei 0,03, ohne daß die Temperaturen einen ähnlichen starken Unterschied aufweisen. Nur bei der höchsten Belastung zeigt sich noch bei kleinen Geschwindigkeiten eine geringe Neigung zum Ansteigen der Reibungszahlen; darunter sind die Notlaufeigenschaften gut. Nach Ausbau bei 134 kg/cm^2 Höchstlast waren nur ganz geringe Laufspiegel erkennbar.

Der Ölaufdruck mußte bei diesem hochtragfähigen Werkstoff (ebenso wie bei WM 80 und A 8) auf 2,5 at gesteigert werden, um die Durchflußmenge konstant zu halten.

Vergleiche der Reibungszahlen. Diagramm-M. 16 bis 17.

Zur besseren Übersicht sind auf Blatt 16 und 17 noch einmal die gemessenen Reibungszahlen von den zehn untersuchten Werkstoffen zusammengestellt, und zwar auf Blatt 16 bei der niedrigsten Belastung ($p = 16,7 \text{ kg/cm}^2$) und auf Blatt 17 bei der jeweils erreichten Höchstbelastung.

Das Blatt 16 ergibt, daß die Reibungszahlen aller Werkstoffe bei niedriger Belastung größenordnungsmäßig ziemlich nahe beieinander liegen (zwischen 0,01 und 0,02). Da sie, wie im einzelnen gezeigt, von der Zapfengeschwindigkeit kaum abhängig sind, stellen die Kurven zugleich ein Bild der erzeugten Reibungsarbeit dar. Es mag hierbei der Einfluß der nicht exakt vergleichbaren Oberflächenrauigkeit eine Rolle spielen; praktisch sind die Unterschiede nicht bedeutsam.

Dagegen heben sich deutlich die Werkstoffe mit schlechter Tragfähigkeit heraus, insofern sie bei kleinen Zapfengeschwindigkeiten (gleichbedeutend mit kleinstem Verlagerungswinkel und engstem Spalt) ein starkes Anwachsen der Reibungszahlen mit abnehmender Geschwindigkeit erkennen lassen. Ihre verschlechterten Notlaufeigenschaften (neben der geringen Tragfähigkeit) kommen hier noch einmal zum Ausdruck (vgl. Ge, GBz, WME).

Umgekehrt zeigen die hochtragfähigen Metalle, wie WM 80, Al sogar ein Absinken der Reibungszahl in Richtung auf die Null-Ölfilms, also günstigen Einfluß auf die Stabilität des

In der Darstellung auf Blatt 17 sind die Reibungszahlen für die jeweils höchsten Lasten verglichen. Sie liegen auch hier trotz starker Verschiedenheit der Belastung ziemlich eng zusammen; die Abhängigkeit von der Belastung ist also bei den einzelnen Stoffen sehr ungleich wirksam.

Die Kurve für Ge fällt naturgemäß ganz heraus, da hier nur eine Tragfähigkeit von rd. 15 kg/cm^2 erzielt wurde, also die Reibungszahl von vornherein sehr viel tiefer liegen mußte.

In Blatt 18 und 19 sind die Temperaturkurven für alle Stoffe einmal bei kleinster Belastung und dann bei den Höchstlasten zusammengestellt. Für erstere verlaufen sie ziemlich gleichartig, ohne daß ein ausgeprägter Unterschied zwischen den gut lei-

tenden Metallen und den schlecht wärmeleitenden Kunstharzen erkennbar wäre. Bei den unter sich stark verschiedenen Höchstlasten dagegen rücken sie naturgemäß stark auseinander.

Als wesentliches Ergebnis der Zusammenstellung auf Blatt 16 und 17 verdient hervorgehoben zu werden, daß in dem vorliegenden Versuchsbereich die Reibungszahl nicht dem Gesetz der Flüssigkeitsreibung ($\mu = \text{konst.} \cdot v \cdot \omega / p$) folgt, sondern dem alten Gesetz der Coulomb'schen Reibung $R = F \cdot \mu$. Es ist auch keineswegs notwendig, daß in den hier durchfahrenen Geschwindigkeitsbereich die Reibungszahlen mit sinkender Drehzahl ansteigen müßten. Wenn bei anderen Versuchen das geschieht, so dürfte der Grund dafür zu suchen sein, daß bei ihnen die Gleichhaltung der Versuchsbedingungen nicht so streng durchgeführt wurde (Ölmenge, Temperatur usw.).

2. Versuchs-Vergleiche

Das Ergebnis der Versuche wird erst durch eine Gegenüberstellung der einzelnen Werkstoffe nach verschiedenen Gesichtspunkten besonders deutlich. Diese ist in den folgenden Diagramm-Blättern Nr. 20 bis 27 in säulenförmiger Darstellung anschaulich gemacht.

Blatt 20

Hier sind die festgestellten maximalen Tragfähigkeiten für sämtliche Werkstoffe zusammengestellt. Die umrandeten Säulen stellen die wirklich gemessenen Werte dar. Da diese bei verschiedenen Temperaturen liegen und die Tragfähigkeit der Ölzigigkeit direkt proportional ist, wurden die Werte auf eine gewählte Einheitstemperatur von 650 bzw. die entsprechende Zähigkeit umgerechnet (schwarze Säulen). Diese Umrechnung stellt eine zweckmäßige Korrektur dar, um eine einheitliche Veranschaulichung zu schaffen. Die Unterschiede sind - mit Ausnahme von GB 14 - nicht erheblich. Für die folgenden Vergleiche werden nur die korrigierten Werte eingesetzt.

Die Darstellung auf Blatt 20 zeigt die auffällige Verschiedenheit der einzelnen Stoffe trotz völlig gleichartiger Versuchsbedingungen. In der Gruppe der Kunstharze tritt der Werkstoff K 8 auffällig hervor (füllstofffrei!). Die übrigen erreichen eine größte Tragfähigkeit von rd. 50 kg/cm^2 . Von den Metallen zeigt Gußeisen die niedrigsten Werte. Weit aus dem höchsten liegt das zinnhaltige Weißmetall; dadurch werden die überlegenen Laufeigenschaften dieser Legierung aufs neue eindrucksvoll bestätigt. Jedoch kommen ihnen die beiden untersuchten Al-Legierungen erheblich nahe. Die Zink- und Bleibronze liegt etwa auf gleicher Höhe wie die Kunstharze mit Füllstoffen; das füllstofffreie Gießharz fast in gleicher Höhe wie die Al-Legierungen.

Dieses Ergebnis entspricht hinsichtlich der Metalle im großen und ganzen den bisher vorliegenden praktischen Erfahrungen; es ergibt aber auf jeden Fall bereits wertvolle Hinweise dafür, in welcher Richtung erfolgreich gearbeitet werden muß, um weitere Fortschritte zu erzielen. (Versuche mit anderen neuartigen Legie-

rungen, wie Kadmium, Silber u.a. konnten leider bisher nicht angeschlossen werden und haben wohl auch wegen der Seltenheit dieser Stoffe keine überragende Bedeutung.)

Bei der Bewertung der Kunstharz-Lagerstoffe muß beachtet werden, daß deren schlechte Wärmeleitfähigkeit unter normalen Verhältnissen die temperaturbedingte Begrenzung der Tragfähigkeit verursacht. Das sie unter besonderen Verhältnissen (z.B. Walzwerk-Lager mit Wasserkühlung) sehr viel höhere Tragfähigkeiten erlauben, ist bekannt. Diese sind dann aber nicht mehr verschleißfrei. Will man auf Verschleißfreiheit verzichten und einen begrenzten, kontrollierbaren Verschleiß zulassen, so kann man wahrscheinlich bei allen Werkstoffen höhere Belastungen erwarten. Die Verschleißfestigkeit stellt aber ein besonderes Problem - gleichfalls chemisch-physikalischer Natur - dar und soll hier außer Betracht bleiben.

Ebenso ist nachdrücklich darauf hinzuweisen, daß die bei hohen Zapfengeschwindigkeiten erzielbaren hydrodynamischen Drücke in der Regel eine ganz andere Art der Beanspruchung darstellen als die Zustände in der Grenzreibung. Dort überwiegt der Einfluß der Schmierflüssigkeit und ihrer physikalischen Beiwerte, d.h. die durch äußere Einflüsse (Drehschnelle) erzeugte Orientierung drückt die Werkstoffeinflüsse in den Hintergrund. Trotzdem ist nicht zu bezweifeln, daß diese auch bei solchen Arbeitsverhältnissen, zum mindesten in den eigentlichen Grenzschichten, ihren Einfluß ausüben.

Blatt 21 zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen Eindrucks-Tiefen (negative Härte) mit der maximalen Tragfähigkeit. Da geringe Eindringtiefen einer großen Härte und umgekehrt entsprechen, zeigt sich, daß der härteste Werkstoff die geringste Tragfähigkeit besitzt (Gußeisen!). Die stark plastischen Werkstoffe (WM 80, K₃ usw.) zeigen gute Tragfähigkeit. Diese ist indessen bei den Kunstharzen trotz annähernd gleich geringer Härte stark verschieden. Dagegen zeigen die verhältnismäßig harten Aluminium-Legierungen gute Tragfähigkeit.

Geringe Härte bedeutet u.U. eine gute "Schmiegungsfähigkeit", d.h. Anpassung der Unebenheiten an den Lagerdruck. Das ist aber allein nicht ausschlaggebend, wie die Al-Legierungen zeigen. Eine gesetzmäßige Abhängigkeit zwischen mechanischer Härte und Tragfähigkeit der geschmierten Fläche ist jedenfalls nicht erkennbar.

Blatt 22

Die maximale Lagerbelastung den Reibungszahlen gegenübergestellt zeigt eine ausgesprochene Gesetzmäßigkeit insofern, als die Reibungszahl - von der Geschwindigkeit unabhängig - der Belastungsgröße allgemein proportional ist. Das geht auch bereits aus den Einzeldarstellungen deutlich hervor. Daß die Größe des Reibungswertes am kleinsten scheint bei den Werkstoffen der geringsten Tragfähigkeit (Ge, GBz), dagegen hoch bei den hochbelastbaren Stoffen, darf nicht zu Trugschlüssen führen, denn wenn die Reibung lastabhängig ist, müssen sich für die kleinen Tragfähigkeiten auch kleinere Reibungszahlen ergeben.

Blatt 23

Der Vergleich der Reibungswerte bei maximaler Belastung mit den zugeordneten Temperaturen ergibt, wie zu erwarten, einen gleichsinnigen Verlauf, denn die Reibungswerte, die geschwindigkeitsunabhängig sind, stellen einen Maßstab für die aufgebrauchte Reibungsarbeit dar. Hierbei wirkt sich natürlich die verschiedene Wärmeleitfähigkeit aus.

Blatt 24

Blatt 6 ergibt die gleiche Gesetzmäßigkeit im Vergleich der Höchstbelastungen mit den zugehörigen Temperaturen. Hier kommt besonders deutlich zum Ausdruck, daß bei den Kunstharzen die schlechte Wärmeleitfähigkeit die Belastbarkeit begrenzt und hohe Temperaturen hervorruft, weil die ausgleichende Wärmeströmung in der Schale unterbunden ist. Das dies der Umstand aber nicht allein maßgebend ist, zeigt das Herausfallen der Tragfähigkeit und des besser leitfähigen Kunstharzes K₈ mit hoher Tragfähigkeit. Vielmehr haben zweifellos innere Veränderungen in der Schmier-schicht einen Einfluß.

Die folgenden Blätter 25, 26 und 27 sind besonders aufschlußreich für die Tatsache, daß von der Belastung und der Drehzahl unabhängige, also reine Werkstoff-Einflüsse das Kräftefeld des Ölfilms bestimmen.

Im Blatt 25 sind die bei den Versuchen mit hängender unbelasteter Welle an der Versuchseinrichtung nach Blatt 4 gemessenen "Gleitwiderstände" (in g Gewichtsbelastung der Schale) den maximalen Tragfähigkeitszahlen bei den eigentlichen Lagerversuchen gegenübergestellt. Es ergibt sich das überraschende Bild, daß den geringen Tragfähigkeiten große Verschiebewiderstände zugeordnet sind, den großen kleinen Gleitwiderstand gegenüber, der hohen Tragfähigkeit ein großer der geringe Verschiebewiderstand der freihängenden Welle. Die gleiche Gesetzmäßigkeit zeigt sich auch bei der Gruppe Ge - GBz - WM 80 und den Kunstharzen K₂ - K₄ - K₈. Die beiden Al-Legierungen weisen bei annähernd gleicher Tragfähigkeit zwar geringe, aber doch verschiedene Gleitwiderstände auf, ebenso die beiden aus gleichartigem Harz hergestellten Kunststoffe K₂ und K₃ gleichen Gleitwiderstand bei verschiedener Tragfähigkeit. Mögen auch die Mängel der noch zu groben Versuchseinrichtung die absoluten Zahlenwerte des Gleitwiderstandes beeinflussen, so steht doch eindeutig fest, daß diese nur von dem inneren Kontakt zwischen Schale bzw. Welle mit dem Schmierstoff herrühren können und somit, da Welle und Schmierstoff stets die gleiche Beschaffenheit aufweisen - ebenso die übrigen Versuchsumstände - lediglich den Einfluß der verschiedenen Werkstoffe der Lagerschale zum Ausdruck bringen. Diesen aber nicht unabhängig, sondern in einem ganz bestimmten gesetzmäßigen Zusammenhang mit der Tragfähigkeit.

Diese zunächst qualitativ genommene Erkenntnis kann nur gedeutet werden aus der Wirksamkeit eines im Schmierfilm induzierten, vom Schalenwerkstoff abhängigen Kraftfeldes.

Wie schon für die verschiedenen Tragfähigkeiten im Lagerver-
such weder aus dem technologischen noch mechanischen noch betrieb-
lichen Zustand der Anordnung ein gesetzmäßiger Zusammenhang abge-
leitet werden konnte, so noch viel weniger für die im gewöhnlich abge-
belasteten Zustand, ohne Drehbewegung, nur mit ganz geringer Gleit-
geschwindigkeit bewirkte Verschiebung der frei am Draht hängenden
Welle bei gleicher Öltemperatur und Durchflußmenge.

Eine ähnliche, nur aus den gleichen Ursachen erklärbare Ge-
setzmäßigkeit überraschender Art zeigt auf Blatt 26 die Gegen-
überstellung der Reibungszahlen mit den frei-
hängenden Gleitwiderständen, sie ist natürlich zu-
nächst auch nur qualitativ zu werten. Auch hier entsprechen klei-
nen Reibungszahlen große Gleitwiderstände bei freier Verschiebung.
Da die Reibungszahlen verschiedenen Belastungen zugeordnet und last-
abhängig sind, geben sie in anderer Form ebenfalls ein Bild der
verschiedenen Tragfähigkeiten, und ihr Vergleich mit den freien
Gleitwiderständen stellt daher gewissenmaßen nur eine Abwandlung
der Gesetzmäßigkeit von Blatt 25 dar und bestätigt sie.

In Blatt 27 endlich sind die Gleitwiderstände
zahlen den Öldrücken gegenübergestellt, die bei
jeweils höchsten Belastung eingestellt werden mußten, um die
Vergleichsmenge von $12 \frac{1}{h}$ durch das Lager zu bringen. Auch
hierbei entsprechen im allgemeinen die geringen Werte der freien
Gleitwiderstände der hängenden Welle großen Öldrücken und umge-
kehrt; auch eine Erscheinung, die kaum anders als aus Änderungen
in dem Strömungsfeld der Schmier-schicht erklärt werden kann und
lediglich auf die Verschiedenheit der Schalenwerkstoffe zurückzu-
führen ist.

Es liegt nahe, hierzu den Einwand zu erheben, daß ja auf
Grund der hydrodynamischen Überlegungen verschiedenen Belastungen
auch verschiedene Verlagerungswinkel und damit verschiedene Weiten
des engsten Spaltes entsprechen müssen, denn es ist zunächst noch
keineswegs erwiesen, daß die hydrodynamischen Gesetze für die Bil-
dung des Druckberges und der Strömung nicht auch noch in zu engen
Spalten Gültigkeit haben sollten. Dann müßten auch durch den eng-
sten Spalt jeweils verschieden große Ölmengen strömen, und daraus
könnten sich dann u.U. die verschiedenen Anfangsdrücke erklären.
Rechnet man aber die Spaltweiten nach den eingangs gegebenen Gleit-
widerständen nach, so ergeben sich engste Spaltweiten in der Größen-
ordnung von nur $0,5$ bis 3μ , wobei die kleinen Werte den
größeren Belastungen und kleinen Geschwindigkeiten und umgekehrt
zugeordnet sind. Bei den im ganzen sehr geringen Geschwindigkei-
ten ergeben sich dann aber im engsten Spalt nur Ölmengen, die ge-
genüber der gesamten Durchflußmenge zu vernachlässigen sind. Die
Hauptmenge des Öls füllt vielmehr den ganzen unbelasteten Teil
der Buchse aus und strömt axial an den Lagerenden heraus. Die
exzentrische Form des hier zur Verfügung stehenden Spaltraumes
ändert sich aber in dem hier vorliegenden Versuchsbereich bei den
geringen Werten der theoretischen Verlagerungswinkel (5° bis 15°)
so wenig, daß damit ebensowenig wie aus der Weite des engsten
Spaltes ($0,4$ bis $2,0 \mu$) die große Verschiedenheit der Zufluß-
drücke erklärt werden kann. Es müssen auch hier die orientieren-
den Einflüsse der verschiedenen Werkstoffe die Hauptrolle spielen,
denn außer diesen wird ja an der Versuchsanordnung nichts geändert.

Denkbar ist natürlich auch, daß bei höheren Belastungen be-
reits die Zunahme der Zähigkeit des Öls mit dem Druck sich
bemerkbar macht. Wieweit diese bei dem vorliegenden Öl wirksam
wird, konnte nicht ermittelt werden. Daß sie möglich ist, geht
aus verschiedenen neueren Untersuchungen hervor (6, 12); sie
wäre ja letzten Endes auch nur eine Ausdrucksform der innermoleku-
laren Vorgänge.

Zusammenfassend ist zu den in Versuchen festgestellten Er-
scheinungen, unbeschadet der Deutung in einzelnen, zu sagen:

"Jeden als Lagerschale verwendbaren Werkstoff ist eine be-
stimmte Tragfähigkeit zugeordnet oder - anders ausgedrückt -
die Fähigkeit, im Kontakt mit dem vorliegenden
Schmierstoff und dem Werkstoff der Welle einen bestimm-
ten Zustand des tragenden Schmier-
films hervorzurufen, der die Grenzen der Tragfähigkeit im Ge-
biet der Grenzreibung bestimmt!"

Dieser Einfluß ist primär, sekundär dagegen die mechanischen
Eigenschaften: Festigkeit, Härte, Elastizität, metallographi-
sches Gefüge usw. Es gibt bestimmte Werkstoffgruppen, die jene
Fähigkeit in hervorragendem Maße besitzen, andere nur in geringem
Maße. Daraus sind die Grenzen erkennbar, in denen die einzelnen
Werkstoffe verwendbar sind und in welcher Richtung, auch im Hin-
blick auf Inlandsrohstoffe, Fortschritte erzielt werden können.
Durch solche systematischen und verhältnismäßig einfachen Versuche
kann eine Klassifizierung der in Frage kommenden Werkstoffe ge-
schaffen werden, und es ist nicht erst nötig, durch zeitraubende
und kostspielige Betriebsversuche die Unbrauchbarkeit irgendwelcher
willkürlich kombinierter Werkstoffmischungen nachzuweisen.

Auf der anderen Seite besteht aber durchaus die Möglichkeit,
daß es bei genügender Weiterentwicklung der chemisch-physikali-
schen Grundlagen molekular-theoretischer Art gelingen könnte, noch
ganz andere neuartige Kontaktgruppen für bestimmte Aufgaben nutz-
bar zu entwickeln.

Daß daneben noch andere Probleme zu beachten sind: ruhende
oder Wechsel-Last, Schlagbeständigkeit, Oberflächenbehandlung,
Einfluß sehr hoher Temperaturen und Drücke usw. versteht sich
von selbst. Im Vordergrund steht dabei immer die noch viel zu
wenig erkannte Bedeutung genügender Formsteifigkeit von Lager
und Welle. Ohne sie kann auch der beste Lagerwerkstoff nicht die
seiner physikalischen Art entsprechenden Eigenschaften entfalten!

IV. Physikalische Deutungen

Unter den Anhängern der "klassischen" hydrodynamischen Lager-
theorie bestand lange Zeit die Anschauung, daß es - wenigstens
im Gebiet der sogenannten "reinen" Flüssigkeitsreibung - auf die
Art des verwandten Lagermetalls nicht ankomme, daß vielmehr nur
die im Begriff der "Zähigkeit" enthaltene Eigenschaft der Schmier-
stoffe von Bedeutung sei und daher bei dem gleichen Schmierstoffe
bei allen Metallen die gleiche Schmierwirkung erzielt werden müsse.
Die Praxis hat diese Vorstellung niemals übernommen; aber auch

die Forschung hat längst erkannt, daß nach weitere unbekannte Eigenschaften mitzuspüren und hat diese mit vielumstrittenen Ausdrücken wie "Oiliness" oder "Oxydation", "Schlupfrigkeit" usw. bezeichnet. Sie ging dabei immer wieder nur von dem Schmierstoff aus, nicht aber von den sie umgebenden Metallen. Es kann aber heute kaum noch einen Zweifel unterliegen, daß erst das Zusammenwirken aller drei Elemente den eigentlichen Schmiervorgang bestimmt, mag auch je nach den Umständen das eine oder andere mehr in den Hintergrund treten. Sonst wäre es kaum zu verstehen, daß z.B. eine Kombination wie Kunstharz - Wasser und Stahlwelle einen brauchbaren Schmiereffekt ergibt.

Eine exakte physikalisch-chemische Deutung der hier behandelten Vorgänge ist heute noch nicht möglich. Die Kenntnis von der eigentlichen Struktur der Flüssigkeiten bleibt hinter den Ergebnissen der kinetischen Gastheorie und der Molekulartheorie der Festen, insbesondere kristallinen Körper noch im Rückstand (7). Einige Tatsachen sind aber auch der ingenieurmäßigen Betrachtung schon zugänglich, nämlich

1. das Vorhandensein starker freier Valenzen, d.h. Oberflächenkräfte an der Oberfläche von Welle und Lagerschale.
2. Die unbegrenzte "Haftfähigkeit" der Moleküle gewisser Stoffe, insbesondere der Kohlenwasserstoffgruppen der Schmierstoffe an den erwähnten Oberflächen.
3. Die Erscheinungen der dielektrischen Polarisation, d.h. die durch Influenzwirkung bewirkbare Erzeugung von Dipolmomenten in den Molekülgruppen der Schmierstoffe.

Stellt man sich Schale und Welle als eine Art von Kondensator vor, in dem das Öl das Dielektrikum bildet, so ist es denkbar, daß die Orientierung der Flüssigkeitsmoleküle zu einer geordneten Strömungslage von der Stärke des zwischen den äußeren Begrenzungsflächen wirkenden elektrischen Feldes beeinflusst wird.

Demgegenüber steht als Grundsatz der hydrodynamischen Kontinuitätstheorie fest, daß eine laminare Schichtenströmung für die Bildung von Schubkräften und damit Drucksteigerung im Schmierfilm Voraussetzung ist. Diese "geordnete" Strömung ist aber ihrerseits von dem Polarisationszustand der Moleküle abhängig, natürlich auch von ihrer Zusammensetzung aus mehr oder weniger polaren Gruppen. Stellt man sich nun die "Tragfähigkeit" eines Schmierfilms als die Wirkung der im Schmierfilm erzeugten **D r u c k e n e r g i e** vor, so muß auch ein Zusammenhang zwischen dieser Tragfähigkeit und dem Polarisations- bzw. Orientierungszustand vermutet werden. Daß hierauf die Verschiedenheit der Oberflächenfelder der einzelnen Werkstoffe sich bei dem gleichen Schmierstoff verschieden auswirken kann, ist mit Sicherheit zu vermuten. Es kann also z.B. bei Gußeisen gegen Stahl eine andere dielektrische Wirkung auftreten als bei Zinn gegen Stahl, zumal ja auch diese Metalle in der Spannungsreihe verschieden liegen.

Im belasteten Lager (eigentliche Lagerversuche) wird dem Dielektrikum eine erhebliche äußere Energie zugeführt (Reibungsmoment). Wie der Transport dieser Energie in den Molekularschichten vor sich geht, entzieht sich bisher unserer Vorstellung, es muß sich aber um einen exothermischen Prozeß handeln, denn es wird ja Wärme frei. Bei den Gleitversuchen der hängenden Welle ist

diese Energiemenge gering und vielleicht ohne großen Einfluß auf den Polarisationszustand; es wirkt sich das "natürliche Feld" frei aus.

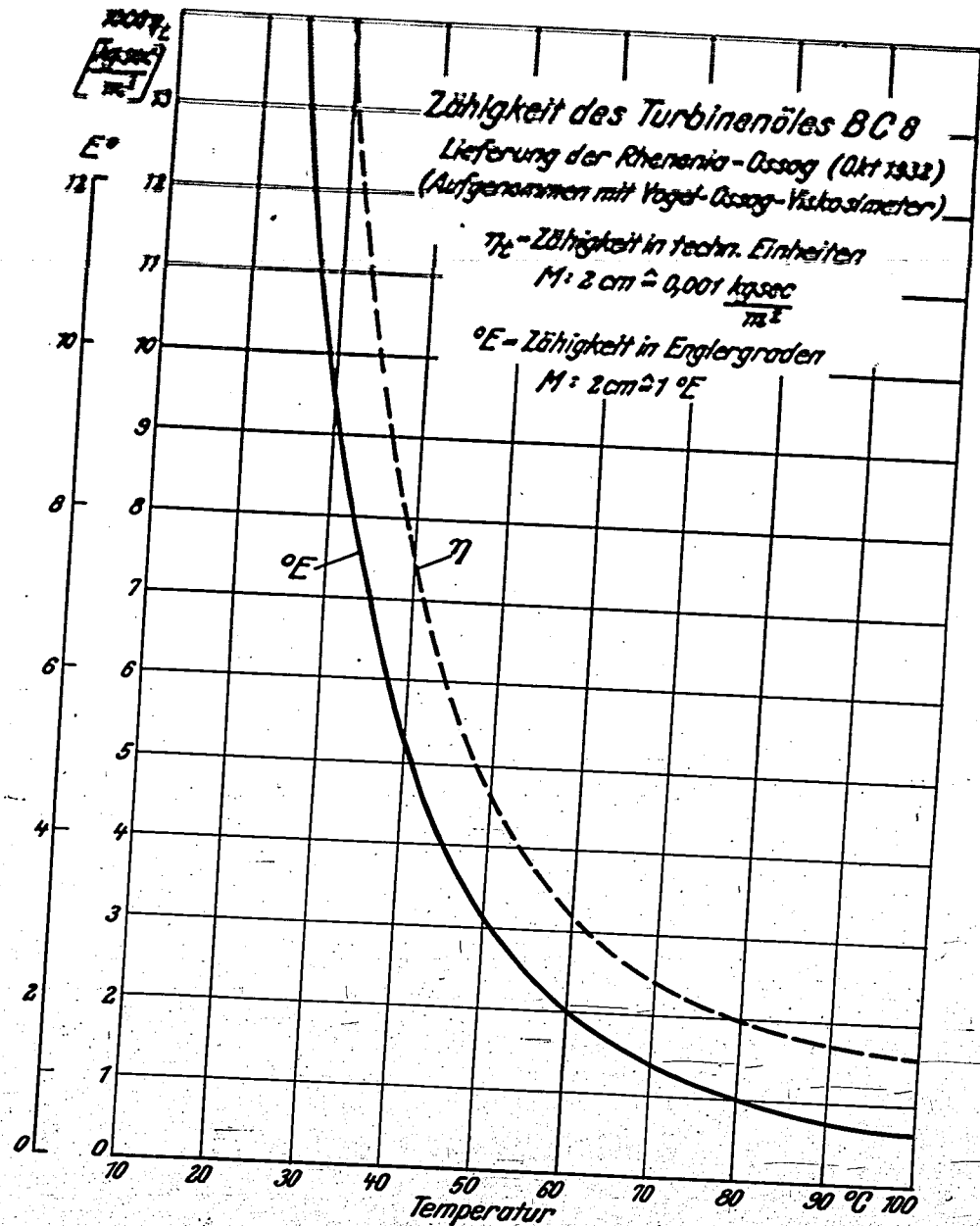
Die reinen Gleitversuche ohne Belastung nach Blatt 4 und Diagramm-Blatt 25 scheinen darauf hinzuweisen, daß bei gewissen Kombinationen, z.B. Gußeisen gegen Stahl, die Orientierungsfähigkeit ungünstig liegt, d.h. eine ungerichtete Moleküllage überwiegt, daher der größere Gleitwiderstand. Bei anderen, z.B. Zinn-Stahl, ist es umgekehrt; die Polarisation wirkt sich in einer der Strömungsorientierung günstigen Weise aus. So bildet sich hier in belasteten Lager in stärkerem Maße eine zur Druckbildung führende Schichtenströmung aus; daher die hohe Tragfähigkeit, aber auch der größere Widerstand gegen den Eintritt des zugeführten Öls (Blatt 27).

Das Gußeisen z.B., das dem Stahl der Welle in der chemischen Struktur nahe liegt, scheint nicht geeignet, auf die Strömungsorientierung im Sinne einer Drucksteigerung einzuwirken, daher der viel stärkere Gleitwiderstand im unbelasteten Strömungsfeld (Gleitversuche), aber auch eine geringe Fähigkeit, Druckströmungen zu bilden, also geringe Tragfähigkeit und geringer Widerstand gegen den Öleintritt.

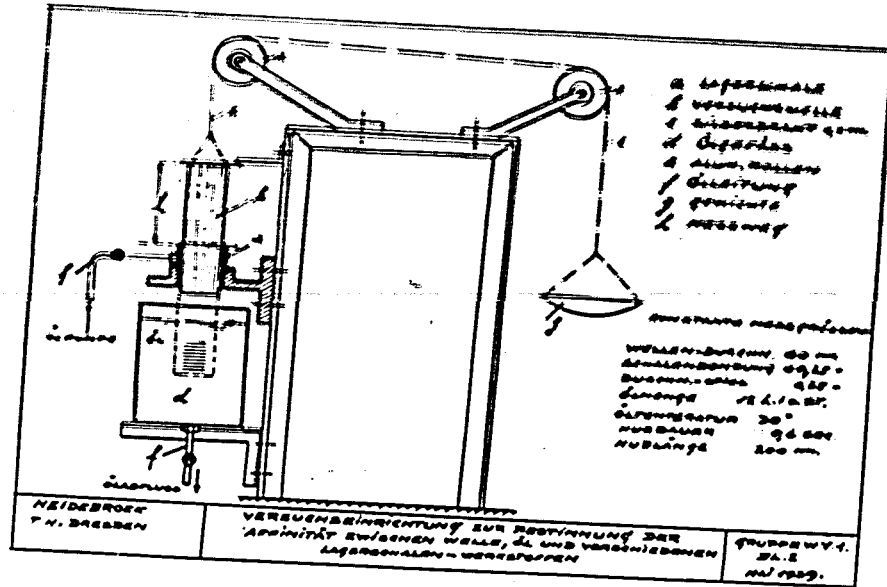
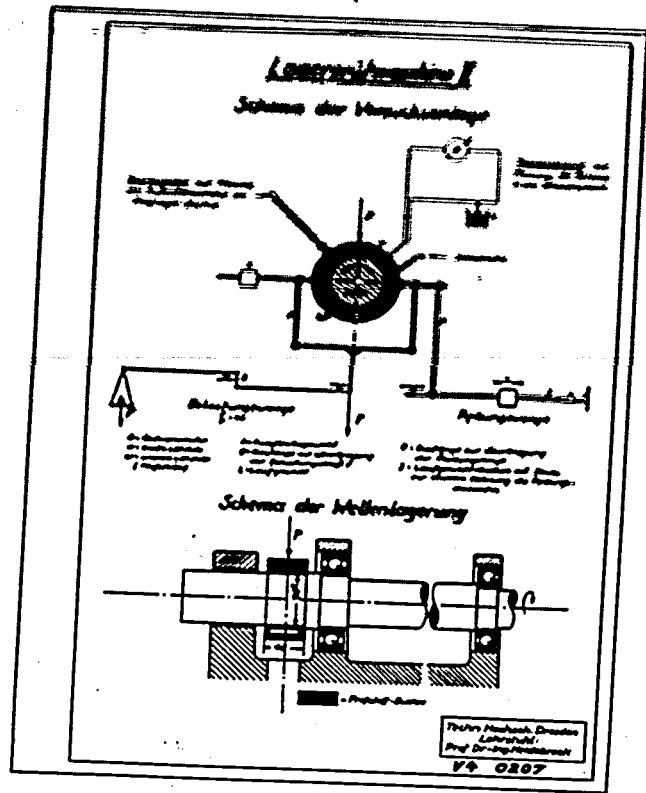
Die vorstehenden Überlegungen erheben natürlich keinen Anspruch darauf, eine exakte physikalische Deutung der sehr entwickelten Vorgänge zu sein; hierzu bedarf es noch sehr eingehender Forschung mit den feinsten Meßverfahren der physikalischen Chemie und der Elektronen-Mechanik. Sie sollen vielmehr nur ein hypothetischer Versuch sein, die in den Versuchen beobachteten Erscheinungen dem Ingenieur begrifflich näherzubringen. Daß dabei noch viele Fragen offen bleiben, ist selbstverständlich. So vor allen Dingen das Problem der Oberflächenstruktur, dem die Forschung mit den Mitteln der Elektronenoptik beizukommen versucht. Ebenso bildet die Chemie der Schmierstoffe für sich allein noch ein gewaltiges Aufgabengebiet (13, 14). Vielfach fehlt es aber in den Kreisen der "reinen" theoretischen Naturwissenschaften noch an der Kenntnis der dem Ingenieur dringlichen Aufgaben. Dieser darf daher nicht davon ablassen, auch seinerseits mit den ihm zur Verfügung stehenden größeren Mitteln die Aufgabenstellung zu klären in der Hoffnung, daß sich bald noch ein weiterer Kreis von Naturwissenschaftlern dieser nationalwirtschaftlich dringenden Arbeit zuwendet. Während in der exakten Forschung die hier zur Erörterung gestellten Probleme sich zunächst auf die kleinsten physikalischen Einheiten und Dimensionen erstrecken, dürften die hier vorgelegten Versuche erkennen lassen, daß es möglich ist, auch in technischen Größenverhältnissen zu Ergebnissen zu kommen, die zu den Arbeiten der exakten Forschung eine Brücke schlagen.

Schrifttum

1. Frossel, 2. Forschung 1930, Bd. 9, H. 6, V D I
2. Vogelpohl, 2. Forschung 1937, VDI-Forschungsheft Nr. 396
3. Pepler, Dissertation Dresden, VDI-Forschungsheft Nr. 391
4. Rumpf, Dissertation Dresden, VDI-Forschungsheft Nr. 393
5. Schmaltz, Technische Oberflächenkunde
Berlin, Jul. Springer, 1937
6. Proc. on the general Discussion on Lubricants
and Lubrications
London 1937, Soc. of Mechanical Engineers
(in 3, 4, 5, 6 reichhaltige Quellenangabe)
7. Eucken, Handbuch der Physikalischen Chemie
8. "Der feste Körper", Vorträge der Physikalischen
Gesellschaft Zürich. Leipzig 1938 (Hirzel)
Darin besonders: P. Debye: "Die quaskristalline
Struktur der Flüssigkeiten"
9. Heidebroek, Die Belastbarkeit von Kunstharzlagern
Z. Maschinenbau - Der Betrieb 1938, Bd. 17, S. 445
10. Heidebroek, Lagern aus Gießharz
Z. Kunststoffe, Bd. 28, S. 200, 1938
11. "Mécanique", Nov.-Dez. 1938
12. H. E. Everett, S.A.E.-J., Bd. 41 (1937), S. 531
13. Dr. Zorn, Angewandte Chemie, Bd. 51 (1938), S. 847
14. H. Harms, Über innere Reibung und innere Schmierung
H. Rössler u. K. L. Wolf Leipzig 1938, Akad. Verlagsgesellschaft



Blatt 1



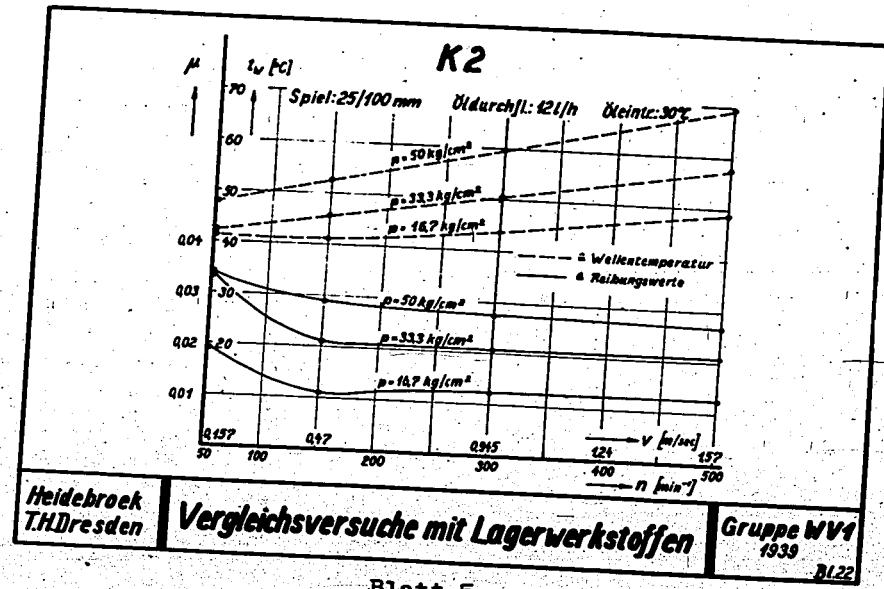
Blatt 4

Blatt 3

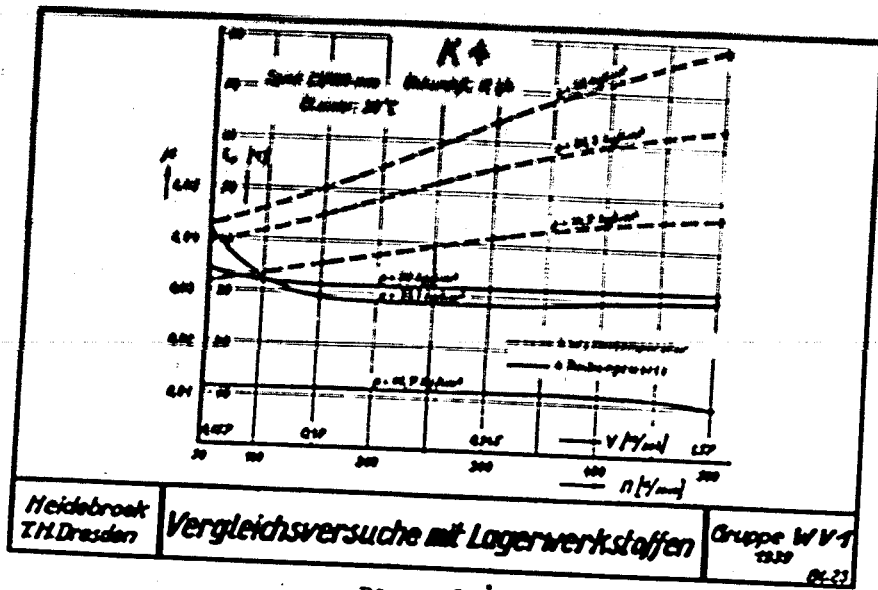
Tafel der untersuchten Werkstoffe und der Versuchsbedingungen

Nr.	Bezeichnung	Werkstoff	Bemerkungen	Versuchsbedingungen
1	K2	Kunstharz T	Texturformung regellos formgepreßt	Lagerpiel (Durchm.) 0,25 mm
2	K4	Kunstharz T	Geschichtetes Gewebe gepreßt und gedreht	Lagerbohrung 6025:101 "
3	K8	Kunstharz	Füllstoff-frei gegossen und gedreht	Lagerlänge 40 "
4	K3	Kunstharz	Kunstharz mit Si-Cerbid gemischt, gedreht	Schalendicke 7 "
5	Ge	Guß Eisen	Feinguß, viel Graphit	Öl-Eintr.-Temp. 30°C
6	GBz	Gußbronze ff	nach Werkst.-Norm	Ölmenge 12 l/Std. - 0,2 l/min
7	WME	Zinkbronze	Glyco-Metall handelsüblich	Härteprüfung nach Hartms. Schapper-Apparat 5mm Kugel 400kg Drucklast Belastung bis 40 min
8	WM 80	Weißmetall	80% Sn, handelsüblich	Gleitprüfung (unbelastet) Abmessungen von Welle und Lager wie oben
9	AS	Al-Legierung	Harte Stützschale mit weicher Laufschiene	Ölmenge 12 l/Std
10	AL	Al-Legierung	96% Al, hochrein	Öltemperatur 30°C
				Hubdauer 45 sec
				Hublänge 200 mm
				Gleitgeschw. ~ 0,85 m/sec

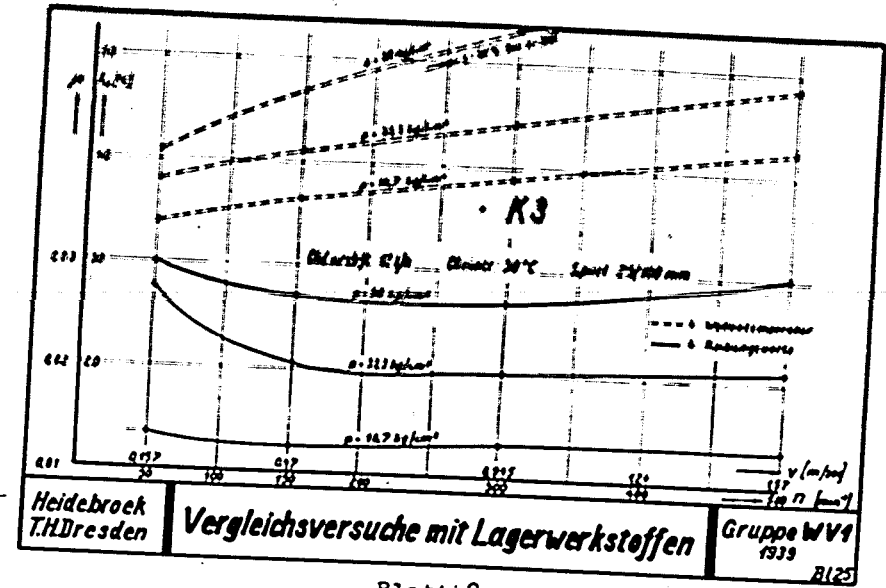
Heidebrock TH. Dresden
 Vergleichsversuche mit Lagerwerkstoffen
 Gruppe WV.1
 1939
 Bl. 21



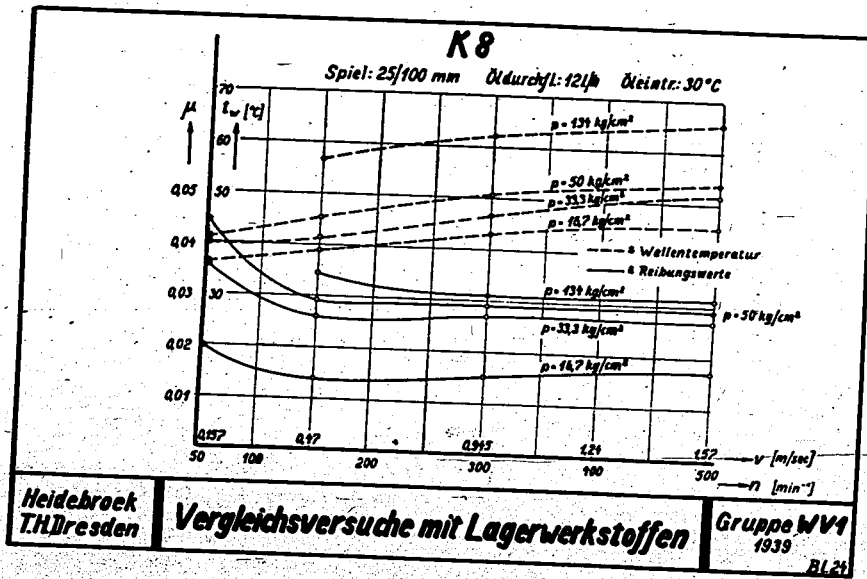
Blatt 5



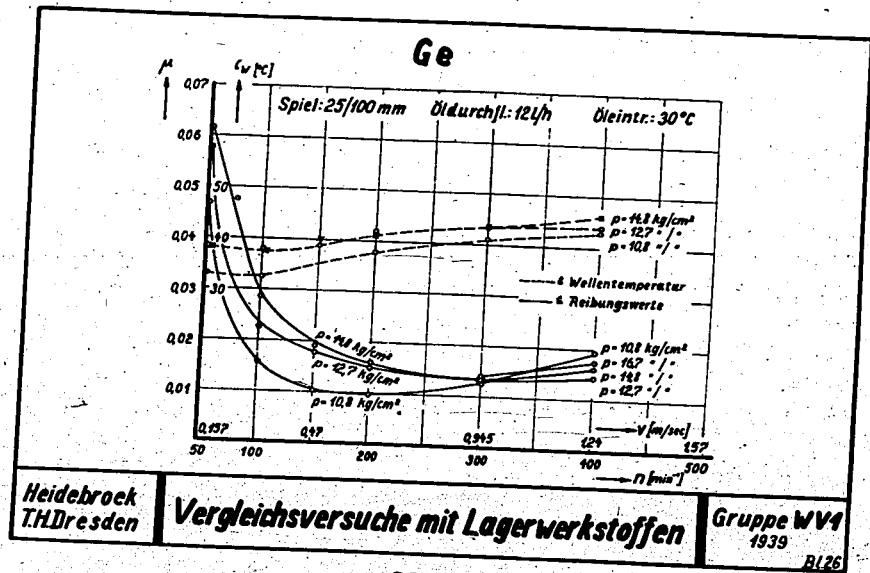
Blatt 6



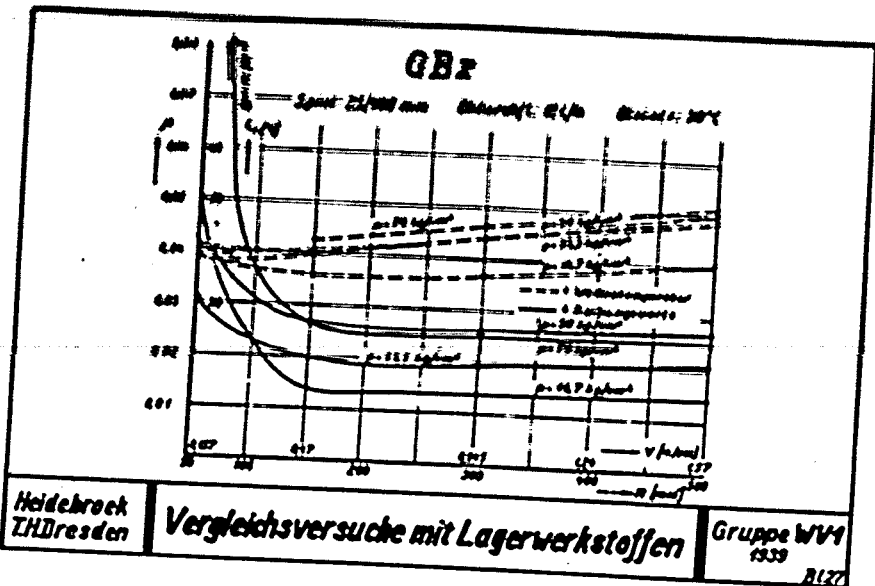
Blatt 8



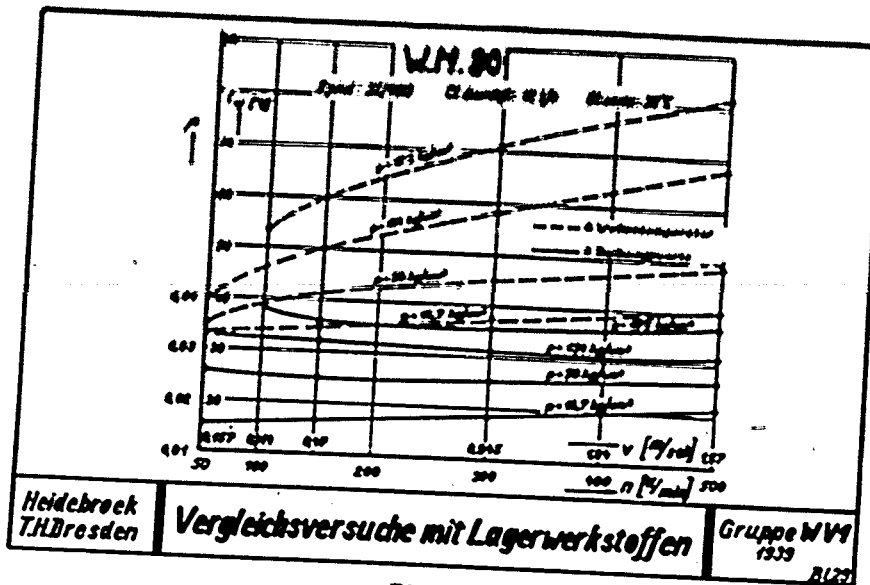
Blatt 7



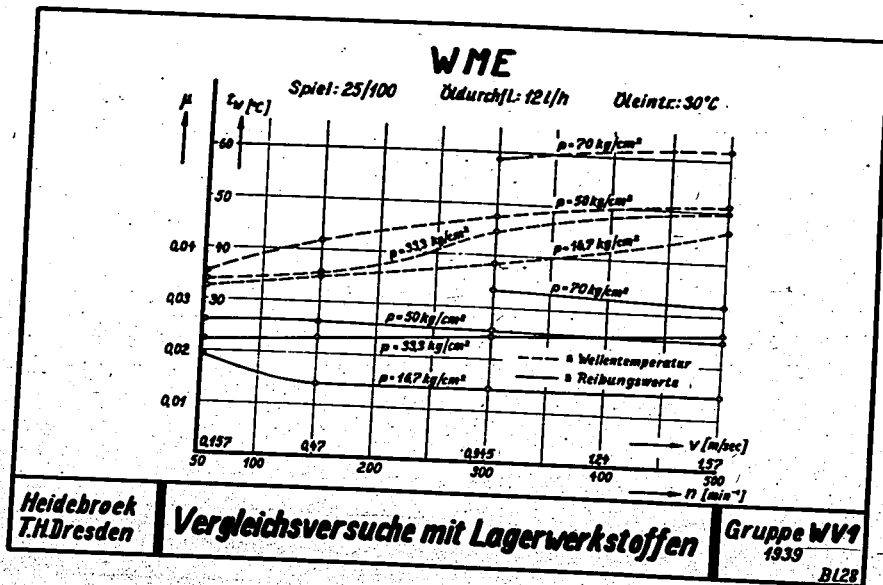
Blatt 9



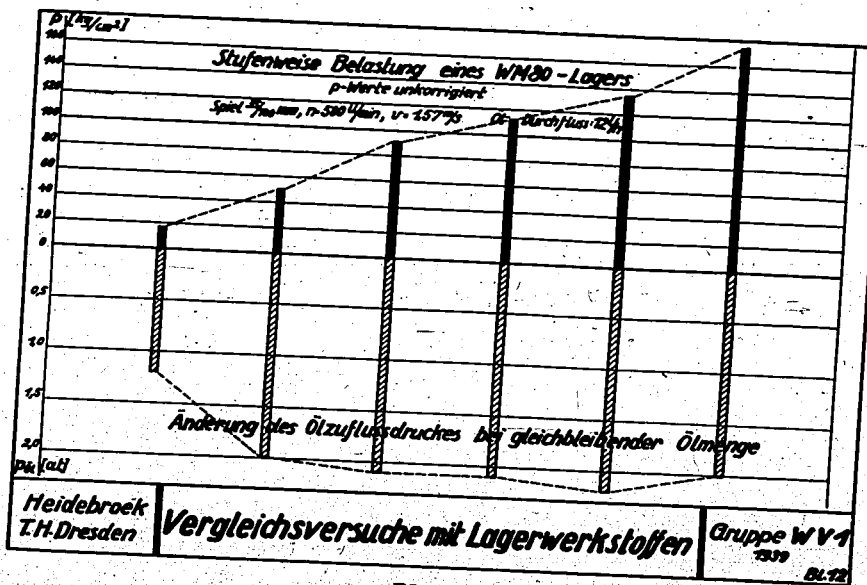
Blatt 10



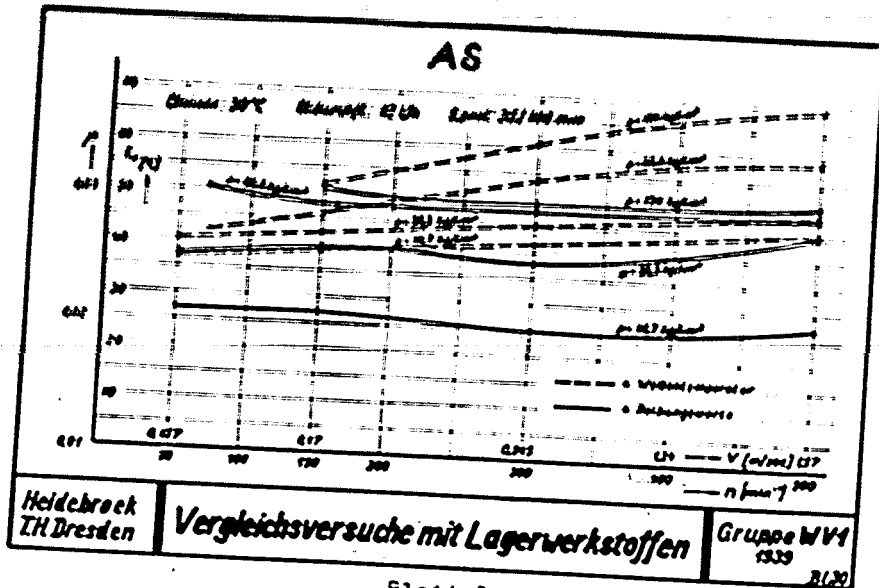
Blatt 12



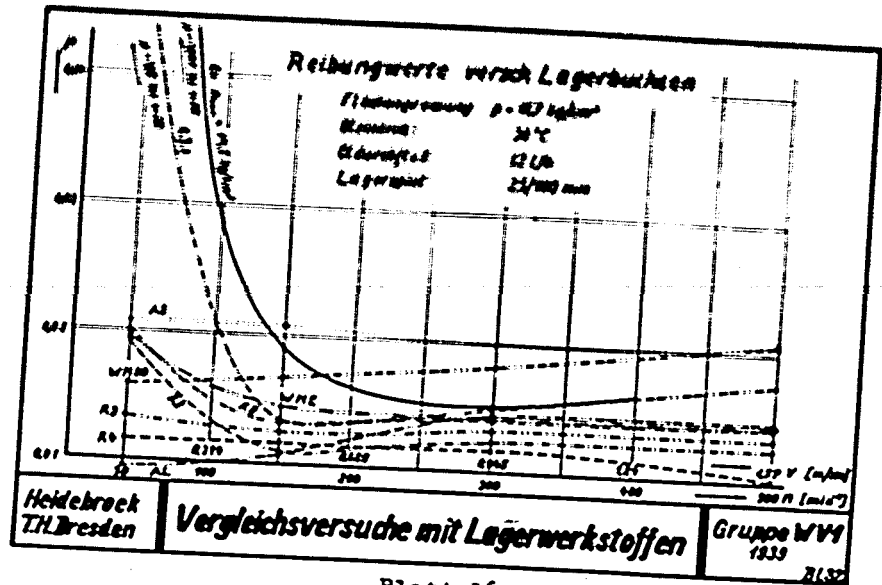
Blatt 11



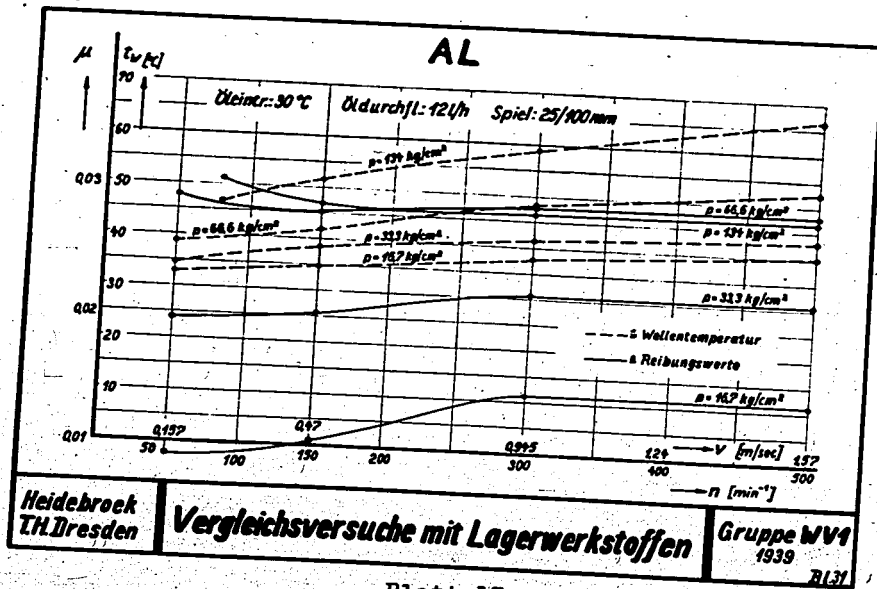
Blatt 13



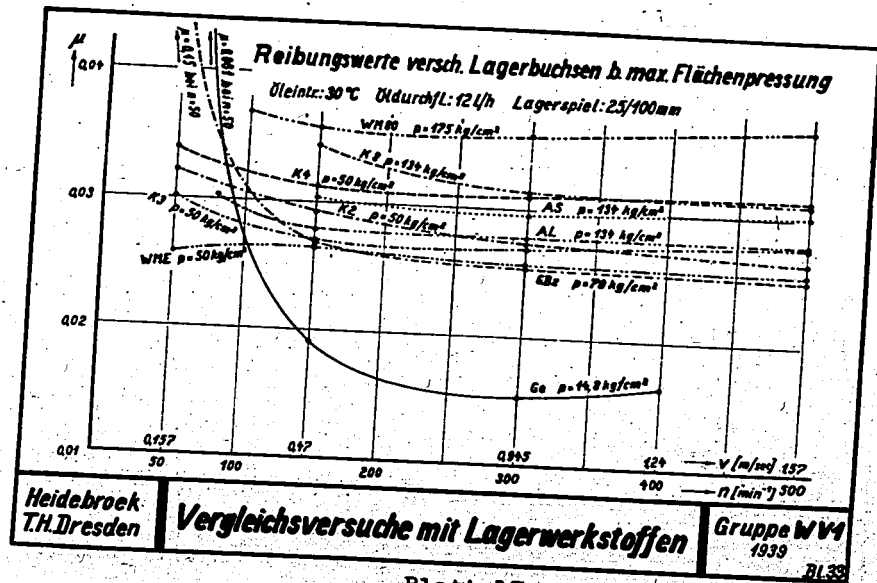
Blatt 14



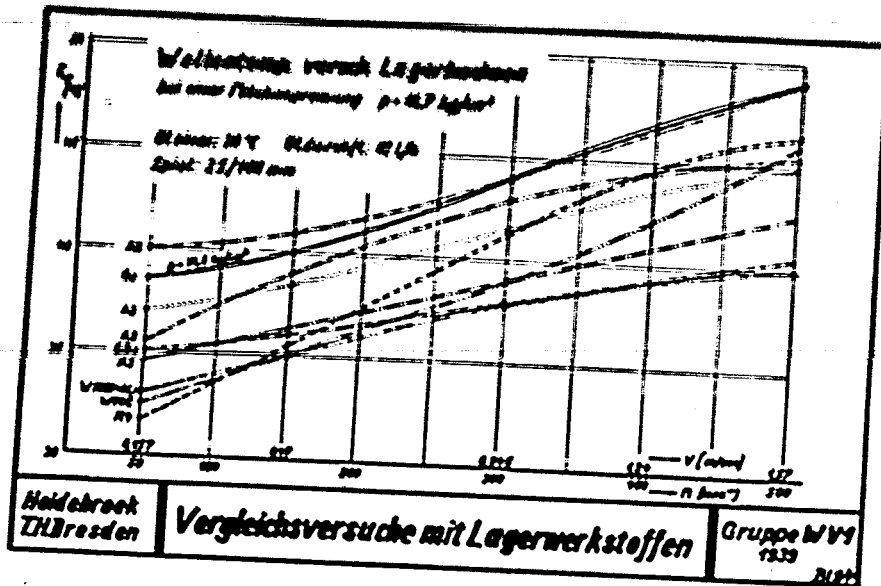
Blatt 16



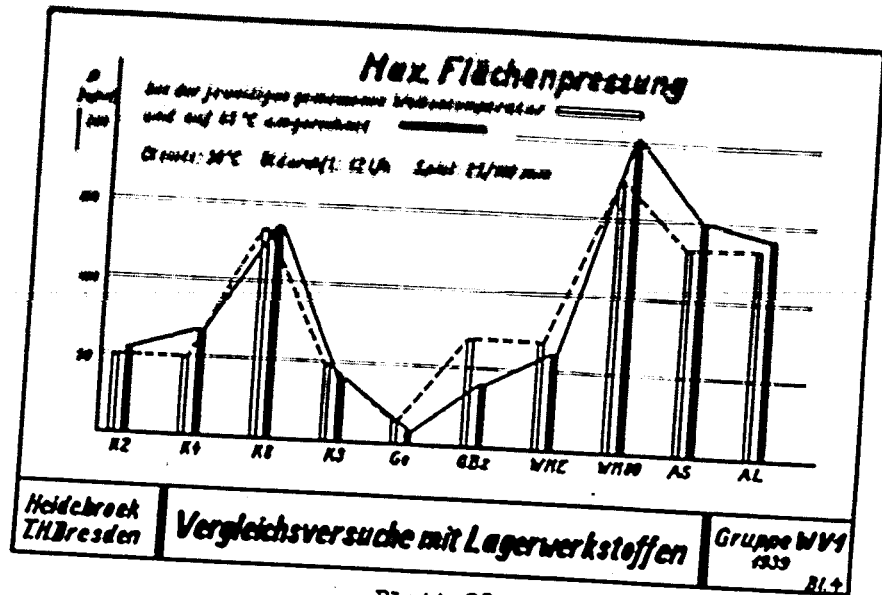
Blatt 15



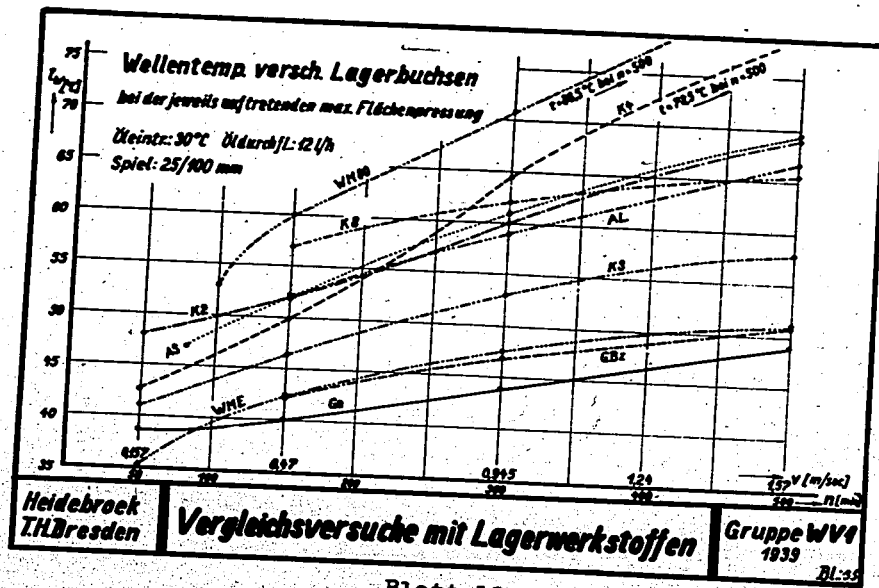
Blatt 17



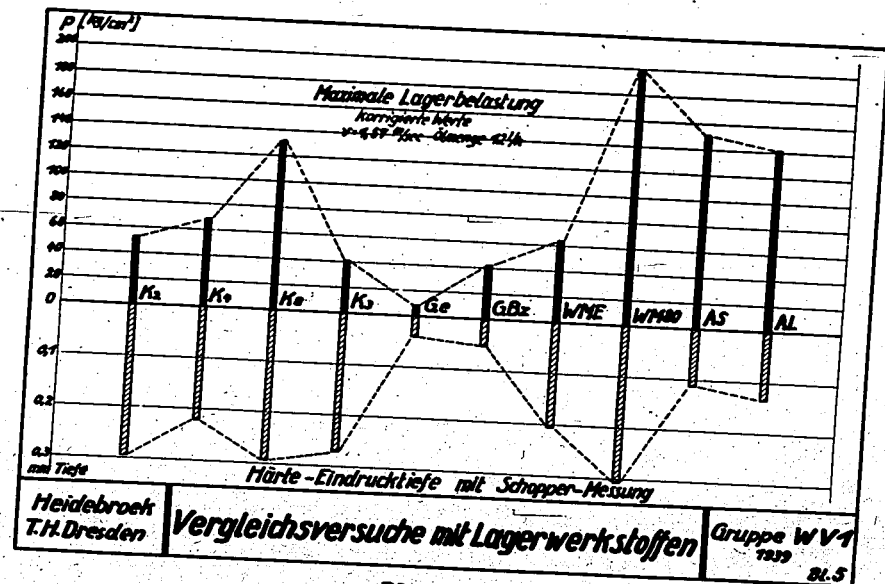
Blatt 18



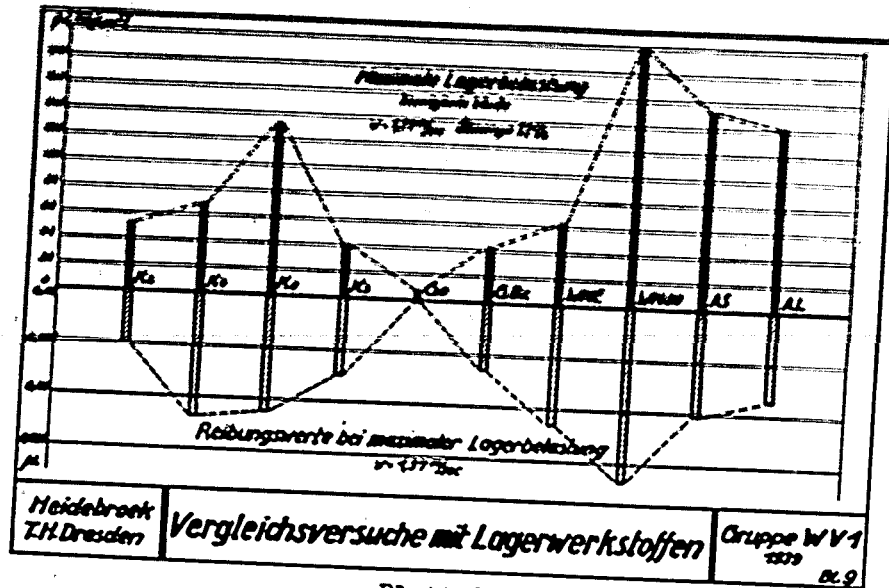
Blatt 20



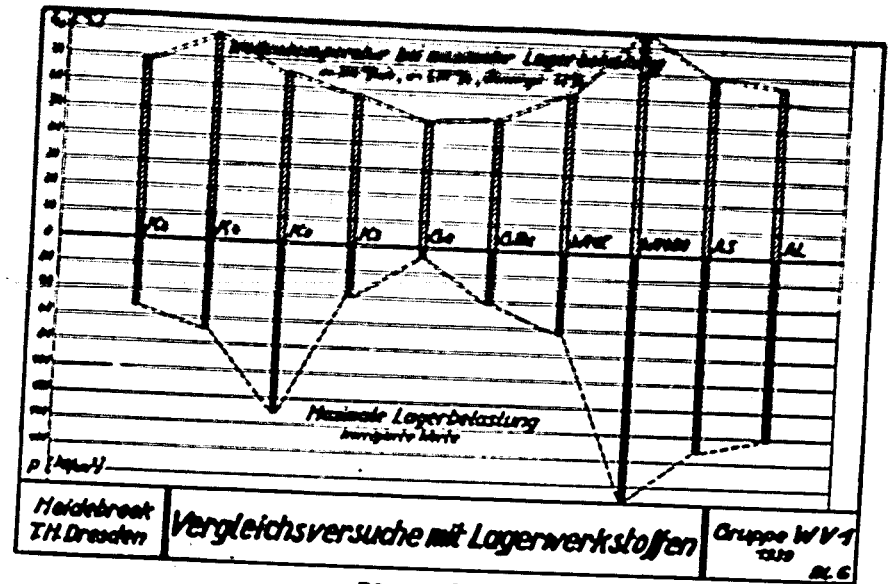
Blatt 19



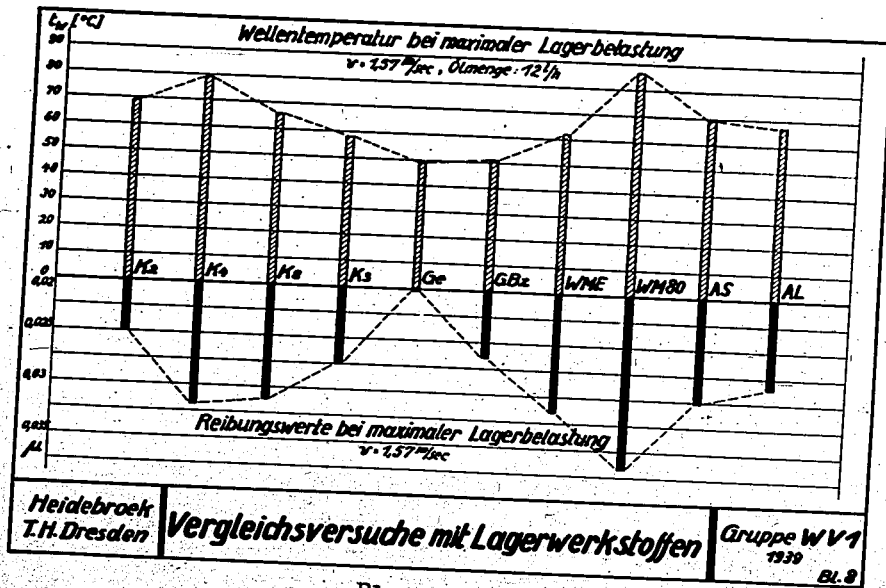
Blatt 21



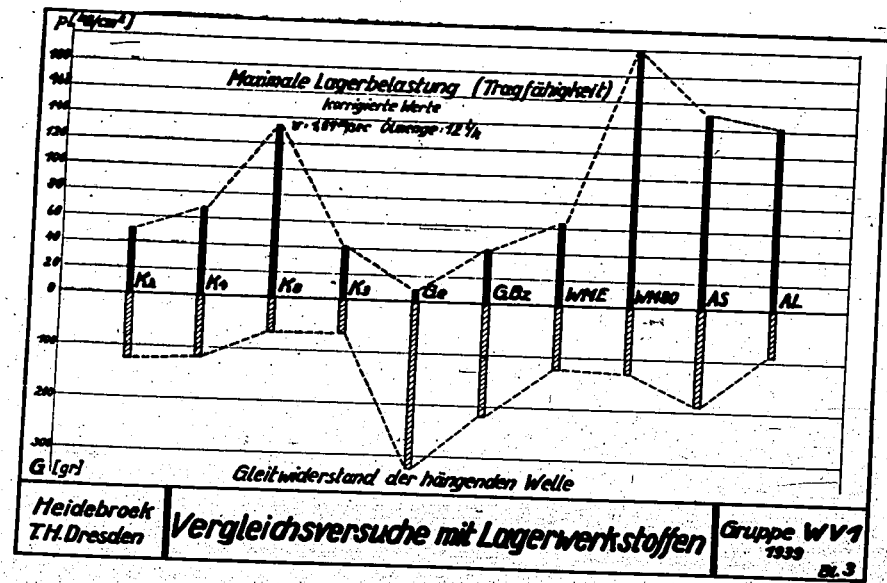
Blatt 22



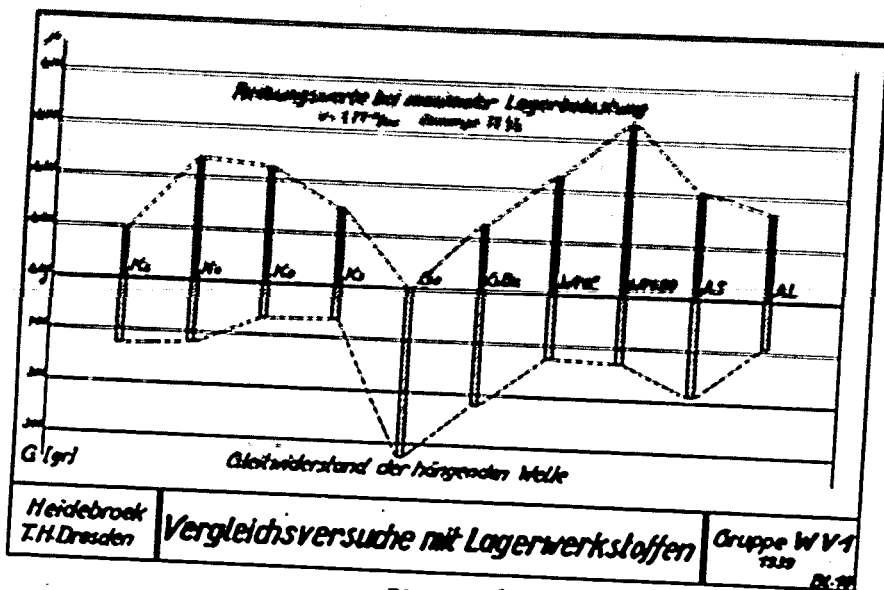
Blatt 24



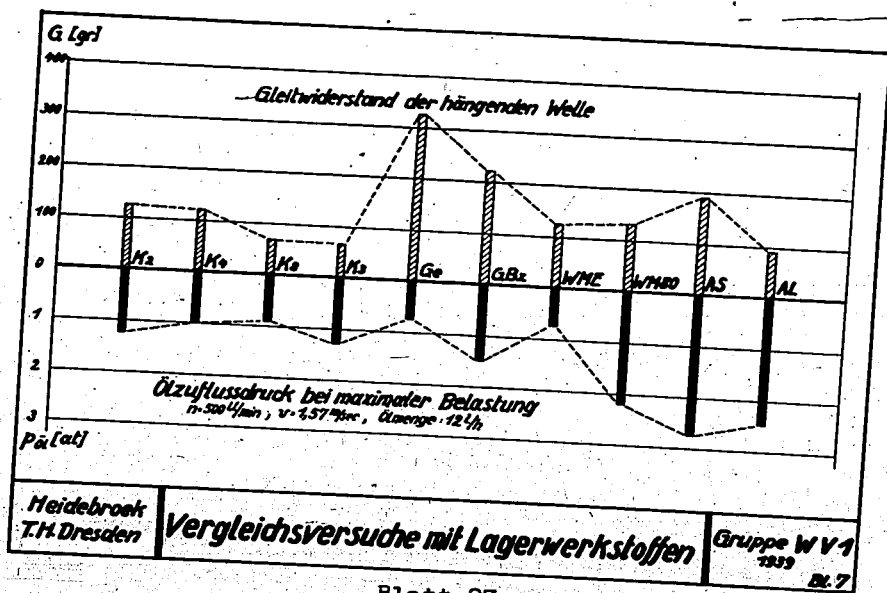
Blatt 23



Blatt 25



Blatt 26



Blatt 27

Nur zum Dienstgebrauch im Geschäftsbereich des Empfängers

SF2

Streng vertraulich!

000684

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 76

über

Laufversuche eines Kraftwagenmotors mit kunstharzumpreßter
Kurbelwelle

(Fortsetzung des Zwischenberichtes Nr. 21)

Bearbeiter: Assistent Arno Döring

Verfaßt beim

Laboratorium für Schmierforschung an der Technischen Hochschule
Dresden

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Ver-
schluß zu halten.

000685

Nur zum Dienstgebrauch im Geschäftsbereich des Empfängers

Streng vertraulich!

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 76

über

Laufversuche eines Kraftwagenmotors mit kunstharzumpreßter
Kurbelwelle

(Fortsetzung des Zwischenberichtes Nr. 21)

Bearbeiter: Assistent Arno Döring

Verfaßt beim

Laboratorium für Schmierforschung an der Technischen Hochschule
Dresden

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Verschuß zu halten.

I. Art und Zweck der neueren Versuche

Im Zwischenbericht Nr. 21 der Deutschen Kraftfahrtforschung wurde über die Laufversuche an einem Kraftwagenmotor berichtet, bei dem die Hauptzapfen der Kurbelwelle mit einem Überzug aus Kunstharz-Preßstoff versehen waren und in den gusseisernen Lagerkörpern des Motorgehäuses liefen, dagegen die Pleuellager noch ihre alte metallene Ausführung behielten. Diese Versuche ergaben die grundsätzliche Möglichkeit, die bisher üblichen zum Teil devilsbelasteten Lagermetalle durch ein Kunstharz-Futter zu ersetzen, trotz der im Kraftwagenmotor vorhandenen hohen Lager- und Öltemperaturen und der dabei auftretenden Wechselbelastungen durch Massenkkräfte und Gasdrücke.

Das Ziel der Versuche war schon damals, die gesamte Welle an allen Laufzapfen mit einem solchen Überzug aus Kunstharz auszurüsten. Dadurch soll erreicht werden, daß die Wellen an den Haupt- und Pleuelzapfen überhaupt nicht mehr bearbeitet zu werden brauchen, die Querschnittsübergänge ohne scharfe Eindröhrungen ausgeführt und insbesondere bei gegossenen Kurbelwellen die Werkstoff-Eigenschaften nicht mehr auf die Lauffähigkeit der Zapfenflächen, sondern nur auf die Festigkeitseigenschaften abgestimmt zu werden brauchen, also alle Methoden des Brennhärtens oder andere Verfestigungsmittel entbehrlich werden.

Es kommt weiter hinzu, daß bei einer etwaigen Beschädigung der Zapfenflächen nicht die ganze Welle unbrauchbar wird, sondern nur die Umprägung erneuert zu werden braucht.

Bei dem s. Zt. benutzten Sechszylindermotor (Wanderer) war der Benzinverbrauch sehr hoch; die Ausdehnung der Versuche auch auf die Pleuelköpfe hätte sehr umständliche bauliche Änderungen erfordert. Es wurde deshalb aus den Beständen des "Kraftfahrtechnischen Instituts" der T H Dresden ein älterer Motor, Bauart "Elite" 12/40 mit 4 Zylindern, herangezogen. Da dieser Gußkolben besitzt und nur mit 4 Zylindern arbeitet, hat er im allgemeinen schlechteren Massenausgleich und der Lauf des Motors ist daher unruhiger und die Belastung stoßweiser als bei den neueren Modellen. Es konnten dabei, wie weiter unten beschrieben, sämtliche Zapfen einschließlich der Pleuelzapfen leicht hergerichtet werden.

Die Versuche wurden wiederum auf dem sehr gut eingerichteten Prüfstand des Kraftfahrtechnischen Instituts (Leitung Professor Dr.-Ing. Beck) mit bereitwilliger Unterstützung seitens des Personals von meinem Assistenten Arno Döring mit großem persönlichen Einsatz Versuche durchgeführt und trotz vielfacher Schwierigkeiten zu einem befriedigenden Ergebnis gebracht.

Es sollte zunächst eine Dauererprobung von mindestens 100 Betriebsstunden unter Dauerlast erzielt werden unter den Verhältnissen, wie sie auf dem Prüfstand möglich sind. Die Versuchsdauer von 100 Stunden entspricht bei dem vorliegenden Motor einer Fahrstrecke von etwa 7000 km. Dabei ist zu berücksichtigen, daß im Fahrbetrieb eine derartige Dauerbelastung nicht auftritt und die Kühlung durch den Fahrwind wesentlich wirksamer ist als eine durch Gebläse auf dem Prüfstand bewirkte zusätzliche Luftkühlung.

Ein solcher Dauerversuch konnte in der zuletzt beschriebenen Anordnung hintereinander durchgeführt werden, wobei an aufeinanderfolgenden Tagen stets etwa 6 bis 7 Stunden durchgefahren wurde. Der Motor wurde zwischendurch nicht mehr geöffnet. Die im Anhang beigefügte Tabelle gibt einen Überblick über die Laufzeiten der letzten Versuchsgruppe.

Neben der Betriebssicherheit im allgemeinen sollte auch der Einfluß des Gegenmaterials in den Schalen, der Öltemperatur und Menge sowie der Dicke der Kunstharz-Putter im Hinblick auf die bekannten Formänderungserscheinungen des Kunstharzes geprüft werden. Die Hauptschwierigkeiten waren an den Pleuelköpfen zu erwarten, da bei diesen nicht nur die stoßweise Belastung scharfer in die Erscheinung tritt, sondern auch die elastische Verformung durch die großen Kräfte sich ungünstig auswirken mußte. Es zeigte sich deshalb auch sehr schnell, daß ein Einbau des Kunstharzes als fest im Kopf montierte Lagerschale (anstelle der umpreßten Zapfen) aussichtslos war. Zusätzliche Schöpfer wie im Bericht 21 waren dagegen nicht mehr erforderlich.

Nach Ablauf des Dauerversuches waren sämtliche Zapfen völlig intakt und zu einer längeren Betriebszeit geeignet. Da weitere Versuche der gleichen Art keine anderen Ergebnisse mehr erwarten ließen, wurden die Versuche Anfang September mit Rücksicht auf die Kriegsverhältnisse zunächst unterbrochen.

Die Lieferung des Kunstharzes sowie die Umpressung der Welle erfolgte wiederum in allen Fällen durch die H. Römmler A.-G., Spremberg N/L., die Fertigbearbeitung in Dresden.

II. Versuchsdurchführung

Die Kurbelwelle (Bild 1) weist an ihren sieben Lagerstellen einen Durchmesser (ohne Preßstoffumwicklung) von 41,95 mm auf. Jeder Zapfen erhielt auf den Umfang verteilt zunächst drei kleine ölnotenähnliche Längsrillen; in diese drückt sich, wie Bild 2 zeigt, der Preßstoff hinein. Sie stellen die einzige Sicherung des Preßstoffwickels gegen Verdrehung dar. Die sieben Zapfen der Kurbelwelle wurden von der Firma H. Römmler A.-G., Spremberg N/L., zuerst mit geschichtetem Preßstoff, Marke "Gerohlex", bis zu einem Durchmesser von annähernd 50 mm umpreßt. (Füllmasse: gewickelte Gewebbahnen.) Sämtliche Lagerstellen wurden hier auf Fertigmaß überschliffen. Da die Umwicklung die an die Oberfläche tretenden Ölbohrungen verdeckt, wurden die Preßstoffschichten durchbohrt und etwas eingesenkt. Die Lagernumerierung geht aus Bild 1 hervor.

Das Lagerspiel wurde folgendermaßen festgestellt: Die auf genaues Maß geschliffene umpreßte Welle wurde zuerst kalt vermesen. Anschließend kam sie 4 Stunden in ein Ölbad von 120 °C. Danach wurde wiederum das Durchmessermaß festgestellt. Zu betonen ist, daß ein Lagern von nur 5 Minuten in diesem Ölbad schon die gleichen Maße wie nach 4 Stunden ergab, der Quellvorgang sich also sehr rasch abspielt.

Lager	nach Schleifen	Lagerung in Öl 4 Std. bei 120°	mittl. Ausdehnung in mm	Vermaßen beim Einbau
1	40,295	40,335	14/100	40,195
2	40,26	40,39	13/100	40,26
3	40,26	40,30	12/100	40,26
4	40,26	40,39	13/100	40,26
5	40,26	40,30	12/100	40,26
6	40,25	40,37	12/100	40,25
7	40,26	40,30	12/100	40,26

Interessant ist eine Gegenüberstellung der Quellerscheinung beider Kurbelwellen in Öl von 120 °C.

Zw.-Bericht 21	Wanderer-Mot.	umpreß. Zapfen- durchmesser	mittl. Aus- dehnung	Wandstärke des Preß- stoffwickels
II. Bericht	Elite-Motor	~ 70,00 mm	bis 37/100 mm	~ 7 mm
		~ 48,00 mm	bis 14/100 mm	~ 3 mm

Während der größere Zapfendurchmesser ein stärkeres Aufquellen begünstigt, vermindert die diesmal den Versuchen zu Grunde gelegte Wandstärke des Preßstoffwickels von nur ~ 3 mm die Ausdehnung ganz bedeutend.

Die Lagerschalen. Da bei den früheren Versuchen das als Lagerschalen dienende Gußgehäuse des Motorenblocks zu keiner Beanspruchung führte, wurden bei den 4 Pleueln die mit Weißmetall ausgegossenen Bronzeschalen herausgenommen und durch neuangefertigte Schalen aus Lagergußeisen ersetzt. Für die drei Hauptlager, die im ersten Versuch mit Gußeisenschalen gelaufen waren, benutzten wir diesmal die schon dem Motor zugehörigen Bronzeschalen. Es wurde lediglich der Weißmetallausguß und soviel von der Bronzeschicht herausgedreht, bis die Durchmesser der umwickelten Kurbelzapfen erreicht waren. Von einer besonderen Ölnotenanordnung wurde Abstand genommen.

Das Lagerspiel ergab sich durch die Ausdehnung der Kurbelwellenlager bei einer Temperatur des Schmieröls von 120 °C zu 13/100 mm. Von einem zusätzlichen Spiel, das ja auch noch bei einer Erwärmung auf 120 °C vorhanden sein muß, wurde abgesehen, da sich die Lagerschalen ebenfalls ausdehnen.

Die Temperatur wurde auch diesmal mittels eines in den Ölsumpf ragenden Thermometers gemessen. Zusätzlich wurde noch ein Thermolement in das der Außenkühlung am wenigsten zugängliche, mittlere Hauptlager von unten her eingebaut, um die hier auftretende Lagertemperatur genau zu erfassen.

Wegen der hohen Raumtemperatur (meist 30 bis 35°) wurde die Motorwanne mit einem Ventilator mit Raumluft angeblasen, um die Wannentemperatur zu erniedrigen.

III. Versuchsergebnisse

1. Laufversuch

Dem Einlaufen lag folgendes Schema zugrunde:

5	Std. Lauf mit 1000 U/min ohne Last,
5	" " " 1000 " bei 1/4 der Vollast,
5	" " " 1000 " " 1/2 " " "
100	" " " wechselnd zwischen halber und ganzer Belastung.

Nach 5 Laufstunden wurde die Kurbelwelle zwecks Überprüfung nochmals ausgebaut. Die 7 unpresteten Lagerstellen und die 4 Pleuellagerschalen aus Gußeisen gaben keinerlei Anlaß zur Beanstandung. Hingegen zeigten die 3 Hauptlagerschalen aus Bronze schon bald beträchtliche Riefen in der Lauffläche. Es ist anzunehmen, daß diese Schalen aus ungeeigneter Bronze hergestellt waren, da denselben nur die Aufgabe zukam, den Weißmetalleinguß zu tragen. Sie wurden nun ebenfalls durch Schalen aus demselben Gußeisen wie die Pleuellagerschalen ersetzt.

2. Laufversuch

Diese Laufprüfung erstreckte sich über 50 Stunden. Abgesehen vom Klappern - wahrscheinlich eines Pleuels - bei hoher Drehzahl gab es keine Beanstandung. Das Klappern ließ sich dadurch erklären, daß die Gußlagerschalen durch das seitliche Spiel mit den Kurbelwangen in Berührung kamen.

Nach dem Ausbau der Kurbelwelle zur weiteren Überprüfung ergab sich folgendes Bild:

Lager 1 war noch vollkommen einwandfrei (Bild 3).

Lager 2 (Bild 4): Der Leinenwickel ist nicht homogen verbunden, sondern hat sich teilweise zusammengesoben. Dadurch wurde ein gleichmäßiger Schmierstoffdurchfluß unterbunden, was eine Verbrennung der Leinenschichten an der Lauffläche nach sich zog. Der fortgesetzte Umlauf der Welle und die Lagerbelastung haben jedoch die Oberfläche des Preßstoffes wieder geglättet, so daß die verbrannte Schicht ein teilweise spiegelndes Aussehen bekommen hat, während daneben und an tiefer liegenden Stellen die blanke Leinwand sichtbar wird.

Lager 3 ist noch einwandfrei.

Lager 4 (mittleres Hauptlager) hat nur an der Stelle, wo das Thermolement gerieben hat, einige schwach sichtbare Riefen (Bild 5).

Lager 5 ist noch einwandfrei.

Lager 6 ist schon stark angegriffen und für weitere Laufversuche nicht mehr geeignet (Bild 6).

Lager 7 ist noch einwandfrei.

Lager 2 und 6 wurden nochmals unprestet und auf Maß geschliffen.

Die Laufversuche wurden fortgesetzt.

Nach 20 3/4 Stunden sank bei einer Drehzahl von 1500 U/min und einer Lagertemperatur von 64 °C der Öldruck von bisher 1,2 at plötzlich auf 0,9 at ab. Kurz darauf war das Lager 3 (Pleuel) festgebrannt. Da alle anderen Lager noch einwandfreie Beschaffenheit zeigten, wurde von diesem Pleuelzapfen der Preßstoffwickel entfernt und an dessen Stelle das ursprünglich dort gelaufene Bronzelager mit Weißmetalleinguß eingebaut.

Nach weiteren 5 1/2 Laufstunden brannte unter denselben äußeren Anzeichen das Lager 2 fest. Nach abermaligem Entfernen des Leinenwickels und Einbau des früher dort gelaufenen Weißmetall-Lager 5.

Daraufhin wurde dieser Versuch abgebrochen.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Die drei Hauptlager haben bis dahin 82 3/4 Betriebsstunden einwandfrei durchgehalten.

Die vier Pleuellager standen bis zu 50 Betriebsstunden durch, wengleich ein Pleuel stark verbrannte und ein zweites leichte Verformung aufzeigte.

Nach dem Umpressen dieser zwei Pleuellager und weiteren 20 3/4 Stunden Laufzeit veraschte ein weiteres Pleuellager, das bisher schon 75 3/4 Stunden durchgehalten hatte. Ihm folgte nach 5 1/2 Stunden ein weiteres, das erst 26 1/4 Stunden gelaufen war. Als nächstes folgte wieder ein Pleuellager, das 81 1/4 Laufstunden durchgehalten hatte.

Abgesehen von der veraschten Lauffschicht saßen die Wickel noch fest auf der Stahlwelle. Auch nach ihrer Entfernung ließen sich keine Schlüsse für das Versagen ziehen (Bild 2). Das Absinken des Öldruckes unter 1 at ließ aber vermuten, daß eine ausreichende Wärmeabfuhr nicht mehr gewährleistet war und daher Zerstörung des Lagers durch zu hohe Temperatur eingeleitet wurde. Diese Erscheinung führt ja auch im praktischen Fahrbetrieb bei Automobil-Motoren, die mit Weißmetallagern ausgerüstet sind, zum Auslaufen.

Warum das erste Pleuellager nach 75 3/4 Stunden versagte, das zweite schon nach weiteren 5 1/2 Stunden und das dritte nur noch 1 1/2 Stunden länger durchhielt, ist folgendermaßen zu begründen:

Solange nur ein Pleuel mit Weißmetallschalen ausgerüstet war, bekamen die übrigen drei Lager zwar prozentual weniger, doch noch immer so viel Öl, daß bis zur Veraschung des nächsten Lagers noch 5 1/2 Stunden vergingen. Je mehr nun aber Weißmetallschalen eingebaut wurden, desto größer war hier der Ölverlust und umso weniger

Öl bekamen die restlichen Preßstoff-Fluallager. Das führte zu diesem stufenartigen Abwinken der Laufseiten.

1. Laufversuch

Da eine Umprägung der Fluallager bis dahin nicht den gewünschten Erfolg brachte, wurden anstelle der Bronzeschalen mit Weißmetallguss an den Fluallagern solche Schalen aus Preßstoff, Marke "Gerohlex", eingebaut, so daß nunmehr die Stahlsapfen auf festen Kunstharz-Schalen liefen. In einem Vorversuche wurden die Quell- und Schrumpferscheinungen zur Ermittlung des benötigten Lagerspiels festgestellt. Die mit den Fluallagern verspannten Schalen von 6 mm Wandstärke wurden in Öl von 120 °C 4 Stunden gekocht und bei dieser Temperatur vermessen. Das Lagerspiel ergab sich im kalten Zustand zu 15/100 mm.

Die zum Festhalten der Preßstoffwickel in jeden Fluallager gefrästen drei Ölnotentartigen Rillen wurden unverändert beibehalten. Die Tatsache, daß sie als Ölsammelaschen die Pumpwirkung des Öldurchflusses nur fördern konnten, befürwortete ihr Beibehalten.

Da der Öldurchflußdruck durch den 1 : 2 untersetzten swangalkufigen Antrieb von der Kurbelwellendrehzahl bestimmt wird, das größere Lagerspiel der Preßstoffe gegenüber Weißmetall aber durch den erleichterten seitlichen Antritt des warmen Öls nicht den gewünschten Öldruck ergab, mußte Abhilfe geschaffen werden.

Deshalb wurde die Ölpumpe von ihrer Kupplung mit der Welle gelöst und durch eine biegsame Welle mit einem neben der Versuchsmaschine stehenden Elektromotor verbunden. Letzterer konnte von 0 bis 3000 U/min geregelt werden.

Bei diesen Versuchen wurde der Öldruck vorsichtshalber bei 4 at konstant gehalten.

Der Versuchsmotor sollte diesmal zum Einlaufen der Lager nicht aus eigener Kraft laufen, deshalb wurde er durch einen Generator angetrieben. Schon nach 2 Stunden waren alle vier Lagerschalen an den Fluallagern vollkommen zerstört (Bild 7).

Neben der Formänderung der reichlich elastischen Stangenköpfe, die eine Zermürbung der nicht biegefesten Kunstharz-Schalen herbeigeführt hat, muß eine zu hohe Temperatur im Lager geherrscht haben; denn die Veraschung der Oberfläche ist schon weit fortgeschritten. Öl war genügend an die Lagerstellen gekommen.

Dieser Versuch bestätigt nur immer wieder die auch im Schrifttum 1) vertretene Ansicht, daß eine Umprägung der Welle eine bedeutend bessere Wärmeabfuhr ermöglicht, als es bei wärmeisolierenden Schalen der Fall sein kann.

Von weiteren Versuchen in dieser Richtung wurde Abstand genommen.

1) Heidebroek: Zeitschrift "Kunstharz und Preßstoffe", 1937, Heft 2, S. 11.

4. Laufversuch

Bei den Versuchen mit umpreßten Wellensapfen bestand noch die Möglichkeit, bessere Erfolge durch die Anordnung von Schmier-Ölnuten in den Lagerschalen zu erzielen. Deshalb erhielten die acht Ölhalbschalen der Fluallager je eine radiale Ölnut, von der an drei Stellen axiale Ölverteilerölnuten nach beiden Seiten abgaben (Bild 6).

Die Kurbelwelle wurde nun an den 4 Fluallagern neu mit "Gerohlex" umpreßt (gewickelte Textileinlagen). Trotzdem das mittlere Hauptlager einwandfrei 84 Stunden durchgestanden hatte, wurde es zur Kontrolle ebenfalls mit neu umpreßt. Das Lagerspiel von 15/100 mm, in kaltem Zustand gemessen, blieb bestehen.

Bei 1360 U/min, 14 PS Bremsleistung, 3 at Öldruck und einer konstanten Temperatur von 74 °C im mittleren Hauptlager lief der Motor 15 Stunden. Die aus dem Motor dringenden Geräusche ließen eine Überprüfung notwendig erscheinen.

Es ergab sich folgendes Bild:

An allen neu umpreßten Lagern ließen sich die Wickel schichtenweise abziehen (Bild 2). Selbst das mittlere Hauptlager, das in der ersten Umprägung 84 Stunden einwandfrei durchgehalten hatte und nun neu umpreßt war, wurde diesmal - dazu ohne jede Veränderung der Lagerkonstruktion - schon nach 15 Stunden zerstört.

Hier liegt der eindeutige Beweis vor, daß eine zuverlässige, bis auf den Grund reichende Aushärtung der Preßstoffwickel nicht erzielt war. Das Versagen war offenbar auf die Beschaffenheit der Preßstoff-Schicht zurückzuführen.

Da eine alle Lager gleichzeitig in einem Arbeitsgang auspressende Preßform lediglich für unsere Versuche nicht gebaut werden konnte, mußte sich die Lieferfirma mit einer jede Lagerstelle allein behandelnden Form begnügen. Dadurch mag es nicht immer möglich gewesen sein, die Welle ständig so warm zu erhalten, wie es eine durchgehende Aushärtung des Preßstoffes voraussetzt. Die beiden Randhauptlager, die noch aus der ersten Umprägung stammen, haben bis dahin eine Laufzeit von ~ 100 Stunden einwandfrei überstanden.

5. Laufversuch

Nach eingehenden Besprechungen mit der Preßstoff-Herstellerfirma Rummeler, Spremberg, wurde die Kurbelwelle nochmals in den Lagern 2 bis 6 neu umpreßt. Diesmal aber nicht mit Leinwandwickeln als Einlage, sondern die Laufzapfen wurden mit Asbestfäden, die mit Harz getränkt waren, umwickelt und dann mit Harz umpreßt und ausgehärtet. Dadurch soll in diesem Falle eine gleichmäßigere Verbindung von Harz und Füllstoff und eine bis auf den Grund gehende Aushärtung erreicht werden.

Diese Lagerstellen wurden ebenfalls nach einer vierstündigen Lagerung in Öl von 120 °C vermessen. Die Aufquellung betrug gleichfalls 15/100 mm.

Da die Möglichkeit bestand, daß sich die eingebauten schwachen Gußschalen der Pleuelköpfe unter der Zug- und Druckbeanspruchung zusammensetzen und knifeln könnten, wurden sie von der axialen Ölmit bis zu ihrem Stos freigeschliffen (s. Bild 6).

Zuerst wurde untersucht, wie groß der Temperaturunterschied bei Fremdantrieb durch Generator und beim Lauf mit eigener Kraft war. Bei einer Drehzahl von 1400 U/min, 3 at Öldruck und ohne Bremsleistungsabnahme lag die an dem Hauptlager gemessene Temperatur bei Fremdantrieb nur 3° tiefer als bei Eigenantrieb. In beiden Fällen lagen stets gleiche Betriebsbedingungen vor. Gemessen wurde erst, nachdem sich eine konstante Temperatur am Thermoelement eingestellt hatte (nach 4 Stunden).

Ohne irgendwelche Beanstandung lief der Motor unter Last 26 Stunden. Eine anschließende Kontrolle der Lager ergab folgende Beschaffenheit:

2 Pleuefutter waren leicht angegriffen. Am mittleren Hauptlager hatte sich das in die Lagerschale eingeschraubte Thermoelement verzogen. Dadurch war eine Beschädigung des Preßstoffes in dem Abschnitt, wo das Thermoelement saß, festzustellen. Alle übrigen Lager waren noch einwandfrei.

6. Laufversuch

Die umpreßte Schicht wurde an den Lagerstellen 2 bis 6 nochmals überschleift, um die entstandenen Riefen zu beseitigen. Die Lagerzapfen haben dadurch folgende Abmessungen erhalten:

Lager 1	48,19 mm	Lager 4	47,77 mm
Lager 2	47,295 mm	Lager 5	47,285 mm
Lager 3	47,30 mm	Lager 6	47,295 mm
		Lager 7	48,26 mm

Um das Lagerspiel von 13/100 mm beizubehalten, mußten neue stärkere gußeiserne Lagerschalen angefertigt werden. Der verwendete Werkstoff war ein normaler Maschinenguß. Da die zusätzlich angeordneten Ölverteilerlarnuten keine Verbesserung gebracht hatten, erhielten die Schalen nur an der Stelle, wo das Öl aus den Pleuelzapfen austritt, eine radiale Ringnut auf den ganzen Umfang. An den Stellen, wo beide Halbschalen aneinanderstoßen, wurden, wie auch im Bild 8 ersichtlich, Öltaschen angebracht. Von einem Freischleifen der Seitenflächen wie bei den ersten Gußlagern wurde Abstand genommen. Zur Feststellung, ob die Hauptlager auch noch eine höhere spezifische Flächenpressung aushalten, wurde Zapfen 1 mit einer 13 mm breiten ringsumlaufenden Aussparung versehen, was einer Erhöhung der Lagerbelastung von 16 % gleichkommt (Bild 11).

Diese Ausführung führte nunmehr zum Erfolge. Der Motor ist 100 1/2 Stunden gelaufen, davon die ersten 50 Stunden mit halber Bremsleistung. In der weiteren Laufzeit wurde zwischen 3/4 und voller Bremsleistung gewechselt, jedoch so, daß die volle Leistung des Motors nur kurzzeitig abgenommen wurde (vgl. die Tabelle der Laufzeiten). Dabei muß betont werden, daß eine tage-

lange Abnahme von 3/4 der maximalen Leistung auf den Prüfstand weit höhere Anforderungen an den Motor stellt, als sie normalerweise im praktischen Fahrbetrieb auftreten, da eine derartige Dauerleistung im Fahrbetrieb kaum vorkommt und die Fahrwind-Kühlung auf dem Prüfstand nicht voll ersetzt werden kann.

Der Öldruck wurde bei jeder Drehzahl des Versuchsmotors mit ungefähr 3 at konstant gehalten. Bei hohen Lagertemperaturen lief deshalb die Ölpumpe mit 3000 U/min.

Die Öltemperaturen bei 3/4 der Bremsleistung lagen in der Ölwanne bei 71°C, im mittleren Hauptlager bei 79,5°C und in den Pleueln schätzungsweise bei 92°C.

Die höchste Temperatur, die einmal - wenn auch nur kurzzeitig - am mittleren Hauptlager auftrat, lag bei 98°C.

Nachdem der Motor die vorgesehenen 100 1/2 Stunden ansichtslos durchgehalten hatte, ergab sich nach seiner Auseinandernahme folgendes Bild:

Die vier Pleuellagerwickel zeigten keinerlei Spuren, die auch nur im geringsten auf ein baldiges Versagen hindeuten könnten. Auf der Lauffläche hat sich ein Spiegel ausgebildet. Von einigen verschwindend kleinen Riefen - die bei Weißmetallagern ebenfalls nach dieser Laufzeit vorzufinden sind - abgesehen geben diese Lager keinerlei Anlaß zu irgendeiner Beanstandung. Bild 9 gibt das Aussehen eines und damit zugleich aller 4 Pleuel nach beendetem Laufversuch wieder.

Für das mittlere Lager gilt das Gleiche. Bild 10 zeigt ebenfalls das Aussehen nach 100 1/2 Stunden Lauf. Die links vom Ölloch um den ganzen Umfang laufende Bahn, auf der Teilchen der oberflächenschicht herausgerissen wurden, ist nicht während der letzten 100 Stunden entstanden. Vielmehr sind das die letzten Spuren der Beschädigung durch das locker gewordene Thermoelement aus dem vorhergehenden Versuch. Beim Überschleifen sind sie nicht ganz zum Verschwinden gekommen.

Den Beweis für die einwandfreie Beschaffenheit der Randhauptlager soll Bild 11 belegen. Diese beiden Lager sind mit der Gerohlex-Druckung vom ersten Versuchstage bis heute 226 1/4 Stunden gelaufen, das Lager 1, wie vorliegendes Bild zeigt, die letzten 100 Stunden noch unter erhöhter Lagerbelastung. Die Beschaffenheit der Wickel ist noch die gleiche wie am ersten Versuchstage.

Zum Abschluß werden noch einmal die Durchmesser der einzelnen Lager nachgemessen.

Lager	Vor dem letzten Versuch	Nach 100 1/2 Std. Lauf	Schrumpfung in 100 1/2 Laufstd.	Gesamtlauf mit diesem Wickel
1	48,19	48,180	1/100	226 1/2
2	47,295	47,265	3/100	126 1/2
3	47,30	47,265	3,5/100	126 1/2
4	47,77	47,740	3/100	126 1/2
5	47,285	47,245	4/100	126 1/2
6	47,295	47,255	4/100	126 1/2
7	48,26	48,250	1/100	226 1/2

Zusammenfassung

Die Gesamtergebnisse der Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Es ist gelungen, den Nachweis zu erbringen, daß es möglich ist, die Kurbelwelle eines vierzylindrigen Kraftwagenmotors an sämtlichen Zapfen-Laufstellen durch einen aufgepreßten Überzug aus Kunstharz-Preßstoff in gußeisernen Lagerschalen so laufen zu lassen, daß nach einem über 100-stündigen Dauerbetrieb auf dem Prüfstand und unter den dort möglichen Verhältnissen bei wechselnder Belastung sämtliche Lager in einwandfrei betriebsfähigem Zustand waren.
- Bei 2 Hauptlagern betrug die Laufzeit insgesamt 226 Stunden.
2. Zu einem einwandfreien Betrieb ist es notwendig, eine ausreichende Ölspeicherung durch einen erhöhten Öldruck - hier etwa 3 at - zwecks genügender Wärmeabfuhr aufrecht zu erhalten. Es empfiehlt sich, die Ölmenge zu den Lagern sowie ihren Druck regelbar zu machen.
3. Die bisher noch unvermeidbaren Quell- und Schrumpfungerscheinungen der Kunstharz-Preßstoffe werden am besten durch eine möglichst geringe Dicke der umpreßten Schicht (von möglichst nicht mehr als 2 bis 3 mm in bearbeitetem Zustand) unschädlich gemacht.
4. Das Lagerspiel ist durch vorhergehende Dehnungsmessungen im kalten Zustand so zu bemessen, daß es im warmen Zustand nur wenige Hundertstel Millimeter beträgt.
5. Die Verwendung von mehrfach umwickelten festen Gewebekappen, mit Kunstharz durchtränkt, empfiehlt sich nicht, da die Bahnen sich nicht gleichmäßig durchhärten und zum Ablättern neigen. Eine Füllung durch eingelegte Fäden eines hitzebeständigen Füllstoffes (Asbest) bewährt sich wesentlich besser.
6. Auf den Preßvorgang, insbesondere auf genügende Erhitzung der Welle beim Pressen, ist besondere Sorgfalt zu verwenden, damit eine gleichmäßige Durchhärtung erzielt wird. Die Bearbeitungszugabe soll möglichst gering gehalten werden (1 bis 2 mm).
7. Die festen Lagerschalen können aus einem normalen Gußeisen mit gleichmäßigem Gefüge und sauberem Oberflächen-Schliff hergestellt werden. Auf genügende Formsteifigkeit, insbesondere an den Pleuelköpfen, ist besonders zu achten.
8. In die Lagerschalen wird zweckmäßig in der der Eintritts-Ölbohrung entsprechenden Querebene eine Ringnut eingedreht, damit das Öl zu beiden Schalenhälften leicht Zutritt hat.

Weitere Versuche

Die Versuche sollen, sobald es die Verhältnisse gestatten, nach der Richtung hin weitergeführt werden, daß das Lagerspiel noch enger gehalten wird, um einen möglichst hohen Gegenruck des Öles und eine Verminderung des Ölverbrauches zu erreichen. Die allgemein neuerdings in steigendem Maße angewendeten Mittel zu einer besseren Ölkühlung zwecks Verminderung der Öleintrittstemperatur haben natürlich für Kunstharzlager besondere Bedeutung.

Vor allem kann nunmehr aber an Fahrversuche im Gelände herangegangen werden. Es wird vorgeschlagen, zunächst einen serienmäßigen normalen Motor einer kleineren Wagentyp mit einer entsprechenden Welle und Lagern zu versehen und in Geländefahrten zu erproben. Hierzu stünde hier u. U. ein Opel-Kadett zur Verfügung; jedoch soll damit geeigneten Vorschlägen der Kraftfahr-Industrie nicht vorgegriffen werden.

Auf den seinerzeitigen Zwischenbericht Nr. 21 sind Äußerungen der Kraftfahr-Industrie an den Verfasser bisher nicht gelangt. Es wäre zu begrüßen, wenn dieselbe sich nunmehr entschließen würde, die Versuche im angegebenen Sinne zu unterstützen. Der betreffende Motor soll dann zunächst auf dem Prüfstand einlaufen und dann in einen entsprechenden Wagen eingebaut werden.

Betriebsdaten des Kite-Motors

max. Drehzahl 2000 U/min. max. Bremsleistung 14,9 PS

Übersicht über die Laufseiten der letzten Versuchsgruppe

Tag	Stunden	Drehzahl	Bremsleistung	Temp. an Hauptlager	Öldruck	Bemerkungen	
		U/min	PS	°C	at		
22.8.39	7	1000	—	68,0	2,8	6. Laufversuch	
23.8.39	7	1320	11,8	73,0	2,8		
24.8.39	6 1/2	1400	12,6	73,0	2,8		
25.8.39	6 1/2	1500	19,5	80,5	2,9		
29.8.39	7	1500	22,5	72,0	3,0		
30.8.39	7	1600	22,4	74	2,9		
31.8.39	7	1500	19,5	67,5	3,0	Raum- Temperatur ca. 30 - 35°	
1.9.39	2	1500	19,5	—	3,0		
3.9.39	5	1500	22,5	71,5	3,0		
4.9.39	7	1500	25,5	72,5	3,0		
5.9.39	7	1600	27,2	79,5	2,6		
6.9.39	7	1500	25,5	72,5	3,0		
7.9.39	7	1520	26,6	76,0	2,8		
8.9.39	7 1/2	1500	26,5	76,0	3,0		
9.9.39	3 1/2	1500	26,6	—	3,0		
11.9.39	6 1/2	1500	26,6	—	2,9		wechselnde Belastung
		2200	34,9	—			



Bild 1



Bild 2

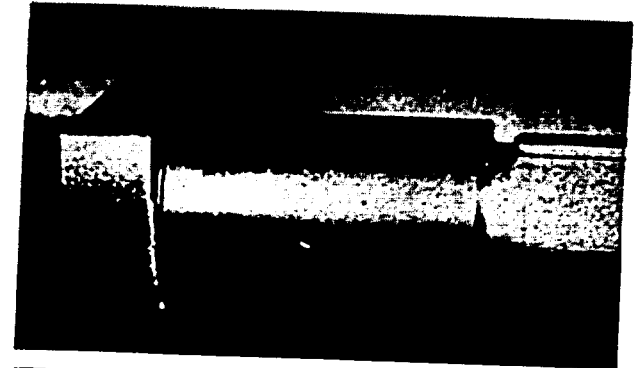


Bild 3

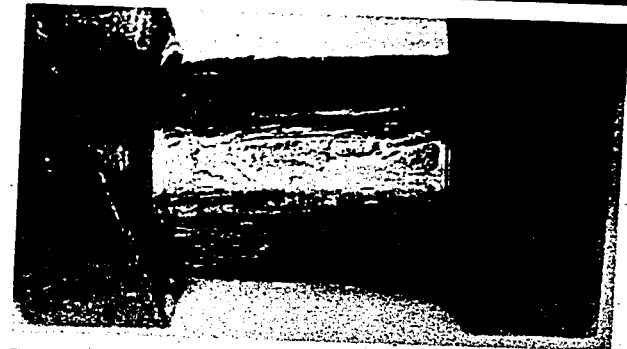


Bild 4

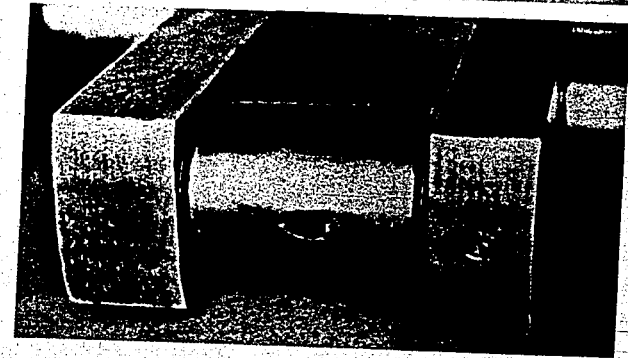


Bild 5

000693

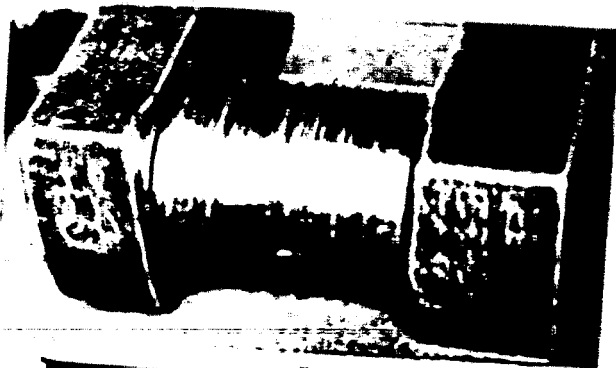


Bild 6

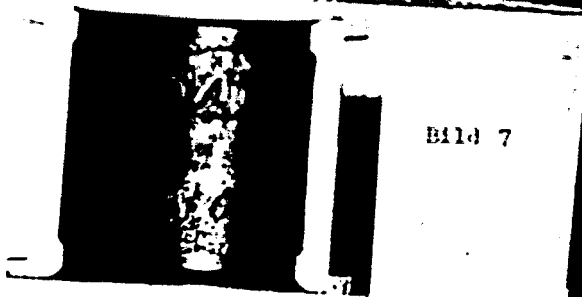


Bild 7

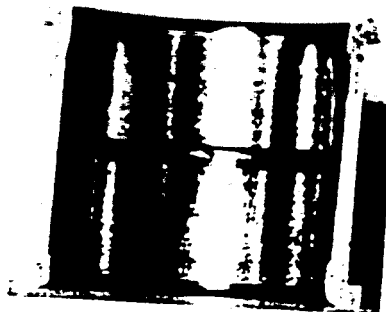


Bild 8

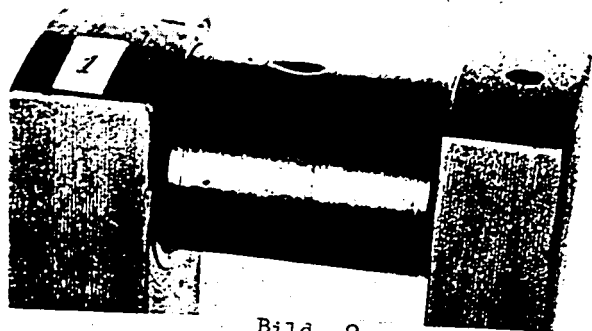


Bild 9

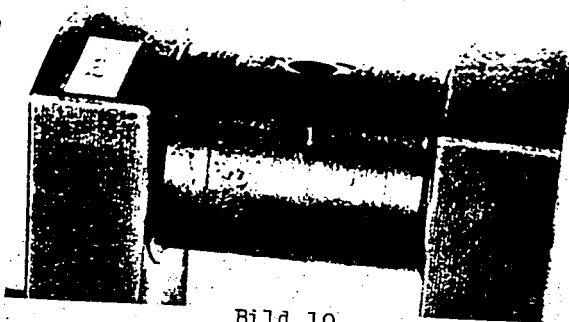


Bild 10

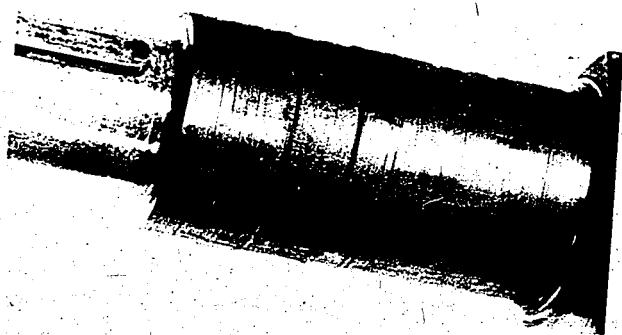


Bild 11

h
Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

SF3

000694

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 83

Neue Methoden zur Bewertung der Schmierfähigkeit
von Ölen und Fetten

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Edgar Pietsch

Verfaßt beim

Laboratorium für Schmierforschung an der Technischen Hochschule
Dresden

von

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Ver-
schluß zu halten.

**Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers**

000695

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 83

**Neue Methoden zur Bewertung der Schmierfähigkeit
von Ölen und Fetten**

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Edgar Pietsch

Verfaßt beim

Laboratorium für Schmierforschung an der Technischen Hochschule
Dresden

von

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Ver-
schluß zu halten.

000696

Professor Dr.-Ing. H e i d e b r o e k
Laboratorium für Schmierforschung
Technische Hochschule Dresden

Neue Methoden zur Bewertung der Schmierfähigkeit
von Ölen und Fetten

Die Untersuchungen wurden zu einem erheblichen Teil mit Unterstützung des "Forschungsrates für das Kraftfahrwesen" beim Reichsverkehrsministerium durchgeführt. Für diese Unterstützung spreche ich auch an dieser Stelle meinen Dank aus.

Dresden, im April 1940.

E. H e i d e b r o e k VDI

000697

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung: Der Begriff der Schmierfähigkeit	1
I. Teil:	
Abreißversuche an Ölfilmen	3
1. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Ab- reißfähigkeit	3
2. Paarung verschiedener Werkstoffe mit gleichem Schmieröl	5
3. Paarung der gleichen Abreißplatte mit verschiedenen Schmierölen	7
4. Einfluß der Temperatur	11
5. Einfluß der Druck-Vorbelastung	11
6. Einfluß des Oberflächen-Zustandes	12
II. Teil:	
Untersuchung der Schmierfähigkeit verschiede- ner Schmierstoffe an Zahnradgetrieben	13
1. Versuchsanordnung und Methode	14
2. Versuchsergebnisse	16
Zusammenfassung	20
Schrifttumsverzeichnis	21

000698

Zwischenbericht für das Reichsverkehrsministerium

Neue Methoden zur Bewertung der Schmierfähigkeit
von Ölen und Fetten

Von E. Heidebroek VDI - Dresden

Der Begriff der Schmierfähigkeit

Eine eindeutige Erklärung, was man unter "Schmierfähigkeit" eines Schmierstoffs, insbesondere der gebräuchlichen Schmieröle und Fette, zu verstehen hat und wie man sie mit exakten Zahlen messen kann, gibt es bis heute noch nicht. Zwar sind im Schrifttum zahlreiche Ölprüfmaschinen beschrieben, die diesem Zweck dienen sollen und vorwiegend eine mechanische Prüfung der Schmierstoffe gestatten, aus der man - abgesehen von den chemischen Werten - Rückschlüsse vergleichender Art auf das Verhalten der Schmierstoffe im Betrieb ziehen zu können glaubt. Die umfassendste Übersicht über diese Methoden findet sich in dem Bericht über die "General Discussion on Lubrication and Lubricants" [1], auf die wegen des Umfangs der Quellen verwiesen werden muß.

In den letzten Jahren haben insbesondere die Vierkugel-Methode nach Boerlage, der SAE-Test, die Methode von Voitländer [2] u.a. Beachtung gefunden; bei diesen wird ein Schmierstoff unter Belastung zwischen drehenden Kugel- oder Zylinderflächen eingebracht und die Last bzw. Geschwindigkeit bis zum Fressen gesteigert, die Drehmomente, Temperaturen usw. gemessen. Andere wiederum benutzen Gleitklötze mit ebener Fläche, die gegen drehende Scheiben gedrückt werden, wobei sowohl die Reibungswerte des Schmierstoffs wie die Grenzbelastungen und das sonstige Verhalten des Werkstoffs untersucht werden. Es ist nur selten möglich, die Ergebnisse dieser Prüfungen auf die Praxis unmittelbar zu übertragen. Manche der Methoden arbeiten im Gebiet der hydrodynamischen Flüssigkeitsreibung, andere ausgesprochen mit Grenzreibung und Verschleißwirkung; es leuchtet ein, daß dadurch allein schon die physikalischen Verhältnisse grundlegend verändert werden können; in den praktischen Anwendungsfällen ist aber der eine oder andere Zustand oder beide durch die Betriebsverhältnisse gegeben und in ihm muß sich die Schmierfähigkeit bewähren. So sind z.B. die zahlreichen Lagerprüfmaschinen in gewissem Sinne auch Ölprüfmaschinen, nur daß hier die spezifischen Eigenschaften des Schmierstoffes von vielen anderen Einflüssen überlagert und daher schwer herauszumessen sind.

Arbeitet man im Gebiet der sog. reinen Flüssigkeitsreibung, so erscheint in den zur Berechnung der Reibung etc. angewandten hydrodynamischen Gleichungen als einzige, den Schmierstoff betref-

^{*)} [.] Die Zahlen in den eckigen Klammern beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluß der Arbeit.

fundamentale physikalische Größe die Zähigkeit η [$\text{kg}\cdot\text{s} / \text{m}^2$], alles andere sind geometrische Größen von Welle und Lager. Um die Rechnungen durchführen zu können, muß man η als konstant annehmen, was bekanntlich nicht entfernt zutrifft; man ist also auf die Schätzung eines mittleren η -wertes angewiesen, wenn man die Kurve der Temperaturabhängigkeit von η kennt. Die Dimension der Zähigkeit ergibt sich zwangsläufig aus dem Ansatz von Newton $\tau = \eta \cdot dv/dy$ in technischen Einheiten zu $\text{kg}\cdot\text{s} / \text{m}^2$; man bestimmt sie in bekannter Weise mit den üblichen Viskosimetern.

So fruchtbar sich die hydrodynamische Rechenmethode allgemein erwiesen hat und so oft ihre Annahmen durch Versuche unter bestimmten Bedingungen grundsätzlich bestätigt wurden, so dringender wurden im Laufe der letzten Jahre die Zweifel, ob mit dem einzigen physikalischen Begriff der Zähigkeit, d.h. Schubkraft-Konstanten, die die Schmierfähigkeit kennzeichnenden Eigenschaften ausreichend erfaßt werden können. War doch diese Größe nur äußerlich durch Fließ-Messungen bestimmt, nicht aber in einen bindenden Zusammenhang mit den molekular-physikalischen Eigenschaften des Schmierstoffs zu bringen. So suchte man nach neuen, geheimnisvollen Begriffen wie Oiliness, onctuosité usw. und wollte darin vor allem die Abhängigkeit der Zähigkeit vom Druck und andere Beobachtungen unterbringen, z.B. die, daß Öle gleicher Zähigkeit, aber verschiedener chemischer Struktur stark verschiedene "Tragfähigkeit", Reibungszahlen und dergl. ergeben können [1].

Die neueren Forschungen auf dem Gebiete der physikalischen Chemie, von denen hier nur Debye, Kyropoulos, K. L. Wolf, Harms [3, 4, 5, 6] u.a. genannt seien, lassen keinen Zweifel mehr darüber, daß die chemisch-molekulare Struktur der in Frage kommenden Kohlenwasserstoffgruppen deren innere Reibung, die Abhängigkeit von Temperatur und Druck, vor allem aber ihre Orientierungsfähigkeit zu einer mehr oder weniger geordneten Strömung ausschlaggebend beeinflussen und daß diese innere Ordnung der Moleküle im Bereich metallischer oder anderer Oberflächen durch die von diesen ausgehenden freien Oberflächenkräfte weitgehend bestimmt wird. Die Frage ist nur, von welchem Bereich der Annäherung ab diese Einflüsse so wirksam werden, daß sie die der hydrodynamischen Theorie zu Grunde liegenden Annahmen empfindlich stören, ja ganz beseitigen können. Dieser Frage nachzugehen, ist Sache der technischen Forschung. Die physikalische Chemie ist z. Zt. damit beschäftigt, den Zusammenhang der sog. Zähigkeits-Eigenschaften mit dem molekularen Aufbau zu klären, ebenso den Einfluß der Oberflächen-Kräfte. Nimmt man an, daß deren Wirkung in engen Ölschichten von etwa 1/1000 mm abwärts spürbar werden kann, so zeigt sich, daß dieser Zustand der sog. Grenzreibung in der technischen Anwendung sehr viel häufiger ist, als man gewohnt ist, anzunehmen. Selbst unter Voraussetzung ideal glatter unelastischer Zylinderflächen ergeben sich bei keineswegs hohen Belastungen unter der Berechnung nach den hydrodynamischen Regeln weit engere Spaltweiten bei vielen Gleitlagern, bei fast allen Zahnrädern, den Wälzlagern, Wälzflächen usw. allein durch die Veränderlichkeit der Geschwindigkeiten, durch ungünstige Schmiegungsverhältnisse, hohe spezifische Belastungen usw. Es ist daher nicht zuviel gesagt, daß der Zustand der Grenzreibung der häufigere, derjenige der vollen Flüssigkeitsreibung der seltene ist.

Diese Tatsache muß dazu führen, die Vorgänge im Bereich der Grenzreibung viel mehr zu durchforschen. Hinsichtlich der Gleit-

lager ist dazu ein Anfang gemacht in den Versuchen, über die im Zwischenbericht Nr. 71 berichtet wurde.

Um die dabei gewonnenen Erkenntnisse einer offenbaren Bedeutung der Art der Paarung zwischen Welle, Lagerschalen-Werkstoff und Schmierstoff zu erweitern und insbesondere den Einfluß des letzteren zu klären, wurden im Laboratorium des Verfassers zwei weitere Versuchsgruppen durchgeführt, und zwar:

I. Abreißversuche an dünnen Ölfilmen,

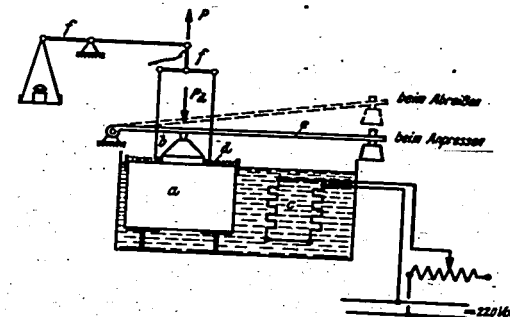
II. Untersuchung der Schmierfähigkeit verschiedener Schmierstoffe an Zahnradgetrieben.

Hierüber soll im folgenden berichtet werden.

I. Abreißversuche an Ölfilmen

1. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Abreißzähigkeit

Die Frage nach der Größe der Haftkräfte, mit denen die Molekülketten der Schmierstoffe an den Oberflächen verankert sind, bildet z. Zt. ein Hauptproblem der physikalisch-chemischen Forschung. Um zu versuchen, diesem Problem auch mit technischen Maßgrößen bzw. Methoden beizukommen, wurde folgende Versuchs-Anordnung entwickelt (Bild 1).



- | | |
|----------------|--------------------|
| a Grundplatte | e Belastungsträger |
| b Abreißplatte | f Abreißgestänge |
| c Heizöl | P Abreißkraft |
| d Versuchsöl | F_d Anpresskraft |

Bild 1. Schema der Abreißvorrichtung.

Eine an der Oberfläche sehr sauber polierte Platte (Faschierplatte aus Stahlguß) wird in ein offenes Gefäß gestellt, in dem durch ein Ölbad eine bestimmte Temperatur unter Zuhilfenahme einer Heisspirale eingehalten werden kann. Auf die polierte Oberfläche wird eine leichte Schicht des zu untersuchenden Schmierstoffes gebracht und nun eine ebenfalls sorgfältig geglättete Gegenplatte, 50 mm Ø aus verschiedenen Werkstoffen aufgelegt. Diese Versuchsplatte ist gelenkig an dem Waagebalken einer Gewichtswaage (Dezimalwaage) aufgehängt und an mehreren Punkten so gefaßt, daß die Waagenbelastung gleichmäßig angreift. Zur Einleitung des Versuches wird zunächst die Versuchsplatte von einem in einer Schneide gelenkig angreifenden, durch Hebel übersetzten Gewicht angedrückt und dadurch die Zugkraft der Waage ausgeschaltet. Bewegt man dabei die Versuchsplatte etwa 1 Min. lang leicht hin und her, so spürt man, daß sie sich immer schwerer bewegt und schließlich nahezu ruckweise festsetzt, so daß sie nur noch mit Gewalt verschoben werden kann. Es ist dann der "Kontakt" zwischen den Metallplatten und dem Schmierfilm hergestellt. Es wird dann das Belastungsgewicht schnell abgehoben und die Zugkraft der mit einem bestimmten Gewicht belasteten Waage auf die Versuchsplatte freigegeben. Es vergeht jedesmal eine gewisse Zeit, bis die obere Platte abreißt; diese Zeit, die je nach der Belastung bzw. Art des Schmierstoffes mehrere Minuten bis zu vielen Stunden dauern kann, wird gemessen, ebenso die wirkende Zugkraft.

Diese AbreiBversuche ergeben, trotz der Einfachheit der behelfsmäßigen Einrichtung, bei hundertfacher Wiederholung stets ein überraschend gleichmäßiges Ergebnis. Bedeutet σ kg/cm² die auf die Flächeneinheit der abgerissenen Platte bezogene Zugbelastung, t_A die bis zur Lösung verstreichende Zeit in s, so ist stets (Bild 2)

$$\sigma \cdot t_A = \text{Const.} \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] = \eta_z$$

oder $t_A = f(\sigma) = \text{Const.} / \sigma$; d.h. t_A über σ aufgetragen (Bild 2) verläuft immer mit großer Genauigkeit nach einer gleichseitigen Hyperbel, wenn man σ ändert (durch Veränderung der Waagenbelastung) und die übrigen Versuchsbedingungen (Ölart, Temperatur, Werkstoff der AbreiBplatte) nicht ändert.

Die dabei gefundene Konstante hat die Dimension der "Zähigkeit" [kg·s / cm²].

Dieses wichtige, grundlegende Ergebnis gestattet, das Versuchsgerät nach vielerlei Richtungen hin zu verwerten. Es sind bisher damit untersucht worden:

1. Die Größe der Konstanten bei der Paarung verschiedener Werkstoffe mit dem gleichen Schmierstoff.
2. Dieselbe Größe bei gleichen Werkstoffen, aber verschiedenen Schmierstoffen.
3. Der Einfluß der Temperatur.
4. Der Einfluß der vorher aufgetragenen Druckbelastung.
5. Der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit.

Die hier ausschlaggebende Konstante soll in folgenden immer mit η_z als "Zeitfestigkeit" oder "AbreiBfähigkeit" bezeichnet werden. Sie stellt, wie die Versuche ergeben, eine der durch Viskosimeter gemessenen Zähigkeit äquivalente Größe dar; das Gerät selbst einen neuartigen Zähigkeitsmesser von großer Einfachheit.

In einzelnen ergaben die Versuche in großen Zügen bisher folgende Erkenntnisse.

2. Paarung verschiedener Werkstoffe mit gleichem Schmieröl

Aus den Versuchen seien folgende Beispiele angeführt. Es wurden Platten von je 50 mm² abgerissen aus folgenden Werkstoffen:

Nr.	Werkstoff	Art
1	Weißmetall	WM 80 normal
2	Rotguß	unbekannt
3	Lautal	Ver. Al-Werke A.G.
4	Kunstharz Nr. 1	Dekorit P (Raschig) füllstoff-freies Gießharz
5	desgl. Nr. 3	Gerohlit (Rümmler) Textilfüllung regellos
6	desgl. Nr. 4	Gerohlex (Rümmler) Textilgewebe grob
7	desgl. Nr. 6	Z ₁ B (Nowack) formgepreßt
8	desgl. Nr. 8	Gerohlex (Rümmler) feines Gewebe

In Bild 3 sind z.B. die gemessenen Werte von η_z über der Belastung für die Rotgußplatte aufgetragen; die Streuung ist ersichtlich nicht groß, trotz der zunächst sehr behelfsmäßigen Versuchsanordnung. In Bild 4 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Sie zeigen zunächst, daß jedem Werkstoff gegenüber der gleichbleibenden Grundplatte eine andere Konstante η_z zugeordnet ist. Temperaturunterschiede haben einen starken Einfluß.

In diesem Versuchsergebnis steckt aber außer den Paarungseigenschaften der verschiedenen Werkstoffe zweifellos noch ein Einfluß des Oberflächenzustandes, d.h. der mikrogeometrischen Rauigkeit. Allgemein wurden alle Platten mit dem gleichen Schmirgelleinen feinsten Körnung abgezogen; das ist aber an sich noch kein Beweis für einen genau gleichmäßigen Rauigkeitszustand. Wurde eine bestimmte Platte nachher mit einem größeren Schmirgelleinen bearbeitet, so ergab sich sogleich eine erhebliche Verminderung des Wertes der AbreiBfähigkeit. Da keine Instrumente zur genauen Messung des Oberflächenzustandes zur Verfügung standen, sind bei der

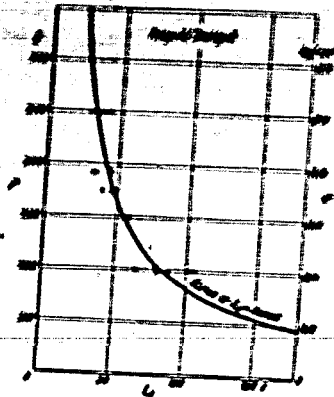


Bild 2.



Bild 3. Rotguß / Stahlguß.

Fa. Carl Zeiss - Jena Versuchsplatten mit genau im Lichtschnittverfahren gemessenen Rauheitsgrad in Auftrag gegeben, die zur Eichung verwandt werden sollen.

Die Klärung dieser Frage ist wichtig, wenn der Einfluß verschiedener Paarungen exakt bestimmt werden soll. Es ist anzunehmen, daß die Zahl der senkrecht zur Oberfläche verankerten Molekülketten von der mehr oder weniger großen Glätte der Oberfläche stark abhängt und damit auch der Abreißwiderstand. Die Frage, ob eine mehr amorphe Oberfläche (Beilby-Schicht) oder eine mehr kristalline die größere Haftfähigkeit besitzt, ist in der physikalisch-chemischen Forschung noch stark umstritten. Die hier beschriebene Versuchsmethode wird es voraussichtlich gestatten, diesen Aufgaben mit Erfolg nachzugehen. Oberflächenbeschaffenheit und Metallstruktur werden aber kaum voneinander zu trennen sein, da bei den in Frage kommenden Bearbeitungsverfahren die erstere immer eine Funktion der letzteren sein wird.

Aus der Darstellung in Bild 2, in dem die Zugspannungen über der Abreißzeit aufgetragen sind, ergeben sich aber noch weitere Schlussfolgerungen. Nach dem Verlauf der Hyperbelkurve sind die Spannungen um so größer, je kürzer die Abreißzeiten sind; für die Zeit 0 wäre theoretisch $\sigma_z = \infty$. Diese Spannungen müssen

aber aus Gleichgewichtsgründen ebenso auf die Werkstoff-Oberfläche wie auf den Ölfilm wirken. Mit anderen Worten: Wenn kurze Abreißzeiten kinematisch zwangsläufig festgelegt sind, können so hohe Abreißspannungen auftreten, daß durch sie, insbesondere bei häufiger Wiederholung, Ermüdungsbrüche an den Oberflächenteilen auftreten und zur Zerstörung der Oberfläche führen können. Solche Gelegenheiten liegen z.B. bei Zahnflanken im Teilkreis vor, in dem reine Wälzbewegung auftritt, bei Rollkurven und ähnlichen Fällen. Man hätte hier eine neuartige, aber keineswegs unwahrscheinliche Erklärung für das Auftreten der sog. Fittings, das, wie schon mehrfach vermutet, an das Vorhandensein einer Schmierschicht gebunden ist. Manche Korrosions-Erscheinungen lassen sich vielleicht auf solche Ursachen zurückführen. Da der Kontakt nur im Zusammenhang mit einem vorherigen Andrücken der Flächen eintritt, läge hier also eine Zug-Druck-Wechselbeanspruchung des Werkstoffs vor, der spröde, kristalline Werkstoffe leichter erliegen als hochelastische bzw. plastische.

3. Paarung der gleichen Abreißplatte mit verschiedenen Schmierölen

Mit einer aus St. 38 hergestellten, kreisrunden und sorgfältig geglätteten Abreißplatte von 50 mm ϕ wurden folgende Schmieröle auf die η_z -Werte untersucht:

Tabelle I der untersuchten Schmiermittel (Öltabelle)

Lfd. Nr.	Bez. im Forsch.-Ber.	Lieferfirma und Firmenbezeichnung	Zustand des Schmiermittels bei Zimmertemperatur
1	Öl A	Rhenania Ossag B G 8	Klares, gelbes Öl mit geringer Viskosität
2	Öl B	I.G.Farbenind. Öl I	Klares, schwarzbraunes Öl von geringer Viskosität
3	Öl C	I.G.Farbenind. Öl II	Klares, rotbraunes Öl von geringer Viskosität
4	Öl D	I.G.Farbenind. Öl III	Trübes, gelbbraunes Öl, welches größere Viskosität als die Öle A, B und C besitzt
5	Öl E	I.G.Farbenind. Öl IV	Klares, honiggelbes Öl. Zähigkeit noch größer als bei Öl D
6	Öl F	I.G.Farbenind. Öl V	Klares, gelbbraunes Öl von sehr großer Zähigkeit und leimartigem Verhalten (große Klebwirkung). Das Öl läßt sich zu langen Fäden ausziehen.
7	Öl F ₁	I.G.Farbenind. Öl VI	Aussehen und Verhalten ähnelt dem Öl F. Die Viskosität liegt bei Öl F ₁ jedoch noch bedeutend höher.

Das Öl A ist das im Laboratorium stets benutzte Einheitsöl BC 8 der Rhenania-Ossag, dessen Zähigkeits-Temperaturkurve wiederholt durch Viskosimeter bestimmt wurde (Bild 5). Trägt man die gemessenen Werte der Abreißfähigkeit η_z über der Temperatur auf, so ergibt sich Bild 6. Die Äquivalenz zwischen den beiden

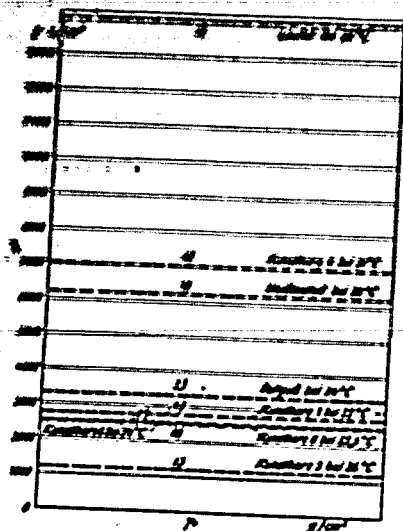


Bild 4. Zeitfestigkeiten η_Z für verschiedenes Material. Öl BO 8.

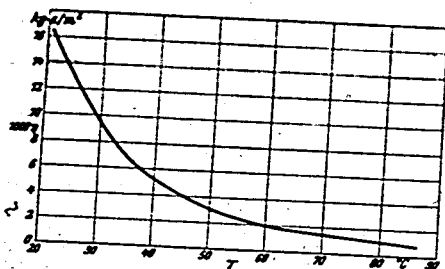


Bild 5.

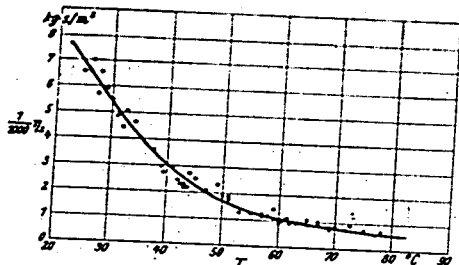


Bild 6.

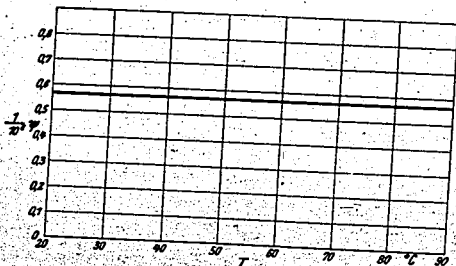


Bild 7.

Darstellungen springt in die Augen. Bildet man einen Bezugsfaktor $\psi = \frac{\eta_z}{\eta}$ und trägt diesen über der Temperatur auf (Bild 7), so erhält man eine Gerade parallel zur Temperaturachse, d.h. ψ ist unabhängig von der Temperatur und stellt den bei einem bestimmten Öl konstanten Umrechnungsfaktor dar, mit dem man aus der η -Kurve die η_z -Kurve ermitteln kann. Mit anderen Worten: der Faktor ψ ist lediglich ein Maßstab-Faktor; man kann, wie das s.B. im Bild 8 für das Öl A geschehen ist, ein und dieselbe Zähigkeits-Kurve in beiden Maßstäben auftragen.

Die Lage der durch die η_z -Messungen gefundenen Punkte, die sehr schön mit den alten Viskositäts-Messungen übereinstimmen, liefert den Beweis, daß der hier beschriebene Apparat einen richtig arbeitenden Zähigkeitsmesser darstellt. Zum Vergleich ist in Bild 9 die gleiche Darstellung noch einmal für das Öl V gebracht, für das die η -Kurve vom Öllaboratorium der I.G. Farben A.-G., Ammoniakwerk Morseburg, Leiter Dr. Zorn, zur Verfügung gestellt wurde. Die Genauigkeit der Abreißmethode geht daraus eindeutig hervor. Welche Vorteile sich daraus ganz allgemein für künftige Zähigkeits-Messungen ergeben werden, läßt sich zunächst noch gar nicht übersehen. Man braucht nur an die Schwierigkeit der Viskosimeter-Messungen bei tiefen und sehr hohen Temperaturen zu denken!

In Bild 10 sind die η -Werte für 22° den ψ -Werten gegenübergestellt, und zwar für die Öle, auf Öl A als Einheit bezogen. Es ergibt sich daraus die wiederum neuartige Erkenntnis, daß bei Ölen verschiedener chemischer Struktur die ψ -Werte, d.h. die η_z -Werte keineswegs in demselben Verhältnis zueinander zu stehen brauchen wie die η -Werte. Es gilt zwar für jedes Öl ein bestimmter konstanter Umrechnungsfaktor ψ zwischen η und η_z , aber für jedes Öl ein anderer. Diese Tatsache beweist eindeutig, daß mit dem üblichen, auf Fließversuchen in Kapillaren bestimmten η -Wert keineswegs die das Öl eindeutig charakterisierende physikalische Größe umschrieben wird, sondern noch andere, in der molekularen Struktur begründete wirken müssen. Sonst müßte der Verlauf des η -Vergleiches die gleiche Gesetzmäßigkeit aufweisen wie der der η_z -Vergleiche.

Die ψ -Werte der untersuchten Öle verlaufen nach folgender Tabelle

Öl	A	B	C	D	E	F	F'
ψ	0,568	1,63	1,00	1,36	1,54	13,5	9,75 · 10 ⁶

oder nach der Größe von ψ geordnet:

Öl	A	C	D	E	B	F'	F
ψ	0,568	1,00	1,36	1,54	1,63	9,75	13,5

Die dimensionslose Zahl ψ soll zunächst als "Gütefaktor" angewendet werden. Ordnet man die Öle nach ihrem η -Wert bei 30°, so ergibt sich folgende Skala:

Öl	A	C	B	D	E	F	F'
----	---	---	---	---	---	---	----

Die Reihenfolge ist also eine andere als die der ψ -Werte. Die gleiche Skala ergibt sich auch für η bei 50°. Die relativen

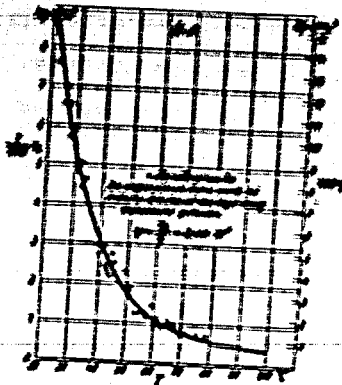


Bild 8. Öl A.

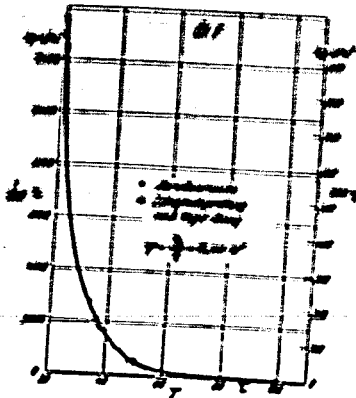


Bild 9.

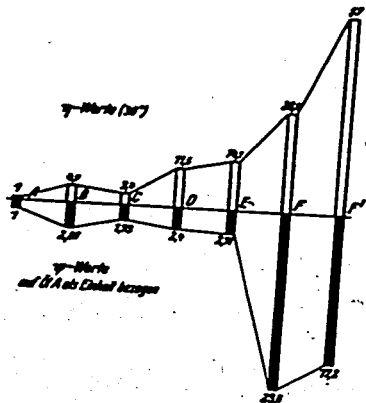


Bild 10. Auf Öl A als Einheit bezogen.

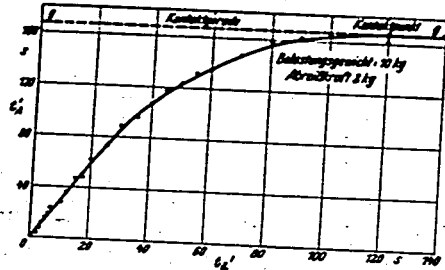


Bild 11.

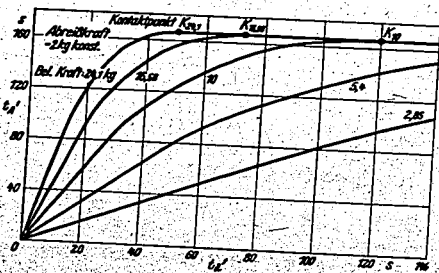


Bild 12.

Werte, auf Öl A als Einheit bezogen, verschieben sich aber etwas untereinander, da ja jedem Öl eine andere Funktion $\eta = f(T)$ zugeordnet ist. Ob zwischen den γ - und η -Werten $\eta = f(\gamma)$ jedenfalls verwickeltere Gesetzmäßigkeit besteht, ist vorerst nicht zu erkennen. Da beide Größen η_s und η , damit also auch der γ -Wert, aber jedenfalls auf den molekularen Aufbau der Öle zurückzuführen sind, kann nur von daher ihr innerer Zusammenhang erklärt werden. Auf die Skala der γ -Werte wird nachher noch zurückzukommen sein.

4. Einfluß der Temperatur

Wie schon im vorigen Abschnitt erwähnt, wird die Abreißfähigkeit η_s von der Temperatur der Ölschicht im gleichen Sinne beeinflusst wie die im Viskosimeter gemessene Zähigkeit η ; mit wachsender Temperatur nimmt sie ab. Das Gesetz $\sigma \cdot t_d = \eta_s = \text{Const.}$ bleibt für jede Temperatur gültig, und zwar immer so, daß für je-
des Öl der Wert $\gamma = \eta_s / \eta$ konstant und temperatur-unabhängig bleibt.

5. Einfluß der Druck-Vorbelastung

Bei den Abreißversuchen stellte sich heraus, daß die Messungen um so gleichmäßiger ausfielen, je länger die Druckvorbelastung zur Erzielung des endgültigen "Kontaktes" vorgenommen wurde. Ebenso, wie beim Abreißen der Vorgang zeitgebunden war, ist auch anzunehmen, daß die Annäherung beim Andrücken zeitgebunden ist und daher bei verschiedener Andrückzeit auch verschiedene Abreißzeiten deutlich, in dem die Abreißzeiten t_d' über den Andrückzeiten t_d aufgetragen sind. Es wurde das Öl B der Tabelle I mit einer Stahlplatte bei einer Temperatur von 21° und 10 kg Anpreßdruck abgerissen. Das Bild beweist, daß die Kurve der Abreißzeiten nach einer gewissen Andrückzeit in den Beharrungszustand übergeht, nach dieser also der endgültige Kontakt erreicht wird. Je nach der Größe der Andrückbelastung geschieht dies früher oder später (Bild 12). Über den Kontaktpunkt hinausgehende Zeiten sind praktisch ohne Einfluß auf den Abreißvorgang.

Trägt man die verschiedenen Abreißzeiten zugeordneten Andrückzeiten t_d' über der Andrück-Belastung P_d' (kg) auf, so ergeben sich lauter Hyperbelkurven (Bild 13). Man kann also genau wie bei den Abreißversuchen eine "Andrück-Zähigkeit" η_d' aus dem Gesetz $\sigma_d \cdot t_d' = \text{Const.} = \eta_d'$ bestimmen, die für jede Belastung einen konstanten Wert liefert (Bild 14). Daraus ist zu schließen, daß die innermolekularen Vorgänge beim Andrücken der gleichen Gesetzmäßigkeit unterliegen wie beim Abreißen, der "Werkstoff" Öl in diesen dünnen Schichten also bei Zug- und Druckbeanspruchung das gleiche Verhalten zeigt. Die Werte η_d' und η_s sind aber - bei gleicher Temperatur von 21° - zahlenmäßig nicht gleich, wie Bild 15 zeigt. (Man beachte die Maßstäbe!) Die η_d' -Werte sind stets größer als η_s ; sie wachsen schneller und konvergieren auf einen Wert ω bei gleichbleibendem Wert η_s .

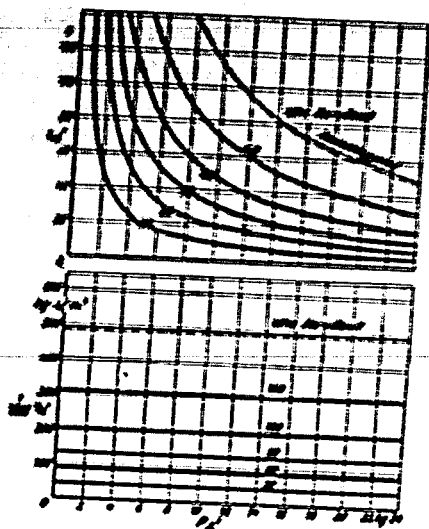
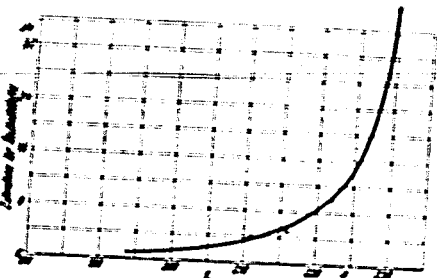


Bild 13 u. 14.

Bild 15



Bild 16. Stetigkeit des Abreißens. Öl I, St 37.11 / Stg



Es wäre natürlich von größtem Interesse, die Abreiß- oder Andrück-Kräfte auch in Beziehung zu setzen zu der in den einzelnen Art Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufzustellen. Genaue Messungen des Abstandes der Platten sind aber bei der geringen Größe (etwa 2μ und darunter) sehr schwierig. Eine behelfsmäßige Messung mit einem Orthotest ergibt ungefähr das Bild 16.

In diesem ist die Zunahme des Platten-Abstandes über der Zeit aufgetragen und scheint eine parabolische Funktion zu ergeben. Die Versuche sollen später mit verfeinerten Meßeinrichtungen erweitert werden. Es wäre von großer Bedeutung, ob sich dabei Analogien zu den Kriechversuchen an Metallstäben, namentlich im Bereich höherer Temperaturen herausstellen, die eine Stützung der u.a. von Debye vorgetragenen Anschauungen über die quasi-kristalline Struktur der zähen Flüssigkeiten ergeben würden.

6. Einfluß des Oberflächen-Zustandes

Es wurde schon im Abschnitt 1 darauf hingewiesen, daß die Abreißkraft mit zunehmender Rauigkeit der Oberfläche abnimmt. Genaue Messungen darüber konnten noch nicht durchgeführt werden. Welche Methoden dazu bis heute zur Verfügung stehen, ist am vollständigsten bei Schmalz [7] nachzulesen. Optische Abbildungen lassen sich, z.B. mit dem Lichtschnitt-Verfahren, nur noch für solche mikrogeometrischen Unebenheiten einigermaßen scharf anfer-

tigen, die etwa um 2μ heraustreten. Ob die neuerdings von amerikanischer Seite für den sog. "Superfinish" entwickelten Geräte, die nach einer Art von Festverfahren arbeiten, wirklich Unebenheiten unter 1μ festzustellen gestatten, konnte nicht nachgeprüft werden. Bisher hat sich in Deutschland nicht gezeigt, daß die leicht Formänderungen unterworfenen und sie verursachenden Taal-Lichtschnitt-Verfahren. Alle diese Verfahren geben immer nur das Bild eines schmalen Streifens wieder; nur bei sehr gleichmäßiger Verteilung der Unebenheiten könnte man dadurch Rückschlüsse auf die Gesamtläche ziehen. Versuche in der Richtung sollen unternommen werden. Wirklich genaue Einsicht in die Oberflächen-Struktur wird man wohl nur durch die Elektronen-Optik gewinnen können. Daran wird in den Instituten für physikalische Chemie gearbeitet; insbesondere an der Frage, ob es quasi-amorphe Oberflächenzustände nach Art der Beilby-Schicht gibt, wie sie Finch [8] und andere Forscher festgestellt zu haben glauben und ob diese für die Haftwirkung der Schmierstoffe von Bedeutung sind.

Immerhin gestatten die hier vorgeführten Versuchsmethoden, bereits für technische Zwecke vergleichsweise Messungen durchzuführen. Es ergeht daher an die interessierten Stellen die Anfordderung, bei Bedarf Probeplatten, nach verschiedenen Bearbeitungsverfahren hergestellt, einzusenden, um die Abreißfähigkeit mit einem Eichöl oder bei bestimmten Schmierstoffen feststellen zu lassen. Daß zwischen dieser Messung und dem praktischen Schmierzustand Beziehungen bestehen, soll an dem Beispiel des folgenden Abschnitts gezeigt werden.

II. Untersuchung der Schmierfähigkeit verschiedener Schmierstoffe an Zahnradgetrieben

Die Schmierfähigkeit irgend eines Schmierstoffes muß sich bei der geschmierten Bewegung zwischen zylindrischen Wälz- oder Gleitflächen auf die an diesen auftretenden Reibungskräfte auswirken, sofern es gelingt, sie unmittelbar zu messen. Bei dem kontinuierlichen Gleitzustand eines Lagers ist das verhältnismäßig leicht möglich. An laufenden Zahnradern ist das zum ersten Male mit großer Annäherung an die wirklichen Verhältnisse mittels der im Laboratorium des Verfassers entwickelten Versuchseinrichtung gelungen, über die G. Dietrich [8] berichtet hat. Bereits auf S. 23 u.f. dieser Arbeit ist das Verhalten verschiedener Schmierstoffe an einem bestimmten Räderpaar untersucht worden, das sich dadurch auszeichnete, daß infolge von Teilungsfehlern eine Zahnflanke verhältnismäßig lange allein trägt und daher die Größe des auftretenden Reibungsausschlages tangential zur Zahnflanke zuverlässig abzugreifen gestattet. Ein entsprechendes Oszillogramm ist in Bild 17 wiedergegeben (Nr. 26 der Arbeit Dietrich).

Auf Grund der dabei bereits erzielten Ergebnisse wurden die Versuche nunmehr auf eine größere Zahl von Schmierstoffen ausgedehnt, die als Getriebe-Öle bzw. Fette für den Anwendungsfall bei Zahnradern besonders in Frage kommen. Bekanntlich sind die verschiedenen Ölfirmer stark darum bemüht, hochdruckfeste Öle bzw.

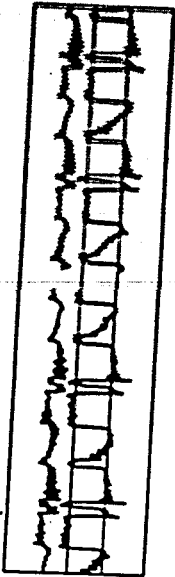


Bild 17. Oszillogramm 26. Reibungskraft von relativer Gleitgeschwindigkeit der Flanken bei geringer Öl-zähigkeit ($\approx 10^{\circ} E$) praktisch unabhängig. Reibungs- und Normalkraftverlauf. Räderpaar 1/23. Drehzahl 75 U/min. Öl F. Temperatur $80^{\circ} C$.

Fette herzustellen, die den Anforderungen an Zahnradgetriebe besser als bisher entsprechen und namentlich einen stärkeren Schutz gegen vorseitigen Verschleiß gewährleisten.

Die hier untersuchten Stoffe sind in der Tabelle II zusammengestellt, sie bestehen aus einer Gruppe reiner Öle *) und einer Gruppe von konsistenten Fetten. Das erste Öl ist das im Laboratorium stets verwendete Normalöl BC 8 der Rhenania-Ossag. Die Öle B bis F wurden von Öl-Forschungs-Laboratorium der I.G. Farben-Industrie A.-G., Ammoniakwerk Merseburg, Leiter Dr. Zorn, freundlichst zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um eine Reihe von hochmolekularen Kohlenwasserstoff-Ölgruppen, die nach besonderen Gesichtspunkten dort entwickelt wurden und z.T. sehr hohe Viskositäten aufweisen. Die Fette sind Produkte der Rhenania-Ossag, wie üblich durch Verseifung hergestellt und handelsübliche Marken, die für Getriebezwecke besonders geeignet sein sollen. Beiden Firmen sei für ihre bereitwillige Unterstützung hierdurch gedankt.

1. Versuchsanordnung und Methode

Während bei Dietrich stets mit Tauchschmierung gearbeitet wurde, ist hier eine "dosierte" Schmierung nach folgendem Verfahren zur Anwendung gekommen: Eine bestimmte Menge Schmierstoff wurde auf die vorher sorgfältig gereinigten Versuchsräder mit dem Pinsel aufgestrichen, und zwar jeweils 1 cm^3 und 5 cm^3 . Sämtliche Zähne wurden mehrmals überpinselt, bis die betreffende Menge als gleichmäßig verteilt anzunehmen war. Dann wurden die Räder zunächst einige Male von Hand durchgedreht und nun in der aus der Dietrich'schen Arbeit bekannten Art angetrieben. Es wurden 2 Drehzahlen ($n = 100 \text{ min}^{-1}$ und $n = 500$) und zwei Belastungsgruppen (Drehmomente von 280 bzw. 120 cmkg entsprechend $N = 0,39$ bzw. $0,835 \text{ PS}$) angewendet. Die Versuchsräder entstammen der Z.F. Friedrichshafen, Räderpaar 1/23 mit Maag-Doppelschlichtschliff (vergl. [8]).

Das Laufbild wurde oszillographisch aufgenommen und dauernd beobachtet, bis sich gegenüber dem Anfangszustand deutliche Veränderungen, d.h. Reibungssprünge ergeben. Durch vorhergehende Versuche mit entfetteten trockenen Flanken konnte bereits nach wenigen Umdrehungen unter Last das Eintreten von Reiboxydation durch deutliche rostbraune

*) Die Öle sind die gleichen wie in Teil I.

II. Tabelle der untersuchten Schmiermittel

Lfd. Nr.	Bes. im Forsch.-Ber.	Lieferfirma und Firmenbezeichnung	Zustand des Schmiermittels bei Zimmertemperatur
1	Öl A	Rhenania Ossag B C 8	Klares, gelbes Öl mit geringer Viskosität
2	Öl B	I.G. Farbenind. Öl X	Klares, schwarzbraunes Öl von geringer Viskosität
3	Öl C	I.G. Farbenind. Öl II	Klares, rotbraunes Öl von geringer Viskosität
4	Öl D	I.G. Farbenind. Öl III	Trübes, gelbbraunes Öl, welches größere Viskosität als die Öle A, B und C besitzt
5	Öl E	I.G. Farbenind. Öl IV	Klares, honiggelbes Öl. Zähigkeit noch größer als bei Öl D.
6	Öl F	I.G. Farbenind. Öl V	Klares, gelbbraunes Öl von sehr großer Zähigkeit und leimartigem Verhalten (große Klebwirkung). Das Öl läßt sich zu langen Fäden ausziehen.
7	Öl F ₁	I.G. Farbenind. Öl VI	Aussehen und Verhalten ähnelt dem Öl F. Die Viskosität liegt bei Öl F ₁ jedoch noch bedeutend höher.
8	Fett G	Rhenania Ossag Shell Ambroleum	Schwarzes Fett von mittlerer Konsistenz. Besondere Eigenschaft: Es haftet sehr schlecht an blanken Metallflächen. Der innere Verband der Fetteilchen ist sehr gut. Man kann das Fett zu dünnen Häuten auseinanderziehen.
9	Fett H	Rhenania Ossag Shell-Hochdruck-Schmierfett roh	Rotes Fett von mittlerer Konsistenz. Fett läßt sich gut auf Zahnflanken aufstreichen. Der innere Verband ist locker. Man kann das Fett nicht zu Fäden ausziehen.
10	Fett J	Rhenania Ossag Shell Fett FD 16 von Shell Mex	Subtil riech., schwarzes Fett von ger. Konsistenz. Schon bei Zimmertemp. zeigen sich flüssige Bestandteile. Der innere Verband gleicht etwa Fett B
11	Fett K	Rhenania Ossag	Hellbraunes, "trockenes" Fett von größerer Konsistenz. Es zieht ger. Fäden u. läßt sich besser als Fett G, aber schlechter als Fett H u. J auf die Flanken aufstreichen.

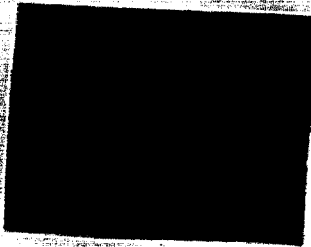


Bild 18 a

Streifen festgestellt werden. Bemerkenswerterweise bleibt die Teilkreiszone davon frei, wie Bild 18 deutlich erkennen lässt; die Reiboxydation scheint also nur in Verbindung mit Gleitreibung aufzutreten.

Im Oszillogramm markiert sich das Einsetzen von Reiboxydation, d.h. trockener Reibung, sehr deutlich durch das Auftreten von starken Ausschlägen (Reibsprüngen). Lässt man die, wie oben angegeben, mit dosierter Menge eingefetteten Räder eine gewisse Anzahl Minuten laufen, so kann man zwei charakteristische Laufzeiten bestimmen, nämlich

- a) bis zum Auftreten der ersten Reibsprünge (Ro_1 -Punkt),
- b) bis zum Auftreten der Reibsprünge an nahezu sämtlichen Flanken (Ro_2 -Punkt).

Da immer gewisse Bearbeitungsunterschiede minimaler Größe an den einzelnen Flanken vorhanden sind, zeigen sich die Reiboxydations-Merkmale sowohl im Oszillogramm, wie auch deutlich sichtbar, an den Flanken selbst zunächst nur an einzelnen Zähnen, dann überall. Wie deutlich an den Flanken, ist aus Bild 18 zu erkennen. Es handelt sich nur um eine hauchdünne Schicht, die leicht abzuwischen ist.



Bild 18 b

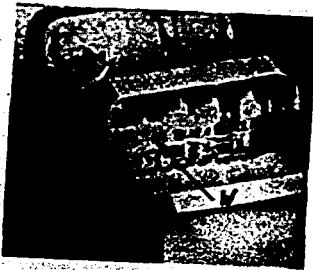


Bild 18 c

2. Versuchsergebnisse

Im folgenden sind die Ergebnisse einer solchen Versuchsreihe zusammengestellt, und zwar für die Dosierung von 1 cm^3 und eine Drehzahl von $n = 100$ bzw. $n = 500$ und entsprechender Leistung nach S.14. In den Bildern 19, 20 sind sie graphisch veranschaulicht. Das Ergebnis ist sehr bemerkenswert. Es zeigt sich eine ausgesprochene Güteskala der Arbeitsfähigkeit der einzelnen Schmierstoffe, besonders deutlich in den Ro_2 -Punkten (untere Säulen), vor allem gekennzeichnet durch die große Minderwertigkeit der verseiften Fette gegenüber den reinen C-H-Ölen. Da bis zum Eintreten der ersten bzw. allseitigen Reibsprünge in Bild 21 - 24 wiederergebenen Oszillogramme. Bild 21 gibt das Reibungsdiagramm bei Tauchschmierung, also ständiger Ölerneuerung wieder, Bild 22 nach 2 Minuten Laufzeit. Ein Unterschied ist nicht erkennbar. Die ersten Reibsprünge (Ro_1 -Punkt) erscheinen in Bild 23 nach 20 Minuten, die allgemeine Reiboxydation (große Ausschläge!) in Bild 24 nach 33 Minuten. Die Laufbilder sind mit dem Einheitsöl A aufgenommen.

Wie schnell sich dagegen die verseiften Fette infolge der mit dem Zahneingriff verbundenen Walkarbeit verbrauchen, zeigen die Laufbilder Bild 25 - 27. Die anfänglich vorhandene Glättung

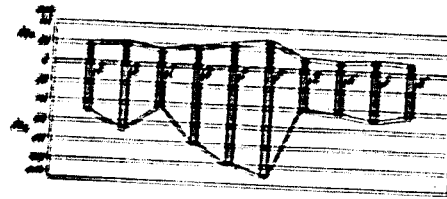


Bild 19.
 $n = 100.$

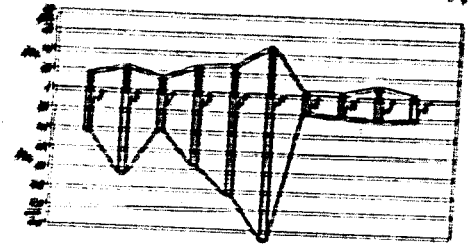


Bild 20.
 $n = 500.$

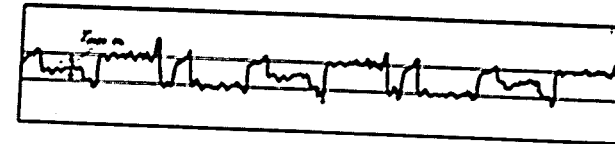


Bild 21. Laufbild bei Tauchschmierung.

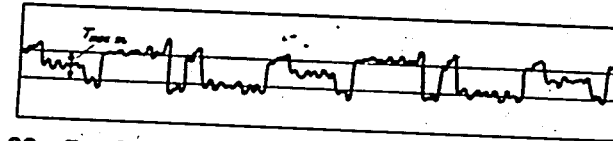


Bild 22. Laufbild bei 1 cm³ Dosierungsschmierung.
Laufzeit: 2 Min.

Laufbilder bei Ölschmierung

Schmiermittel: Öl A
Drehzahl $n = 100 \text{ U/min}$
Getriebeleistung $N = 0,39 \text{ PS}$

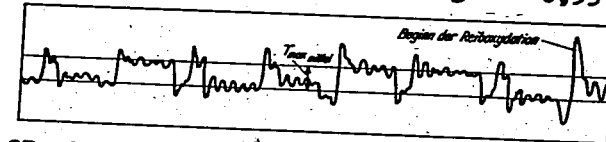


Bild 23. Beginn der Reiboxydation (Ro_1 -Punkt)
Laufzeit: 20 Min.

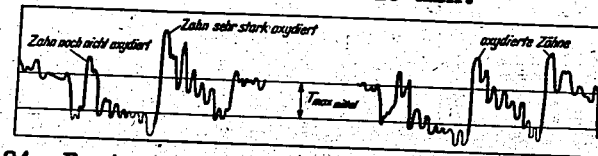


Bild 24. Fortgeschrittene Reiboxydation. Laufzeit: 35 Min.

Laufbilder bei Ölschmierung

Schmiermittel: Öl A
Drehzahl $n = 100 \text{ U/min}$
Getriebeleistung $N = 0,39 \text{ PS}$

Laufbilder bei ruhiger Fettbedeckung.

Schmiermittel: Fett H
 Schmiermenge: 50 cm³
 Drehzahl n = 100 U/min
 Getriebeleistung N = 0,39 PS

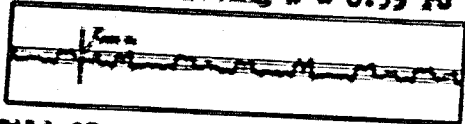


Bild 25. Aufnahme bei Laufbeginn

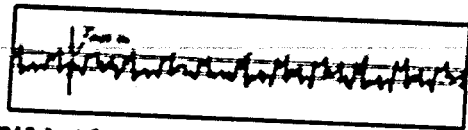


Bild 26. Aufnahme nach 1 min Laufzeit.

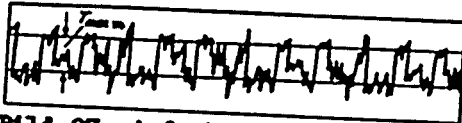


Bild 27. Aufnahme nach 3 min Laufzeit.

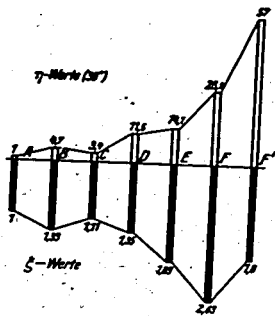


Bild 32.

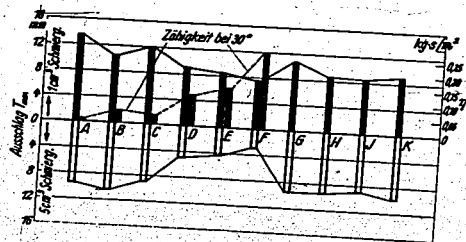


Bild 33.

Stärkende Wirkung des Öls P

Schmiermenge: 5 cm³
 Drehzahl n = 100 U/min
 Getriebeleistung N = 0,39 PS

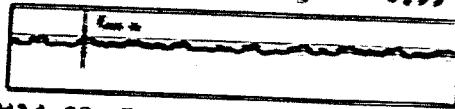


Bild 28. Laufzeit: 2 Minuten.



Bild 29. Laufzeit: 15 Minuten.

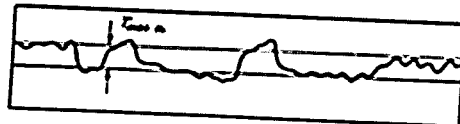


Bild 30. Laufzeit: 45 Minuten.

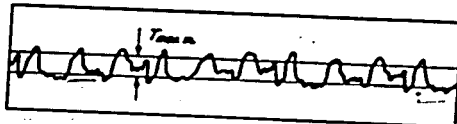


Bild 31. Schmiermittelmenge 1 cm³, Betriebsverhältnisse wie oben. Laufzeit: 2 min. (Die Aufnahme zeigt die Schwingungen in gedrängter Form.)

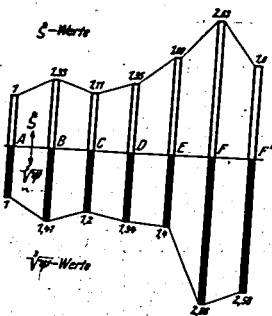


Bild 34.

der Reibschwingungen verliert sich schon nach einer Minute! Nach 3 Min. Laufzeit liegt bereits ein sehr unruhiges Reibungsbild mit starken Ausschlägen vor. Sehr beachtlich ist dagegen die stark glättende Wirkung des hochviskosen Öles P (Bild 28 - 30), die noch bei keinem Öl bisher in der gleichen Weise beobachtet wurde. Nach 15 bzw. 45 Min. Laufzeit sind die kleinen, aus der Oberflächen-Rauhigkeit der Zahnflanken herrührenden Oberschwingungen fast völlig geglättet. Nach 2 Min. sind sogar die kinematisch bedingten Grund-Ausschläge noch völlig unterdrückt. Die Räder laufen dabei völlig geräuschlos! Diese Laufbilder sind mit 5 cm³ Dosiermenge, also einer Schichtdicke von etwa 0,5 mm aufgenommen. Mit abnehmender Schichtdicke (1 cm³ = 0,1 mm Schichtdicke) zeigt sich die Glättung noch nach 2 Minuten (Bild 31).

Ordnet man die untersuchten Schmierstoffe nach ihrer Lebensdauer, vom Höchstwert angefangen, so ergibt sich die Reihenfolge:

Öle	P	E	B	D	C	A,
Fette	J	K	H	G.		

Nach der Zähigkeit η bei 22°:

Öle	P	E	D	B	C	A.
-----	---	---	---	---	---	----

(Die Fette sind fortgelassen, da eine vergleichbare Zähigkeitsmessung bei ihnen nicht möglich ist.) Die Zähigkeitsfolge der Öle entspricht also nur im allgemeinen der Güteskala, nicht aber z.B. in der Folge B, D, C bzw. D, B, C. Das gegenseitige Verhältnis dieser Werte wird deutlich, wenn man in Bild 32 sowohl die Zähigkeiten wie die Lebensdauer-Zeiten auf die Werte des Öles A als Einheit umrechnet und so ihre relativen Größen, auf Öl A bezogen, gegenüberstellt. Danach unterscheiden sich z.B. die relativen η -Werte von Öl D, C und B zahlenmäßig sehr beträchtlich, dagegen die ξ -Werte (relative Lebensdauer-Zeiten, bezogen auf Öl A) nur geringfügig. Daraus wird wieder deutlich, daß die Zähigkeit für die Arbeitsfähigkeit der Öle nicht allein ausschlaggebend ist. Besonders auffallend tritt dieser Umstand in Erscheinung, wenn man die bei den einzelnen Ölen tatsächlich auftretende Größe der Reibungskraft tangential zur Zahnflanke unter gleichartigen Versuchsbedingungen aus den Oszillogrammen entnimmt. Dazu wurden mit n = 100 min⁻¹ und jeweils 1 bzw. 5 cm³ dosierten Ölmenge nach je 2 Min. Laufzeit Oszillogramme aufgenommen (Bild 21 und 22) und aus diesen die Werte des maximalen durchschnittlichen Reibungsausschlages abgegriffen (s. oben Bild 17). Im Diagramm Bild 33 sind die Ergebnisse dargestellt. Es zeigt sich, daß die zähflüssigen Öle den kleinsten, die dünnflüssigen den größten Ausschlag ergeben. Nach den üblichen Anschauungen der hydrodynamischen Theorie müßte es gerade umgekehrt sein, die Reibung also mit der Zähigkeit wachsen. Man spricht hier wohl von einer Art "Dämpfung" der Reibungsausschläge durch die größere Zähigkeit. Da aber die kinematischen Bewegungsverhältnisse nicht geändert werden, kann man sich unter diesem Begriff physikalisch nichts vorstellen. Lediglich die innere molekulare Struktur der Schmierstoffe kommt hier zur Wirkung. Je dünnflüssiger das Öl, desto enger wird der Spalt und desto stärker treten die Grenzwirkungen in Erscheinung.

Ähnliche Beobachtungen sind übrigens bereits in der Arbeit Dietrich [8] enthalten (S. 25), wo festgestellt wurde, daß mit wachsender Temperatur die Reibungszahlen zunehmen.

Die Geräuschminderung der stoffweigeren Öle ist dementsprechend; mit dem Öl γ laufen die Räder nahezu geräuschlos. Damit ist der in der Dietrich'schen Arbeit nachgewiesene Zusammenhang zwischen Reibungs-Anschlag und Geräuschbildung wiederum bestätigt. Zum Schluss soll noch der Zusammenhang zwischen der im ersten Teil des Berichtes ermittelten relativen Abreiß-Fähigkeit (γ -Werte) und den ξ -Werten (relative Lebensdauer) untersucht werden. Die Annahme liegt nahe, daß zwischen beiden ein Zusammenhang besteht, da nach der hier vertretenen Anschauung beide auf die gleichen, im Bereich der Grenzreibung vorliegenden molekularen Zustände zurückzuführen sind. Eine exakte Gesetzmäßigkeit ist natürlich nur mit deren genauer Aufklärung möglich. Aus verschiedenen rechnerischen Annahmen hat sich eine Beziehung der ξ -Werte (relative Lebensdauer) zur γ vorläufig ergeben. In Bild 34 sind die Werte für die verschiedenen Öle der γ gegenübergestellt. — Als qualitativer Vergleich ist die hier ersichtliche Gesetzmäßigkeit immerhin beachtenswert. Träfe sie grundsätzlich, d.h. quantitativ zu, so würde man durch einfache Messung der Abreißfähigkeit bzw. Lebensdauer der Öle unter den hier untersuchten Betriebsverhältnissen bei Zahnradgetrieben, d. h. ihre "S o h m i e r f ä h i g k e i t" gewonnen haben. Es sei daran erinnert, daß im I. Abschnitt des Berichtes der Wert $\gamma = \frac{2}{\xi}$ als eine für ein bestimmtes Öl bei allen Temperaturen gültige Konstante ermittelt wurde.

Zusammenfassung

Es wurde durch neuartige Versuchsmethoden festgestellt, daß auch durch technische Maßgrößen auf Grund molekular-physikalischer Überlegungen bisher unbekannte schmiertechnische Eigenschaften der Schmierstoffe bestimmt werden können. Als solche erweist sich einmal der Begriff der Abreiß-Zähigkeit und die zu seiner Bestimmung angewendete Abreiß-Methode als sehr fruchtbar, ferner bei Zahnradgetrieben im Lauf eine vergleichende Methode zur Ermittlung der Arbeitsfähigkeit bzw. Lebensdauer der verschiedenen Schmierstoffe. Beide Methoden stehen aller Wahrscheinlichkeit nach in einem inneren Zusammenhang und führen zu einer qualitativ vergleichbaren Deutung der Schmierfähigkeit.

Ob diese Ergebnisse auch auf andere, im Gebiet der Grenzreibung arbeitende Gleitflächen (Kolbenreibung, Gleitlager usw.) anwendbar sind, soll durch weitere Versuche geklärt werden.

Schriftumsverzeichnis

- [1] General Discussion on Lubrication and Lubricants. Instit. of Mech. Engineer, London 1937.
- [2] R. Voitländer, Mitt. des Hydr. Instituts der T.H. München 1939, Teil 3, S. 145.
- [3] Debye: "Die quasikristalline Struktur der Flüssigkeiten" in "Der feste Körper", Vorträge der Physikalischen Ges. Zürich. Leipzig 1938.
- [4] "Schmierung", Selbstverlag der Deutsch-Amerik. Petroleum-Gesellschaft 1938.
- [5] K. I. Wolf, "Molekularphysikalische Probleme der Schmierung", Z. VDI 1939, Bd. 83, S. 781.
- [6] H. Harms, H. Rössler u. K. I. Wolf, Über innere Reibung und innere Schmierung, Leipzig 1938, Akad. Verlagsgesellschaft.
- [7] G. Schmaltz: Technische Oberflächenkunde, Jul. Springer, Berlin 1939. Dasselbst zahlreiche Quellenangaben.
- [8] G. Dietrich: Reibungskräfte, Laufunruhe und Geräuschbildung an Zahnrädern. Deutsche Kraftfahrtforschung 1939, Heft 25.

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

SIF 4

000709

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 104/1941

Methoden zur Bestimmung
der technischen Schmierfähigkeit
von Schmierstoffen

Bericht aus dem
Laboratorium für Schmierforschung
an der Technischen Hochschule Dresden.

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

SIF 4

000709

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 104/1941

Methoden zur Bestimmung
der technischen Schmierfähigkeit
von Schmierstoffen

Bericht aus dem
Laboratorium für Schmierforschung
an der Technischen Hochschule Dresden.

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

000710

Deutsche Kraftfahrtforschung

In Auftrage des

Reichs-Vorkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 104/1941

Methoden zur Bestimmung
der technischen Schmierfähigkeit
von Schmierstoffen

Bericht aus dem
Laboratorium für Schmierforschung
an der Technischen Hochschule Dresden

Prof. Dr.-Ing. E. Heidebroek VDI

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Verschuß zu halten.

000711

Die Untersuchungen wurden zu einem erheblichen Teil mit Unterstützung des "Forschungsrates für das Kraftfahrwesen" beim Reichsverkehrsministerium durchgeführt. Für diese Unterstützung spreche ich auch an dieser Stelle meinen Dank aus.

Dresden, im Oktober 1941.

E. H e i d e b r o e k VDI

000712

Das Problem der exakten Bestimmung der mit "Schmierfähigkeit" bezeichneten Eigenschaften eines Öles oder Schmierstoffes anderer Art beschäftigt die Fachwelt in unso höherem Maße, je mehr es der chemischen Industrie gelingt, teils mit, teils ohne Verwendung naturgegebener Ölprodukte Schmierstoffe der verschiedensten Struktur, Zähigkeit, Beständigkeit usw. durch synthetischen Aufbau zu züchten und für bestimmte Anwendungsfälle besonders geeignet zu machen. Nachdem einmal die laboratoriummäßige und industrielle Möglichkeit dazu erkannt war, sich von der Vorherrschaft der natürlichen Ölvorkommen zu befreien und damit von dem Vorhandensein ihrer Erbeigenschaften, ergibt sich eine Fülle von neuen Stoffen, die zwar den allgemeinen physikalischen Eigenschaften an einen Schmierstoff entsprechen, deren Bewertung für die Brauchbarkeit im technischen Schmierprozeß aber erst noch festgestellt werden muß.

Ebenso groß ist die Fülle der physikalischen und chemischen Methoden, die geeignet sind, gewisse Eigenschaften herauszustellen bzw. zu entfernen, die sich nachweislich als wichtig erweisen. Darüber besteht ein so umfangreiches Schrifttum, daß eine Aufzählung auch nicht annähernd möglich ist. Die vollzählichste Übersicht darüber findet sich in dem zweibändigen Bericht der Institution of Mech. Engineers über die Schmierungs-Tagung in London 1937 (Lubricants and Lubrications). Hierzu sind inzwischen neuere, in Deutschland entwickelte Methoden getreten.

000712

Das Problem der exakten Bestimmung der mit "Schmierfähigkeit" bezeichneten Eigenschaften eines Oles oder Schmierstoffes anderer Art beschäftigt die Fachwelt in umso höherem Maße, je mehr es der chemischen Industrie gelingt, teils mit, teils ohne Verwendung naturgegebener Ölprodukte Schmierstoffe der verschiedensten Struktur, Zähigkeit, Beständigkeit usw. durch synthetischen Aufbau zu züchten und für bestimmte Anwendungsfälle besonders geeignet zu machen. Nachdem einmal die laboratoriummäßige und industrielle Möglichkeit dazu erkannt war, sich von der Vorherrschaft der natürlichen Ölvorkommen zu befreien und damit von dem Vorhandensein ihrer Erbeigenschaften, ergibt sich eine Fülle von neuen Stoffen, die zwar den allgemeinen physikalischen Eigenschaften an einen Schmierstoff entsprechen, deren Bewertung für die Brauchbarkeit im technischen Schmierprozeß aber erst noch festgestellt werden muß.

Ebenso groß ist die Fülle der physikalischen und chemischen Methoden, die geeignet sind, gewisse Eigenschaften herauszustellen bzw. zu entfernen, die sich nachweislich als wichtig erweisen. Darüber besteht ein so umfangreiches Schrifttum, daß eine Aufzählung auch nicht annähernd möglich ist. Die vollzählichste Übersicht darüber findet sich in dem zweibändigen Bericht der Institution of Mech. Engineers über die Schmierungs-Tagung in London 1937 (Lubricants and Lubrications). Hierzu sind inzwischen neuere, in Deutschland entwickelte Methoden getreten.

Mit allen diesen Verfahren werden zweifellos irgendwelche physikalischen Eigenschaften mehr oder weniger exakt gemessen; die Frage ist nur, wie weit die so gewonnenen Aussagen für den eigentlichen **t e c h n i s c h e n** Schmierereffekt Bedeutung haben oder auf ihn übertragbar sind.

I. Die technische Schmierfähigkeit.

Es darf nicht übersehen werden, daß Schmierung immer einen **t e c h n i s c h e n** Prozeß darstellt, der an die kinematischen, konstruktiven und technologischen Eigenheiten der davon betroffenen Maschinenteile und Apparate gebunden ist, gleichviel ob es sich um den winzigen Zapfen eines feinmechanischen Getriebes oder um die gewaltigen Wellen einer Großmaschine handelt. Immer handelt es sich ferner darum, Kräfte von einem bewegten auf einen ruhenden Maschinenteil durch die Schmier-schicht zu übertragen, d.h. um einen **Energie-Wanderungsvorgang**, der im Hinblick auf die geringen Mengen und Abmessungen des eigentlich tragenden Schmierfilms eine ganz außerordentliche Beanspruchung dieser kleinsten Elemente darstellt und daher zu stürmischen Reaktionen thermischer, chemischer oder sonstiger intermolekularer Art führen muß. Es stellt sich hier eine solche Fülle von schwierigen Problemen, die alle in den Begriff der "Schmierfähigkeit" einmünden, daß man, von der technischen Seite her gesehen, zunächst eine Ordnung der Fälle nach größeren Gebieten vornehmen muß, um in einer ersten Annäherung die am

meisten typischen zu erfassen, ohne daneben die Kleinarbeit an den Sondergebieten zu vernachlässigen. Die beiden am häufigsten vorkommenden Grundfälle sind einmal die **G l e i t r e i b u n g** im zylindrischen Zapfen oder ebenen Gleitflächen, andererseits die **Z ä h l r e i b u n g** an rollenden Zylinderflächen, mit oder ohne überlagerte Gleitreibung. Erstere sind ferner dadurch gekennzeichnet, daß sie vorwiegend kontinuierlichen Charakter haben, letztere durch einen solchen von ausgeprägt intermittierender, periodischer Art.

Greift man diese beiden Gebiete heraus, so überdeckt man damit den weitaus häufigsten Teil aller technischen Schmier-vorgänge; werden die Prüfmethode dann der konstruktiven Form dieser beiden Gebiete nach Möglichkeit angepaßt, so erfaßt man mit Sicherheit den wichtigsten Komplex der betrieblichen Vorfälle und - was besonders wichtig ist - die Art der dabei ins Gewicht fallenden **S t ö r u n g s v o r g ä n g e**.

Es darf nicht übersehen werden, daß alle diese und insbesondere die wichtigsten beiden Anwendungsgruppen nämlich stets mit bestimmten Strömungsformen verbunden erscheinen, also auch hydrodynamisch definiert werden müssen; vielmehr ist die Art der jeweils vorliegenden hydrodynamischen Beanspruchung von großer Bedeutung für die Tragfähigkeit und Grenzbelastung der Schmierflüssigkeiten. Dies gilt insbesondere für das Gebiet der sog. Flüssigkeitsreibung, aber auch bis in das Gebiet der Grenzreibung hinein, wenn auch hier noch andere Einflüsse hinzutreten.

Entfernt man sich also mit der gewählten Versuchsmethode zu weit von der im wirklichen Betriebe vorliegenden Strömungsart, so ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis nicht ohne weiteres gegeben. Dies ist der Grund, warum an sich interessante Verfahren wie z.B. die Vierkugelmethode nach Boerlage, die Versuche von Thoma-Voitländer, der P.T.R. von Vieweg und Kluge und viele andere Verfahren wohl interessante, nur für den betr. Apparat vergleichsfähige Ergebnisse liefern, aber eine allgemein brauchbare Bestimmung der **t e c h n i s c h e n** Schmierfähigkeit nicht gestatten. Sie sind vorerst nur für reine Forschungszwecke von Nutzen.

Die übliche Messung der Zähigkeit im Viskosimeter ist demgegenüber von weit größerer praktischer Bedeutung. Da diese in den hydrodynamischen Ansätzen die einzige dort vorkommende physikalische Größe darstellt, ist ihr Einfluß im Gebiet der hydrodynamischen Schwimmreibung, soweit deren Voraussetzungen erfüllt sind, bestimmend für die Schmierfähigkeit in diesem Strömungszustand. Leider wird aber dieser Faktor dadurch beeinträchtigt, daß die Zähigkeit nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Druck stark abhängig ist und die Einbeziehung dieser Anhängigkeiten in die Rechnung zu unüberwindlichen mathematischen Schwierigkeiten führt. Außerdem aber wird in sehr engen Spalten die hydrodynamische Druckbildung sehr stark überlagert durch Oberflächenwirkungen und Strukturänderungen im Ölfilm; Diese Zustände der **G r e n z r e i b u n g**, die an der Grenze

der Tragfähigkeit des Schmierstoffes und seiner molekularen Beständigkeit liegen, sind aber, wie neuere Forschungen gezeigt haben, für die Betriebssicherheit der Schmierung häufig geradezu entscheidend. Genau so, wie man bei der Festigkeitsuntersuchung metallischer Werkstoffe an die Belastungsgrenzen gehen muß, um ihre charakteristischen Eigenschaften zu erkennen, ist dies auch bei der Untersuchung der Tragfähigkeit eines Schmierfilms notwendig.

Die hydrodynamische Schmiertheorie lehrt, daß die Annäherung zwischen 2 aufeinander gleitenden oder wälzenden Flächen umso enger, die Filmdicke also umso kleiner wird, je größer die Belastung und je kleiner die relative Geschwindigkeit. Für jeden Film gibt es also bei gegebener Belastung eine untere "Grenzgeschwindigkeit", bei der er zusammenbricht, d.h. seine Tragfähigkeit aufhört. Diesen Zustand gilt es möglichst genau zu erfassen. Er liegt meistens weit im Gebiet der Grenzreibung, d.h. in derjenigen Phase des Schmiervorgangs, bei der noch kein metallischer Verschleiß, wohl aber vielfach schon eine Verfestigung des Ölfilms und eine strukturelle Änderung im Ordnungszustand der Moleküle auftritt. Hier zeigen sich, wie die zahlreichen Versuche ergeben, die charakteristischen Unterschiede sowohl der Schmierstoffe wie der angrenzenden Metallflächen besonders deutlich.

Von Bedeutung ist ferner die Art der **S c h m i e -**
g u n g zwischen den aufeinander gleitenden oder wälzenden

Flächen. Der zylindrische Zapfen im Gleitlager stellt das eine Extrem, die Zahnflanke und das Walager das andere dar. Bei letzteren können sehr hohe spezifische Pressungen nach Hertz bis zu $10000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ und darüber auftreten, die aber örtlich betrachtet, nur periodisch auftreten, während beim Gleitlager, wo die Pressungen $1000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ selten übersteigen, stets ein örtlicher Beharrungszustand eingeregelt werden kann.

II. Maschinen zur wirklichkeitsgetreuen Prüfung der Schmierfähigkeit.

Die vorausgegangenen Überlegungen haben dazu geführt, folgende Prüfmaschinen einzusetzen, nämlich

- 1) die Lagerprüfmaschine
- 2) das Zahnradprüfgerät.

Beide, ursprünglich zu anderen Aufgaben entwickelt, haben sich bei richtiger Anwendung als ausgezeichnete Geräte zur Untersuchung der Schmierfähigkeit im wirklichkeitsgetreuen technischen Bereich erwiesen.

1) Der Gleitlager-Versuch.

Als Lagerprüfmaschine kommt eine Bauart zur Anwendung, wie sie bereits in der Arbeit von N ü c k e r : "Über den Schmiervorgang im Gleitlager" (Forschungsheft 352) beschrieben ist, jedoch in einem kleineren Modell für Zapfen von 60 mm ϕ und 40 mm Breite (Bild 1). Die Versuchswelle ist zwecks größter

Steifigkeit dreimal gelagert; das Versuchslager ist in einen stabilen Stahlkörper eingebaut, auf den die Belastungen durch sorgfältig ausgeglichene Schneiden mittelst eines Hebelsystems mit Übersetzung 1:100 durch Gewichte übertragen werden; das Reibungsmoment an der Lagerschale wird durch unmittelbare Wägung an eine ebenfalls sorgfältig austarierten Reibungswaage gemessen. Die Maschine gestattet ohne schädliche Formänderungen Belastungen bis zu 300 kg/cm^2 , bezogen auf die Projektion der Zapfenfläche, und darüber, aufzubringen. Der Antrieb erfolgt über einen Leonard Umformer und ein Stufengetriebe, Bauart Flender, so daß der Drehzahlbereich in weiten Grenzen von etwa 0,05 m/sec bis ca. 9,5 m/sec veränderlich ist. Da die Grenzreibungswirkungen meist nicht weiter als bis ca. 3 m/sec reichen, kann der Übergang in das Gebiet der vollen Schwimmreibung noch weit erfaßt werden.

Der Schmierstoff wird durch eine Zahnradpumpe aus einem Behälter mit geregelter Temperatur unter Druck zugeführt und tritt in eine Öltasche (Längsnut) ein. Eintrittsdruck, Temperatur und Menge werden laufend gemessen; die maßgebende Temperatur durch ein Thermoelement, das in die Oberfläche der Lagerschale dicht vor dem Druckscheitel eingelassen ist, somit unmittelbar die Temperatur des Ölfilms angibt.

Die Versuche werden stets im Beharrungszustand gefahren nach vorausgegangener Einlaufzeit. Es werden je nach der Art des Lagerschalen-Werkstoffs verschiedene Belastungsstufen aufgelegt und bei konstanter Belastung mit wechselnden Zapfen-

geschwindigkeiten gefahren. In der Regel genügt es, mit einer oberen Zapfengeschwindigkeit von ca. 3,14 m/sec zu beginnen und dann die Geschwindigkeit bis auf den kleinsten erreichbaren Wert derselben herabzuregeln. Der Augenblick des Filmasammenbruchs kündigt sich deutlich durch das Blocken der Maschine und plötzliches Hochschnellen des Reibungsmomentes an. Voraus geht häufig schon ein sog. unsicheres Gebiet, in dem an der Reibungswaage Unruhe zu spüren ist. Mit genügender Vorsicht gelingt es aber, auch dieses Gebiet noch zu durchfahren und den Punkt der kleinsten, bei der vorliegenden Belastung noch gerade tragfähigen Filmdicke aufzunehmen.

Der Verlauf der Temperaturkurven liefert die Begrenzung nach oben, d.h. nach dem Gebiet höherer Geschwindigkeiten. Als obere Grenzbelastung, d.h. größte Tragfähigkeit wird diejenige angesehen, bei der der Temperaturanstieg noch innerhalb des gemessenen Geschwindigkeitsbereiches deutlich einem Beharungswert zustrebt, der noch unter der als zweckmäßig befundenen oberen Temperaturgrenze von 80° bleibt. Wird die Geschwindigkeit darüber hinaus noch gesteigert, so muß die Belastung ohnehin gesenkt werden, weil die Reibungsarbeit dann verhältnismäßig mit der Geschwindigkeit zunimmt.

Das Diagramm Bild 2 zeigt ein typisches Bild einer solchen Aufnahme, die mit einer Metall-Lagerschale einer bestimmten Legierung und dem Normalöl des Laboratoriums, Marke BC 8 der Rhenania-Ossag, gewonnen wurde. Der Eintrittsdruck des Öles

wurde mit 3,5 at. an der Pumpe konstant gehalten und 5 Belastungsstufen von 44,4 - 86,2 - 127,5 - 169 - 210 kg/cm², bezogen auf die Projektion der tragenden Schalenfläche, durchgemessen. Das Lagerpiel beträgt einheitlich 0,25 mm, auf den Durchmesser bezogen.

Bei der niedrigsten Belastung von 44 kg/cm² zeigt der Verlauf der μ -Kurve sehr schön den typischen Verlauf, der nach hydrodynamischen Gesetzen zu erwarten ist, nämlich Abstieg bis zu einem Umkehrpunkt, dann in der Grenzreibung steilen Anstieg bis zu einer kleinsten Endgeschwindigkeit von 0,08 m/sec. Erhöht man die Belastungen, so verflachen sich die μ -Kurven immer mehr; das Grenzreibungsgebiet dehnt sich immer weiter aus, und die Grenzgeschwindigkeiten werden immer größer; auch das unsichere Gebiet dehnt sich immer weiter aus; bei der Höchstlast von 210 kg/cm² so weit, daß hier die Verwendbarkeit der kleinen Geschwindigkeiten bereits fraglich wird.

Soll nun eine Gruppe von Ölen verglichen werden, so werden stets Temperatur am Eintritt, Öldruck und Lagerpiel genau konstant gehalten, nur die Öle werden gewechselt. Die Welle bleibt stets dieselbe; es wird streng darauf gehalten, daß kein Fressen, d.h. Verschleiß eintritt. Es wird stets die gleiche Lagerschale verwendet. Will man aber den Einfluß verschiedener Lagerschalen-Werkstoffe einbeziehen, so empfiehlt es sich, vielleicht zwei extrem verschiedene Arten zu wählen, also z.B. W.M.80 und Preßstoff-Lagerschalen.

Grundsätzlich ergibt jede Paarung von Öl und Lager-schalen-Werkstoff ein verschiedenes Diagramm; es läßt sich aber praktisch gar nicht durchführen, z.B. bei einer Gruppe von 8 Ölen diese mit der viel größeren Zahl von Lagerwerkstoffen zu kombinieren; man beschränkt sich daher zweckmäßig auf deren eine oder zwei. Wichtig ist auch die Messung des Öldurchflusses, der sog. "Ölschlupfigkeit" der Paarung. Die gemessenen Öl-mengen werden in einem besonderen Diagramm (vergl. Bild 2) aufgetragen; sie steigen etwa linear mit der Drehzahl und ergeben fast immer das charakteristische Bild, daß hochtragfähige Paarungen nur einen geringen Öldurchsatz, schlecht tragfähige dagegen einen großen Öldurchsatz aufweisen.

Die Ergebnisse der Versuche an einer Ölreihe werden in Zusammenstellungen ähnlich Bild 3 verglichen, und zwar sind hier die bei der geringsten erreichbaren Geschwindigkeit gemessenen μ -Werte, Öl-mengen und die Werte v_{min} selbst gegenübergestellt. Schon eine solche Gegenüberstellung ergibt höchst charakteristische Kennzeichen. In Bild 3 ist beispielsweise eine Gruppe von 8 Ölen ähnlicher Struktur, aber sehr verschiedener Zähigkeit verglichen, so, daß die leichtflüssigen links, die zähflüssigen mit steigender Zähigkeit nach rechts angeordnet sind.*) Man erkennt, daß die Mindestgeschwindigkeiten und die Öl-mengen mit wachsender Zähigkeit abnehmen, die Reibungszahlen μ aber relativ wenig abweichen. Hierbei ist zu beachten, daß es sich einmal um Messun-

*) Eine Kurve der Zähigkeiten findet sich in Bild 6.

gen in der Grenzreibung handelt, dann aber der zahlenmäßige Wert von μ nicht immer sehr genau zu bestimmen ist, weil bei der vorliegenden Bauart der Lagerprüfmaschine die Empfindlichkeit der auf Schneiden gelagerten Reibungswaage stark von der Belastung abhängt. Führt man aber eine Versuchsreihe bei gleicher Belastung durch, so kann man sehr wohl die μ -Werte untereinander vergleichen, ohne daß man den absoluten Zahlenwert zu irgendwelchen Rückschlüssen heranzieht. Hierauf ist besonders hinzuweisen, da häufig bei Versuchen und in der Rechnung der Zahlengröße von μ übertriebene Bedeutung zugemessen wird, die ihr bei der mangelnden Vergleichsfähigkeit der Meßapparaturen, aber auch praktisch gar nicht zukommt.

Schon die in Bild 3 enthaltene Gegenüberstellung zeitigt qualitative Vergleichswerte, aus denen man bei einiger Erfahrung die relativen Eigenschaften einer solchen Gruppe ohne weiteres entnehmen kann. Es lassen sich daraus aber auch quantitative Kennzahlen ermitteln.

Quantitative Öl-Kennziffern.

Geht man von der Annahme aus, daß die hydrodynamischen Gesetze der Reibungstheorie auch im Bereich der Grenzreibung gültig bleiben, sofern man nur die entsprechende, an den Meßpunkten herrschende Temperatur und die dadurch gegebene Zähigkeit in Rechnung stellt, so kann man die Weite des engsten Spaltes berechnen, der durch die Verlagerung des Zapfens ent-

steht, ebenso den Verlagerungswinkel α_0 . Ist f das Lagerpiel, so stehen beide durch die Gleichung

$$h_0 = f(1 - \cos \alpha_0)$$

in Beziehung. Bei den Grenzgesehwindigkeiten handelt es sich immer um sehr kleine Verlagerungswinkel; man muß dabei und bei der Berechnung des engsten Spaltes natürlich die Oberflächenrauigkeiten mikroskopischer Art vernachlässigen, ebenso, wenn der Meßpunkt bereits im ansteigenden Ast der u -Kurve liegt, die darin wahrscheinlich bereits zum Ausdruck kommende Struktur-Wandlung des Ölfilms in engsten Spalten, d.h. u.a. die Änderung der Zähigkeit mit dem Druck. Diese Einflüsse sind vorerst rechnerisch nicht erfassbar; es scheint aber auch nicht notwendig, wie das Ergebnis später zeigen wird.

In Tafel I sind für eine Versuchsreihe von 8 Ölen bestimmter Struktur die gemessenen Werte n_{\min} und die errechneten Werte α_0 und h_0 eingetragen (h_0 = Weite des engsten Spaltes), dazu die kinematischen Zähigkeiten γ bei 30° . Für die Berechnung von h_0 und α_0 sind jeweils die Zähigkeiten eingesetzt; die den bei n_{\min} gemessenen Temperaturen im Diagramm entsprechen.

Die Berechnung von α_0 bzw. h_0 erfolgt nach einer Beziehung

$$\alpha_0^3 \cos \alpha_0 = \frac{6\gamma R_1^2 \cdot U \cdot (I \text{ const})}{c^2 \cdot P/b}$$

worin c die Schmiegunszahl = $\frac{f}{2}$ und I das Integral einer geome-

trischen Funktion des Verlagerungswinkels bedeutet, das für den vorliegenden Bereich einen konstanten Wert annimmt. Statt des absoluten Spieles $c = \frac{f}{2}$ kann natürlich auch das relative Lagerpiel c/R eingeführt werden. Dieser Ansatz ist aus der von Verfasser im Heft 4 der "Forschung im Ingenieurwesen" 1935, S.161 u. ff. entwickelten Methode hervorgegangen und gestattet, mit einem verhältnismäßig geringen Rechenaufwand die Werte α_0 bzw. h_0 mit hinreichender Genauigkeit zu berechnen.

Grundsätzlich müßten kleinen Werten von n_{\min} auch kleine Werte von α_0 und h_0 entsprechen. In Wirklichkeit wachsen aber wegen der größeren γ -Werte in der Ölreihe beide Werte in der Richtung auf die hochviskosen Öle, es werden also größere Spaltweiten durch die größere Zähigkeit erzwungen. Hier ist z.B. in der leichteren Belastungsreihe für W.M.80 bei $p = 44,4$ die unterste Grenze der Filmtragfähigkeit noch nicht erreicht; meßtechnische Schwierigkeiten verhindern aber ein weiteres Herunterregeln der Geschwindigkeit bei dem vorliegenden Antriebsmechanismus.

Die Filmdicke erreicht auch bei $v = 0$ und $\alpha_0 = 0$ niemals den Wert 0, wie es die Theorie voraussetzt, sondern es bleibt immer eine endliche Filmdicke erhalten, namentlich bei hochmolekularen Stoffen von großer Kettenlänge.

Es läßt sich nunmehr die Tragfähigkeit des Ölfilms an der kritischen unteren Grenze durch die beiden Größen

h_0 = engste Spaltweite und

n_{\min} = kleinste erreichbare Drehzahl

so ausdrücken, daß sie h_0 direkt proportional, n_{\min} umgekehrt proportional, etwa nach der Formel

$$\text{Filmtragfähigkeit } F_t = \frac{\text{Const} \cdot h_0}{n_{\min}}$$

gesetzt wird, wobei die Konstante auch eine Meßgröße darstellt, die nur für den vorliegenden Apparat Gültigkeit hat. Setzt man z.B.

$$F_t = \frac{1000 \cdot h_0}{n_{\min}}$$

so kann man dadurch die relative Tragfähigkeit der Öle untereinander zum Ausdruck bringen bzw. sie auf ein Eichöl beziehen.

In Tafel II sind die entsprechenden F_t -Werte für die vorliegende Ölreihe zusammengestellt; eine graphische Übersicht gibt das Diagramm Bild 5.

Indessen kommt in dieser Kennzahl noch nicht die weiter oben erwähnte Tatsache zum Ausdruck, daß die bei den einzelnen Paarungen gemessenen Ölmengen, die durch das Lager bei sonst gleichmäßigen geometrischen Abmessungen fließen, stark verschieden sind und umso mehr abnehmen, je höher die Viskosität bzw. das Molekulargewicht ist. Es liegt also nahe, in die Kennziffer auch noch den spezifischen Öldurchsatz einzubeziehen.

Nachdem oben bereits der engste Spalt h_0 berechnet war, läßt sich durch eine einfache Umrechnung auch die Weite desjenigen Spaltes finden, in dem der Öldruck nach der Theorie sein Maximum erreicht und $\frac{dp}{dy} = 0$ wird. In diesem kann man eine reine laminare Parallelströmung voraussetzen, die an der Welle = U , d.h. der Umfangsgeschwindigkeit der Welle ist und nach der Lagerschale

hin linear auf 0 abfällt. Demnach ist hier die in den eigentlichen Tragespalt eingepreßte Ölmenge zu setzen:

$$Q^x = \frac{h_0^x \cdot U \cdot b}{2}$$

wenn h_0^x die Spaltweite im Druckscheitel und b die Lagerbreite bedeuten. Mit $h_0^x = 1,226 \cdot h_0$, $b = 4 \text{ cm}$, $U = \frac{6 \sqrt{n_{\min}}}{60} \text{ cm/sec} = 0,314 \cdot n_{\min}$ (Zapfenabmessungen 60 mm ϕ , 40 Breite) wird

$$Q^x = \frac{h_0^x \cdot 0,314 \cdot n_{\min} \cdot 4}{2} = 0,77 \cdot h_0 \cdot n_{\min}$$

Bezieht man nun die frühere Kennziffer F_t auf diese, im eigentlichen Sinne tragende Ölmenge und bildet den Ausdruck:

$$F_q = \frac{F_t}{Q^x}, \text{ so wird}$$

$$F_q = \frac{1000 \cdot h_0}{n_{\min} \cdot Q^x} = \frac{1000 \cdot h_0}{0,77 \cdot h_0 \cdot n_{\min}^2} = \frac{1300}{n_{\min}^2} = \frac{\text{Const}}{n_{\min}^2}$$

wenn man die Meßzahl 1000 beibehält.

Damit fällt der gerechnete Wert h_0 heraus und die neue Kennzahl

$$F_q = \frac{1300}{n_{\min}^2} \text{ bezieht sich nun nur noch auf die gemessene Größe}$$

n_{\min} ; sie ist ihrem Quadrat umgekehrt proportional. Sie drückt die auf den spezifischen Ölverbrauch reduzierte Tragfähigkeits-Kennziffer aus. Auch sie hat natürlich nur relative Bedeutung im Vergleich zu einem bestimmten Ausgangsöl. Ihr Aufbau ist aber außerordentlich einfach und sie beruht auf einem meßbaren Wert. Es erhellt daraus die Bedeutung, die der dem Filmzusammenbruch

unmittelbar vorausgehenden, eben noch erreichbaren Mindestdrehzahl für die Bedeutung der Tragfähigkeit des Öles sukzessive.

Sie ist daher auch unabhängig von der gesamten durch das Lager strömenden Ölmenge, die ja auch gemessen wird, aber wegen des dreidimensionalen Charakters der Strömung nur schwer rechnerisch zu den geometrischen Abmessungen in Beziehung zu bringen ist.

In Tafel III sind die so errechneten P_q -Werte zusammengestellt. Die mit einem Stern versehenen Werte zeigen an, daß bei den hier vorliegenden niederen Belastungen die Tragfähigkeit nicht ausgeschöpft werden konnte, weil es meist technisch nicht möglich war, die Grenzgeschwindigkeiten noch weiter herabzusetzen. Dagegen kommen bei W.M.80 und $p = 127 \text{ kg/cm}^2$ die Kennwerte voll zum Ausdruck.

In Tafel IV sind alle Werte für W.M.80, $p = 127,5$ und Kunstharz-Preßstoff mit $p = 52,5$ auf das Öl 2 als Eichöl bezogen; der Unterschied der Tragfähigkeit kommt hier noch deutlicher zum Ausdruck.

Daß die Werte bei der Paarung Weißmetall gegen Stahl anders ausfallen als bei der Paarung Kunstharz gegen Stahl, liegt an der grundsätzlich zu beachtenden Tatsache, daß jeder Lagerwerkstoff gegenüber der Welle eine andere "Affinität" besitzt, die sich nur molekular-physikalisch, aber nicht hydrodynamisch deuten läßt. Bei den Kunstharzwerkstoffen ist außerdem der Belastungshöhe infolge der schlechten Wärmeleitfähigkeit und Tempe-

ratur-Empfindlichkeit eine viel niedrigere Grenze gesetzt.

Wieviel höher z.B. die Ölschlüpfigkeit der Paarung Kunstharz - Stahl gegenüber Weißmetall - Stahl ausfällt, zeigt das Diagramm Bild 4. Bei Kunstharz mußte der Öldruck auf 1 at. gegenüber 3,5 at. bei Weißmetall verringert werden, um annähernd die gleichen Ölmenge bei gleichem Spiel und gleicher Temperatur zu erzielen. Da die im eigentlichen, tragenden Spalt, also zwischen h_0 und h_0^x durchgepumpten Ölmenge nur einen kleinen Bruchteil der gesamten Ölmenge ausmachen, die durch das Lager überhaupt fließt, kann man annehmen, daß der Gesamt-Durchsatz etwa der Wurzel aus dem Eintritts-Druck proportional ist. Reduziert man demnach die Ölmenge für W.M.80 durch 3,5 bei $p = 44,4$, so ergibt sich die untere Kurve der Q_{\min} , die zeigt, wie stark die Ölschlüpfigkeit der beiden Paarungen verschieden ist. Das gilt für alle Ölarten, aber ebenso auch für andere Metall-Legierungen als W.M.80. Diese bei zahlreichen Versuchen immer wieder beobachtete Tatsache ist hydrodynamisch nicht zu erklären. Sie hat mit großer Wahrscheinlichkeit ihren Grund darin, daß die beim Einpumpen in den engen Spalt unter Druck bewirkten Orientierungsvorgänge der Ölmoleküle viel weiter reichen und sich auswirken, als etwa der Einfluß der Grenzflächenkräfte (Haftkräfte) selbst, deren Wirkung - wenigstens in freier Strömung - bisher immer nur auf 1 bis 2 Moleküllängen reichend angenommen wurde.

Zusammengefaßt läßt sich sagen: die hier entwickelten Kennziffern F_t und F_q geben - als Vergleichswerte betrachtet -

ein getreues Abbild der Tragfähigkeit, gemessen an wirklichkeitsgetreuen und wirklichkeitsnahen Zuständen der Gleitreibung.

Trägt man die Werte F_i und F_q , unter entsprechender Angleichung der Maßstäbe, in einem Schaubild über den einzelnen Ölen auf (Diagr. Bild 5) und dazu die Zähigkeiten, so ergibt sich daß der Verlauf der Kennsiffern bei dieser Art Beanspruchung den Zähigkeitswerten mit großer Annäherung folgt. (Die Zähigkeitswerte sind für 30° , d.h. die stets gleiche Eintrittstemperatur eingesetzt; von dieser weichen die bei n_{\min} festgestellten Temperaturen nur wenig ab.)

Diese Übereinstimmung ist ein Beweis sowohl für die Richtigkeit der angestellten Messungen wie für die angewandte Methode; sie ist auch ein Beweis dafür, daß qualitativ die Gesetze der hydrodynamischen Strömungstheorie sich bis weit in das Gebiet der sog. Grenzreibung durchzusetzen scheinen, jedoch wie später gezeigt wird, nur für den Zustand der typischen Gleitlagerströmung und, was nicht übersehen werden darf, für die vorliegende Ölgruppe, die, abgesehen von dem Normalöl 2, gleichen strukturellen Aufbau, jedoch mit verschiedenen Molekulargewichten besitzt.

Auffallend ist dagegen, daß trotzdem die bei der Grenzgeschwindigkeit gemessenen μ -Werte nicht der Stufung der Zähigkeiten bzw. Molekulargewichte folgen, vielmehr wenig von einander abweichen (vergl. Diagr. B.3). Da der μ -Wert ein Ausdruck

für die innere Flüssigkeitsreibung, d.h. den inneren Gleitwiderstand der im Strömungsweg orientierten, zwischen den haftenden Grenzketten sich entlang schiebenden Molekülketten ist, besteht die Möglichkeit, ja Wahrscheinlichkeit, daß die untersuchte Gruppe in demjenigen physikalischen Effekt gleichartig ist, auf den die Größenordnung der inneren Reibung zurückzuführen ist, der aber nicht mit der Zähigkeit identisch zu sein braucht. Diese Möglichkeit besteht bei der vorliegenden Ölgruppe durchaus; da aber eine Untersuchung nach dieser Richtung zu noch wenig geklärten Problemen der Physikalischen Chemie führt, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Es wird aber anschließend gezeigt werden, daß es auch noch andere technische Meßmethoden gibt, mit denen andere spezifische Eigenschaften der Öle zu bestimmen sind, deren Kenntnis zur vollständigen Beurteilung der Schmierfähigkeit unter anderen Betriebszuständen geboten ist.

Für den Bereich der typischen Gleitlagerbelastung ist jedoch die Methode durchaus fruchtbar. Sie läßt sich ebensowohl auf den Vergleich verschiedener Metallpaarungen anwenden, was bereits mit Erfolg unter Beibehaltung immer des gleichen Öles geschehen ist und bei größeren Reihen bekannter Austauschwerkstoffe eine sehr schöne Übereinstimmung mit den Erfahrungen der Praxis ergeben hat. Hierüber wird später berichtet werden. Auch der Einfluß verschiedener Oberflächenzustände, Spaltweiten etc. läßt sich auf diese Weise verdeutlichen. Die Vielfältigkeit der

Kombinations-Möglichkeiten ist aber so groß, daß mit den s.Zt. vorhandenen wenigen Hilfskräften und Einrichtungen immer nur ein Teil der Probleme angefaßt werden kann.

Aus den vorstehend geschilderten Versuchen geht auch noch folgende Überlegung hervor. Bei vielen mehr physikalisch orientierten Apparaten zur Bestimmung der Schmierfähigkeit wird häufig eine Reibungsziffer μ als kennzeichnend für die Öleigenschaften festgestellt und als Vergleichswert benutzt. Diese Reibungsziffer μ stammt aus der alten Coulomb'schen Regel $R = P \cdot \mu$ oder $\mu = \frac{R}{P}$, wenn R die tangential wirkende Reibungskraft und P die dazu senkrechte äußere Last darstellt.

Nun läßt sich aber R in Wirklichkeit immer nur als das Integral der über den Reibungsspalt auftretenden, stark veränderlichen Schubspannungen, einmal an der bewegten, einmal an der ruhenden Fläche deuten, wobei diese beiden noch verschieden ausfallen. Dieses Integral bezieht sich aber auf eine verwickelte Funktion von der Form

$$R = \frac{F \cdot \eta \cdot U}{2 \cdot c} (f \varphi)$$

worin, wie eingangs angegeben, c den Schmiegungsfaktor und $f(\varphi)$ eine nicht einfache trigonometrische Funktion des den eigentlichen Schmierpalt umfassenden Winkels, d.h. dessen Ausdehnung bedeutet. Ändern sich diese Werte, so ändert sich auch jedesmal der Wert von R bzw. μ . Es ist also ein Unterschied, ob man etwa einen Gleitklotz oder eine Nadel gegen eine umlaufende ebene

Scheibe drückt oder 2 Zylinder achsparallel oder mit gekreuzten Achsen aufeinander wälzen läßt oder welche geometrischen Beziehungen sonst vorliegen. Jedemal entsteht ein anderer Wert von μ . Alle diese Werte, so exakt sie auch gemessen werden können, sind also niemals untereinander vergleichbar. Sie können daher auch keine gleichen Ergebnisse über die Öleigenschaften liefern, ganz abgesehen davon, daß auch die Grenzreibungs-Erscheinungen dabei sich verschieden äußern können.

Die Reibungsziffer μ darf also immer nur auf den jeweils vorliegenden Apparat bezogen werden, und es erhellt daraus deutlich die eingangs betonte Notwendigkeit, die Meßmethode strömungsmäßig möglichst genau den wirklichkeitsgetreuen, praktisch-technischen Verhältnissen anzupassen, erst, wenn die Schichtdicke auf etwa einmolekulare Größe absinkt, also den Charakter eines Epilamens annimmt, gewinnt der Reibungswert wieder einen der Coulomb'schen Regel entsprechenden konstanten Charakter [5].

2. Die Tragfähigkeit im Zahnradprüfgerät.

Im Laboratorium des Verfassers wurde schon vor einigen Jahren ein Prüfgerät entwickelt, das gestattet, an laufenden Zahnradern unter Belastung den Ablauf der Reibungskräfte tangential zur Zahnflanke und die senkrecht dazu wirkenden Kräfte im Oszillographen aufzunehmen und abzubilden. Darüber ist in Heft 25 [1] und 59 [2] der "Deutschen Kraftfahrtforschung" ausführlich

berichtet worden. Ursprünglich zur Untersuchung der allgemeinen Kraftwirkungen an Zahnflanken und der Gerkuschbildung entwickelt, erwies sich das Gerät sehr bald als ein ausgezeichnetes Mittel, nicht nur die Genauigkeit der Verzahnung, sondern auch die Wirkung verschiedenartiger Schmierstoffe zu prüfen. Hierauf hatte schon D i e t r i c h [1] hingewiesen und u.a. die bemerkenswerte Tatsache festgestellt, daß mit wachsender Zähigkeit die Reibungsausschläge abnehmen; im Gegensatz zu der verbreiteten Anschauung, daß sie mit s i n k e n d e r Zähigkeit abnehmen müßten. Diese Versuche wurden weiter ausgebaut durch Einbeziehung der dosierten Schmierung, worüber P i e t s c h [2] ausführlich berichtet hat. Verteilt man eine genau bemessene Schmierstoffmenge, in der Regel 1 bzw. 5 cm³, nach sorgfältiger Reinigung der Zahnflanken ganz gleichmäßig auf alle Zahnflanken, so kann man an dem Ablauf des Reibungsdiagrammes die im Laufe der Zeit eintretende "Abnutzung" des Schmierfilms zeitlich genau verfolgen. Im frisch geschmierten Zustand erhält man das gleiche Laufbild wie bei Tauchschmierung. Nach einer gewissen Zeit, d.h. eine entsprechenden Zahl von Lastwechseln zeigt das Oszillogramm an einzelnen, dann an allen Flanken starke unregelmäßige Reibungssprünge; diese machen sich außerdem durch das Auftreten von Reibrost an den Flanken bemerkbar. Da die so gemessenen Zeiten sich etwa zwischen 2 bis 60 Minuten bewegen, können sie hinreichend genau gemessen werden. Sie sind für jedes Öl charakteristisch und stellen gewissermaßen die "Dauerfestigkeit" des Ölfilms dar.

Die hier vorliegende Prüfung ist wiederum eine wirk-

lichkeitsgetreue, und zwar unter den der Zahnbelastung eigentlichen Verhältnissen. Sie umfaßt damit wiederum ein weites Gebiet der praktischen Schmierungstechnik, und zwar ein sehr wichtiges. Die Beanspruchung ist einmal eine periodische, insofern jeder Zahn nur in kurzen Intervallen im Eingriff steht. Die auftretenden Pressungen, auf der Grundlage der Hertz'schen Spannungen berechnet, nehmen sehr große Werte an (bis zu 10000 kg/cm²), müssen also in sehr engen Spalten, d.h. im ausgesprochenen Grenzreibungsgebiet vom Schmierfilm aufgenommen werden. Wieweit in diesen engen Spalten von molekularer Größenordnung die hydrodynamischen Gesetze noch gelten, ist unsicher; darüber hat schon P e p p l e r [3] in einer früheren Arbeit Untersuchungen angestellt.

Kinematisch sind nun die relativen Bewegungsverhältnisse zwischen den Zahnflanken dadurch interessant, daß der Gleitbewegung immer eine Wälzbewegung überlagert ist; im Teilkreis liegt sogar nur eine reine Rollbewegung vor. Über die eigenartige Form der Wälzbahnen gibt die Arbeit von P i e t s c h [2] S.14 ein deutliches Bild. Danach findet beim Abwälzen ständig ein Losreißen der mit hoher Pressung angedrückten Schmierschichten statt da der Lastangriffspunkt ständig weiter wandert. Hierbei wird die Schmierschicht also auf eine Art von "Zugfestigkeit" beansprucht, die sich zweifellos auf den molekularen Zusammenhang der Schicht anders auswirken als eine reine Gleitbewegung.

Setzt man nun für eine Ölreihe die so gemessenen Lebensdauerzeiten in Beziehung zu einem Einheitsöl, so ergeben die so gefundenen ξ -Werte eine neue Kennziffer, die für die hier vor-

liegende Art der Beanspruchung charakteristisch ist. Die Untersuchungen von P i e t s c h [2] haben bereits gezeigt, daß diese Werte quantitativ mit den η -Werten nicht mehr in Einklang zu bringen sind. Das wird bestätigt durch gleichartige Versuche an der neueren Ölreihe, die im ersten Teil bei Gleitlagerversuchen verwendet wurde. Zeigten dort die Kennziffern F_f bzw. F_q einen sehr deutlichen Zusammenhang mit der Zähigkeit, so zeigt die Gegenüberstellung der (absoluten) Lebensdauerwerte R_0 mit der Zähigkeit (Bild 6) ein ziemlich unabhängiges Verhalten. Nur die beiden letzten, hochviskosen Öle 7 und 8 zeigen bei stärkerer Dosierung einen deutlicheren Anstieg; dabei ist aber zu beachten, daß dieselben natürlich eine größere Klebfähigkeit besitzen und dadurch nicht so leicht von der Platte abgeschleudert werden können.

Ebenso ergeben die gemessenen Reibungsausschläge mit leicht fallender Tendenz ebensowenig eine Abhängigkeit von der Zähigkeit wie die des Vergleichs halber ebenfalls eingetragenen Werte μ bei n_{\min} der Gleitlagerversuche.

Hieraus ist zu folgern, daß mit dieser Versuchsmethode andere physikalische Eigenschaften der Prüföle betroffen werden als im Gleitversuch. Es kann also sehr wohl eine Ölgruppe bei Gleitbeanspruchung genau der Zähigkeit folgende Kennziffern ergeben, ohne daß sie die gleiche Bewertung bei der andersgearteten Beanspruchung im Abreißzustand ergibt, d.h. Rückschlüsse für die Tragfähigkeit im Zahnradgetriebe oder ähnlich liegenden Fällen zuläßt. Daraus, daß die hier vorliegenden Öle sich gegenüber der

Zahnflanken-Beanspruchung praktisch gleichartig verhalten, gegenüber der Gleitbeanspruchung aber gemäß ihrer Zähigkeits-Stufung, ist wiederum der Schluß erlaubt, daß sie einen gleichen strukturellen Effekt enthalten, der auf die Gleitbeanspruchung anspricht, auf die Walzbeanspruchung aber nicht, obwohl ihre Molekulargewichte und Zähigkeiten stark verschieden sind.

Daß die Zähigkeit bzw. die damit gleichlaufenden Kennziffern der Gleitbeanspruchung nicht die gleiche Bedeutung für die Tragfähigkeit im Abreißzustand haben, geht besonders deutlich aus folgender Gegenüberstellung hervor. Bei einer Dosierung von 1 cm^3 , 100 Umdreh./je Min. und 47 kg Zahnbelastung der gleichen Versuchsräder wurde ein Schmierstoff gänzlich anderer chemischer Struktur untersucht; dessen Zähigkeit etwa der des Öles 4 der Reihe entspricht (Schmierstoff X). Bei ihm betrug die Lebensdauerzeit R_0 55 Minuten gegenüber 13 des Öles 4, die Reibungsamplitude T_{\max} 3,5 mm gegenüber 13 mm bei Öl 4.

In Bild 6 ist der betr. Punkt für R_0 bzw. T_{\max} bei dem Öl gleicher Zähigkeit eingetragen; der Unterschied bei vollkommen gleichen Betriebsbedingungen springt in die Augen. Noch deutlicher wird derselbe, wenn man die Oszillogramme selbst ins Auge faßt. Bei sämtlichen Ölen der Reihe 1 - 8 fallen die Oszillogramme, von deren Wiedergabe hier abgesehen ist, völlig gleichartig aus, ähnlich den Oszillogrammen 4 und 5 S. 18 der Arbeit P i e t s c h [2]. Nur die maximalen Amplituden T_{\max} unterscheiden sich in dem im Bild 6 gekennzeichneten geringfügigen Ausmaß. Das Öl X dagegen

liefert ein Oszillogramm ähnlich Osz. 15 auf S. 20 der genannten Arbeit, mit kleinen Ausschlägen und Abdämpfung der Schwingungen. Dies ist ein Beweis dafür, daß bei diesem Stoff ein Struktur-Effekt vorliegt, der gestattet, die verhältnismäßig geringe Zähigkeit mit der hohen Dauerfestigkeit eines Öles, dessen Zähigkeit etwa 10-mal so hoch ist, zu vereinigen.

Es ist bisher kein anderes technisches Verfahren gefunden worden, das gestattet, solche Effekte deutlich zu machen, und es leuchtet ein, daß daraus für den strukturellen Aufbau neuer, namentlich synthetischer Öle wertvolle Fingerzeige gewonnen werden können, und zwar, wie immer wieder betont werden muß, unter betriebsgetreuen Verhältnissen. Der Gedanke, Zahnradgetriebe auch zur Ölprüfung zu benutzen, ist wohl schon mehrfach ausgenutzt u. a. von der Zahnradfabrik Friedrichshafen. Es handelt sich dabei aber immer um die Messung des Energie-Aufwandes ganzer Getriebegruppen. Dabei wird der eigentliche Schmiervorgang im tragenden Spalt an der Flanke aber stark überlagert von Planschwirkungen, Pumperscheinungen usw. Erst die Anwendung des Oszillographen gestattet, mit der hier verwandten Apparatur den eigentlichen Reibungsvorgang für sich herauszuschälen. Die Versuche stellen erst einen Anfang dar und können sicher noch verfeinert werden; insbesondere sollten sie auf höhere Belastungen und Drehzahlen ausgedehnt werden. Immerhin entspricht die hier aufgebrachte Belastung bei dem benutzten Räderpaar bereits einer Hertz'schen Pressung von ca. 3000 kg/cm^2 .

Die gleiche Methode gestattet übrigens auch sehr schön, den Grad der Verschlechterung der Schmierfähigkeit zu bestimmen, wie er etwa in der Wanne eines Brennkraftmotors durch Verdünnung mit Benzindämpfen eintreten kann. Im Diagramm Bild 7 sind ein normales Öl, etwa Öl 4 der Reihe 1 - 8 (obere Kurve) und ein anders aufgebauter Stoff (untere Kurve) neuer Art gegenübergestellt. Das Bild zeigt deutlich bei dem ersten Öl die starke Abhängigkeit vom Benzinzusatz, beim zweiten die fast völlige Unempfindlichkeit. Auch daraus können für die Ölsynthese wertvolle Richtlinien gewonnen werden.

III. Versuche nach der Abreißmethode.

Da die hier bisher geschilderten Versuche noch ziemlich zeitraubend sind und namentlich bei den Gleitlager-Versuchen immer größere Mengen von Öl benötigt werden, liegt der Wunsch nahe, einfache Schnellprüfungsmethoden zu finden, die gestatten, im Laboratoriums-Versuch zunächst anfallende kleine Mengen der großen Vielzahl von möglichen Stoff-Kombinationen schnell im Groben zu prüfen. Diesem Zweck dient die im Heft 2 der Forschung 1941 S. 74 beschriebene Methode [4]. Hierbei werden bekanntlich zwischen ebenen Platten die Prüföle nach vorherigem Andrücken (Kontaktzustand) durch Abreißen in senkrechter oder tangentialer Richtung auf Zug- bzw. Schubfestigkeit geprüft, indem bei gegebener Abreißspannung σ die Abreißzeit t gemessen wird. Hierbei ergab sich stets eine Gesetzmäßigkeit von der einfachen Form

$$\sigma_z \cdot t_z = \tau_z \text{ bzw. } \sigma_s \cdot t_s = \tau_s = \text{Const.}$$

Die sog. Abreißfähigkeit τ_z bzw. τ_s hat die Dimension der Zähigkeit ($\frac{\text{kg sec}}{\text{cm}^2}$) und stellt eine der im Viskosimeter gemessenen üblichen Zähigkeit äquivalente Größe dar. Bezieht man sie aber auf die kinematische Zähigkeit η und bildet die Quotienten $\psi_z = \frac{\tau_z}{\eta}$ bzw. $\psi_s = \frac{\tau_s}{\eta}$, so stellen diese eine für alle Temperaturen gleiche, dimensionslose Kennziffer dar, die für jedes Öl einen bestimmten Wert annimmt. Diese Werte stellen keine absolute physikalische Größe dar, da sie stark von der mikrogeometrischen Beschaffenheit der Platten-Oberflächen abhängen; sie können also auch vorerst bei gleichen Versuchsbedingungen nur als Vergleichswerte benutzt werden, namentlich auch in der Form, daß man ihren Quotienten $\gamma = \frac{\psi_z}{\psi_s}$ bildet, d.h. also das Verhältnis der Zugfestigkeit zur Scherfestigkeit bestimmt.

Die eigentliche physikalisch-chemische Bedeutung dieser Kennziffern unterliegt z.Zt. noch eingehenden Untersuchungen in einschlägigen Instituten, wobei insbesondere die Begriffe Haftfähigkeit, Oberflächenspannung und Kohäsionsdruck eine Rolle spielen, ebenso Orientierungs-Effekte.

Bei der hier wiederholten Ölreihe 1-8 liegen (mit Ausnahme des aus der Reihe fallenden Sichöles 2) bezeichnender Weise die ψ_z - und ψ_s -Werte praktisch auf fast gleicher Höhe, zeigen sich also unabhängig von der Viskositäts-Stufung, genau wie die Werte R_0 , μ_{\min} und T_{\max} .

Sehr interessante Zusammenhänge dieser Art ergeben sich bei folgendem Beispiel. Ein chemisch genau definierter Schmier-

stoff, der in Wasser löslich ist, also keine Emulsion bildet, wurde zunächst in der Lagerprüfmaschine auf seine Schmierfähigkeit untersucht und diese als ausgezeichnet befunden mit Kennziffern, die seiner Zähigkeitelage etwa entsprechen, allerdings auch hier schon etwas höher liegen.

Verdünt man nun den reinen Stoff in steigendem Verhältnis mit destilliertem Wasser, so ändern sich die im Zahnrad- bzw. Abreißversuch gewonnenen Kennwerte in der Art, wie es die folgenden Bilder zeigen. In Bild 8 sind einmal die Zähigkeiten bei 30° über dem volumetrischen Verdünnungsverhältnis aufgetragen, sodann die Werte ψ_z und ψ_s sowie deren Quotient $\gamma = \frac{\psi_z}{\psi_s}$ und zwar bezogen auf den reinen Stoff als Einheitswert (= 1 gesetzt). Man sieht, daß, während die Zähigkeit mit wachsendem Wasserzusatz stetig abnimmt, die ψ_z -Werte ($\psi_z = \frac{\tau_z}{\eta}$) und ebenfalls die ψ_s -Werte zunächst steil anwachsen, dann über einen gewissen Bereich konstant bleiben und dann mit deutlichen Knicken bei ca. 35% bzw. 50% Wasserzusatz wieder steil ansteigen. Da die ψ -Werte das Verhältnis der Abreißfähigkeit zur Viskosimeterzähigkeit η bedeuten, kommt darin im ersten Teil des Bereichs das Absinken von η zum Ausdruck, im mittleren und späteren Teil aber nicht mehr, da namentlich im Gebiet der Verdünnung von 35 bis 65% Vol.% Wasser die Zähigkeit nur noch geringfügig abnimmt.

Da nun jedes Mischungsverhältnis einen bestimmten definierten Schmierstoff für sich darstellt, erkennt man hieraus besonders deutlich, daß die Abreißfähigkeiten nicht eine einfache Funktion der viskosimetrischen Zähigkeit sein können, sondern

anderen, intermolekularen Effekten folgen.

Die gleichen Unstetigkeiten ergibt Bild 9, in dem die im Fahrradversuch gemessenen Lebensdauer-Zeiten K_0 in absoluten Werten über dem Mischungsgrad aufgetragen sind. Auch hier zeigen sich deutliche Knickpunkte bei 35 bzw. 50 % vol. Mischung.

In Bild 10 sind die Reibungsausschläge, die der mittleren Reibungsziffer entsprechen, für verschiedene Arten der Dosierung aufgetragen. Hier zeigt sich eine stetige Zunahme der Reibungswerte mit zunehmendem Wassergehalt, also *abnehmend* der Zähigkeit so deutlich, daß dadurch diese schon früher erwähnte Tatsache [1][2] hier noch einmal eine unzweideutige Bestätigung findet. Das ist wiederum ein Beweis dafür, daß bei der im Zahnradversuch vorliegenden Grenzreibung die hydrodynamischen Gültigkeiten sich umkehren; nebenbei bemerkt auch ein Beweis dafür, daß die Schmierstoffe hoher Zähigkeit im Zahnradbetrieb günstigere Reibungsverhältnisse ergeben als solche mit geringer, und zwar ganz abgesehen von der jeweiligen chemischen Struktur des Schmierstoffes.

Bei den gewöhnlichen naturgegebenen Ölen, deren chemische Zusammensetzung an sich schon außerordentlich verwickelt ist und durch Mischungen noch verwickelter wird, lassen sich solche vergleichenden Feststellungen schwer treffen; in Wasser sind sie nicht löslich und bilden Emulsionen. Dagegen gestattet das Verfahren der Zahnrad- und Abreißprüfung sehr wohl, bei der Schmierstoff-Synthese, wo es sich um definierte Abwandlungen in der chemischen Struktur handelt, schnell eine größere Reihe mit

verschiedenem, molekularem Aufbau untereinander zu vergleichen. Das wäre immerhin eine wesentliche Erleichterung in der Auswahl der großen Zahl von möglichen Kombinationen.

Zusammenfassung.

Der Zweck der vorstehenden Darlegungen war es nicht, zahlenmäßige Ergebnisse über die technische Schmierfähigkeit dieser oder jener Stoffe vorzulegen, sondern technische Methoden mit technischen Meßgrößen aufzuzeigen, mit denen derartige Werte unter solchen Versuchsbedingungen gewonnen werden können, die den wirklichen Verhältnissen eines technischen Schmiervorganges möglichst nahekommen. Dieser Zweck wurde bei den Lager- und Zahnradversuchen bereits in erheblichem Umfange erreicht; die ebenfalls herangezogenen Abreißversuche werden zur Ergänzung herangezogen, um gewisse strukturelle Eigenschaften der Schmierstoffe zu erkennen. Um sie unmittelbar auf den Schmiereffekt übertragen zu können, bedarf es noch eingehender physikalischer Grundlagenforschung; vorerst gibt ihre statistische Erfassung schon gewisse relative Vergleichsmöglichkeiten.

Eine - im physikalischen Sinne - exakte oder absolute Definition des Begriffes "Schmierfähigkeit" gibt es noch nicht und wird es wahrscheinlich nicht geben. Damit wäre der Technik auch an sich wenig geholfen, selbst wenn man sich im Verlauf der weiteren Forschung auf einen solchen Begriff quantitativer Art einigen sollte. Für die praktische Schmiertechnik wird eine Beziehung auf die besonderen Anforderungen der Anwendung immer notwendig bleiben. Hierin beruht die Besonderheit der vorstehenden beschriebenen Methoden.

Schriftumsverzeichnis:

- 1) G. Dietrich, Reibungskräfte, Laufunruhe und Geräuschbildung an Zahnrädern.
Deutsche Kraftfahrtforschung Heft 25, VDI-Verlag, Berlin, 1939.
- 2) E. Pietsch, Das Schmiermittel im Zahnradgetriebe unter besonderer Berücksichtigung der Grenzreibung.
Deutsche Kraftfahrtforschung Heft 59, VDI-Verlag, Berlin, 1941.
- 3) W. Peppler, Druckübertragung an geschmierten zylindrischen Gleit- und Wälzflächen.
VDI-Forschungsheft Nr. 391, VDI-Verlag, Berlin, 1938.
- 4) E. Heidebroek u. E. Pietsch, Untersuchungen über den Schmierzustand in der Grenzreibung.
Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 2, Bd. 12, 1941, S. 74.
- 5) R. Holm, Die technische Physik der elektrischen Kontakte.
Jul. Springer, Berlin 1941.

Tafel I.

Öl	1	2	3	4	5	6	7	8
WM 80 (p=44,4)								
n_{min} =	55	44	40	35	20	20	20	20
h_o =	1,63	1,68	1,36	1,96	2,07	2,38	4,64	6,4
α_o =	9°13'	9°26'	8°29'	10°9'	10°26'	11°12'	15°40'	18°20'
WM 80 (p=127,5)								
n_{min} =	435	130	240	135	80	50	30	20
h_o =	2,0	1,39	1,96	1,98	1,80	1,81	2,04	2,74
α_o =	10°20'	8°34'	10°10'	10°8'	9°45'	9°47'	10°20'	12°
Gerohlex (p=52,5)								
n_{min} =	275	150	175	90	55	35	20	20
h_o =	2,64	2,5	2,4	2,93	3,26	3,26	3,5	6,0
α_o =	12°40'	12°30'	12°10'	12°35'	13°	13°	13°30'	17°50'

Tafel II.

F_t - Werte:

Öl	1	2	3	4	5	6	7	8
WM 80 p=44,4	29,5	38	39	56	103	119	230	330
WM 80 p=127,5	4,6	10,7	8,15	14,7	22,5	35,5	68	137
Gerohlex p=52,5	9,6	16,6	13,7	32,6	59	93	175	300

Tafel III.

1) WM 80, $p = 44,4$

01	1	2	3	4	5	6	7	8
n_{\min}	55	44	40	35	20	20	20	20
n_{\min}^2	3025	1936	1600	1225	400	400	400	400
$F_q = \frac{1300}{n_{\min}^2}$	0,43	0,67	0,81	1,06	3,25	3,25 ⁺	3,25 ⁺	3,25 ⁺

2) WM 80, $p = 127,5$

01	1	2	3	4	5	6	7	8
n_{\min}	435	130	240	135	80	50	30	20
n_{\min}^2	189225	16900	57600	18225	6400	2500	900	400
$F_q = \frac{1300}{n_{\min}^2}$	0,0069	0,077	0,0225	0,071	0,203	0,517	1,44	3,23

3) Gerohlex, $p = 52,5$

01	1	2	3	4	5	6	7	8
n_{\min}	275	150	175	90	55	35	20	20
n_{\min}^2	75625	22500	30625	8100	3025	1225	400	400
$F_q = \frac{1300}{n_{\min}^2}$	0,017	0,0572	0,0423	0,16	0,397	1,05	3,23 ⁺	3,23 ⁺

(In der Gleichheit der letzten Werte ⁺) kommt zum Ausdruck, daß die wirklich geringste Drehzahl aus meßtechnischen Gründen nicht ausgeschöpft werden konnte.)

Tafel IV.

Relative Werte von F_q bezogen auf 01 $z = 1$

01	1	2	3	4	5	6	7	8
WM 80 $p = 44,4$	0,635	1	1,10	1,57	4,02 ⁺	4,02 ⁺	4,02 ⁺	4,02 ⁺
WM 80 $p = 127,5$	0,09	1	0,292	0,92	2,64	6,7	18,7	42
Gerohlex $p = 52,5$	0,297	1	0,74	2,8	6,95	18,4	56,7	56,7 ⁺

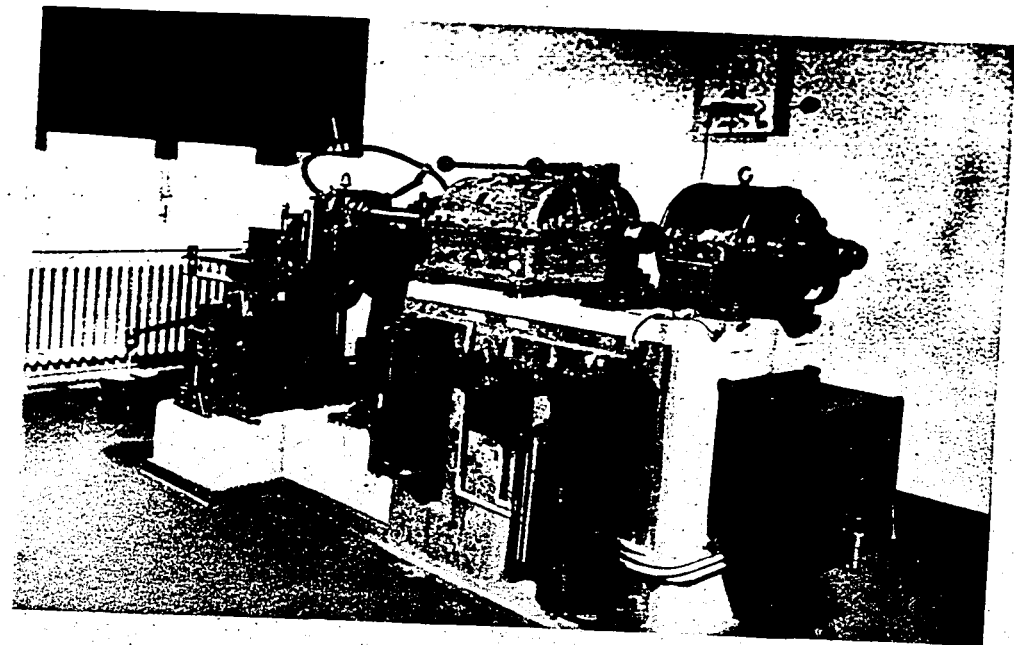


Bild 1. Lagerprüfmaschine Prof. Heidebroek

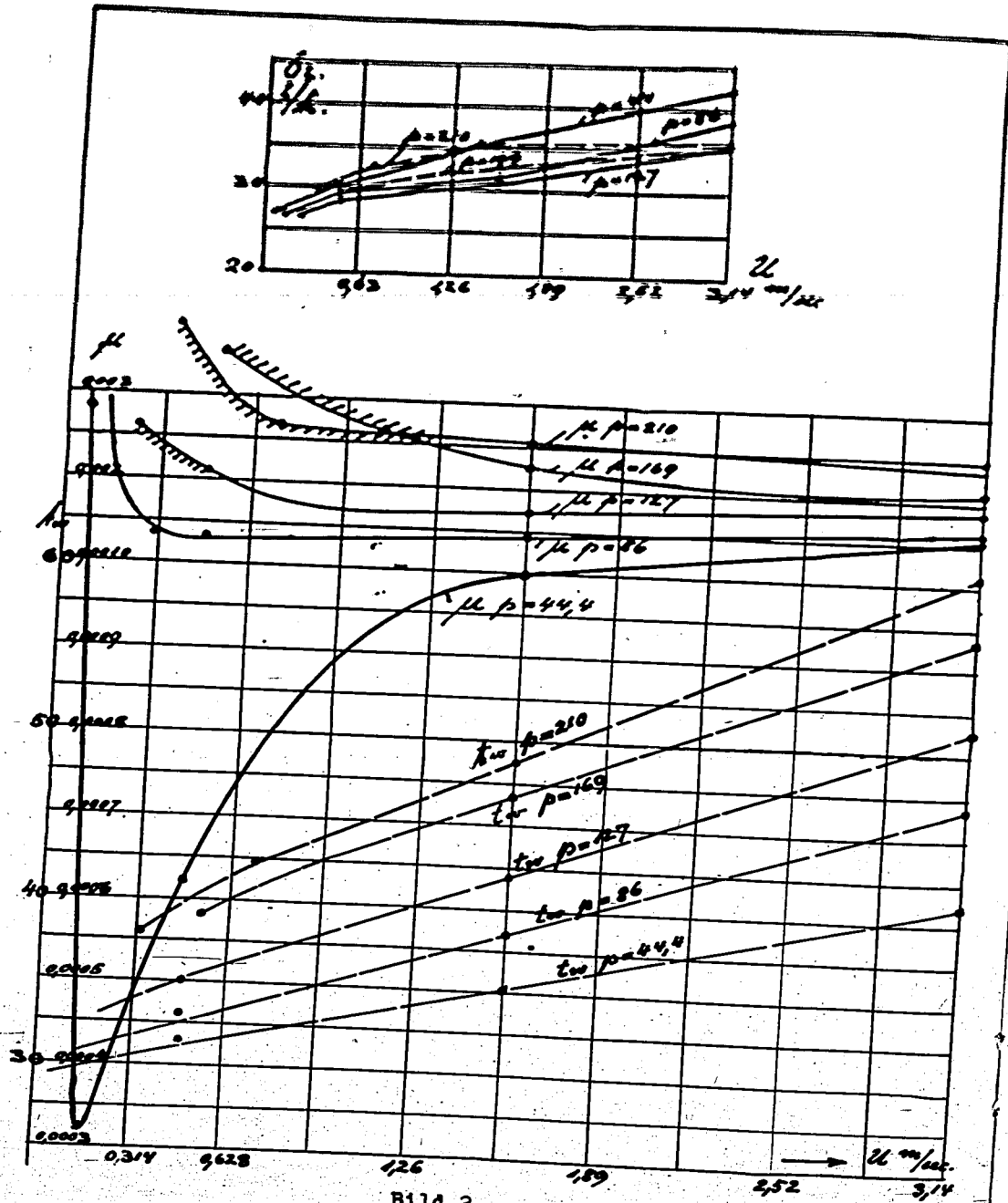


Bild 2.

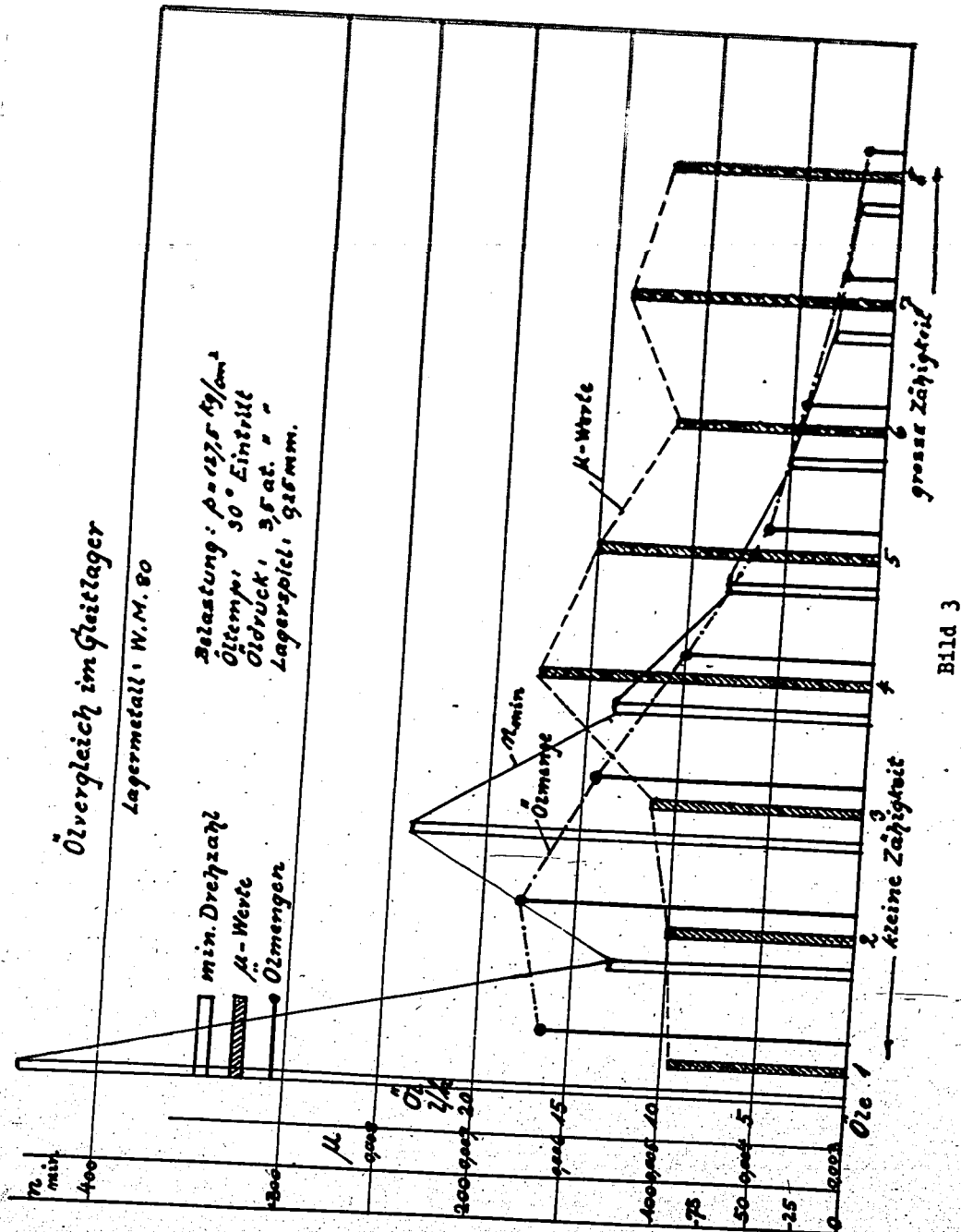


Bild 3

000731

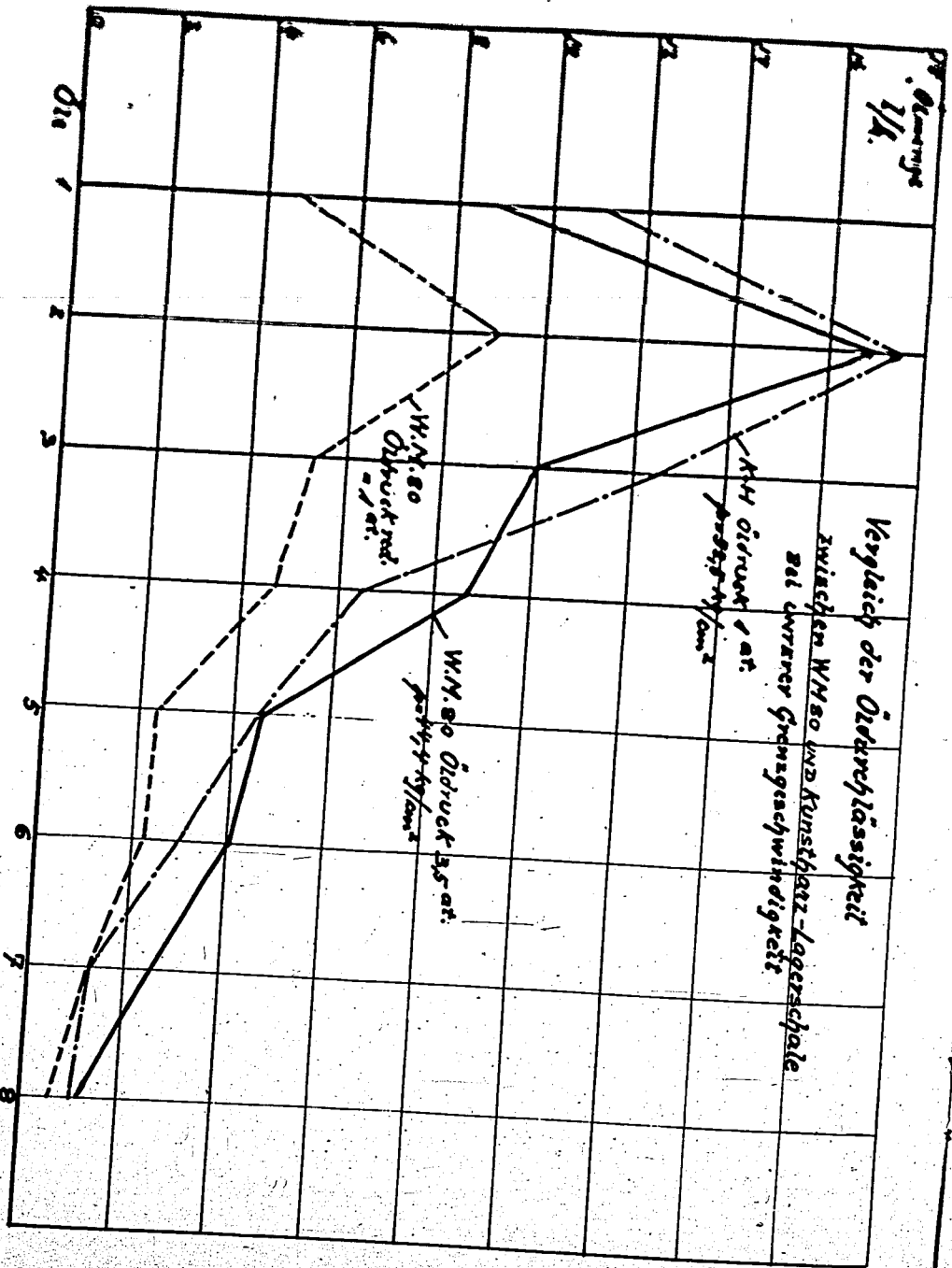


Bild 4

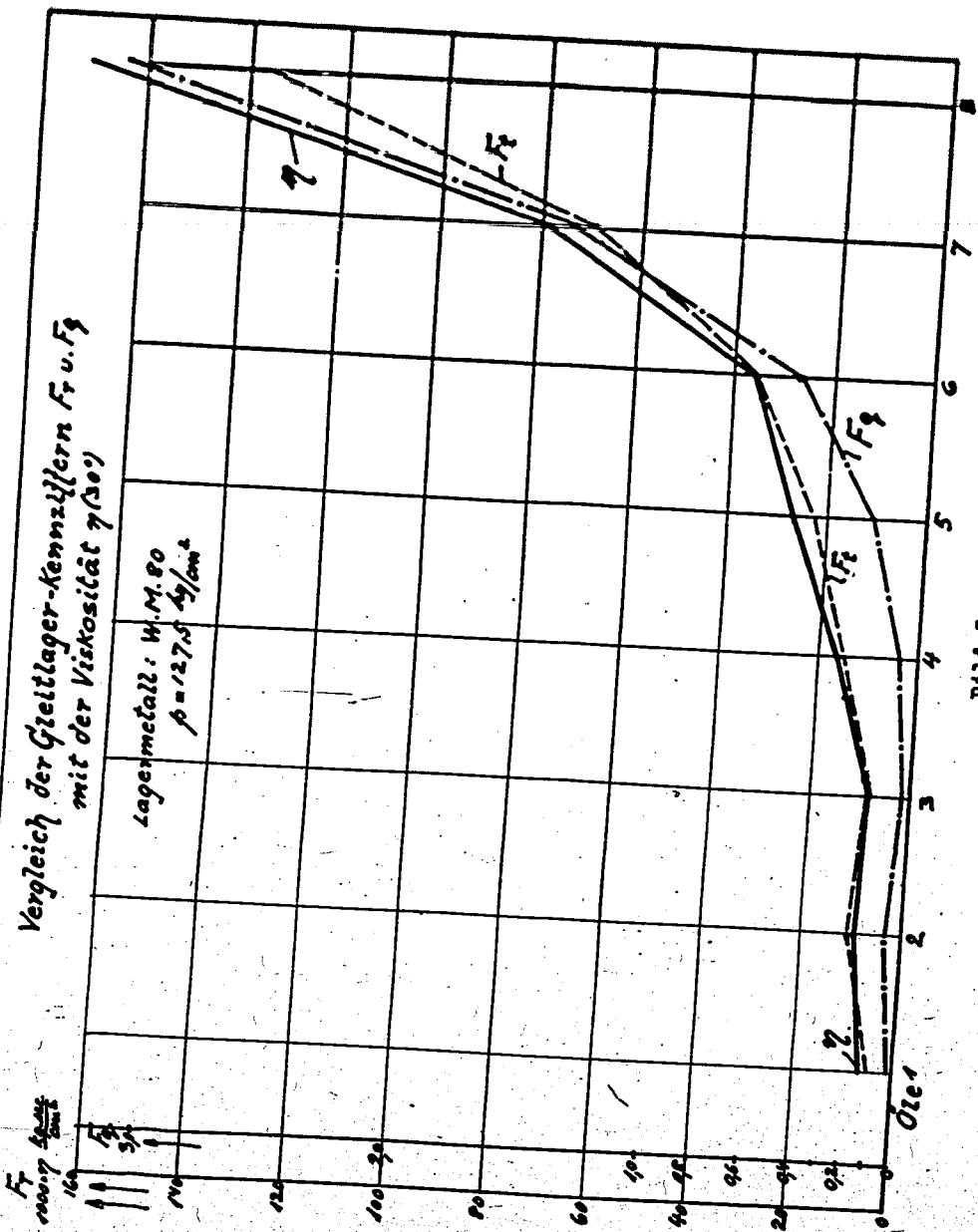


Bild 5

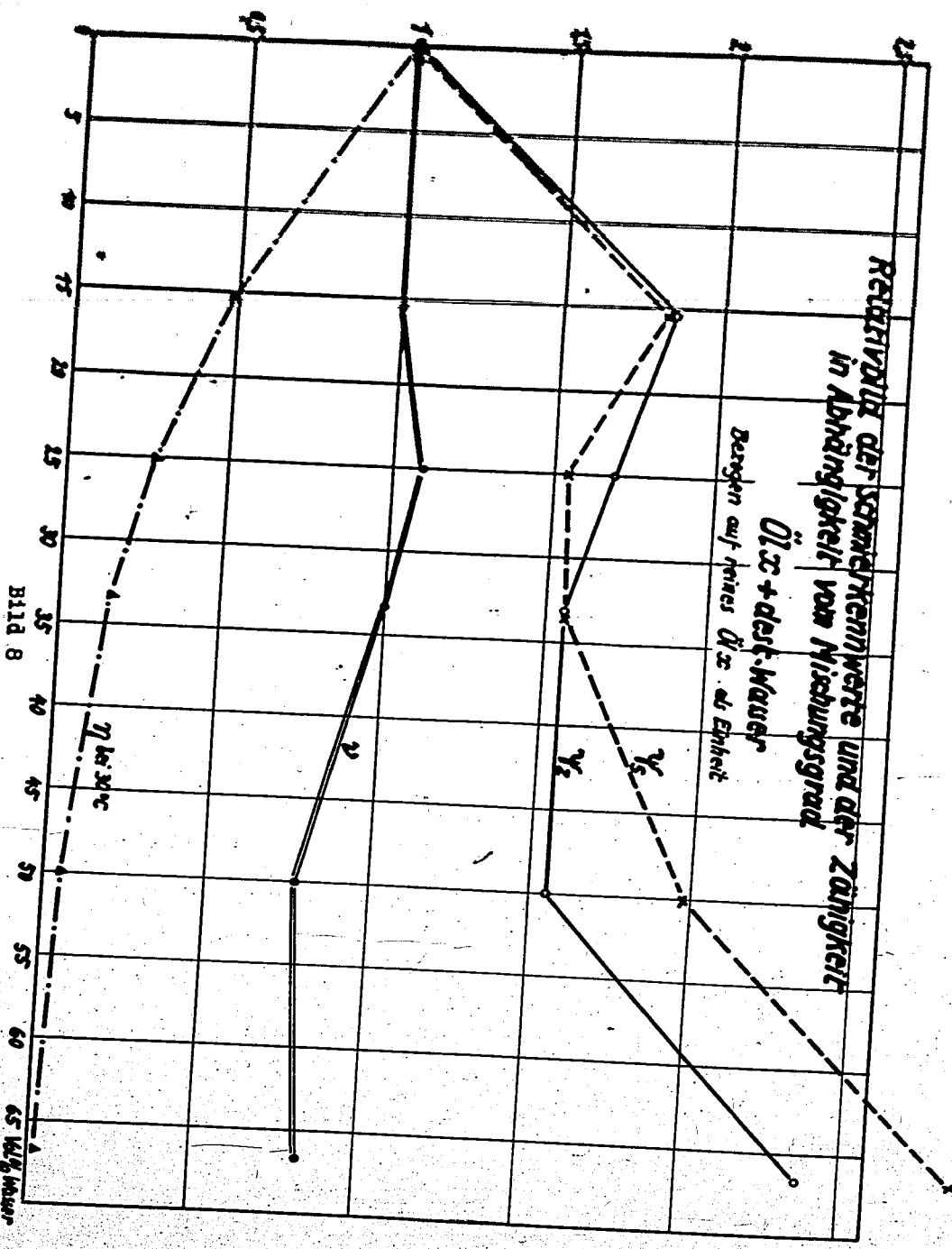


Bild 8

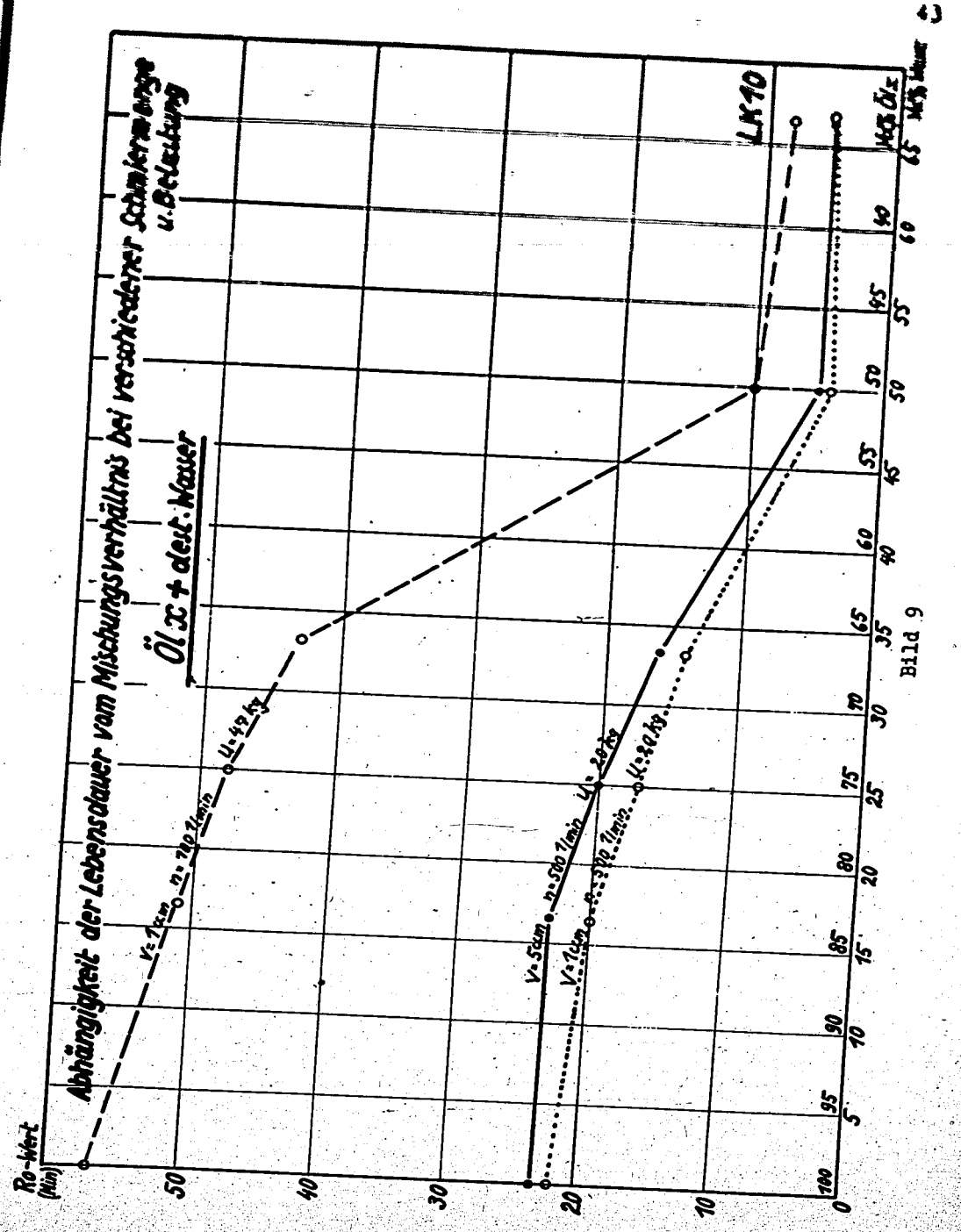
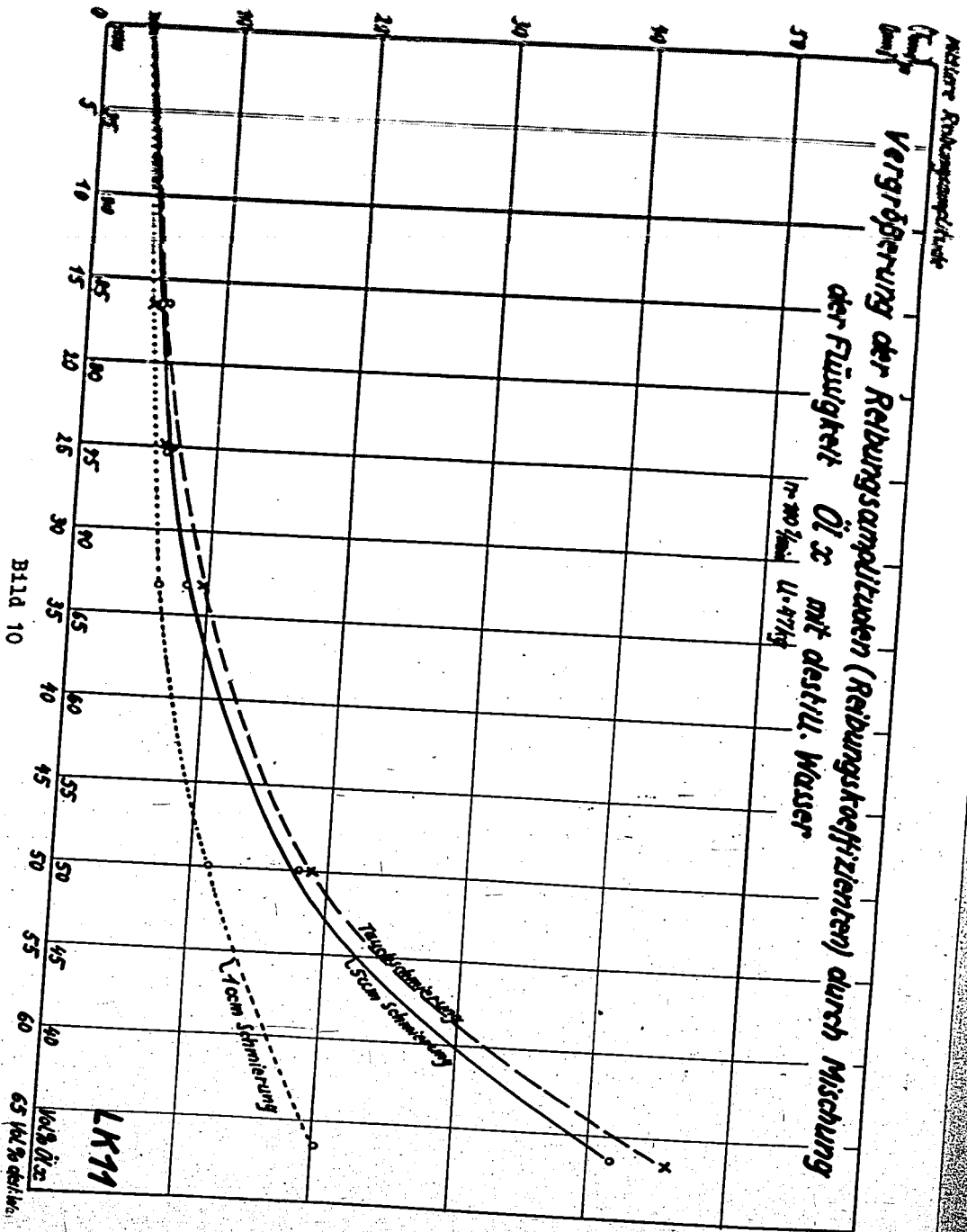


Bild 9

000734



Deutsche Kraftfahrtforschung
Im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

S F 5
Heft 68

000735

Wasserstoff als Motortreibmittel

Dr.-Ing. Manfred Oehmichen VDI
Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule
Dresden

(Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlig VDI
i. V. Prof. Dr.-Ing. W. Pauer VDI)

1942



VDI-Verlag GmbH · Berlin NW 7

Deutsche Kraftfahrtforschung
Im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

Heft 68

000736

Wasserstoff als Motortreibmittel

Dr.-Ing. Manfred Oehmichen VDI
Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule
Dresden

(Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlig VDI
i. V. Prof. Dr.-Ing. W. Pauer VDI)

1942

VDI-Verlag GmbH · Berlin NW 7

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1	6 Versuchsanordnungen	11
11 Der Wasserstoffmotor und seine Anwendungsmöglichkeiten	1	61 Leistung	13
12 Wasserstoff in Bomben und Motoren im Rahmen bisheriger Forschungen	2	62 Thermischer Wirkungsgrad	15
7 Angaben beim Konstruieren des Motors	2	63 Kraftstoffverbrauch	17
3 Theoretische Untersuchungen	3	64 Wärmeverluste	17
31 Einführung des Wasserstoffes	3	65 Kennwertpunkt	18
32 Die Arbeitsverfahren	5	66 Klopfgrenzen	19
33 Thermischer Wirkungsgrad	5	67 Verbräunung	19
34 Leistung	6	68 Betriebsmerkmale	21
35 Temperatur und Dichte	8	7 Vergleichende Betrachtungen	21
4 Anlage und Durchführung der Versuche	10	71 Leistung	21
41 Versuchsanlage	10	72 Thermischer Wirkungsgrad	22
42 Verwechslungsführung	11	73 Verbräunung	24
5 Versuche	12	74 Kraftstoffverbrauch	24
		75 Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffherstellung	26
		8 Zusammenfassung	27
		9 Schrifttumverzeichnis	29

Formelgrößen

a, b, c, e, i, m	Konstanten.	M	[kg/cm ²]	mittlerer Innendruck.
A	mechanisches Wärmeäquivalent; $A = \frac{1}{427}$	Q	[kcal]	Wärmemenge.
b ₁	[kcal/PS ^h]	R, R ₀	[m ²]	Gaskonstante; R ₀ = 818 m ² .
b ₂	[kcal/PS ^h]	s, S	[kcal/kg ² , kcal/°]	Entropie.
B	[kg/Mol]	t, T	[°C, °K]	Temperatur.
C _v	[kcal/Mol ² , kcal/kg ²]	u, U	[kcal/Mol kcal]	innere Energie.
d _m	[m]	v	[m ³ /kg]	spezifisches Volumen.
F	[—]	V	[m ³]	Volumen.
G	[m/s ²]	V _c	[m ³]	Verdichtungsendvolumen.
G	[kg]	V _H	[m ³]	geometrisches Hubvolumen.
h	[mm]	V _{H2}	[m ³]	einzublasendes Wasserstoffvolumen.
h _m	[m]	W	[kcal]	dem Kraftstoff entsprechende Wärmemenge.
h ₀	[—]	z	[s]	Zeit.
H	[mm]	z ₁	[Mol/Mol]	Molanteil der Einzelgase je Mol.
H ₀	[kcal/m ²]	z	[—]	Verdichtungsverhältnis.
H _u	[kcal/kg, kcal/m ²]	z	[—]	Wirkungsgrad.
k	[—]	z _{th}	[—]	thermischer Wirkungsgrad, bezogen auf die Nutzleistung.
n	[U/min]	z _{thi}	[—]	thermischer Wirkungsgrad, bezogen auf die Innenleistung.
N ₁	[PS]	z _{thv}	[—]	thermischer Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses.
N ₂	[PS]	z _{vol}	[—]	volumetrischer Wirkungsgrad.
p, P	[kg/cm ² , kg/m ²]	z	[—]	Luftüberschusszahl.
p ₀	[kg/cm ²]	z'	[°KW]	Kurbelwinkel.
		z''	[—]	Geschwindigkeitsbeiwert.

Alle Rechte vorbehalten. Copyright 1942 by VDI-Verlag GmbH, Berlin NW 7
 Printed in Germany. Druck: August Hopfer, Burg b. Magdeburg
 DW 919

1 Einleitung

11 Der Wasserstoffmotor und seine Anwendungsmöglichkeiten

Auf die Möglichkeit, Wasserstoff im Motor zu verbrennen, wird schon zum Beginn des vergangenen Jahrhunderts hingewiesen¹⁾. In die Zeit, in der sich die Verbrennungskraftmaschine durchzusetzen beginnt, fallen auch die ersten Vorschläge, Wasserstoff als Kraftstoff zu verwenden. Bisher ist dieses Problem immer wieder aufgegriffen worden, ohne daß nennenswerte praktische Durchführungen bekanntgeworden wären. In letzter Zeit waren jedoch wieder Bestrebungen im Gange, die geeignet schienen, den Wasserstoffmotor, wenn auch unter anderen Bedingungen als früher, etwas mehr in den Vordergrund treten zu lassen.

Für den Wasserstoffmotor kommen verschiedene Anwendungsgebiete in Betracht. Hauptsächlich kann an eine Verwendung im stationären Betrieb gedacht werden, etwa in chemischen Werken, bei denen Wasserstoff in größeren Mengen anfällt oder ohne nennenswerten, zusätzlichen Aufwand hergestellt werden kann, und in Elektrizitätszentralen, die zur Spitzendeckung der elektrischen Energie den durch Druckelektrolyse gewonnenen und gespeicherten Wasserstoff für ein motorisches Verfahren ausnutzen wollen. Im Schrifttum wird sogar die Anwendungsmöglichkeit im nichtstationären Betrieb besprochen [12 bis 18, 23, 25 bis 27, 52]. Beim Antrieb von Luftschiffen ist Wasserstoff unter gewissen Bedingungen erfolgreich mit herangezogen worden [17, 56]. Hierbei wurde der als Ausgleich für den Auftrieb des Dieselmotors dienende Wasserstoff nach Maßgabe des Verbrauchs an Dieselmotoren zur Verbrennung verwendet.

Wenn es gelingt, Wasserstoff unter hohen Drücken betriebsicher und billig herzustellen und möglichst auch zu speichern, kann in vielen Fällen... auf die hier im einzelnen nicht eingegangen werden soll, der Antrieb mit Wasserstoff manchem anderen Kraftstoffantrieb gleichgestellt werden. In der vorliegenden Arbeit sollen die motorischen Eigenschaften des Wasserstoffs und die Betriebsmöglichkeiten in einem den besonderen Verhältnissen entsprechenden Motor untersucht werden. Für den Aufbau des Motors und die Versuchsplanung konnte nur in geringem Maße auf das Schrifttum zurückgegriffen werden.

12 Wasserstoff in Bomben und Motoren im Rahmen bisheriger Forschungen

Wasserstoff, der als Zwischenprodukt der Reaktion jedes wasserstoffhaltigen Kraftstoffs auftritt, interessierte von jeher besonders bei Bombenversuchen zur Erforschung der Verbrennungsercheinungen. Sein Verhalten bei der Verbrennung im Motor war jedoch nur in seltenen Fällen Gegenstand eingehender Untersuchungen. Erst in den letzten Jahren, als man auf die Verwendung heimischer Kraftstoffe immer mehr angewiesen war, ging man dazu über, die Verbrennung des Wasserstoffs auch im Motor zu untersuchen.

Da das vorhandene Schrifttum in einer früheren Darlegung [46] schon besprochen wurde, wird in diesem Zusammenhang darauf und auf die Schrifttumszusammenstellung am Ende der vorliegenden Arbeit verwiesen.

Zusammenfassend soll noch einmal erwähnt werden, daß ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den Bombenversuchen und den am Motor erhaltenen Ergebnissen besteht. Geht man von den Bombenversuchen aus, so ergeben sich bei reichen Wasserstoff-Luft-Gemischen schon bei Atmosphärendruck recht erhebliche Verbrennungsgeschwindigkeiten. Bei höheren Drücken oder gar bei Bombenversuchen, die Wasserstoff im Motor zu verbrennen. Man muß jedoch bedenken, daß es gewagt erscheint, Wasserstoff im Motor zu verbrennen. Man muß jedoch bedenken, daß die Bombenversuche meist schon nicht miteinander verglichen werden können, aber gewiß nicht in ihren absoluten Werten als Grundlage für den Motorbetrieb gelten können. Sämtliche Außen- und Gasbewegung, Temperatur- und Druckeinflüsse, Wärmeübergangsverhältnisse und vieles mehr, können die Versuchswerte verändern.

Es scheint daher nicht verwunderlich, daß die Motorversuche zum Teil ganz andere Verhältnisse als die Bombenversuche wiedergeben. Bei den Motorversuchen bestätigte sich lediglich der große Zündbereich, der im Motor bis zu einem gewissen Grade eine Gemischregelung erlaubt.

¹⁾ Die Zahlen in Klammern verweisen auf das Schrifttum am Ende der Arbeit.
²⁾ Cecil (1820) nach Chemiker-Ztg. Bd. 64 (1933) S. 951.

Über die ältesten Patente ist es Verboten kaum etwas bekannt. Erst Hirsche [52], Arrault [53] und Erren [11 bis 14, 25 bis 27, 53] geben über Wasserstoffverbrennung im Motor ausführliche Darstellungen. Am zuverlässigsten scheinen die Versuche zu sein, die Hirsche und Arrault an Viertaktmotoren mit Fremdstellung durchgeführt. Letzterer gibt einen indizierten Wirkungsgrad $\eta_{\text{ind}} = 38\%$ bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 1:7$ und einer Drehzahl = 1000 U/min an. Bemerkenswert ist, daß die hohen Verbrennungsgeschwindigkeiten, wie sie sich bei den Bombenversuchen ergeben, nicht auftraten. Nach diesen Angaben scheint jedoch ein dauerhafter Betrieb des Motors in der Nähe des theoretischen Mischungsverhältnisses nicht mehr möglich zu sein. Erren allerdings glaubte gerade mit diesem Gemisch die besten Erfolge erzielt zu haben [14]. Da aus all diesen Ergebnissen ein einwandfreies Bild nicht zu gewinnen war, wurden die geplanten Versuche so durchgeführt, daß ein Vergleich mit den bestehenden Versuchsergebnissen möglich wurde.

2 Aufgaben beim Entwurf des Motors

Auf den angeführten Ergebnissen mußten die folgenden Versuche aufbauen. Dabei ergab sich von Anfang an, daß eine zufriedenstellende Leistung bei dem geringen Gemischheizwert der Wasserstoff-Luft-Gemische nur durch Überladung erreicht werden konnte. Der untere Heizwert des Wasserstoffs beträgt $H_0 = 2500 \text{ kcal/m}^3$ (bezogen auf 760 mm QS und 0°C). Für eine Verbrennung mit dem theoretischen Gemisch, also $\lambda = 1,0$, ergibt sich bei Sauggasbetrieb, d. h. Einbringen des fertigen Gemischs in den Zylinder, ein Gemischheizwert von

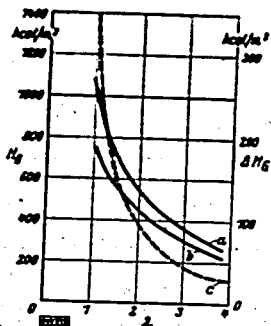


Bild 1. Gemischheizwert H_G abhängig von der Luftüberschußzahl λ bei Wasserstoffbetrieb.
a Druckaufladung; b Sauggasbetrieb; c Unterschied ΔH_G des Gemischheizwertes bei beiden Verfahren.

$H_G = 760,7 \text{ kcal/m}^3$. Bei Druckaufladung, und zwar Ansaugen von reiner Luft und Zuladen des Wasserstoffs, erhöht sich bei der gleichen Gemischzusammensetzung der Gemischheizwert der Ladung auf $H_G = 1079,3 \text{ kcal/m}^3$. Bei Ansaugen des fertigen Gemischs beträgt dann der Wärme-Sinne durch ein Ladegebläse, wie es sich ohne Schwierigkeiten auch in diesem Fall verwirklichen ließe, nicht in Rechnung gestellt. Wie Bild 1 zeigt, ist bei den verschiedenen Verfahren der Unterschied ΔH_G der Gemischheizwerte bei kleinem Luftüberschuß am größten. Die Aufladung wird also um so nutzbringender, je mehr sich die Gemischzusammensetzung dem theoretischen Gemisch nähert.

Das Zuladen von Kraftstoff bedingt jedoch das Vorhandensein von Wasserstoff, der unter einem bestimmten Mindestdruck steht. Es ist daher schließlich eine Frage der Wirtschaftlichkeit, in welchem Maße sich die Druckerzeugung bei der Herstellung des Wasserstoffs und damit die Anwendung dieses Verfahrens günstig verwirklichen läßt [1: 42].

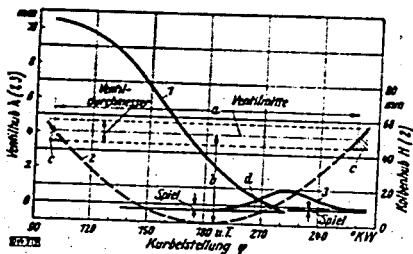


Bild 2. Steuerzeiten des Versuchsmotors.
1 Erhebungskurve des Luft-Einlassventils; 2 Weg des Kolbenbodens;
3 Erhebungskurve des Wasserstoff-Einlassventils.
a Zeit, in der das Wasserstoff-Einlassventil vom Kolben freigegeben wird; b Entfernung der Ventilmitte vom Kolbenboden bei der unteren Totpunktstellung; c Überdeckung des Kraftstoffventils durch den Kolben; d Überschneidung der Öffnungszeiten von Kraftstoff- und Luft-Einlassventil.

Da die Versuche einen Vergleich mit den bekannten Ergebnissen ermöglichen sollten, waren alle äußeren Bedingungen darauf abzustimmen. Die Drehzahl wurde daher mit höchstens 3000 U/min festgelegt.

Will man den Motor zunächst mit einem Wasserstoff-Luft-Gemisch bei Fremdstellung arbeiten lassen, so sind nur geringfügige konstruktive Änderungen nötig. Eine Mischung des Wasserstoffs mit der Luft außerhalb des Zylinders sollte vermieden werden. Dadurch wird ein Ventil für geschobene Einbläser erforderlich. Die Steuerung hierfür kann von der Nockenwelle aus erfolgen. Einbläser des Wasserstoffs bei einer Anordnung des Wasserstoff-Einlassventils im Zylinderkopf hat den Vorzug, daß zur Gemischbildung fast der gesamte Verdichtungsdruck für Verdrängung in die Zylinderbühne geführt (Bild 11). Die Einblasdauer ist dabei durch den Wasserstrom des Motors nach Bild 2 bestimmt. Hier sind die Wege des Luft-Einlassventils (1), des Kolbenbodens (2) und des Wasserstoff-Einlassventils (3) in Abhängigkeit von der Kurbelstellung φ aufgetragen. Damit ist die größte mögliche Einblasdauer (a) festgelegt. Diese ist begrenzt durch das Schließen des Luft-Einlassventils und die Lage des Kraftstoffventils (b) Kurbelstellungen an, während deren die Kraftstoffventillösung vom Kolben verdeckt ist. Um eine wirksame Aufladung zu erreichen, ist die Öffnungsdauer des Kraftstoffventils in die zweite Hälfte der Einblasdauer (a) verlegt. In diesem Gebiet ist das Luft-Einlassventil schon fast geschlossen. Es findet nur eine Überschneidung entsprechend der schraffierten Fläche (d) statt, soll möglichst klein gehalten werden, um eine gute Ausnutzung des Flascheninhalts zu gewährleisten.

Eine zusätzliche Wirbelung durch den eintretenden Wasserstoffstrahl ist bei diesem Verfahren in Betracht zu ziehen. Diese wird durch tangenciales Einströmen erzeugt, wobei das Gemisch in drehende Bewegung zusätzlich zu der Luftströmung, die durch die Kolbenbewegung und Einströmen vorgänge entsteht, versetzt werden kann.

Schließlich könnte an eine Ausnutzung der Abgase, die ja nur aus hoch überhitztem Wasserdampf, Sauerstoff und Stickstoff bestehen, in irgendeiner Form gedacht werden.

Durch das Verfahren der Zuladung werden auch beim Betrieb dieser Gasmaschine hohe Mittel- drücke zu erreichen sein. Sie werden — wenn man von Bild 1 ausgeht — die Mitteldrücke der mit flüssigen Kraftstoffen arbeitenden Motoren mindestens erreichen, ja sogar übersteigen können. Das Verfahren bietet somit die Möglichkeit, den Kraftstoff mit geringem Heizwert günstig im Motor auszunutzen.

Diese einfachen Betrachtungen zeigen eine gewisse Vielseitigkeit des Motors. Es ist dann noch eine Frage der Anpassung von Motor und Kraftstoff, den Kraftstoffverbrauch möglichst niedrig zu halten und den Bestwert des thermischen Wirkungsgrades η_{th} zu erreichen.

3 Theoretische Untersuchungen

31 Zuführung des Wasserstoffs

Wie schon ausgeführt, soll der Wasserstoff durch Eigendruck unter Ausnutzung der in der Flasche gespeicherten Energie in den Zylinder einströmen. Dem Regelorgan fallen demnach folgende Aufgaben zu:

1. Begrenzung der zeitlichen Dauer des Einströmens des Wasserstoffs, und entweder
 - 2a. Veränderung des Wasserstoffdruckes vom Flaschendruck bis auf ein die Menge bestimmendes Maß bei konstantem Durchtrittsquerschnitt, oder
 - 2b. Veränderung des Durchtrittsquerschnitts bei konstantem Einströmdruck.
- Wenn die Steuerung von der Nockenwelle bei konstanter Nockenerhebung ausgeht, ist die Dauer des Einblasens durch die Drehzahl bestimmt. Die Menge kann durch einen Drehschieber oder durch ein Ventil etwa mit geeigneter Hebelveränderung am Kipphebel bei Nockenbetrieb begrenzt werden.

Da die Abdichtung im Falle des Wasserstoffs, der ja das kleinste Molekül darstellt, außerordentlich schwierig ist, wurde von einem Drehschieber, wie ihn z. B. Erren [17] verbunden mit der Zuführung der Kraftstoffmenge wurde durch den Kraftstoffnocken begrenzt.

Es galt nun, zwischen einer Druckregelung und einer Querschnittsregelung zu wählen. Die Vorversuche haben ergeben, daß eine Druckregelung aus später noch anzuführenden Gründen nicht ratsam scheint. Es wurde daher mit veränderlichem Durchtrittsquerschnitt gearbeitet. Da nach den Voraussetzungen der Ventilquerschnitt festliegt, kann die Regelung des

Über die ältesten Patente ist ein Verzeichnis schon etwas bekannt geworden. Erst Hünneke [50], Berrill [16] und Erren [11 bis 13, 25 bis 27, 32] geben über Wasserstoffverbrennung im Motor ausführliche Darstellungen. Am sorgfältigsten scheinen die Versuche zu sein, die Hünneke und Berrill an Viertaktmotoren mit Fremdstellung durchgeführt. Letzterer gibt einen indizierten Wirkungsgrad $\eta_i = 36\%$ bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 1:7$ und einer Drehzahl $n = 1000 \text{ U/min}$ an. Bemerkenswert ist, daß die beiden Verbrennungsgeschwindigkeiten, wie sie sich bei dem Nockenversuch ergaben, nicht auffraßen. Nach diesen Angaben arbeitet jedoch ein gewandelter Betrieb des Motors in der Nähe des theoretischen Mischungsverhältnisses nicht recht möglich zu sein. Erren allerdings glaubte gerade mit diesem Gemisch die besten Erfolge erzielt zu haben [14]. Da aus all diesen Ergebnissen ein starrschraffiertes Bild nicht zu gewinnen war, wurden die geplanten Versuche im durchgeführten, daß ein Vergleich mit den bestehenden Versuchsergebnissen möglich wurde.

2 Aufgaben beim Entwurf des Motors

Auf den angeführten Ergebnissen mußten die folgenden Versuche aufbauen. Dabei ergab sich von Anfang an, daß eine zufriedenstellende Leistung bei dem geringen Gemischheizwert der Wasserstoff-Luft-Gemische nur durch Überladung erreicht werden konnte.

Der untere Heizwert des Wasserstoffs beträgt $H_0 = 2500 \text{ kcal/m}^3$ (bezogen auf 760 mm QS und 0°C). Für eine Verbrennung mit dem theoretischen Gemisch, also $\lambda = 1,0$, ergibt sich bei Sauggasbetrieb, d. h. Einbringen des fertigen Gemisches in den Zylinder, ein Gemischheizwert von

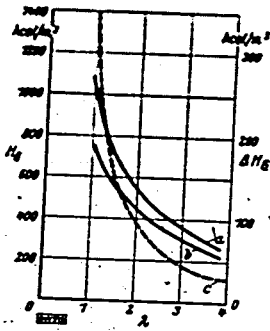


Bild 1. Gemischheizwert H_0 abhängig von der Luftüberschusszahl λ bei Wasserstoffbetrieb.
a Druckaufladung; b Sauggasbetrieb; c Unterschied ΔH_0 des Gemischheizwertes bei beiden Verfahren.

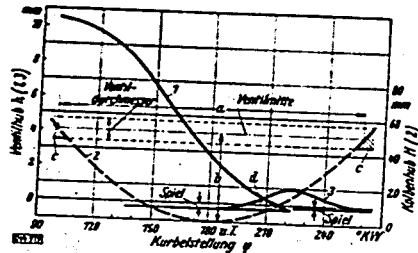


Bild 2. Steuerzeiten des Versuchsmotors.
1 Erhebungskurve des Luft-Einlassventils; 2 Weg des Kolbenbodens;
3 Erhebungskurve des Wasserstoff-Einlassventils.
a Zeit, in der das Wasserstoff-Einlassventil vom Kolben freigegeben wird; b Entfernung der Ventilmitte vom Kolbenboden bei der unteren Totpunktstellung; c Überdeckung des Kraftstoffventils durch den Kolben; d Überschneidung der Öffnungszeiten von Kraftstoff- und Luft-Einlassventil.

$H_0 = 760,7 \text{ kcal/m}^3$. Bei Druckaufladung, und zwar Ansaugen von reiner Luft und Zuladen des Wasserstoffs, erhöht sich bei der gleichen Gemischzusammensetzung der Gemischheizwert der Ladung auf $H_0 = 1079,3 \text{ kcal/m}^3$. Bei Ansaugen des fertigen Gemisches beträgt dann der Wärme-Sinne-durch ein Ladegebläse, wie es sich ohne Schwierigkeiten auch in diesem Fall verwirklichen ließe, nicht in Rechnung gestellt. Wie Bild 1 zeigt, ist bei den verschiedenen Verfahren der Unterschied ΔH_0 der Gemischheizwerte bei kleinem Luftüberschuß am größten. Die Aufladung wird also um so nutzbringender, je mehr sich die Gemischzusammensetzung dem theoretischen Gemisch nähert.

Das Zuladen von Kraftstoff bedingt jedoch das Vorhandensein von Wasserstoff, der unter einem bestimmten Mindestdruck steht. Es ist daher schließlich eine Frage der Wirtschaftlichkeit, in welchem Maße sich die Druckerzeugung bei der Herstellung des Wasserstoffs und damit die Anwendung dieses Verfahrens günstig verwirklichen läßt [1, 42].

Da die Versuche einen Vergleich mit den bekannten Ergebnissen ermöglichen sollten, waren alle äußeren Bedingungen darauf abzustimmen. Die Drehzahl wurde dabei mit höchstens 2000 U/min festgelegt.

Will man den Motor zunächst mit einem Wasserstoff-Luft-Gemisch bei Fremdstellung arbeiten lassen, so sind nur geringfügige konstruktive Änderungen nötig. Eine Mischung des Wasserstoffs mit der Luft außerhalb des Zylinders sollte vermieden werden. Dadurch wird ein Ventil für dessen geordnete Einführung erforderlich. Die Steuerung hierfür kann von der Nockenwelle des Zylinderkopfs bei dem Vorzug, daß zur Gemischbildung fast der gesamte Verdichtungsdruck zur Verfügung steht. Bei den folgenden Untersuchungen war jedoch das Ventil mittels durch den Wassermantel in die Zylinderbohrung geführt (Bild 11). Die Einblasdauer ist dabei durch die Steuerzeiten des Motors nach Bild 2 bestimmt. Hier sind die Wege des Luft-Einlassventils (1), des Kurbelstellung ψ aufgetragen. Damit ist die größte mögliche Einblasdauer (a) festgelegt. Diese ist begrenzt durch das Schließen des Luft-Einlassventils und die Lage des Kraftstoffventils (b) Kurbelstellungen an, während deren die Kraftstoffventillöffnung vom Kolben verdeckt ist. Um eine wirksame Aufladung zu erreichen, ist die Öffnungsdauer des Kraftstoffventils in die zweite Hälfte der Einblasdauer (a) verlegt. In diesem Gebiet ist das Luft-Einlassventil schon fast geschlossen. Es findet nur eine Überschneidung entsprechend der schraffierten Fläche (d) statt, soll möglichst klein gehalten werden, um eine gute Ausnutzung des Flascheninhalts zu gewährleisten.

Eine zusätzliche Wirbelung durch den eintretenden Wasserstoffstrahl ist bei diesem Verfahren in Betracht zu ziehen. Diese wird durch tangentialen Einströmen erzeugt, wobei das Gemisch in vorgänge entsteht, versetzt werden kann.

Schließlich könnte an eine Ausnutzung der Abgase, die ja nur aus hoch überhitztem Wasserdampf, Sauerstoff und Stickstoff bestehen, in irgendeiner Form gedacht werden.

Durch das Verfahren der Zuladung werden auch beim Betrieb dieser Gasmasschine hohe Mittel- drücke zu erreichen sein. Sie werden — wenn man von Bild 1 ausgeht — die Mittel- drücke der flüssigen Kraftstoffen arbeitenden Motoren mindestens erreichen, ja sogar übersteigen können. Das Verfahren bietet somit die Möglichkeit, den Kraftstoff mit geringem Heizwert günstig im Motor auszunutzen.

Diese einfachen Betrachtungen zeigen eine gewisse Vielseitigkeit des Motors. Es ist dann noch eine Frage der Anpassung von Motor und Kraftstoff, den Kraftstoffverbrauch möglichst niedrig zu halten und den Bestwert des thermischen Wirkungsgrades η_{th} zu erreichen.

3 Theoretische Untersuchungen

3.1 Zuführung des Wasserstoffs

Wie schon ausgeführt, soll der Wasserstoff durch Eigendruck unter Ausnutzung der in der Flasche gespeicherten Energie in den Zylinder einströmen. Dem Regelorgan fallen demnach folgende Aufgaben zu:

1. Begrenzung der zeitlichen Dauer des Einströmens des Wasserstoffs, und entweder
 - 2a. Veränderung des Wasserstoffdruckes vom Flaschendruck bis auf ein die Menge bestimmendes Maß bei konstantem Durchtrittsquerschnitt, oder
 - 2b. Veränderung des Durchtrittsquerschnitts bei konstantem Einströmdruck.
- Wenn die Steuerung von der Nockenwelle bei konstanter Nockenerhebung ausgeht, ist die Dauer des Einblasens durch die Drehzahl bestimmt. Die Menge kann durch einen Drehschieber oder durch ein Ventil etwa mit geeigneter Hebelveränderung am Kipphebel bei Nocken-antrieb begrenzt werden.

Da die Abdichtung im Falle des Wasserstoffs, der ja das kleinste Molekül darstellt, außerordentlich schwierig ist, wurde von einem Drehschieber, wie ihn z. B. Erren [17] verbunden mit einer Druckregelung benutzt, abgesehen und mit einem Einblasventil gearbeitet. Die Zeitdauer der Zuführung der Kraftstoffmenge wurde durch den Kraftstoffnocken begrenzt.

Es galt nun, zwischen einer Druckregelung und einer Querschnittsregelung zu wählen. Die Vorversuche haben ergeben, daß eine Druckregelung aus später noch anzuführenden Gründen nicht ratsam scheint. Es wurde daher mit veränderlichem Durchtrittsquerschnitt gearbeitet. Da nach den Voraussetzungen der Ventilquerschnitt festliegt, kann die Regelung des

Kraftstoffe nur auch durch Hubveränderung des Ventils erfolgen. Diese ergibt sich durch eine stetigen Überströmung am Kipphebel. Eine zeitliche Druckänderung ist dann immer auch möglich. Um das Einströmen des Wasserstoffs unabhängig von den Schwingungen der Luftzufuhr und dem während des Einströmens auftretenden Druck im Zylinder zu gestalten und aus gleichzeitiger möglicher Notwendigkeit zu überströmen Druckverhältnissen zu bestehen. Dies läßt sich durch geeignete Wahl des Kipphebelarms erreichen.

Die resultierende Wassermenge wird dann lediglich eine Funktion des Ventilschubs, wenn unveränderliche Temperaturen des einströmenden Wasserstoffs bei gleichem Druckverhältnis angenommen werden.

Wenn man das kritische Druckverhältnis zugrunde legt, ergibt sich unter Berücksichtigung der Ventilschubhöhe (Kegelschubhöhe), der Drehzahl und des Zustandes des Wasserstoffs bei adiabatischem Einströmen für das einströmende Wasservolumen je Hub

$$V_{w,cr} = \frac{V_H \cdot \lambda_{cr}}{2,29 \cdot \lambda} \quad (1)$$

Die mittlere Ventilhubhöhe während der Öffnungsdauer des Ventils, dargestellt in $\circ KW$ (φ) ist dann:

$$\lambda_m = \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{V_H \cdot \lambda_{cr}}{2,29 \cdot \lambda} \quad (2)$$

Dabei bedeutet:

V_H (m³) das geometrische Hubvolumen,
 φ (rad) den volumetrischen Wirkungsgrad,
 n (1/min) die Drehzahl,
 λ (—) die Luftüberschußzahl,
 $c = a \cdot b \cdot c$.

Es ergibt sich als Konstante aus den allgemeinen Bedingungen

$$a = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{T_0}{T_1} = \sqrt{2g} \cdot \cos \alpha$$

als Stoffkonstante

$$b = \sqrt{R} \cdot \left| \frac{k}{k-1} \right|$$

und als Wert, der den Ausgangsbedingungen entspricht.

$$c = \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} \cdot \psi \cdot d_m$$

unter Verwendung folgender Bezeichnungen:

T (°K)	Temperatur	bezogen auf Normalzustand (T_0, p_0) und auf den Zustand vor dem Einströmen (T_1, p_1)
p (kg/cm ²)	Druck	
g (m/s ²)	Erdbeschleunigung	
R (m ² /s ²)	Gaskonstante	
k (—)	Polytropenexponent	
ψ (—)	Geschwindigkeitsbeiwert	
d_m (m)	mittlerer Ventilsitzdurchmesser	

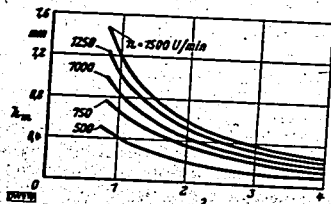


Bild 3. Regelkurven: Mittlere Ventilhubhöhe h_m abhängig von der Luftüberschußzahl λ für konstante Drehzahlen, gewonnen aus Gl. 2.

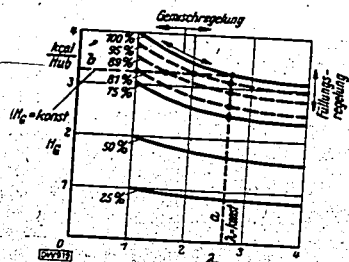


Bild 4. Regelkurven: Gemischheizwert H_0 abhängig von der Luftüberschußzahl λ bei Gemisch- und Füllungsregelung für verschiedene Luftmengen (25 bis 100%), bezogen auf das Hubvolumen V_H .
 a Füllungsregelung;
 b Gemischregelung.

Auf Bild 3 sind einige mit verschiedenen Bauformen gewonnene Regelkurven für verschiedene Druckverhältnisse zusammengestellt. Es ergibt sich daraus eine Abhängigkeit des Luftüberschußes (λ) von der Ventilhubhöhe und Drehzahl.

Bei großem Luftüberschuß, also kleinen Leistungen (Leerlauf) bedingen schon kleine Änderungen des Ventilschubs so große Änderungen des Mischungsverhältnisses, daß in diesem Gebiet die reine Gemischregelung nicht verteilhaft erscheint. Wahrscheinlich wäre in diesem Bereich eine Füllungs- oder eine gemischte Regelung besser. Diese kann durch zeitliche Drückung der angelegten Luftmenge erhalten werden; es werden dabei Verbrennungen einer immer kleineren Gemischmenge erreicht. Man arbeitet also mit geringem Luftüberschuß und darf dabei auf gute Verbrennung hoffen.

Insbesondere ist natürlich auch die Regelung der Leistung bei gleichem Luftüberschuß und veränderlichem Gemischheizwert möglich. Diese Regelung liegt aber nicht im Sinn der besseren Gemischbildung. Die folgenden Versuche sollen jedoch zunächst einmal zeigen, in welchem Maße sich die reine Gemischregelung anwenden läßt, und werden daher hauptsächlich ohne Drückung in der Ausgestaltung durchgeführt werden.

22 Die Arbeitsverfahren

Sieht man vom reinen Dieselverfahren oder dem Dieselmotorenverfahren, das bei Wasserstoffbetrieb noch nicht mit Erfolg angewendet wurde, ab, kann man sich entweder

1. des einfachen Ottoverfahrens oder
2. eines Zuladeverfahrens

bedienen.

Bei den frühesten Versuchen von Ricardo, Hartall und anfangs auch von Erren wurde dem Arbeitssylinder das fertige Wasserstoff-Luft-Gemisch zugeführt. Die Zündung erfolgte dabei durch Fremdzündung in der Nähe des oberen Totpunktes, so daß als Vergleichsprozeß eine Gleichraumverbrennung nach dem Ottoverfahren (Bild 5), verlaufend zwischen den Punkten 1, 2, 3, 4, anzunehmen ist. Die Verbrennung im Gasmotor weicht nun bekanntlich von der Gleichraumverbrennung gleicher Arbeitsleistung vor sich gehen. Die Gleichdruckverbrennung hat niedrigere Wirkungsgrade[59]. Sie wird allerdings bei Zündermotoren kaum anzutreffen sein.

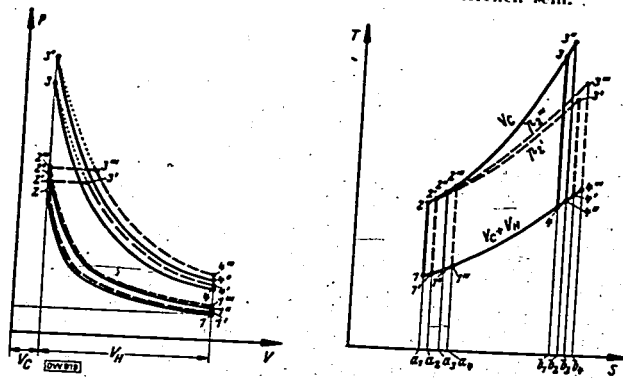


Bild 5. Vergleichsprozesse für das Ottoverfahren im P, V - und T, S -Diagramm, mit und ohne Aufladung. Gleichraumverbrennung; --- Gleichdruckverbrennung.

Bei der Zuladung des Kraftstoffs während des Verdichtungshubes liegen infolge der erhöhten Temperaturen und Drücke am Ende des Ausdehnungshubes die Vorgänge innerhalb des Linienzuges (Bild 5), der durch die Punkte 1'', 2'', 3'', 4'' bei Gleichraum- und 1''', 2''', 3''', 4''' bei gemischter Verbrennung aus den gleichen Gründen bestimmt ist. Die Linien 3'3' bzw. 3'''3''' bezeichnen die Diagramme des gemischten Prozesses, so daß an diesen Linien die Verbrennung bei gleichem Druck, nachdem eine Verbrennung bei gleichem Raum stattgefunden hat, endet. Die

Zuladung kann zwischen den Punkten 1 und 2' bzw. 2'' an jeder Stelle während des Verdichtungsprozesses erfolgen. Die Gemische, die den Punkten 1 und 2' entsprechen, werden jedoch im praktischen Betrieb bei Gemischzeiten nicht angewandt werden. Bei Punkt 1 müßte stattdessen ein Kraftstoff-Luft-Gemisch unter einem Druck, der größer als der Anblasedruck ist (Druckverhöhung von 1 auf 1' oder 1''), dem Zylinder zugeführt werden. Der höhere Anfangsdruck bedingt einen Lader und damit einen größeren Arbeitsaufwand. Dazu kommt, daß zum Zeitpunkt der Zuladung des Einlaßventil noch geöffnet ist (Bild 7), so daß ein Teil des zugeführten Gemisches verlorengeht.

Wird der Kraftstoff im Punkt 2' bzw. 2'' zugeleitet, so ist zunächst nur die Luft zu verdichten. Der Einblasedruck muß dann jedoch den Verdichtungsdruck übersteigern. Das bedeutet eine erhöhte Ausnutzung des Pleumehubes, da sie nur bis zum Verdichtungsdruck entleert werden kann. Weiterhin steht praktisch keine Zeit für die Durchwirbelung des Gemisches zur Verfügung. Man könnte also höchstens im Dieselmotorverfahren arbeiten.

Die Zuladung wird daher an irgendeinem Punkt zwischen 1 und 2' vorgenommen werden müssen. Der Ablauf der Verbrennung ist bei beiden Verfahren gleich; ebenso wie adiabatische Verdichtung und Entspannung für beide Fälle angenommen werden kann.

33 Thermischer Wirkungsgrad

Die zur Kennzeichnung der thermischen Eigenschaften des wirklichen Prozesses mit Wasserstoff im Schrifttum angeführten Wirkungsgrade weichen stark voneinander ab (11 bis 18, 25 bis 27, 49, 50, 52, 60). Es war daher von Interesse, den theoretisch erreichbaren Wirkungsgrad η_0 unter den gegebenen Bedingungen zu berechnen und die Rechnung mit den angegebenen Versuchswerten zu vergleichen.

- Voraussetzung für die Rechnung war die Berücksichtigung von
 - Veränderlichkeit der spezifischen Wärme,
 - Einfluß der Restgase im Zylinder,
 - Einfluß der Temperatur am Ende des Ansaughubes,
 - Änderung der Gemischzusammensetzung vor und nach der Verbrennung.

Der Einfluß der Dissoziation auf den Wirkungsgrad wurde abgeschätzt, während der Wärmeübergang von und an die Zylinderwand und Überschiebverluste unberücksichtigt blieben. Als Vergleichsprozess für die Rechnung wurde das im Bild 5 dargestellte Ottoverfahren gewählt. Der Vorgang verläuft also zwischen zwei Adiabaten und zwei Isochoren. Da ein Prozeß unter diesen Voraussetzungen rechnerisch die besten Wirkungsgrade ergibt und in Wirklichkeit zusätzliche, hier nicht-berücksichtigte Verluste auftreten, müssen alle Versuchswerte kleiner sein. Der Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses ist, wenn die für die Füllung der Flasche aufgewendete Energie unberücksichtigt bleibt,

Die zwischen den Punkten 1 und 1' abgeführte Wärmemenge Q_{abg} ist gleich der Differenz der inneren Energien bei diesen Zuständen, während die zugeführte Wärmemenge Q_{zu} durch die bei der Verbrennung frei werdende Wärmemenge gegeben ist. Sie ergibt sich aus Heizwert und Kraftstoffmenge, so daß der Wirkungsgrad wird

$$\eta_0 = 1 - \frac{u_2^* - u_1}{B H_u} \quad (4)$$

Dabei bezieht sich * auf den Zustand nach der Verbrennung. Für die innere Energie eines Gemisches gilt allgemein:

$$u = \sum \alpha_i \int C_{v,i} dt \quad [\text{kcal/Mol}] \quad (5)$$

wobei $C_{v,i}$ [kcal/Mol⁰] die spezifische Wärme, t [°C] die Temperatur und α [Mol/Mol] den Molanteil der Einzelgase je Mol Gemisch bedeuten.

Während sich u_1 aus den Anfangsbedingungen bestimmen läßt, muß u_2^* von Punkt 1' ausgehend über die Zustände der Punkte 2' und 3 errechnet werden. Dazu ist die Bestimmung der jeweiligen Temperaturen nötig.

Verdichtung und Entspannung kann man nach den Voraussetzungen als Adiabaten behandeln. Es ergibt sich aus dem zweiten Hauptsatz

$$dQ = TdS = dU + APdV \quad [\text{kcal}] \quad (6)$$

unter Anwendung der idealen Gasgleichung

$$PV = G \cdot R \cdot T \quad [\text{mkg}] \quad (7)$$

für ein Mol, sofern C_v in kcal/kg⁰ eingesetzt wird,

$$i = \int_1^2 C_v dT + A R \ln (V_2/V_1) \quad [\text{kcal}] \quad (8)$$

oder, wenn $\epsilon = k-1$ ist,

$$i (T_2) = i (T_1) + 1,396 \ln (V_2/V_1) \quad (9)$$

Nach Neßel (36) erhält man, wenn die mittleren spezifischen Wärmen bekannt sind:

$$i (T) = C_v \left[\frac{T}{\epsilon} + \int_1^2 \frac{C_v'}{T^2} dT - C_v \right] = \int_1^2 \frac{C_v'}{T} dT \quad (10)$$

Die Verbrennung im Ottomotor bei konstantem Volumen ergibt:

$$V_2^* = V_1 \quad (11)$$

und daraus

$$H_2 = u_2^* - u_1$$

Berücksichtigt man die Volumenkontraktion infolge der Verbrennung, so erhält man mit $V_2/V_1 = \epsilon$ folgende Beziehungen:

- Verdichtung: $i (T_2) = i (T_1) + 1,396 \ln \epsilon$
- Entspannung: $i (T_2^*) = i (T_1^*) - 1,396 \ln \epsilon$
- Verbrennung: $H_2 = u_2^* - u_1$

Wenn man die Bedingungen des wirklichen Motors dem Vergleichsprozess angenähert zugrunde legt, führt die oben angeführte Rechnung zu den in Bild 6 dargestellten Abhängigkeiten. Der

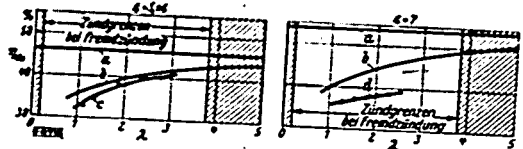
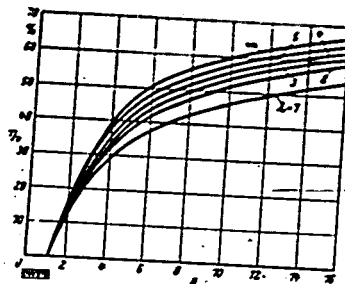


Bild 7. Thermischer Wirkungsgrad η_0 abhängig von der Luftüberschußzahl λ . a Luftwirkungsgrad; b theoretischer Wirkungsgrad; c Versuchswerte von Rindow; d Versuchswerte von Pfr.

Bild 8. Thermische Wirkungsgrade des Vergleichsprozesses (η_0) bei veränderlicher Verdichtung (ϵ) und konstantem Luftüberschuß (λ). Für $\lambda = \infty$ („Luftwirkungsgrad“) gilt: $k = 1,396$

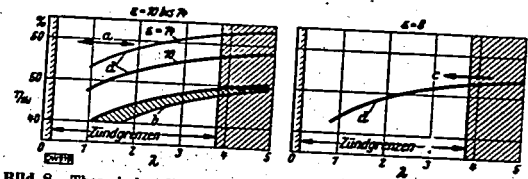


Bild 8. Thermischer Wirkungsgrad η_0 abhängig von der Luftüberschußzahl λ . a und b mittlere Versuchswerte von Erren ($\epsilon = 14$ und 10); c Versuchswerte von Pfr ($\epsilon = 8$); d theoretischer Wirkungsgrad.

Wirkungsgrad η_0 strebt, wie bekannt, mit zunehmendem Luftüberschuß, also bei kleinen Leistungen, einem Höchstwert zu, der im vorliegenden Fall mit einem Polytropenexponenten $k = 1,396$ für reine Luft, d. h. ohne Temperaturanstieg bei der Verbrennung, entsprechend $\lambda = \infty$, dargestellt ist (Luftwirkungsgrad η_L).

Mit dem Verdichtungsverhältnis ϵ wächst der Wirkungsgrad η_0 je nach dem Verfahren, und zwar muß er bei Zuladung mit Erhöhung des Einblasedruckes tiefer werden. Hierbei wachsen nämlich die Endtemperaturen durch die Temperaturerhöhung während der Wasserstoffeinströmung, und gleichzeitig steigt der Gesamtdruck an.

Man kann daher beim Zuladeverfahren etwas kleinere Wirkungsgrade erwarten. Da die Abweichungen jedoch gering sind und im Betrieb andere Einflüsse überwiegen, ist von einer rechnerischen Behandlung abgesehen worden.

Zuleitung kann zwischen den Punkten 1 und 2 bzw. 2' an jeder Stelle während des Verdichtungsprozesses erfolgen. Die Gemische, die den Punkten 1 und 2' entsprechen, werden jedoch im praktischen Betrieb bei Gemischzeiten nicht angewandt. Bei Punkt 1 müßte nämlich ein Kraftstoff-Luft-Gemisch unter einem Druck, der größer als der Außendruck ist (Druckerhöhung von 1 auf 1' oder 1''), dem Zylinder zugeführt werden. Der höhere Anfangsdruck bedingt einen Leck und damit einen größeren Arbeitsaufwand. Dazu kommt, daß zum Zeitpunkt des Zuladens des Einblases noch gasförmig ist (Bild 7), so daß ein Teil des zugeführten Gemisches verfliegt.

Wird der Kraftstoff im Punkt 2' bzw. 2'' zugeführt, so ist zunächst nur die Luft zu verdichten. Der Einblasedruck muß dann jedoch den Verdichtungsdruck übersteigen. Das bedeutet eine schlechte Ausnutzung des Pleurchraums, da sie nur bis zum Verdichtungsdruck erhöht werden kann. Weiterhin steht praktisch keine Zeit für die Durchströmung des Gemisches zur Verfügung. Man könnte also höchstens im Düsenverfahren arbeiten.

Die Zuladung wird daher an irgendeinem Punkt zwischen 1 und 2' vorgenommen werden müssen. Der Ablauf der Verbrennung ist bei beiden Verfahren gleich; ebenso wie adiabatische Verdichtung und Entspannung für beide Fälle angenommen werden kann.

23 Thermischer Wirkungsgrad

Die zur Kennzeichnung der thermischen Eigenschaften des wirklichen Prozesses mit Wasserstoff im Schrifttum angeführten Wirkungsgrade weichen stark voneinander ab (11 bis 18, 25 bis 27, 48, 50, 52, 60). Es war daher von Interesse, den theoretisch erreichbaren Wirkungsgrad η_c unter den gegebenen Bedingungen zu berechnen und die Rechnung mit den angegebenen Versuchswerten zu vergleichen.

- Voraussetzung für die Rechnung war die Berücksichtigung von
 - Veränderlichkeit der spezifischen Wärme.
 - Einfluß der Restgase im Zylinder.
 - Einfluß der Temperatur am Ende des Ansaughubes.
 - Änderung der Gemischzusammensetzung vor und nach der Verbrennung.

Der Einfluß der Dissoziation auf den Wirkungsgrad wurde abgeschätzt, während der Wärmeübergang von und an die Zylinderwand und Überschiebverluste unberücksichtigt blieben. Als Vergleichsprozeß für die Rechnung wurde das im Bild 5 dargestellte Ottoverfahren gewählt. Der Vorgang verläuft also zwischen zwei Adiabaten und zwei Isochoren. Da ein Prozeß unter diesen Voraussetzungen rechnerisch die besten Wirkungsgrade ergibt und in Wirklichkeit zusätzliche, hier nicht berücksichtigte Verluste auftreten, müssen alle Versuchswerte kleiner sein. Der Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses ist, wenn die für die Füllung der Flasche aufgewendete Energie unberücksichtigt bleibt,

$$\eta_c = 1 - (Q_{ab}/Q_{zu}) \dots\dots\dots (3)$$

Die zwischen den Punkten 1 und 1' abgeführte Wärmemenge Q_{ab} ist gleich der Differenz der inneren Energien bei diesen Zuständen, während die zugeführte Wärmemenge Q_{zu} durch die bei der Verbrennung frei werdende Wärmemenge gegeben ist. Sie ergibt sich aus Heizwert und Kraftstoffmenge, so daß der Wirkungsgrad wird

$$\eta_c = 1 - \frac{u_2^* - u_1}{B H_u} \dots\dots\dots (4)$$

Dabei bezieht sich * auf den Zustand nach der Verbrennung. Für die innere Energie eines Gemisches gilt allgemein:

$$u = \sum \alpha_i \int C_{v,i} dt \quad [\text{kcal/Mol}] \dots\dots\dots (5)$$

wobei $C_{v,i}$ [kcal/Mol^o] die spezifische Wärme, t [°C] die Temperatur und α [Mol/Mol] den Molanteil der Einzelgase je Mol Gemisch bedeuten.

Während sich u_1 aus den Anfangsbedingungen bestimmen läßt, muß u_2^* von Punkt 1 ausgehend über die Zustände der Punkte 2 und 3 errechnet werden. Dazu ist die Bestimmung der jeweiligen Temperaturen nötig.

Verdichtung und Entspannung kann man nach den Voraussetzungen als Adiabaten behandeln. Es ergibt sich aus dem zweiten Hauptsatz

$$dQ = TdS = dU + APdV \quad [\text{kcal}] \dots\dots\dots (6)$$

unter Anwendung der idealen Gasgleichung $P \cdot V = G R T$ [mkg] $\dots\dots\dots (7)$
für ein Mol, sofern C_v in kcal/kg^o eingesetzt wird.

$$i = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT + A R \ln (V_2/V_1) \quad \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^o} \right] \dots\dots\dots (8)$$

oder, wenn $\epsilon = \text{konst.}$,

$$i (T_2) = i (T_1) \pm 1,986 \ln (V_2/V_1) \dots\dots\dots (9)$$

Nach Neßler [26] erhält man, wenn die mittleren spezifischen Wärmen bekannt sind:

$$i (T) = C_p \cdot T + \int \frac{C_p'}{T} dT - C_p \cdot T_0 = \int \frac{C_p'}{T} dT \dots\dots\dots (10)$$

Die Verbrennung im Ottomotor bei konstantem Volumen ergibt:

$$V_2^* = V_1 \dots\dots\dots (11)$$

und daraus

$$B H_u = u_2^* - u_1$$

Berücksichtigt man die Volumenkontraktion infolge der Verbrennung, so erhält man mit $V_2/V_1 = \epsilon$ folgende Beziehungen:

Verdichtung: $i (T_2) = i (T_1) + 1,986 \ln \epsilon$

Entspannung: $i (T_2^*) = i (T_1^*) - 1,986 \ln \epsilon$

Verbrennung: $B H_u = u_2^* - u_1$

Wenn man die Bedingungen des wirklichen Motors dem Vergleichsprozeß angenähert zugrunde legt, führt die oben angeführte Rechnung zu den in Bild 6 dargestellten Abhängigkeiten. Der

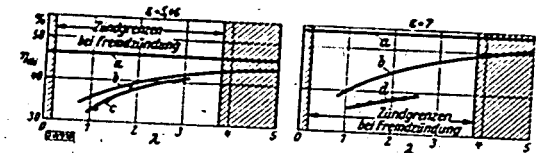
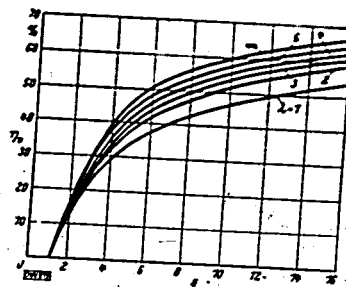


Bild 7. Thermischer Wirkungsgrad η_{th} abhängig von der Luftüberschußzahl λ . a Luftwirkungsgrad; b theoretischer Wirkungsgrad; c Versuchswerte von Ricardo; d Versuchswerte von Pfr.

Bild 6. Thermische Wirkungsgrade des Vergleichsprozesses (η_c) bei veränderlicher Verdichtung (ϵ) und konstantem Luftüberschuß (λ). Für $\lambda = \infty$ („Luftwirkungsgrad“) gilt: $k = 1,396$
 $\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$

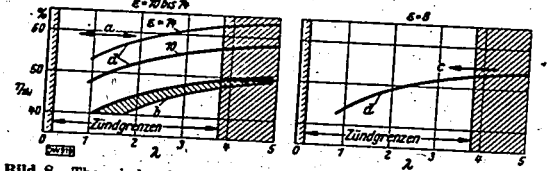


Bild 8. Thermischer Wirkungsgrad η_{th} abhängig von der Luftüberschußzahl λ . a und b mutmaßliche Versuchswerte von Erren ($\epsilon = 14$ und 10); c Versuchswerte von Voss ($\epsilon = 8$); d theoretischer Wirkungsgrad.

Wirkungsgrad η_c strebt, wie bekannt, mit zunehmendem Luftüberschuß, also bei kleinen Leistungen, einem Höchstwert zu, der im vorliegenden Fall mit einem Polytropenexponenten $k = 1,396$ für reine Luft, d. h. ohne Temperaturanstieg bei der Verbrennung, entsprechend $\lambda = \infty$, dargestellt ist (Luftwirkungsgrad η_L).

Mit dem Verdichtungsverhältnis ϵ wächst der Wirkungsgrad η_c je nach dem Verfahren, und zwar muß er bei Zuladung mit Erhöhung des Einblasedruckes tiefer werden. Hierbei wachsen nämlich die Endtemperaturen durch die Temperaturerhöhung während der Wasserstoffeinströmung, und gleichzeitig steigt der Gesamtdruck an.

Man kann daher beim Zuladeverfahren etwas kleinere Wirkungsgrade erwarten. Da die Abweichungen jedoch gering sind und im Betrieb andere Einflüsse überwiegen, ist von einer rechnerischen Behandlung abgesehen worden.

Vergleicht man nun die erreichten Wirkungsgrade mit den im Versuch geforderten, so ergibt sich bei den Werten von *Herold* (50) und auch von *Pyg* (48) eine gute Übereinstimmung. In Bild 7 sind die Versuchswerte *Herold*, der mit einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 5,45$ arbeitete, und von *Pyg*, der ein Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 7$ erreichte, zusammen mit dem erreichten thermischen Wirkungsgrad und dem „Luftwirkungsgrad“ über dem Luftüberschußzahlen aufgetragen. Gleichartig sind, wie auch in allen folgenden Diagrammen, die Zündgrenzen der Wasserstoff-Luft-Gemische bei Fremdzündung eingetragen. Der außerordentlich große Zündbereich, der von $\lambda = 0,2$ bis $\lambda = 3,8$ reicht, kennzeichnet den Wasserstoff als vornehmungsgegenwärtiges Gem. *Herold*'s Werte kommen dem erreichten sehr nahe. Sie liegen ebenso wie die von *Pyg* in der Nähe möglichen Grenzen in Bezug auf Zündbereich und Abdruckwert des Wirkungsgrades.

Bei den folgenden Ergebnissen legen die Wirkungsgrade vorwiegend auf die Realisierung eines bestimmten Motors, also abhängig von dessen zusätzlicher Verlusten, vor. Nun wurden Heißwertwerte aus früheren Versuchen, wie sie *L'Homme* (54) zusammengestellt, verwendet und damit die Versuchswerte von *Erren* und *Los* umgerechnet, um Vergleichsmöglichkeiten zu schaffen.

Auf Bild 8 sind Werte *Erren* (11 bis 18, 25 bis 27) und die von *Los* (10) zusammengestellt. Für ein Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10$, mit dem *Erren* arbeitete, liegen die umgerechneten Werte etwa in der schraffierten Fläche. Es ist zu ersehen, daß auch diese Wirkungsgrade durchaus im Bereich der möglichen liegen, während die Angabe von $\eta_{th} = 45\%$ für einen effektiven Wirkungsgrad, selbst bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 14$, das *Erren* als das höchste von ihm erreichte theoretischen Gemische liegen. Gerade in diesem Gebiet mußte aber der Wirkungsgrad erheblich tiefer liegen.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang noch die Werte, wie sie *Los* bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 8,0$ angibt, so erkennt man, daß diese Werte nicht möglich sind. Selbst an der unteren Zündgrenze, also bei höchstem Luftüberschuß, ist der angegebene Wert noch zu günstig.

Der Vergleich der Wirkungsgrade lehrt, daß je nach dem Verdichtungsverhältnis Wirkungsgrade, die in den gleichen Größenordnungen wie bei anderen Verbrennungskraftmaschinen liegen, sowohl bei Aufladetrieb als auch bei dem reinen Ottoverfahren zu erreichen sind. In manchen Fällen sind die Angaben der bisher angeführten Versuchsergebnisse jedoch sehr optimistisch dargestellt.

34 Leistung

Der der Leistung entsprechende mittlere Druck des Vergleichsprozesses ist

$$p_e = \frac{427 B H_u}{10^4 V_1} \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \eta_e \text{ [kg/cm}^2\text{]} \dots \dots \dots (16)$$

wenn V_1 das Volumen je Mol Ladung ist, d. h.

$$p_e = i \cdot f (\lambda, z, c),$$

wenn man das Verdichtungsverhältnis ϵ ungeändert läßt. Bild 9 zeigt in Abhängigkeit dieser mittleren Drücke die Wirkungsgrade η_e für konstante Verdichtungsverhältnisse ϵ und Luftüberschußzahlen λ .

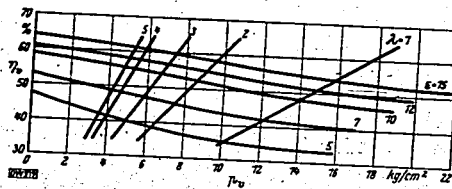


Bild 9. Thermischer Wirkungsgrad η_e abhängig vom mittleren Druck p_e des Vergleichsprozesses für konstante Verdichtungsverhältnisse ϵ und Luftüberschußzahlen λ .

schußzahlen λ . Man erkennt die hohen Leistungen, die beim Zuladeverfahren möglich sind (siehe auch Bild 1) und die Mitteldrücke entsprechen, wie sie bei Otto- und Dieselmotoren auftreten. Der Wirkungsgrad zeigt dabei ähnliche Verhältnisse, wie sie bei Bild 6 besprochen wurden. Für höchste Wert entsprechend dem Verdichtungsverhältnis. Die Luftüberschußzahlen als Funktion der Kraftstoffmenge sind nach der oben angeführten Gleichung Strahlen, die durch den Koordinatenanfangspunkt, laufen.

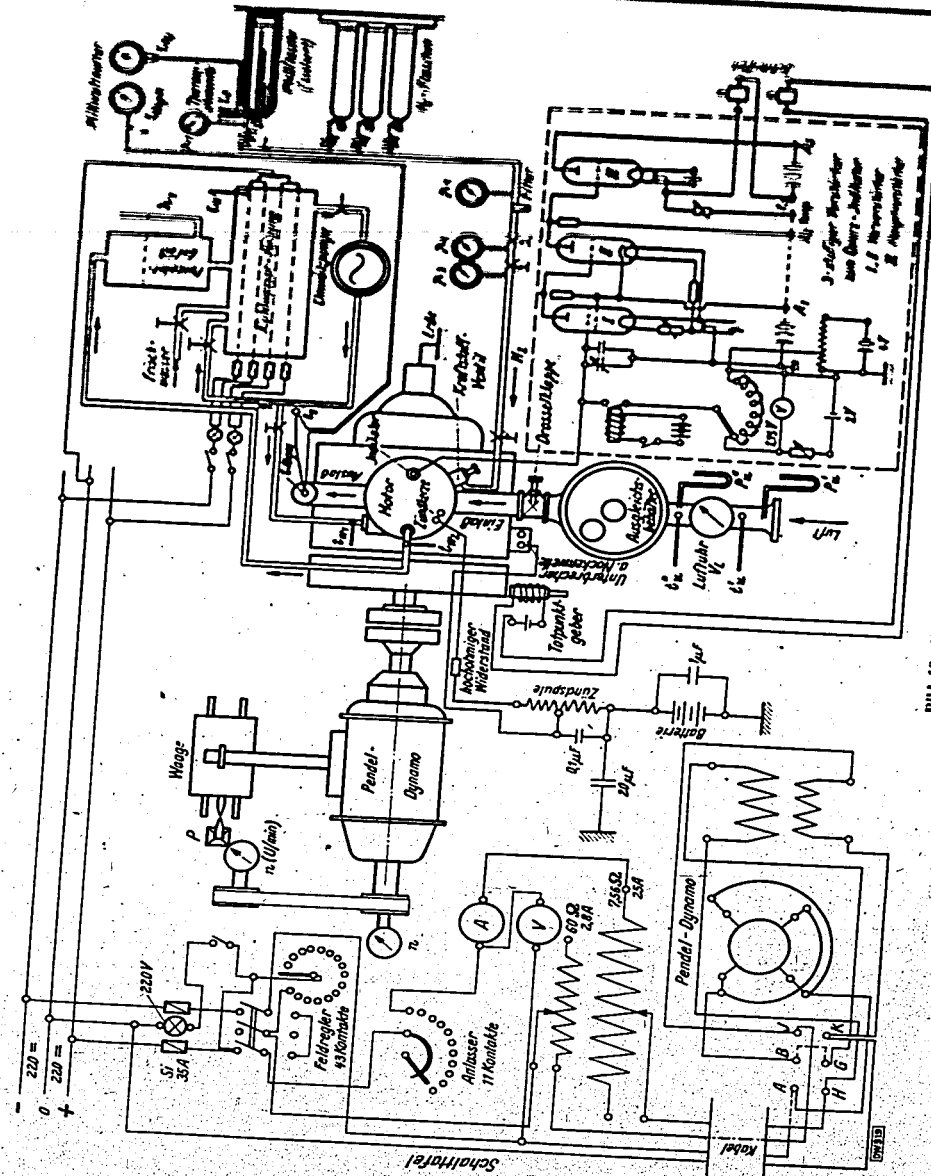


Bild 10. Versuchsanlage.

33 Temperaturen und Drücke

Die Verbrennungstemperaturen und die Verbrennungsdichte liegen in den höchsten Grenzen. Da aber die erreichten Temperaturen und Drücke infolge von Verlusten bei weitem nicht erreicht werden und da im Motor der auf die Zeit bezogene Druckanstieg, also die Drucksteigerungsgeschwindigkeit, meist mehr als der höchste Druck ist, ist die Drucksteigerungsgeschwindigkeit abzumessen. Die Verbrennungsgeschwindigkeit liegt, wie hieraus von eingehenden Messungen an der Verbrennungskammer, so daß nur der Versuch im Motor darüber Aufschluß geben kann.

Zusammengefaßt ergibt sich aus den theoretischen Überlegungen, daß die Verbrennung von Wasserstoff im Motor unter ähnlichen Verhältnissen wie bei anderen Gasmotoren durchzuführen ist und daß es möglich sein muß, rein motorisch betrachtet, mit Wasserstoff günstige Kraftstoffverbräuche und damit günstige Wirkungsgrade zu erreichen.

4 Anlage und Durchführung der Versuche

41 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage zeigt Bild 10. Zur Durchführung der Versuche fand ein stehender Einzylindermotor mit einem Hub von 140 mm und einer Bohrung von 100 mm entsprechend einem Hubvolumen von 1,1 l Verwendung (Bild 11). Es wurde mit Fremdzündung durch eine Bosch-Kerze gearbeitet. Die Primärspannung der verwendeten Bosch-Zündspule betrug 12 V. Das Verdichtungsverhältnis des Motors konnte durch Einsetzen von Platten verschiedener Dicke zwischen Kopf und Zylinder geändert werden.

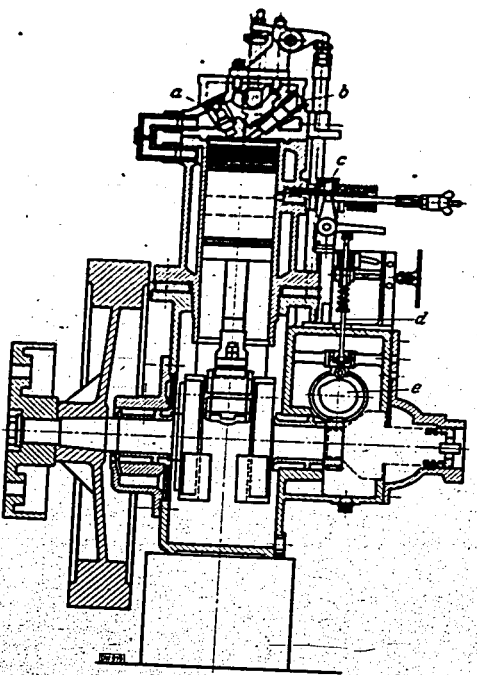


Bild 11. Schnittbild des Versuchsmotors. a Zündkerze; b Quarzindikator; c Kraftstoffventil; d Ventiltrieb; e Kraftstoffnocken.

Der Kraftstoff wurde durch ein seitlich durch die Zylinderwand geführtes, federbelastetes Ventil zugeführt (Bild 12), das seinen Antrieb über die Nockenwelle erhielt. Bei früheren Versuchen wurde der Kraftstoff radial eingeblasen. Später, als auf das Kurbelgehäuse ein eigens für die Versuche angefertigter Zylinder aufgeschraubt worden war, konnte mit tangentialer Einblasung gearbeitet werden. Das Ventil selbst wurde mehrfach abgeändert. Die Hauptzahl der Versuche wurde mit einem Ventil veränderlichen Hubes durchgeführt.

Der Kraftstoffverbrauch wurde durch Druck- und Temperaturmessung an einer wärmeisolierten Meßflasche, deren Volumen bekannt war, festgestellt.

Der Wasserstoffdruck wurde vom Flaschendruck mit zwei Druckreglern, die in Stufen von 150 atü auf 20 atü und von 20 atü auf 6 atü arbeiteten, reduziert.

Die Leistung des Motors wurde mit einer Pendeldynamo bestimmt. Die Kühlwassertemperaturen konnten beliebig eingestellt werden. Die Wassermessung selbst wurde in einem Poncelet-Gefäß mit geeichten Ausflußdüsen ausgeführt. Zur Messung der Luftmenge diente

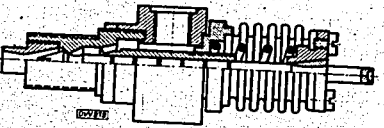


Bild 12. Schnittbild des Kraftstoffventils.

eine trockene Luftluft, die ein Anpaßschubhaken vorgehalten war. Der Druckverlust wurde durch piezoelektrische Druckmessung mit einem dreiwertigen Verdrängerversuch über einen Schlierenmikrographen im Maße festgehalten.

42 Versuchsbeschreibung

Bei Drehzahlen von 500 bis 1500 U/min wurde der gesamte Leertorquereich des Motors untersucht. Dabei wurden verschiedene Verdichtungsverhältnisse, und zwar 5,4; 7,5; 9,5; 10; 12; 15,4 zugrunde gelegt. Zur Feststellung der Luftüberwuchtsahl wurde die angesaugte Luftmenge gemessen. Eine Kraftstoffmessung wurde zur Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades vor in einer bestimmten Zeitspanne unter Berücksichtigung der Abweichung des Wasserstoffs vom idealen Gas (Gl. 17) berechnet. Für diesen Zweck aufgestellte Diagramme (Bild 13, 14) ermöglichen eine schnelle Bestimmung des Verbrauches. Auf Bild 13 sind die Abweichungen h_0 vom idealen Gas für konstante Temperaturen abhängig vom Druck aufgetragen nach der Gleichung

$$h_0 = \left(\frac{p}{T} \right)_{H_2} \dots \dots \dots (17)$$

Für zwei voneinander verschiedene Zustände ergibt sich daraus der Gewichtsunterschied

$$G = G_1 - G_2 = m \left(\frac{p_1}{T_1} h_1 - \frac{p_2}{T_2} h_2 \right) \text{ [kg]} \dots \dots \dots (18)$$

$$m = (V/H) \cdot 10^4$$

wobei V das Flaschenvolumen und H die Gaskonstante des Wasserstoffs bedeutet. Daraus ergibt sich Bild 14, aus dem für bestimmte Drücke und Temperaturen an Stelle des Gewichts die verbrauchten Wärmemengen abzulesen sind. Für eine Temperatur des Wasserstoffs in der Flasche in der Flasche von p_1 auf p_2 die verbrauchte Wärmemenge W aus der Differenz von W_1 und W_2 .

$$W = G H_0 \dots \dots \dots \text{ [kcal]} \dots \dots \dots (19)$$

Der Wasserstoff hatte vor dem Ventil einen Druck von 6 atü und erreichte im engsten Querschnitt des Ventils die kritische Geschwindigkeit. Die Regelung der eingeblasenen Menge erfolgte

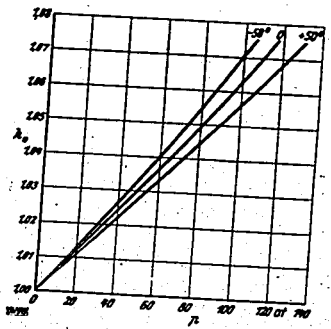


Bild 13. Abweichung h_0 (Gl. 17) des Wasserstoffs vom idealen Gas der Zustandsgleichung bei verschiedenen Drücken und Temperaturen.

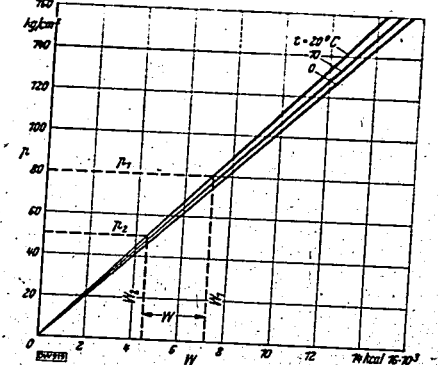


Bild 14. Diagramm zur Verbrauchsmessung. Flaschendruck p abhängig vom Wärmeinhalt W für konstante Temperaturen des Wasserstoffs in der Meßflasche unter Verwendung von Gl. 17, Gl. 18 und Gl. 19.

dann lediglich durch Querschnittsveränderung, und zwar durch Änderung des Ventilhubes über einen Kipphebel mit veränderlichem Hebelarm. Es liegt also bei gleicher Einblasedauer eine Regelung durch Veränderung der Ventilerhebungsgeschwindigkeit vor. Für einzelne Versuche wurde eine zusätzliche Regelung durch Drosselung der angesaugten Luftmenge erreicht. Zu jeder Versuchsreihe wurden Druck-Zeit-Diagramme aufgenommen und zur Auswertung verwendet.

Besonders schwierig gestaltete sich die Abklärung der dem Wasserstoff Unzulänglichkeiten in den Leistungsverbindungen, aber vor allem am Ventiltät, wenn der Ausgang vieler Versuchsversuche. Hierbei hat wegen der Notwendigkeit, eine durch einen unrichtigen Ventiltät, in Erscheinung; vielmehr ist die Genauigkeit der Kraftstoffdosierung, auf deren zuverlässige Ausführung sich die Untersuchungen stützen sollten.

Drehzahl, Drehmoment, Wärmeabgabe an das Kühlwasser und Abgastemperaturen wurden auch den üblichen Verfahren bestimmt.

5 Versuche

Die Versuche sollten die Möglichkeit des Verfahrens überhaupt prüfen und einen Vergleich mit den bisher vorliegenden Ergebnissen am Motor und den Bombenversuchen ermöglichen. Schließlich sollte die den Weg für die anschließenden Versuche aufzeigen.

Voraussetzung mag hier werden, daß die Reibungsverluste des bei den ersten Versuchen verwendeten Motors sehr hoch waren. Die Meßwerte, die sich auf die effektive Leistung beziehen, mußten daher schlechter ausfallen als solche, die unter normalen Verhältnissen gemessen wurden.

Bei dem Betrieb des Motors stellten sich anfänglich Schwierigkeiten während des Anlaufens ein, die ihre Ursachen in einem Wasserdampfdruck auf der Zündkerze hatten. Der Glühwert der Kerze wurde daher auf $W 95 A_2$, das kleinste des bei Bosch üblichen Maßes, herabgesetzt, um ein Beschlagen zu vermeiden.

Das Erreichen bester Leistungs- und Verbrauchswerte war stark von der Kühlwassertemperatur abhängig. Als günstige Temperaturen ergaben sich etwa $60^\circ C$ für den Eintritt und $70^\circ C$ für den Austritt des Kühlwassers.

Von besonderem Interesse waren die ersten Druckindizierungen, die ergeben mußten, ob die Ergebnisse der Bombenversuche in bezug auf Verbrennungsgeschwindigkeit und Zündgrenzen auf den Motor zu übertragen waren. Wie später noch ausführlicher dargestellt werden wird, konnten Verbrennungsgeschwindigkeiten, welche die von flüssigen Kraftstoffen bekannten wesentlich übersteigen, nur selten beobachtet werden. Die Angaben über die Zündgrenzen von Wasserstoff-Luft-Gemischen, die man aus Bombenversuchen entnehmen konnte, treffen offenbar auch für motorische Verhältnisse zu, wenn man zunächst die untere Zündgrenze betrachtet. Bei reiner Qualitätsregelung wurde die geringstmögliche Leerlaufdrehzahl bei etwa 12% Kraftstoffgehalt in der Mischung erreicht. Wurde das Gemisch noch weiter verdünnt, so setzte die Zündung öfters aus. Diese Werte stimmen mit den bei Bombenversuchen unter ähnlichen Drücken ermittelten gut überein.

Während bei den Druckdiagrammen für höhere Mitteldrücke der zeitliche Verlauf und die Druckhöhe aufeinanderfolgender Diagramme gleich waren, wurden für kleinere Mitteldrücke, etwa von $3,0 \text{ kg/cm}^2$ ab, Streuungen beobachtet. Da eine Zündzeitpunktveränderung keine Besserung brachte, dürfte der Grund hierfür hauptsächlich in einer ungenügenden Durchmischung gelegen haben. Bei kleineren Leistungen, von einer Luftüberschußzahl von etwa $\lambda = 2,5$ ab, befindet man sich schon nahe an der unteren Zündgrenze, und es ist durchaus möglich, daß sich um die Zündkerze herum verschiedene reiche Gemische befunden haben. Ein weiterer Grund für dieses Verhalten dürfte jedoch die Druckregelung, die bei diesen Versuchen noch angewendet wurde, gewesen sein. Die Regelung des Wasserstoffdruckes bei konstantem Durchtrittsquerschnitt bedeutet für geben, daß diese Drücke sehr niedrige Drücke vor dem Einblaseventil. Untersuchungen haben ergeben, daß diese Drücke nur unwesentlich über den Drücken liegen, die im Zylinder herrschen. Es ist daher möglich, daß die geregelte Zufuhr des Wasserstoffs durch Druckschwankungen gestört wird. Damit ist aber ein unmittelbarer Einfluß auf das Mischungsverhältnis verbunden. Da bildung in dem unzerklüfteten Brennraum hauptsächlich von der Drehzahl abhängig. Die unregelmäßige Verbrennung mußte also auch auf die Art der Zuführung und der Regelung des Wasserstoffs zurückgeführt werden.

Die Motorleistung, die bei den ersten Versuchen erreicht wurde, entsprach ebenso wie der Kraftstoffverbrauch und der thermische Wirkungsgrad nicht den Erwartungen.

Es stellte sich später heraus, daß eine Überladung, wie sie zunächst angestrebt worden war, nicht stattgefunden hatte. Die Überschneidung der Öffnungsdauer von Einblase- und Ansaugventil lag durch vorgegebene Konstruktionen des umgebauten Motors so ungünstig, daß bei höheren Einblasedruck Wasserstoff vermischt mit Öl durch das Einblaseventil als grauer Nebel deutlich sichtbar austrat. Die wirklich vorhandene Zeit zur Aufladung war dann so klein, daß diese nicht genügend wirksam werden konnte.

Damit erklären sich auch die sehr großen Verbräuche und der schlechte thermische Wirkungsgrad, der bei den ersten Versuchen festgestellt wurde. Diese Werte eignen sich daher auch nicht

für unmittelbare Vergleiche mit den von anderen Seiten angegebenen Verbrauchswerten über die Verwendung von Wasserstoff im Motor.

Auf dem Vorkursus konnten innerhalb der Hauptversuche aufgeführt und unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse durchgeführt werden.

Zunächst wurde die Regelung der Drehzahl bei konstanter Einblasegeschwindigkeit ausgebildet. Die Einblasegeschwindigkeit erfolgte konstant, um dabei die kinetische Energie des Wasserstoffstromes zur Wärmehaltung des Zylinderinhalts auszunutzen. Die Stoßwellen wurden so gelegt, daß ein Wasserstoffstrom aus dem Zylinder ausströmte und daß eine Aufladung erzielt werden konnte.

Unter Zugrundelegung dieser Änderungen und Beibehaltung der bis jetzt befandenen Kühlwassertemperaturen und Erhöhung der Drehzahl von 1000 U/min auf 1500 U/min und maximal 2000 U/min wurden die folgenden Versuche durchgeführt.

Die Ergebnisse der Versuche sind in den folgenden Ausführungen mit angeführt, soweit dies nötig erschien.

6 Versuchsergebnisse

6.1 Leistung

Eingangs wurde schon darauf hingewiesen, daß auch bei Kraftstoffen mit geringem Heizwert unter Anwendung der Zuladung hohe Mitteldrücke zu erreichen sind. Sie kommen größenordnungsmäßig denen gleich, wie sie von flüssigen Kraftstoffen bekannt sind. Die Versuche mit Wasserstoff bestätigen dies und Bild 15 zeigt, daß bei mäßigem Luftüberschuß — Gebiete, in denen

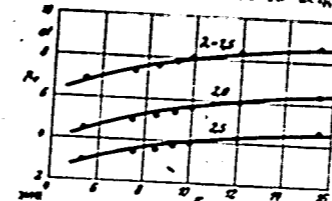


Bild 15. Mittlerer Druck p_m abhängig vom Verdichtungsverhältnis λ bei konstanten Luftüberschußzahlen λ .

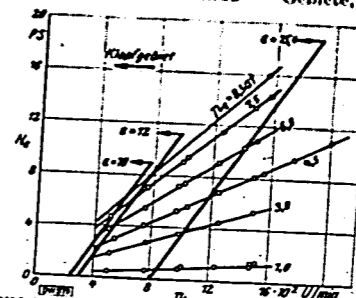


Bild 16. Nutzleistung N_e abhängig von der Drehzahl n bei konstanten Mitteldrücken p_m ; eingezeichnet sind ferner die Klopfgrenzen für verschiedene Verdichtungsverhältnisse λ .

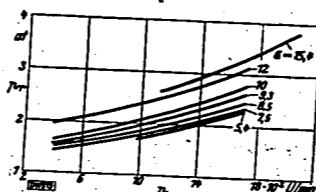


Bild 17. Mittlerer Druck p_m bezogen auf die Verlustleistung abhängig von der Drehzahl n bei konstanten Verdichtungsverhältnissen λ .

ein geordneter Betrieb gewährleistet ist — Mitteldrücke bis zu $p_m = 8,5$ at zu erreichen sind. Dabei spielt natürlich das Verdichtungsverhältnis eine Rolle, und es ist ersichtlich, daß mit zunehmendem Verdichtungsverhältnis der Mitteldruck bei konstantem Mischungsverhältnis anwächst. Erhöhte Verdichtung bei Beginn der Verbrennung bedingt höhere Enddrücke und -temperaturen. Die Brenngeschwindigkeit wächst hierbei, und man gelangt zur Annäherung an eine Gleichraumverbrennung mit höheren Verbrennungsenddrücken. Daraus ergibt sich eine Leistungssteigerung. Die Luftüberschußzahlen liegen bei den höchsten Mitteldrücken noch etwa 20% über dem theoretischen Gemisch. Das bedeutet aber, daß ein ungestörter Betrieb in jedem Fall möglich ist. Bei kleinsten Mitteldrücken hingegen könnten so große Luftüberschußzahlen erreicht werden, wie sie selbst bei Gasmaschinen selten beobachtet wurden.

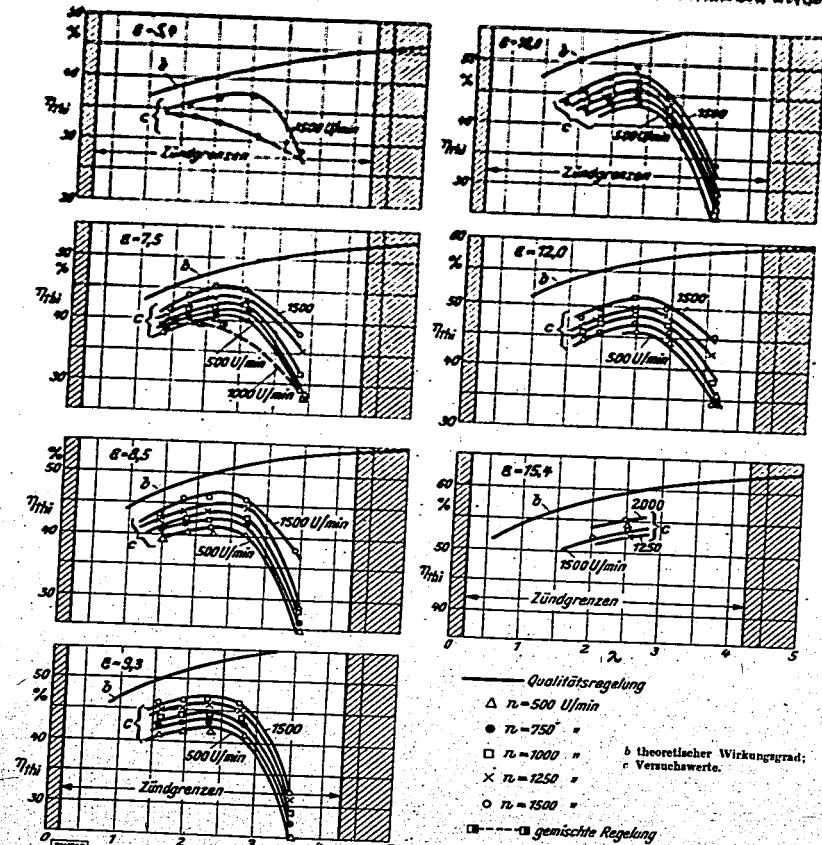
In welchen Grenzen und in welcher Weise der Klopfvorgang die Leistung beeinflusst, wird an anderer Stelle noch dargelegt werden. Die durch Klopferscheinungen gegebenen Grenzen sind in Bild 16, auf dem die effektive Leistung N_e in Abhängigkeit von der Drehzahl n dargestellt sind,

000744

eingemessen. Es läßt sich aus dem Bild erkennen, daß man sich mit steigenden Drehzahlen immer weiter vom Klippenrand entfernt, und daß ein höherer Mischungsverhältnis λ eine Annäherung an denselben bewirkt. Von Bedeutung dabei ist weiterhin die Verdichtungsverhältnisse ϵ , die bei erhöhter Drehzahl auch bei den höchsten Verdichtungsverhältnissen. Es ergibt sich auch für die vorhandenen Versuche vorgegeben waren, mäßige Leistungen zu erzielen sind, ohne daß störende Einflüsse durch Klippen zu befürchten wären.

Die Leistungsverluste in ihrer Gesamtheit sind in Bild 17 abhängig von der Drehzahl aufgetragen. Bei hohen Drehzahlen, etwa über 1500 U/min, werden die Verluste verhältnismäßig hoch. Dies war zu erwarten, da der Motor anfangs nur für 750 U/min ausgelegt war. Ohne großen Aufwand wurde er jedoch, wie schon erwähnt, für einen Drehzahlbereich bis maximal 2000 U/min eingerichtet, um einen Vergleich mit den bisher vorhandenen Versuchen durchführen zu können. Die großen mechanischen Verluste sind also nicht auf Vorgänge im Motor während der Verbrennung, etwa durch Verbräunungsstoffe, zurückzuführen. Sie haben auch keinen Einfluß auf deren inneren Ablauf, der den wesentlichen Teil der Leistungsbildung bildet.

Höchstleistungen von 17 PS bei 1500 U/min und einem Hubraum von 1,1 l, d. h. Literleistungen von 15,5 PS/l, konnten ohne Schwierigkeiten erreicht werden. Von noch höheren Leistungen, die gewiß möglich sind, wurde abgesehen, da eine Überbeanspruchung des Motors vermieden werden sollte.



130000

66 Thermischer Wirkungsgrad

Verdichtungsverhältnis, Mischungsverhältnis und Leistung bzw. mittlerer Druck über den größten Klippenrand von den untersuchten Abhängigkeiten auf den thermischen Wirkungsgrad aus. Unter Berücksichtigung dieser Größen sind die bei den einzelnen Verdichtungsverhältnissen ϵ gemessenen Werte in Bild 18 dargestellt. Wegen der schon besprochenen verhältnismäßig großen mechanischen Verluste ist zunächst nur der auf die indizierte Leistung bezogene Wirkungsgrad η_{hi} und zwar für konstante Drehzahlen, über der Luftüberschusszahl aufgetragen. Gleichzeitig enthält das Diagramm die Wirkungsgrade des angenäherten theoretischen Prozesses (b) und die oben und unten Zündgrenze des Wasserstoff-Luft-Gemisches bei Drücken, die etwa dem Verdichtungsdruck entsprechen.

Der Wirkungsgrad wächst nach den Versuchsergebnissen entsprechend der Theorie mit steigender Verdünnung des Gemische, ohne dabei die errechneten Absolutwerte zu erreichen. Dies dürfte auch kaum möglich sein, da die Rechnung auf einem den wirklichen Verhältnissen nur angenäherten Verfahren beruht. Bis zu einem Luftüberschuß von etwa $\lambda = 2,5$ ergeben sich bei allen untersuchten Verdichtungsverhältnissen recht günstige Wirkungsgrade, während bei noch größerem Kraftstoffmangel ein außerordentlich starker Abfall des Wirkungsgrades ersichtlich ist. Allerdings befindet man sich, wie eine Nachrechnung ergibt, schon sehr nahe an der unteren Zündgrenze legt. Der Bestwert des Wirkungsgrades liegt in fast allen Fällen bei $\lambda = 2,0$.

Die entsprechenden Abhängigkeiten vom Verdichtungsverhältnis (Bild 19) zeigen auch hier einen den theoretischen Werten mit $\lambda = \infty$ angenäherten Verlauf, ohne sonderliche Abweichungen. Die Bestwerte des indizierten Wirkungsgrades η_{hi} liegen für Verdichtungsverhältnisse $\epsilon = 5$ bis 10 punkt günstige Betriebsbedingungen an.

Der Einfluß der Drehzahl tritt bei diesen Versuchen besonders in Erscheinung. Bei Drehzahl-erhöhungen treten Zunahmen des Wirkungsgrades auf (Bild 20), die sich vermutlich aus dem Ge-

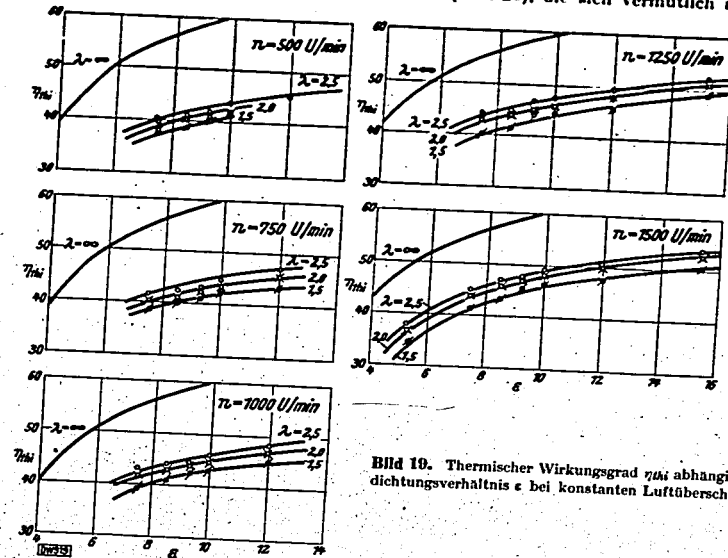


Bild 18. Thermischer Wirkungsgrad η_{hi} abhängig vom Verdichtungsverhältnis ϵ bei konstanten Luftüberschusszahlen λ .

Bild 19 (nebenstehende Seite). Thermischer Wirkungsgrad η_{hi} abhängig von der Luftüberschusszahl λ bei konstanten Drehzahlen n und Verdichtungsverhältnissen ϵ .

mischungsverhältnis ergibt. Allerdings scheint dieser Einfluß nach Erreichen einer bestimmten Drehzahl von geringerer Bedeutung zu werden.
 Der dem Mischungsverhältnis entsprechende mittlere Druck und die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von ihm interessieren hauptsächlich im Hinblick auf ein günstiges Verhältnis von höchster Leistung zu bestem Wirkungsgrad. In Bild 21 sind für die untersuchten Verdichtungsverhältnisse wiederum die Wirkungsgrade η_m und η_{th} dargestellt und zwar der innere (η_m) über dem indizierten mittleren Druck p_i und der äußere (η_{th}) über dem effektiven mittleren Druck p_e . Der große Unterschied beider ist schon ersichtl. Trotzdem ergeben sich auf die Kühlung bezogene Wirkungsgrade η_m von maximal 25%. Das Optimum liegt nun nicht bei hoher Leistung, sondern bei mittleren Drücken von $p_i = 6$ bis 7 kg/cm^2 . Allgemein ist zu erkennen, daß ein wirtschaftlicher Betrieb zwischen $p_i = 4,5 \text{ kg/cm}^2$ und $7,5 \text{ kg/cm}^2$ zu erwarten sein wird, wenn man von dem

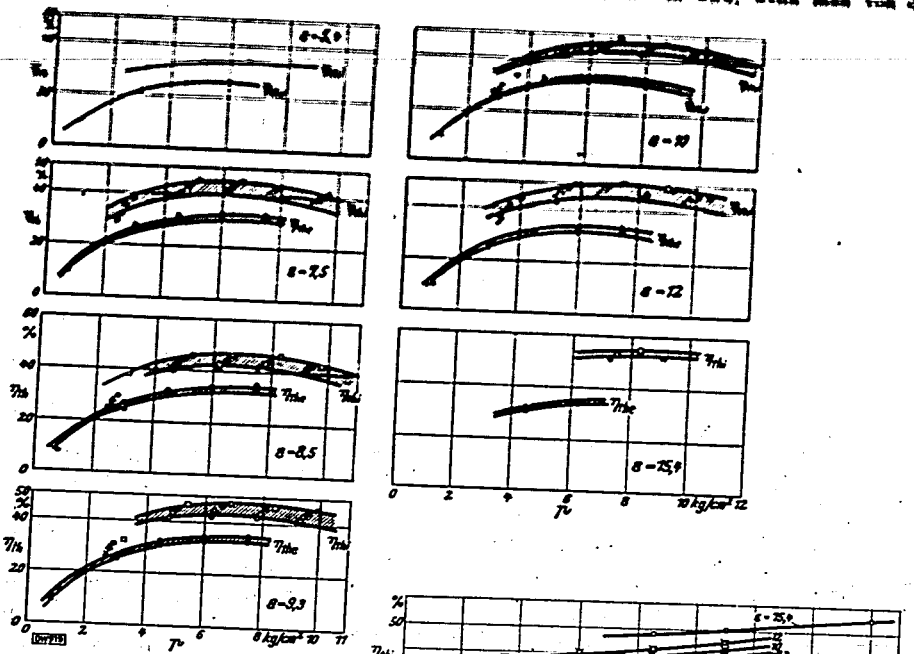


Bild 21. Thermische Wirkungsgrade η_m und η_{th} abhängig vom mittleren Druck p (p_i bzw. p_e).

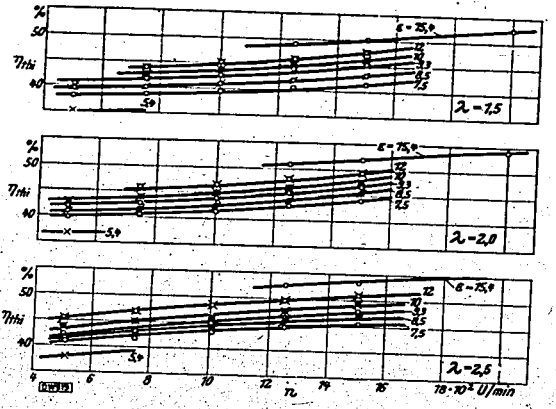


Bild 20. Thermischer Wirkungsgrad η_{th} abhängig von der Drehzahl n für konstante Verdichtungsverhältnisse ϵ .

bei diesem Verfahren angewandten Verfahren ausgeht. Der große Abfall bei kleinstem mittlerem Druckem könnte vielleicht durch Abändern des Verfahrens bis zu einem gewissen Grade vermieden werden. Auch der indizierte Wirkungsgrad η_m zeigt ähnliche Abhängigkeiten, und man kann versuchen zu verbessern sind. Doch darf man sich davon nicht allzuviel versprechen, denn es ist eine Frage der Wirtschaftlichkeit, ob sich die Aufwände dafür lohnen würden, wenn überhaupt das Verfahren praktische Bedeutung gewinnen sollte. Die motorischen Ausnutzungsmöglichkeiten und die thermischen Eigenschaften sprechen jedenfalls dafür.

63 Kraftstoffverbrauch

Der Verbrauch an Wasserstoff im Motor ist im folgenden in Wärmeeinheiten auf die Leistung und Zeiteinheit in kcal/PS.h bezogen. Es ergibt sich daraus für spätere Betrachtungen gegenüber dem Gewicht- und Raumaß mancher Vorteil.
 Die spezifischen Verbräuche sind abhängig vom Mischungsverhältnis und vom mittleren Druck aufgeschichtet (Bild 22, 23). Dabei entspricht das Band zwischen den zwei begrenzenden Kurven in jedem Fall der Abweichung, die sich aus der Änderung der Drehzahl ergibt.

Bild 22. Kraftstoffverbrauch k und k_i abhängig von der Luftverhältnis λ .

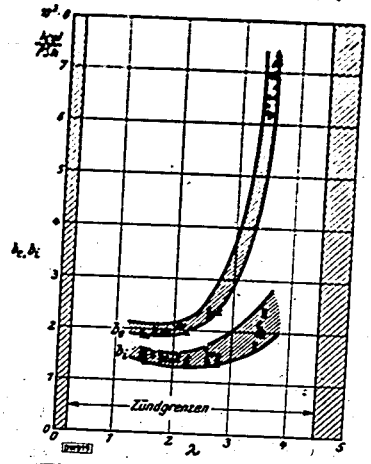
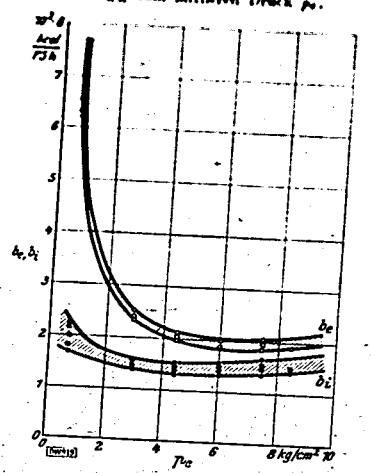


Bild 23. Kraftstoffverbrauch k und k_i abhängig vom mittleren Druck p_e .



Es interessiert nun aus Wirtschaftlichkeitsgründen hauptsächlich der auf die Nutzleistung bezogene Kraftstoffverbrauch. Dazu läßt sich sagen, daß bei großem Luftüberschuß und kleinen mittleren Drücken, also z. B. bei Leerlauf, ein Betrieb in der hier vorgenommenen Weise außerordentlich unrentabel wird. Der Verbrauch kann dabei bis zu $b_e = 7000$ bis 8000 kcal/PS.h an dem kraftstoffarmen Gebiet hin steigt, je größer der Luftüberschuß ist, denn nach dem besten thermischen Wirkungsgrad entsprechen, hält sich der Verbrauch in fast gleichbleibenden und engen Grenzen. Es wurden bei mittleren und hohen Lasten mit dem Durchschnittswert $b_e = 2000 \text{ kcal/PS.h}$ und dem Bestwert $b_e = 1800 \text{ kcal/PS.h}$ recht gute Ergebnisse erzielt. Die Unterschiede zwischen den auf die indizierte und die Endleistung bezogenen Werten, die durch Mehrverbrauch infolge großer mechanischer Verluste und ungünstiger Verbrennungsverhältnisse bedingt sind, müßten in Annäherung an die b_e -Kurve verbessert werden. Hieraus ergibt sich auch die Möglichkeit, vielleicht im Leerlauf mit geringeren Verbräuchen auszukommen.

64 Wärmeverteilung

Die Aufteilung der Überschusswärme, die nicht zur nutzbaren Arbeitsleistung herangezogen wird und für den ungestörten Lauf des Motors von großer Bedeutung ist, zeigt Bild 24. Die

prozentuale Verteilung der bei der Verbrennung erzeugten Wärmemengen (4) ist hieraus abhängig vom Luftüberschuß λ . Es entspricht dabei die mittlere Wärmemenge dem auf die Endleistung bezogene Wirkungsgrad. Sie liegt nach früheren Ausführungen etwa bei einem Drittel der möglichen Wärmemenge für höchste Leistung. Von den restlichen zwei Dritteln verteilen sich, ohne daß schädliche Wärmeverluste dabei aufgetreten wären, etwa 25% der Gesamtwärme auf das Kühlwasser, während 35% in dem Abgas abgeführt werden. Der Rest von 10% geht durch Wärmestrahlung und Strahlung verloren. Diese Werte ändern sich mit dem Mischungsverhältnis des Verdichtungsverhältnisses nach den dargestellten Abhängigkeiten. Am ungünstigsten werden die Verhältnisse, wenn bei hohen Leistungen des Motors größere Wärmemengen durch Leitung in Kollben, Zylinder und Gehäuse abgeführt werden.

Die Abhängigkeit der Wärmeabfuhr vom Verdichtungsverhältnis bringt ebenfalls keine wunderlichen Abweichungen von den allgemein bei Verbrennungsmotoren bekannten Ergebnissen.

Es ist noch darauf hinzuweisen, daß die Abgase ohne schädliche Beimischungen sind. Sie bestehen aus etwa 70% Stickstoff und im Grenzfall aus 20% Sauerstoff oder Wasserdampf in einem Mengenverhältnis, das dem Mischungsverhältnis entspricht. Das bedeutet, daß von der zugeführten Wärmemenge etwa 25% im Stickstoff und 10% im Wasserdampf und Sauerstoff der Abgas abgeführt werden.

Auch diese Wärmebilanzen lassen die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens erkennen, wobei die Abgaszusammensetzung besonders beachtenswert erscheint.

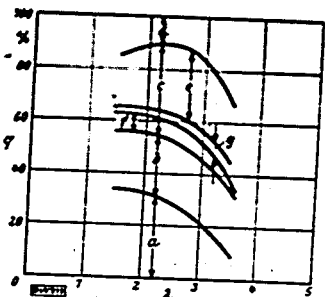


Bild 24. Wärmemengen q abhängig von der Luftüberschußzahl λ .

• austretende Wärme: q im Stickstoff
 • Kühlwasserwärme: q im Wasserdampf
 • Abgaswärme: q im Sauerstoff
 • Restwärme: q in Luft
 $\lambda = 1,5; n = 1500 \text{ U/min.}$

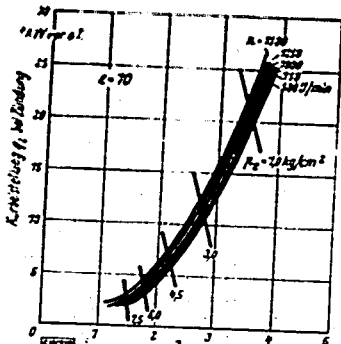


Bild 25. Zündzeitpunkt abhängig von der Luftüberschußzahl λ für konstante Drehzahlen n und mittlere Drücke p_e .

65 Zündzeitpunkt

Bei allen Gasmaschinen ist der große Einfluß des Zündzeitpunktes auf Leistung und Verbrauch bekannt. Oftmals ist bei Anwendung der Gemischregelung eine erhebliche Vorverlegung des Zündzeitpunktes zur Durchzündung des Gemischs mit großer Luftüberschußzahl nötig. In den unteren Fällen (Bild 25) hat sich dabei für kleine Leistungen eine große Vorzündung als nötig erwiesen, um die Verbrennung im rechten Augenblick abzuschließen. Die ungünstigen Verbrennungsänderung des Zündzeitpunktes nicht zu bessern. Beste Leistungen und Wirkungsgrade sind bekanntlich zu erreichen, wenn die Druckspitze der Verbrennung etwa 12°KW nach dem o. T. liegt [48]. Für diese Bedingung betragen die größten Vorzündungen bei dem niedrigsten Verdichtungsverhältnis $\lambda = 5,4$ und Luftüberschußzahlen, wie sie sich nur bei Wasserstoffbetrieb erreichen verhältnis — bis $\lambda = 15,4$ — wurde die Zündung für kleine Leistungen bis etwa 18°KW vor o. T. bei niedrigen Drehzahlen zurückverlegt. Bei höchsten Leistungen konnte in der Nähe des oberen Totpunktes etwa 2 bis 3°KW vor o. T. gezündet werden. Dabei war die Zündeneinstellung weniger empfindlich als bei kleinen Leistungen. Allgemein ließ sich feststellen, daß die Verbrennung in weiten Grenzen unempfindlich gegen Änderungen der Zündeneinstellung war. Am größten zeigte

sich der Einfluß der Zündung bei kleinen Leistungen. Höhere Drehzahlen verlangten geringere Vorverlegung des Zündzeitpunktes, während erhöhte Verdichtung gestattet, mit der Zündung näher an den oberen Totpunkt zu gehen.

In welchem Maße das Vorlegen der Zündkerze oder die Verwendung mehrerer Zündkerzen sich günstig für den Betrieb erweisen würde, wurde nicht untersucht.

66 Klopfgrenzen

Der unerschöpfte Verbrennungsraum des Versuchsmotors war geeignet, ein Klopfen weitestgehend zu verhindern.

Tatsächlich konnten auch hohe Leistungen bei den verschiedensten Verdichtungsverhältnissen erzielt werden, ohne daß Klopferscheinungen auftraten. Erst bei höchsten Leistungen, entsprechend Luftüberschußzahlen, die in der Nähe des theoretischen Gemische lagen, war ein geordneter Betrieb nicht mehr aufrechtzuerhalten. Bild 26 zeigt den Zusammenhang zwischen Luftüberschuß

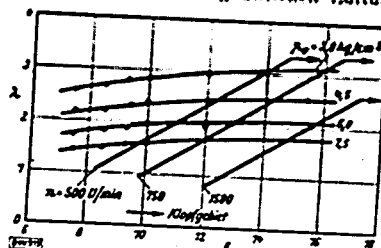


Bild 26. Luftüberschußzahl λ abhängig vom Verdichtungsverhältnis ϵ bei konstanten mittleren Drücken p_e ; eingezeichnet sind ferner die Klopfgrenzen für verschiedene Drehzahlen n .

und Verdichtungsverhältnis bei konstanten Mittelldrücken. Für einige Drehzahlen sind die Grenzen eingezeichnet, bei denen klopfreier Betrieb gewährleistet ist. Es zeigte sich, daß mit zunehmender Drehzahl das klopfreie Gebiet größer wird. Ebenso ergab schon Bild 16, daß mit zunehmender Verdichtung nur Drehzahlerhöhungen den ungestörten Betrieb ermöglichten.

Immerhin konnte bis zu einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 12$ bei Drehzahlen von 750 bis 1500 U/min Mittelldrücke bis zu $p_e = 8 \text{ kg/cm}^2$ ohne Störungen erreicht werden. Sogar bei $\epsilon = 15,4$ wäre es gewiß möglich gewesen, zu höheren mittleren Drücken zu gelangen. Jedenfalls sind bei den vorliegenden Untersuchungen bei Drehzahlen von 600 bis 1500 U/min und Verdichtungsverhältnissen von $\epsilon = 5$ bis $\epsilon = 12$ alle Leistungsstufen bis zu $p_e = 7,5 \text{ kg/cm}^2$ ohne Klopfen angewendet worden. Klopfstörungen führen nach diesen Versuchen bei Wasserstoffbetrieb erst dann zu Schwierigkeiten, wenn man sich den Leistungsgrenzen des Motors nähert.

Selbstzündungen sind in keinem Fall beobachtet worden. Selbst bei den höchsten Verdichtungsverhältnissen beginnt die Verbrennung erst nach der Zündung durch den Zündfunken, wie die im folgenden gezeigten Diagramme beweisen.

67 Verbrennung

Die Ansicht, daß die Verbrennung von Wasserstoff-Luft-Gemischen im Motor entgegen den Ergebnissen der Bombenversuche nicht unbedingt zu unberechenbaren Verbrennungsgeschwindigkeiten und Höchstldrücken führt, ist durch verschiedene Versuche bereits erwiesen.

Die hier angeführten Druck-Zeit-Diagramme (Bilder 27 bis 32), die nur eine kleine Auswahl darstellen können, zeigen nun, daß bei hohen Leistungen zwar hohe Verbrennungsenddrücke auftreten, daß aber die Verbrennungsgeschwindigkeiten durchaus beherrschbar sind.

Die Bilder 27, 28 und 29 zeigen Diagramme für verschiedene Mittelldrücke p_e bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen ϵ . Es wurden zum Teil besonders vom Normalzustand abweichende Diagramme ausgewählt. In allen Fällen liegen für mittlere Lasten auch bei höchsten Verdichtungen die Spitzendrücke unter 60 at , und nur bei sehr hohen Mittelldrücken steigen die Enddrücke bis zu 90 at an. Es konnten jedoch Beharrungszustände, bei denen diese Druckspitzen auftraten, über längere Versuchsreihen ohne Störungen eingehalten werden. Bei kleinsten Leistungen liegt der Verbrennungsenddruck kaum über dem Verdichtungsdruck. Die Verbrennung erfolgt dabei sehr unregelmäßig, und es ergeben sich alle Formen von Diagrammen etwa nach Bild 30. Dabei setzt die Zündung über mehrere Hübe oftmals aus, um später wieder eine Verbrennung mit einem brauchbaren Diagramm zu ergeben.

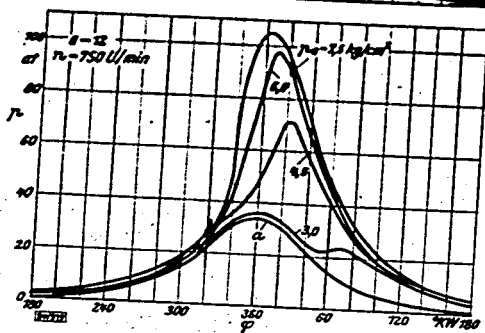
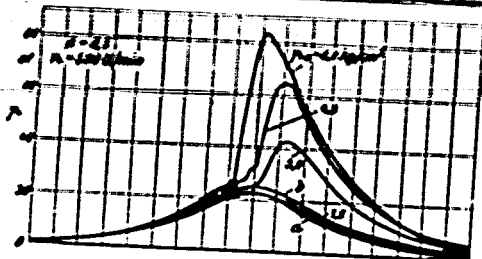
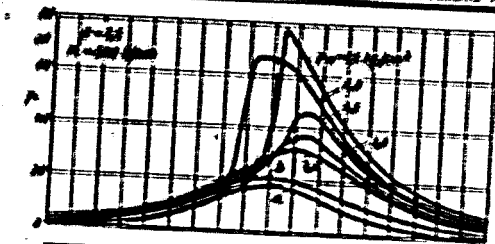


Bild 27 bis 29. Druck-Zeit(Kurbelwinkel)-Diagramme für konstante Mitteldrücke p_m .
a Verdichtungsdiagramm; b Leerlauf.

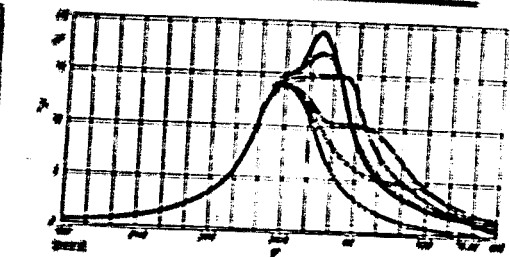


Bild 30. Druck-Zeit(Kurbelwinkel)-Diagramme aufgenommen unter gleichen Vorbedingungen, jedoch die ungesättigte Verbrennung bei großem Luftüberschuß ($\epsilon = 2,0$).
 $p_m = 25$; $n = 1500$ U/min; $p_c = 20$ kg/cm²

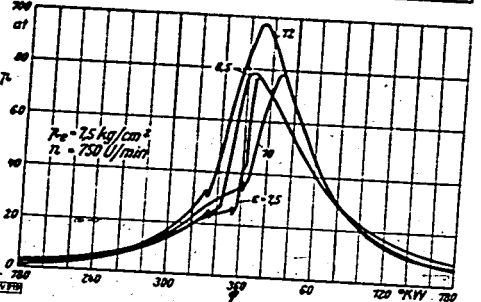
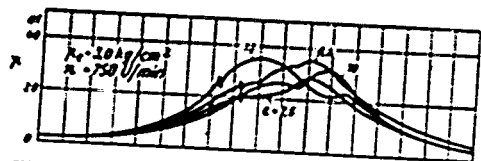


Bild 31 und 32. Druck-Zeit(Kurbelwinkel)-Diagramme für konstante Verdichtungsverhältnisse ϵ .

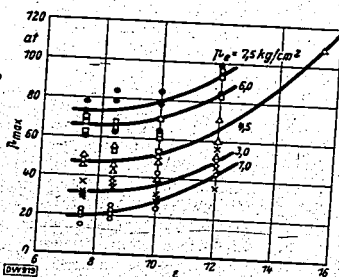


Bild 33. Verbrennungsenddruck p_{max} abhängig vom Verdichtungsverhältnis ϵ bei konstanten mittleren Drücken p_m .

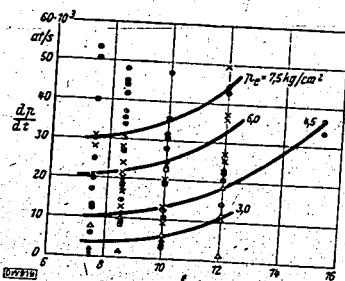


Bild 34. Drucksteigerungsgeschwindigkeit dp/dt abhängig vom Verdichtungsverhältnis ϵ bei konstanten mittleren Drücken p_m .

Allgemein ist bei allen Diagrammen zu bemerken, daß der Druckanstieg zunächst langsam einsetzt und erst nach einer gewissen Verzögerung zu einer schmalen Drucksteigerung führt. Bei sehr großen Mitteldrücken erfolgt allerdings meist sofort nach der Zündung ein recht starker Druckanstieg, der auch Bild 31 bis zu Knackdruck von über 100 at bei hohem Verdichtungsverhältnissen führen kann. Die Drucksteigerungsgeschwindigkeit nimmt dann erheblich höhere Werte an, die bei $20 \cdot 10^3$ at/s liegen können (Bild 34).

Ein Beispiel dafür, wie wenig empfindlich der Wasserstoffbetrieb gegen Zündzeitpunktänderungen sein kann, ergibt sich aus Bild 27. Für höchste Last $p_m = 7,5$ kg/cm² und 3000 U/min lag der Zündbeginn bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 7,5$ bei 27°KW vor u. T. Es ergab sich ein Diagramm, in dem die Druckspitze weit vor dem oberen Totpunkt zu liegen kam. Trotzdem war ein einwandfreier Betrieb möglich.

Die Kurve für $p_m = 7,5$ kg/cm² auf Bild 27 stellt klopfenden Betrieb dar. Auffällig ist auch hier, daß zunächst die Geschwindigkeit des Druckanstieges noch gering ist, um dann plötzlich anzuziehen. Jedoch vor Erreichen des Spitzendrucks nimmt sie wieder ab, so daß nur ein weit kleineres Gebiet als bei der Kurve für $p_m = 6,0$ kg/cm² in Bild 27 wirklich gefährlich für den Betrieb erscheint. In diesen beiden Fällen ist allerdings nicht gewiß, ob die Oszillographenschleife in der Lage war, den Druckänderungen völlig verzerrungsfrei zu folgen.

Für die Versuche wurde angestrebt, die Druckspitze etwa 15°KW nach u. T. zu legen. Dies ließ sich trotz großer Vorladung für großen Luftüberschuß nicht in allen Fällen erreichen.

Die Bilder 31 und 32 sind jeweils für gleiche Mitteldrücke p_m und Drehzahlen n bei den verschiedenen Verdichtungsverhältnissen dargestellt. Bei kleinen Belastungen (Bild 31) sieht man außer der unregelmäßigen Verbrennung, die sich durch Vorverlegung des Zündzeitpunktes nicht ändert, auch keinen Einfluß des Verdichtungsverhältnisses auf Enddruck und Druckanstieg. Bei höchsten Lasten (Bild 32) gelingt es durch entsprechende Zündeneinstellung Druckhöhen und Drucksteigerungsgeschwindigkeit zu beherrschen. Man erreicht dann sehr gleichmäßige Verbrennungen.

Die Druck-Zeit-Diagramme geben somit Aufschluß darüber, daß bei Wasserstoffbetrieb der absolute Enddruck und auch die Geschwindigkeit des Druckanstieges sich bei allen Verdichtungsverhältnissen von $\epsilon = 5$ bis $\epsilon = 15$ in normalen Grenzen hält. Der Einfluß des Zündzeitpunktes erstreckt sich dabei mehr auf Mischungsverhältnisse mit kleinen als mit großen Luftüberschußzahlen.

68 Betriebseigenschaften

Sieht man von den Schwierigkeiten der ersten Versuchsstadien des Motors ab, so ist zu sagen, daß keine sonderlichen Komplikationen bei den Untersuchungen aufgetreten sind.

Der Motor zeigte bei allen Belastungsstufen einen sehr weichen, ruhigen Gang, der angenehmer als der eines Dieselmotors schien. Zündaussetzer traten nur im Bereich kleiner Belastungen auf. Rückschläge durch das Lufterlaßventil oder Auspuffknaller wurden ebenfalls nur bei Leerlauf beobachtet, wenn das Gemisch nicht durchgezündet hatte. Bei mittleren und höchsten Leistungen waren keine derartigen Störungen bemerkbar. Das Wasserstoffzuführungsventil gab keinen Anlaß zu Störungen. An der Zuführungsstelle gab es auch niemals Rückschläge in die Kraftstoffleitung. Gegen Belastungsschwankungen war der Motor weitgehend unempfindlich, während er selbst auf kleine Änderungen bei der Regelung der Wasserstoffmenge ansprach. Im allgemeinen zeigte sich eine nach hohen Drehzahlen strebende Tendenz.

Die Zuführungsorgane bilden bei einigermaßen sorgfältiger Behandlung keine Gefährdung der Betriebssicherheit durch Undichtigkeit oder durch zündfähige Gemische am Versuchsstand.

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen ist also zu erkennen, daß Wasserstoff bei Verwendung als Kraftstoff im Motor unter geeigneten Bedingungen in thermodynamischer Hinsicht anderen Kraftstoffen in keiner Weise nachsteht.

7 Vergleichende Betrachtungen

71 Leistung

Für einen Vergleich der bei den vorliegenden Versuchen gewonnenen Ergebnisse über die Leistungen bei Wasserstoffbetrieb scheinen die Ergebnisse früherer Untersuchungen nicht geeignet. Auch Werte von EFF_n [11 bis 18, 25 bis 27, 52], der sich in neuerer Zeit hauptsächlich mit diesem Problem befaßt, sind nicht verläßlich.

Dagegen scheint es angezeigt, den eigenen Versuchswerten die handelsüblicher Motoren neuerer Bauart, die mit flüssigen Kraftstoffen arbeiten, gegenüberzustellen. Bild 35 zeigt die Literleistungen der gebräuchlichsten Fahrzeugmotoren, die etwa dem Versuchsmotor entsprechen, in Abhängigkeit vom Hubvolumen. Gleichzeitig enthält das Diagramm Hyperbeln gleicher Leistung.

Größte Leistungen ergeben die im hohen Bereich eingewirkten Ottomotoren bei kleineren Hubräumen indige hoher Drehzahlen, die meist über 2000 U/min liegen, während solche der Ottomotoren mit größerem Hubraum und Drehzahlen von etwa 2000 U/min entsprechend tiefer angenommen sind. Die Leistungen der Versuchsmotoren beziehen sich für die verschiedenen Drehzahl- und Lastverläufe durchwegs in der Größenordnung der von Ottomotoren, obwohl die Drehzahl bedeutend niedriger, und zwar maximal bei 1500 U/min, für diese Versuche gehalten wurde. Diese Tatsache stellt sich in Bild 25 deutlich dar. Hier sind für gleiche Motoren die mittleren effektiven Drücke p_e eingetragen. Für den untersuchten Fall liegt der höchste Mittelwert weit über dem Durchschnitt aller angeführten Mittelwerte der verschiedenen Motoren. Das bedeutet

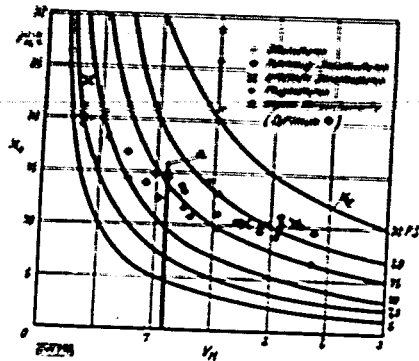


Bild 25. Leistung N_e abhängig vom Hubvolumen V_H für konstante Nutzleistung N_e verschiedener Motoren.

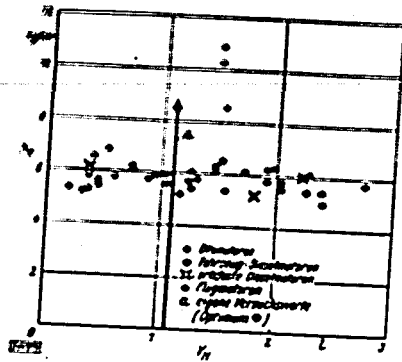


Bild 26. Mittlerer effektiver Druck p_e abhängig vom Hubvolumen V_H verschiedener Motoren.

aber, daß der mittlere Nutzdruck bedeutend herabgesetzt werden kann — soweit dies wünschenswert erscheint —, ohne die Durchschnittswerte der heute üblichen kleineren Motoren, wie sie etwa im Kraftfahrzeug Verwendung finden, zu unterschreiten.

Es ergibt sich daraus, daß Wasserstoff als Kraftstoff bei Anwendung der Druckaufladung leistungsmäßig den heute üblichen Verfahren und Kraftstoffen ebenbürtig zur Seite steht und bei geeigneter Weiterentwicklung des Verfahrens — ohne zusätzliche Aggregate, etwa einen Lader für Aufladebetrieb — eine noch bessere Leistungsausbeute verspricht.

72 Thermischer Wirkungsgrad

Da sich gezeigt hat, daß bei Wasserstoff-Luft-Gemischen Leistungen erzielt werden, die in den Größenordnungen der mit flüssigen Kraftstoffen gemessenen liegen, muß auch die Wärmeentwicklung beider annähernd gleich sein. Daher können schließlich auch die Wirkungsgrade, entgegen manchen übertriebenen Angaben, keine sonderlichen Abweichungen zeigen, zumal die Wärmeentwicklung und die damit verbundenen Verbrennungstemperaturen für den Wirkungsgrad bestimmend sind. Zum Vergleich der thermischen Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe muß man also auch von Zuständen gleicher Wärmeentwicklung ausgehen. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für ein Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 5,4$ bei einem Vergleich mit Werten von Ricardo [50] die in Bild 37 dargestellten Abhängigkeiten. Man erhält im wesentlichen gleiche Kurvenverläufe, die sich bis zu einem Luftüberschuß von etwa $\lambda = 2,0$ kaum voneinander unterscheiden; Erst von diesen Werten an treten stärkere Unterschiede auf. Die etwas günstigeren Ergebnisse Ricardos können nicht auf das Verfahren selbst zurückgeführt werden. Ricardo arbeitete mit Sauggas im Gegensatz zur Druckeinblasung, wie sie in den vorliegenden Versuchen angewendet wurde. Ebenfalls in Bild 37 finden sich Versuchswerte von Pye [48] bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 7$. Es ist zu erkennen, daß die eigenen Versuchswerte, bei denen das Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 7,5$ betrug, besser liegen. Die Unterschiede von maximal 4% sind allerdings gering. Da dem Wirkungsgrad die Kraftstoffmessung zugrunde liegt, ist die Meßgenauigkeit von großer Bedeutung. Die Verfahren der Kraftstoffmessung bei Ricardo und Pye sind nicht bekannt, und es läßt sich daher über die Genauigkeit der Wirkungsgradbestimmung nichts aussagen. Immerhin sollte man meinen, das Ver-

fahren der Gemischherstellung dürfte indige bessere Vorbereitung des Gemisches für Zündung und Verbrennung auch bessere Wirkungsgrade zur Folge haben als das der Druckeinblasung, bei dem etwa nur die Hälfte des Verdichtungsgrades für die Gemischbildung zur Verfügung steht. Der geringe Unterschied im Verdichtungsverhältnis kann keinen derartigen Einfluß auf den Wirkungsgrad ausüben. Deshalb ist anzunehmen, daß bei günstigen Mischungsverhältnissen die Verbrennung so gut ist, daß die Gemischbildung selbst keinen großen Einfluß auf den Wirkungsgrad hat und daß die Abweichungen auf Meßgenauigkeiten beruhen.

Bild 27 zeigt nun Wirkungskurven von Errens [17], die sich auf die Nutzleistung beziehen. Der mittlere Nutzdruck p_e als Messgröße ist gewiß für den Gebrauchszustand unzureichender Motoren von Interesse, aber für allgemeine grundsätzliche Erörterungen wenig geeignet. Trotzdem

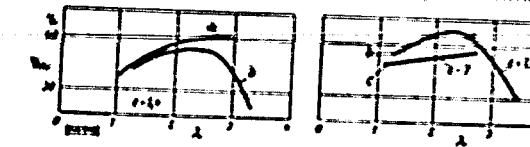


Bild 27. Thermischer Wirkungsgrad η_{th} abhängig vom mittleren effektiven Druck p_e bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10$.

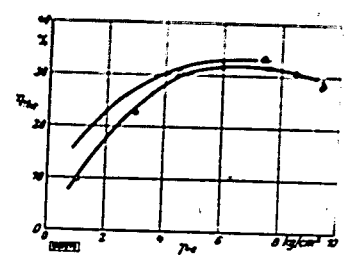


Bild 28. Thermischer Wirkungsgrad η_{th} abhängig vom mittleren Druck p_e bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10$.

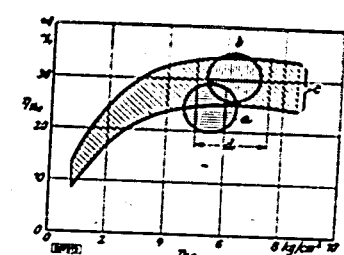


Bild 29. Thermischer Wirkungsgrad η_{th} abhängig vom mittleren Druck p_e bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10$.

der bei den vorliegenden Versuchen verwendete Motor hohe mechanische und hydraulische Verluste aufwies, ergibt sich im Gegensatz zu anderen Angaben Errens ein ähnliches Bild der Wirkungsgrade. Die von ihm angegebenen Werte scheinen um einiges besser zu sein, während die höchsten mittleren Drücke im wesentlichen tiefer als die eigenen liegen. Da diese Kurve jedoch die einzige ist, mit der sowohl Wirkungsgrade als auch Mitteldrücke der Errenschen Versuche etwas ausführlicher dargestellt sind — allerdings ohne nähere Angaben über die verwendeten Mischungsverhältnisse — ist ein erschöpfender Vergleich nicht gut möglich.

In diesem Zusammenhang interessieren besonders die Wirkungsgrade bei Wasserstoffbetrieb im Vergleich mit denen handelsüblicher Motoren. Bild 39 stellt die Bestwerte der Wirkungsgrade von Otto- (a), Dieselmotoren (b), wie sie sich im Schrifttum finden, und Werte des untersuchten Wasserstoffmotors (c) bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen dar. Hier tritt zunächst der Einfluß der Verdichtungsverhältnisse, für die der besseren Übersicht wegen die Kurven nicht eingezeichnet sind, derart in Erscheinung, daß bei niederen Verdichtungsverhältnissen die Werte der Ottomotoren mit denen des untersuchten Motors übereinstimmen. Für hohe Verdichtung, wie sie beim Dieselfahren zur Anwendung kommen, wächst naturgemäß der Wirkungsgrad in der bekannten Weise. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Einfluß des Mischungsverhältnisses des Gemisches kleinere Wirkungsgrade als Dieselmotoren und vor allem als der mit Wasserstoff betriebene, der ja erlaubt, große Luftüberschüßzahlen zu erreichen. Ein Vergleich aller dieser Wirkungsgrade bei gleichem Gemischheizwert müßte die besten Werte bei Wasserstoff zeigen. Eine Beeinflussung des Wirkungsgrades bei Wasserstoffbetrieb durch den Wasserdampfgehalt der Restgase ist nicht zu erwarten. Wenn man an die fördernde Wirkung des Wasserdampfes im flüssigen Zustand bei Verbrennungsmotoren [51] denkt, so kann sich diese im wesentlichen nur in einer Änderung der Temperaturen des Kreisprozesses durch Entzug der Verdampfungswärme

aus dem Arbeitsmittel entweichen [27]. Im vorliegenden Fall fällt jedoch der Verdichtungsprozess und damit die Verdichtungsenergie einerseits Einwirkung auf den Wirkungsgrad in einem Hinsicht fort.

Das Fehlen von Kohlenstoff im Abgas bedingt niedrige Temperaturen infolge der kleineren mittleren spezifischen Wärmekapazität des Wasserstoffgasen. Daraus ergibt sich eine Wirkungsgradverbesserung. Für einen konstanten Wärmeverbrauch der Ladung ist der Wirkungsgrad allein abhängig von der Differenz der inneren Energien im Beginn und am Ende des Prozesses nach Gl. 4. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades kann also bei gleicher Wärmeverbrauch im wesentlichen durch eine Verringerung der Energie am Ende des Vorganges erfolgen. Das wiederum läßt sich durch kleine Temperaturen und niedrige spezifische Wärmekapazität des Abgasgemisches erreichen, und zwar nach Gl. 5. Verfahren ganz fehlt, bildet einen großen Teil der Abgabe bei der Verbrennung aller Kohlenwasserstoffe. Sie gibt Anlaß zu höheren inneren Energien am Ende des Vorganges, als dies bei Wasserstoffdampf, Stickstoff und Sauerstoff der Fall ist.

Die Änderung des Wirkungsgrades mit der Temperatur ergibt sich, wenn Q_m in kcal/Mol eingerechnet wird, so

$$\left(\frac{\eta}{\eta'}\right) = \frac{1}{Q_m} \left(\frac{u_1}{\eta'} - \frac{u_2}{\eta} \right) = \frac{1}{Q_m} \Delta T \dots (20)$$

Man erhält also für eine Änderung des Wirkungsgrades bei verschiedenen Kraftstoffen lediglich eine Abhängigkeit von der Summe der spezifischen Wärmen, wenn die zugeführte Wärmemenge konstant ist. Diese Ausführungen bestätigen die Möglichkeit, bei Wasserstoffbetrieb bessere Wirkungsgrade zu erhalten, als es mit den üblichen flüssigen Kraftstoffen möglich ist.

73 Verbrennung

Die Verbrennung von Wasserstoff-Luft-Gemischen ist, wie vielfach im Schrifttum erwähnt wird, recht ungleichmäßig. Die angeführten Druck-Zeit-Diagramme unterstreichen dieses Verhalten bei der Verbrennung im Motor besonders bei Mischungen mit großem Luftüberschuß, wie es Bild 30 darstellt. Bei größeren Wasserstoffkonzentrationen treten wesentliche Verbesserungen bei der Verdichtungsdrucke und bei den Druckanstiegen festzustellen (Bild 33 und 34).

Auf fast allen Diagrammen mit Ausnahme derjenigen, die höchsten Mitteldrücken entsprechen, kann beobachtet werden, daß die Verbrennung langsam einsetzt, um erst nach einer gewissen Verzugsperiode zur schnelleren Verbrennung überzugehen. Man kann daraus schließen, daß bei Wasserstoffbetrieb die Ausbreitung der Flammenfront zunächst langsam beginnt. Ist der Wasserstoffanteil im Gemisch gering, so kann auf Grund der ungleichmäßigen und zum Teil eigentümlichen Verbrennung, wie sie die Bilder 30 und 31 zeigen, angenommen werden, daß mehrere Verzugskerne zu Beginn der Zündung vorhanden sind, die durch ungleichmäßige Mischung zur teilweisen Entflammung des Gemisches führen. Dieses Verhalten ist auch bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen zu beobachten. Wenn das Gemisch weitgehend durchgebrannt ist und sich die Flamme der Wand nähert, sinkt die Verbrennungsgeschwindigkeit, wie die Oszillogramme zeigen, wahrscheinlich infolge der Wandwirkung, stark ab. Die geringere Änderung des Druckes mit der Zeit gegen Ende der Verbrennung und schließlich auch Bild 40, das den Umsetzungs-faktor F zeigt, bestätigen dies. Als Umsetzungs-faktor sind dabei die Druckänderungen je 0,001 s, bezogen auf den Druckanstieg, also

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) / \left(\frac{p}{z}\right) = F \dots (21)$$

für verschiedene Kurbelstellungen über dem zugehörigen Kurbelwinkel aufgetragen, wobei $dz = 0,001$ s, dp der 0,001 s entsprechende Druckanstieg, p der Anstieg des Druckes von Zündung bis Ende der Verbrennung und z die zugehörige Zeit bedeutet. Für verschiedene Verdichtungsverhältnisse und Durchbrennzeiten trotz verschiedener Zündzeitpunkte für gleiche Mitteldrücke ungefähr gleich ist. Die Durchbrennzeiten nehmen bei großer Konzentration des Gemisches stark ab (c und d), und es ist zu erkennen, daß die Verbrennung früh nach o. T. beendet ist. Es ergeben sich also ähnliche Verhältnisse mit teilweise größeren Umsetzungs-geschwindigkeiten, wie sie von F. A. F. Schmidt [53] und List [36] dargestellt wurden. Die Diagramme bestätigen — wie sich schon aus den voran-gehenden Besprechungen ergab —, daß es als ungünstig betrachtet werden muß, mit allzu großem Luftüberschuß zu arbeiten. War bei der Besprechung des thermischen Wirkungsgrades nur auf die Unwirtschaftlichkeit in bezug auf die thermische Ausnutzung des Kraftstoffes eingegangen

werden, so können die vorliegenden Druck-Zeit-Diagramme auch die ungenügende Verbrennung aufteil, die Ursache zu diesem Verhalten ist, erkennen. Oftmals erfolgen wirkliche Verbrennungen mit geringem Druckanstieg infolge des schon erheblich vorverdrängten Volumen und wird am Ende der Entzündung. Hierbei auftretende Nachteile durch ungenügende mechanische und thermische Beanspruchung der Zylinder und besonders die schädliche Auswirkung der heißen Abgase auf das Substrat. Ob dabei kleinere Luftüberschusszahlen gewählt werden sollen, die auf Grund der vorliegenden Versuche bei Wasserstoffbetrieb unter $\lambda = 2,0$ liegen müßten, oder ob mehrere Zünd-

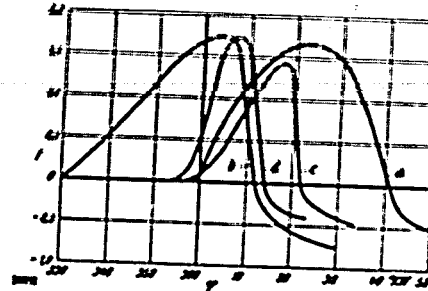


Bild 41. Druck-Zeit (Kurbelwinkel)-Diagramme bei Wasserstoffbetrieb nach Burstall. 1 - 7; n = 1000 U/min.

Bild 42. Druck-Volumen-Diagramme bei Wasserstoffbetrieb nach Erren. The table lists parameters for two cases: a) Luft-Wasserstoff and b) Sauerstoff-Wasserstoff mit Inertgas. It includes values for initial pressure (p0), initial volume (V0), final pressure (p1), and final volume (V1).

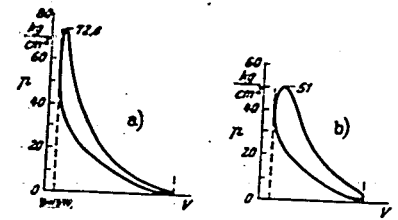
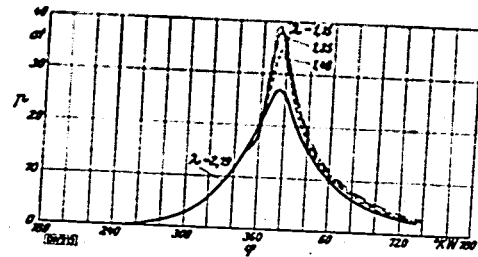


Bild 42. Druck-Volumen-Diagramme bei Wasserstoffbetrieb nach Erren. a) Luft-Wasserstoff: p0 = 4,1 kg/cm²; n = 700 U/min. b) Sauerstoff-Wasserstoff mit Inertgas (Wasserdampf und Stickstoff): p0 = 4,65 kg/cm²; n = 435 U/min.

kerzen zur Besserung verhelfen würden, kann nicht entschieden werden, — da sich die Versuche nicht in dieser Richtung bewegten. In Gebieten mit $\lambda \approx 2,0$ ergeben sich für alle untersuchten Fälle beste Verbrennungen mit Umsetzungs-geschwindigkeiten, die in bekannten, beherrschbaren Grenzen liegen.

Die Selbstzündungstemperatur des Wasserstoffs wird mit etwa 600°C bei 1 ata angegeben [32]. In keinem Fall trat diese bei den Versuchen ein. Jedes Diagramm gibt Aufschluß darüber, daß der Druckanstieg erst nach der Zündung durch den Funken selbst bei höchsten Verdichtungsverhältnissen beginnt. Es werden also kaum Temperaturen von 600°C im Gemisch erreicht werden. Da die Wärmeableitung sehr groß ist [32], und die Verbrennung erst ein bedeutend angeregtes Stadium erreicht haben muß, bevor ein schnelles Durchbrennen der Ladung gewährleistet ist, kann man auf wesentlich tiefere Endtemperaturen der Ladung gewährleisten. Das gleiche Verhalten zeigen auch Druck-Zeit-Diagramme Burstalls, die in Bild 41 dargestellt sind.

In unserem Falle wurde davon abgesehen, genaue Luftüberschusszahlen für die Diagramme anzugeben, da nur Mittelwerte über eine bestimmte Versuchszeit, nicht aber für eine einzige Arbeitsperiode vorliegen. Während nun der Druckverlauf ähnlich dem von Burstall gemessen ist, sind die Drücke, die er angibt, trotz des geringen Luftüberschusses recht niedrig. Die eigenen Werte liegen jedenfalls oft bedeutend höher.

Ein sehr früher Zündbeginn hat, wie Bild 27 zeigt, einen außerordentlich schnellen Druckanstieg, dem große Verbrennungsgeschwindigkeiten entsprechen, zur Folge. Obwohl der Anfangs-

durch dabei kein ist, schließt sich die durch die Verdichtung gewonnene Wärmemenge, die während nach geringer Tendenz zeigt, auch schon abzusinken, genügt für die Wärmewirkung bei der Verbrennung auszureichen. Dabei wird allerdings auch der Spitzendruck nicht ungünstig vor dem oberen Totpunkt liegen, so daß eine große Wärmemenge im Zylinderkopf abgeführt werden muß. Dieser Zustand kann nach gewisser Zeit Abhilfe zu erweisen sein. Solche Diagramme sind demnach auch nur bei kleinen Drehzahlen zu erziehen, bei denen genügend Zeit ist, die schädliche Wärme abzuführen, ohne den Gang des Motors zu beeinträchtigen. Auch starker Triebwerkbeanspruchung wird hierbei natürlich der Wirkungsgrad besonders schädlich empfinden. Das weist jedoch ist jedoch, zu zeigen, daß selbst in dieser ungünstigen Fällen der Wasserstoffbetrieb anzuwenden ist, und darzustellen, in welcher weiten Grenzen die Verbrennung unempfindlich für die Zünd-einstellung sein kann.

Leider stehen zum Vergleich außer den Diagrammen Harvalds (Bild 41) keine weiteren zur Verfügung, da die von Erren angegebenen (Bild 42) wegen der kleinen Abmessungen nicht übertragbar sind. Auch Bombenversuche über Verbrennungsgeschwindigkeiten und Hochdrucke bei Anfangsdrücken und Temperaturen, wie sie im Motor bei verschiedenen Mischungen auftraten, sind nicht bekannt, so daß weitere Folgerungen aus den Vorgängen im Motor unterbleiben müssen.

Die Abnahme der Verbrennungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Luftüberschuß im Motor [54] findet in den vorliegenden Druck-Zeit-Diagrammen eine Bestätigung. Damit ist gleichzeitig der Zusammenhang mit dem Absinken des Wirkungsgrades im Bereich großer Luftüberschüsse (Bild 18) gegeben. Die sehr geringen Brenngeschwindigkeiten bei großem Luftüberschuß haben große Wärmeverluste zur Folge und tragen zusammen mit den Zündaussetzern — also dem Abgeben völlig ungenutzter Energie — zur Erniedrigung des Wirkungsgrades bei.

Die Druck-Zeit-Diagramme geben ausführliche Aufschlüsse über den Verbrennungsablauf im Motor und lassen erkennen, daß hierbei keine Abweichungen anderen Gasmotoren gegenüber auftreten, wenn man von der größeren Verbrennungsgeschwindigkeit absieht. Es bleiben auch, wie Bild 27, 28 und 32 zeigt, die oft vermuteten hohen Enddrücke und Druckanstiege (Bild 31 und 34) unter normalen Bedingungen aus. Allerdings ist für einzelne Fälle (Bild 29) mit sehr großer Enddrücken zu rechnen, wenn nämlich infolge von hoher Verdichtung die Verbrennungsgeschwindigkeit überaus rasch ansteigt. Man erhält dann nach einer außerordentlich kurzen Verzugsperiode fast senkrechte Druckanstiege, die auch als kurze, harte Schläge bei jeder Zündung wahrnehmbar sind. Klopfen hingegen trat hierbei nicht ein, da wir uns, wie sich auch aus dem Schrifttum ergibt [31, 46], noch in einem Gebiet mit geringer Klopfneigung befanden.

Es läßt sich also folgern, daß die Verbrennung der Wasserstoff-Luft-Gemische ohne Schwierigkeiten in allen Fällen im Motor beherrschbar ist und daß bei sachgemäßer Einstellung des Motors keine thermischen oder mechanischen Schäden auftreten können.

74 Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch interessiert aus wirtschaftlichen Gründen mit dem Ziel der Kenntnis der Betriebskosten, wie sie durch den Kraftstoffverbrauch des Motors entstehen, und aus technischen Belangen. Dabei spielt das Gewicht des zu fördernden Kraftstoffs und des Behälters bei beweglichen Motoren eine Rolle, um festzustellen, welche Gewichtsanteile von der zu fördernden Last der Kraftstoff einnimmt und mit welchem Aktionsradius das Fahrzeug ausgestattet ist.

Zum Vergleich der Verbräuche eignet sich am besten die Angabe des Verbrauchs in Wärme-einheiten. In Bild 43 sind die gemessenen Werte unter Berücksichtigung der bekannten Kraft-bei Wasserstoffbetrieb durchaus in angemessenen Grenzen, obwohl anzunehmen ist, daß im Betrieb der Verbrauch gegenüber den im Versuch gemessenen Werten gewiß steigen wird.

Da es sich erwiesen hat, daß der Verbrauch bei gleichem Verdichtungsverhältnis günstig im Vergleich mit dem flüssigen Kraftstoffe liegt, sollen nunmehr noch die Totgewichte des Behälters und des Kraftstoffballastes bei verschiedenen Kraftstoffen näher untersucht werden.

Eine normale Stahlflasche, wie sie für Wasserstoffspeicherung Verwendung findet, besitzt einen Betriebsdruck von 150 atü bei 6 m³ Inhalt, entsprechend einem Wärmehalt von W = 14400 kcal ein Gewicht von 75 kg. Eine der neu entwickelten Leichtflaschen hingegen ist geeignet, bei Drücken bis zu 200 atü einen Inhalt von 8 m³ entsprechend W = 19200 kcal bei einem Flaschengewicht von 53 kg aufzunehmen.

Wenn schon die letzte Flaschenart eine weitgehende Gewichtsverringering von fast 30 % bedeutet, so ist trotzdem der Ballast ganz erheblich. Anschaulich wird dies aus Zahlentafel 1, in der zusammengestellt ist, welche Totlasten auf eine Wärmemenge von 1000 kcal bei flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen zu rechnen sind.

Am günstigsten ist die Totlast bei Wasserstoffbetrieb. Allein etwa 65% des Behälters, während dies bei flüssigen Kraftstoffen nur etwa 17% des Gesamtgewichtes ausmacht. Entsprechend diesem Zahlen sind bei Wasserstoffbetrieb nur etwa 1% gegenüber 63% bei flüssigen Kraftstoffen auf den Gewichtsteil der mitgeführten Kraftstoffe zu rechnen.

Diese Zusammenstellung schließt von vornherein eine günstige, wirtschaftliche Ausnutzung des Wasserstoffes im Kraftfahrzeug unter den Verhältnissen, wie sie sich aus heute bieten, aus. Selbst wenn man für diesen Sonderzweck eigene gewaltige Stahlflaschen verwenden würde, wäre die Totlast auch viel zu groß. Wasserstoff könnte auch dann kaum mit den üblichen Kraftstoffen konkurrieren. Günstiger läßt der Vergleich bei dem heute üblichen Gasbetrieb aus, wobei Triebgewicht schon recht schlechte Verhältnisse wiedergibt, aber bei weitem nicht so ungünstig wie Wasserstoff darstellt.

Diese unwirtschaftliche Verhältnisse zeigt Bild 44. Hier ist dargestellt, wie sich die Flaschenzahl bei Wasserstoffbetrieb unter Verwendung leichter und schwerer Flaschen zu dem Volumen flüssiger Kraftstoffe verhält. Es ergeben sich im günstigsten Fall für 30 l Benzin etwa 12 und für das gleiche Volumen Gasöl 14 Flaschen Wasserstoff. Dabei ist schon berücksichtigt, daß die Flaschen von etwa 8 atü in der Flasche bei dem untersuchten Verfahren nicht ausgenutzt wird.

Das folgende Bild 45 stellt schließlich nochmals dar, welche Flaschenmengen bei einer bestimmten Leistung über eine bestimmte Zeitdauer gebraucht werden und wie dieser Verbrauch bei Wasserstoffbetrieb durch die Flaschenzahl sehr beschränkt sein würde und einem Vergleich mit dem bei anderen Kraftstoffen erreichten kaum standhalten kann.

Aus den Untersuchungen über den Kraftstoffverbrauch ist zu erkennen, daß Wasserstoff günstige Verbrauchswerte in der Größenordnung der mit flüssigen Kraftstoffen arbeitenden ermöglicht und daher für gewisse Sonderzwecke mit vollem Erfolg zu verwenden ist.

Für bewegliche Motoren jedoch ist er zur Überwindung größerer Entfernungen ungeeignet, da das Leergewicht der zu transportierenden Flaschen überaus groß und die gespeicherte Kraftstoffmenge trotz hoher Drücke recht bescheiden ist. Dabei muß sich diese ungünstige Verteilung von Nutz- und Totgewicht für die Leistungsausbeute eines Kraftfahrzeuges nachteilig auswirken. Anders liegt nach Meinecke [40] der Fall bei Lokomotivtrieben. Bei Dampftrieben muß unter üblichen Bedingungen stets eine bestimmte Menge von Kohle und Wasser mitgeführt werden. An deren Stelle könnten die Flaschen für Wasserstoffbetrieb treten. Das Flaschengewicht, das dem gleichen Aktionsradius bei Dampftrieb entspricht, ist dann sogar etwas geringer als der Brennstoffballast bei Dampftrieb.

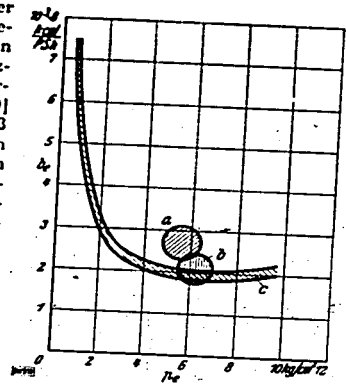


Bild 43. Kraftstoffverbrauch b_0 abhängig vom mittleren Druck p_e . a Ottomotoren; b Dieselmotoren; c eigene Versuchswerte mit Wasserstoffmotor.

Zahlentafel 1. Gewichtsverteilung bei verschiedenen Kraftstoffen

Kraftstoff	Gesamtgewicht		Behältergewicht		Kraftstoffgewicht	
	kg/10 ³ kcal	%	kg/10 ³ kcal	%	kg/10 ³ kcal	%
Benzin; Gasöl	0,12	100	0,02	16,7	0,1	83,3
Treibgas	0,195	100	0,104	53,5	0,091	46,5
Motorenmethan	0,56	100	0,47	84,0	0,09	16,0
Stadtgas	1,73	100	1,59	92,0	0,14	8,0
Wasserstoff, Leichtflaschen	2,81	100	2,77	98,8	0,04	1,2
Wasserstoff, Normalflaschen	5,24	100	5,20	99,3	0,04	0,7

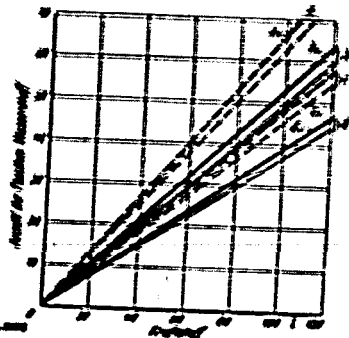


Bild 44. Vergleich der nötigen Anzahl Flaschen Wasserstoff mit dem entsprechenden Volumen flüssiger Kraftstoffe.

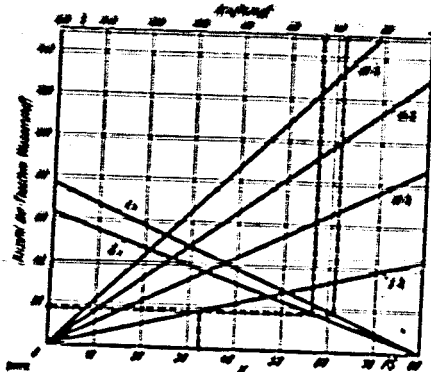


Bild 45. Schema zur Ermittlung der nötigen Anzahl Flaschen Wasserstoff für geforderte Leistungen (P_n) und Zylinderzahlen (z), gleichzeitig ist der Vergleich mit dem entsprechenden Verbrauch an Gasöl (g) und Benzin (d) möglich (g₁ und d₁ wie in Bild 44).

75 Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffherstellung

Für den Wasserstoffbetrieb ist nicht allein die motorische Eignung maßgebend; schließlich sind dabei auch wirtschaftliche Erwägungen zu berücksichtigen. Der im Kleinhandel übliche Preis von etwa 48 Pf/m³ steht dabei infolge seiner Höhe außer jeder Diskussion. Erst bei einer weitgehenden Preissenkung würde dem Verfahren allgemeinere Bedeutung zukommen können. Über die Herstellpreise findet man ganz unterschiedliche Angaben, die sich nach den örtlichen Verhältnissen richten. Dabei spielt die Art der Erzeugung eine große Rolle. Bei der Elektrolyse des Wassers fällt der größte Anteil der Kosten auf die Apparaturen, während für die Wartung nur ein kleiner Teil aufzuwenden ist. Das Konvertverfahren hingegen bedingt große Kosten für die Wartung, wobei die Anlagekosten den kleineren Teil ausmachen. Je nach Stromkosten, Kohlepreise, Arbeitslöhnen, Größe der Anlage, Abschreibung und Amortisation fallen demgemäß auch die Erzeugungspreise sehr verschieden aus. Eine Zusammenstellung verschiedener Angaben gibt

Zahlentafel 2. Es ergibt sich daraus, daß der Preis von 2,7 bis 6,8 Pf/m³ je nach dem Verfahren und dem Grad der Reinheit des Erzeugnisses schwankt. Im Durchschnitt wird bei diesen Angaben ein Wasserstoffgehalt von 98 % genannt. Bei einigen Kohleverfahren beträgt die Reinheit nur 87 %. Der Rest besteht dann je nach dem Verfahren aus Stickstoff, Kohlenoxyd oder Methan. Eine ausführlichere Berechnung, allerdings ohne Berücksichtigung der Verdichtungsarbeit und Flaschenamortisation, gibt Zdanjy [66] für elektrolytischen Wasserstoff. Er findet 4,75 Pf/m³ bei einem Energiepreis des elektrischen Stromes von 0,8 Pf/kWh für 1 m³ H₂ bei einer Anlage, die 5000 m³ Wasserstoff in der Stunde bei 20° C liefert. Die Stromdichte an den Elektroden bewegt sich bei den elektrolytischen Verfahren zwischen 500 und 3000 A/m². Die Zellenspannung ist dabei 1,25 V. Der Energieverbrauch wird mit 4,4 kWh/m³ H₂ angegeben. Ähnliche Werte treten auch bei anderen Veröffentlichungen auf und können für Druckelektrolyse und für gewöhnliche Zersetzung als Mittelwerte gelten.

Nach all den Angaben ist mit einem mittleren Wasserstoff-Erzeugungspreis von etwa 4,5 Pf/m³ zu rechnen. Dabei wird die Preisgestaltung natürlich stark vom Kraftstoffverbrauch abhängen. Dazu kommt noch der Preis für die Abfüllung in Flaschen und deren Amortisation, der je nach der Verbrauchsmenge zu 6 Pf/m³ H₂ gerechnet werden kann. Da bei der Druckelektrolyse die Verdichtungsarbeit für das Gas entfällt, verringert sich der Endpreis um diesen Wert.

Preis für Wasserstoffherstellung in Pf mit H₂ bedingt durch Herstellungsart und Reinheit: 1. Preis, 2. Preis, 3. Preis, 4. Preis, 5. Preis, 6. Preis, 7. Preis, 8. Preis, 9. Preis, 10. Preis, 11. Preis, 12. Preis, 13. Preis, 14. Preis, 15. Preis, 16. Preis, 17. Preis, 18. Preis, 19. Preis, 20. Preis, 21. Preis, 22. Preis, 23. Preis, 24. Preis, 25. Preis, 26. Preis, 27. Preis, 28. Preis, 29. Preis, 30. Preis, 31. Preis, 32. Preis, 33. Preis, 34. Preis, 35. Preis, 36. Preis, 37. Preis, 38. Preis, 39. Preis, 40. Preis, 41. Preis, 42. Preis, 43. Preis, 44. Preis, 45. Preis, 46. Preis, 47. Preis, 48. Preis, 49. Preis, 50. Preis, 51. Preis, 52. Preis, 53. Preis, 54. Preis, 55. Preis, 56. Preis, 57. Preis, 58. Preis, 59. Preis, 60. Preis, 61. Preis, 62. Preis, 63. Preis, 64. Preis, 65. Preis, 66. Preis, 67. Preis, 68. Preis, 69. Preis, 70. Preis, 71. Preis, 72. Preis, 73. Preis, 74. Preis, 75. Preis, 76. Preis, 77. Preis, 78. Preis, 79. Preis, 80. Preis, 81. Preis, 82. Preis, 83. Preis, 84. Preis, 85. Preis, 86. Preis, 87. Preis, 88. Preis, 89. Preis, 90. Preis, 91. Preis, 92. Preis, 93. Preis, 94. Preis, 95. Preis, 96. Preis, 97. Preis, 98. Preis, 99. Preis, 100. Preis.

Zahlentafel 2.

Wassergasverfahren	Kohlehydratverfahren	Ferrosilberverfahren	Elektrolyse
2,7	2,7	4,0	5,0
3,6	3,5		6,25
5,0	1,35 bis 2,5		
6,0	5,0		
6,10	7,2 bis 7,6		

Am günstigsten ist es, wenn die Flaschen selbstfüllend sind, so daß etwa mit einem kontinuierlich zu füllenden Druckbehälter gearbeitet wird. Dann kann der Preis für 1 m³ Wasserstoff bei der Druckelektrolyse mit etwa 5 Pf und bei der gewöhnlichen Elektrolyse mit 8 Pf angenommen werden. Diese Werte sind nur geschätzt und haben nicht in allen Teilen Anspruch auf Vollständigkeit.

8 Zusammenfassung

Die Betriebmöglichkeiten des Wasserstoffmotors wurden theoretisch geprüft und mit den bisher veröffentlichten Ergebnissen verglichen. Weiterhin wurden die Betriebseigenschaften eines im Zylinder gebauten Motors, der eigens für Wasserstoffbetrieb umgebaut worden war, untersucht.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit dem wenigen auf diesem Gebiet vorliegenden Material und mit den heute üblichen motorischen Verfahren zeigte, daß Wasserstoff als Kraftstoff bei der Verbrennung im Motor den heute verwendeten Kraftstoffen in bezug auf die thermischen Eigenschaften und die Wirtschaftlichkeit gleichgestellt werden kann.

Allerdings ist eine Verwendung in Fahrzeugmotoren infolge des sehr hohen Behältergewichts nur für kürzere Entfernung geeignet. Im Lokomotivbetrieb hingegen sind die Gewichtsverhältnisse günstiger.

Besonders dürfte sich Wasserstoff in Ausnahmefällen für Sonderzwecke oder in ortsfesten Motoren überall dort ausnutzen lassen, wo er als Nebenprodukt in größeren Mengen anfällt oder wo eigens für diesen Zweck Anlagen mit billiger Wasserstoff-Herstellung erstellt werden.

9 Schriftumsverzeichnis

- [1] Arndt, K.: Fortschritte im Bau elektrolytischer Wasserzersetzer — Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 907/1112.
- [2] Bausch, H.: Bestimmung von Verbrennungsgrenzen bei Anwendung hoher Drücke — Diss. T. H. Darmstadt 1929.
- [3] Benson, M.: Wasserelektrolyseanwendung bei Verbrennungsmaschinen — Engl. P. 225613; 1924.
- [4] Berl, E., und H. Fischer: Untersuchungen an explosiblen Gas- und Dampf-Luft-Gemischen — Z. Elektrochem. Bd. 30 (1924) S. 29/36.
- [5] Bone, W. A., and D. T. A. Townend: Flame and combustion in gases — London: Longmans, Green & Co. Ltd. 1927.
- [6] Borchardt, Ph.: Die Zerlegung des Koksengases mit Bezugnahme auf die Probleme der Fern-Gasversorgung — Gas- u. Wasserfach Bd. 70 (1927) S. 562/68.
- [7] Bräuer, A., und J. Reistötter: Neuerungen auf dem Gebiete der anorganisch-chemischen Industrie — Z. angew. Chem. Bd. 44 (1931) S. 406/43.
- [8] Dieterlen, Fr.: Versuche über die Zündgrenzen von Wasserstoff-Luft-Gemischen in der Explosionshohle — Diss. T. H. Dresden 1930.
- [9] Drehkolben-Kraftmaschinen GmbH. Dresden: Arbeitsverfahren für Drehkolben-Brennkraftmaschinen — DRP. 695663; 1. 8. 1940.
- [10] Druckzersetzer GmbH: Druckzersetzer — Franz. P. 770440; 1934.
- [11] Erren, R.: Trackles torpedo — New terror to Warfore — Daily Independent 1937.
- [12] Erren, R.: Cheaper running on gas fuels — Motor Transp. Lond. (1937) S. 1/3.
- [13] Erren, R.: Efficient operation on gas — Commerce. Mot. 1937.
- [14] Erren, R.: The Erren combustion cycle. A new method to utilizing gaseous fuel — Autom. Engr. Bd. 27 (1937) S. 319/22.
- [15] Erren, R.: Hydrogen as a fuel — World's Carriers 1937.
- [16] Erren, R.: The Erren combustion cycle. A new method to utilizing gaseous fuel — Autom. Engr. Bd. 27 (1937) S. 319/22.
- [17] Erren, R.: A new injection system for gas engines — Engineer, Lond. Bd. 167 (1939) S. 468.
- [18] Erren, R.: J. Usines Gaz Bd. 57 (1940) S. 48.
- [19] Erren, R.: Druckausgleich — Engl. P. 432698; 1935.
- [20] Erren, R.: Zweitaktarbeitsverfahren für Knallgas-Motoren — DRP. 571134; 1933.

* Sonderdrucke; nähere Angaben sind dem Verfasser nicht bekannt — die Seitenzahlen stimmen wahrscheinlich nicht mit der regulären Seitenzählung überein.

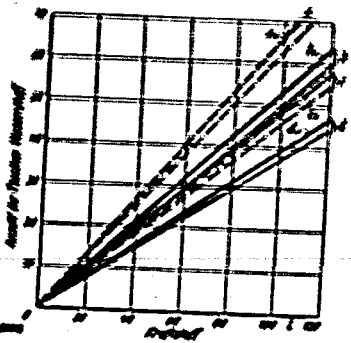


Bild 64. Vergleich der nötigen Anzahl Flaschen Wasserstoff mit dem entsprechenden Volumen flüssiger Kraftstoffe.

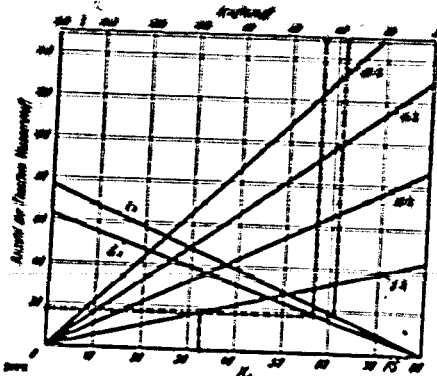


Bild 65. Scheubild zur Ermittlung der nötigen Anzahl Flaschen Wasserstoff für geforderte Leistungen (P) und Motorzahlen (n); gleichzeitig ist der Vergleich mit dem entsprechenden Verbrauch an Gasöl (c) und Benzin (d) möglich (c₁ und d₁ wie in Bild 64).

75 Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffherstellung

Für den Wasserstoffbetrieb ist nicht allein die motorische Eignung maßgebend; schließlich sind dabei auch wirtschaftliche Erwägungen zu berücksichtigen. Der im Kleinhandel übliche Preis von etwa 48 Pf/m³ steht dabei infolge seiner Höhe außer jeder Diskussion. Erst bei einer weitgehenden Preissenkung würde dem Verfahren allgemeinere Bedeutung zukommen können. Über die Herstellpreise findet man ganz unterschiedliche Angaben, die sich nach den örtlichen Verhältnissen richten. Dabei spielt die Art der Erzeugung eine große Rolle. Bei der Elektrolyse des Wassers fällt der größte Anteil der Kosten auf die Apparaturen, während für die Wartung nur ein kleiner Teil aufzuwenden ist. Das Konvertverfahren hingegen bedingt große Kosten für die Wartung, wobei die Anlagekosten den kleineren Teil ausmachen. Je nach Stromkosten, Kohlepreisen, Arbeitslöhnen, Größe der Anlage, Abschreibung und Amortisation fallen demgemäß auch die Erzeugungspreise sehr verschieden aus. Eine Zusammenstellung verschiedener Angaben gibt Zahlentafel 2.

Es ergibt sich daraus, daß der Preis von 2,7 bis 6,8 Pf/m³ je nach dem Verfahren und dem Grad der Reinheit des Erzeugnisses schwankt. Im Durchschnitt wird bei diesen Angaben ein Wasserstoffgehalt von 98% genannt. Bei einigen Kohleverfahren beträgt die Reinheit nur 87%. Der Rest besteht dann je nach dem Verfahren aus Stickstoff, Kohlenoxyd oder Methan. Eine ausführlichere Berechnung, allerdings ohne Berücksichtigung der Verdichtungsarbeit und Flaschenamortisation, gibt Zdzansky [66] für elektrolytischen Wasserstoff. Er findet 4,75 Pf/m³ bei einem Energiepreis des elektrischen Stromes von 0,8 Pf/kWh für 1 m³ H₂ bei einer Anlage, die 5000 m³ Wasserstoff in der Stunde bei 20° C liefert. Die Stromdichte an den Elektroden bewegt sich bei den elektrolytischen Verfahren zwischen 500 und 3000 A/m². Die Zellenspannung ist dabei 1,25 V. Veröffentlichtungen auf und können für Druckelektrolyse und für gewöhnliche Zersetzung als Mittelwerte gelten.

Nach all den Angaben ist mit einem mittleren Wasserstoff-Erzeugungspreis von etwa 4,5 Pf/m³ zu rechnen. Dabei wird die Preisgestaltung natürlich stark vom Kraftstoffverbrauch abhängen. Dazu kommt noch der Preis für die Abfüllung in Flaschen und deren Amortisation, der je nach der Verbrauchsmenge zu 6 Pf/m³ H₂ gerechnet werden kann.

Da bei der Druckelektrolyse die Verdichtungsarbeit für das Gas entfällt, verringert sich der Endpreis um diesen Wert.

Zahlentafel 2.

Wasserstoffverfahren	Kohlenoxydverfahren	Fällverfahren	Elektrolyse
2,7	2,1	4,0	5,0
5,4	3,5		6,0
5,0	3,0 bis 3,1		
6,0	5,0		
6,10	7,1 bis 7,6		

Preis für Wasserstoffherstellung in Pf und Pf, abhängig durch Herstellungsverfahrens und Flaschenzahl mit verschiedenen Angaben (S. 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100).

Am günstigsten ist es, wenn die Flaschen entbehrlich sind, so daß etwa mit einem kontinuierlich zu füllenden Druckbehälter gearbeitet wird. Dann kann der Preis für 1 m³ Wasserstoff bei der Druckelektrolyse mit etwa 5 Pf und bei der gewöhnlichen Elektrolyse mit 8 Pf angenommen werden. Diese Werte sind nur geschätzt und haben nicht in allen Teilen Anspruch auf Vollständigkeit.

8 Zusammenfassung

Die Betriebmöglichkeiten des Wasserstoffmotors wurden theoretisch geprüft und mit den bisher veröffentlichten Ergebnissen verglichen. Weiterhin wurden die Betriebsigenschaften eines im Zugebaut worden war, untersucht.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit dem wenigen auf diesem Gebiet vorliegenden Material und mit den heute üblichen motorischen Verfahren zeigte, daß Wasserstoff als Kraftstoff bei der Verschaffung und der Wirtschaftlichkeit gleichgestellt werden kann.

Allerdings ist eine Verwendung in Fahrzeugmotoren infolge des sehr hohen Behältergewichts nur für kürzere Entfernung geeignet. Im Lokomotivbetrieb hingegen sind die Gewichtsverhältnisse günstiger.

Besonders dürfte sich Wasserstoff in Ausnahmefällen für Sonderzwecke oder in ortsfesten Motoren überall dort ausnutzen lassen, wo er als Nebenprodukt in größeren Mengen anfällt oder wo eigens für diesen Zweck Anlagen mit billiger Wasserstoff-Herstellung erstellt werden.

9 Schriftumsverzeichnis

[1] Arndt, K.: Fortschritte im Bau elektrolytischer Wasserzersetzer — Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 907/1112.

[2] Bausch, H.: Bestimmung von Verbrennungsgrenzen bei Anwendung hoher Drücke — Diss. T. H. Darmstadt 1929.

[3] Benson, M.: Wasserelektrolyseanwendung bei Verbrennungsmaschinen — Engl. P. 226613; 1924.

[4] Berl, E., und H. Fischer: Untersuchungen an explosiblen Gas- und Dampf-Luft-Gemischen — Z. Elektrochem. Bd. 30 (1924) S. 29/36.

[5] Bone, W. A., and D. T. A. Townend: Flame and combustion in gases — London: Longmans, Green & Co. Ltd. 1927.

[6] Borchardt, Ph.: Die Zerlegung des Kokssofengases mit Bezugnahme auf die Probleme der Fern-Gasversorgung — Gas- u. Wasserfach Bd. 70 (1927) S. 562/68.

[7] Bräuer, A., und J. Reitschötter: Neuerungen auf dem Gebiete der anorganisch-chemischen Industrie — Z. angew. Chem. Bd. 44 (1931) S. 406/43.

[8] Dieterlen, Fr.: Versuche über die Zündgrenzen von Wasserstoff-Luft-Gemischen in der Explosionsbombe — Diss. T. H. Dresden 1930.

[9] Drehkolben-Kraftmaschinen GmbH. Dresden: Arbeitsverfahren für Drehkolben-Brennkraftmaschinen — DRP. 695663; 1. 8. 1940.

[10] Druckzersetzer GmbH: Druckzersetzer — Franz. P. 770440; 1934.

[11] Erren, R.: Trackles torpedo — New terror to Warfore — Daily Independent 1937.

[12] Erren, R.: Cheaper running on gas fuels — Motor Transp. Lond. (1937) S. 1/3.

[13] Erren, R.: Efficient operation on gas — Commerc. Mot. 1937.

[14] Erren, R.: The Erren combustion cycle. A new method to utilizing gaseous fuel — Autom. Engr. Bd. 27 (1937) S. 319/22.

[15] Erren, R.: Hydrogen as a fuel — World's Carriers 1937.

[16] Erren, R.: The Erren combustion cycle. A new method to utilizing gaseous fuel — Autom. Engr. Bd. 27 (1937) S. 319/22.

[17] Erren, R.: A new injection system for gas engines — Engineer, Lond. Bd. 167 (1939) S. 468.

[18] Erren, R.: J. Usines Gaz Bd. 57 (1940) S. 18.

[19] Erren, R.: Druckausgleich — Engl. P. 432698; 1935.

[20] Erren, R.: Zweitaktarbeitsverfahren für Knallgas-Motoren — DRP. 571434; 1933.

*) Sonderdrucke; nähere Angaben sind dem Verfasser nicht bekannt — die Seitenzahlen stimmen wahrscheinlich nicht mit der regulären Seitenzählung überein.

000753

Neue Hefte **Deutsche Kraftfahrtforschung**
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

- Hefte 47 **Katalysatorverluste an luftgekühlten Kraftmaschinen und deren Kühlung.** Mit folgenden Beiträgen: Erweiterung der Geschwindigkeit für luftgekühlte Kraftmaschinen. Von H. Ernst VDI und E. Scheider. Kälteköhlte für luftgekühlte Kraftmaschinen. Von H. Eckert VDI/ATG. Din A 4, 46 Seiten mit 20 Bildern und 2 Zahlentafeln. 1947. Brosch. 2,75 RM.
- Hefte 48 **Nachprüfung der Luftdruckmessungen an Fahrzeugmodellen durch Ausdehnungsprobe mit den Fahrzeugen.** Von W. Weid VDI/ATG und E. Nowatki. DIN A 4, 16 Seiten mit 25 Bildern und 1 Zahlentafel. 1941. Brosch. 1,50 RM.
- Hefte 49 **Schleifverhalten beim Betrieb mit Kältemitteln.** Von H. Opitz VDI und W. Vitz VDI. DIN A 4, 21 Seiten mit 31 Bildern (davon 7 Analysebilder mit Betrachtungsbeile) sowie 1 Zahlentafel. 1947.
- Hefte 50 **Katolyse und Frequenzmessenurteilung des Gierlaubes von Kraftmaschinen.** Von H. Glaubitz und K. Gössle.
- Hefte 51 **Zündverzögerung und Bewertung des Kraftstoffes.** Grundlagen zur Entwicklung eines einheitlichen Prüfverfahrens für Diesel- und Ottokraftstoffe. Von H. Ernst VDI. Zündverzögerungen an Diesel- und Ottokraftstoffen. Von O. Widmaier. DIN A 4, 36 Seiten mit 44 Bildern und 4 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 3,40 RM.
- Hefte 52 **Aufladungsvergange von Viertakt Dieselmotoren.** Der Spülvorgang. Von W. Riedel. DIN A 4, 15 Seiten mit 32 Bildern. 1941. Brosch. 1,20 RM.
- Hefte 53 **Der Spülvorgang auf Grund einer neuen Auffassung der Expansionsströmung.** Von F. Schultz-Grunow VDI und K. Wieghardt. DIN A 4, 15 Seiten mit 15 Bildern. 1941. Brosch. 1,50 RM.
- Hefte 54 **Der Betrieb gemisch-gepülpter Zweitaktmotoren mit Flühagrass.** Von U. Schmidt. DIN A 4, 16 Seiten mit 19 Bildern. 1941. Brosch. 1,50 RM.
- Hefte 55 **Das Schmiermittel im Zahnradgetriebe unter besonderer Berücksichtigung der Grenzreibung.** Von E. Pietsch VDI. DIN A 4, 24 Seiten mit 20 Bildern, 25 Oszillogrammen und 2 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 2,25 RM.
- Hefte 56 **Progressive Federung von Kraftwagen.** Von E. Lehr VDI. DIN A 4, 12 Seiten mit 21 Bildern. 1941. Brosch. 1,15 RM.
- Hefte 57 **Versuche zur Frage der Kraftstoffaufbereitung durch die Einspritzdüse.** Von W. Oschatz. DIN A 4, 32 Seiten mit 102 Bildern. 1941. Brosch. 3,— RM.
- Hefte 58 **Vorspannung und Dauerhaltbarkeit an Schraubenverbindungen mit einer und mehreren Schrauben.** Von A. Thum VDI und H. Lorenz VDI. DIN A 4, 20 Seiten mit 34 Bildern und 13 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 1,85 RM.
- Hefte 59 **Kraftstoff und Motor beim Anlassen von Fahrzeugdieselmotoren.** Mit folgenden Beiträgen: Der Einfluß der Zündwilligkeit des Kraftstoffes auf das Anlaßverhalten von Fahrzeugdieselmotoren. Von W. Rixmann. Einfluß der Drehzahl auf die Selbstdauer beim Fahrzeugdieselmotor in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Von H. J. Conrad. DIN A 4, 83 Seiten mit 88 Bildern und 15 Zahlentafeln. 1941. Brosch. 7,90 RM.
- Hefte 60 **Nachweis der Schmierfilmdurchbrechung durch Messen des elektrischen Übergangswiderstandes zwischen Kolbenring und Zylinder.** Von R. Poppinga VDI. Din A 4, 31 Seiten mit 41 Bildern. 1941. Brosch. 3,— RM.

Verzeichnis der früher erschienenen Hefte steht kostenlos zur Verfügung

Bezug durch jede Buchhandlung!



VDI-VERLAG GMBH · BERLIN NW 7

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

SF 6

000754

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 109 / 1942

Über die Gewinnung von Schmierölen aus Braunkohlenteer
(K 21.4868-Fo IV IBM Bln-15 v. 1. 4. 41)

Bericht aus dem
Institut für Braunkohlen- und Mineralölforschung
an der Technischen Hochschule Berlin

Prof. Dr. habil. R. Heinze

000755

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 109 / 1942

Über die Gewinnung von Schmierölen aus Braunkohlenteer
(K 21.4868-Fo IV IBM Bln-15 v. 1. 4. 41)

Bericht aus dem
Institut für Braunkohlen- und Mineralölforschung
an der Technischen Hochschule Berlin

Prof. Dr. habil. R. Heinze

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Verschuß zu halten.

000756

Bearbeiter: Dozent Dr. habil. M. Mardor
und Dipl.Chem. H. Feichtinger

000757

1. Grundgedanke der vorliegenden Arbeit

Öle aus Teeren aller Art können wegen ihrer starken Viskosität- Temperatur-Abhängigkeit und ihrer hohen Verkokungsneigung nicht als Motorenöle verwendet werden. Erst in neuerer Zeit wurden Versuche unternommen, auch Braunkohlenschwelteere als Ausgangstoffe bei der Gewinnung von Motorenölen einzusetzen. Der Grundgedanke der Aufarbeitung von Braunkohlenschwelteeren zu Schmierölen besteht darin, die Teere von unerwünschten aromatischen naphthenischen Bestandteilen sowie von Sauerstoff-, Schwefel- und Stickstoffverbindungen durch Anwendung auswählend wirkender Lösungsmittel zu befreien und zwecks Viskositätserhöhung mit Kondensationsmitteln wie Metallchloriden nachzubehandeln. Die Eigenschaften der auf diesen Wege erzeugten Schmieröle sind zwar gegenüber den unmittelbar aus Braunkohlenteer gewonnenen Ölen verbessert, entsprechen aber den hohen, an Motorenöle gestellten Anforderungen noch nicht.

In weiteren Arbeiten wurde versucht, eine Verbesserung der Teeröle dadurch hervorzurufen, dass man den Lösungsmittelbehandelten Ölen vor der Umsetzung mit Metallchloriden Chlorparaffine zusetzte. Das sich unter Chlorwasserstoffabspaltung mit umsetzende Paraffin erhöht den paraffinischen Anteil am Teeröl und verbessert dementsprechend die Viskosität-Temperaturabhängigkeit sowie die thermische Beständigkeit des Enderzeugnisses. Die mit Chlorparaffinzusatz vorgenommenen Versuche führten jedoch deshalb nicht zu einem brauchbaren Motorenöl, weil es nicht gelang, die Chlorwasserstoffabspaltung aus dem Chlorparaffin unter den angewandten Umsetzungsbedingungen bis zu Ende zu führen. Die gewonnenen Öle enthielten erhebliche Mengen von Chlorverbindungen mit stark metallkorrodierenden Eigenschaften.

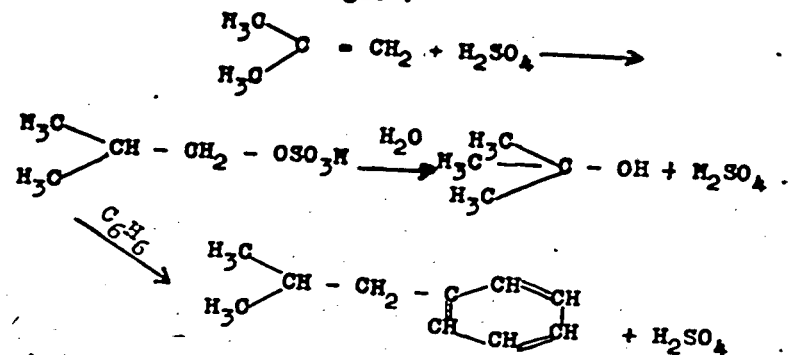
Die vorliegende Arbeit verfolgte deshalb das Ziel, die Anreicherung paraffinischer Anteile in den Teeren durch Mischpolymerisation in Gegenwart von Schwefelsäure mit Olefinen zu erreichen. Die benötigten Olefine werden durch Abspaltung von Chlorwasserstoff aus Chlorparaffinen bei erhöhter Temperatur gewonnen. Eine solche Arbeitsweise erlaubt die erstrebte Kettenverlängerung innerhalb der Teermoleküle unter Vermeidung der durch Verwendung von Chlorparaffin und Metallchlorid auftretenden Schwierigkeiten. Da mit den Olefinen nur die im Dieselmotor schwer zündenden Aromaten zu hochmolekularen Schmierölkohlenwasserstoffen reagieren, werden in der Ausgangsteerfraktion Paraffinkohlenwasserstoffe mit hoher Zündwilligkeit angereichert. Mit der Schmierölfraction wird also gleichzeitig die Dieselmotorkraftstoff-Fraktion verbessert. Zur Erkennung des ablaufenden Reaktionsmechanismus wurden den eigentlichen Versuchen mit Braunkohlenteerölen Mischpolymerisationsversuche mit Kohlenwasserstoffindividuen vorangestellt.

2. Darstellung von Alkylbenzolen durch Addition von Olefinen an Benzoe

Zur Darstellung von Monoalkylbenzolen kann man in verschiedener Weise 3) vorgehen. In diesem Zusammenhange interessiert nur

die von I p a t i e f f, C o r e o n und P i n e s ⁴⁾ beschriebene Arbeitsweise, nach der die Alkylierung von Benzol mit Olefinen oder Isoolefinen unter Zuhilfenahme von konz. Schwefelsäure als Katalysator erfolgt.

Bei Alkylierungsversuchen mit Isobutylen, Amylen, Octylen, Nonylen, Undecylen und Dodecylen (Reaktionstemperatur 0 bis 10°C) wurden drei Hauptreaktionen beobachtet, die je nach der angewandten Säurestärke mehr oder weniger in den Vordergrund treten. Unter der Einwirkung 70%iger Schwefelsäure findet lediglich eine Esterbildung des Olefins mit der Säure statt. Bei Anwendung 80%iger Säure tritt hauptsächlich eine Polymerisation der Olefine ein, während 90-96%ige Säure im wesentlichen die Bildung von Monoalkylbenzolen katalysiert. Die Alkybenzoldarstellung verläuft dabei über den Schwefelsäureester, denn während der Reaktion von Benzol mit Isobutylen konnte Isobutylsulfat abgefangen werden, das mit Wasser tertiären Butylalkohol ergab:



Da bei den mit Braunkohlenteerölen und Olefinen durchzuführenden Versuchen ebenfalls Alkylierungsreaktionen angestrebt werden, ergibt sich, dass bei den Umsetzungen am günstigsten eine hohe Säurekonzentration gewählt wird.

Eine Wiederholung der von I p a t i e f f und Mitarbeitern angegebenen Benzolalkylierungsumsetzungen mit n-A-Heptylen und n-A-Hexadecylen in Gegenwart von 98%iger Schwefelsäure führte zu den erwarteten Alkylierungsergebnissen. Die physikalischen Daten der gereinigten Alkybenzole stimmen in engen Grenzen mit denen der von S c h m i d t, H o p p und S c h o e l l e r ⁵⁾ auf anderem Wege gewonnenen reinen Alkybenzole überein.

Praktische Versuche:

Darstellung von n-Heptylbenzol

5,2 g n-Heptylen (n-Pentyläthylen) wurden in einem Rundkolben von 0,5 l Inhalt mit 33,1 g Benzol (im Verhältnis von 1:8 Molen) vermischt und auf 0°C gekühlt. Der Kolben besaß 3 Tuben, durch die ein mechanischer Rührer, ein Tropftrichter und ein Thermometer eingeführt wurden. Unter ständigem Rühren und unter Einhaltung einer Temperatur von 0 bis 2°C wurden 38,3 g 98%ige Schwefelsäure zugegeben. Die Schwefelsäuremenge war so berechnet, dass das Gewichtverhältnis Kohlenwasserstoffgemisch : Säure 1:1 betrug. Dieses Verhältnis wurde bei allen nachfolgenden Versuchen beibehalten.

Nach einer Reaktionszeit von 5 Stunden wurde das Gemisch im Scheidetrichter bei Raumtemperatur stehen gelassen. Nach Eintritt der Schichtentrennung wurde die untere Schwefelsäureschicht abgelassen. Das Reaktionserzeugnis wurde mit 5%iger Natronlauge behandelt und mehrmals mit dest. Wasser gewaschen, um die Natriumsalze der gebildeten Säuren - Heptylschwefelsäure, Heptylsulfosäure und Benzolsulfosäure - zu entfernen. Das neutralisierte und gewaschene Produkt wurde mit geblühtem Natriumsulfat getrocknet und bei Normaldruck destilliert. Nach Übergang der ersten Tropfen stieg das Thermometer sofort auf 230°C. Die gesamte Flüssigkeit ging zwischen 230 und 235°C über. Nachmaliges Fraktionieren ergab 5,12 g eines zwischen 232 und 235°C siedenden Körpers. Zu seiner Identifizierung wurden die Wichte, der Brechungsindex und die Elementarzusammensetzung ermittelt:

	Heptylbenzol	
	Literaturwerte ³⁾	eigene Werte
Kp ₇₆₀ , °C	233	232 - 233
d ₂₀ ⁴⁾	0,8590	0,8606
n _D 20	1,4860	1,4860

Elementarzusammensetzung:

4,157 mg Substanz: 13,510 mg CO₂, 4,220 mg H₂O

Bor. C 88,63 % H 11,37 %

Gef. C 88,69 % H 11,36 %

Der Beweis für die eingetretene Addition von Heptylen und Benzol ist somit erbracht. Die Ausbeute an Heptylbenzol beträgt 56,0 % der Theorie.

Darstellung von n-Cetylbenzol

Eine weitere Addition gelang mit n-A-Ceten (n-A-Hexadecylen) und Benzol. 56,3 g Ceten wurden mit 183,2 g Benzol (im Verhältnis von 1:8 Molen) und 239,5 g 98%iger Schwefelsäure in schon beschriebener Weise bei 0 bis 2°C umgesetzt. Bei der Unterdruckdestillation des neutralisierten, gewaschenen und getrockneten Reaktionsproduktes gingen 41,5 g eines bei 15 mm Hg-Säule von 210 bis 235°C siedenden Destillats über. Bei der Rektifikation wurden 30,0 g eines unter 15 mm Hg-Säule bei 230 bis 231°C siedenden Produktes, das anhand der nachfolgenden Kenndaten als Cetylbenzol angesprochen wurde, erhalten.

n - Cetylbenzol

	Literaturwerte ³⁾	eigene Werte
$n_{D, 15}^{20}$	230	230 bis 231
d_{20}^{20}	0,8506	0,8503
n_D^{20}	1,4014	1,4002
Viskosität:		
ost bei 40°C	6,89	6,75
80°C	3,10	3,06
η bei 40°C	1,555	1,543
80°C	1,226	1,222

Elementarzusammensetzung:

5,168 mg Substanz: 16,495 mg CO₂, 5,790 mg H₂O

Ber. C 87,33 % H 12,67 %

Gef. C 87,08 % H 12,54 %

Die Ausbeute an Cetylbenzol errechnet sich auf 38,0 %, bezogen auf das Ausgangskohlenwasserstoffgemisch.

3. Darstellung ungesättigter Kohlenwasserstoffe aus Paraffinen

Für technische Umsetzungen zur Herstellung von Schmierölen aus Braunkohlenteeren stehen definierte Olefine aus Braunkohlenteeren nicht zur Verfügung. Ein Weg, Olefine in technischem Ausmaße zu gewinnen, besteht darin, das bei der Schwelung von Braunkohlen ebenfalls anfallende feste Paraffin zu chlorieren und aus dem Chlorparaffin z.B. durch Erhitzen Salzsäure abzuspalten. Um einen Anhaltspunkt über den bei einer solchen Umsetzung eintretenden Reaktionsverlauf zu erhalten, wurde zunächst ein reiner Paraffinkohlenwasserstoff, und zwar Cetan, einer Chlorierung mit anschliessender Salzsäureabspaltung unterworfen. Das Cetan wurde dabei so lange chloriert, bis die Gewichtszunahme theoretisch der Bildung von Monochloracetan entsprach. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Chlorierungsversuchen⁶⁾ an niedrig siedenden Paraffinkohlenwasserstoffen entstand nach der HCl-Abspaltung kein einheitliches Olefin mit konstantem Siedepunkt, sondern ein ungesättigtes Produkt mit einem weiten Siedeintervall (ca. 170 bis 360° bei 15 mm Hg-Säule). Hieraus ist zu folgern, dass der Angriff des Chlors, wenn auch mit unterschiedlicher Stärke, über die ganze Kette der Paraffinkohlenwasserstoffe erfolgt. Möglicherweise werden für die Angriffsfähigkeit der einzelnen Atome der Ketten ähnliche Gesichtspunkte massgeblich sein, wie sie in der Olefinspaltregel von

O. Schmidt⁷⁾ zum Ausdruck kommen. Das gilt insbesondere für die gleichzeitig entstehenden mehrfach chlorierten Paraffine. Ein Beweis für die Entstehung der mehrfach chlorierten Paraffine ist einfach dadurch gegeben, dass es gelingt, durch Kühlung des Monochlorparaffins eine erhebliche Menge unveränderten Paraffins abzutrennen. Weitere Untersuchungen darüber werden einer späteren Arbeit vorbehalten.

Für die Gewinnung von Olefinen aus hochmolekularen Paraffinen über die Chlorparaffine als Zwischenstufe genügt es im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu wissen, dass die Wasserstoffsubstitution durch Chlor sowohl zu einfach als auch zu mehrfach chlorierten Kohlenwasserstoffen führt. Wie der ziemlich kontinuierliche Verlauf der Destillationskurve der durch HCl-Abspaltung gewonnenen ungesättigten Kohlenwasserstoffe andeutet, scheint eine besondere Bevorzugung bestimmter Molekülstellen bei der Substitution nicht stattzufinden, z.B. konnte nur ein sehr geringer Bruchteil des Chlorproduktes von Cetan als α -Chloracetan durch Überführung in n-Cetylbenzol identifiziert werden. Es ist also wahrscheinlich, dass die Bevorzugung der α -Stellung, wie sie von Michael und Turner⁸⁾ bei der Wasserstoffsubstitution des Hexans durch Chlor gefunden wurde, mit zunehmender Kettenlänge der Paraffinmoleküle zurückgeht.

Demgemäss ist anzunehmen, dass bei der Olefindarstellung aus festem Braunkohlenparaffin durch Chlorierung und HCl-Abspaltung ein fast unentwirrbares Gemisch von ungesättigten Kohlenwasserstoffen mit Doppelbindungen in praktisch allen möglichen Molekülstellungen gebildet wird. Seine Zusammensetzung wird je nach den angewandten Versuchsbedingungen bei der Chlorierung erheblich verändert.

Praktische Versuche:

Darstellung von ungesättigten Kohlenwasserstoffen aus Cetan

In eine mit 502 g Cetan beschickte Waschflasche, deren Einleitungsrohr mit einer Glasfritte versehen war, wurde bei einer Flüssigkeitstemperatur von 140° Chlor eingeleitet. Das einer üblichen Stahlflasche entnommene Chlor wurde vor dem Einleiten mit konz. Schwefelsäure gewaschen. Die Aufheizung des Waschflascheninhaltes geschah mittels eines gasbeheizten Paraffinbades. Die unter diesen Bedingungen leicht von statten gehende Reaktion ist exotherm, so dass sich die Temperatur des Reaktionsgemisches durch Einstellung der Strömungsgeschwindigkeit des Chlors leicht regeln lässt. Das sich in grossen Mengen entwickelnde Salzsäuregas wurde in einer nachgeschalteten Waschflasche in Wasser aufgefangen. Die Chlor-Reaktionsgefässes 78,2 g betrug. Diese Zunahme entspricht theoretisch der Bildung von Monochloracetan. Das Reaktionsprodukt wurde zwecks Abspaltung von Salzsäure zweimal bei Normaldruck destilliert. Man erhielt ein wenig Chlor enthaltendes Gemisch ungesättigter Kohlenwasserstoffe (Chlorgehalt 1,78 Gew.%) das in den Grenzen von etwa 200 bis 360° bei Normaldruck siedet und in einer Ausbeute von 448 g = 90% der Theorie anfiel.

Das so gewonnene ungesättigte Kohlenwasserstoffgemisch wurde in derselben Weise wie Heptylen und Cetan unter Verwendung von Schwefelsäure als Katalysator zu Benzol addiert. Das Reaktionsprodukt wurde durch fraktionierte Destillation bei 15 mm Hg-Säule in die folgenden Fraktionen zerlegt:

Fraktion Nr.	Siedegransen °C bei 15 mm Hg	Ausbeute %
1	170 bis 225	38,1
2	225 bis 240	3,5
3	240 bis 310	10,5

Aus der Fraktion 2 wurde durch nochmalige Destillation eine zwischen 229 bis 331 siedende (15 mm Hg) Mittelfraktion herausgeschnitten. Diese dem n-Cetylbenzol entsprechende Fraktion fiel in einer Ausbeute von nur 1,36 g an. Ihre Elementarzusammensetzung und ihre physikalischen Daten stehen mit denen von n-Cetylbenzol in verhältnissmäßig guter Übereinstimmung:

Cetylbenzol	Fraktion 230 - 231° (15 mm Hg)
d ₂₀ 0,8558	0,8532
n _D 20 1,4814	1,4852

Elementarzusammensetzung:

4,908 mg Substanz: 15,425 mg CO₂, 5,470 mg H₂O

Ber. C 87,33 % H 12,67 %
 Gef. C 85,74 % H 12,47 %

Darstellung ungesättigter Kohlenwasserstoffe aus Braunkohlenhartparaffin

Die Umwandlung von Braunkohlenhartparaffin (Schmp. 52°C) in ungesättigte Kohlenwasserstoffe wurde in derselben Weise wie die des Cetans vorgenommen. Der Chlorgehalt des Hartparaffins betrug nach der Chloreinleitung 19,82 Gew. % (Carius). Das bei der nachfolgenden Destillation unter Salzsäureabspaltung entstehende ungesättigte Kohlenwasserstoffgemisch ging zwischen 180 und 360°C über. Es stellte eine helle, ölige Flüssigkeit dar, die beim Stehen an der Luft schnell eine gelbe bis braune Färbung annahm.

Aus 100 Gewichtsteilen Chlorparaffin wurden beim Destillieren gewonnen:

76,7 Gew. % Kohlenwasserstoffe

22,5 Gew. % Salzsäure

1,9 Gew. % schwarzer, pechartiger Rückstand.

Das nach der Destillation im Destillat noch verbliebene Salzsäuregas wurde durch Erhitzen auf 200°C unter Durchleiten eines Stickstoffstromes ausgetrieben. Das von Salzsäuregas befreite Erzeugnis erwies sich bei der Cariusbestimmung als chlorfrei.

4. Additionsreaktionen zur Gewinnung viskoser Kohlenwasserstoffe

a) Mischpolymerisation ungesättigter Kohlenwasserstoffe aus Chlorparaffinen mit Braunkohlenteeröl

Die aus Chlorparaffinen dargestellten ungesättigten Kohlenwasserstoffe lassen sich unter der Einwirkung von Schwefelsäure mit Aromaten zu höhermolekularen Kohlenwasserstoffen addieren. Als aromatenhaltige Ausgangsstoffe kommen technisch in erster Linie Teeröle (Dieselkraftstofffraktion) in Frage. Wie bereits ausgeführt, reagieren in diesem Falle die in Dieselkraftstoffen unerwünschten aromatischen Bestandteile mit den schon enthaltenen und den zugesetzten ungesättigten zu höhermolekularen Kohlenwasserstoffen, während die paraffinisch-naphthenischen Anteile unverändert dem Dieselkraftstoff-Siedebereich erhalten bleiben. Man kann so erwarten, dass gute Dieselkraftstoffe und brauchbare Schmieröle gleichzeitig hergestellt werden können.

Je nachdem, wie man das nach der Umsetzung von Braunkohlenteeröl mit ungesättigten aus Chlorparaffinen erhaltene Produkt aufarbeitet, gewinnt man Schmieröle verschiedener Eignung. Trennt man das Reaktionsprodukt durch Destillation in ein als Dieselkraftstoff verwendbares Destillat und ein als Schmieröl angesprochenes Rückstandöl, so findet sich in letzterem ein unzulässig hoher Aschegehalt (z.B. 7,8 Gew. %). Dieser Aschegehalt ist ausschliesslich auf die nach der Umsetzung zwecks Neutralisation erfolgende Laugebehandlung zurückzuführen, bei der die während der Schwefelsäureumsetzung als Nebenprodukte entstehenden Alkylschwefelsäuren in die entsprechenden Salze umgewandelt werden. Ein brauchbares Schmieröl lässt sich deshalb nur als Destillat gewinnen. Die Ergebnisse der nachstehend beschriebenen praktischen Versuche lassen klar erkennen, dass die in solcher Weise hergestellten Destillatschmieröle den Anforderungen an Motorenöle entsprechen. Die dabei gleichzeitig erzielte Verbesserung der Dieselkraftstoffeigenschaften ist erheblich.

b) Polymerisation von ungesättigten Kohlenwasserstoffen aus Chlorparaffinen und von Braunkohlenteeröl je für sich

Welche Vorteile die Umsetzung des Braunkohlenteeröles mit den ungesättigten Kohlenwasserstoffen aus Chlorparaffin mit sich bringt, lässt sich aus den Ergebnissen der mit Braunkohlenteeröl bzw. ungesättigten Kohlenwasserstoffen allein angesetzten Schwefelsäureumsetzungen entnehmen.

Die Anwesenheit der ungesättigten Kohlenwasserstoffe aus Chlorparaffin bewirkt eine bedeutende Steigerung der Gesamtausbeute an Dieselkraftstoff und Schmieröl (von 32,0 aus Braunkohlenteeröl auf 55,8 Gew. % aus Teeröl-ungesättigten-Gemisch). Die ungesättigten Kohlenwasserstoffe ergaben für sich allein mit Schwefelsäure in Reaktion gebracht 56,3 Gew. % Dieselkraftstoff und Schmieröl. Durch den angewandten Zusatz an ungesättigten Kohlenwasserstoffen zum Braunkohlenteeröl (105 g zu 150 g.) wurden die Ausbeuten an Dieselkraftstoff und Schmieröl also bereits so verbessert, als ob sich reine

ungesättigte Kohlenwasserstoffe aus Chlorparaffin umgesetzt hatten. Trotzdem ist der als Säureester verlustig gehende Kohlenwasserstoffanteil mit rund 40 Gew. % sehr hoch. Wahrscheinlich wird durch Herabsetzung der Säurestärke von 98% auf etwa 90 bis 92 % eine Verbesserung in dieser Hinsicht erzielt werden können.

Die Eigenschaften der Reaktionsergebnisse werden durch den Zusatz ungesättigter Kohlenwasserstoffe zum Braunkohlenteeröl ebenfalls stark beeinflusst. Mit steigender Zusatzmenge fallen das spez. Gewicht und die Verkokungsneigung der gewonnenen Dieselkraftstofffraktion ab, die Zündwilligkeit, wie aus der Abnahme des spezifischen Gewichts geschlossen werden kann, nimmt dagegen zu 1). Bei der Schmierölfraction ist ein Abfall des spez. Gewichtes und der Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit (Viskositätspolhöhe) zu verzeichnen. Die Verkokungsneigung nimmt in engen Grenzen zu, ohne die erzielten Verbesserungen zu beeinträchtigen. Eine eindeutige Abhängigkeit der Viskosität bei gleicher Temperatur scheint nicht vorhanden zu sein.

Praktische Versuche :

Die Umsetzung des Braunkohlendieselkraftstoffes mit den aus Chlorparaffin durch HCl - Abspaltung erzeugten Ungesättigten wurde in den schon genannten dreifach turbulierten Glaskolben durchgeführt. Wie bei den dort beschriebenen Alkylierungsversuchen wurde das Mischungsverhältnis Kohlenwasserstoffgemisch : Schwefelsäure (98 %ig) 1 : 1 gewählt. Die Reaktionstemperatur betrug 0 bis 30°C, die Reaktionsdauer 1,5 Stunden.

105 g ungesättigter Kohlenwasserstoff ($d_{20}^4 = 0,8236$, $Kp_{12} \text{ mm} = 60 - 220^\circ \text{C}$) wurden mit 150 g Braunkohlendieselkraftstofffraktion ($d_{20}^4 = 0,8888$, $Kp_{12} \text{ mm} = 60 \text{ bis } 220^\circ \text{C}$, Conradson test 0,013 Gew.%, Cetanzahl 39,2) in Gegenwart von 255 g 98 %iger Schwefelsäure zur Reaktion gebracht. Nach der Umsetzung wurden 158 g = Rest von 97 g = 38 Gew. % verblieben in der Schwefelsäure als Säure- getrennte Kohlenwasserstoffprodukt wurde zur Vermeidung starker Emulsionsbildung vor der Neutralisation mit dem 8-fachen Volumen Benzol aufgenommen und mit festem Natriumcarbonat versetzt. Die beim Erwärmen gebildete Schicht der ausgeschiedenen Natriumsalze wurde abgelassen. Das noch verbleibende Reaktionsprodukt (58,0 Gew. %), bezogen auf das Ausgangskohlenwasserstoffgemisch) wurde mit Wasser gewaschen und vom zugesetzten Benzol durch Destillation bei Normaldruck getrennt. Durch weitere Destillation bei Unterdruck wurde das von Benzol befreite Reaktionsprodukt in ein bei 12 mm Hg-Druck unter 220°C siedende Destillat (Dieselkraftstoff), ein zwischen 220 und 360°C (15 mm Hg-Druck) überggehendes Destillat (Schmieröl) und einen im Kolben als schwarzes Hartpech verbleibenden Rückstand zerlegt. Die Ausbeuten an Dieselkraftstoff, Schmieröl und Rückstand, bezogen auf das benzolfreie Kondensat, betrugen 62,0, 34,2 und 3,8 Gew.%. Aus der eingesetzten Kohlenwasserstoffmenge wurden also gewonnen :

- 1) Eine Bestimmung der Cetanzahl der erzeugten Dieselkraftstoffe konnte wegen der geringen zur Verfügung stehenden Kraftstoffmengen nicht vorgenommen werden.
- 2) Zwecks Vermeidung von Schwierigkeiten durch Paraffinausscheidungen wurden sowohl die unges. Kohlenwasserstoffe aus Chlorparaffin als auch der Braunkohlendieselkraftstoff vor der Umsetzung bei -10°C entparaffiniert.

	g	Gew. %
Dieselmkraftstoff	91,8	36,0
Schmieröl	50,5	19,8
Verlust		
a) durch Säureesterbildung	97,0	38,0
b) bei der Lösgewäsche	10,1	4,0
c) als Destillationsrückstand	5,6	2,2
	255,0	100,0

Dieselmkraftstoffeigenschaften :

Spez. Gewicht d_{20}^4	0,8172
Siedegrenzen (12 mm Hg), °C	66 - 220
Verkokungsneigung (Conradson) Gew. %	0,000.

Schmieröleigenschaften :

Spez. Gewicht d_{20}^4	0,9143
Siedegrenzen (15 mm Hg), °C	220 bis 360 °
Viskosität bei 40°C, cSt	64,80
°C	8,58
°C	12,80
°C	2,10
Viskositätspolhöhe	2,38
Verkokungsneigung (Conradson), Gew. %	0,51

Umsetzung der ungesättigten Kohlenwasserstoffe aus Chlorparaffin mit Schwefelsäure

105 g ungesättigter Kohlenwasserstoff aus Chlorparaffin wurden in beschriebener Weise unter Einhaltung der genannten Bedingungen mit Schwefelsäure (98% ig) zur Reaktion gebracht. Bei der Unterdruckdestillation (12 mm Hg) des in einer Ausbeute von 61,8 % angefallenen Umsetzungsproduktes gingen 56,3 Gew. % bis 220°C über (Dieselmkraftstoff-Fraktion), 36,0 Gew. % fielen in den Siedegrenzen von 220 bis 380°C an. Der Rest verblieb als schwarzer pechartiger Rückstand im Destillierkolben.

Ausbeuten, bezogen auf Ausgangskohlenwasserstoff:

	g	Gew. %
Dieseldieselkraftstoff	36,2	34,3
Schmieröl	23,1	22,0
Verlust		
a) durch Säureteerbildung	37,8	36,0
b) bei der Laugewäsche	3,1	3,0
c) als Destillationsrückstand	4,9	4,7
	<u>105,00</u>	<u>100,00</u>

Dieseldieselkraftstoffeigenschaften:

Spez. Gewicht d_{20}^4	0,8112
Siedegrenzen (12 mm Hg), °C	70 - 220
Verkokungsneigung, Gew. % (Conradson)	0,000

Schmieröleigenschaften:

Spez. Gew. d_{20}^4	0,8888
Siedegrenzen (12 mm Hg), °C	220 - 380
Viskosität bei 40°C, cSt	41,15
°E	5,49
bei 80°C, cSt	10,07
°E	1,84
Viskositätspolhöhe	1,90
Verkokungsneigung, Gew. % (Conradson)	0,44

Umsetzung von Braunkohlendieseldieselkraftstoff mit Schwefelsäure:

150 g Braunkohlendieseldieselkraftstoff wurden wie bei den vorstehend beschriebenen Umsetzungen mit 150 g Schwefelsäure (98%ig) zur Reaktion gebracht. Hierbei und bei der nachfolgenden Unterdruckdestillation (12 mm Hg-Druck) ergeben sich folgende Ausbeuten an Endstoffen:

Ausbeuten, bezogen auf die eingesetzte Braunkohlendieselkraftstoffmenge:

	g	Gew. %
Dieseldieselkraftstoff	33,9	22,6
Schmieröl	15,0	9,4
Verlust		
a) durch Säureteerbildung	91,5	61,0
b) bei der Laugewäsche	6,0	4,0
c) als Destillationsrückstand	4,5	3,0
	<u>150,9</u>	<u>100,0</u>

Dieseldieselkraftstoffeigenschaften:

Spez. Gewicht d_{20}^4	0,8295
Siedegrenzen (12 mm Hg), °C	50 bis 220
Verkokungsneigung, Gew. % (Conradson)	0,006

Schmieröleigenschaften:

Spez. Gewicht d_{20}^4	0,9204
Siedegrenzen (12 mm), °C	220 - 340
Viskosität bei 40°C, cSt	52,90
°E	7,01
bei 80°C, cSt	10,50
°E	1,88
Viskositätspolhöhe	2,87
Verkokungsneigung, Gew. % (Conradson)	0,29

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.

Wenn auch die deutsche Schmierölversorgung zu Beginn des Krieges dank der stark erhöhten Erdölförderung und dank der Entwicklung der Synthese-Schmierölindustrie als gesichert gelten konnte, so ist doch durch den erhöhten Verbrauch der Wehrmacht und besonders durch die Angliederung grosser Wirtschaftsräume eine Bedarfserhöhung eingetreten, die durch die während des Krieges hinzugekommene Produktion in Rumänien und im ehemaligen Polen nicht völlig wettgemacht wird. Es liegt deshalb nahe, zusätzlich auch andere,

Kohlenwasserstofföle enthaltende Rohstoffe wie Braunkohlenschwefelöle durch geeignete Veredlungsverfahren der Schmierölindustrie nutzbar zu machen.

Die bisher erzeugten Schmieröle aus Teeren verschiedener Art finden jedoch wegen der starken Temperaturabhängigkeit ihrer Viskosität, wegen ihres hohen Asphaltgehaltes und ihrer ebenfalls hohen Verkokungsneigung nur für untergeordnete Zwecke Verwendung. Die vorliegende Arbeit verfolgt deshalb das Ziel, hochwertige Schmieröle aus Braunkohlenschwefelölen durch chemische Umwandlung zu gewinnen. Der Grundgedanke der angewandten Aufbereitungsweise besteht darin, die aromatenhaltige Dieselkraftstofffraktion der Braunkohlenteere mit langkettigen ungesättigten Kohlenwasserstoffen unter Einwirkung von Schwefelsäure als Katalysator in Reaktion zu bringen. Die benötigten ungesättigten Kohlenwasserstoffe werden durch Chlorierung von Braunkohlenparaffin und durch anschließende Abspaltung von Salzsäuregas in der Hitze hergestellt. Bei der Umsetzung mit Braunkohlendieselkraftstoff in Gegenwart von konz. Schwefelsäure addieren sich die zugeetzten und die im Kraftstoff enthaltenen ungesättigten Kohlenwasserstoffe an die aromatischen Kohlenwasserstoffe der Teerfraktion unter Bildung höhermolekularer viskoser Verbindungen. Durch den Entzug der schwerzündenden aromatischen Anteile werden die zündtechnischen Eigenschaften der restlichen Dieselkraftstofffraktion bedeutend verbessert. Andererseits wird der unerwünschte aromatische Charakter der Schmieröle durch die Addition langer Seitenketten weitgehend aufgehoben.

Zur Aufklärung des eintretenden Reaktionsverlaufs und zur Festlegung der günstigsten Reaktionsbedingungen wurden den eigentlichen Versuchen Umsetzungen mit reinen Kohlenwasserstoffverbindungen vorangestellt. Durch Darstellung von Heptylbenzol und Cetylbenzol wurde der Nachweis erbracht, dass der von anderer Seite angenommene Mechanismus bei der Schwefelsäureumsetzung von Aromaten mit Olefinen richtig ist. Die Reaktionsbedingungen können so gewählt werden, dass im wesentlichen eine Bildung von alkylierten Aromaten eintritt. Wie Chlorierungsversuche an Cetan wahrscheinlich machen, ergibt die Chlorierung von Paraffin einfach und mehrfach chlorierte Kohlenwasserstoffe mit Chloratomen in voraussichtlich allen möglichen Molekülstellungen. Zu dieser Schlussfolgerung führte insbesondere der Befund, dass die Giedekurve der durch Salzsäureabspaltung aus Chloracetan dargestellten ungesättigten Kohlenwasserstoffe kontinuierlich verlief.

Die katalytische Umsetzung von Braunkohlendieselkraftstoff mit ungesättigten Kohlenwasserstoffen aus Chlorparaffin zeitigte als Reaktionsergebnisse einen gegenüber dem Ausgangskraftstoff erheblich verbesserten Dieselkraftstoff und ein gut brauchbares Motorenöl. Die niedrige, nur rund 55 Gew.-% (bezogen auf Ausgangskohlenwasserstoff) betragende Ausbeute an Schmieröl plus Dieselkraftstoff liess zu wünschen übrig. Es ist jedoch zu erwarten, dass der hauptsächlich durch Säureteerbildung hervorgerufene Verlust durch Verringerung der Säurestärke herabgesetzt werden kann. Wie die Ergebnisse der mit Braunkohlendieselkraftstoff bzw. mit ungesättigten Kohlenwasserstoffen aus Chlorparaffin allein angestellten Versuche erkennen lassen, werden durch die gleichzeitige Umsetzung beider Ausgangskomponenten Endergebnisse von fast ebenso guten Eigenschaften wie durch Olefinpolymerisation allein gewonnen. Die Ausbeuten sind in beiden Fällen etwa gleich. Damit ist grundsätzlich der Nachweis für die Brauchbarkeit des Braunkohlenteeres als Ausgangsstoff für die Erzeugung hochwertiger Schmieröle (Motorenöle) erbracht.

Schriften - Verzeichnis.

- 1.) Deutsche Erdöl A.G., E.P. 479 488 (1936)
F.P. 811 733 (1937)
Deutsche Anmeldung vom 8,8,1935
- 2.) M. Warden und G. Hertz, Deutsche Kraftfahrtforschung
im Auftrage des Reichsverkehrsministeriums,
Zwischenbericht 92 (1941)
- 3.) A.W. Schmidt, G. Hopp und v. Schoeller, Ber.dt.chem.Ges.
72 B, 1893 (1939)
- 4.) V.N. Ipatieff, R.B. Corson u.H. Pines, Journ.Amer.Chem.
Soc, 58, 913 (1936)
- 5.) F. Krafft und J. Göttig, Ber.dt.chem. Ges. 21,3180 (1888)
- 6.) A. Michael u.H.J. Turner, Ber.dt.chem.Ges. 39,2,153(1906)
- 7.) O. Schmidt, Z.physik.Chem. A 159, 337 (1932)
Ber.dt.chem.Ges. 67,1870 (1934)
68, 60. 1658 (1935)

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

S F 7

000764

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 120/1944

Über die Gewinnung von Schmierölen aus Braunkohlenteer

(K 21.3637, Fo IV IBM Bln. 15 v. 10. 4. 42)

Bericht aus dem

Institut für Braunkohlen- und Mineralölforschung
an der Technischen Hochschule Berlin

Prof. Dr. habil. R. Heinze

000765

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 120/1944

Über die Gewinnung von Schmierölen aus Braunkohlenteer
(K 21.3637, Fo IV IBM Bln. 15 v. 10. 4. 42)

Bericht aus dem
Institut für Braunkohlen- und Mineralölforschung
an der Technischen Hochschule Berlin

Prof. Dr. habil. R. Heinze

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Ver- schluß zu halten.

Die Gewinnung ausreichender Mengen guter Schmieröle stellt eine der Hauptaufgaben der deutschen Kriegswirtschaft dar. Da ausreichende Mengen Schmieröl aus Erdöl nicht zur Verfügung stehen, ist es notwendig, andere Rohstoffe z.B. Braunkohlenschwefel zur Schmierölerzeugung heranzuziehen.

Im folgenden wurde versucht, mit Hilfe von konz. Schwefelsäure als Katalysator die in Braunkohlenteerölen (Dieselkraftstoff-Fraktion) enthaltenen, aromatischen Bestandteile an die ebenfalls hierin befindlichen Olefine sowie die aus Braunkohlhartparaffin gewonnenen Olefine zu kondensieren. Dadurch werden die nicht sündwilligen Aromaten zu höhermolekularen, viskosen Schmierölkohlenwasserstoffen umgesetzt und paraffinische und naphthenische Inhaltsstoffe in der Dieselkraftstoff-Fraktion angereichert.

Um einen Überblick über die Ausbeuten und über die physikalischen und chemischen Eigenschaften der gewinnbaren Erzeugnisse zu bekommen, wurden einheitliche Siedegrenzen der Ausgangsstoffe gewählt. Aus einem handelsüblichen Dieselkraftstoff sowie aus den in oben dargestellter Weise gewonnenen Olefinprodukten wurde jeweils eine zwischen 60 bis 220°C bei 12 Torr übergehende Fraktion geschnitten und zur Vermeidung von Paraffinausscheidungen während der Umsetzung bei 0° entparaffiniert. Die beiden Fraktionen wurden jeweils für sich und im Verhältnis Dieselkraftstoff zu Olefin wie 2 : 1 mit konz. Schwefelsäure kondensiert. Die Additionsreaktion wurde in einem dreifach tubulierten Kolben (5ltr.) vorgenommen. Die Tuben dienten der Einführung eines eingeschliffenen Rührers, eines Thermometers und eines Tropftrichters. Das umzusetzende Kohlenwasserstoffgemisch wurde der im Kolben vorgelegten Säure aus dem Tropftrichter langsam zugeführt. Der Kolben selbst wurde durch ein Kältebad (Alkohol + Kohlenäureschnee) auf die jeweilig vorgesehene Reaktionstemperatur gebracht.

Umsetzungen mit 92 %iger Schwefelsäure.

Die Umsetzung des Braunkohlendieselkraftstoffes mit den aus Braunkohlhartparaffin gewonnenen Olefinen, die durch Chlorierung von Paraffin und Abspaltung der Salzsäure durch Destillation gewonnen wurden, wurde in der Weise vorgenommen, dass die im Verhältnis 2 : 1 gemischten Ausgangsstoffe unter ständigem Rühren in 92 %ige Schwefelsäure eingetragen wurden. Das Mischungsverhältnis Kohlenwasserstoffgemisch : Schwefelsäure war 1 : 2. Die Reaktionstemperatur betrug 0°C, die Reaktionsdauer 300 Minuten.

278 g ungesättigte Kohlenwasserstoffe
(d_{4}^{20} 0,8250) wurden mit 589 g Braunkohlendieselkraftstoff-Fraktion (d_{4}^{20} 0,8900) in Gegenwart von 1734 g 92 %iger Schwefelsäure zur Reaktion gebracht. Nach der Umsetzung wurde das Reaktionsergebnis im Scheidetrichter vom schweren Säureteer getrennt 620 g = 71,5 Gew. % des Ausgangskohlenwasserstoffgemisches wurden als säurehaltiges Rohkondensat zurückgewonnen. Der Rest von 247 g = 28,5 Gew. % verblieb in der Schwefelsäure als Säureteer und wurde verworfen. Zur Aufarbeitung des Rohkondensates wurde über pulverisiertem Kalziumoxyd im Vakuum destilliert, so dass die beim Kondensationsvorgang gebildeten Sulfonsäuren als Kalziumsalze im Rückstand blieben und das übergehende Destillat praktisch säurefrei war. Dieses wurde in eine bei 12 Torr bis

200°C übergehende Dieselkraftstoff-fraktion und eine bei 12 Torr, 220°C siedende Schmierölfraktion getrennt. Das Ende der Destillation wurde durch den an Thermometer leicht erkennbaren Krachpunkt bestimmt. Als Rückstand hinterließ im Destillationskolben ein schwarzes, sprödes Fech, das im wesentlichen aus den beim Destillieren gebildeten, sulfosauren Kalziumsalsen bestand. Aus der eingesetzten Kohlenwasserstoffmenge wurden also gewonnen:

Zahlentafel 1.

	<u>g</u>	<u>Gew.-%</u>
Dieseldkraftstoff	331,0	38,2
Schmieröl	190,0	21,9
Verlust		
durch Säureteerbildung	247,0	28,5
als Dest.-Rückstand	99,0	11,4
	<u>867,0</u>	<u>100,0</u>

Dieseldkraftstoffeigenschaften

Wichte bei 20°C	0,8239
Siedekennziffer	258,09
Conradsonwert, Gew.-%	0,04
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,15
Stockpunkt, °C	18,0
Asche, Gew.-%	0,000
Jodzahl (de Wijs)	19,0
Cetanzahl, HWA-Motor	55,0
Ärhometermethode	60,0

Schmieröleigenschaften.

Wichte bei 20°C	0,9057
Visk. in E° bei 40°C	2,64
bei 80°C	1,44
in cst bei 40°C	18,00
bei 80°C	5,62
Viskositätspolhöhe	1,70
Conradson-wert, Gew.-%	0,03
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,54
Stockpunkt, °C	1,0
Asche, Gew.-%	0,002
Jodzahl (de Wijs)	30,8

Zum Vergleich der Ausbeuten sowie der physikalischen und chemischen Daten wurden die Ausgangsdieseldkraftstoff- und die Ausgangs-Olefin-Fraktion mit 92 %iger Schwefelsäure je für sich unter den oben genannten Bedingungen umgesetzt.

Umsetzung der Olefine mit 92 %iger Schwefelsäure.

817 g Olefine aus Braunkohlenchlorparaffin wurden in beschriebener Weise mit 1634 g 92 %iger Schwefelsäure umgesetzt. Die Ausbeute aus der eingesetzten Kohlenwasserstoffmenge betrug nach

Zahlentafel 2

	<u>g</u>	<u>Gew.-%</u>
Dieseldkraftstoff	380,0	46,4
Schmieröl	125,0	15,3
Verlust		
durch Säureteerbildung	217,0	26,6
als Dest.-Rückstand	95,0	11,7
	<u>817,0</u>	<u>100,0</u>

Dieseldkraftstoffeigenschaften

Wichte bei 20°C	0,7986
Siedekennziffer	248,2
Conradson-wert, Gew.-%	0,01
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,20
Stockpunkt, °C	25,0
Asche, Gew.-%	0,000
Jodzahl (de Wijs)	21,3
Cetanzahl, HWA-Motor	64,5
Ärhometermethode	68,5

Schmieröleigenschaften

Wichte bei 20°C	0,8889
Viskosität in E° bei 40°C	3,24
bei 80°C	1,54
in cst bei 40°C	23,40
bei 80°C	6,70
Viskositätspolhöhe	1,75
Conradson-wert, Gew.-%	0,10
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,13
Stockpunkt °C	- 2,5
Asche, Gew.-%	0,010
Jodzahl (de Wijs)	38,9

Umsetzung der Braunkohlendieselkraftstoff-Fraktion mit 92 %iger Schwefelsäure.

892 g Braunkohlendieselkraftstoff-Fraktion wurden in gleicher Weise mit 1704 g 92 %iger Schwefelsäure umgesetzt. Bei der Überdruckdestillation ergaben sich folgende Ausbeuten an Endstoffen:

Tabelle 1

	g	Gew. %
Dieselkraftstoff	347,5	38,9
Schmieröl	160,0	17,9
Verlust durch Säureteerbildung	282,0	31,7
als Dest. Rückstand	102,5	11,5
	892,0	100,0

Dieselkraftstoffeigenschaften

Wichte bei 20°C	0,8505
Siedekennziffer	273,4
Conradson-Wert, Gew. %	0,00
Schwefelgehalt, Gew. %	0,18
Stockpunkt, °C	11,5
Asche, Gew. %	0,00
Jodzahl (de Wijs)	20,6
Cetanzahl, HWA-Motor	49,5
Arhometermethode	54,2

Schmieröleigenschaften

Wichte bei 20°C	0,9130
Viskosität in E° bei 40°C	2,76
bei 80°C	1,45
in cSt bei 40°C	19,05
bei 80°C	5,68
Viskositätspolhöhe	1,82
Conradson-Wert, Gew. %	0,03
Schwefelgehalt, Gew. %	0,81
Stockpunkt, °C	+2,5
Asche, Gew. %	0,008
Jodzahl (de Wijs)	34,3

In den Abbildungen 1, 2 und 3 wurden die gemessenen physikalischen und chemischen Daten der gewonnenen Dieselkraftstoffe und Schmieröle in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis der

Ausgangskomponenten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass neben der Polymerisation der ungesättigten Verbindungen in der Ausgangsdieselkraftstoff-Fraktion und der Ausgangsolefin-Fraktion nur ein schwacher Alkylierungseffekt eingetreten ist, vielmehr findet im wesentlichen eine Umsetzung innerhalb der Einzelkomponenten statt.

Koch und Hilberath¹⁾ wiesen in ihrer Arbeit nach, dass sich bei einer Polymerisation von Gemischen einheitlicher, ungesättigter Kohlenwasserstoffe die Viskositätseigenschaften der gewonnenen Schmieröle additiv aus den bei den einheitlichen Olefinen beobachteten Daten ergeben. Die aufgefundenen Abhängigkeiten lassen klar erkennen, dass auch hier ein fast additives Verhalten der Ausbeuten, Wichten, Viskositäten, Polhöhen, Jodzahlen und Cetanzahlen vorherrscht.

Der Anteil derjenigen Ausgangsstoffe, die in Schmierölkohlenwasserstoffe übergehen, beträgt im Durchschnitt 20 % des Gesamtgemisches. Gleichzeitig wird die Dieselkraftstoff-Fraktion wesentlich verbessert; beispielsweise steigt die Cetanzahl der Ausgangsdieselkraftstoff-Fraktion von 35,0 auf 50,0 an. Das ist zugleich ein Beweis dafür, dass ein Teil der Aromaten durch Olefine in hochmolekularen Verbindungen alkyliert wurde. Bemerkenswert ist, dass bei der Polymerisation der Olefine für sich die Cetanzahl der Ausgangsolefinfraktion von 52,0 auf 64,0 anstieg. Es kann daraus mit Sicherheit geschlossen werden, dass unter der Einwirkung von Schwefelsäure keine Ringbildung, sondern nur eine Polymerisation der Olefine eintrat. In der Dieselkraftstofffraktion fand eine Anreicherung der im Ausgangsstoff noch vorhandenen, zündwilligeren Paraffinkohlenwasserstoffe statt.

Aus den bisherigen Versuchen folgt, dass die katalytische Umsetzung von Braunkohlendieselkraftstoff mit ungesättigten Kohlenwasserstoffen aus Chlorparaffin einen gegenüber dem Ausgangskraftstoff verbesserten Dieselkraftstoff und ein brauchbares Motorenöl ergibt.

Der Einfluss der hochkonzentrierten Schwefelsäure ist derart zu deuten, dass eine Alkylierung der aromatischen Inhaltsstoffe durch die ungesättigten Körper erfolgt; die Polymerisation der Olefine für sich tritt demgegenüber zurück. Der Beweis hierfür liegt in den niederen Wichten, die den paraffinischen Charakter des einzelnen Schmierölmoleküls klar zutage treten lassen. Auch die Abnahme der Dieselkraftstoffwichten mit steigendem Olefingehalt lässt erkennen, dass die schwereren Aromaten mit den ungesättigten Körpern reagierten; denn gleichzeitig ist eine Zunahme der Schmierölwichten zu verzeichnen. Der Verlust durch Säureteerbildung ist ausserordentlich hoch; er beträgt bis zu 40 % des Ausgangskohlenwasserstoffgemisches.

Mischpolymerisationen von Braunkohlendieselkraftstoff.

Unter Umgehung des bereits für andere Zwecke eingesetzten Braunkohlenparaffins wurden eingehende Versuche in der Richtung angestellt, brauchbare Schmieröle allein aus den ungesättigten und aromatischen Inhaltsstoffen der Braunkohlendieselkraftstoffe unter Verwendung von Schwefelsäure als Reaktionsbeschleuniger zu gewinnen.

1) Brennstoffchemie 23. 67. (1942)

000769

Als Ausgangsstoff wurde ein handelsüblicher Dieselkraftstoff mit folgenden analytischen Daten verwendet:

Zahlentafel 4

Wichte bei 20°C	0,8962
Siedekennziffer	277,6
Conradson-Wert, Gew.-%	0,12
Schwefelgehalt, Gew.-%	1,24
Stockpunkt, °C	- 7,0
Asche, Gew.-%	0,04
Jodzahl (de Wijs)	53,2
Cetanzahl, HWA-Motor	34,5
Ärömetermethode	39,6

Um den Umsetzungsgrad und die erzielten Eigenschaftverbesserungen erfassen zu können, wurde der Ausgangsdieselkraftstoff selbst sowie alle sich von ihm ableitenden Umsetzungsprodukte durch Unterdruckdestillation in eine bis 220°C bei 12 Torr übergende Dieselkraftstofffraktion und in eine über 220°C siedende Schmierölfraktion getrennt. Die Krackgrenze und damit die Ausbeute an Schmieröl wurden bei diesen Versuchen dadurch heraufgesetzt, dass nach Erreichung einer Siedetemperatur von 250°C der Druck bis auf 5 Torr vermindert wurde.

Aus dem nicht umgesetzten Ausgangsdieselkraftstoff wurden folgende Destillationsprodukte gewonnen:

Zahlentafel 5

Dieselkraftstoff	91,3 Gew.-%
Schmieröl	7,6 "
Dest.Rückstand	1,1 "
	100,0 Gew.-%

Dieselkraftstoffeigenschaften

Wichte bei 20°C	0,8913
Siedekennziffer	275,0
Conradson-Wert, Gew.-%	0,10
Schwefelgehalt, Gew.-%	1,16
Stockpunkt, °C	-10,0
Asche, Gew.-%	0,005
Jodzahl (de Wijs)	77,4
Cetanzahl, HWA-Motor	34,0
Ärömetermethode	39,0

Schmieröleigenschaften

Wichte bei 20°C	0,9334
Viskosität in E° bei 40°C	2,53
bei 80°C	1,36
in cSt bei 40°C	16,95
bei 80°C	4,65
Viskositätspolhöhe	3,10
Conradsonwert, Gew.-%	0,11
Schwefelgehalt, Gew.-%	1,04
Stockpunkt, °C	+ 17,0
Asche, Gew.-%	0,003
Jodzahl (de Wijs)	52,5

In einer Anzahl von Versuchsreihen wurde das Alkylierungs- und Polymerisationsvermögen der Schwefelsäure am Beispiel des vorbeschriebenen Dieselkraftstoffes untersucht. Geprüft wurden der Einfluss des Verhältnisses Säure zu Braunkohldieselkraftstoff, der Reaktionsdauer, der Säurestärke und der Temperatur auf die Ausbeute und die Eigenschaften der Reaktionsprodukte.

Umsetzungen in Abhängigkeit vom Verhältnis Säure zu Ausgangsöl.

Zunächst wurden in der im ersten Teil dieser Arbeit beschriebenen Weise Umsetzungen des Ausgangsbraunkohldieselkraftstoffes mit 96 %iger Schwefelsäure in wechselndem Mengenverhältnis angesetzt; es wurden die Verhältnisse Säure zu Ausgangsöl wie 1 : 4, 1 : 2, 1 : 1 und 2 : 1 gewählt. Die Reaktionstemperatur wurde durch ein Kältebad konstant auf 0°C gehalten. Die Reaktionsdauer betrug bei allen Versuchen einheitlich 300 Minuten.

Für die einzelnen Mischungsverhältnisse wurden die in den nachstehenden Werten zum Ausdruck kommenden Ergebnisse erzielt:

Zahlentafel 6

Ausbeuten in Gew.-% für das Verhältnis
Säure : Ausgangsöl =

	1:4	1:2	1:1	2:1
Dieselkraftstoff	59,1	52,9	38,1	27,8
Schmieröl	12,8	14,4	14,5	13,2
Verlust durch Säureteerbildung	16,5	24,0	37,0	53,0
als Dest.Rückst.	11,6	8,7	10,4	6,0
	100,0	100,0	100,0	100,0

000770

Dieselmotoreigenschaften
Verhältnis Säure : Ausgangsöl-

	1:4	1:2	1:1	2:1
Wichte bei 20°C	0,8733	0,8646	0,8493	0,8286
Gledekennziffer	278,9	276,3	281,5	280,2
Conradson-Wert Gew.-%	0,02	0,01	0,03	0,02
Schwefelgehalt Gew.-%	0,65	0,48	0,58	0,28
Stockpunkt, °C	- 11,0	- 10,5	- 8,0	- 5,5
Asche, Gew.-%	0,0	0,0	0,0	0,0
Jodzahl (de Wijs)	41,7	33,5	21,4	10,6
Cetanzahl, HWA-Motor	41,0	46,0	51,0	60,0
Arkometermethode	47,2	49,18	57,0	65,3

Schmieröleigenschaften
Verhältnis Säure zu Ausgangsöl-

	1:4	1:2	1:1	2:1
Wichte bei 20°C	0,9472	0,9365	0,9252	0,9097
visk. B° bei 40°C	5,66	5,62	6,56	5,11
bei 80°C	1,74	1,74	1,86	1,73
in cst bei 40°C	42,52	42,17	49,49	38,25
bei 80°C	8,96	9,02	10,28	8,84
visk. Polhöhe	3,12	2,83	2,65	2,35
Conradson-Wert Gew.-%	0,20	0,15	0,10	0,10
Schwefelgehalt Gew.-%	1,64	1,25	0,88	0,53
Stockpunkt, °C	+ 15,5	+ 11,0	+ 11,0	+ 12,0
Asche, Gew.-%	0,008	0,034	0,023	0,013
Jodzahl (de Wijs)	48,7	40,0	29,5	19,0

Abbildung 4 gibt die Abhängigkeit der Ausbeuten an Dieselmotorkraftstoff und Schmieröl sowie der Verluste an Säureteer und an Destillationsrückstand von der angewandten Säuremenge wieder.

Mit steigendem Säuregehalt nimmt die Gesamtausbeute an Rohkondensat, bezogen auf die eingesetzte Ausgangsdieselmotorkraftstoffmenge, annähernd proportional ab. Die Schmierölausbeute weist bei einem Säureverhältnis von 1:1 ein Maximum von 14,5 % auf. Bei einem höheren Verhältnis fällt sie deshalb wieder ab, weil die aromatischen Kondensationsprodukte mit ungenügender Kettenlänge durch den hohen Überschuss an Schwefelsäure als Sulfosäuren in den Säureteer übergehen. Auch die an der Additionsreaktion nicht

teilnehmenden aromatischen und olefinischen Bestandteile der Dieselmotorkraftstofffraktion werden sulfuriert und herausgelöst. Demzufolge reichend fallen die Wichten sowohl der Schmieröle als auch der Dieselmotorkraftstoffe mit steigendem Säureverhältnis, d.h. der Gehalt der Fraktionen an Paraffinen nimmt zu (Abb. 5). Für die Dieselmotorkraftstofffraktion folgt daraus eine außerordentliche Cetanzahlsteigerung, a.B. von 34,5 bis auf 60,0 bei Anwendung des Säureverhältnisses von 2 : 1 (Abb. 6).

Mit steigendem Verhältnis Säure zu Ausgangsöl verbesserte sich das Viskosität-Temperatur-Verhalten. Die Polhöhe nahm von 3,2 bei der Schmierfraktion des nicht ungesättigten Ausgangsöles auf 2,35 beim Säureverhältnis 2 : 1 ab. Offenbar waren hier die höhermolekulare Olefine mit Aromaten in Reaktion getreten, die die erstrebte Kettenverlängerung mit ihrer hohen C-Atomzahl bewirkten. Demzufolge sank die Jodzahl, wie aus Abb. 6 zu ersehen ist, beträchtlich.

Die Stockpunkte der Schmieröle sind von den angewandten Säure-Öl-Verhältnissen unabhängig, während die der Dieselmotorkraftstoffe mit steigendem Säureverhältnis von - 11,0°C auf - 5,5°C steigen. Dieses Verhalten erklärt die Anreicherung der Paraffine mit mittlerer Kettenlänge und gutem Zündverhalten im Motor.

Mit der Schwefelsäurebehandlung tritt mit steigendem Säure-Öl-Verhältnis eine für die Korrosionseigenschaften günstige Abnahme des Schwefelgehaltes auf.

Umsetzungen in Abhängigkeit von der Reaktionsdauer

Für den Ablauf der Polymerisations- und Alkylierungsreaktionen unter dem Einfluss von Schwefelsäure war es interessant, die Änderung der Ausbeute und der physikalischen Konstanten mit der Einwirkungsdauer zu verfolgen. Zu diesem Zwecke wurde das als günstig erkannte Verhältnis Säure : Ausgangsöl = 1 : 1 gewählt. Die Reaktionstemperatur blieb 0°C.

Die bei einer Reaktionsdauer von 60, 150 und 300 Minuten erhaltenen Daten bei konstantem Säureverhältnis waren folgende:

Zahlentafel 7

Ausbeuten in Gew.-% bei verschiedener Reaktionsdauer:

	60 Min.	150 Min.	300 Min.
Dieselmotorkraftstoff	48,1	45,7	38,1
Schmieröl	14,7	15,8	14,5
Verlust durch Säureteerbildung	30,7	33,5	37,0
als Dest. Rückstand	6,5	5,0	10,4
	100,0	100,0	100,0

Dieselmotortreibstoffeigenschaften
Reaktionsdauer in Minuten

000771

	60	150	300
Wichte bei 20°C	0,8562	0,8533	0,8493
Siedekennziffer	278,9	278,1	281,5
Conradson-wert, Gew.-%	0,01	0,01	0,03
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,78	0,53	0,58
Stockpunkt, °C	- 6,0	- 9,0	- 8,0
Asche, Gew.-%	0,000	0,000	0,000
Jodzahl (de Wijs)	25,1	24,0	21,4
Cetanzahl HWA-Motor	49,0	49,0	51,0
Ärkometermethode	53,9	54,7	57,0

Schmieröleigenschaften
Reaktionsdauer in Minuten

	60	150	300
Wichte bei 20°C	0,9231	0,9255	0,9252
visk. in E° bei 40°C	4,85	6,00	6,56
bei 80°C	1,68	1,79	1,86
in cSt bei 40°C	36,24	45,20	49,49
bei 80°C	8,35	9,59	10,28
Viskositätspolhöhe	2,78	2,80	2,65
Conradson-wert, Gew.-%	0,25	0,12	0,10
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,99	0,89	0,88
Stockpunkt, °C	+ 12,5	+ 13,0	+ 11,0
Asche, Gew.-%	0,130	0,003	0,023
Jodzahl (de Wijs)	29,9	29,8	29,5

Aus Abbildung 7 ist ersichtlich, dass nach einer Reaktionsdauer von 60 Minuten die Hauptumsetzung der Olefine und Aromaten mit 96 %iger Schwefelsäure beendet ist. Dementsprechend ändern sich die Ausbeuten durch Verlängerung der Reaktionsdauer nur wenig. Die Dieselmotortreibstoffausbeute nimmt weiterhin schwach linear ab, weil nicht polymerisierte, aromatische Teerinhaltstoffe von der überschüssigen Schwefelsäure sulfuriert werden und in den Säureteer übergehen.

Die Darstellung der Wichten in Abbildung 8 lässt den Alkylierungsvorgang in Abhängigkeit von der Reaktionsdauer erkennen. Nach Umsatz der spezifisch schweren Aromaten des Ausgangsöles hat die Wichte der Dieselmotortreibstofffraktion erheblich abgenommen, während die Wichten der Schmieröle

annähernd gleich bleiben. Dieser Vorgang steht in Einklang mit der Abnahme der Jodzahlen (Abbildung 9). Innerhalb der ersten 60 Minuten fällt die Jodzahl der Ausgangsdieselmotortreibstofffraktion von 77,4 auf 25,1. Nach Ablauf dieser Reaktionszeit ist kaum noch eine Änderung der Jodzahlen zu erkennen.

Mit zunehmender Reaktionsdauer wird das Viskositäts-Temperatur-Verhalten bei steigender Eigenviskosität verbessert. Diese Erscheinung entspricht dem schon mitgeteilten Befund, dass die Polhöhe einheitlicher, alkylierter Aromaten mit steigender Seitenkettenlänge abfällt.

Eine zusätzliche Prüfung der Verwendbarkeit der gewonnenen Öle als Motoröle ergab die völlige Säure- und Esterfreiheit. Ein ebenso gutes Ergebnis brachte die Korrosionsprüfung. Nach 24-stündiger Einwirkung bei 100°C auf einen Kupferstreifen wurde eine Gewichtsabnahme von 1,8 mg/16 cm² auf einen Zinkstreifen eine solche von nur 0,6 mg/16 cm² Oberfläche festgestellt.

Umsetzungen in Abhängigkeit von der Reaktionstemperatur.

Die Addition von Olefinen an aromatischen Kohlenwasserstoffen hängt nicht nur von der Art und Menge des Katalysators, sondern auch von der Temperatur ab. So sind Alkylierungsreaktionen wesentlich durch tiefe Temperaturen begünstigt. Sie finden im allgemeinen im Temperaturgebiet um 0°C statt. Höhere Temperaturen führen zur Polymerisation der Olefine für sich.

Da die Art der Reaktion für den Bau des Schmierölmoleküls entscheidend ist, erschien es im Rahmen dieser Arbeit notwendig, auch die Abhängigkeit der Schmieröleigenschaften von der Reaktionstemperatur zu prüfen.

So wurde der Ausgangs-Braunkohlendieselmotortreibstoff (Zahlentafel 8) mit 96 %iger Schwefelsäure als Katalysator im Verhältnis 1 : 1 bei einer einheitlichen Reaktionsdauer von 150 Minuten bei - 10, ± 0, + 10 und + 20°C umgesetzt. Die erhaltenen Ausbeuten an Dieselmotortreibstoff und Schmieröl, bezogen auf das Ausgangsöl, waren folgende:

Zahlentafel 8
Ausbeuten in Gew.-% bei verschiedenen Reaktionstemperaturen

	- 10°	± 0°	+ 10°	+ 20°
Dieselmotortreibstoff	53,4	45,7	45,0	43,2
Schmieröl	13,0	15,8	13,7	13,8
Verlust durch Säureteerbildung	28,6	33,5	35,3	37,2
als Dest Rückstand	5,0	5,0	6,0	5,8
	100,0	100,0	100,0	100,0

alkraftstoffeigenschaften

Reaktionstemperatur in °C

	- 10°	± 0°	+ 10°	+ 20°
Wichte bei 20°C	0,8623	0,8533	0,8519	0,8479
siedekennziffer	276,5	278,1	278,0	280,3
Conradson-Wert, Gew.-%	0,00	0,01	0,02	0,01
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,56	0,53	0,50	0,44
Stockpunkt, °C	- 7,0	- 9,0	- 8,0	- 6,0
Asche, Gew.-%	0,000	0,000	0,000	0,000
Jodzahl (de Wijs)	26,6	24,0	20,4	18,2
Cetanzahl, HVA-Motor	45,5	49,0	51,5	53,0
Ärnometermethode	50,8	54,7	55,1	57,3

Schmieröleigenschaften

Reaktionstemperatur in °C

	- 10°	± 0°	+ 10°	+ 20°
Wichte bei 20°C	0,9299	0,9255	0,9223	0,9187
Visk. in E° bei 40°C	6,12	6,00	5,69	5,30
bei 80°C	1,81	1,79	1,78	1,76
in ogt bei 40°C	46,10	45,2	42,8	39,73
bei 80°C	9,80	9,59	9,42	9,18
Visk. Polhöhe	2,76	2,80	2,73	2,38
Conradsonwert, Gew.-%	0,15	0,12	0,10	0,20
Schwefelgehalt, Gew.-%	0,89	0,89	0,90	0,92
Stockpunkt, °C	+ 13,0	+ 13,0	+ 13,0	+ 12,0
Asche, Gew.-%	0,008	0,003	0,009	0,003
Jodzahl (de Wijs)	29,7	29,8	30,0	30,7

Die Abhängigkeit der Ausbeuten von der Reaktionstemperatur lässt ein schwaches Maximum bei 0°C erkennen (Abbildung 10). Oberhalb dieser Temperatur tritt z.T. Sulfurierung der aromatischen Kohlenwasserstoffe, unterhalb von 0°C eine gewisse Reaktionsträgheit auf, so dass sich ein Teil der ungesättigten Inhaltsstoffe innerhalb der angewandten Reaktionsdauer noch nicht umsetzte.

Die Abnahme der Wichten (Abbildung 11) lässt auf zunehmende Sulfurierung aromatischer Kohlenwasserstoffe mit steigender Temperatur schliessen; dementsprechend verstärkt sich der paraffinische Charakter der Reaktionsprodukte. In diesem Sinne liegt z.B. das sich mit der Temperatur verbessernde Viskosität-Temperatur-Verhalten des Schmieröles einerseits

und die wachsende Günstigkeit des Dieselkraftstoffes andererseits (Abbildung 12). Da der Einfluss der Reaktionstemperatur auf die übrigen analytischen Daten z.B. auf den Aschegehalt, den Stockpunkt und den Conradson-Wert gering ist, muss als günstigste Temperatur die auch technisch am einfachsten einzustellende Temperatur von 20° angesehen werden.

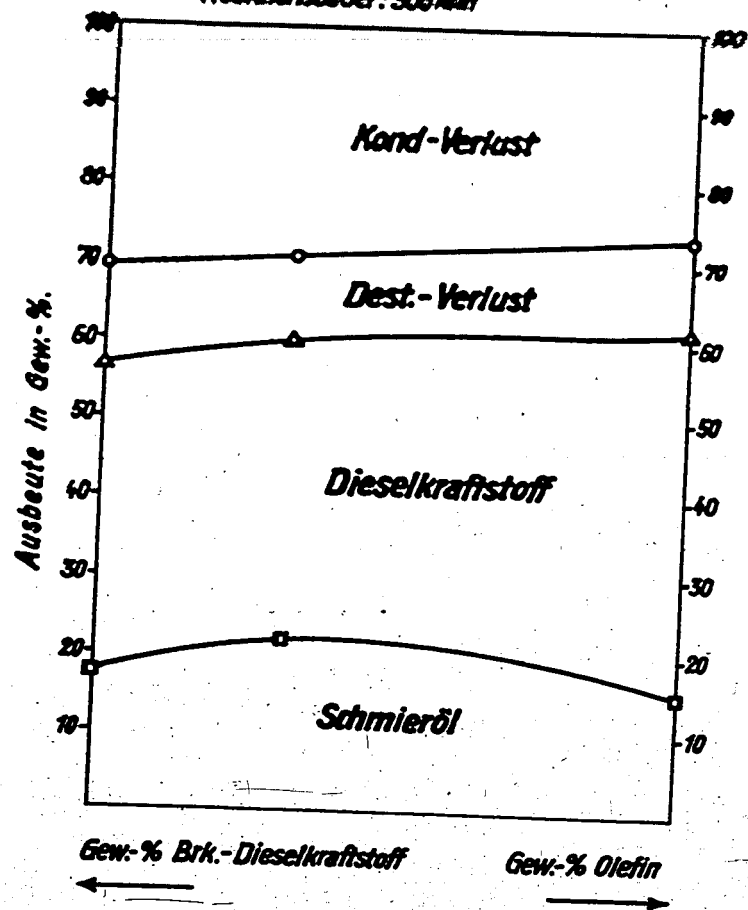
Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Lösung der Aufgabe, für alle praktischen Zwecke brauchbare Schmieröle unter gleichzeitiger Gewinnung verbesserter Dieselkraftstoffe aus Braunkohlenschwelteerdestillaten zu gewinnen.-Grundgedanke der Teerölumsetzung zu Schmieröl ist, die aromatischen Inhaltsstoffe der Teerdestillate mit langkettigen, ungesättigten Kohlenwasserstoffen unter Einwirkung von Schwefelsäure in Reaktion zu bringen. Die ungesättigten Kohlenwasserstoffe wurden durch Chlorierung von Braunkohlenparaffin und anschließende Abspaltung von Salzsäuregas in der Hitze hergestellt. Bei der Umsetzung mit konz. Schwefelsäure addierte sich ein erheblicher Teil der Olefine an die Aromaten zu hochviskosen Kohlenwasserstoffen mit günstigem Viskosität-Temperaturverhalten.

Im Hinblick darauf, dass das Braunkohlen-Hartparaffin bereits anderen, ebenso wichtigen Verwendungszwecken zugeführt wird, wurde im zweiten Teil der Arbeit versucht, Braunkohlen-teeröl (z. Dieselkraftstoff-Fraktion) allein mit Schwefelsäure umzusetzen. Es gelang auf diese Weise, einen Teil der Ölinhaltsstoffe zu schmierölarartigen Kohlenwasserstoffen zu polymerisieren bzw. zu alkylieren. Durch anschliessende fraktionierte Destillation wurde das Reaktionsprodukt in derselben Weise wie bei der unter Zusatz ungesättigter Kohlenwasserstoffe durchgeführten Reaktion in einen wesentlich verbesserten Dieselkraftstoff und kein viskoses Schmieröl zerlegt. Durch systematische Untersuchungen, die in Abhängigkeit vom Verhältnis Säure : Öl von der Reaktionsdauer und der Reaktionsverhältnisse zur Erzeugung hoher Ausbeuten an guten Dieselkraftstoffen und Schmierölen ermittelt. Die Schwefelsäure ist als echtes Alkylierungsmittel anzusprechen, dessen Wirkung umso mehr zum Ausdruck kommt, je grösser das Verhältnis Säure : Öl und je länger die Reaktionszeit gewählt wird. Als Masstab der eingetretenen Alkylierung kann dabei die Steilheit der doppelt logarithmisch aufgetragenen Viskosität-Temperatur-Geraden (Polhöhe) gelten. Der Einfluss der Reaktions-temperatur auf die Ausbeuten und Eigenschaften der Reaktions-erzeugnisse ist ziemlich gering, so dass man technisch am günstigsten bei Raumtemperatur arbeitet. Eine Beschränkung des Anwendungsbereiches der Öle ergibt sich durch den um 0°C liegenden, hohen Stockpunkt. Will man die Öle auch bei niedrigeren Temperaturen, z.B. als Motoröle, verwenden, so ist es notwendig, entweder von stark entparaffinierten Teerölen auszugehen oder die Endprodukte einer weitgehenden Entparaffinierung zu unterziehen.

Der in dieser Arbeit neu vorgeschlagene Weg zur Umsetzung von Braunkohlenteerölen mit Schwefelsäure kann somit als Grundlage für die technische Herstellung und verbesserter Dieselmotortreibstoffe und brauchbarer Schmieröle dienen.

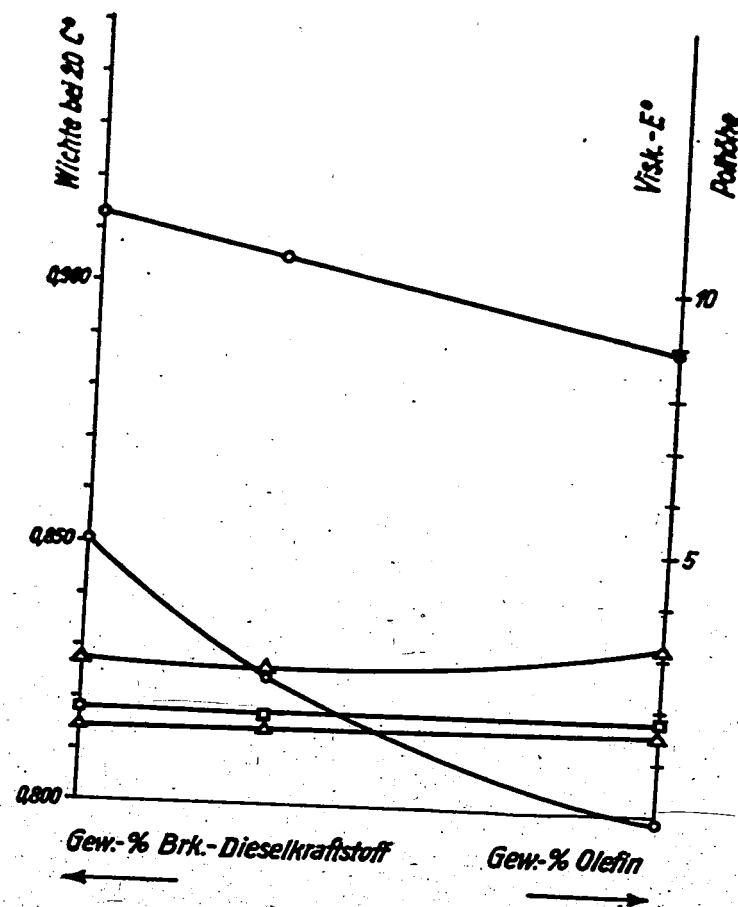
Kondensationsmittel: 22%ige H_2SO_4
 Temperatur: $0^\circ C$
 Verhältnis Säure: Ausgangsöl: 2:1
 Reaktionsdauer: 300 min



- Rohkondensat
- △ Dieselmotortreibstoff
- Schmieröl

Abbildung 1

Kondensationsmittel: 22%ige H_2SO_4
 Temperatur: $0^\circ C$
 Verhältnis Säure: Ausgangsöl: 2:1
 Reaktionsdauer: 300 min

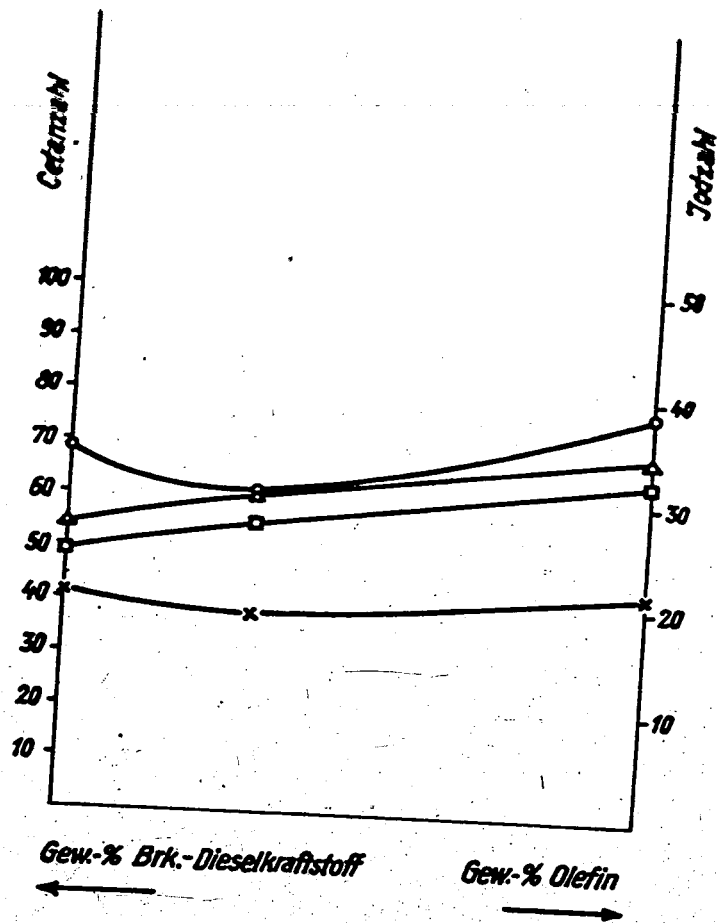


- Wichte
- △ Viskosität in E° bei 40 u. $80^\circ C$
- Viskositätspolhöhe

Abbildung 2

000774

Mineralsäuremittel 92%ige H_2SO_4
 Temperatur: 0°C
 Verhältnis Säure: Ausgangsöl = 2:1
 Reaktionsdauer: 300 min



x Jodzahl des Dieselkraftstoffes
 o Jodzahl des Schmieröles
 □ Cetanzahl, H.W.A.-Motor
 Δ Cetanzahl, Aräometermethode
 Abbildung 3

Mineralsäuremittel 92%ige H_2SO_4
 Temperatur: 0°C
 Reaktionsdauer: 300 min

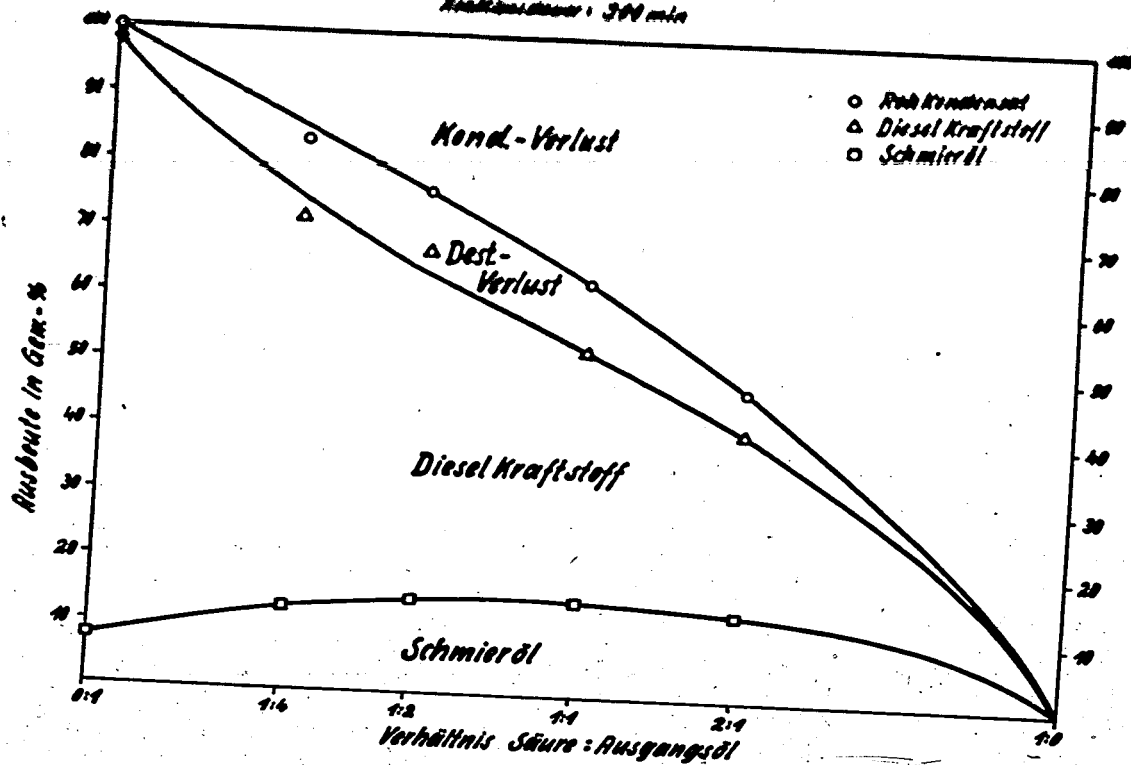
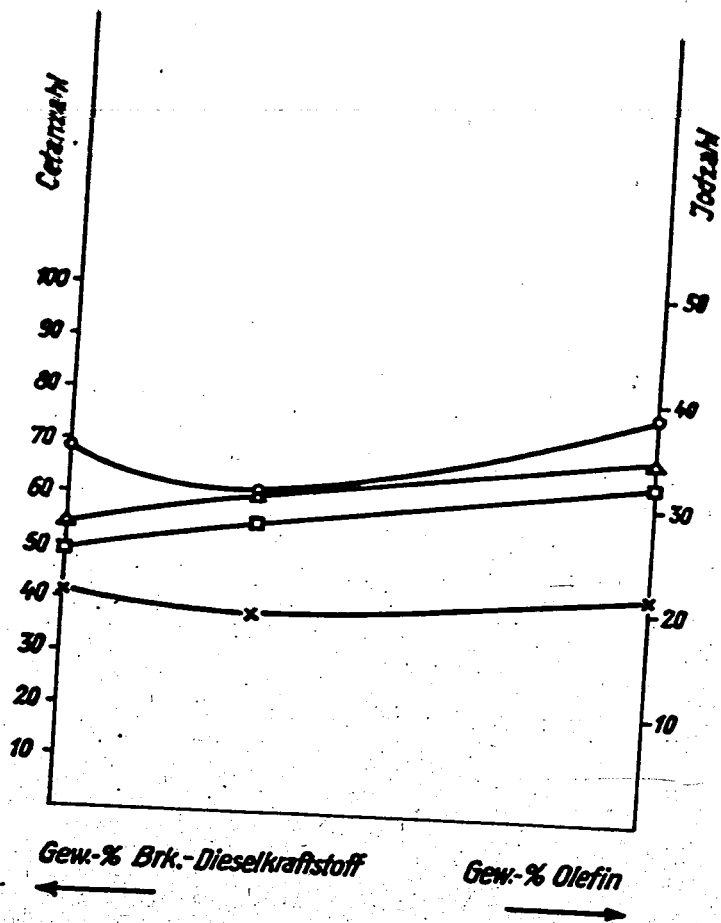


Abbildung 4

800774

Mischersäuerungsmittel 92 %ige H_2SO_4 ,
 Temperatur: 0°C
 Verhältnis Säure: Ausgangsöl = 2:1
 Reaktionsdauer: 300 min



x Jodzahl des Dieselkraftstoffes
 o Jodzahl des Schmieröles
 □ Cetanzahl, H.W.A.-Motor
 Δ Cetanzahl, Aräometermethode

Abbildung 3

Mischersäuerungsmittel 92 %ige H_2SO_4 ,
 Temperatur: 0°C
 Reaktionsdauer: 300 min

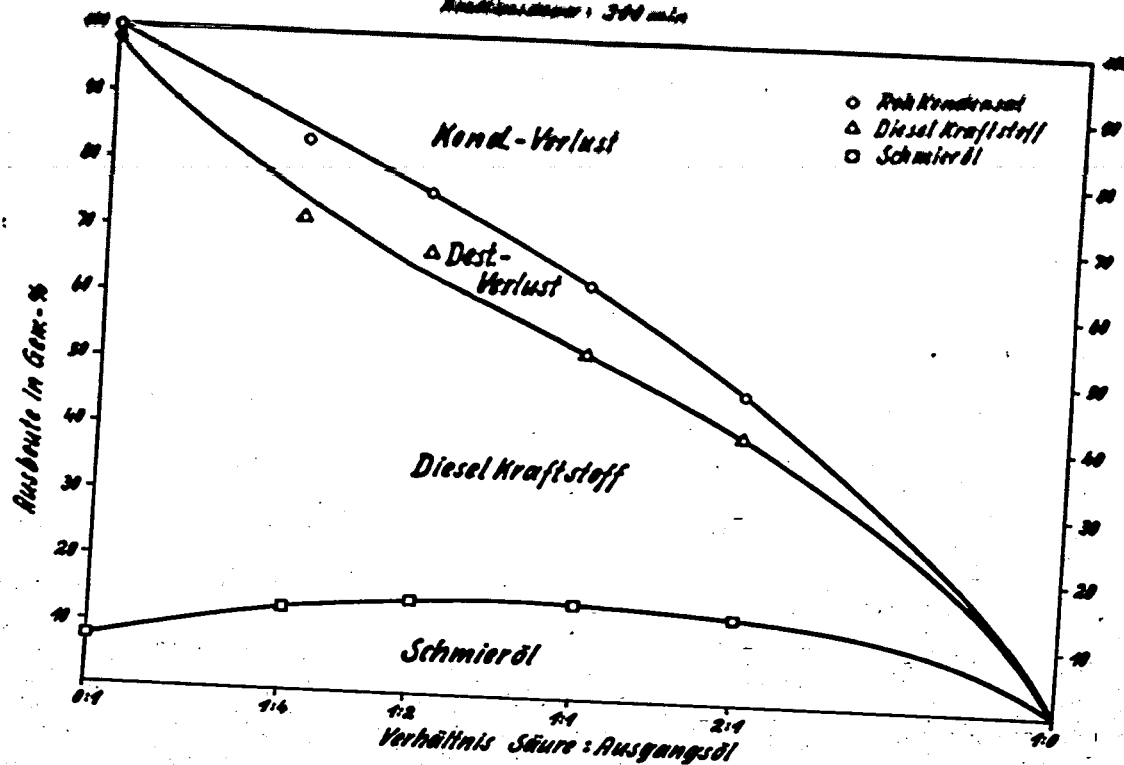


Abbildung 4

000775

Kondensationsmittel: 90 to 100 H₂SO₄
 Temperatur: 0°C
 Reaktionsdauer: 300 min

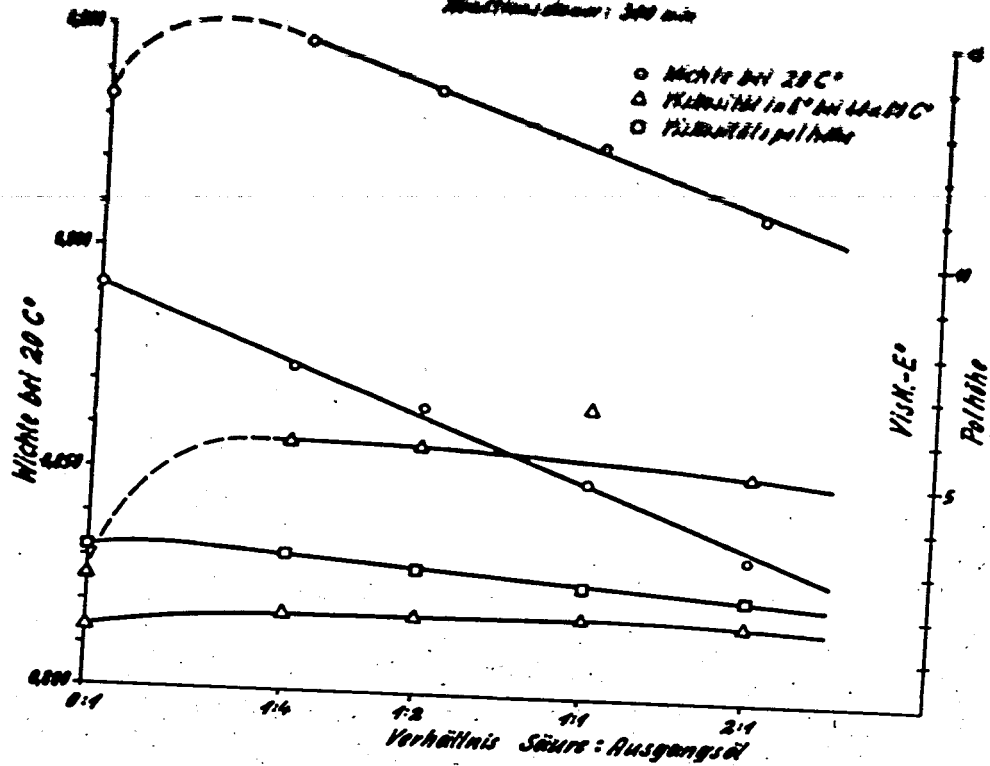


Abbildung 5

Kondensationsmittel: 90 to 100 H₂SO₄
 Temperatur: 0°C
 Reaktionsdauer: 300 min

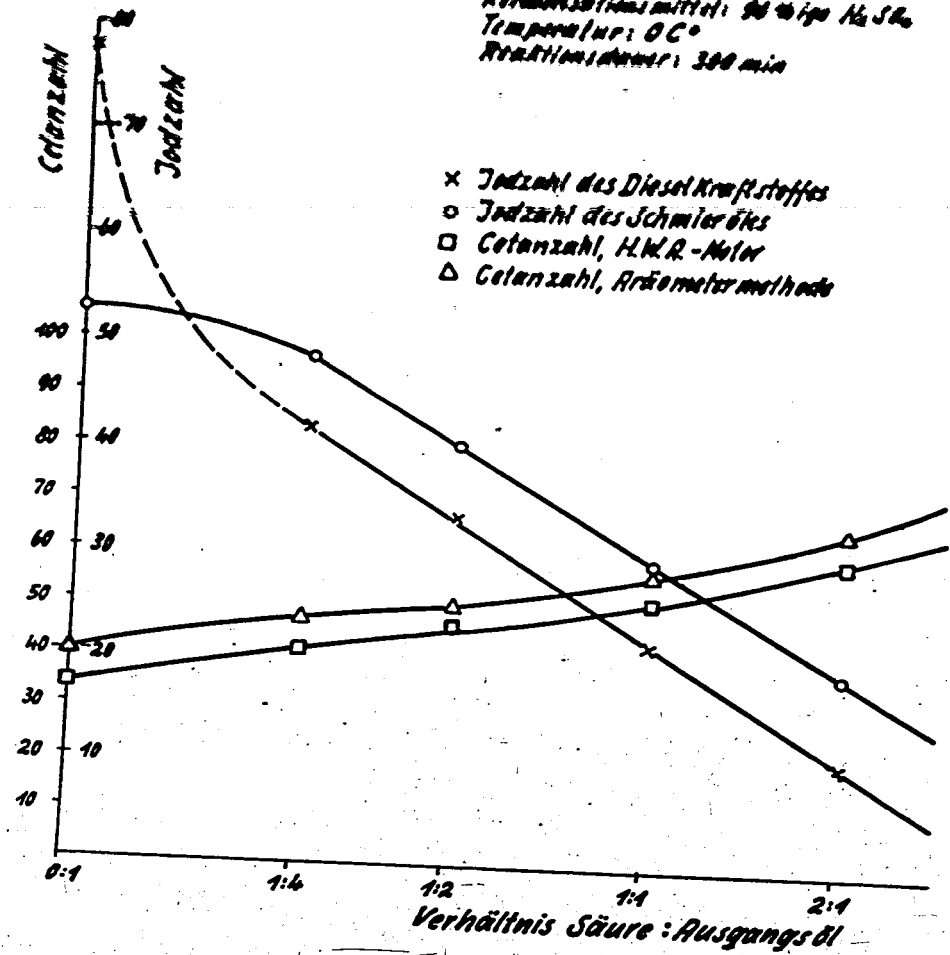


Abbildung 6

000776

Reaktionszeitpunkt: 20 bis 30 min
 Verdichtungs-Schritt: Auspumpen
 Temperatur: 0°C

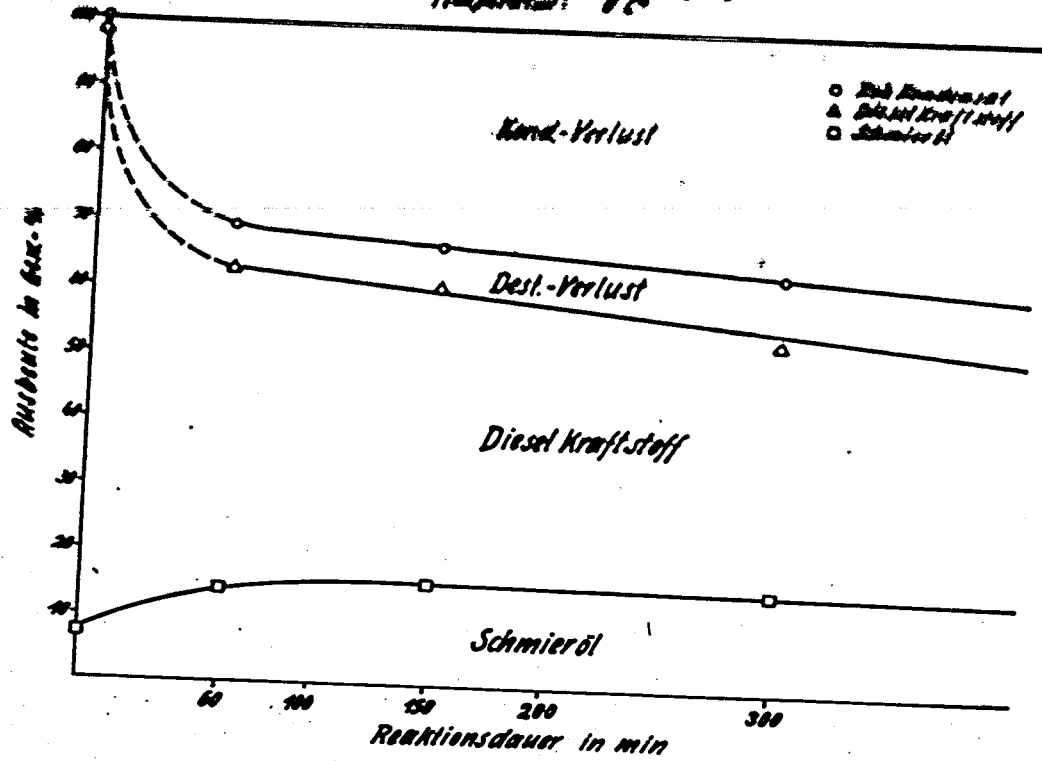


Abbildung 7

Reaktionszeitpunkt: 20 bis 30 min
 Verdichtungs-Schritt: Auspumpen
 Temperatur: 0°C

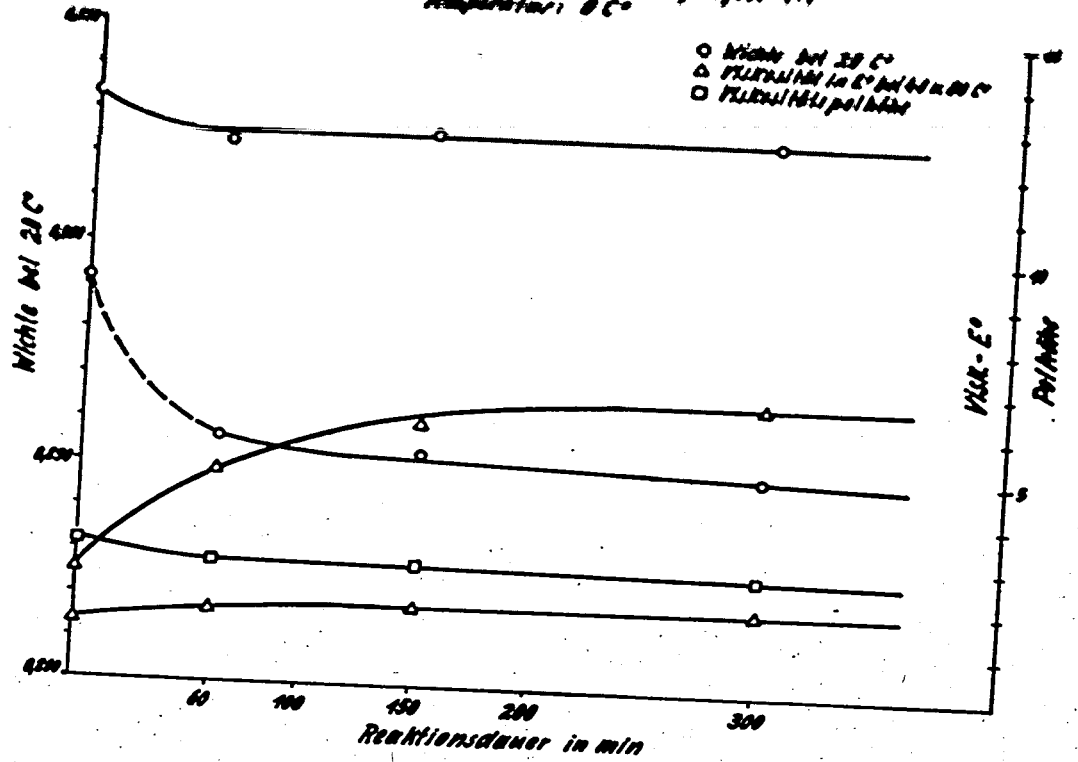


Abbildung 8

Kondensationsmittel: 90%ige H₂SO₄
 Verhältnis Säure : Ausgangsöl = 1:1
 Temperatur: 0°C

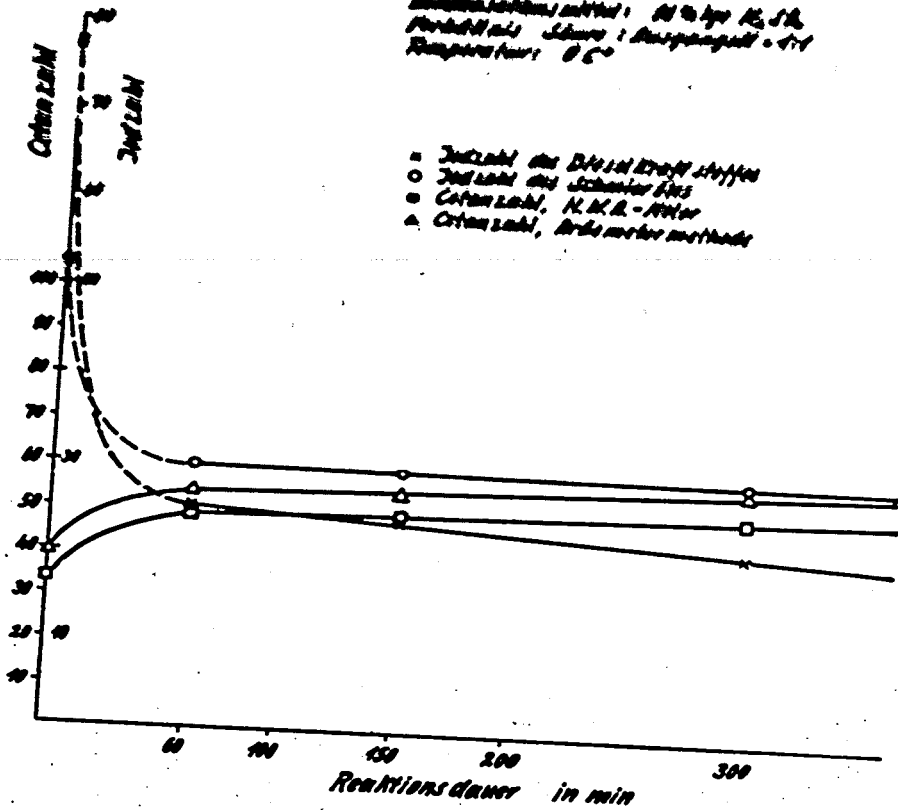


Abbildung 9

Kondensationsmittel: 90%ige H₂SO₄
 Verhältnis Säure : Ausgangsöl = 1:1
 Reaktionsdauer: 150 min

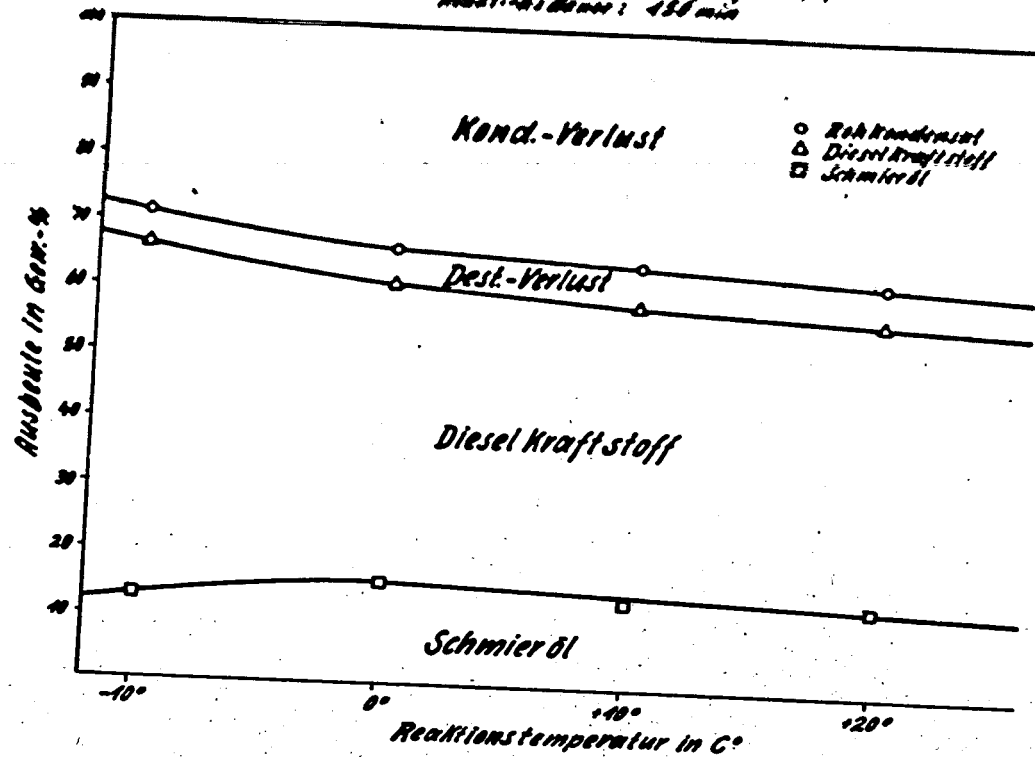


Abbildung 10

Kondensationsmittel: 50 g/lige NaOH
 Peräthylsäure: Ausgangspunkt 1-1
 Reaktionsdauer: 150 min

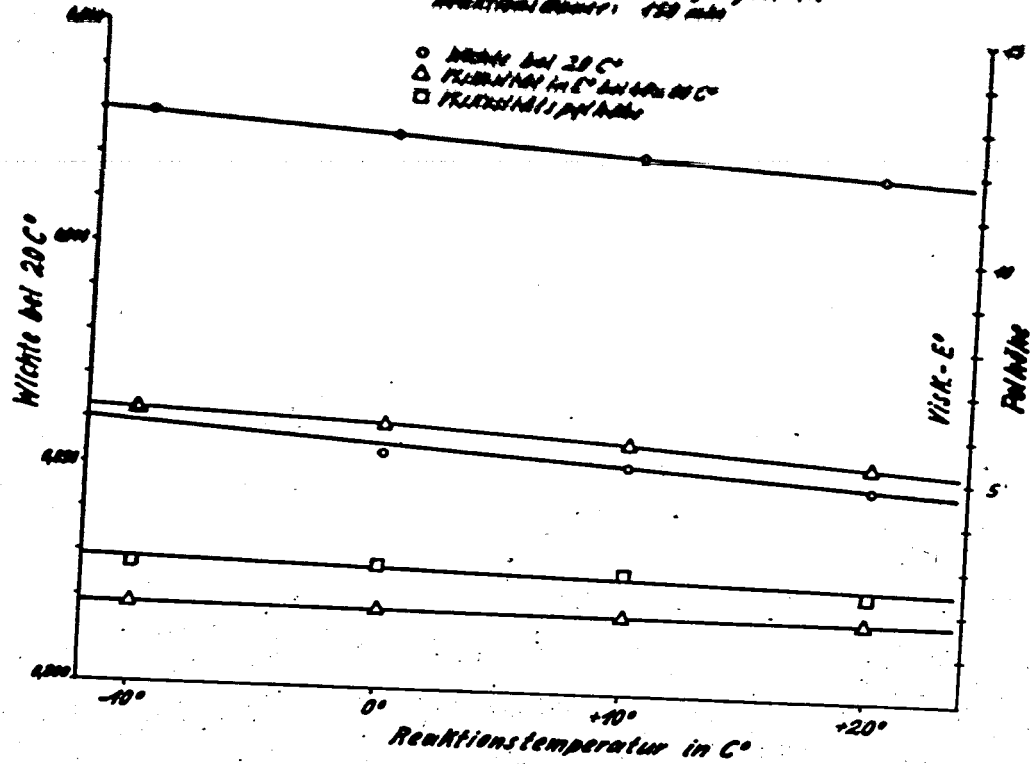


Abbildung 11

Kondensationsmittel: 50 g/lige NaOH
 Peräthylsäure: Ausgangspunkt 1-1
 Reaktionsdauer: 150 min

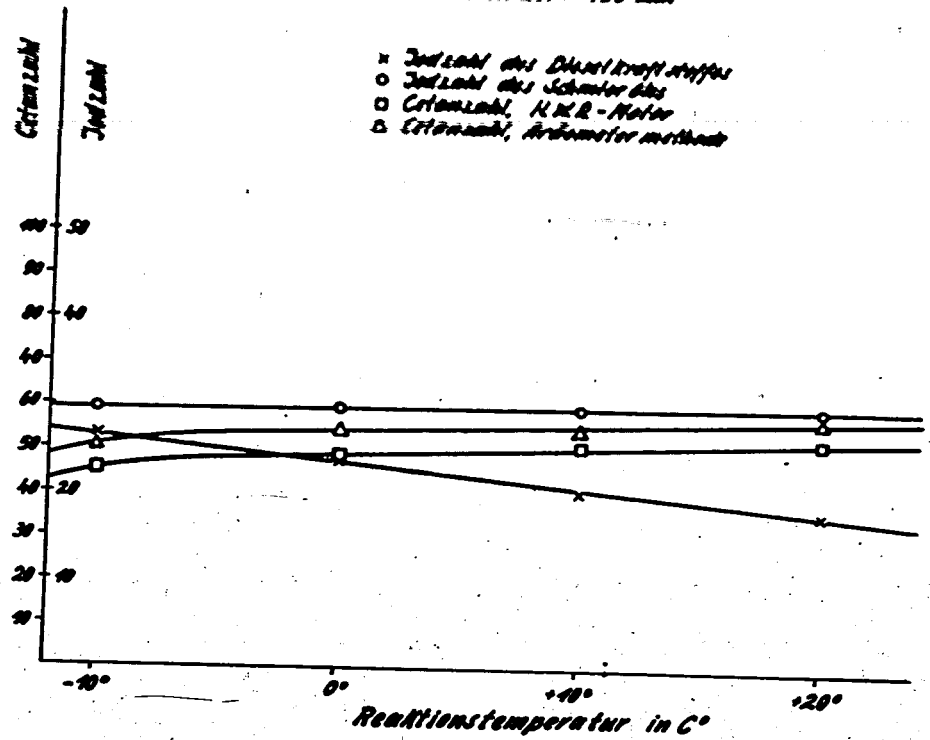


Abbildung 12

000779

Herstellung: VDI-Verlag GmbH, Berlin NW 7

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

S F 8

000780

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 92 / 1941

Über die Gewinnung von Schmierölen aus Braunkohlenteer

(K 4 511/39 - Fo IV/IBM. Bln 2)

Bearbeitet von: Dozent Dr.-Ing. habil. M. Marder
Dipl.-Ing. G. Mertz

Bericht aus dem
Institut für Braunkohlen- und Mineralölforschung
an der Technischen Hochschule Berlin
Leiter: Prof. Dr. phil. habil. R. Heinze

000781

Deutsche Kraftfahrtforschung

im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 92/1941

Über die Gewinnung von Schmierölen aus Braunkohlenteer

(K 4 511/39 - Fo IV/IBM Bln 2)

Bearbeitet von: Dozent Dr.-Ing. habil. M. Marder
Dipl.-Ing. G. Mertz

Bericht aus dem
Institut für Braunkohlen- und Mineralölforschung
an der Technischen Hochschule Berlin
Leiter: Prof. Dr. phil. habil. R. Heinze

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Verschluss zu halten.

000782

Inhalt

	Seite
I. Die Möglichkeiten zur Herstellung von Schmierölen aus Braunkohlenschweltsäuren	1
II. Umwandlung von Braunkohlenschweltsäure-Erzeugnissen zu Schmierölen	2
1. durch Aluminiumchlorid-Behandlung von Braunkohlenteerdestillat	2
a) Umsetzung von Vulkanitöl	2
b) Eigenschaften des unraffinierten Braunkohlenteerdestillates	3
c) Durchführung der Versuche	6
d) Eigenschaften der gewonnenen Rückstandsöle unter verschiedenen Reaktionsbedingungen, und zwar in Abhängigkeit:	6
α) von der Menge des Aluminiumchloridzusatzes	6
β) von der Reaktionstemperatur	7
γ) von der Versuchsdauer	9
e) Eigenschaften der Destillate	10
2. durch Umsetzung von Braunkohlenteerdestillat mit Chlorparaffinen	10
a) Herstellung der Chlorparaffine	11
b) Durchführung der Umsetzungen	12
c) Versuchsergebnisse	13
3. durch Aluminiumchlorid-Behandlung von Braunkohlen-Dieselmotortoffen mit und ohne Zusatz von Chlorparaffin	19
a) Eigenschaften des Ausgangsstoffes	19
b) Eigenschaften der Enderzeugnisse	21
III. Zusammenfassung	23
Schrifttum	26
Abbildungen	27

000783

Beitrag zur Gewinnung von Schmierölen
aus Braunkohlenschwelteeren

I. Die Möglichkeiten zur Herstellung von
Schmierölen aus Braunkohlenschwelteeren

Abgesehen von der Hochdruckhydrierung, werden Braunkohlenschwelteere zur Zeit im wesentlichen zu Dieselmotoren und Heizölen aufgearbeitet; daneben werden kleine Mengen Benzin und Schmieröl (sog. Vulkanitöl) gewonnen. Letzteres wird als Rückstandsöl bei der Destillation von Paraffinablauföl und anschließend Säure-Lauge-Raffination hergestellt. Das Vulkanitöl hat sich für viele Arten der Lagerschmierung im Kohlebergbau-, Brikettfabrik- und Mineralölfabrikbetrieb als brauchbar erwiesen. Es handelt sich um ein verhältnismäßig leichtes Öl mit einer Viskosität von 4°E bei 50°C, mit einer Polhöhe von 3,1, mit ziemlich hoher Verkokungsneigung (Conradson-Wert z.B. 3,17 Gew.-%) und geringer Kältebeständigkeit (Stockpunkt + 4°C). Die genannten Eigenschaften gestatten eine Verwendung des Vulkanitöles als Motorenöl nicht, andererseits läßt der hohe Gehalt der Schwelteere und ihrer Erzeugnisse an Sauerstoff-, Stickstoff- und Schwefelverbindungen wegen des damit verbundenen polaren Aufbaues der Inhaltsstoffe auf eine gute Schmierfähigkeit schließen.

Schon während des Weltkrieges wurden von mehreren Stellen, insbesondere von der Versuchsanstalt der Kriegsschmieröl-Gesellschaft, der Vorgängerin der heutigen Gesellschaft für Braunkohlen- und Mineralölforschung an der Technischen Hochschule, Berlin, Untersuchungen mit Braunkohlenschwelteeren zwecks Gewinnung von Maschinen- und Motorenöl vorgenommen. Diese Versuche führten zu einer erheblichen Produktion von Braunkohlenschmierölen und Teerfettölen. Nach dem Kriege wurden diese Schmieröle durch solche aus Erdöl ersetzt, weil von den letzteren größere Mengen zur Verfügung standen und nicht, wie B u b e l) mitteilt, aus dem Bestreben, eine bessere Qualität zu verwenden. Besonders das Zinkchlorid-Polymerisat aus Braunkohlenteerdestillat hat sich bewährt. Nach dem Weltkriege von E r d m a n n 2) und von S e i d e n s c h n u r 3) durchgeführte Versuche bezogen sich im wesentlichen auf die Erniedrigung des Stockpunktes der Braunkohlenschmieröle durch Entparaffinierung mit Hilfe von Aceton oder Benzol-Alkohol, z.B. erhielt S e i d e n s c h n u r aus Braunkohlenteer 62 % Schmieröl mit einem Stockpunkt von - 8° C und einer Viskosität von 6,27°E bei 50° C. Auch die W e r s c h e n - W e i ß e n f e l s e r B r a u n k o h l e n A G 4) erhielt nach einem Aceton-Entparaffinierungsverfahren als Schmieröle gut verwendbare Paraffinablauföle mit einem Stockpunkt von - 15° C. Bemerkenswert ist ein Vorschlag von H a g e m a n n 5), der auf einen bereits 1896 geäußerten Gedanken von H e u s l e r 6) zurückgeht. Er besteht darin, die zu einem erheblichen Teil in Braunkohlenteer befindlichen ungesättigten aliphatischen und hydroaromatischen Kohlenwasserstoffe mit Hilfe von Katalysatoren wie Aluminiumchlorid zu polymerisieren und auf diese Weise sowohl brauchbare Schmier-

ole als auch motorisch besser geeignete Dieselmotortreibstoffe zu gewinnen; denn durch Polymerisation der ungesättigten Verbindungen wird einerseits die Verkokungsneigung der niedriger als Schmieröl siedenden Dieselmotortreibstoffe herabgesetzt, andererseits bewirkt die Abtrennung der hydroaromatischen Verbindungen eine Steigerung der Zündwilligkeit. Eine Erhöhung der Ausbeuten an Schmieröl kann man unter Umständen dadurch erzielen, daß man das im Braunkohlenteer anfallende feste Paraffin zu olefinischen Kohlenwasserstoffen aufspaltet und mit den ursprünglich vorhandenen ungesättigten Verbindungen polymerisiert. H a g e m a n n 5) fand bei seinen Versuchen, die er zwecks Polymerisation der ungesättigten Anteile der Braunkohlenteerdestillate vornahm, einen verhältnismäßig hohen Verbrauch an Aluminiumchlorid, den er darauf zurückführt, daß die sauerstoff- und schwefelhaltigen Verbindungen unter dem Einfluß des Katalysators eine Umwandlung in harzartige Stoffe erfahren. Er glaubt deshalb, daß man zu besseren Ergebnissen gelangen müßte, wenn man als Ausgangsstoffe für die Polymerisation die Lösungsmittelraffinate der Teerdestillate, deren Sauerstoff- und Schwefelgehalt stark herabgesetzt ist, einsetzen würde.

In der vorliegenden Arbeit wurden diese Gedanken aufgegriffen. Sowohl unraffinierte als auch raffinierte Braunkohlenteerdestillate wurden der Polymerisation unter Einwirkung von Aluminiumchlorid unterworfen. Außerdem wurde versucht, das Braunkohlenteerparaffin für die Schmierölgewinnung aus Paraffin nutzbar zu machen; zu diesem Zweck wurde das Paraffin jedoch nicht gekrackt, sondern mit Chlor zu Chlorparaffin umgesetzt und dann in Gegenwart von Aluminiumchlorid mit den ungesättigten Bestandteilen der Braunkohlenteerdestillate in Reaktion gebracht.

Demgemäß wurden folgende Umwandlungsmöglichkeiten in diese Untersuchungen einbezogen:

1. Umsetzung der unraffinierten Braunkohlenschwelteerdestillate mit Aluminiumchlorid zwecks Erhöhung der Viskosität und Beseitigung der zur Asphaltbildung neigenden Anteile.
2. Umsetzung von Braunkohlenteerdestillaten mit Chlorparaffin zwecks Erniedrigung der Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit und der Verkokungsneigung.
3. Aluminiumchlorid-Behandlung von raffinierten Braunkohlenteerdestillaten, um den Einfluß des Raffinationsgrades des Ausgangsstoffes auf die Eigenschaften der herzustellenden Schmieröle zu untersuchen.

II. Umwandlung von Braunkohlenschwelteer- Erzeugnissen zu Schmierölen

1. durch Aluminiumchlorid-Behandlung von Braunkohlenteerdestillat

a) Umsetzung von Vulkanitöl

In einem Vorversuch wurde zunächst festgestellt, ob sich Vulkanitöl (Zahlentafel 1) als Ausgangsstoff für Umsetzungen mit Aluminiumchlorid eignet.

Zahlentafel 1

Analytische Daten von Vulkanitöl (Sauerstoffraffinat von Braunkohlenschwelteerdestillat)

Spez. Gewicht bei 20°C	0,974
Viskosität bei 50°C	4,0
bei 100°C	1,45
Viskositätspolhöhe	3,1
Flammpunkt i. o. T. °C	196
Conradsonwert, Gew.-%	3,17
Hartasphaltgehalt, Gew.-%	1,14
Aschegehalt, Gew.-%	0,07
Stockpunkt, °C	+ 4

Das Vulkanitöl wurde bei 50°C unter Rühren mit 5 Gew.-% Aluminiumchlorid behandelt. Der Versuch mußte aber nach etwa 30 Minuten abgebrochen werden, da infolge starker Asphaltbildung am Boden des Kolbens der Rührer zum Stehen gebracht wurde. Es ist daraus zu ersehen, daß die Behandlung von Vulkanitöl mit Aluminiumchlorid in Übereinstimmung mit den H a g e m a n n 'schen Versuchsergebnissen aussichtslos ist. Das nach 30 Minuten Behandlungszeit vom Asphalt abgessene Vulkanitöl zeigte nur eine unwesentliche Viskositätserhöhung von 4°E auf 4,8°E bei 50°C.

Zu den nächsten Versuchen wurde als Ausgangsöl ein nur von Kreosot befreites Braunkohlenteerdestillat verwendet; man ging dabei von der bekannten Tatsache aus, daß das als Kondensationsmittel verwendete Aluminiumchlorid in erster Linie die im Dieselmotortreibstoff unerwünschten ungesättigten aliphatischen und hydroaromatischen Kohlenwasserstoffe umsetzt. Man würde dadurch unter Umständen die Möglichkeit erhalten, aus einem nicht raffinierten Braunkohlenteeröl sowohl einen brauchbaren Dieselmotortreibstoff als auch ein gutes Schmieröl lediglich durch Aluminiumchlorid-Behandlung zu gewinnen; denn in den leichtsiedenden Anteilen müssen sich hauptsächlich die nicht umgesetzten paraffinischen Kohlenwasserstoffe von guter Zündwilligkeit und in den schwerer siedenden Anteilen die zu Schmierölen kondensierten Kohlenwasserstoffe mit aromatischen Ringen angereichert vorfinden.

b) Eigenschaften des unraffinierten Braunkohlenteerdestillates

Das für die Aluminiumchlorid-Behandlung eingesetzte unraffinierte Braunkohlenteerdestillat ist durch die in der Zahlentafel 2 aufgeführten Analysenfestwerte gekennzeichnet. Die Analysenwerte entsprechen den allgemein bei Braunkohlenteerdestillaten gefundenen Daten. Die große Viskosität und der hohe Stockpunkt sind darauf zurückzuführen, daß auch sehr hochsiedende Anteile des Braunkohlenteeres in diesem Öl enthalten sind. Die verhältnismäßig geringe Zündwilligkeit, die bei den Braunkohlendieselmotortreibstoffen des Handels zwischen 45 und 50 liegt, ist auf den geringen Raffinationsgrad zurückzuführen. Die ziemlich hohe Jodzahl läßt auf einen stark ungesättigten Charakter des Öles schließen.

Zahlentafel 2

Analytische Daten des unraffinierten Braunkohlenteeröles

Farbe	schwarzbraun
Geruch	starker Braunkohlenteergeruch
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9335
Viskosität bei 20°C in E°	2,75
in cSt.	19
Siedekennziffer	336
Siedeverlauf nach Engler-Ubbelohde	
Siedebeginn in °C.	140
5 Vol-% sieden bei	263
15 " " "	286
25 " " "	299
35 " " "	311
45 " " "	326
55 " " "	343
65 " " "	358
75 " " "	373
85 " " "	391
91 " " "	397 +)

+) Eintritt starker Spaltung

Stockpunkt in °C	- 1
Conradsonwert in Gew.-%	0,33
Kreosot in Vol.-%	0,0
Schwefel in Gew.-%	1,2
Flammpunkt i. o. T. in °C	132

Korrosionseigenschaften

mg Gewichtsverlust von 16 cm²
Oberfläche in 24 Stunden bei 50°C

bei Zn	- 1,5
" Cu	- 1,4
Cetenzahl, HWA-Motor	39
Jodzahl	78,2

Um festzustellen, welche Öle aus dem Braunkohlenteerdestillat durch einfaches Abdestillieren der niedrigsiedenden Bestandteile gewonnen werden können, wurde eine Vakuumdestillation vorgenommen, durch die das Ausgangsöl in ein unter 220°C bei 8 mm QS siedendes Destillat und ein Rückstandsöl getrennt wurde. Die Grenze von 220°C bei 12 mm QS wurde auf Grund der Untersuchungen

von Spaut a 7) eingehalten. Spaut a fand, daß die meisten Markenachmieröle einen Siedebeginn bei durchschnittlich 210°C/12 mm QS und ein Siedende bei 380°C/12 mm QS haben. Die Eigenschaften des Destillates und des Rückstandsöles sind in der Zahlentafel 3 zusammengestellt.

Zahlentafel 3

Physikalisch-chemische Eigenschaften eines Destillates und eines Rückstandsöles aus entkreosotiertem Braunkohlenteeröl

Destillat

Ausbeute in Gew.-%	70,3
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9205
Stockpunkt in °C	- 8
Conradsonwert in Gew.-%	0,13
Cetenzahl, HWA-Motor	36,5

Rückstandsöl

Ausbeute in Gew.-%	29,7
Spez. Gewicht bei 20°C	0,978
Viskosität in °E bei 50°C	7,6
" 100°C	1,66
in cSt " 50°C	57,5
" 100°C	8,07
Viskositätspolhöhe	4,23
Conradsonwert in Gew.-%	2,21
Hartasphalt in Gew.-%	2,1
Stockpunkt in °C	+ 14
Aschegehalt in Gew.-%	0,085
Flammpunkt i. o. T. in °C	232

Das Destillat geht mit gelber Farbe über, dunkelt aber in der Vorlage während der Destillation nach, wobei es dunkelgrünbraun bis schwarz und undurchsichtig wird. Die Eigenschaften des Destillates deuten auf ein sehr unbeständiges, nur bedingt als Dieselkraftstoff verwendbares Erzeugnis hin. Besonders seine Zündwilligkeit (Cetenzahl 36,5) entspricht der z.B. vom Heereswaffenamt gestellten Anforderung einer Cetenzahl von 50 nicht. Der Abfall der Cetenzahl gegenüber der des Ausgangsöles ist einfach darauf zurückzuführen, daß die zündwilligen höher siedenden Teeranteile durch Destillation abgetrennt wurden.

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des in einer Ausbeute von 29,7 Gew.-% anfallenden Rückstandsöles entsprechen in nahezu keiner Hinsicht den üblichen Eigenschaften guter Schmieröle. Es besitzt einen außerordentlich hohen Stockpunkt von +14°C,

einen hohen Gehalt an Asphalt (2,1 Gew.-%), eine dementsprechend starke Verkokungsneigung (Conradsonwert 3,31 Gew.-%) sowie eine sehr schlechte Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit (Polhöhe 4,23). Auch der Aschengehalt liegt nicht mehr innerhalb der Grenze der Anforderungen an Motorschmieröle. Daraus ergibt sich eindeutig, daß durch einfache Destillation von Braunkohlenteerölen Schmieröle von guter Beschaffenheit nicht gewonnen werden können.

a) Durchführung der Versuche

Die Umsetzungen mit Aluminiumchlorid wurden wie folgt ausgeführt:

300 cm des jeweilig verwendeten Teerdestillates wurden in einem Rundkolben von 500 cm Inhalt auf dem Paraffinbad bis zur Versuchstemperatur erhitzt. Sodann wurde eine bestimmte Menge gepulvertes, wasserfreies Aluminiumchlorid (Schering, subl. techn.) unter Rühren mit einem durch Elektromotor betriebenen Glasrührer zugegeben. Ein zuerst angewandter Eisenrührer verzögerte die Umsetzung, man bekam wenigviskose Rückstandsöle.

Während der gesamten Reaktionszeit wurde ständig gerührt. Nach der Umsetzung wurde das Öl 12 Stunden lang stehen gelassen und von der abgesetzten Aluminiumchlorid-Additionsverbindung (Aluminiumchlorid-Schlamm) abgossen, mit Wasser bis zur neutralen Reaktion gewaschen und mit wasserfreiem Natriumsulfat getrocknet. Nach dem Trocknen wurde das erhaltene Öl im Vakuum bis 220°C bei 8 mm QS destilliert.

d) Eigenschaften der gewonnenen Rückstandsöle unter verschiedenen Reaktionsbedingungen, und zwar in Abhängigkeit

α) von der Menge des Aluminiumchloridzusatzes

Die Polymerisations- und Kondensationsversuche wurden zuerst unter Anwendung verschiedener Aluminiumchlorid-Mengen, und zwar von 3, 5 und 8 Gew.-% angesetzt; als Reaktionstemperatur wurden 100°C und als Reaktionsdauer 5 Stunden gewählt. Die Ausbeute an Rückstandsöl (Zahlentafel 4) sank bei dem mit 3 Gew.-% Aluminiumchlorid durchgeführten Versuch gegenüber derjenigen ohne Vorbehandlung aus dem Ausgangsöl gewonnenen um 2,7 Gew.-% (von 29,7 auf 27 Gew.-%) ab. Dieser Ausbeuteverlust ist offensichtlich darauf zurückzuführen, daß 10 Gew.-% des Öles im Aluminiumchloridschlamm verloren gingen. Demgemäß steigt die Ausbeute bei dem mit 5 Gew.-% Aluminiumchlorid vorgenommenen Versuch, bei dem der Verlust im Schlamm ebenfalls nur 10 Gew.-% betrug, auf 34 Gew.-% an. Eine weitere Steigerung des Aluminiumchloridzusatzes auf 8 Gew.-% bringt wiederum einen Abfall der Rückstandsölausbeute durch erhöhten Verlust im Aluminiumchloridschlamm mit sich (vergl. Abb. 1).

Die Eigenschaften der Rückstandsöle ändern sich unter den gewählten Reaktionsbedingungen mit Ausnahme des Zähigkeitsgrades bei Anwendung verschieden großer Mengen von Aluminiumchlorid nur unwesentlich. Die schlechte Polhöhe wird zunächst bis zu einem gewissen Grad verbessert; steigert man aber die zugesetzte Aluminiumchloridmenge bis auf 8 Gew.-%, so tritt wiederum eine Verschlechterung ein, die voraussichtlich auf die Bildung hochpolyme-

rer Asphaltstoffe mit großer Polhöhe zurückzuführen ist. Die günstigsten Ergebnisse wurden bei einem mittleren Zusatz von 5 Gew.-% erzielt; sowohl die Rückstandsölausbeute als auch die Eigenschaften sind bei diesem Zusatz am besten. Aus diesem Grunde wurden bei den weiteren in Abhängigkeit von der Temperatur und der Reaktionsdauer durchgeführten Versuchen stets 5 Gew.-% Aluminiumchlorid zugesetzt.

Zahlentafel 4

Die nach der Aluminiumchlorid-Behandlung in Abhängigkeit von dem Aluminiumchlorid-Zusatz erhaltenen Rückstandsöle

Reaktionstemperatur in °C	100		
Reaktionsdauer in Stunden	5		
Aluminiumchlorid-Zusatz in Gew.-%	3	5	8

Destillat

Ausbeute in Gew.-%	63	56	52
Spez. Gew. bei 20°C	0,9190	0,9075	0,9010
Cetenzahl, HWA-Motor	43	44	44
Stockpunkt in °C	-6	-6	-6
Conradson-Wert in Gew.-%	0,07	0,06	0,06

Rückstandsöl

Ausbeute in Gew.-%	27	34	29
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9795	0,9780	0,9790
Viskosität in °E bei 50°C	12,97	17,83	20,01
" 100°C	1,953	2,200	2,260
in cSt. " 50°C	98,5	135,5	152,0
" 100°C	11,3	13,8	14,4
Viskositätspolhöhe	4,14	4,08	4,6
Conradsonwert in Gew.-%	2,74	2,50	3,48
Stockpunkt in °C	+10	+10	+10

Verlust (Aluminiumchlorid-Schlamm)

in Gew.-%	10	10	19
-----------	----	----	----

β) von der Reaktionstemperatur

Führt man die Aluminiumchlorid-Umsetzung bei verschiedenen Temperaturen durch, so weisen die zu gewinnenden Rückstandsöle bemerkenswerte Unterschiede auf. Mit steigender Temperatur wächst die Ausbeute zunächst etwa linear, bei höherer Temperatur (150°C) etwas weniger stark an (Zahlentafel 5). Der Grund ist wohl darin

000787

zu sehen, daß sich der Verlust in Aluminiumchlorid-Schlamm mit zunehmender Reaktionstemperatur nicht proportional, sondern in stärkerem Maße erhöht. Ein gutes Bild der wesentlichen, mit der Reaktionstemperatur eintretenden Veränderungen vermittelt Abb. 2.

Die Viskositäten bei 50 und 100°C steigen mit zunehmender Reaktionstemperatur sehr stark an; je nach der angewandten Reaktions-temperatur erscheint es deshalb möglich, die Viskosität in be- liebiger Weise einzustellen. Die Viskosität-Temperatur-Abhängig- keit wird durch die Umsetzung praktisch nicht beeinflusst; das be- deutet, daß die durch Polymerisation und Kondensation in das Rück- standsöl überführten Anteile Braunkohlenteeröl etwa dieselbe che- mische Zusammensetzung besitzen wie das ohne Vorbehandlung gewon- nene Rückstandsöl. Ebenso wie die Viskosität steigt auch die Ver- kokungseigung nach **C o n r a d s o n** mit der Reaktionstempe- ratur an. Wählt man niedrigere Umsetzungstemperaturen (unter 60°C), so erzielt man einen kleinen Abfall der Conradsonwerte gegenüber denen des unbehandelten Rückstandsöles. Bei höheren Tem- peraturen nimmt der Conradson-Wert jedoch untragbar hohe Werte an, der z.B. für das bei 150°C gewonnene Reaktionsprodukt bei 4,36 Gew.-% liegt. Die Kältebeständigkeit des Rückstandsöles wird durch Aluminiumchlorid-Behandlung bei verschiedenen Temperaturen nur un- maßgeblich vermindert. Der geringe Abfall des Stockpunktes von +14°C auf +10°C bei den über 20°C angesetzten Versuchen ist na- hezu belanglos. Es wurde die Beobachtung gemacht, daß der Schwefelgehalt des Rückstandsöles durch die Aluminiumchlorid-Behandlung herabgesetzt wird. Die Abnahme des Schwefelgehaltes ist um so größer, je höher die Reaktionstemperatur gewählt wurde. Es ist jedoch anzunehmen, daß weniger die Reaktionstemperatur als die ge- bildete Menge an Aluminiumchlorid-Schlamm die Verminderung des Schwefelgehaltes bestimmt. Eine vollkommene Entfernung des Schwefels, wie sie von **H e u s l e r** erwartet wird, erscheint nach den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht möglich.

Zahlentafel 5

Die nach der Aluminiumchlorid-Behandlung in Abhängig- keit von der Behandlungstemperatur erhaltenen Ergebnisse

Aluminiumchlorid-Zusatz in Gew.-%	5			
Reaktionszeit in Stunden	5			
Reaktionstemperatur in °C	20	60	100	150
Destillat				
Ausbeute in Gew.-%	73	66	56	49
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9195	0,9110	0,9075	0,9060
Cetenzahl, HWA-Motor	39	42	44	44
Stockpunkt in °C	-6	-6	-6	-6
Conradsonwert in Gew.-%	0,11	0,09	0,06	0,06
Rückstandsöl (s. S. 9)				

Rückstandsöl

	22	27	34	37
Ausbeute in Gew.-%	0,970	0,970	0,970	0,901
Spez. Gew. bei 20°C				
Viskosität in °E				
bei 50°C	7,80	12,91	17,83	23,69
" 100°C	1,665	1,943	2,200	2,460
in cSt. bei 50°C	59,0	90,0	135,5	180,0
" 100°C	8,15	11,20	13,80	16,30
Polhöhe	4,23	4,23	4,00	4,26
Conradsonwert Gew.-%	1,79	1,85	2,50	4,36
Stockpunkt in °C	+14	+10	+10	+10
Schwefel in Gew.-%	1,10	1,10	0,60	0,56

Verlust (Aluminiumchloridschlamm)

in Gew.-%	5	7	10	14
Schwefel in Gew.-%	2,9	2,9	2,3	2,3

γ) von der Versuchsdauer

Verändert man die Dauer der Aluminiumchlorid-Umsetzungsver- suche innerhalb eines Bereiches von 5 bis 15 Stunden, so findet man keine grundlegenden Unterschiede in der Beschaffenheit der zu gewinnenden Rückstandsöle. Die Ausbeute, das spezifische Gewicht, der Conradsonwert und der Stockpunkt bleiben weitgehend gleich (Zahlentafel 6). Auch die Viskosität erfährt nur eine geringe Zu- nahme, die Polhöhe und der Schwefelgehalt einen kleinen Abfall, der besonders beim Übergang der Reaktionsdauer von 5 auf 10 Stun- den bemerkbar wird. Aus diesem Grunde wurde in den weiteren Ver- suchen normalerweise 10 Stunden als Versuchsdauer gewählt. Ver- längert man sie über 10 Stunden hinaus, so treten nur noch sehr geringe Verbesserungen der Öleigenschaften auf, die aber durch verhältnismäßig großen Verlust im Aluminiumchloridschlamm erkauft werden. Einige der mit der Behandlungsdauer veränderten Daten sind in Abb. 3 in Abhängigkeit von der Reaktionszeit aufgetragen.

Zahlentafel 6

Die nach der Aluminiumchlorid-Behandlung in Abhängig- keit von der Behandlungsdauer erhaltenen Ergebnisse

Aluminiumchlorid-Zusatz in Gew.-%	0			
Reaktionstemperatur in °C	60			
Reaktionszeit in Stunden	0	5	10	15
Destillat				
Ausbeute in Gew.-%	70,3	66,0	61,0	57,0
Spez. Gew. bei 20°C	0,9205	0,9110	0,9040	0,9050
Cetenzahl, HWA-Motor	36,5	42,0	44,0	44,0
Stockpunkt in °C	-8	-6	-6	-6
Conradsonwert in Gew.-%	0,13	0,09	0,04	0,04

000788

Ruckstandöl

Ausbeute in Gew.-%	29,7	27,0	27,0	29,0
Spez. Gew. bei 20°C	0,9780	0,9780	0,9780	0,9776
Viskosität in °E				
bei 50°C	7,60	12,91	15,40	15,60
" 100°C	1,660	1,943	2,100	2,120
in cSt bei 50°C	57,5	90,0	117,0	110,5
" 100°C	8,07	11,20	12,80	13,00
Polhöhe	4,23	4,23	3,88	3,81
Conradsonwert in Gew.-%	2,21	1,83	2,10	1,92
Stockpunkt in °C	+ 14	+ 10	+ 10	+ 10
Schwefel in Gew.-%	1,23	1,10	0,80	0,76
Verlust in Gew.-%	-	7	12	15

a) Eigenschaften der Destillate

Die nach der Aluminiumchlorid-Behandlung hergestellten Destillate sind grundsätzlich als Kraftstoffe für schnelllaufende Dieselmotoren verwendbar (vergl. Zahlentafel 4 - 6). Gegenüber dem durch einfache Destillation des Ausgangsöles gewonnenen Öl tritt eine wesentliche Verbesserung der Eigenschaften ein. Das spez. Gewicht und der Conradsonwert sinken als Folge der Umsetzung der aromatischen Kohlenwasserstoffe ab, in entsprechender Weise steigt die Zündwilligkeit. Die Kältebeständigkeit wird nur wenig verbessert. Durch Veränderung des Aluminiumchlorid-Zusatzes, der Behandlungstemperatur oder der Umsetzungsdauer werden die Eigenschaften der Destillate kaum berührt. Im allgemeinen steigt die Zündwilligkeit mit der Zunahme des Aluminiumchlorid-Zusatzes, der Reaktionsdauer und -temperatur um einige Einheiten an. Dieser Einfluß ist jedoch so gering, daß dadurch die Arbeitsbedingungen bei einer etwaigen technischen Umsetzung kaum beeinflußt werden können.

2. durch Umsetzung von Braunkohlenteerdestillat mit Chlorparaffinen

Da die unmittelbar aus dem entkreosotierten Teeröl hergestellten Schmieröle sowohl hinsichtlich ihrer Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit als auch ihrer Verkokungsneigung den an Motoren gestellten Anforderungen nicht entsprechen, wurde versucht, eine Verbesserung dadurch zu erzielen, daß man das Braunkohlenteeröl mit Chlorparaffin in Gegenwart von Aluminiumchlorid nach Friedel-Crafts umsetzte. Es ließ sich erwarten, daß das Chlorparaffin in diesem Fall mit den aromatischen und hydroaromatischen Kohlenwasserstoffen des Öles in Verbindungen überführt wird. Die entstehenden Moleküle weisen am Ring eine lange paraffinische Kette auf, die dem Schmieröl paraffinische Eigenschaften verleiht und somit die Polhöhe erniedrigt. Als Ausgangsstoff zur Herstellung des Chlorparaffins wurde ein Braunkohlen-Plattenweichparaffin mit folgenden Eigenschaften genommen:

Zahlentafel 7

Eigenschaften des zur Herstellung von Chlorparaffin benutzten Braunkohlenweichparaffins

Spez. Gewicht bei 20°C	0,803
Erstarrungspunkt in °C (nach Shukoff)	43,0
mittl. Molekulargewicht	332
Elementaranalyse, Gew.-%	
1. Messung C	85,01
H	14,82
2. Messung C	85,19
H	14,65

Die Eigenschaften des Weichparaffins lassen nach H o l d e ⁸⁾ und D a l m b e r t ⁹⁾ auf Heneicosan $C_{21}H_{44}$ und Docosan $C_{22}H_{46}$ schließen.

a) Herstellung der Chlorparaffine

Das Paraffin wurde in üblicher Weise bei 95 - 100°C mit durch konz. Schwefelsäure ($d_{20} = 1,84$) getrocknetem Chlor behandelt. Die Chlorierung wurde in einem Rundkolben vorgenommen. Das Einleitungsrohr für das Chlor war zu einer feinen Spitze ausgezogen und endete am Boden des Rundkolbens unter einem schnell rotierenden Flügelrührer, so daß der Gasstrom gut verstäubt wurde. Man stellte den Gasstrom so ein, daß kein Chlor aus dem Ableitungsrohr entwich und kontrollierte durch Wägung die Chloraufnahme. Es wurden so Chlorparaffine von 8,9, 15,1, 16,5, 22,2 und 25,4 Gew.-% Chlor hergestellt.

Die aus dem Abzugsrohr entweichende Salzsäure und von ihr mitgeführtes Chlor wurden in Natronlauge absorbiert. Die durch Titration festgestellte Salzsäuremenge entsprach der vom Paraffin aufgenommenen Chlormenge. Freies Chlor fand sich - in Form von Hypochlorit - nur in ganz geringen Mengen in der Absorptionsflüssigkeit und nur, nachdem etwa 15 Gew.-% Chlor von dem Paraffin aufgenommen wurden. Bei der Chlorierung von Weichparaffin wurden natürlich keine einheitlichen Chlorierungsstufen erhalten, sondern es handelt sich bei dem sog. "Chlorparaffin" um ein Gemisch verschieden weit chlorierter Paraffin-Kohlenwasserstoffe. Z.B. bemerkte man bei den etwa 10 bis 20 Gew.-% Chlor enthaltenden, hellgelb gefärbten Chlorparaffinen nach längerem Stehen eine Schichtentrennung in ein flüssiges und ein halbfestes Chlorparaffin. Die Chlorparaffine über 20 Gew.-% Chlor waren von zitronengelber Farbe und bei Zimmertemperatur (+ 18 bis + 20°C) flüssig.

Die analytischen Festwerte der in beschriebener Weise erzeugten Chlorparaffine sind aus der Zahlentafel 8 ersichtlich.

Zahlentafel 8

000789

Analytische Daten der Chlorparaffine

Chlorgehalt in Gew.-%	8,9	15,1	16,5	22,2	25,4
Spez. Gewicht bei 20°C	0,8490	0,8985	0,9095	0,9575	0,9826
Stockpunkt in °C	+ 33	+ 23	+ 21	+ 10	+ 4
Viskosität in °E					
bei 50°C	1,634	1,915	1,957	2,470	2,950
" 100°C	1,240	1,296	1,299	1,380	1,440
in cSt					
" 50°C	7,80	11,90	11,35	16,40	20,70
" 100°C	3,25	3,88	3,91	4,86	5,60
Viskositätspolhöhe	0,64	0,94	1,02	1,27	1,46
Conradsonwert in Gew.-%	0,16	0,16	0,16	0,30	0,31
Korrosionseigenschaften					
mg Gewichtsverlust von					
16 cm ² Oberfläche in					
48 Stdn. bei 20°C					
bei Cu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
" Zn	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
bei 100°C in 24 Stdn.					
bei Cu	0,8	1,1	1,1	2,3	7,5
" Zn	1,0	1,4	1,5	5,8	6,3

Obwohl die meisten der dort angegebenen analytischen Daten keinen praktischen Wert besitzen, kommt in ihnen doch die hohe Eignung der Chlorparaffine als Komponenten von Schmierölen zum Ausdruck; denn die Viskositätspolhöhe der Chlorparaffine ist außerordentlich niedrig. Zudem ist die durch sie hervorgerufene Korrosion bei weitem nicht so groß, wie man auf Grund des zum Teil sehr hohen Chlorgehaltes erwarten sollte (vergl. auch Abb. 4).

b) Durchführung der Umsetzungen

Die Umsetzung des entkrosotierten Braunkohlenteeröles mit Aluminiumchlorid und Chlorparaffin wurde grundsätzlich in derselben Weise wie die Aluminiumchloridbehandlung des Teeröles allein vorgenommen. Das Chlorparaffin wurde dem Teeröl vor dem Aluminiumchlorid-Zusatz beigemischt. Die Versuchsbedingungen wurden nicht geändert. Bei der Umsetzung mit Chlorparaffin und Aluminiumchlorid setzte eine lebhaftere Salzsäure-Entwicklung ein. Nach der Reaktion wurde das Umsetzungsprodukt, wie bei früheren Versuchen ohne Chlorparaffinzusatz, mit Wasser so lange gewaschen, bis neutrale Reaktion eintrat. Eine Neutralisation mit Lauge erwies sich wegen der dabei eintretenden starken Emulsionsbildung als undurchführbar.

Das neutrale Reaktionsprodukt wurde zunächst durch Absitzen, sodann durch Trocknen mit wasserfreiem Natriumsulfat vom Wasser befreit; anschließend wurde bei einem Druck von 8 bis 10 mm QS

eine bis 220°C übergehende Dieselkraftstofffraktion abdestilliert. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Destillate und der Rückstandsöle wurden ermittelt.

a) Versuchsergebnisse

Die Umsetzungen des entkrosotierten Braunkohlenteeröles mit Aluminiumchlorid und Chlorparaffin wurden in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur (Zahlentafel 9), von der Umsetzungsdauer (Zahlentafel 10) und von der zugesetzten Chlorparaffin-Menge durchgeführt (Zahlentafel 11). Die Versuchsergebnisse sind außer in den genannten Zahlentafeln in den Abbildungen 5 - 7 aufgezeichnet.

Zahlentafel 9

Die bei der Aluminiumchlorid-Behandlung nach Chlorparaffin-Zusatz in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur erhaltenen Ergebnisse.

Aluminiumchlorid-Zusatz in Gew.-%				
	5			
Chlorparaffinzusatz in Gew.-%				20
Reaktionszeit in Stunden				5
Reaktionstemperatur in °C	20	60	100	150

Destillat

Ausbeute in Gew.-%	56	47	42	38
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9100	0,9027	0,9012	0,9008
Cetenzahl, HVA-Motor	40	42	44	44
Stockpunkt in °C	- 6	- 6	- 6	- 6
Conradsonwert, Gew.-%	0,11	0,10	0,07	0,05

Rückstandsöl

Ausbeute in Gew.-%	40	46	51	52
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9670	0,9670	0,9685	0,9685
Viskosität in °E				
bei 50°C	4,12	5,49	7,73	18,19
" 100°C	1,500	1,620	1,785	2,470
in cSt				
" 50°C	30,4	41,2	58,5	138,2
" 100°C	6,25	7,83	10,00	16,90
Viskositätspolhöhe	2,39	2,31	2,32	2,60
Conradsonwert, Gew.-%	2,21	2,23	2,45	4,05
Stockpunkt in °C	+ 14	+ 12	+ 10	+ 10
Chlorgehalt in Gew.-%	7,3	6,9	5,8	5,6
Verlust in Gew.-%	4	7	7	10

Zahlentafel 10

Die bei der Aluminiumchlorid-Behandlung nach Chlorparaffin-
Zusatz in Abhängigkeit von der Behandlungszeit erhaltenen
Ergebnisse

Aluminiumchlorid-Zusatz in Gew.-%	0	5	10	15	20
Chlorparaffin-Zusatz in Gew.-%	0	20			
Reaktionstemperatur in °C	-	100			
Reaktionszeit in Stunden	-	5	10	15	20
<u>Destillat</u>					
Ausbeute in Gew.-%	70,3	42,0	40,0	38,0	37,0
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9205	0,9012	0,9014	0,9011	0,8980
Cetenzahl, HWA-Motor	36,5	44,0	45,0	45,0	46,0
Stockpunkt in °C	- 8	- 6	- 6	- 6	- 4
Conradsonwert, Gew.-%	0,13	0,07	0,05	0,04	0,04
<u>Rückstandsöl</u>					
Ausbeute in Gew.-%	29,7	51,0	52,0	54,0	54,0
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9780	0,9685	0,9702	0,9711	0,9740
Viskosität in °E bei 50°C	7,60	7,73	10,02	10,22	10,25
" 100°C	1,660	1,785	2,000	2,005	1,991
in cSt " 50°C	57,5	58,5	76,0	77,5	77,8
" 100°C	8,07	10,00	11,80	11,85	11,70
Polhöhe	4,20	2,32	2,30	2,40	2,48
Conradsonwert, Gew.-%	2,21	2,45	3,26	3,67	3,81
Stockpunkt in °C	+ 14	+ 10	+ 10	+ 10	+ 10
Chlorgehalt, Gew.-%	0,00	6,80	6,04	6,02	5,89
<u>Verlust in Gew.-%</u>	0	7	8	8	9

Zahlentafel 11

Nach der Aluminiumchlorid-Behandlung in Abhängigkeit
von der Chlorparaffin-Zusatzmenge erhaltene Ergebnisse

Aluminiumchlorid-Zusatz in Gew.-%	5	10	15	20	
Reaktionszeit in Stunden	10				
Reaktionstemperatur in °C	100				
Chlorparaffin-Zusatz in Gew.-%	0	5	10	15	20
<u>Destillat</u>					
Ausbeute in Gew.-%	53	53	50	40	40
Spez. Gewicht bei 20°C	0,8985	0,8977	0,8973	0,8984	0,9014
Cetenzahl, HWA-Motor	44	44	44	44	45
Stockpunkt, °C	- 6	- 6	- 6	- 6	- 6
Conradsonwert, Gew.-%	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<u>Rückstandsöl</u>					
Ausbeute in Gew.-%	33	35	39	41	52
Spez. Gewicht bei 20°C	0,9780	0,9700	0,9702	0,9704	0,9702
Viskosität in °E bei 50°C	19,22	15,27	12,22	12,13	10,02
" 100°C	2,28	2,19	2,07	2,12	2,00
in cSt " 50°C	146,0	116,0	92,8	92,1	76,0
" 100°C	14,6	13,7	12,5	13,0	11,8
Polhöhe	3,94	3,05	2,80	2,52	2,34
Conradsonwert in Gew.-%	2,61	2,58	2,62	2,58	2,86
Stockpunkt in °C	+ 10	+ 10	+ 10	+ 10	+ 10
Chlorgehalt in Gew.-%	0,00	1,34	3,53	5,59	6,04
<u>Verlust in Gew.-%</u>	14	12	11	11	8

Gegenüber den Versuchen ohne Chlorparaffin ist grundsätzlich eine Steigerung der Ausbeute an Rückstandsöl sowie ein Abfall der Viskositätspolhöhe eingetreten. Alle anderen Kennwerte der Rückstandsöle haben keine wesentliche Änderung erfahren. Ein Nachteil der mit Chlorparaffin angesetzten Versuche ist, daß ein Teil des Chlors im Schmieröl zurückbleibt. Der Chlorgehalt ist naturgemäß umso höher, je größer der Chlorgehalt des zugesetzten Chlorparaffins und je größer die zugegebene Chlorparaffinmenge ist. Mit steigender Behandlungstemperatur fällt unter sonst gleichen Bedingungen der Chlorgehalt des Schmieröles ab. Mit zunehmender Behandlungsdauer nimmt der Chlorgehalt des Reaktionsproduktes ebenfalls, aber in bedeutend geringerer Maße ab. Der Grund dafür die nicht völlige Umsetzung des Chlors zu Salzsäure ist wohl darin zu sehen, daß das als Katalysator wirkende Aluminiumchlorid durch die während der Reaktion in erheblichen Mengen entstehenden Asphaltstoffe in seiner Aktivität stark gehemmt wird. In diesem Sinne ließ sich der Chlorgehalt des Endproduktes durch Erhöhung des Aluminiumchlorid-Zusatzes vermindern. Eine Steigerung der zugesetzten Aluminiumchlorid-Menge über 5 Gew.-% kommt aber sowohl wegen der verhältnismäßig hohen Kosten des Aluminiumchlorids als auch wegen der großen Verluste durch Asphaltbildung technisch nicht in Frage. Die Steigerung der Ausbeute an Schmieröl bei Verwendung von Teeröl und Chlorparaffin als Ausgangsstoff ist selbstverständlich auf das Chlorparaffin zurückzuführen. Mit der Behandlungstemperatur, der Behandlungsdauer und der zugesetzten Chlorparaffin-Menge nimmt die Schmierölausbeute zu.

Die Ergebnisse dieser Versuche stimmen insofern mit den Erwartungen überein, als die Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit der gewonnenen Schmieröle durch die Einführung der Chlorparaffine in die Schmierölmoleküle erheblich verbessert worden ist. Die in einer Anzahl von Versuchen erhaltenen Schmieröle mit Polhöhen von 2,3 bis 2,4 entsprechen in ihrer Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit etwa dem Verhalten von Schmierölen aus naphthenbasischen Erdölen. Nachteilig ist jedoch der gegenüber den ohne Chlorparaffin-Zusatz hergestellten Schmierölen noch vergrößerte Conradsonwert und außer dem schon erwähnten Chlorgehalt auch der hohe Stockpunkt. Bei den in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur und der Behandlungsdauer angesetzten Versuchen läuft die Zunahme der Polhöhe parallel mit der des Conradson-Wertes. Bei niedriger Behandlungstemperatur und kurzer Umsetzungsdauer erhält man infolgedessen die günstigsten Ergebnisse hinsichtlich Polhöhe und Verkokungsneigung. In Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse der in Abhängigkeit von der Chlorparaffin-Menge durchgeführten Versuche. Steigerung der Chlorparaffin-Menge bewirkt einen Abfall der Polhöhe, aber eine Zunahme des Conradson-Wertes.

Die in den Zahlentafeln 9 - 11 ebenfalls wiedergegebenen analytischen Festwerte der Destillate zeigen gegenüber denen der in früheren Versuchen ohne Chlorparaffin erhaltenen Destillate keine nennenswerten Unterschiede. Zu erwähnen ist lediglich, daß die mit Chlorparaffin gewonnenen Destillate eine etwas hellere Farbe als die ohne Chlorparaffin hergestellten aufweisen; beim Stehen dunkelt ihre Farbe weniger nach.

Vollständigkeitshalber wurde eines der erhaltenen Schmieröle, und zwar das mit der besten Polhöhe (Zahlentafel 9) bei -10°C und bei -20°C unter Zusatz von Aceton entparaffiniert

und unter Fallung mit Normalbenzin und Bleienerde entasphaltiert (Zahlentafel 12 und 13). Die dabei gewonnenen Öle besitzen die in den Zahlentafeln 12 und 13 angegebenen analytischen Daten. Eine bedeutende Verbesserung der Eigenschaften des Rückstandsöles wird durch Entparaffinierung und Entasphaltierung nicht bewirkt. Der Abfall des Stockpunktes bringt eine beträchtliche Herabsetzung der Viskosität mit sich. Der Viskositätsabfall ist am stärksten bei der bei -10°C vorgenommenen Entparaffinierung; führt man die Entparaffinierung bei -20°C aus, so steigt die Viskosität wieder um einen kleinen Betrag an.

Begründet wird dieser Abfall und Anstieg dadurch, daß asphalthaltige Stoffe eine Zunahme, paraffinhaltige dagegen eine Abnahme der Viskosität der Braunkohlenschmieröle bewirken. Das nach dem Entparaffinierungsversuch bei -10°C erhaltene Rückstandsöl ist bereits von Asphalt befreit, so daß sich das bei -20°C entparaffinierte Öl nur durch einen geringeren Paraffingehalt von dem ersteren unterscheidet. Durch die Abnahme des Paraffingehaltes steigt der Chlorgehalt im Endöl an. Polhöhe und Conradson-Wert werden bei diesen Versuchen verbessert.

Zahlentafel 12

Analytische Daten der Rückstandsöle nach der Entharzung und Entparaffinierung bei -10°C in Aceton

Bezeichnung des Öles	Ohne Aluminiumchloridbehandlung	Nach Aluminiumchloridbehandlung	Nach Chlorparaffinzusatz und Aluminiumchloridbehandlung
Spez. Gewicht bei 20°C	0,978	0,968	0,965
Viskosität in $^{\circ}\text{E}$			
bei 50°C	5,36	15,40	5,21
" 100°C	1,567	2,100	1,625
in cSt " 50°C	39,4	117,0	39,0
" 100°C	7,03	12,80	7,70
Polhöhe	3,88	4,15	2,16
Conradson-Wert in Gew.-%	2,00	1,50	1,20
Stockpunkt in $^{\circ}\text{C}$	-1	-14	-11
Chlorgehalt in Gew.-%	0,0	0,0	7,3
Hartasphalt in Gew.-%	2,1	0,0	0,0
Erdölharz und Weichasphalt in Gew.-%	14,3	10,5	9,0

Gegenüber den Versuchen ohne Chlorparaffin ist grundsätzlich eine Steigerung der Ausbeute an Rückstandsöl sowie ein Abfall der Viskositätspolhöhe eingetreten. Alle anderen Kennwerte der Rückstandsöle haben keine wesentliche Änderung erfahren. Ein Nachteil der mit Chlorparaffin angesetzten Versuche ist, daß ein Teil des Chlors im Schmieröl zurückbleibt. Der Chlorgehalt ist naturgemäß umso höher, je größer der Chlorgehalt des angesetzten Chlorparaffins und je größer die zugegebene Chlorparaffinmenge ist. Mit steigender Behandlungstemperatur fällt unter sonst gleichen Bedingungen der Chlorgehalt des Schmieröles ab. Mit zunehmender Behandlungsdauer nimmt der Chlorgehalt des Reaktionsproduktes ebenfalls, aber in bedeutend geringerer Maße ab. Der Grund dafür die nicht völlige Umsetzung des Chlors zu Salzsäure ist wohl darin zu sehen, daß das als Katalysator wirkende Aluminiumchlorid durch die während der Reaktion in erheblichen Mengen entstehenden Asphaltstoffe in seiner Aktivität stark gehemmt wird. In diesem Sinne ließ sich der Chlorgehalt des Endproduktes durch Erhöhung des Aluminiumchlorid-Zusatzes vermindern. Eine Steigerung der zugesetzten Aluminiumchlorid-Menge über 5 Gew.-% kommt aber sowohl wegen der verhältnismäßig hohen Kosten des Aluminiumchlorids als auch wegen der großen Verluste durch Asphaltbildung technisch nicht in Frage. Die Steigerung der Ausbeute an Schmieröl bei Verwendung von Teeröl und Chlorparaffin als Ausgangsstoff ist selbstverständlich auf das Chlorparaffin zurückzuführen. Mit der Behandlungstemperatur, der Behandlungsdauer und der zugesetzten Chlorparaffin-Menge nimmt die Schmierölausbeute zu.

Die Ergebnisse dieser Versuche stimmen insofern mit den Erwartungen überein, als die Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit der gewonnenen Schmieröle durch die Einführung der Chlorparaffine in die Schmierölmoleküle erheblich verbessert worden ist. Die in 2,3 bis 2,4 entsprochen in ihrer Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit etwa dem Verhalten von Schmierölen aus naphthenbasischen Erdölen. Nachteilig ist jedoch der gegenüber den ohne Chlorparaffin-Zusatz hergestellten Schmierölen noch vergrößerte Conradsonwert und außer dem schon erwähnten Chlorgehalt auch der hohe Stockpunkt. Bei den in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur und der Behandlungsdauer angesetzten Versuchen läuft die Zunahme der Polhöhe parallel mit der des Conradson-Wertes. Bei niedriger Behandlungstemperatur und kurzer Umsetzungsdauer erhält man infolgedessen die günstigsten Ergebnisse hinsichtlich Polhöhe und Verkokungsneigung. In Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse der in Abhängigkeit von der Chlorparaffin-Menge durchgeführten Versuche. Steigerung der Chlorparaffin-Menge bewirkt einen Abfall der Polhöhe, aber eine Zunahme des Conradson-Wertes.

Die in den Zahlentafeln 9 - 11 ebenfalls wiedergegebenen analytischen Festwerte der Destillate zeigen gegenüber denen der in früheren Versuchen ohne Chlorparaffin erhaltenen Destillate keine nennenswerten Unterschiede. Zu erwähnen ist lediglich, daß die mit Chlorparaffin gewonnenen Destillate eine etwas hellere Farbe als die ohne Chlorparaffin hergestellten aufweisen; beim Stehen dunkelt ihre Farbe weniger nach.

Vollständigkeitshalber wurde eines der erhaltenen Schmieröle, und zwar das mit der besten Polhöhe (Zahlentafel 9) bei -10°C und bei -20°C unter Zusatz von Aceton entparaffiniert

und unter Fällung mit Normalbenzin und Bleienerde entasphaltiert (Zahlentafel 12 und 13). Die dabei gewonnenen Öle besitzen die in den Zahlentafeln 12 und 13 angegebenen analytischen Daten. Eine bedeutende Verbesserung der Eigenschaften des Rückstandsöles wird durch Entparaffinierung und Entasphaltierung nicht bewirkt. Der Abfall des Stockpunktes bringt eine beträchtliche Herabsetzung der Viskosität mit sich. Der Viskositätsabfall ist am stärksten bei der bei -10°C vorgenommenen Entparaffinierung; führt man die Entparaffinierung bei -20°C aus, so steigt die Viskosität wieder um einen kleinen Betrag an.

Begründet wird dieser Abfall und Anstieg dadurch, daß asphalthaltige Stoffe eine Zunahme, paraffinhaltige dagegen eine Abnahme der Viskosität der Braunkohlenschmieröle bewirken. Das nach dem Entparaffinierungsversuch bei -10°C erhaltene Rückstandsöl ist bereits von Asphalt befreit, so daß sich das bei -20°C entparaffinierte Öl nur durch einen geringeren Paraffingehalt von dem ersteren unterscheidet. Durch die Abnahme des Paraffingehaltes steigt der Chlorgehalt im Endöl an. Polhöhe und Conradson-Wert werden bei diesen Versuchen verbessert.

Zahlentafel 12

Analytische Daten der Rückstandsöle nach der Entharzung und Entparaffinierung bei -10°C in Aceton

Bezeichnung des Öles	Ohne Aluminiumchloridbehandlung	Nach Aluminiumchloridbehandlung	Nach Chlorparaffinzusatz und Aluminiumchloridbehandlung
Spez. Gewicht bei 20°C	0,978	0,968	0,965
Viskosität in $^{\circ}\text{E}$			
bei 50°C	5,36	15,40	5,21
" 100°C	1,567	2,100	1,625
in cSt " 50°C	39,4	117,0	39,0
" 100°C	7,03	12,80	7,70
Polhöhe	3,88	4,15	2,16
Conradson-Wert in Gew.-%	2,00	1,50	1,20
Stockpunkt in $^{\circ}\text{C}$	- 1	- 14	- 11
Chlorgehalt in Gew.-%	0,0	0,0	7,3
Hartasphalt in Gew.-%	2,1	0,0	0,0
Erdölharz und Weichasphalt in Gew.-%	14,3	10,5	9,0

Zahlentafel 13

Analytische Daten der Rückstandsöle nach der Entharzung und Entparaffinierung bei -30°C in Aceton

Bezeichnung des Öles	ohne Aluminiumchlorid-Behandlung	nach Aluminiumchlorid-Behandlung	nach Chlorparaffinzusatz und Aluminiumchlorid-Behandlung
Spez. Gewicht bei 20°C	0,981	0,981	0,968
Viskosität in $^{\circ}\text{E}$			
bei 50°C	7,80	19,61	7,41
" 100°C	1,650	2,180	1,785
in cSt. " 50°C	59,0	149,0	56,0
" 100°C	8,0	13,6	9,5
Polhöhe	4,60	4,78	2,40
Conradson-Wert in Gew.-%	2,90	1,85	1,20
Stockpunkt in $^{\circ}\text{C}$	- 9	- 17	- 26
Chlorgehalt in Gew.-%	-	-	7,6
Korrosionseigenschaften			
mg Gewichtsverlust von 16 cm^2 Oberfläche in 24 Stunden bei 100°C			
Zn	-	-	0,2
Fe	-	-	0,4
bei 150°C			
Zn	-	-	0,8
Fe	-	-	1,1
bei 200°C			
Zn	-	-	195,3
Fe	-	-	11,2
Flammpunkt in $^{\circ}\text{C}$	224	231	218
Verlust			
Hartasphalt in Gew.-%	2,1	0,0	0,0
Erdölharz u. Weichasph.	14,3	10,5	9,0
Verdampfbarkeit nach Noack in Gew.-%		14,2	15,8

Um den steigenden Chlorgehalt der Rückstandsöle herabzusetzen, wurde das bei -30°C entparaffinierte und entasphaltrierte Rückstandsöl bei 150°C mit metallischem Natrium und aktiver Bleicherde gerührt. Nach 4-stündiger Behandlung wurde das Reaktionsprodukt abgekühlt, das nicht umgesetzte Natriummetall mit Methylalkohol ersetzt und das Öl mit Wasser gewaschen, dann mit wasserfreiem Natriumsulfat getrocknet. Es gelang nach diesem Verfahren tatsächlich, den Chlorgehalt von 7,6 auf 0,8 % (Zahlentafel 14) herabzusetzen. Die übrigen analytischen Daten des mit Natrium umgesetzten Öles erfahren keine wesentliche Änderung.

Zahlentafel 14

Die nach der Behandlung mit metallischem Natrium und Bleicherde erhaltenen Rückstandsöle

Bezeichnung	vor der Natriumbehandlung	nach der Natriumbehandlung
Spez. Gewicht bei 20°C	0,969	0,967
Viskosität in $^{\circ}\text{E}$ bei 50°C	7,41	6,88
" 100°C	1,785	1,773
in cSt. " 50°C	56,0	52,0
" 100°C	9,50	9,36
Polhöhe	2,4	2,2
Conradsonwert in Gew.-%	1,66	1,81
Stockpunkt in $^{\circ}\text{C}$	- 26	- 21
Chlorgehalt in Gew.-%	7,6	0,8

3. durch Aluminiumchlorid-Behandlung von Braunkohlen-Dieselmotorenstoffen mit und ohne Zusatz von Chlorparaffin

a) Eigenschaften des Ausgangsstoffes

Da die hohen Verluste im Aluminiumchlorid-Schlamm und der hohe Chlorgehalt der Endprodukte das nur entkreosotierte Teeröl als Ausgangsstoff für die Aluminiumchlorid-Behandlung als wenig brauchbar erkennen lassen, wurden weitere Versuche mit einem normal raffinierten Handelsdieselmotorenstoff aus Braunkohlenteer (Zahlentafel 15) angesetzt.

Von dem früher verwendeten entkreosotierten Öl unterscheidet sich dieser Dieselmotorenstoff durch ein niedrigeres spezifisches Gewicht, geringeren Conradson-Wert, tieferen Stockpunkt und höhere Cetenzahl. Der Siedebereich liegt im ganzen etwas unter dem des nur entkreosotierten Teeröles.

Zahlentafel 16

Analytische Daten von Braunkohlen-Dieselskraftstoff

Spez. Gewicht bei 20°C	0,896
Viskosität bei 20°C in °E	1,82
Siedekennziffer	394
Siedeverlauf nach Engler-Ubbelohde	
Siedebeginn in °C	
5 Vol.-%	220
15 "	244
25 "	256
35 "	269
45 "	279
55 "	288
65 "	297
75 "	310
85 "	328
95 "	352
Stockpunkt in °C	- 6
Conradson-Wert in Gew.-%	0,10
Cetanzahl, HWA-Motor	41
Jodzahl	62,8
Grenztemperatur der Filtrierbarkeit °C - 4 bis - 5	
Flammpunkt in °C	168

Ein gut raffiniertes Braunkohlenteerergebnis läßt von vornherein ein Aluminiumchlorid-Umsetzungsprodukt von wesentlich besseren Eigenschaften erwarten, als man es bei Verwendung von unraffiniertem Teeröl erhalten würde; denn in früheren Versuchen 10) wurde bereits festgestellt, daß man durch Aluminiumchloridbehandlung von Selektivraffinaten aus Braunkohlenteer bedeutend bessere Rückstandsöle als durch Umsetzung unraffinierter Braunkohlenteer-Erzeugnisse erhalten kann.

Um festzustellen, wieviel Rückstandsöl und Destillat ohne Vorbehandlung mit Aluminiumchlorid gewonnen werden, wurde der Dieselskraftstoff einer Destillation im Vakuum von 8 mm QS bei 220°C unterworfen (Zahlentafel 16). An Destillat fielen entsprechend den niedrigen Siedegrenzen des Ausgangsstoffes 97 Gew.-% an. Die Eigenschaften dieses Destillates unterscheiden sich praktisch von denen des Ausgangsöles nicht. Die restlichen 3 Gew.-% Rückstandsöl zeigen verhältnismäßig gute Eigenschaften; besonders die Polhöhe von 2,84 ist in Anbetracht dessen, daß es sich lediglich um einen unvorbehandelten Dieselskraftstoff handelt, ziemlich niedrig. Allerdings liegen der Conradson-Wert (3,60 Gew.-%) und der Stockpunkt (+ 22°C) viel zu hoch, als daß eine technische Verwendung - z.B. als Motorenöl - in Frage käme.

Zahlentafel 16

Physikalisch-chemische Eigenschaften eines Destillates und eines Rückstandsöles aus dem Braunkohlen-Dieselskraftstoff

<u>Destillat</u>	Ausbeute in Gew.-%	97
	Spez. Gewicht bei 20°C	0,8937
	Stockpunkt in °C	- 7
	Conradson-Wert in Gew.-%	0,06
	Cetanzahl, HWA-Motor	40

Rückstandsöl

	Ausbeute in Gew.-%	3
	Spez. Gewicht bei 20°C	0,961
	Viskosität in °E bei 50°C	6,03
	" 100°C	1,6
	in cSt " 50°C	42,4
	" 100°C	7,4
	Polhöhe	2,84
	Conradson-Wert, Gew.-%	3,60
	Stockpunkt °C	+ 22
	Asche in Gew.-%	0,19

b) Eigenschaften der Enderzeugnisse

Die Umsetzungen des Braunkohlen-Dieselskraftstoffes mit Aluminiumchlorid wurden sowohl ohne als auch in Anwesenheit von Chlorparaffin durchgeführt. Nimmt man die Aluminiumchloridumsetzung in Abwesenheit von Chlorparaffin vor, so tritt z.B. bei einem Zusatz von 5 Gew.-% Aluminiumchlorid eine starke Steigerung der Zähigkeit des Rückstandsöles von 6,03 auf 67,4°E bei 50°C ein; der Stockpunkt fällt von + 22°C auf + 9°C und der Conradson-Wert von 3,60 auf 3,05 Gew.-% (Zahlentafel 17, erste Spalte). Andererseits steigt die Polhöhe von 2,84 auf den sehr hohen Wert von 5,5, zudem enthält das Rückstandsöl eine erhebliche Menge an Erdölharz und Weichasphalt (16,1 Gew.-%).

Wesentlich bessere Polhöhen erhält man, wenn die Aluminiumchlorid-Behandlung in Gegenwart von Chlorparaffin vorgenommen wird. (Zahlentafel 17 und Abb. 8). Da aber der Stockpunkt in diesem Falle zum Teil bedeutend gegenüber dem des Ausgangsöles erhöht wird, wurde das Enderzeugnis bei - 20°C unter Zusatz von Aceton entparaffiniert.

Zahlentafel 17

Die nach der Aluminiumchlorid-Behandlung und dem Chlorparaffinzusatz in Abhängigkeit vom Chlorgehalt in Chlorparaffin erhaltenen Ergebnisse

Aluminiumchlorid-Zusatz in Gew.-%	5					
Reaktionszeit in Stunden	10					
Reaktionstemperatur in °C	100					
Chlorparaffin-Zusatz in Gew.-%	20					
Chlorgehalt in Chlorparaffin in Gew.-%	0,0	8,9	15,1	16,5	22,2	24,5
Destillat						
Ausbeute in Gew.-%	80	62	62	62	68	68
Spez. Gewicht bei 20°C	0,8854	0,8764	0,8797	0,8800	0,8800	0,8840
Cetenzahl, HWA-Motor	46,5	51,0	51,0	51,0	51,0	51,0
Stockpunkt in °C	- 6	± 0	- 4	- 4	- 6	- 6
Conradsonwert, Gew.-%	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Rückstandsöl						
Ausbeute in Gew.-%	14	30	30	30	24	24
Spez. Gew. bei 20°C	0,9800	0,9260	0,9440	0,9452	0,9480	0,9581
Viskosität in °E						
bei 50°C	67,40	-	-	-	24,74	32,60
" 100°C	3,73	-	-	-	3,04	3,58
in cSt " 50°C	512	-	-	-	188	248
" 100°C	27,3	-	-	-	21,5	26,0
Polhöhe	5,50	-	-	-	2,44	2,43
Conradson-Wert, Gew.-%	3,05	1,83	2,12	3,28	4,10	4,37
Stockpunkt	+ 9	+ 30	+ 18	+ 18	+ 10	+ 8
Erdölharz u. Weichasphalt in Gew.-%	16,1	6,0	6,2	6,2	8,1	8,3
Verlust in Gew.-%	6	8	8	8	8	8

Zahlentafel 18

Die nach der Aluminiumchlorid-Behandlung und dem Chlorparaffinzusatz in Abhängigkeit vom Chlorgehalt in Chlorparaffin erhaltenen Ergebnisse nach dem Entharsen und Entparaffinieren

Aluminiumchlorid-zusatz in Gew.-%	5				
Reaktionszeit in Stunden	10				
Reaktionstemperatur in °C	100				
Chlorparaffinzusatz in Gew.-%	20				
Chlorgehalt in Chlorparaffin in Gew.-%	8,9	15,1	16,5	22,2	24,5
Destillat					
Spez. Gewicht bei 20°C	0,8818	0,8822	0,8830	0,8845	0,8850
Cetenzahl, HWA-Motor	49	49	49	49	49
Stockpunkt in °C	- 16	- 16	- 16	- 16	- 16
Conradsonwert, Gew.-%	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Rückstandsöl					
Spez. Gewicht bei 20°C	0,964	0,968	0,968	0,971	0,972
Viskosität in °E					
bei 50°C	10,41	9,04	8,47	8,12	7,99
" 100°C	1,890	1,844	1,785	1,830	1,826
in cSt " 50°C	79,0	68,5	64,2	61,5	60,5
" 100°C	10,63	10,15	9,50	9,99	9,95
Polhöhe	3,29	2,88	2,63	2,47	2,43
Conradsonwert in Gew.-%	0,85	1,10	1,10	1,40	1,40
Stockpunkt in °C	- 24	- 24	- 24	- 24	- 24
Chlorgehalt, Gew.-%	4,37	4,63	4,62	5,10	5,28
Flammpunkt in °C	221	221	221	223	221
Erdölharz u. Weichasphalt	6,0	6,2	6,2	8,1	8,3
Korrosionseigenschaften					
mg Gewichtsverlust von 16 cm ² Oberfläche in 24 Stunden bei 100°C					
bei Zn				0,2	
" Fe				0,3	

Aus den in Zehntafel 18 zusammengestellten analytischen Daten der entparaffinierten Rückstandsöle geht hervor, daß man unter den gewählten Umsetzbedingungen nach der Entparaffinierung Schmieröle gewinnen kann, die hinsichtlich der Polhöhe und des Conradson-Wertes wesentlich bessere Eigenschaften als die in früher beschriebener Weise hergestellten Öle besitzen. Die Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit verläuft um so flacher, je höher der Chlorgehalt des zugesetzten Chlorparaffins ist; der Conradson-Wert scheint jedoch in derselben Weise zuzunehmen. Leider läuft auch hier die Aluminiumchlorid-Umsetzung nicht völlig zu Ende, wie an dem ziemlich hohen Chlorgehalt der Rückstandsöle zu erkennen ist. Der Chlorgehalt ist naturgemäß um so höher, je größer der Chlorgehalt im zugegebenen Chlorparaffin ist (siehe Abb. 9).

Um einen Überblick über die Angriffsfähigkeit der gewonnenen Rückstandsöle zu erhalten, ließ man ein Gemisch aus gleichen Anteilen der in der Zehntafel 18 beschriebenen Rückstandsöle bei 100°C 24 Stunden auf Zink- und Eisenmetallstreifen einwirken. Die dabei eingetretene Korrosion (Gewichtsverlust 0,2 bzw. 0,3 mg je 16 qcm Oberfläche) ist praktisch gleich Null zu setzen.

Erhitzt man die mit Chlorparaffin-Zusatz und anschließender Aluminiumchlorid-Behandlung erhaltenen Rückstandsöle auf 200°C, so fällt der Chlorionennachweis mit Silbernitrat im wässrigen Extrakt negativ aus. Bei der Korrosionsprüfung mit Zink- und Eisenmetall bei 200°C über 24 Stunden kann man nach dem Extrahieren mit Wasser Chlorionen mit Silbernitrat nachweisen; der Chlorgehalt betrug 0,03 % der angewandten Ölmenge. Das Öl wird nach der Korrosionsprüfung dunkler, weil das gebildete Zinkchlorid bzw. Eisenchlorid offenbar die Rolle eines Kondensationsmittels übernimmt und das Öl verändert.

Parallel zu diesen Versuchen wurde eine Mischung des durch Aluminiumchlorid-Behandlung hergestellten Rückstandsöles mit 20 Gew.-% Chlorparaffin (25,4 Gew.-% Chlor) untersucht. Die Korrosionsprüfung mit Zink- und Eisenmetall bei 200°C und 24 Stunden ergab höhere Werte an abgespaltenem Chlor (1,6 % Chlor) stärkere Schwarzfärbung des Öles und höhere Korrosionsergebnisse an den Metallstreifen. Demzufolge hat man bei Verwendung von Schmierölen mit solchen Zusätzen wegen der auftretenden Korrosionserscheinungen mit erhöhtem Verschleiß und einer zusätzlichen stärkeren Ölveränderung zu rechnen.

III. Zusammenfassung

Wie in einer früheren Arbeit 10) nachgewiesen werden konnte, lassen sich aus Braunkohlenschwelter-Erzeugnissen durch Umsetzung mit Aluminiumchlorid Schmieröle in verhältnismäßig hoher Ausbeute gewinnen. Die Eigenschaften der Erzeugnisse lassen insofern zu wünschen übrig, als insbesondere die Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit einen zu steilen Verlauf nimmt; auch die im Conradson-Wert zum Ausdruck kommende Verkokungsneigung ist verhältnismäßig hoch. Aus diesem Grunde wurde im ersten Teil der vorliegenden Arbeit geprüft, ob es möglich ist, die Raffination von Braunkohlenschwelterdestillat dadurch mit der Gewinnung von Schmieröl

zu koppeln, daß man die Aluminiumchloridumsetzung in Gegenwart von Chlorparaffin vornimmt, denn es ist zu erwarten, daß die Chlorparaffine sich in erster Linie mit Aromaten und Hydroaromaten aus schmierölarartigen Molekülen umwandeln, während die paraffinischen und naphthenischen Kohlenwasserstoffe nicht umgesetzt zurückbleiben. Zerlegt man das Endprodukt in Destillat und Rückstandsöl, so müßte das Destillat die paraffinischen Kohlenwasserstoffe anreichern, während sich das Aluminiumchlorid-Erzeugnis im Rückstandsöl vorfindet. Da paraffinische Kohlenwasserstoffe eine hohe Zündwilligkeit besitzen, sollte also das Destillat gute Eigenschaften für die Verwendung als Dieselkraftstoff aufweisen. Gleichzeitig wird die Qualität des Schmieröles durch das mitgesetzte Chlorparaffin verbessert.

Mit einem unraffinierten Braunkohlenteerdestillat wurde eine Anzahl von Umsetzungen ohne und in Gegenwart von Chlorparaffin mit verschiedenem Chlorgehalt in Abhängigkeit von der Reaktionstemperatur, der Reaktionsdauer und der zugesetzten Aluminiumchlorid-Menge angesetzt. Die Versuchsergebnisse lassen erkennen, daß die nach der Umsetzung mit Aluminiumchlorid allein gewonnenen Destillate bessere Eigenschaften als die unmittelbar durch Destillation hergestellten zeigen. Destillate von besseren Eigenschaften als solche, die üblicherweise durch Säure-Lauge-Raffination erhalten werden, wurden jedoch nicht gewonnen.

Eine weitere Verbesserung wird durch Zusatz von Chlorparaffin bei der Aluminiumchloridumsetzung erzielt. Die Verbesserung wird jedoch zum Teil dadurch aufgehoben, daß das Endprodukt einen ziemlich hohen Chlorgehalt besitzt, weil die Aluminiumchloridumsetzung nicht völlig bis zu Ende verläuft. Der Chlorgehalt läßt sich durch eine Nachbehandlung mit metallischem Natrium bei erhöhter Temperatur größtenteils beseitigen.

Da zu erwarten war, daß ein raffiniertes Braunkohlöl als Ausgangsöl zu besseren Ergebnissen führen würde, wurden dieselben Versuche nochmals mit einem gut raffinierten Dieselkraftstoff (Säure-Lauge-Raffinat) durchgeführt. Mit diesem Öl als Ausgangsstoff gelang es, Schmieröle herzustellen, die in ihren Eigenschaften den Daten der naphthenbasischen Schmieröle aus Erdöl entsprechen. Auch diesen Ölen ist ein ziemlich hoher Chlorgehalt eigen. Obwohl die Angriffsfähigkeit dieser Öle gegenüber den Metallen gering ist, ist eine Entchlorierung mittels Natrium anzuraten.

Schrifttum

1. Babe, Öl u. Kohle/Erdöl u. Teer 14, 499 (1938)
2. Erdmann, Öl u. Kohle/Erdöl u. Teer 14, 502 (1938)
3. Seidenschner, Brennstoffchemie 2, 85 (1921)
4. Warschen-Weissenfelder Braunkohlen AG,
Öl u. Kohle/Erdöl u. Teer 14, 502 (1938)
5. Hagemann, Erdöl u. Teer VII, 464, 478 (1931)
6. Heusler, Zeitschr. f. angew. Chemie 2, 288, 318 (1896)
7. Spausta, Brennstoff-Chemie 18, 153 (1937)
8. Holdq, Kohlenwasserstofföle und Fette (1933)
9. Dalmbert, Dissertation "Über die Isolierung von Normal-Paraffinen aus Braunkohlenparaffin" (1905)
10. Merder u. Mertz, Öl u. Kohle/Petroleum 35, 705 (1939)

Abb. 1. Abhängigkeit der Ausbeute, der Viskosität, der Polhöhe und des Conradson-Wertes des Rückstandsöles von der zugesetzten $AlCl_3$ -Menge.

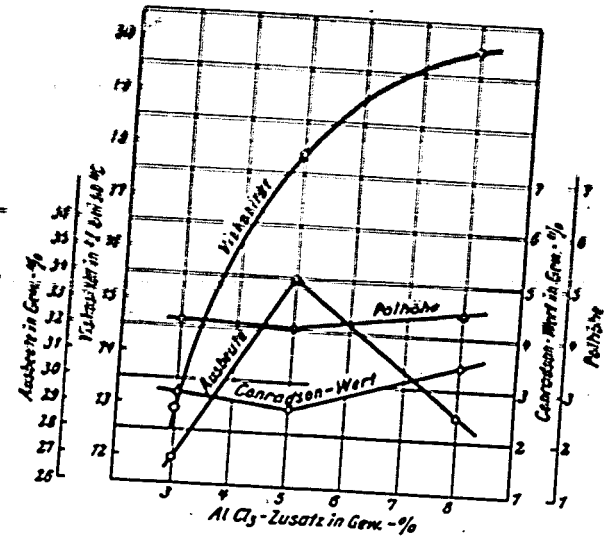
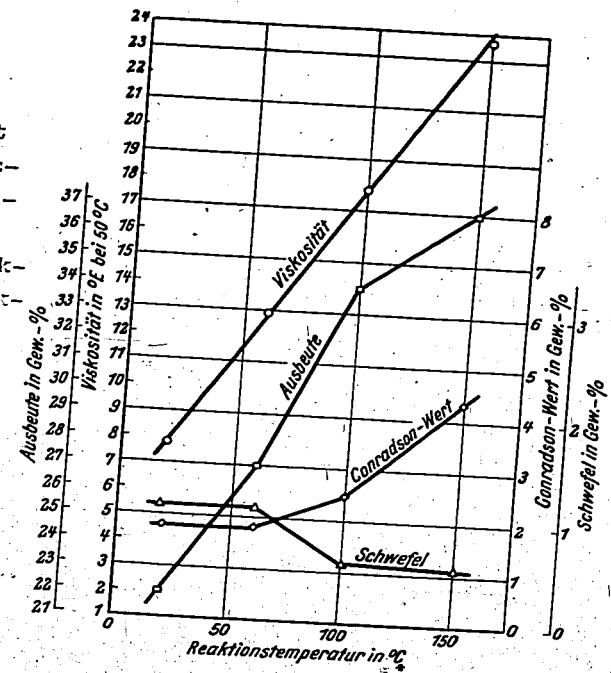


Abb. 2. Abhängigkeit der Ausbeute, der Viskosität, des Schwefelgehaltes und des Conradson-Wertes des Rückstandsöles von der Reaktionstemperatur.



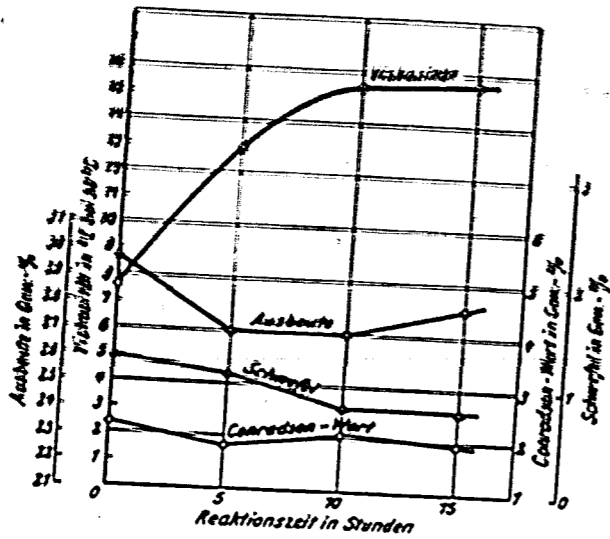


Abb. 3. Abhängigkeit der Ausbeute, der Viskosität, des Schwefelgehaltes und des Conradson-Wertes des Rückstandöles von der Reaktionszeit.

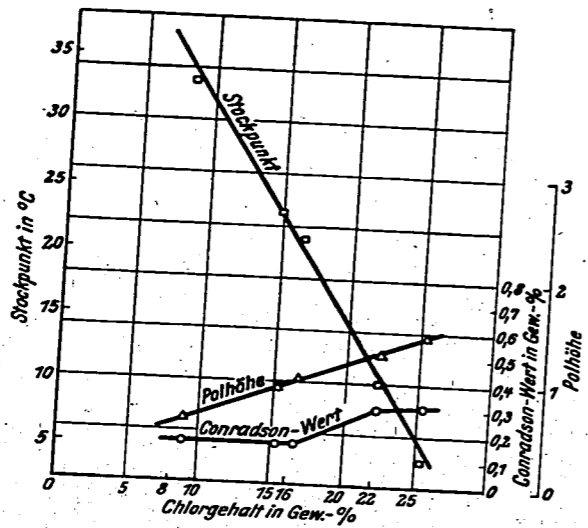


Abb. 4. Abhängigkeit des Siedepunktes, der Polhöhe und des Conradson-Wertes von dem Chlorgehalt im Chlorparaffin.

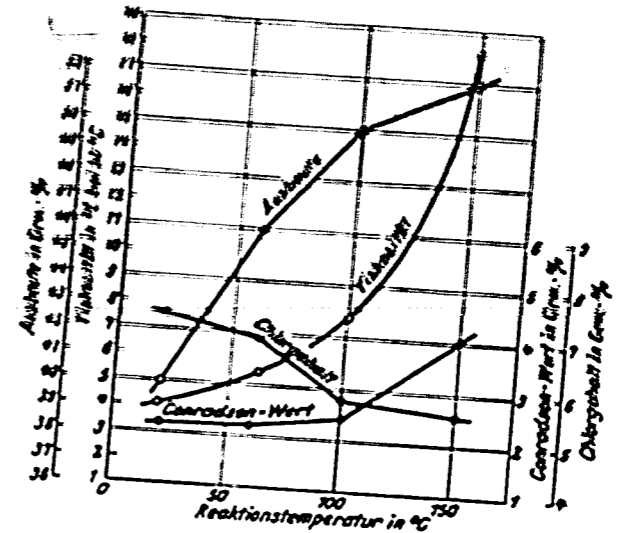


Abb. 5. Abhängigkeit der Viskosität, der Ausbeute, des Chlorgehaltes und des Conradson-Wertes des Rückstandöles von der Reaktionstemperatur.

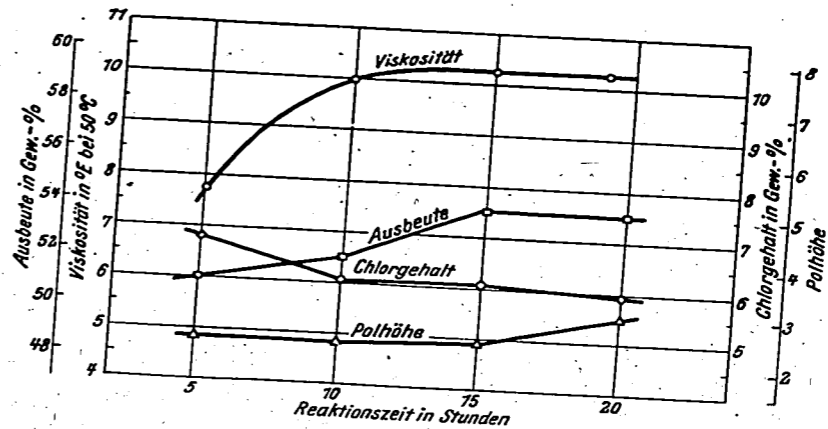


Abb. 6. Abhängigkeit der Viskosität, der Ausbeute, der Polhöhe und des Chlorgehaltes des Rückstandöles von der Reaktionszeit.

000798.

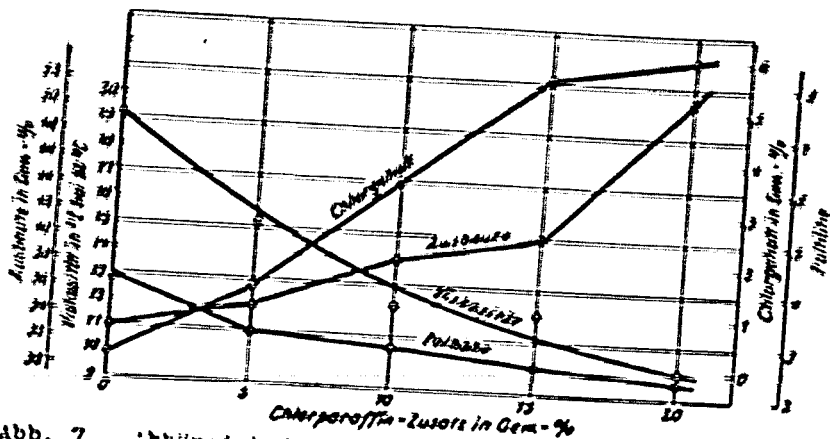


Abb. 7. Abhängigkeit der Viskosität, der Ausbeute, der Polhöhe und des Chlorgehaltes des Rückstandöles von dem Chlorparaffin-Zusatz.

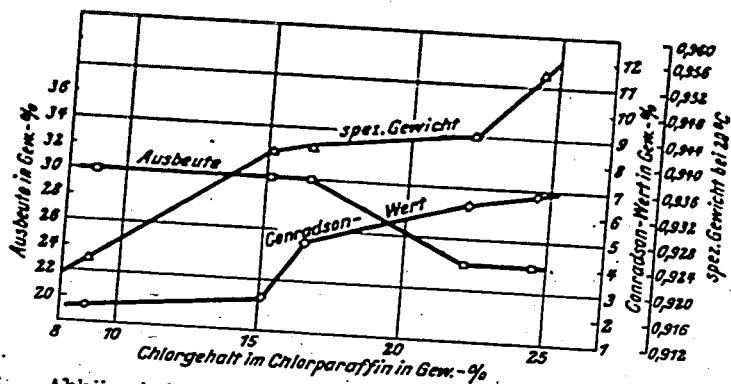


Abb. 8. Abhängigkeit der Ausbeute, des spezifischen Gewichtes und des Conradson-Wertes des Rückstandöles von dem Chlorgehalt im Chlorparaffin.

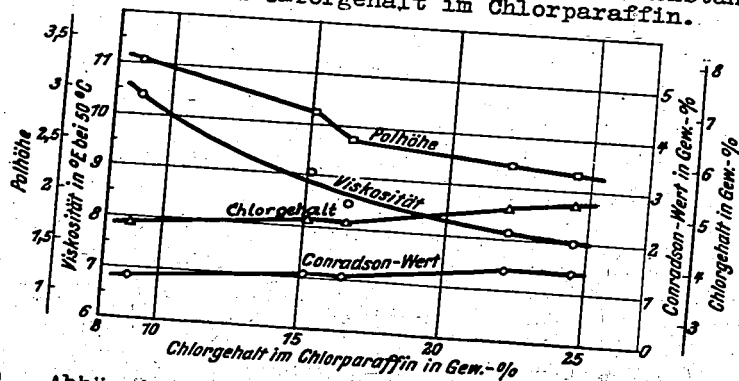


Abb. 9. Abhängigkeit der Viskosität, der Polhöhe, des Chlorgehaltes und des Conradson-Wertes vom Chlorgehalt im Chlorparaffin.

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsereich des Empfängers

SF9

000799

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 93/1941

Verwendbarkeit von Zündbeschleunigern
für Dieselkraftstoffe

von

Prof. Dr. habil. R. Heinze - Dozent Dr. habil. M. Marder
und Dipl.-Ing. M. Veidt

Bericht des

Instituts für Braunkohlen- und Mineralölforschung an der
Technischen Hochschule Berlin (Fo IV JBM Bln. 7. K 4 3733/38)

000800

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 93 / 1941

Verwendbarkeit von Zündbeschleunigern
für Dieselmotoren

von

Prof. Dr. habil. R. Heinze - Dozent Dr. habil. M. Marder
und Dipl.-Ing. M. Veidt

Bericht des

Instituts für Braunkohlen- und Mineralölforschung an der
Technischen Hochschule Berlin (Fo IV JBM Bln. 7. K 4 3733/38)

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Verschluss zu halten.

Als wichtigste Eigenschaft von Dieseldieselkraftstoffen ist die Zündwilligkeit anzusehen. Manche Kraftstoffe aber, z. B. solche aus Krackprozessen oder aus der Kohleverkokung, erfüllen gerade die an die Zündwilligkeit gestellten hohen Anforderungen nicht. Es ist deshalb verständlich, daß zur Verbesserung der Zündwilligkeit zahlreiche Zusatzstoffe, sog. dope-Stoffe, vorgeschlagen wurden. Die große Fülle dieser Stoffe läßt es an der Zeit erscheinen, den Einfluß von Zusätzen auf die technische Verwendbarkeit heimischer Dieseldieselkraftstoffe zu überprüfen, um die der deutschen Kraftstoffindustrie erwachsenden Möglichkeiten der Dieseldieselkraftstoffverbesserung klar zu erkennen. Dazu ist es notwendig, den Einfluß der Zündbeschleuniger sowohl auf die Zündwilligkeit als auch auf die Verkokungsneigung, auf den Angriff gegenüber Metallen und auf die Lagerbeständigkeit der Kraftstoffe zu verfolgen.

Als Zündbeschleuniger vorgeschlagene Zusatzstoffe

Zur Verbesserung der Zündwilligkeit von Dieseldieselkraftstoffen wurden im wesentlichen die folgenden Stoffe und Stoffgemische, deren Anwendung größtenteils durch Patente geschützt ist, angegeben:

2 bis 4 Kohlenstoffatome enthaltende Alkylnitrate wie Äthylnitrat und Butylnitrat 1) +),

Mono- oder Polyalkylnitrate u.a. die Salpetersäureester des normalen primären Amyl-, des primären Isoamyl-, des sekundären Butyl-, des Dimethyläthyl- und des tertiären Butyl-Karbinols 2),

0,5 bis 5 % einer Mischung von Alkylnitrat oder -nitrat, z.B. Äthyl-, Propyl- oder Butylnitrat mit Butylbromid 3),

1 bis 5 % Salpetersäureester aliphatischer Alkohole mit verzweigter Kohlenstoffkette, wie Isobutylnitrat oder Nitrierungsprodukte der über 160° siedenden Anteile der durch Drucksynthese aus Kohlenoxyd und Wasserstoff gewonnenen Alkohole 4),

2 % eines 2 bis 4 Kohlenstoffatome enthaltenden Alkylnitrates und 0,1 bis 0,5 % einer organischen Bromverbindung, z. B. Benzyl- oder Cyclohexylbromid, gegebenenfalls unter Zusatz einer organischen Sauerstoff enthaltenden Kupferverbindung, wie Kupferoleat oder -stearat 5),

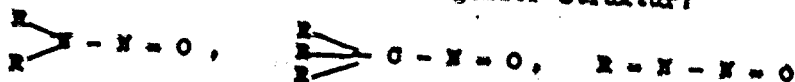
Polynitrate mehrwertiger Alkohole, die Löslichkeitserhöhende Gruppen enthalten, wie 1,2 - Propylen- (Butylen-, Amylen-) glykoldinitrat, 1,3 - Butylenglykoldinitrat, Dimethylmethyloimethandinitrat und Nitromethyldimethylol 6),

geringe Mengen von Nitroprodukten aliphatischer oder hydroaromatischer Kohlenwasserstoffe, die nicht ausgesprochen Explosivstoffe sind. Nitroprodukte von Gemischen solcher Kohlenwasserstoffe, z.B. aus Benzinen 7),

+) Die Zahlenangaben beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluß der Arbeit.

0,5 bis 1 % organischer Verbindungen, die an zwei benachbarten Kohlenstoffatomen ein Halogen und eine Nitratgruppe enthalten, beispielsweise 9,10 - Bromstearinsäurenitrat 8),

0,5 bis 5 % Glykolphlorhydrin- oder Glykolphosphorhydrinnitrat 9), geringe Mengen von Nitroso-Verbindungen folgender Struktur:



z.B. Nitrosodimethylanilin, Nitrosodiisopropylamin, Nitrosovinylmethylamin, Trimethylnitrosomethan, Piperidin, Pyrrolidin und Carbazol 10),

1 bis 5 % einer nicht explosiven aliphatischen Nitrosoverbindung, wie Nitroso-N-Methylurethan 11),

Zusatz von Alkohol zu ammoniakhaltigen Kraftstoffen gegebenenfalls unter Zugabe von Explosivstoffen, wie Propylnitrat oder von Stoffen wie Tetralin, Dekalin oder höheren Alkoholen 12),

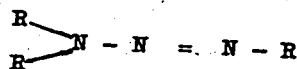
man sättigt Methylalkohol oder ein Gemisch desselben mit Phenol, Kresol und ähnlichen Verbindungen mit gasförmigem Ammoniak, gegebenenfalls setzt man noch etwas Äther oder Acetylen zu 13),

metallorganische Verbindungen unter Zugabe stickstoffhaltiger organischer Stoffe, wie Anilin oder Nitrophenol 14),

0,5 bis 5 % einer organischen Verbindung der Metalle der 2. und 5. Gruppe des periodischen Systems. Eine besonders starke Wirkung wird Quecksilberalkylnitrat, Bariumdiphenylaminsulfonat und Tributylantimon zugeschrieben 15),

0,01 bis 1 % freien Schwefels oder an Phosphor oder an eine Aminogruppe gebundenen Schwefels, z.B. in Form von $P_4 S_3$ oder $S_6 N_2$ 16),

1 bis 5 % mindestens einen Arylkern enthaltenden Triazens



z.B. Diphenyltriazen, 4-Chlor-4-methyldiphenyltriazen und Phenyldiamyltriazen 17),

0,5 bis 5 % Diazoaminobenzol 18),

0,5 bis 1 % eines substituierten Pentazdiens (Bisaryldiazoamin,

$R - N = N - \begin{array}{c} R'' \\ | \\ N \end{array} - N = N - R'$) wie 3-Methyl-1,5-diphenyl-pentazdien 19),

Zusatz von zwei Zündstoffen verschiedener Struktur, von denen einer, z.B. Methyl- oder Äthylnitrat, eine niedrige Entzündungstemperatur und der andere, z.B. organische Peroxyde, eine hohe Entzündungstemperatur besitzt 20),

Tetralinperoxyd 21),

organische Peroxyde wie Acetonperoxyd ohne und mit Zusatz von Stoffen, die die Güte der Kraftstoffe zu verbessern vermögen 22),

1 bis 5 % eines Ketonperoxyds mit 5 bis 6 Kohlenstoffatomen, z.B. Methyläthylketon- und Diäthylketonperoxyd 23),

1 bis 5 % eines aliphatischen Oxims, beispielsweise Formaldoxim, Acetaldoxim, Heptaldoxim, Acroleinoxim, Cyclopentanonoxim, Dimethylglyoxim, Propandion-1,3-dioxim und Pentandion-1,3-dioxim 24),

1 bis 5 % eines aliphatischen oder aromatischen Diketons 25),

Antoxydable Stoffe: Aldehyde, Chinone, Holzsteere und deren Destillate, fette Öle und ätherische Öle 26),

Steinkohlenteeröle, die einer teilweisen Oxydation mittels Luft oder mittels Wasserdampf und Oxydationskatalysatoren unterworfen wurden 26),

Öllösliche Oxydationskatalysatoren, wie die fettsauren, leinölsauren, harzsauren oder borsauren Salze des Bleis 26),

Furfurol 27),

etwa 5 % einer stark ungesättigten Verbindung wie Allylen, Diacetylen, Allen oder Butadien 28),

1 bis 5 % eines Stoffes, den man durch Erhitzen eines Terpens oder eines vorwiegend aus Terpenen bestehenden Produktes, z.B. Kienöl, zusammen mit Schwefel erhält 29),

0,2 bis 5 % Chlorpikrin 30),

etwa 1 % organischer Tetrasulfide, wie Diäthyl-, Diphenyl-, Dinitrodiäthyl- und Dianisoltetrasulfid 31),

0,22 % Schwefelstickstoff $N_2 S_4$ 32)

und 0,4 bis 5 % Diäthyldisulfid, Diglycoldisulfid, Diphenyl-disulfid oder ähnliche Verbindungen 33),

In einer Anzahl von Arbeiten wird auf die Brauchbarkeit bestimmter Stoffe als Zündzusätze hingewiesen. Aubert u.a. 34) stellten z.B. fest, daß man den Zündverzug im Dieselmotor verkürzen kann, wenn man ein Äthylnitrat-Gasöl-Gemisch mittels einer zweiten Einspritzvorrichtung von dem Dieselkraftstoff gesondert entweder gleichzeitig oder kurz danach einspritzt. Der Äthylnitrat-Zusatz bewirkte zudem eine weichere Verbrennung; die Motorleistung wurde heraufgesetzt.

Ramaja 35) u.a. geben an, daß sich zur Erniedrigung des Zündpunktes der Traktorkraftstoffe am besten Äthylnitrat eignet. Andere Zusätze kleiner Mengen von Stoffen mit höherem Zündpunkt als Gasöl erniedrigten den Zündpunkt von Gasölen, besonders in

Luftatmosphäre. Z. B. wurde der Flammpunkt eines Gasöles durch Zusatz von 10 % Ricinusöl von 116° auf 200° herabgesetzt.

Die durch Tetralinperoxyd, Acetylperoxyd und Äthylnitrat hervorgerufene Erhöhung der Zündwilligkeit wurde von Hubner und Erlhoff 36) in Abhängigkeit von der Zusatzmenge verfolgt. Je nach der angewandten Prüfmethode wurden verschiedene große Verbesserungen der Zündwilligkeit erzielt, die beispielsweise bei 0,4 %igen Zusatz von Acetonperoxyd zwischen 7 und 14 Cetenzahleinheiten schwankten. Bei Verwendung von Äthylnitrat als Zündzusatz in Mengen von 1 bis 5 % ergaben sich noch größere Unterschiede des Ansprechvermögens auf verschiedene Motorprüfweisen.

Schmidt und Mohry 37) stellten Untersuchungen über die Beeinflussung der Verbrennungsvorgänge im Dieselmotor durch Zusatz organischer Peroxyde an. Sie kamen zu dem Ergebnis, daß die Wirkung der Peroxydzusätze sowohl von der Struktur der Peroxyde als auch von der chemischen Zusammensetzung der Kraftstoffe abhängt. Das beste Verhalten zeigen die einfachen Dialkylperoxyde wie Dimethyl- und Diäthylperoxyd. Mit zunehmender Molekülgröße und mit der Einführung von Oxygruppen nimmt die motorische Wirksamkeit ab. Aromatisch-aliphatische Peroxyde eignen sich besser als rein aromatische. Von den Hydroperoxyden erwies sich nur das Tetralinperoxyd als brauchbar; die durch Tetralinperoxyd hervorgerufene Verkürzung des Zündverzuges ist jedoch gering.

Auf diesen Versuchsergebnissen aufbauend wurden weitere Untersuchungen im Braunkohleninstitut Berlin vorgenommen.

Die in die Eignungsprüfungen einbezogenen Kraftstoffe und Zündbeschleuniger

Da der Einfluß der Zusätze auf die Eigenschaften der Kraftstoffe wie Zündwilligkeit, Lagerbeständigkeit, Korrosions- und Verkokungsneigung verschieden ist, wurden die anzustellenden Untersuchungen an mehreren für die deutsche Kraftstoff-Industrie wichtigen Kraftstoffarten vorgenommen, und zwar an:

- Nr. 1 Erdölspaltdestillat
- Nr. 2 Braunkohlenteerdestillat
- Nr. 3 Braunkohlenteerdestillat, gemischt mit Braunkohlenteer-Spaltdestillat
- Nr. 4 Steinkohlenschwelteer-Destillat
- Nr. 5 Steinkohlen-Hochtemperaturteer-Destillat

Da es praktisch unmöglich ist, die außerordentlich große Zahl der vorgeschlagenen Zündzusätze einzeln zu erproben, mußte eine Auswahl unter ihnen getroffen werden. Eine Vereinfachung der anzustellenden Prüfungen ergibt sich aber daraus, daß die als Zündbeschleuniger angegebenen durchweg organischen Stoffe größtenteils in bestimmten Gruppen zusammengefaßt werden können. Zu den wichtigsten Gruppen gehören:

Die Kraftstoffe sind durch folgende Analysenwerte gekennzeichnet:

Zahlentafel 1

Eigenschaften der angewandten Dieselmotorkraftstoffe

	Kraftstoff Nr.				
	1	2	3	4	5
Spez. Gewicht bei 20°	0.888	0.880	0.883	1.045	1.060
Stockpunkt in °C	- 42	- 8	- 8	- 18	- 29
Schwefelgehalt in Gew.-%	0.58	0.63	0.54	0.87	0.54
Flammpunkt i.o.T. in °C	92	85	88	134	105
Conradsonwert in Gew.-%	0.110	0.180	0.146	0.745	0.984
Kreosotgehalt (Diffmeth.), Vol.-%	0	0.5	1	16	7
Korrosionsangriff auf Zink, Gew.-Verlust in mg/16 cm ² Oberfl.	0.3	0.8	0.7	3.7	2.8
Cetanzahl (H.W.A.-Motor)	37	39	40	zündet nicht	
Siedeverlauf nach Engler:					
Siedebeginn, °C	220	154	176	232	207
5 Vol.-% destillieren bei °C	225	190	200	249	220
15 " " " "	229	214	223	266	230
25 " " " "	232	232	240	282	236
35 " " " "	235	247	256	295	246
45 " " " "	238	260	268	313	257
55 " " " "	241	274	280	333	274
65 " " " "	246	286	291	350	296
75 " " " "	252	299	305	364	323
85 " " " "	260	318	321	386	350
95 " " " "	283	348	349	424	395
Siedekennziffer	244	267	273	326	283

000804

Alkylnitrate, -nitrite, -peroxyde, -nitratthalogene, -bromide, Nitroverbindungen, Nitrosamine, Polysulfide, Aldehyde, Ketone, Oxime, Chinone, öllöslliche Oxydationskatalysatoren und ungesättigte Kohlenwasserstoffe.

Vertreter dieser Stoffgruppen wurden in die bisher angestellten Eignungsprüfungen einbezogen. Im einzelnen wurde die Wirksamkeit folgender Stoffe überprüft: +)

- Äthylnitrat, Amylnitrat,
- Amylnitrit, Äthylenchlorhydrinnitrat,
- Tetralinperoxyd, Benzoylperoxyd,
- Nitroso - M - methylurethan, Nitrosodimethylanilin-para,
- Chlordinitrobenzol, Trinitrotoluol,
- Diäthyltetrasulfid, Benzoylaceton,
- Cyclohexanonoxim, Diacetyldioxim,
- harzsaures Blei, Kupferstearat,
- Butylbromid, Benzylbromid,
- Dipenten (Limonen) und Terpen.

Es ist anzunehmen, daß andere als die genannten Vertreter der Stoffgruppen eine ähnliche Wirkung wie diese hervorrufen werden.

Einwirkung von Zusätzen verschiedener Struktur auf die Zündwilligkeit von Dieselkraftstoffen

Die genannten Zusätze wurden entsprechend den Vorschlägen des Schrifttums einzeln und in bestimmten Mischungen den Dieselkraftstoffen zugesetzt. Die Cetanzahl der Gemische wurde im H.W.A.-Prüfmotor gemessen. Um auch den Einfluß der Lagerung auf die Wirksamkeit der Zusätze festzustellen, wurden die Cetanwerte nicht nur unmittelbar nach dem Zusatz, sondern auch nach 6-monatiger Lagerung der mit Zusätzen versetzten Kraftstoffe ermittelt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Zahlentafeln 2 bis 4 zusammengestellt, und zwar sind die unmittelbar nach der Zugabe der "dope"-Stoffe gemessenen Cetanwerte jeweils im ersten Teil der Zahlentafeln wiedergegeben. Die Cetanzahlen der Kraftstoffe mit Zusätzen von Diacetyldioxim und von harzsaurem Blei wurden nicht gemessen, da

+ Die Zusatzstoffe wurden mit Ausnahme von Tetralinperoxyd von Heyl & Co., Berlin, bezogen. Das Tetralinperoxyd wurde von Herrn Prof. Dr. Hock, Clausthal, zur Verfügung gestellt, dem wir auch an dieser Stelle für sein freundliches Entgegenkommen danken.

Zahlentafel 2

Cetanwerte des Kraftstoffes 3 (Cetanzahl 40) nach dem Zusatz von Zündbeschleunigern

Zündbeschleuniger	unmittelbar nach dem Zusatz					nach 6-monatiger Lagerung						
	Zugesetzte Menge in Gew.-%					Zugesetzte Menge in Gew.-%						
	0,5	1	1,5	2	3	5	0,5	1	1,5	2	3	5
Amylnitrat	46,5	49,0	53,0	58,0	67,0	82,0	47,0	49,0	53,5	58,0	68,0	81,5
Amylnitrat + 0,1 % Butylbromid	46,5	50,0	53,5	61,5	-	-	46,5	51,0	53,5	62,0	-	-
Amylnitrit	41,0	43,0	45,0	48,5	54,5	64,0	41,5	43,0	45,0	49,0	55,0	64,5
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid	42,0	44,0	46,0	48,5	52,5	66,0	43,0	44,5	46,0	48,0	53,0	64,5
Äthylnitrat	46,0	50,0	54,0	57,0	-	-	46,0	51,0	53,5	57,0	-	-
Äthylnitrat + 0,1 Benzylbromid	45,5	50,0	53,0	57,0	-	-	45,0	50,0	53,0	58,0	-	-
Äthylnitrat + 0,1 Butylbromid + Cu-Stearat	46,5	50,0	54,0	58,0	-	-	46,5	50,0	54,5	58,0	-	-
Tetralinperoxyd	42,0	42,0	42,5	48,0	52,0	-	42,0	42,5	42,5	48,0	52,5	-
Äthylenchlorhydrinnitrat	-	51,0	-	57,5	-	-	-	51,0	-	57,0	-	-
Nitrosomethylurethan	-	49,5	-	56,0	-	-	-	49,0	-	56,5	-	-
Diäthyltetrasulfid	-	48,5	-	54,0	-	-	-	48,5	-	54,0	-	-
Chlordinitrobenzol	-	40,0	-	40,5	-	-	-	40,0	-	41,0	-	-
Trinitrotoluol	-	39,5	-	41,5	-	-	-	39,0	-	41,0	-	-
Benzoylaceton	-	40,5	-	41,5	-	-	-	39,5	-	41,5	-	-
Cyclohexanonoxim	-	40,0	-	41,5	-	-	-	40,0	-	41,5	-	-
Nitrosodimethylanilin	-	39,0	-	41,0	-	-	-	39,0	-	42,0	-	-
Dipenten (Limonen)	-	41,0	-	41,5	-	-	-	41,0	-	41,5	-	-
Terpen	-	40,0	-	41,5	-	-	-	40,0	-	42,0	-	-
Amylnitrat + 1 % Butylbromid	-	-	-	60,0	-	-	-	-	-	60,0	-	-
Amylnitrat + 2 % Butylbromid	-	-	-	-	66,0	-	-	-	-	-	67,0	-

Zahlentafel 3

Cetanwerte des Kraftstoffes 1 (Cetanzahl 37) nach dem Zusatz von Zündbeschleunigern

Zündbeschleuniger	unmittelbar nach dem Zusatz					nach 6-monatiger Lagerung						
	Zugesetzte Menge in Gew.-%					Zugesetzte Menge in Gew.-%						
	0,5	1	1,5	2	3	5	0,5	1	1,5	2	3	5
Amylnitrat	41,5	45,0	47,0	52,0	59,0	72,5	41,0	45,0	46,0	52,5	59,0	72,0
Amylnitrat + 0,1 % Butylbromid	41,0	44,0	48,0	50,0	-	-	41,0	43,5	48,0	50,5	-	-
Amylnitrat + 1 % Tetralinperoxyd	-	-	-	56,5	-	-	-	-	-	57,0	-	-
Amylnitrit	38,0	38,5	40,0	41,0	57,0	72,0	38,0	38,5	40,5	41,0	57,5	72,0
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid	38,0	39,0	40,0	41,0	54,5	-	38,0	39,0	40,5	42,0	54,0	-
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid + Cu-Stearat	38,0	39,0	40,5	41,0	54,0	-	38,5	39,0	40,0	41,5	54,5	-
Äthylnitrat	40,0	43,0	47,0	49,0	-	-	40,0	43,0	47,5	49,5	-	-
Äthylnitrat + 0,1 % Benzylbromid	40,0	43,5	46,5	49,5	-	-	40,0	43,0	46,0	50,0	-	-
Tetralinperoxyd	38,5	40,5	42,5	45,0	49,0	-	38,5	40,0	41,5	45,0	49,5	-
Äthylenchlorhydrinnitrat	-	44,0	-	50,0	-	-	-	44,0	-	51,0	-	-
Nitrosomethylurethan	-	44,0	-	48,0	-	-	-	44,0	-	48,0	-	-
Diäthyltetrasulfid	-	44,0	-	49,5	-	-	-	44,0	-	49,0	-	-
Chlordinitrobenzol	-	37,0	-	38,5	-	-	-	37,0	-	39,0	-	-
Trinitrotoluol	-	37,0	-	37,0	-	-	-	37,0	-	38,0	-	-
Benzoylacetone	-	37,5	-	38,0	-	-	-	37,5	-	38,0	-	-
Cyclohexanonoxim	-	38,5	-	38,5	-	-	-	38,5	-	39,0	-	-
Nitrosodimethylanilin	-	37,5	-	38,0	-	-	-	37,5	-	38,0	-	-
Dipenten (Limonen)	-	36,5	-	38,0	-	-	-	38,0	-	38,0	-	-
Terpen	-	37,0	-	37,0	-	-	-	37,0	-	37,5	-	-
Amylnitrat + 1 % Butylbromid	-	-	-	52,5	-	-	-	37,0	-	37,5	-	-
Amylnitrat + 2 % Butylbromid	-	-	-	-	60,0	-	-	-	-	52,0	-	61,0

000805

Zahlentafel 4

Cetanwerte des Kraftstoffes 2 (Cetanzahl 39) nach dem Zusatz von Zündbeschleunigern

Zündbeschleuniger	unmittelbar nach dem Zusatz					nach 6-monatiger Lagerung						
	Zugesetzte Menge in Gew.-%					Zugesetzte Menge in Gew.-%						
	0,5	1	1,5	2	3	5	0,5	1	1,5	2	3	5
Amylnitrat	47,5	51,0	55,5	59,5	67,0	82,5	47,5	52,0	55,0	59,0	67,5	83,0
Amylnitrat + 0,1 % Butylbromid	47,5	52,0	57,0	61,5	-	-	47,5	53,0	57,0	62,0	-	-
Amylnitrat + Cu-Stearat	47,5	51,5	56,0	60,0	-	-	47,0	52,0	55,5	61,0	-	-
Amylnitrat + 1 % Tetralinperoxyd	-	-	-	63,0	-	-	-	-	-	63,5	-	-
Amylnitrit	41,0	43,0	45,5	48,5	55,5	67,5	41,0	43,0	45,0	49,0	56,0	67,5
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid	42,0	43,0	44,0	50,0	57,0	-	42,0	43,0	44,0	51,0	57,5	-
Äthylnitrat	46,5	50,5	55,0	58,0	-	-	46,5	51,0	55,0	58,5	-	-
Äthylnitrat + 0,1 % Benzylbromid	46,5	50,0	54,0	57,5	-	-	46,5	50,0	54,0	57,5	-	-
Tetralinperoxyd	42,0	42,0	42,5	47,5	51,0	-	42,0	42,0	42,5	47,0	50,0	-
Äthylenchlorhydrinnitrat	-	49,5	-	56,0	-	-	-	49,5	-	56,5	-	-
Nitrosomethylurathan	-	48,5	-	55,0	-	-	-	48,5	-	55,0	-	-
Diäthyltetrasulfid	-	47,0	-	52,5	-	-	-	47,0	-	53,0	-	-
Chlordinitrobenzol	-	40,0	-	40,0	-	-	-	40,0	-	40,5	-	-
Trinitrotoluol	-	39,0	-	39,0	-	-	-	38,0	-	39,0	-	-
Benzoylacetone	-	40,0	-	41,0	-	-	-	40,0	-	42,0	-	-
Cyclohexanonoxim	-	40,0	-	41,0	-	-	-	40,0	-	42,0	-	-
Nitrosodimethylanilin	-	40,0	-	39,5	-	-	-	40,0	-	39,5	-	-
Dipenten (Limonen)	-	39,0	-	39,5	-	-	-	39,0	-	40,0	-	-
Terpen	-	40,0	-	41,0	-	-	-	40,0	-	42,0	-	-
Amylnitrat + 1 % Butylbromid	-	-	-	59,0	-	-	-	40,0	-	42,0	-	-
Amylnitrat + 2 % Butylbromid	-	-	-	-	66,5	-	-	-	-	60,0	-	66,0

9

diese Stoffe in den Kraftstoffen praktisch unlöslich waren. Kupferstearat war in den Kraftstoffen sehr wenig löslich. Die zugesetzte Menge entsprach jeweils dem Sättigungsgrad. Benzoylperoxyd löste sich in merklichen Mengen nur in den Steinkohlenteerdestillaten. Seine Wirksamkeit wurde deshalb nur im Gemisch mit diesem untersucht. Aus den Zahlentafeln 2 - 4 ist ersichtlich:

Als wirksamste Zündbeschleuniger sind die Nitrate anzusehen. Die Steigerung der Cetanzahl ist dem Zusatz annähernd proportional (Abb. 1 und 2). Die Braunkohlenteerdestillate 2 und 3 sprechen etwas besser als das Erdölspaltdestillat 1 an. Durch 2 % Amylnitrat wird z. B. die Cetanzahl des Braunkohlenteerdestillates 2 von 39 auf 58, die des Spaltdestillates 1 von 37 auf 52 erhöht. 5 %iger Zusatz von Amylnitrat bewirkt eine Cetanzahlsteigerung des Braunkohlenteerdestillates 2 um 44 Einheiten auf 83 und des Spaltdestillates um 35,5 Einheiten auf 72,5. Eine weitere Verbesserung durch Zugabe von Butylbromid als Aktivator wurde weder bei Amylnitrat noch bei Acethylnitrat erzielt. Mit und ohne Zusatz von Butylbromid erhält man in engen Grenzen dieselben Abhängigkeiten. Die Braunkohlenteerdestillate 2 und 3 zeigen untereinander ein ziemlich gleichmäßiges Verhalten gegenüber den Zündstoffen, obwohl das Destillat 3 ein Gemisch aus Braunkohlenteerdestillat und Spaltprodukt darstellt. Scheinbar sprechen die Inhaltsstoffe von Braunkohlenteerzeugnissen verhältnismäßig unabhängig von der Vorbehandlung in etwa gleicher Weise auf Zündbeschleuniger an.

Kupferstearatzusätze rufen ebenso wie solche von Butylbromid keine zusätzliche Erhöhung der Zündwilligkeit hervor (Abb. 3). Die mit diesem Stoff ohne und mit Zugabe von Butylbromid hervorgerufene Verbesserung der mit Nitraten gedopten Kraftstoffe deckt sich praktisch mit den ohne diese Zusätze gewonnenen.

Eine eigentümliche Wirkung zeigt Tetralinperoxyd auf die Braunkohlenteerdestillate 2 und 3, bei denen die Steigerung der Zusatzmenge von 0,5 auf 1,5 % praktisch keine Cetanzahlerhöhung mit sich bringt (Abb. 4). Erst nach weiterer Zugabe von Tetralinperoxyd tritt eine erneute Wirkung hervor. Dieselbe Erscheinung wurde bei den Gemischen, denen Amylnitrat zugesetzt war, beobachtet (Abb. 5). Amylnitritzusätze von 2 Gew.-% zu Kraftstoff 1 und bis zu 1,5 Gew.-% zu Kraftstoff 2 wirken sich auf die Cetanzahl der Kraftstoffe nur wenig aus. Erst nach Zugabe weiterer Nitritmengen stiegen die Cetanzahlen auf die zu erwartenden Werte an.

Diese Befunde finden dadurch eine einfache Erklärung, daß kurze Zeit nach dem Zusatz von Tetralinperoxyd oder Amylnitrit eine Fällung von Niederschlag stattfand. Bei dem letzteren trat gleichzeitig Gasentwicklung ein. Der Abfall der zündbeschleunigenden Wirkung ist also eindeutig auf eine chemische Umsetzung des Peroxyds und des Amylnitrits mit reaktionsfähigen Inhaltsstoffen der Kraftstoffe zurückzuführen. Die dabei verbrauchten Peroxyd- oder Nitritmengen gehen der Wirkung als Zündbeschleuniger verloren. Die Niederschlagsmengen betragen bei Zusatz von 2 Gew.-% Tetralinperoxyd bzw. Amylnitrit zu Kraftstoff 2 0,246 bzw. 0,225 Gew.-%. Zur Verhütung von Störungen wurden die Niederschläge vor der analytischen und motorischen Prüfung der Gemische abfiltriert.

Eine brauchbare Cetanzahlzunahme wird auch durch Zusätze von Nitrosomethylurethan, Äthylchlorhydrinnitrat und Diäthyltetra-

Zahlentafel 5

Erhöhung der Zündwilligkeit (Cetanzahl) eines Steinkohlenteer-Kraftstoffes durch Zündbeschleuniger

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%				
	0,5	1	2	3	4
Amylnitrit + 0,3 % Butylbromid				+	
Äthylnitrat				20,5	26,5
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid		+			27,5
Äthylnitrat + 0,3 % Benzylbromid		+			
Äthylnitrat + 0,1 % Cu-Stearat		+			
Äthylnitrat + 0,1 % Cu-Stearat + 0,1 % Butylbromid		+			
Amylnitrat		+	20,5	24	
Äthylchlorhydrinnitrat		+			
Tetralinperoxyd	+	+	+		
Benzoylperoxyd		+			
Trinitrotoluol		+			
Cyklohexanoxim				+	
Nitrosodimethylanilin	+	+			

+) Zündet nicht

sulfid erreicht (Abb. 6). Auch hier ist die Wirkung auf den Zündverzöger der Braunkohlenteerdestillate 2 und 3 stärker als die auf das Kracköl 1. Mit zunehmender Konzentration der Zündbeschleuniger scheint die je % erzielte Verbesserung abzunehmen.

Zahlentafeln 5 und 6

Die Zündwilligkeit der Steinkohlenteerdestillate 4 und 5 ist so niedrig, daß ihre Cetanzahl nach 1 %igem Zusatz irgend eines der verwendeten Zündbeschleuniger noch unter der Grenze des Meßbereiches im H.W.A.-Prüfmotor liegt. Erst wenn man 2 bis 5 % Alkylnitrat zugibt, mißt man bei dem untersuchten Schwelteer-Destillat Cetanzahlen zwischen 18 und 27,5. Nach 5 %igem Zusatz von Äthylnitrat stieg die Cetanzahl des Hochtemperaturteer-Destillates bis auf 22. In diesem Falle würden anstelle von Cetanzahlen angegeben, weil die Eichkurve für die ersteren nicht bis zu so tiefen Werten festlag. Der Unterschied zwischen Cetanzahl und Cetanzahl beträgt im genannten Bereich etwa 2 bis 3 Einheiten. Die heute für Kraftstoffe von Fahrzeugdieselmotoren geforderte hohe Zündwilligkeit mit einer Cetanzahl von mindestens 50 wird

Zahlentafel 6

Erhöhung der Zündwilligkeit (Cetanzahl) eines Steinkohlent-
Rechttemperatur-Öles durch Zündbeschleuniger

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%					
	0,5	1	2	3	4	5
Äthylnitrat						
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid		+))	+))	+))	18	22
Äthylnitrat + 0,3 % Benzylbromid		+))				
Äthylnitrat + 0,1 % Cu-Stearat		+))				
Äthylnitrat + 0,1 % Cu-Stearat + 0,1 % Butylbromid		+))				
Amylnitrat		+))				
Amylnitrit + 0,3 % Butylbromid		+))		+))		
Äthylenchlorhydrinnitrat		+))				
Tetralinperoxyd		+))				
Benzoylperoxyd		+))				
Trinitrotoluol		+))				
Nitrosodimethylanilin	+))			+))		

+) Zündet nicht

also selbst bei Zugabe von 5 Gew.-% der Zündzusätze bei weitem nicht erreicht. Von weiteren Versuchen mit höheren Zusätzen anderer Zündstoffe wurde abgesehen, weil bei der Zündwilligkeitsbestimmung solcher Gemische eine so starke Verkokung des Motors eintrat, daß nach jeder Messung eine Reinigung vorgenommen werden mußte. Demnach besteht nur geringe Aussicht, durch die bisher vorgeschlagenen Zündstoffe Steinkohlenteeröle für den schnelllaufenden Dieselmotor nutzbar zu machen. Eine Ausnahme bilden vornehmlich die nach der Entphenolierungsweise von Hansen hergestellten Dieselmotorstoffe aus der Heizflächenschwelung von Steinkohlen, die für sich bereits Cetanzahlen um 30 besitzen. Eine Anzahl der geprüften Zusatzstoffe, nämlich Chlordinitrobenzol, Trinitrotoluol, Benzoylacetone, Cyclohexanonoxim, Nitrosodimethylanilin, Dipenten und Terpen, übten im Gegensatz zu den bisher genannten keinen Einfluß auf die Zündwilligkeit der Kraftstoffe aus. Die Cetanzahlen der reinen Kraftstoffe 1 bis 3 von 37, 39 und 40 werden praktisch nicht verändert (vergl. die Zahlentafeln 2 - 4).

Einfluß der Zusätze auf andere Eigenschaften als auf die Zündwilligkeit

1. Auf die Verkokungseignung

Zündbeschleuniger wirken, wie schon die beschriebenen Versuche mit Steinkohlenteerölen zeigen, nicht nur auf das Zündverhalten, sondern auch auf die Verkokungseignung der Kraftstoffe ein. Es ist deshalb zweckmäßig, diesen Einfluß ebenfalls einer Prüfung zu unterziehen.

Die Verkokungseignung von Dieselmotorstoffen wird laboratoriumsmäßig entweder durch Ermittlung des Asphaltgehaltes oder durch unmittelbare Verkokung in besonderen Apparaten gemessen. Der Gehalt an Hartasphalt wird nach DIN DVM 3660 bestimmt.

Zur Ermittlung der Verkokungseignung werden verschiedene Prüfarten angewandt. Bei den Verkokungstesten nach Conradson, Jentsch, Muck und Ramsbottom werden die flüchtigen Anteile der zu prüfenden Kraftstoffe unter Zurücklassung eines koksähnlichen Rückstandes völlig abgetrieben, der Rückstand wird in Gew.-% angegeben.

Um den im Motor herrschenden Bedingungen näherzukommen, führen Hagemann und Hammerich die Verkokung der Dieselmotorstoffe unter einem Preßluftdruck von 20 atü bei 155° durch. Die Verkokungsbedingungen werden dadurch den an der Einspritzdüse geltenden Verhältnissen angeglichen. Nach zweistündiger Erhitzung wird der durch Normalbenzin fällbare Anteil in Gew.-% ermittelt. Nach einem Vorschlag von Weber wird der nach Hagemann-Hammerich behandelte Kraftstoff weiter unter den von Conradson aufgestellten Bedingungen verkocht oder erst einem Schwelprozeß bei 450° unterworfen und dann nach Conradson behandelt.

Nach der amerikanischen ASTM-Methode werden von dem Kraftstoff zunächst 90 % abdestilliert; der Rest wird nach Conradson verkocht.

Die praktische Erprobung der Methoden zur Prüfung der Verkokungseigenschaften von Dieselmotorstoffen auf Grund motorischer Vergleichsversuche ist noch nicht abgeschlossen. Schmidt und Kneule³⁸⁾ neigen zu der Ansicht, daß die unmittelbar nach Conradson ermittelten Laboratoriumswerte in den meisten Fällen für die Praxis brauchbar sind. Deshalb und wegen der Einfachheit der Arbeitsweise wurde der Einfluß der Zusätze auf die Verkokungseignung durch Bestimmung der Conradson-Werte unter genormten Bedingungen ermittelt. Diese Untersuchungen wurden jedoch nur nach Zusatz derjenigen Stoffe angestellt, die eine wesentliche Steigerung der Cetanzahl hervorrufen.

Die Einwirkung von Amylnitrat, Amylnitrit und Tetralinperoxyd auf das Verkokungsverhalten nach Conradson wurde an den Kraftstoffen 1 bis 3 überprüft (Zahlentafeln 7 bis 9, Abb. 7 bis 9). Der Einfluß der übrigen als wirksam erkannten Zusätze wurde nur jeweils an einem Kraftstoff ermittelt. Von den mit den Kraftstoffen 4 und 5 angesetzten Gemischen wurde nur ein Teil der mit Äthylnitrat versetzten verkocht.

Zahlentafel 7

Conradson-Werte von Kraftstoff 1
nach Zusatz verschiedener Zündbeschleuniger

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%			
	0,5	1	1,5	2
Tetralinperoxyd	0,124	0,130	0,158	0,236
Äthylnitrat	0,213	0,271	0,372	0,456
Äthylnitrat + 0,1 % Benzylbromid	0,218	0,283	0,344	0,461
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid + Cu-Stearat	0,215	0,280	0,382	0,467
Äthylnitrat + Cu-Stearat	0,289	0,318	0,375	0,476
Amylnitrat	0,218	0,326	0,379	0,480
Amylnitrat + 0,1 % Butylbromid	0,232	0,271	0,355	0,409
Amylnitrit	0,268	0,442	0,655	1,004
Amylnitrit + 0,1 % Benzylbromid	0,287	0,487	0,762	1,239
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid + Cu-Stearat	0,363	0,484	0,662	0,892
Amylnitrat + 1 % Tetralinperoxyd	0,252	0,380	0,483	0,694
Äthylenchlorhydrinnitrat	0,348	0,446	0,636	0,828
Nitrosomethylurethan	0,237	0,268	0,283	0,300
Diäthyltetrasulfid	0,362	0,494	0,618	0,783

Grundsätzlich tritt bei allen Kraftstoffen durch den Zusatz eine Erhöhung der Verkokungsneigung nach Conradson ein, die mit der zugegebenen Zündstoffmenge meist annähernd proportional ansteigt. Die Steigerungen sind für jeden Zündbeschleuniger bei allen Kraftstoffen nahezu gleich.

Die Wirkung verschiedener Stoffe auf denselben Kraftstoff ist jedoch sehr unterschiedlich. Die bei weitem geringste Zunahme der Conradson-Werte verursacht Tetralinperoxyd. Die in Abhängigkeit von der Zusatzmenge aufgetragenen Conradson-Werte ergeben in diesem Falle bis zu Zusätzen von 1,5 Gew.-% eine flach verlaufende Kurve oder Linie. Diese geringe Erhöhung bei niedrigen Zusätzen ist sicherlich zum Teil auf den Verbrauch des Tetralinperoxyds durch die erwähnte chemische Umsetzung zurückzuführen. Trotzdem zeigt der Gesamtverlauf der Kurven, daß die Verkokungsneigung nach Conradson durch Tetralinperoxydzusätze nur wenig zunimmt. Eine außerordentlich starke Erhöhung der Conradson-Verkokung verursachen das Nitrit, Tetrasulfid und Äthylenchlorhydrinnitrat.

Zahlentafel 8

Conradson-Werte von Kraftstoff 2
nach Zusatz verschiedener Zündbeschleuniger

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%			
	0,5	1	1,5	2
Tetralinperoxyd	0,210	0,231	0,251	0,276
Äthylnitrat	0,208	0,230	0,367	0,391
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid	0,221	0,238	0,380	0,412
Äthylnitrat + 0,1 % Benzylbromid + Cu-Stearat	0,217	0,341	0,383	0,415
Amylnitrat	0,220	0,318	0,381	0,464
Amylnitrat + 0,1 % Benzylbromid	0,227	0,243	0,414	0,427
Amylnitrit	0,247	0,380	0,478	0,692
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid	0,290	0,407	0,442	0,534
Äthylenchlorhydrinnitrat	0,307	0,418	0,472	0,670
Nitrosomethylurethan	0,217	0,240	0,374	0,406
Diäthyltetrasulfid	0,238	0,280	0,431	0,613

Für Gemische aus Steinkohlenteerölen mit Äthylnitrat wurden die folgenden Conradson-Werte gemessen:

Kraftstoffart	Äthylnitratzusatz in Gew.-%				
	0	2	3	4	5
Steinkohlenschwelter-Destillat	0,745	1,71	1,93	2,16	2,52
Steinkohlenhochtemperaturteer-Destillat	0,984	-	-	1,92	2,40

Die an sich schon sehr hohen Conradson-Werte der Steinkohlenteeröle werden durch Äthylnitratzusätze noch bedeutend gesteigert. In Übereinstimmung hiermit stehen die bei der Zündwilligkeitsprüfung dieser Gemische im Motor gefundenen starken Koksansätze.

Legt man die amerikanischen und englischen Anforderungen an die Conradson-Werte von Dieselkraftstoffen für schnelllaufende Motoren, das sind höchstens 0,2 Gew.-%, zugrunde +), so liegen die

+) In deutschen Lieferbedingungen sind Grenzwerte für den Conradson-Test nicht angegeben.

Zahlentafel 7

Conradson-Werte von Kraftstoff 1
nach Zusatz verschiedener Zündbeschleuniger

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%			
	0,5	1	1,5	2
Tetralinperoxyd	0,124	0,130	0,158	0,236
Äthylnitrat	0,213	0,271	0,372	0,456
Äthylnitrat + 0,1 % Benzylbromid	0,218	0,283	0,344	0,461
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid + Cu-Stearat	0,215	0,280	0,382	0,467
Äthylnitrat + Cu-Stearat	0,289	0,318	0,375	0,476
Amylnitrat	0,218	0,326	0,379	0,480
Amylnitrat + 0,1 % Butylbromid	0,232	0,271	0,355	0,409
Amylnitrit	0,268	0,442	0,655	1,004
Amylnitrit + 0,1 % Benzylbromid	0,287	0,487	0,762	1,239
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid + Cu-Stearat	0,363	0,484	0,662	0,892
Amylnitrat + 1 % Tetralinperoxyd	0,252	0,380	0,483	0,694
Äthylenchlorhydrinnitrat	0,348	0,446	0,636	0,828
Nitrosomethylurethan	0,237	0,268	0,283	0,300
Diäthyltetrasulfid	0,362	0,494	0,618	0,783

Grundsätzlich tritt bei allen Kraftstoffen durch den Zusatz eine Erhöhung der Verkokungsneigung nach Conradson ein, die mit der zugegebenen Zündstoffmenge meist angenähert proportional ansteigt. Die Steigerungen sind für jeden Zündbeschleuniger bei allen Kraftstoffen nahezu gleich.

Die Wirkung verschiedener Stoffe auf denselben Kraftstoff ist jedoch sehr unterschiedlich. Die bei weitem geringste Zunahme der Conradson-Werte verursacht Tetralinperoxyd. Die in Abhängigkeit von der Zusatzmenge aufgetragenen Conradson-Werte ergeben in diesem Falle bis zu Zusätzen von 1,5 Gew.-% eine flach verlaufende Kurve oder Linie. Diese geringe Erhöhung bei niedrigen Zusätzen ist sicherlich zum Teil auf den Verbrauch des Tetralinperoxyds durch die erwähnte chemische Umsetzung zurückzuführen. Trotzdem zeigt der Gesamtverlauf der Kurven, daß die Verkokungsneigung nach Conradson durch Tetralinperoxydzusätze nur wenig zunimmt. Eine außerordentlich starke Erhöhung der Conradson-Verkokung verursachen das Nitrit, Tetrasulfid und Äthylenchlorhydrinnitrat.

Zahlentafel 8

Conradson-Werte von Kraftstoff 2
nach Zusatz verschiedener Zündbeschleuniger

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%			
	0,5	1	1,5	2
Tetralinperoxyd	0,210	0,231	0,251	0,276
Äthylnitrat	0,208	0,230	0,367	0,391
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid	0,221	0,238	0,380	0,412
Äthylnitrat + 0,1 % Benzylbromid + Cu-Stearat	0,217	0,341	0,383	0,415
Amylnitrat	0,220	0,318	0,381	0,464
Amylnitrat + 0,1 % Benzylbromid	0,227	0,243	0,414	0,427
Amylnitrit	0,247	0,380	0,478	0,692
Amylnitrit + 0,1 % Butylbromid	0,290	0,407	0,442	0,534
Äthylenchlorhydrinnitrat	0,307	0,418	0,472	0,670
Nitrosomethylurethan	0,217	0,240	0,374	0,406
Diäthyltetrasulfid	0,238	0,280	0,431	0,613

Für Gemische aus Steinkohlenteerölen mit Äthylnitrat wurden die folgenden Conradson-Werte gemessen:

Kraftstoffart	Äthylnitratzusatz in Gew.-%				
	0	2	3	4	5
Steinkohlenschwel- teer-Destillat	0,745	1,71	1,93	2,16	2,52
Steinkohlenhochtem- peraturteer- Destillat	0,984	-	-	1,92	2,40

Die an sich schon sehr hohen Conradson-Werte der Steinkohlenteeröle werden durch Äthylnitratzusätze noch bedeutend gesteigert. In Übereinstimmung hiermit stehen die bei der Zündwilligkeitsprüfung dieser Gemische im Motor gefundenen starken Koksansätze.

Legt man die amerikanischen und englischen Anforderungen an die Conradson-Werte von Dieselmotorkraftstoffen für schnellaufende Motoren, das sind höchstens 0,2 Gew.-%, zugrunde +), so liegen die

+) In deutschen Lieferbedingungen sind Grenzwerte für den Conradson-Test nicht angegeben.

Zahlentafel 9

Conradson-Werte von Kraftstoff J
nach Zusatz verschiedener Zündbeschleuniger

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%			
	0,5	1	1,5	2
Tetralinperoxyd	0,154	0,162	0,175	0,246
Äthylnitrat	0,194	0,225	0,280	0,315
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid	0,180	0,280	0,300	0,360
Äthylnitrat + 0,1 % Butylbromid + Cu-Stearat	0,206	0,270	0,306	0,440
Äthylnitrat + Cu-Stearat	0,292	0,302	0,325	0,456
Amylnitrat	0,230	0,268	0,383	0,443
Amylnitrat + 0,1 % Butylbromid	0,174	0,352	0,362	0,433
Amylnitrit	0,252	0,374	0,540	0,733
Amylnitrit + 0,1 % Benzylbromid	0,261	0,383	0,520	0,689
Äthylenchlorhydrinnitrat	0,472	0,548	0,623	0,718
Nitrosomethylurethan	0,209	0,231	0,387	0,428
Diäthyltetrasulfid	0,228	0,271	0,407	0,543

Werte aller Zusatzstoffe mit Ausnahme der von Tetralinperoxyd bereits bei einer Zugabe von 0,5 Gew.-% außerhalb der zulässigen Grenzen.

Wenn auch die Ergebnisse einen quantitativen Rückschluß auf die Verkokungsneigung gedopter Kraftstoffe im Motor nicht zulassen, so ist jedoch eindeutig festzustellen, daß die untersuchten Zusatzstoffe einen nachteiligen Einfluß auf das Verkokungsverhalten der Dieselkraftstoffe ausüben. Die Verwendung der Zündbeschleuniger wird durch diese unerwünschte Eigenschaft erheblich beschränkt; denn meist besitzen Kraftstoffe mit niedriger Zündwilligkeit eine hohe Verkokungsneigung, die durch Zusatz von Zündbeschleunigern leicht über die zulässige Grenze hinaus vergrößert werden kann.

2. Auf den Angriff gegenüber Metallen

Von Dieselkraftstoffen wird gefordert, daß sie solche Metalle nicht angreifen, die als Werkstoffe von Behältern, Rohrleitungen und Motorteilen Verwendung finden. Praktisch ist vor allem die Prüfung der Korrosionseinwirkung der Kraftstoffe auf Zink von Bedeutung; denn Zink wird vielfach noch heute als Rostschutz von Kraftstoffbehältern benutzt, obwohl seine Neigung, durch Kraftstoffe korrodiert zu werden, bekannt ist.

Die hier durchgeführte Prüfung wurde nach der von Hammerich vorgeschlagenen Methode vorgenommen. Danach wird ein Zinkstreifen von bestimmter Oberfläche (100 x 10 x 1 mm) einer 24-stündigen Einwirkung des zu untersuchenden Dieselkraftstoffes bei 100° ausgesetzt. Die Gewichtsabnahme in mg des nach der Behandlung von Fremdstoffen befreiten Zinkstreifens wird als relativer Maßstab der korrosiven Eigenschaften des Kraftstoffes gegenüber Zinkfläche nicht übersteigen.

Die Wirkung der Zündbeschleuniger auf die Angriffsfähigkeit der Dieselkraftstoffe wurde, um die Zahl der anzusetzenden Korrosionsversuche auf ein bestimmtes Maß zu beschränken, stichprobenweise an drei Kraftstoffen mit den als brauchbar erkannten Stoffen in verschiedenen Gewichtsverhältnissen überprüft (Zahlentafeln 10 und 11). Es ist klar ersichtlich, daß die Zündsätze in fast jedem Falle auch eine Erhöhung des Angriffs durch Dieselkraftstoffe verursachen. Diese Steigerung ist jedoch in den meisten Fällen, z. B. bei Zugabe von Äthylnitrat sowie von Nitrosomethylurethan, unmaßgeblich klein. Dagegen wird die zulässige Grenze von 4 mg/16 cm² Oberfläche Gewichtsverlust durch Zusatz von Tetralinperoxyd und von Amylnitrit ziemlich bald überschritten. Aus diesem Grunde erweist es sich als notwendig, Dieselkraftstoffe mit Zündbeschleunigern stets auch hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens zu überprüfen.

Zahlentafel 10

Angriffsfähigkeit gedopter Kraftstoffe gegenüber Zink

Gewichtsverlust in mg/16 cm² (Hagemann - Hammerich)

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-%							
	Zu Kraftstoff 1				Zu Kraftstoff 2			
	1	1,5	2	3	1	1,5	2	3
Amylnitrat	1,2			1,8		0,7		0,9
Amylnitrat + 0,1 % Benzylbromid	1,4			1,7		0,5	0,7	
Äthylnitrat	0,5		0,5		0,6		0,8	
Amylnitrit	0,8		2,7	3,8		3,5		6,1
Tetralinperoxyd		4,7			1,6		5,2	
Nitrosomethylurethan	0,2		0,4		0,4		1,3	
Diäthyltetrasulfid	1,0		1,8		0,7		1,8	
Äthylenchlorhydrinnitrat	1,6		1,4		2,1		3,5	

Zahlentafel 11

Angriffsfähigkeit gedopter Kraftstoffe gegenüber Zink
Gewichtsverlust in mg/16 cm² (Hagenmann - Hammerich)

Zündbeschleuniger	Zugesetzte Menge in Gew.-% zu Kraftstoff 3				
	0,5	1	1,5	2	3
Amylnitrat					
Amylnitrat + 0,1 % Butylbromid		0,6			0,4
Ethylnitrat		0,7		0,9	
Amylnitrit	0,2				0,3
Tetralinperoxyd		1,8		4,7	
Nitrosomethylurethan	1,2		3,5	6,7	
Diäthyltetrasulfid		0,6		1,8	
Äthylenchlorhydrinnitrat		2,0		3,8	
		1,2		3,1	

3. Auf die Lagerbeständigkeit

Die Anforderungen an die Lagerbeständigkeit von Dieseldkraftstoffen erstrecken sich auf die oft erst in längeren Zeiträumen auftretenden Ausscheidungen harz- und asphalthaltiger Stoffe, die die Förderung der Kraftstoffe vom Behälter zum Motor unterbinden.

Zur Prüfung der Lagerbeständigkeit der mit Zündbeschleunigern versetzten Kraftstoffe wurden Proben von Gemischen der Dieseldkraftstoffe mit allen untersuchten Zündbeschleunigern unter Lichtausschluß aufbewahrt. Etwa 100 g der Kraftstoffproben wurden zu diesem Zweck in 300 ccm fassende Erlenmeyerkolben gefüllt. Die Kolben wurden sodann mit Korkstopfen verschlossen und im Dunkeln stehen gelassen. Nach einer Versuchszeit von einem Jahr waren weder in den reinen noch in den mit Zusätzen versehenen Kraftstoffen irgendwelche Ausscheidungen aufgetreten. Eine Ausnahme bilden diejenigen Kraftstoffgemische, die Zusätze von Nitrit oder Tetralinperoxyd enthalten. Bei ihnen entstanden, wie bereits erwähnt, kurze Zeit nach der Zugabe dieser Stoffe Ausscheidungen, die auf Umsetzungen mit den Kraftstoffinhaltsstoffen zurückzuführen sind. Werden diese Niederschläge nach Beendigung der Reaktion abfiltriert, so sind auch die mit Nitrit oder Tetralinperoxyd versetzten Kraftstoffe lagerbeständig.

Eine nach 6-monatiger Lagerung erfolgte Nachprüfung der Zündwilligkeit der Gemische ergab innerhalb der Fehlergrenzen der motorischen Messung keine Unterschiede gegenüber den unmittelbar nach dem Zusatz ermittelten Cetanwerten.

Erklärung der unterschiedlichen Wirkung der
als Zündzusätze vorgeschlagenen Stoffe

Warum lassen manche der im Schrifttum als Zündbeschleuniger vorgeschlagenen Stoffe keine Wirkung im Dieselmotor erkennen? Bei der gewöhnlichen Verbrennung, z.B. in Feuerungen, spielen Zwischenreaktionen und Zwischenprodukte kaum eine Rolle. Maßgebend für die Verwendung der Heizstoffe ist im wesentlichen nur der Heizwert. Bei der Verbrennung im Motor ist die Möglichkeit der Anwendung eines Kraftstoffes und seine Ausnutzung dagegen vom Verlaufe der Verbrennung abhängig. Die chemischen Vorgänge vor und während der Verbrennung kommen zu ausschlaggebender Bedeutung. Aus diesen Grunde sind für die Verbrennungsmotoren nur Kraftstoffe mit bestimmten Eigenschaften verwendbar. Die Dieseldkraftstoffe müssen u. a. entweder leicht oxydable Stoffe enthalten oder bei den im Motor herrschenden Drucken und Temperaturen durch thermische Zersetzung bilden. Die Eignung der Kraftstoffe für den Dieselmotor wird dabei nicht durch die Höhe des Zündpunktes, sondern durch die Größe und Geschwindigkeit der Sauerstoffabsorption im Verbrennungsraum bedingt. Der kritische Wert für die Beurteilung der Brauchbarkeit der Kraftstoffe für den Dieselmotor ist der Zündverzögerung und nicht der Zündpunkt.

Bei vielen Vorschlägen ging man grundsätzlich von der nicht zutreffenden Annahme aus, daß die Höhe des Zündpunktes allein das Kriterium für die Zündwilligkeit im Motor ist; man hat angenommen, daß ein Zündbeschleuniger um so wirksamer ist, je mehr er den Zündpunkt der Kraftstoffe erniedrigt. Man hat sich deshalb lediglich auf die Bestimmung der Zündpunkte der Dieseldkraftstoffe mit und ohne Zusatz der Zündbeschleuniger sowie der Zusätze selbst beschränkt. Diejenigen Stoffe, die selbst einen niedrigen Zündpunkt aufweisen oder die als Zusätze den Zündpunkt herabsetzen, wurden als Zündbeschleuniger vorgeschlagen.

Wenn man die thermischen Eigenschaften der überprüften Zündzusätze betrachtet, so erkennt man, daß nur die Zusätze, die instabil sind, gute Beschleuniger darstellen. Die Alkylnitrate zeichnen sich bekanntlich durch die Heftigkeit, mit der sie schon beim Erhitzen über ihren Siedepunkt explodieren, aus. Die Nitrite, Peroxyde und die übrigen wirksamen Zündstoffe zerfallen ebenfalls leicht.

Die übrigen in ihrer Wirkung als Zündbeschleuniger untersuchten Zusätze sind thermisch stabil und nehmen dementsprechend auch keinen Einfluß auf den Zündverzögerung der Dieseldkraftstoffe im Motor.

Zusammenfassung

In der vorstehenden Arbeit wurde die Wirksamkeit einer Anzahl der im Schrifttum vorgeschlagenen Zusatzstoffe zur Verbesserung der Zündwilligkeit von Dieseldkraftstoffen überprüft. Die Versuche ergaben, daß nur ein Teil dieser Stoffe wirksam ist, und zwar Alkylnitrate, Alkylnitrite, Peroxyde, Alkylhalogennitrate, Nitroverbindungen und Polysulfide. Unwirksam waren Nitrosamine, wie Nitrosodimethylamin-para, Oxime wie Cyclohexanonoxim, Ketone wie

Benzoylacetone und ungesättigte Kohlenwasserstoffe wie Dipenten und Terpen. Der Grad der Zündwilligkeitssteigerung wird durch die chemische Zusammensetzung der Kraftstoffe beeinflusst.

Versuche, die zündbeschleunigende Wirkung von Nitraten und Nitriten durch Zugabe von Butylbromid oder Benzylbromid oder Octylstearat bzw. Bromid und Stearat zugleich zu erhöhen, haben ergeben, daß durch diese Zusätze keine nennenswerte Verbesserung der motorischen Zündwilligkeit über die Wirkung der Nitrite und Nitrate hinaus stattfindet.

Die meisten Zusätze verlieren ihre Brauchbarkeit auch während der Lagerung der Kraftstoffe nicht. Ausscheidungen, die die Lagerbeständigkeit der Kraftstoffe herabsetzen könnten, traten nur bei Amylnitrit und Tetralinperoxyd, die mit einzelnen Kraftstoffen unter Niederschlagsbildung reagierten, auf; deshalb wirkten diese Stoffe, in kleinen Mengen zugesetzt, unwesentlich zündbeschleunigend.

Die Korrosionseigenschaften der Kraftstoffe werden durch die Zusätze in manchen Fällen merklich verschlechtert, sodaß es zweckmäßig erscheint, die Angriffsfähigkeit gedopter Kraftstoffe gegenüber den Motorbaustoffen vor der Verwendung zu prüfen.

Besonders stark wirkt sich die Anwesenheit der Zündbeschleuniger auf die Verkokungsneigung der Kraftstoffe aus. Mit Ausnahme von Tetralinperoxyd verursachen die Zusätze bereits bei einer Zugabe von 0,5 Gew.-% eine Erhöhung der Conradsonwerte über die in Lieferbedingungen zugelassene Grenze hinaus. Die starke Erhöhung der Verkokungsneigung der Kraftstoffe beschränkt die praktische Anwendung von Zündbeschleunigern wesentlich, da die in ihrer Zündwilligkeit zu verbessernden Kraftstoffe meist selbst eine hohe Verkokungsneigung aufweisen, die durch die Zündbeschleuniger noch erhöht wird.

Das Versagen eines Teiles der im Schrifttum vorgeschlagenen Zündbeschleuniger wird darauf zurückgeführt, daß man bei der Entwicklung der Zündbeschleuniger von der irrigen Annahme ausging, daß der Zündpunkt für die Wirksamkeit maßgeblich ist. Nur solche Zusätze erwiesen sich aus diesem Grunde brauchbar, die bei den im Motor herrschenden Bedingungen eine hohe Zerfallsneigung haben und etwa wie Initialzündler den Verbrennungsablauf einleiten.

Schrifttum

- 1) Imperial Chemical Industries Ltd., Dän. P. 48 216 (1932)
- 2) E. V. Bereclavsky, F. P. 821 211 (1937)
- 3) D. A. Howes, Imperial Chemical Industries Ltd., A. P. 2 065 506 (1933)
- 4) G. S. Marvel, E. I. Dupont de Nemours et Co., A. P. 2 031 497 (1933)
- 5) Imperial Chemical Industries Ltd., D.R.P. 616 917 (1933);
F.P. 757 326 (1933)
P. L. Wesely und R. Peterson, Imperial Chemical Industries Ltd.,
E.P. 404 682 (1934)
- 6) C. A. Woodburg und W. A. Lawson, E. I. Dupont de Nemours et Co.,
A.P. 2 066 506 (1932)
- 7) F. Hofmann und K. Giesler, D.R.P. 574 678 (1931)
- 8) R. H. Griffith und S. G. Hill, Gas Light and Coke Co.,
E.P. 436 027 (1934)
- 9) W. A. Bristow und C. Buist, E.P. 461 320 (1935)
- 10) P. Salzburg, P. L. Wesely und R. Peterson, E.I. Dupont de Nemours et Co., A.P. 2 009 818 (1932)
- 11) D. A. Howes, Imperial Chemical Industries Ltd., E.P. 405 658 (1932)
- 12) L. Fernandes und P. Paoletti, It. P. 340 924 (1936)
- 13) L. Fernandes und P. Paoletti, It. P. 340 089 (1936)
- 14) P. Auerbach, Belg. P. 430 012 (1938)
- 15) Standard Oil Development Co., F.P. 853 719 (1939)
- 16) Standard Oil Development Co., F.P. 855 535 (1939)
- 17) G. Moran, E. W. Fuller und G. S. Grandall, Socony Vacuum Oil Co.,
A.P. 2 136 456 (1937)
- 18) R. C. Moran, E. W. Fuller und G. S. Grandall, Socony Vacuum
Oil Co., A.P. 2 136 455 (1936)
- 19) G. S. Grandall, Socony Vacuum Oil Co., A.P. 2 188 262 (1938)
- 20) Imperial Chemical Industries, A.P. 1 849 051 (1932)
- 21) H. Hock, D.R.P. 651 771 (1934)
- 22) N. V. de Bataafsche Petroleum, Matschappij, F.P. 774 099 (1934)
- 23) Texaco Development Corp., F.P. 429 326 (1937)

- 24) E. I. Dupont de Nemours et Co., B.P. 429 763 (1933)
- 25) D. A. Howe, Imperial Chemical Industries Ltd., B.P. 403 124 (1932)
- 26) A. Hagemann, D.R.P. 612 073 (1931)
- 27) I. Klassen, D.R.P. 622 067 (1933)
A. H. Fleming, Schweiz.P. 187 127 (1935)
- 28) I. O. Farbenindustrie, B.P. 399 150 (1932)
- 29) R. C. Moran und G. S. Grandall, Socony Vacuum Oil Co., A.P. 2 137 410 (1937)
- 30) A. A. Burton, Standard Oil Co., A.P. 2 200 260 (1939)
- 31) Texas Co. New York, A.P. 2 034 643 (1933)
- 32) N. V. de Bataafsche Petroleum Matschappij, P.P. 764 721 (1933)
- 33) G. S. Grandall, R. C. Moran und H. G. Berger, Socony Vacuum Oil Co., A.P. 2 167 345 (1936)
- 34) M. Aubert, P. Clerget und R. Duchene, C. R. hebdom. Séances Acad. Sci. 201, 879 (1935)
- 35) K. S. Ramaja, W. L. Waldman und P. S. Choroschilow, russ. Neftjanoje Chosjaistwo Nr. 4/5, 69 (1937)
- 36) W. H. Hubner und G. Egloff, Universal Oil Products Booklet Nr. 209 (1937)
- 37) A. W. Schmidt und F. Mohry, Braunk 30, 535 (1936) Öl und Kohle 36, 122 (1940)
- 38) A. W. Schmidt und F. Kneule, Öl und Kohle 14, 1034 (1938)
- 39) Th. Hammerich, Öl und Kohle 14, 539 (1938)

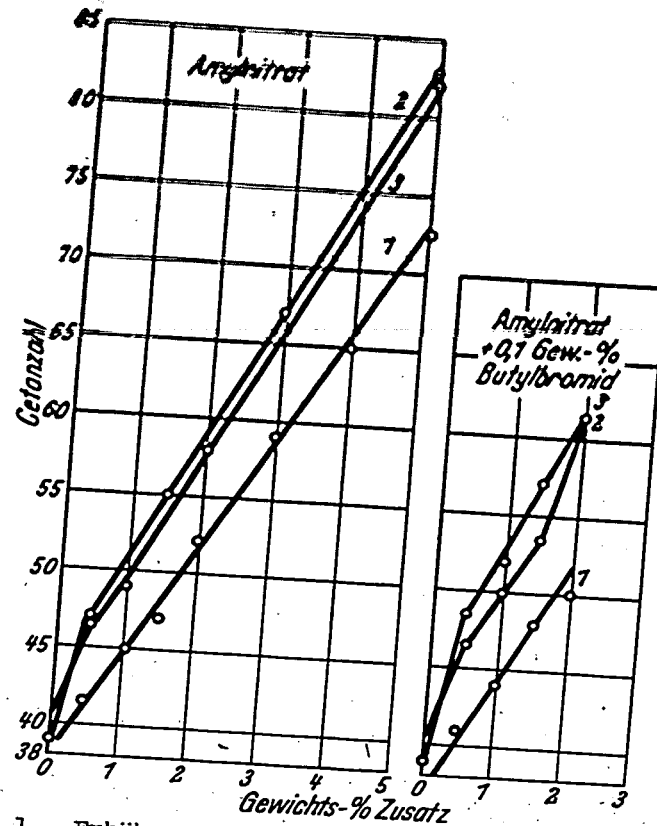


Abb. 1. Erhöhung der Zündwilligkeit durch Zusätze.

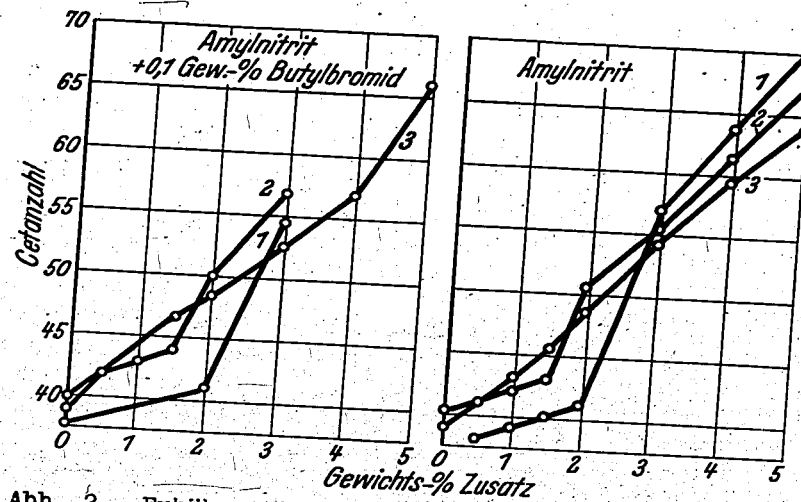


Abb. 2. Erhöhung der Zündwilligkeit durch Zusätze.

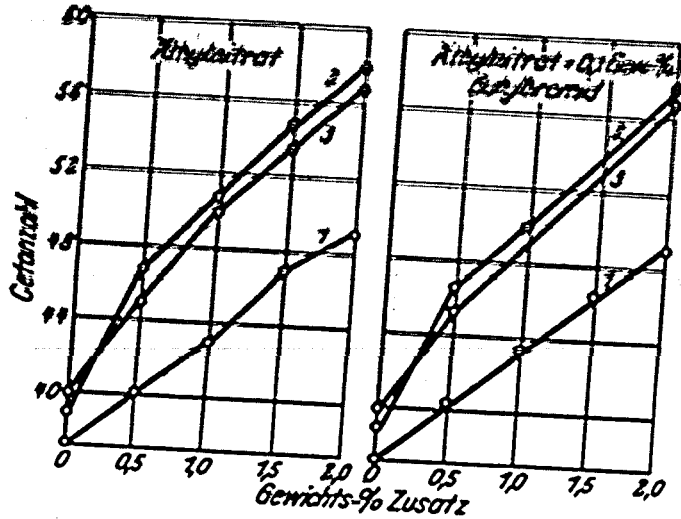


Abb. 3. Erhöhung der Zündwilligkeit durch Zusätze.

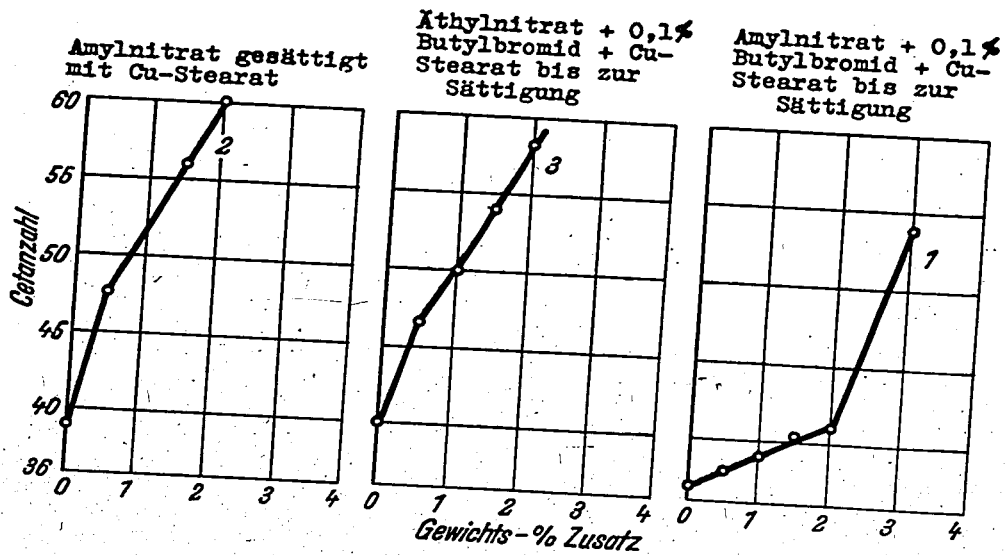


Abb. 4. Erhöhung der Zündwilligkeit durch Zusätze.

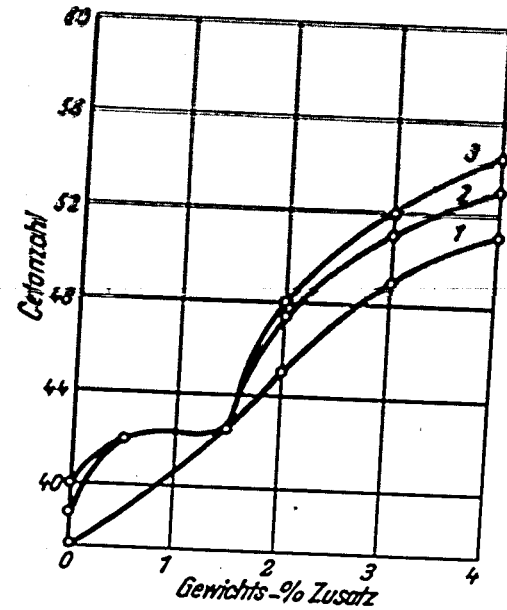


Abb. 5. Erhöhung der Zündwilligkeit durch Zusätze von Tetralinperoxyd.

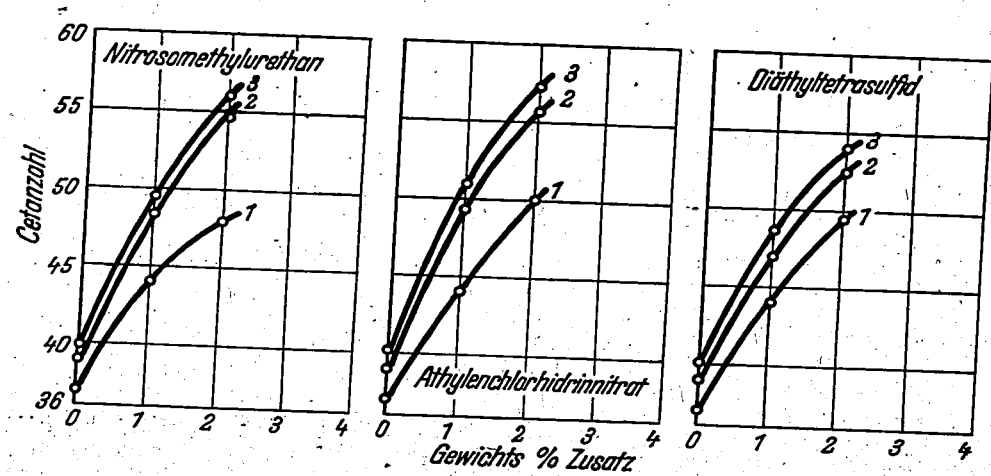


Abb. 6. Erhöhung der Zündwilligkeit durch Zusätze.

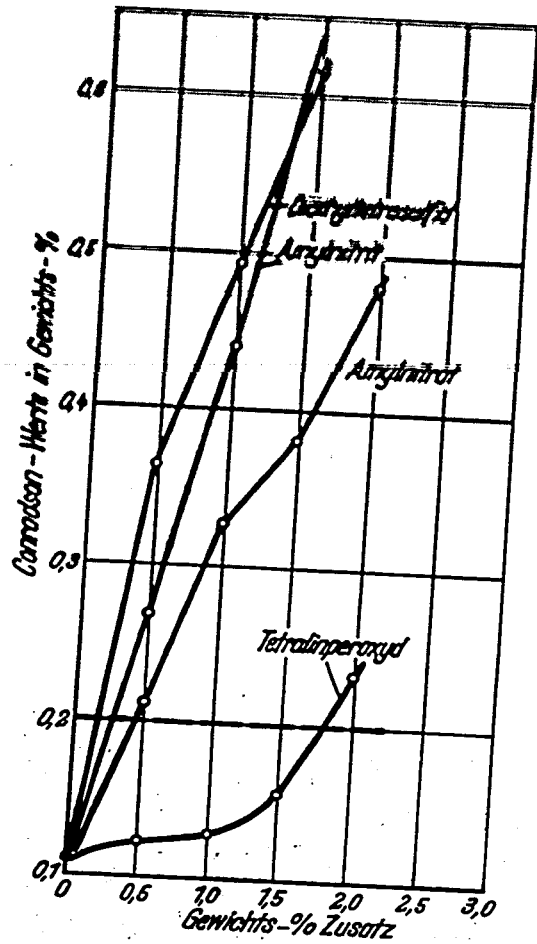


Abb. 7. Steigerung der Conradsonwerte eines Erdölcrack-Dieselmotorkraftstoffes durch Zusätze von Zündbeschleunigern.

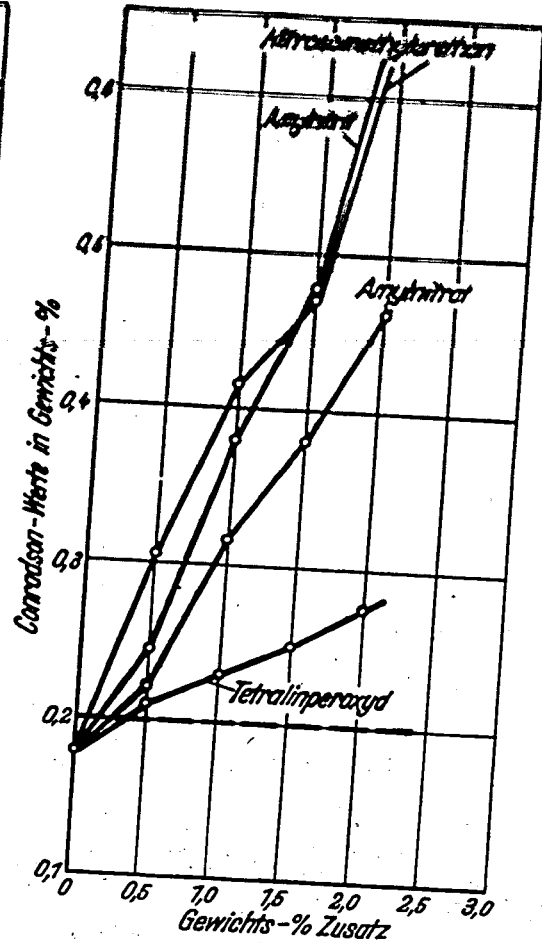


Abb. 8. Steigerung der Conradsonwerte eines Braunkohlen-Dieselmotorkraftstoffes durch Zusätze von Zündbeschleunigern.

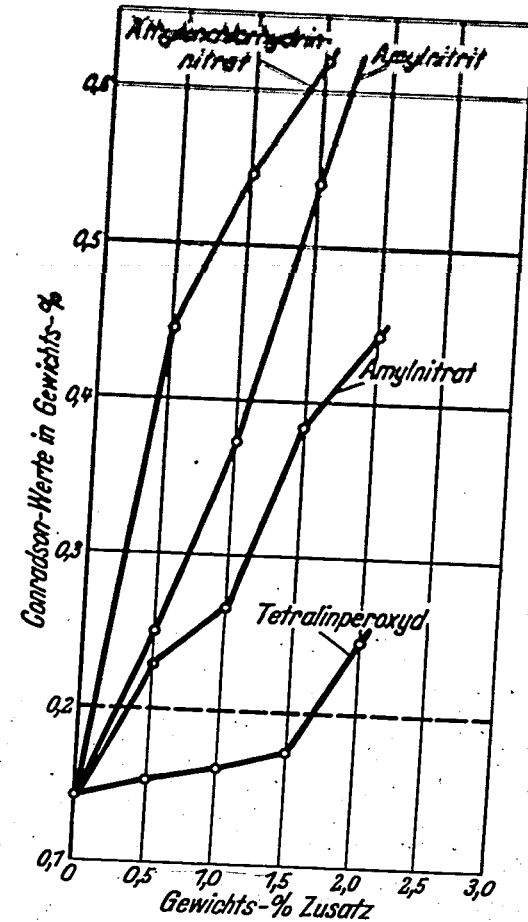


Abb. 9. Steigerung der Conradsonwerte eines Braunkohlencrack-Dieselmotorkraftstoffes durch Zusätze von Zündbeschleunigern.

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

SF 10

000815

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 85

über

Untersuchungen an Staubfiltern für Verbrennungsmotoren
1. Zwischenbericht

Bearbeiter: Dr.-Ing. habil. Ulrich Schmidt

Bericht der
Technischen Hochschule Berlin
Versuchsanstalt und amtliche Prüfstelle für Kraftfahrzeuge

Professor Dr.-Ing. O. Schöne

Juni 1940

Nur zum Dienstgebrauch im Ge-
schäftsbereich des Empfängers

000816

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 85

über

Untersuchungen an Staubfiltern für Verbrennungsmotoren

1. Zwischenbericht

Bearbeiter: Dr.-Ing. habil. Ulrich Schmidt

Bericht der
Technischen Hochschule Berlin
Versuchsanstalt und amtliche Prüfstelle für Kraftfahrzeuge

Professor Dr.-Ing. O. Schöne

Juni 1940

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen - Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen - Der Bericht ist unter Ver-
schluß zu halten.

000817

Im Auftrage und mit Unterstützung des Herrn Reichsverkehrsministers werden an der Versuchsanstalt und amtlichen Prüfstelle für Kraftfahrzeuge Untersuchungen auf der Ansaugseite von Motoren durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen entstanden durch den Anbau von Staubfiltern an die Ansauganlage neue Probleme, über deren Untersuchung im folgenden berichtet wird.

Für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Versuche spreche ich dem Herrn Reichsverkehrsminister hierdurch meinen besten Dank aus.

Bln.-Charlottenburg,
den 13. Juni 1940
Dr. S/Bl.

gez. S c h ö n e

Untersuchungen an Staubfiltern für Verbrennungsmotoren

1. Zwischenbericht

Aufgabe

Bei Untersuchungen auf der Ansaugseite von Motoren hat sich ein starker Einfluß der verwendeten Staubfilter und ihres Verschmutzungsgrades herausgestellt. Es entstand infolgedessen die Aufgabe, von verschiedenen Filterarten Charakteristiken ihrer Widerstandskurven aufzunehmen. Gleichzeitig wurde dabei die Filterwirkung festgestellt.

Versuchsanlage

Das Schema der Versuchsanlage ist in Abb. 1 dargestellt. Die Luft für die Beschickung des Staubfilters wird von einem Ventilator 1 geliefert, welcher von einem Elektromotor 2 angetrieben wird. In der Ausblaseleitung des Ventilators befindet sich ein Staugerät 3, an welches die schreibende Ringwaage 3 a zur Messung der vom Gebläse gelieferten Luftmenge angeschlossen ist. Der Staub wird der Luft in einem Lufttrichter über die Leitung 6 a zugeführt. Diese Leitung führt einen vor der Drosselscheibe 5 abzweigenden Teilluftstrom, in welchen von der Staubaufgabe 6 Staub eingebracht wird. Die Staubaufgabe besteht aus einem Vorrats-Silo mit einer darunter befindlichen Förderschnecke. Diese Schnecke wird über das Getriebe 8 von dem Motor 7 angetrieben, gleichzeitig ist an das Getriebe zur Zählung der Schneckenwellenumdrehungen ein Zählwerk angeschlossen. Zur Vermeidung von Brückenbildungen wird der Staubsilo mit Hilfe des Getriebes 8 in kurzen Zeitabständen durch einen Klopffammer erschüttert.

Die staubhaltige Luft gelangt sodann in die Filterpatrone 10, in welcher die zur Untersuchung gelangenden Filterproben untergebracht werden. Hinter der Filterpatrone ist ein Filtersack 12 zur Aufnahme des vom Staubfilter durchgelassenen Staubes angeschlossen. Der Druckverlust in der Filterpatrone wird durch den schreibenden Differenzdruckmesser 11 aufgezeichnet.

Die Ringwaage 3 a ist mit einem Kontaktwerk versehen, welches über den Motorregler 4 den Antriebsmotor 2 des Gebläses 1 so regelt, daß unabhängig von dem Filterwiderstand in der Staubleitung ständig konstante Luftgeschwindigkeit herrscht.

Durchführung der Messungen

Die Filterpatrone 10 wurde mit dem zu untersuchenden Filtermaterial beschickt und im sauberen Zustand bzw. nach Benetzung des Filtermaterials mit Öl gewogen. Der Regler 4 und die Ringwaage 3 a wurden auf eine bestimmte, konstant zu haltende Luftgeschwindigkeit eingestellt. Der Silo 6 mit der Förderschnecke und dem im Silo enthaltenen Staub wurde zu Beginn des Versuches ebenfalls gewogen. Sodann wurde der Motor 7 auf eine vorher

000819

errechnete, einer bestimmten Staubmenge entsprechende Drehungszahl gebracht. Als Versuchs-Staub wurde Flugasche aus dem Elektrofilter einer Kraftwerke benutzt.

Der Differenzdruckschreiber 11 zeichnete laufend den Anfangswiderstand des Filters sowie die Widerstandsunnahme durch Verschmutzung auf, wobei die Regleinrichtung 4 für konstante Luftgeschwindigkeit sorgte. In 1/2 stündigen Abständen wurde die Anlage stillgesetzt und das Gewicht der Filterpatrone 10 sowie des Staubbeilos 6 festgestellt. Aus dem Vergleich dieser Gewichte ergab sich sodann der Wirkungsgrad des Filters.

Versuchsergebnis

Es wurden vorläufig folgende Filtermaterialien untersucht:

- Streckmetall (Delbag),
- Turbogewebe (Knecht),
- gestricktes Metallgewebe (Khrich & Graetz)
- Teppichfaser (Zellwolle).

Bei allen Versuchen wurde eine Geschwindigkeit von 4,72 m/sec vor dem Filter und ein Staubgehalt der Luft von ca. 0,07 g/m³ eingehalten.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung des Streckmetalles. In der Patrone befanden sich 5 Scheiben Streckmetall, welche insgesamt mit 1,18 g Öl benetzt waren. Die Scheiben lagen entsprechend ihrem Einbau in die Luftfilter dicht aufeinander. Im unteren Teil der Abbildung ist über der zugeführten Staubmenge als Abszisse die ausgefilterte Staubmenge, der Filterwiderstand und der Filterwirkungsgrad aufgetragen. Der Filterwiderstand wurde errechnet nach der Formel

$$\xi = \frac{p}{v^2},$$

wobei p den Differenzdruck am Filter in mm WS und v die Luftgeschwindigkeit darstellt. Es ist sicher, daß diese Formel nicht streng gültig ist, da bei konstanter Widerstandszahl der Druckverlust im Filter nicht genau mit dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit wächst, jedoch gilt in engeren Grenzen diese Formel und ist besonders dann zu gebrauchen, wenn die Luftgeschwindigkeit wie im vorliegenden Falle bei allen Messungen konstant gehalten wird. Im oberen Teil der Abbildung ist noch einmal der Filterwiderstand aufgetragen, in diesem Falle jedoch über der ausgefilterten, d.h. im Filter zurückbleibenden Staubmenge, da der Widerstand eines Filters selbstverständlich nicht von der zugeführten, sondern von der im Filter zurückgehaltenen Staubmenge abhängt. Die Abbildung zeigt, daß der Filterwirkungsgrad mit dem Wert von 75 % beginnt, jedoch schon nach außerordentlich kurzer Zeit stark abfällt und sich einem Endwert von 25 % nähert (als Filterwirkungsgrad ist nicht das Verhältnis

$\frac{\text{gesamte festgehaltene Staubmenge}}{\text{gesamten zugeführten Staubmenge}}$,

sondern der jeweilige stündliche Wirkungsgrad, d. h.

$\frac{\text{pro Stunde festgehaltene Staubmenge}}{\text{pro Stunde zugeführte Staubmenge}}$

eingetragen). Der Filterwiderstand beginnt mit dem niedrigen Wert von ca. 2 und ist bei 5 g ausgefilterter Staubmenge bereits auf 4,4 gestiegen.

Abb. 3 zeigt die Ergebnisse bei Benutzung von 5 Scheiben Turbogewebe, welche nach Benetzung mit Öl eine Ölmenge von 1,92 g halten. Der Wirkungsgrad liegt erheblich besser als bei Streckmetall, er beginnt mit 94 %, sinkt aber ebenfalls sehr rasch ab. Der anfängliche Filterwiderstand liegt etwas höher als bei Streckmetall, aber bei 5 g ausgefilterter Staubmenge ist er bereits auf 8,4 gestiegen. Der Versuch wurde hier wegen der nicht ausreichenden Ventilatorleistung abgebrochen. Man erkennt jedoch, daß der Filterwirkungsgrad bei Fortsetzung des Versuches noch wesentlich weiter gesunken wäre unter gleichzeitigen Ansteigen des Filterwiderstandes.

Die Filterpatrone wurde nach Beendigung des Versuches vorsichtig auseinandergenommen und dabei folgendes festgestellt:

Die Filterwirkung entsteht dadurch, daß sich der Staub auf der Vorderseite des Gewebes, durch die Ölbenetzung festgehalten, vor den Drähten des Gewebes in Form von kleinen Buckeln und Bergen abgelagert (vgl. Abb. 3 a), wobei durch das direkte Aufliegen der Scheiben auf die davor gelagerten rasch eine starke Verklebung der Durchtrittsöffnungen eintritt (vgl. Abb. 3 b).

Es wurde deshalb angenommen, daß der Filterwiderstand bei Verschmutzung des Filters wesentlich weniger ansteigen würde, wenn die Filterscheiben nicht dicht aufeinander gepreßt, sondern in einem bestimmten Abstand voneinander gehalten werden. Infolgedessen wurden bei einem neu angesetzten Versuch fünf Streckmetallscheiben durch Distanzringe von 5 mm Breite voneinander getrennt. Die Luftgeschwindigkeit betrug wieder 4,72 m/sec und der Staubgehalt der Luft ungefähr 76 mg/m³. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen.

Die Filterwirkung, die zu Anfang beträchtlich hoch ist, läßt schnell nach, der Filterwiderstand zeigt jedoch das erwartete geringe Ansteigen in Abhängigkeit von der ausgefilterten Staubmenge. Der Filterwiderstand beträgt bei sauberem Filter ungefähr 2 und steigt nach Ausfilterung von 5 g Staub auf nur 2,5 an. Der gleiche Versuch wurde sodann mit Turbogewebe wiederholt. Der Filterwirkungsgrad ist auch in diesem Falle besser als bei dem Streckmetall. Der Filterwiderstand steigt ebenfalls weniger an als bei dicht gepackten Scheiben, liegt jedoch bei verschmutztem Filter höher als bei Benutzung von Streckmetall. Er beträgt bei 5 g ausgefilterter Staubmenge 4 Einheiten.

Diese beiden Versuche zeigen deutlich die Überlegenheit der in Abständen angebrachten Filterscheiben gegenüber dicht gepackten Filtern in bezug auf den Durchströmwiderstand. Eine Änderung des Filterwirkungsgrades ist praktisch nicht eingetreten und ließ sich auch nicht erwarten.

Als nächstes wurde Schlauchgewebe der Firma Barich & Draetz als Filtermaterial benutzt. Bei einer Packungstiefe von 23 mm, entsprechend der normalen Ausführung, wurden 7,2 g Schlauchgewebe in der Filterpatrone untergebracht, welche nach Benetzung eine Menge von 1,21 g Öl enthielt. Die Luftgeschwindigkeit betrug wieder 4,72 m/sec, der Staubgehalt der Luft ca. 70 mg/m³. Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. Der Filterwirkungsgrad, der anfangs über 90 % beträgt, fällt ebenfalls wieder sehr stark ab, er beträgt bei 10 g zugeführter Staubmenge nur noch 43 %. Der Filterwiderstand ist zu Beginn sehr niedrig, steigt jedoch in Abhängigkeit von der aufgenommenen Staubmenge ziemlich rasch an.

Es wurde sodann ein Versuch unternommen, die Metallgewebefüllungen der Filter durch Zellwollfasern zu ersetzen. Es wurde eine Faser von 23 Den, sogenannte Teppichfaser der I.G. Farbenindustrie A.G. benutzt. Die Packungstiefe und Packungsdichte wurden so gewählt, daß der anfängliche Filterwiderstand den Widerständen von Streckmetall und Turbogewebe ungefähr entsprach. Es wurde hierzu 1,76 g Zellwolle in die Patrone eingebracht, welche nach der Tränkung mit Öl und sorgfältiges Auspressen eine Ölmenge von ca. 3,7 g aufgenommen hatte. Die Ölaufnahmefähigkeit der Faser ist also außerordentlich groß und verspricht damit einen sehr guten Entstaubungsgrad. Die Luftgeschwindigkeit betrug wieder 4,72 m/sec, der Staubgehalt der Luft ca. 76 mg/m³.

Abbildung 7 zeigt die Versuchsergebnisse. Durch die gleichmäßige Verteilung der für das Festhalten des Staubes wichtigen Ölteilchen über die gesamte Filterbreite und -tiefe ist der Wirkungsgrad der Entstaubung hervorragend. Er beträgt im sauberen Zustand 100 % und nähert sich nach einer eingeführten Staubmenge von 10 g einem Grenzwert von 96 %. Der Filterwiderstand beträgt auf Grund der Wahl der Packung im neuen Zustand ca. 2 Einheiten und steigt wesentlich langsamer als bei dicht gepacktem Streckmetall oder Turbogewebe. Nach einer Staubaufnahme von 5 g ist er erst auf ca. 3,8 Einheiten angewachsen, während er im gleichen Fall bei Streckmetall 4,4 und bei Turbogewebe sogar 8,4 Einheiten betrug.

Da die Ergebnisse bei der Benutzung von Fasermaterial diese außerordentlich günstigen Erfolge zeigten, sind weitere Versuche mit diesem Material angestellt worden. Die große Reinigungskraft des Filtermaterials bedingt eine schnellere Verschmutzung als bei Benutzung von Drahtgeweben. Infolgedessen steigt der Filterwiderstand, bezogen auf die Zeiteinheit, trotz geringem Ansteigen, bezogen auf die ausgeführte Staubmenge, noch verhältnismäßig stark an.

Es sollte deshalb versucht werden, unter Beibehaltung der günstigen Eigenschaften der Ölhaltefähigkeit der Zellwolle eine längere Betriebsdauer der Filterpatrone zu erzielen. Zu diesem Zweck wurde von der Überlegung ausgegangen, daß die zu filternde Luftmenge nicht mehr durch eine Packung hindurch, sondern an einer ölbenetzten Packung entlangstreichen müsse. Wenn die Durchtrittsöffnungen groß genug gewählt werden, muß sich dabei eine außerordentlich große Betriebsdauer der Filter ergeben.

Es wurden infolgedessen Filterscheiben hergestellt, welche aus einem 5 mm breiten Ring bestanden, der zu beiden Seiten als

Begrenzungsfläche Drahtgaze trug. Der Zwischenraum zwischen den beiden Begrenzungsflächen wurde mit Zellwolle von 3,35 Den fest ausgefüllt. Dann wurde von diesen Scheiben ein Segment so abgeschnitten, daß der entstehende Durchtrittsquerschnitt für die Luft 1/3 des Gesamtquerschnittes betrug. Diese Scheiben wurden sodann mit Öl getränkt und in Abständen von 10 mm unter gegenseitiger Versetzung der Durchtrittsöffnungen für die Luft in die Filterpatrone eingebaut.

Abb. 8 zeigt das Schema des Einbaues und die erzielten Ergebnisse. Die Luftgeschwindigkeit betrug wieder 4,27 m/sec, der Staubgehalt der Luft ca. 77 mg/m³. Die von den Scheiben aufgenommene Ölmenge ist mit 10,5 außerordentlich hoch. Der Wirkungsgrad beträgt in sauberen Zustand 80 % und sinkt während des Betriebes langsam auf 73 % ab, ist also als recht gut anzusprechen. Der Filterwiderstand ist jedoch schon im Neuzustand ziemlich hoch, er beträgt ca. 4,7 Einheiten und steigt während des Betriebes zuerst langsam, sodann schneller an. Der hohe Anfangswert deutet darauf hin, daß durch die scharfe Umlenkung der Luft in dem schmalen Zwischenraum zwischen den Filterscheiben ein ziemlicher Strömungswiderstand auftritt. Das allmähliche und dann schnellere Anwachsen des Filterwiderstandes zeigt, daß die Kanäle zwischen den Filterscheiben anscheinend langsam zuwachsen.

Nach Beendigung des Versuches wurde das Filter ausgebaut. Die Betrachtung der einzelnen Filterscheiben bestätigte die gehegte Erwartung. Abb. 8 a zeigt die Staubauflage auf den drei Filterscheiben. Man erkennt, daß insbesondere auf der mittleren Scheibe sich so viel Staub abgelagert hat, daß der Zwischenraum zwischen der ersten und zweiten Scheibe sich wesentlich verkleinerte und damit den Luftwiderstand im Laufe des Betriebes erhöhte.

Um eine längere Betriebsdauer zu erzielen, wurde infolgedessen der Abstand zwischen den Scheiben von 10 auf 20 mm erhöht. Abb. 9 zeigt das Einbauschema und die Versuchsergebnisse. Der Filterwirkungsgrad beträgt zu Anfang 83 % und sinkt langsam auf 60 % ab. Der Filterwiderstand, der zu Beginn 3,8 Einheiten beträgt, bleibt dagegen während des gesamten Versuches fast konstant.

Zusammenfassung

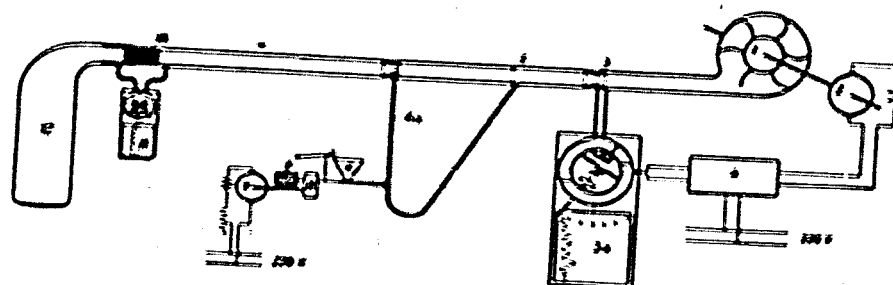
Die Untersuchung verschiedener Filtermaterialien auf den Filterwirkungsgrad und den Filterwiderstand hat bereits bei diesen Vorversuchen eine Reihe wichtiger Ergebnisse gebracht. Bei den zurzeit benutzten Füllmaterialien für Filter (Streckmetall und Turbogewebe) sinkt der Filterwirkungsgrad von einem anfangs hohen Wert sehr schnell ab. Der Filterwiderstand steigt mit zunehmender Verschmutzung schnell an.

Durch Einbau der Filterscheiben im geringen Abstand voneinander kann das Ansteigen des Filterwiderstandes mit zunehmender Verschmutzung wirksam verlangsamt werden.

Der Ersatz der Metallpackungen durch Zellwollfaser ergibt ausgezeichnete Filterwirkung, welche durch die große Ölmenge, die

das Material aufnimmt, und durch die sehr gleichmäßige Verteilung dieser Ölmenge über den ganzen Filterraum zu erklären ist.

Die Benutzung von ölgetränkten Frallscheiben gestattet bei entsprechender Entfernung dieser Scheiben voneinander trotz großer Verschmutzung sehr lange Laufzeiten der Filter. Der Wirkungsgrad ist allerdings nicht so gut wie bei Durchströmung von Zellwollmaterial, liegt jedoch noch immer wesentlich besser als bei Metallfüllungen. Eine Kombination von sellwollgefüllten Frallscheiben und durchströmter Zellwolle soll erprobt werden und dürfte Widerstand gegen Verschmutzung die brauchbarsten Ergebnisse liefern.



1 Gehäuse 2 Staub-Meßer 3-4. Meßrohr u. schwebende Ringmenge zur Messung der Luftmenge
 5 Zähler für Gasmenge durch Ringmenge 30 geteilt 6 Stundenzähler mit Meßfunktion
 7a Zuführung von Staub-Luftgemisch 7 b Meß- und Durchströmungsgläser für Staubprobe 8 Durchströmung
 9 Motor für 6 H Luftabfuhr 10 schwebende Differenzdruckmeßrohr 11 Filterbehälter zur Aufnahme des Filtermediums

Abb. 1. Versuchsanlage für die Staubfilter-Versuche.

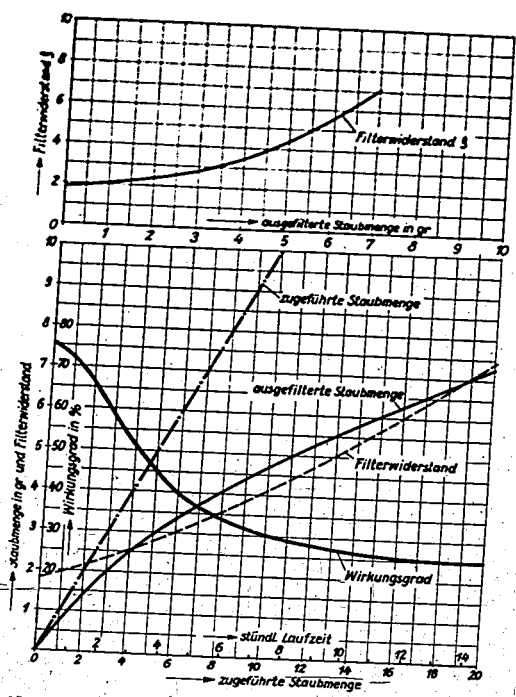


Abb. 2. Staubfilter-Versuche.
 5 Scheiben Streckmetall (benetzt mit 1.180 g Öl)
 Luftgeschwindigkeit: 4,72 m/s
 Staubgehalt der Luft: 0,066 g/m³

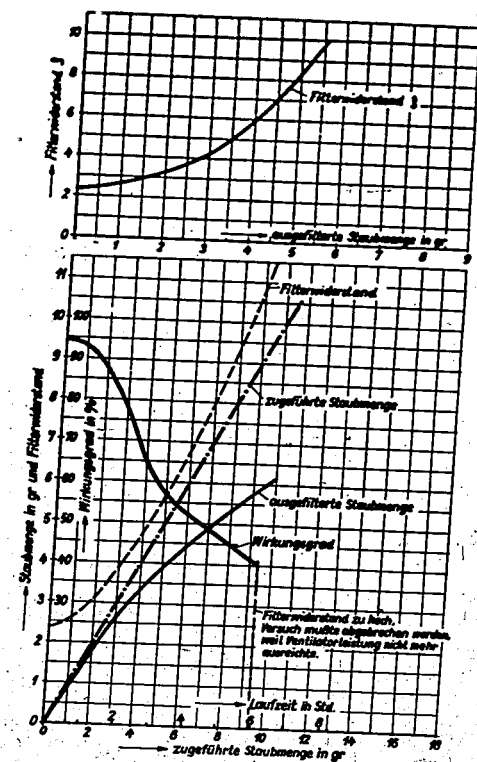
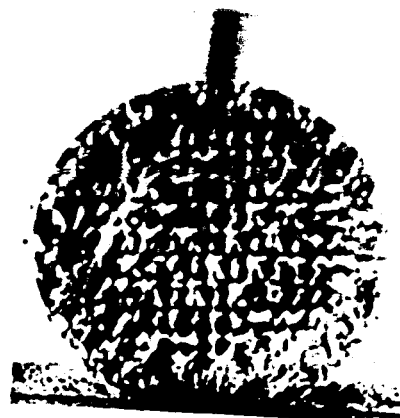


Abb. 3. Staubfilter-Versuche.
 5 Scheiben Turbogewebe-Knecht Cannstadt (Öl benetzt mit 1,92 g)
 Luftgeschwindigkeit: 4,72 m/s, Staubgehalt der Luft: 0,0736 g/m³

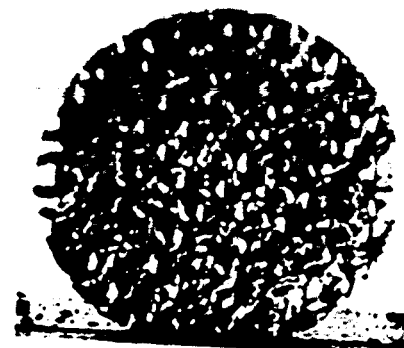
000822



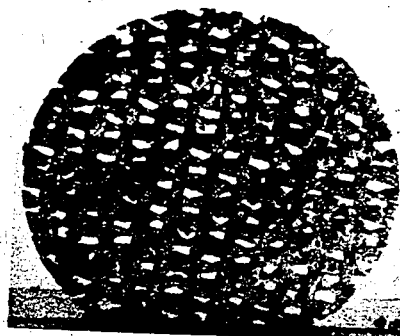
Abb. 3 a. Filterscheibe aus Turbogewebe
(nach dem Versuch)



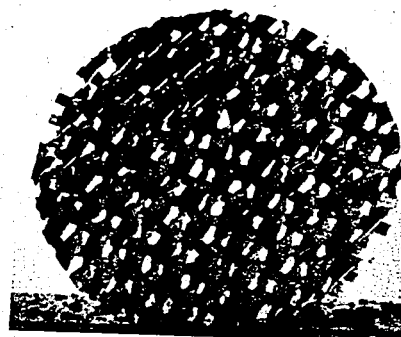
1



2



3



4

Abb. 3 b. Filterscheiben aus Turbogewebe
(nach dem Versuch)

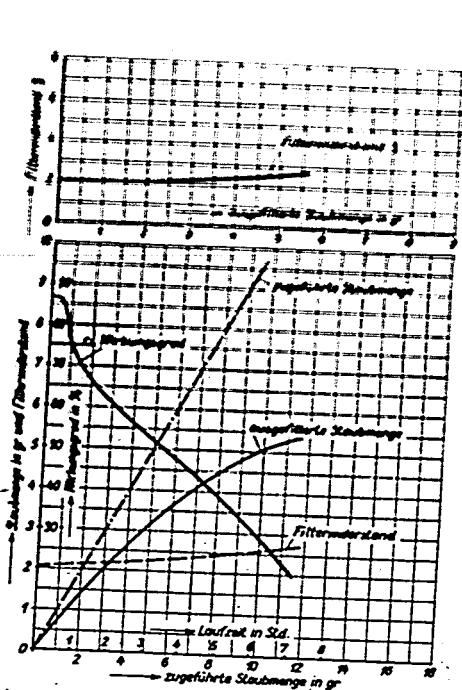


Abb. 4. Staubfilter-Versuche.
5 Scheiben Streckmetall zwischen Distanzringen von 5 mm Breite

Luftgeschwindigkeit: 4,72 m/s
Staubgehalt der Luft: 0,0758 g/m³

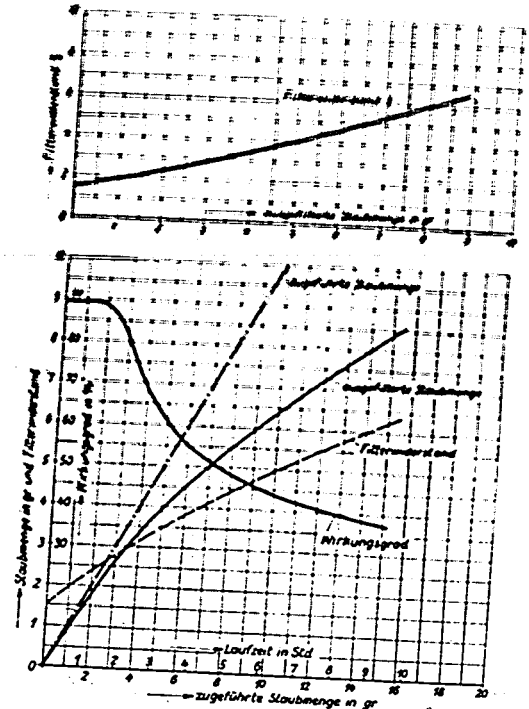


Abb. 5. Staubfilter-Versuche.
5 Scheiben Tzrbogewebe zwischen Distanzringen von 5 mm Breite

Luftgeschwindigkeit: 4,72 m/s
Staubgehalt der Luft: 0,076 g/m³

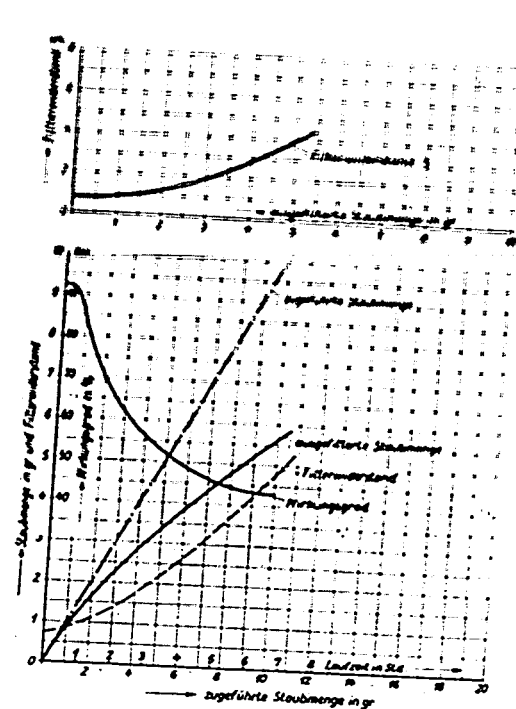


Abb. 6. Staubfilter-Versuche.
7200 g Schlauchgewebe von Ehrich u. Graetz mit 1120 g Öl benetzt.

Tiefe der Packung: 22 mm
Luftgeschwindigkeit: 4,72 m/s
Staubgehalt der Luft: 0,0712 g/m³

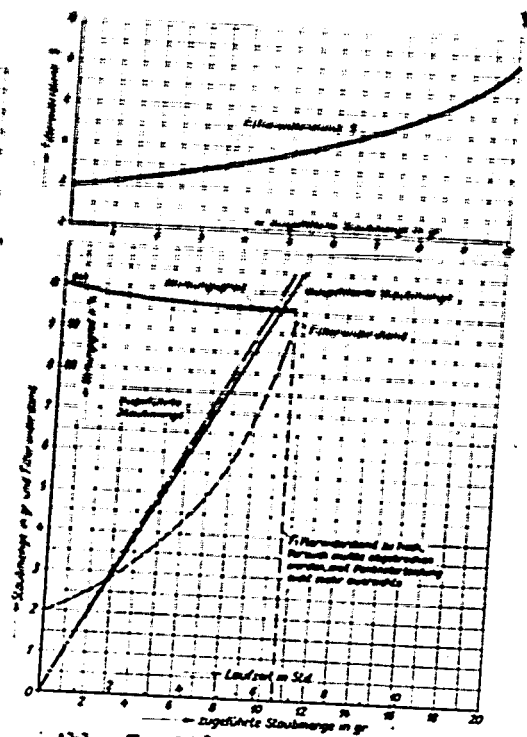
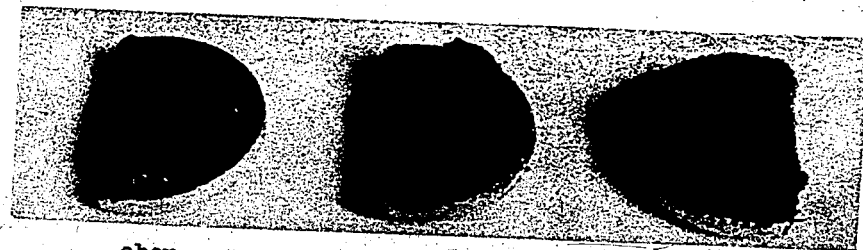


Abb. 7. Staubfilter-Versuche.
Filter-Material: Zellwolle (Teppichfaser 23 Den)

Gew.: 1.760 g trocken
5.425 g Ölbenetzt
Luftgeschwindigkeit: 4,72 m/s
Staubgehalt der Luft: 0,0758 g/m³



oben Mitte unten
Abb. 8 a. Prall-Filter Scheiben (nach dem Versuch).

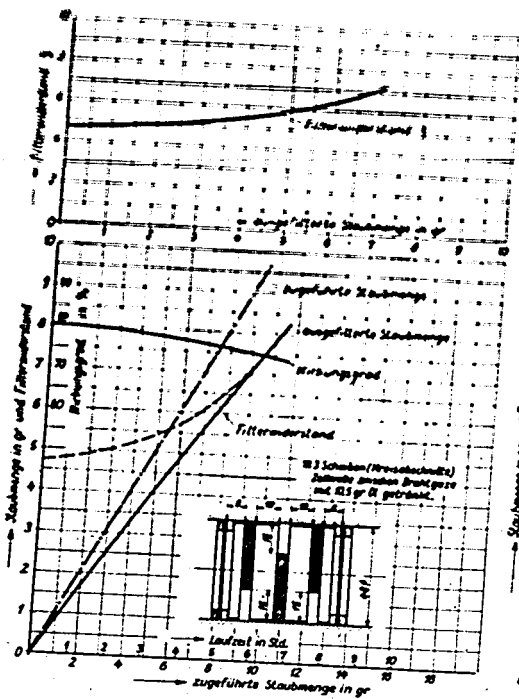


Abb. 8. Staubfilter-Versuche.
 3 Scheiben Zellwolle,
 Scheibenabstand: 10 mm
 Luftgeschwindigkeit:
 4,72 m/s
 Staubgehalt der Luft:
 0.0770 g/m³

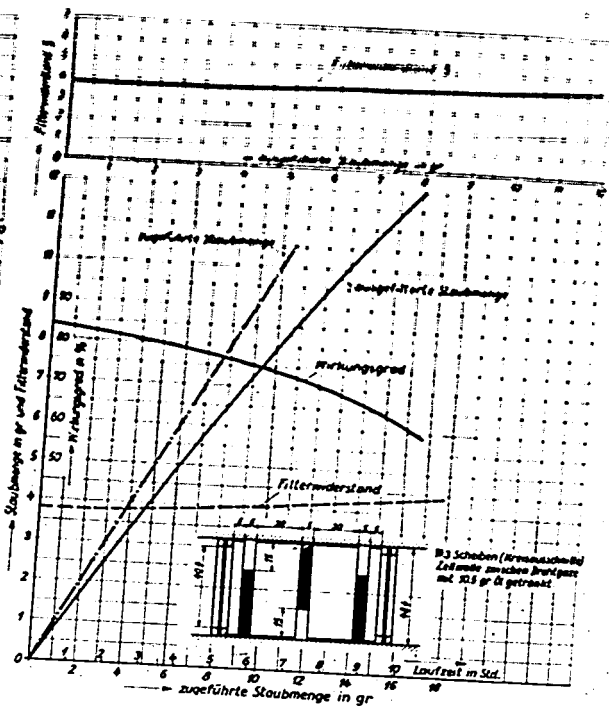


Abb. 9. Staubfilter-Versuche.
 3 Scheiben Zellwolle,
 Scheibenabstand: 20 mm
 Luftgeschwindigkeit:
 4,72 m/s
 Staubgehalt der Luft:
 0.0753 g/m³

Nur zum Dienstgebrauch im Geschäftsbereich des Empfängers

S F 11

000825

Deutsche Kraftfahrtforschung

im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 78

Prüfung der Einwirkung der Treibstoff-Zusatzmittel und ihrer
Verbrennungsprodukte auf die im Motorenbau
verwendeten Metalle

Berichtersteller: Dr. Gerhard Schikorr
Kurt Alex

Mitteilung aus dem Staatlichen Materialprüfungsamt
Berlin-Dahlem

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Verschluss zu halten.

Nur zum Dienstgebrauch im Geschäftsbereich des Empfängers

000826

Deutsche Kraftfahrtforschung

Im Auftrage des

Reichs-Verkehrsministeriums

TECHNISCHER FORSCHUNGSBERICHT

Zwischenbericht Nr. 78

Prüfung der Einwirkung der Treibstoff-Zusatzmittel und ihrer
Verbrennungsprodukte auf die im Motorenbau
verwendeten Metalle

Berichterstatter: Dr. Gerhard Schikorr
Kurt Alex

Mitteilung aus dem Staatlichen Materialprüfungsamt
Berlin-Dahlem

Zur Beachtung!

Dieser Bericht ist bestimmt für die Arbeiten im Dienstgebrauch des Empfängers. Der Bericht darf innerhalb des Dienstgebrauchs nur an Persönlichkeiten ausgehändigt werden, die aus dem Inhalt Anregungen für ihre Arbeiten zu schöpfen vermögen. Verwendung zu Veröffentlichungen (ganz oder teilweise) sowie Weiterleitung an Persönlichkeiten außerhalb des Dienstgebrauchs des Empfängers ist ausgeschlossen. Der Bericht ist unter Ver- schluß zu halten.

A. Einleitung

000827

Im Handel befinden sich eine Zahl von Mitteln, die dem Treibstoff zugesetzt werden sollen, um seine Eigenschaften bei der Verbrennung zu verbessern (z. B. Antiklopfmittel, Mittel zur angeblich besseren Ausnutzung des Energiegehaltes des Treibstoffes u. a.).

Bisher wurde nur die Angriffsfähigkeit des im Treibstoff gelösten Mittels geprüft. Diese Prüfung ist aber nicht ausreichend, und zwar deshalb nicht, weil im praktischen Betrieb die Mittel mitverbrannt werden und die entstehenden Verbrennungsstoffe angreifende Eigenschaften auch dann haben können, wenn das Mittel selbst nicht angreift. So kann das Mittel z. B. organische Stickstoffverbindungen enthalten, die - im Treibstoff gelöst - un- schädlich sind, die jedoch bei der Verbrennung zusammen mit dem ebenfalls bei der Verbrennung entstehenden Wasser Salpetersäure bilden und dann Metalle stark angreifen.

Die Aufgabe der Untersuchung ist es, erstens ein geeignetes Prüfverfahren für die Wirkung der Verbrennungsprodukte der Zusatzmittel auf Metalle auszuarbeiten und zweitens eine Reihe von Mitteln auf ihre Angriffsfähigkeit gegen Metalle in dieser Weise zu prüfen.

Der vorliegende Bericht schildert die Entwicklung des Prüfverfahrens. Die Feststellung der Wirkung einzelner Zusatzmittel soll in weiteren Versuchen erfolgen.

B. Grundsätzliches zur Korrosion durch Verbrennungsgase

I. Korrosion bei hoher Temperatur

Der unmittelbare Angriff der Verbrennungsgase auf Metalle gehört in das Gebiet der Verzunderungserscheinungen und dürfte weitgehend denselben Gesetzen gehorchen. In zwei Beziehungen bestehen jedoch Unterschiede, und zwar:

1. Rußabscheidungen auf den Metallen können eine Hemmung der Korrosion zur Folge haben.
2. Während bei der Verzunderung im allgemeinen Sauerstoff im Überschuß vorhanden ist, enthalten die Treibstoff-Verbrennungsgase nur wenig oder keinen Sauerstoff.

Hierzu ist das Folgende zu sagen:

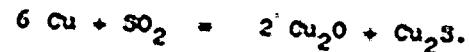
- a) Je höher der Gehalt der Verbrennungsgase an Sauerstoff ist, desto geringer ist die Neigung der Gase zur Rußbildung und damit zur Schutzschichtbildung. Bei Sauerstoff-Überschuß in den Gasen ist also ein starker Angriff zu erwarten. (Ob die Konzentration des Sauerstoffs die Korrosion unmittelbar maßgebend beeinflusst, ist ungewiß.)

b) Der Angriff durch den in den Gasen enthaltenen Sauerstoff wird wahrscheinlich durch den Gehalt der Gase an Schwefeldioxyd stark beschleunigt.

c) Bei Fehlen von Sauerstoff ist keineswegs anzunehmen, daß die Verbrennungsgase unschädlich für Metalle sind. Das in ihnen enthaltene Schwefeldioxyd selbst kann vielmehr z. B. mit Kupfer bei hoher Temperatur nach folgender Gleichung reagieren:



oder vielleicht sogar nach



Wenn auch der Gehalt der Verbrennungsgase an Schwefeldioxyd sicher nur sehr gering ist, so kann er wegen der großen Mengen der im Laufe der Zeit entstehenden Gase grundsätzlich doch sehr beträchtlich werden. (Bei einem Gehalt des Treibstoffes von 0,01 % Schwefel könnte bei vollständiger Umsetzung nach der zweiten Gleichung von jedem Liter verbranntem Treibstoff etwa 1 g Kupfer zerstört werden.)

II. Korrosion bei niedriger Temperatur

Während die soeben genannten Verhältnisse in Motorzylindern und den anschließenden Teilen der Auspuff-Leitungen vorliegen, können am Ende der Auspuff-Leitungen gänzlich andere Bedingungen wirksam sein, und zwar im besonderen dann, wenn die Gase so gekühlt werden, daß Kondensation oder nahezu Kondensation des in den Gasen vorhandenen gasförmigen Wassers, das sich bei der Verbrennung gebildet hat, eintreten kann. Die hierbei auftretende Korrosion ist ein Sonderfall der atmosphärischen Korrosion. Im allgemeinen wird sich das Verbrennungswasser in den Auspuffleitungen nicht kondensieren, denn wenn der Wagen läuft, werden die Leitungen weit über 100° heiß. Wenn aber die Wagen nur kurze Strecken fahren, ist Wasserkondensation möglich. Stehen solche Wagen dann mehrere Tage in der Garage, so ist ein Rost-Angriff möglich.

Eine weitere Möglichkeit zur Kondensation von Verbrennungswasser in der Auspuffleitung ist bei Einbau von Heiztöpfen gegeben. Diese haben bekanntlich den Zweck, die Wärme der Auspuffgase zur Heizung des Wagen-Innern auszunutzen. Wenn man hierbei die Wärmeausnutzung zu weit treibt, kann sich bereits im Heiztopf das Verbrennungswasser kondensieren und sehr starke Korrosionserscheinungen zur Folge haben. Bild 1 zeigt bei A ein Rohr in einem Heiztopf, das völlig zerfressen ist. In dem betreffenden Fall führten die aus dem Heiztopf durch das Rohr in das Wagen-Innere dringenden Verbrennungsgase den Tod eines Menschen herbei.

III. Grundsätzliches zur Prüfung der Korrosion

durch Treibstoff-Verbrennungsgase

Naturgemäß ist die Angriffsfähigkeit der Treibstoff-Verbrennungsgase und der Treibstoffe selbst nicht miteinander gleich zu setzen. Es kann zwar durchaus vorkommen, daß ein an sich stark

angreifender Treibstoff auch stark angreifende Verbrennungsgase bildet, was z. B. für Treibstoff gilt, der sogenannten aktiven Schwefel enthält. Andererseits kann aber ein Treibstoff an sich metallunschädlich sein, aber doch Verbrennungsgase bilden, die stärker angreifen als die Verbrennungsgase anderer, an sich ebenfalls unschädlicher Treibstoffe. Das dürfte z. B. für Treibstoffe mit einem Gehalt an inaktiven Schwefel zutreffen, der beim Verbrennen genau so in Schwefeldioxyde übergehen kann wie aktiver Schwefel. Ähnliches gilt für Treibstoffe, denen organische Mittel zugesetzt wurden (vgl. S. 1, Einleitung).

Es ist daher erforderlich, daß die Angriffsfähigkeit der Treibstoff-Verbrennungsgase unmittelbar geprüft wird. Derartige Prüfungen haben nun den Mangel z. T. sehr schlechter Reproduzierbarkeit, was auf den nur schwer übersichtlichen Veränderungen der Betriebsbedingungen beruht. Man findet mitunter bei Versuchen, die - wie man glaubt - völlig gleichartig ausgeführt wurden, Werte, von denen der eine das Zehnfache des anderen beträgt. Diese Unsicherheit macht es zunächst unmöglich, zu entscheiden,

1. welcher von zwei Treibstoffen stärker angreifende Verbrennungsgase bildet,
2. ob im Laufe der Korrosion sich die Korrosionsgeschwindigkeit infolge der Bildung von Schutzschichten aus Korrosionsprodukten verringert.

Die erste Schwierigkeit kann nur durch größere Genauigkeit beim Einhalten der Versuchsbedingungen überwunden werden (bei der im nächsten Abschnitt beschriebenen Versuchsordnung ist wenigstens die Größenordnung der gefundenen Werte gewährleistet). Gegen die zweite Schwierigkeit gibt es ein sehr einfaches Mittel, das im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem besonders bei der Untersuchung des atmosphärischen Rostens des Eisens, bei dem ja auch unbeeinflussbare Schwankungen der Bedingungen vorliegen, angewendet wurde. Es beruht darin, daß man für die späteren Versuchszeiten stets frische unkorrodierte Proben mit ansetzt. Aus dem Vergleich der Korrosion dieser unkorrodierten Proben mit der Korrosion bereits vorher korrodierten Proben kann man eindeutig erkennen, ob die Korrosionsprodukte vor weiterer Korrosion schützen oder nicht.

C. Versuchsordnung und -ausführung

I. Hauptbestandteile der Versuchsordnung

Für die Versuche wird ein gebrauchter, unten gesteuerter Sechszylinder-Opel-Motor von 1,8 l. Hubvolumen verwendet. Die Versuchsanlage ist in Bild 2 schematisch wiedergegeben. In ihr ist an das Sammelrohr für die Abführung der in den 6 Zylindern entstehenden Verbrennungsgase ein mehrere Meter langes Rohr von

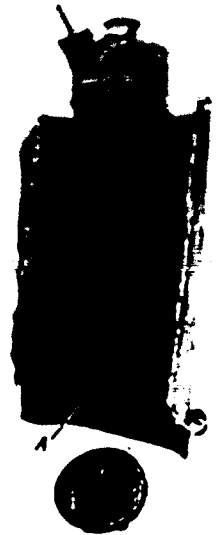


Bild 1. Von Treibstoff-Verbrennungsgasen stark angegriffener Heiztopf

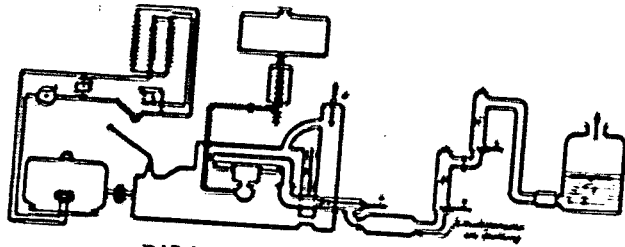


Bild 2. Versuchsanlage

dem sich der Motor befindet, ins Freie. Bei A liegt das Rohr also innerhalb des Raumes, bei B und C an der freien Atmosphäre. Die Angriffsbedingungen entsprechen

- bei A etwa den Verhältnissen im Motor selbst und in den nahe-
liegenden Teilen der Abführungsrohre,
- bei B etwa den normalen Verhältnissen am Auspuff,
- bei C etwa den Verhältnissen am Auspuff, wenn die Gase vorher
durch einen Heiztopf geleitet werden.

Die Temperatur bei A, B und C wird durch das Thermoelement a und die Thermometer b und c überwacht.

II. Nebenbestandteile der Versuchsanordnung

Der Tank besteht aus dem eigentlichen Tank und einem Meßtank, an dem die verbrauchte Treibstoffmenge abgelesen werden kann.

Der Kühler ist ein Lamellenkühler. Das Kühlwasser wird mit einer Pumpe umgewälzt. Da infolge des fehlenden Fahrwindes die Kühlung nicht ausreicht, wird dauernd frisches Wasser durch den Kühler fließen gelassen, wodurch die Temperatur im Kühler, die an dem Thermometer d abgelesen wird, ständig bei 75 ... 80° gehalten werden kann.

Als Bremsvorrichtung ist ein 220 V-Gleichstrom-Generator an-
gebaut. Der in ihm entstehende Strom wird in regelbaren Widerstän-
den in Wärme verwandelt.

Als Ölfang ist zwischen die Versuchsorte A und B ein
Schalldämpfer eingebaut.

Vor Austritt in die Atmosphäre werden die Gase 3 Stunden lang
durch eine Waschflasche geleitet, in der sich etwa 3 Liter Wasser
befinden. Die Analyse dieser Lösung nach Durchleiten der Gase bie-
tet eine leichte Kontrollmöglichkeit des Schwefelgehaltes des
Treibstoffes. In der übrigen Zeit ist die Waschflasche nicht ange-
schlossen.

III. Art und Anordnung der Versuchsproben

Zunächst werden Zylinderkopf-Gußbeisen und Hüttenkupfer^{+) für}

<sup>+) Kupfer wurde aus prüftechnischen Gründen gewählt, da es von
Treibstoff-Verbrennungsgasen besonders leicht angegriffen werden kann.</sup>

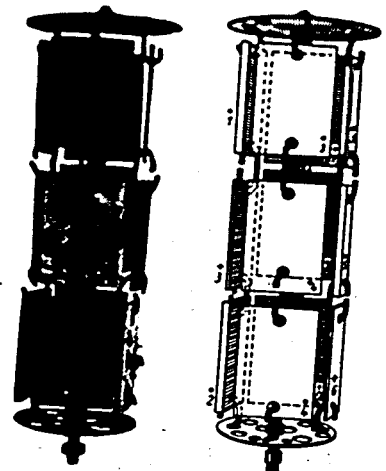
52 mm lichter Weite
angeschlossen, in dem
bei A, B und C
(vgl. Bild 2) die Ver-
suchsproben in einer
unten näher beschriebe-
nen Weise angebracht
sind. Der Abstand zwi-
schen A, B und C
beträgt jeweils etwa
2 m. Zwischen A und
B führt das Rohr aus
dem Versuchsraum, in
dem sich der Motor be-
findet, ins Freie. Bei
A liegt das Rohr also
innerhalb des Raumes,
bei B und C an der
freien Atmosphäre.
Die Angriffsbedingun-
gen entsprechen

die Versuche geprüft. Der Gehalt an Fremdbestandteilen war bei
Gußeisen 3,0 % C (2,6 % Graphit), 2,2 % Si, 0,9 % Mn, 0,2 % P,
0,1 % S, 0,2 % Cu, bei Kupfer 0,14 % Gesamt-Verunreinigungen.

Die Probengröße ist bei Gußeisen 45 x 30 x 4 mm³, bei Kupfer
45 x 30 x 1 mm³. Zur Befestigung enthalten die Proben an ihren
beiden Enden Bohrungen von 4 mm ϕ . Die Proben sind durch einge-
schlagene Nummern gekennzeichnet.

Die Proben werden kettenförmig in einem Gestell angebracht,
das im wesentlichen aus zwei kreisförmigen Siebplatten von 45 mm ϕ
besteht, die von einem in ihren Mittelpunkt senkrecht befestigten
Stab in einem Abstand von etwa 17 cm gehalten werden. Das Ge-
stell und die Haken, mit denen die Proben in ihm und aneinander be-
festigt sind, bestehen aus Flußstahl. (Elementbildung ist wegen
Abwesenheit eines Elektrolyten nicht zu befürchten.) Ein derarti-
ges Gestell mit den darin befindlichen Proben (nach der Einwirkung
der Verbrennungsgase) ist in Bild 3 als Lichtbild wiedergegeben.

Die Proben werden stets für drei
Versuchszeiten angesetzt, und zwar für
jede Versuchszeit zwei Proben. Da mög-
licherweise die Angriffsbedingungen an
den beiden Enden des Gestells nicht
gleichmäßig sind, müssen die beiden
für eine Versuchszeit bestimmten Pro-
ben stets an verschiedenen Enden des
Gestells befestigt werden, da sonst die
Möglichkeit besteht, daß z. B. aus den
gefundenen Werten Schutzschichtbildung
gefolgert wird, während in Wirklichkeit
an der betreffenden Stelle nur schwäche-
re Angriffsbedingungen herrschen. Die
Anordnung der einzelnen Probennummern
ist in Bild 4 wiedergegeben. Paral-
lelproben für eine Versuchszeit sind
1 und 2, 3 und 4, 5 und 6.



IV. Versuchsausführung

Nach vielen Versuchsreihen, die
nicht brauchbare Werte ergaben, wurden
die Versuche folgendermaßen ausgeführt:

Bild 3. Ge-
stell mit Ver-
suchsproben
nach Einwir-
kung der Gase
Bild 4. Pro-
benanordnung
• = Gußeisen
+ = Kupfer

Je 18 Gußeisen- und Kupferproben
wurden entfettet, gewogen und in drei Gestelle eingefügt. Diese
wurden bei A, B und C in das Versuchsrohr geschoben und darin
befestigt. Der Motor war vorher schon in Betrieb gesetzt und bei
Abgabe eines Stromes von 10 Amp. Stärke so lange gelaufen, daß
die Thermometer a, b und c nicht mehr eindeutig stiegen. Die
jetzt herrschenden Temperaturen betragen

bei A	360...425°
bei B	160...190°
bei C	50...90°

Die Temperaturen wurden alle Stunden abgelesen, ebenso die Tempera-
turen des Versuchsraumes und der Außenatmosphäre, ferner die rela-
tive Luftfeuchtigkeit an beiden Orten.

Bei den ersten in dieser Art ausgeführten Versuchsreihen wurden Versuchszeiten von 1, 3 und 5 Stunden gewählt. Die Ergebnisse waren jedoch so schlecht reproduzierbar, daß auf die nähere Beschreibung dieser Versuchsreihen verzichtet wird.

Bei der später gewählten Ausführung, deren Ergebnisse im nächsten Abschnitt beschrieben sind, betragen die Versuchszeiten bis zu 5 Tagen. An jedem Tage wurden die Proben 5 Stunden lang den Verbrennungsgasen in dem Versuchsrohr ausgesetzt. Nach Abstellen des Motors wurden die Proben über Nacht in dem Versuchsrohr belassen.

Die Verteilung der Proben auf die 12 Plätze eines Versuchsgestells (vgl. Bild 5) für die einzelnen Versuchszeiten ist in Bild 5 schematisch dargestellt. In ihm bedeutet jedes mit Punkten versehene Feld eine Gußeisen-Probe, jedes mit Kreuzen versehene Feld eine Kupfer-Probe. Die Länge des Feldes kennzeichnet die Versuchsdauer, seine Lage in Bild 5 die zeitliche Lage. Alles Weitere geht aus Bild 5 unmittelbar hervor.

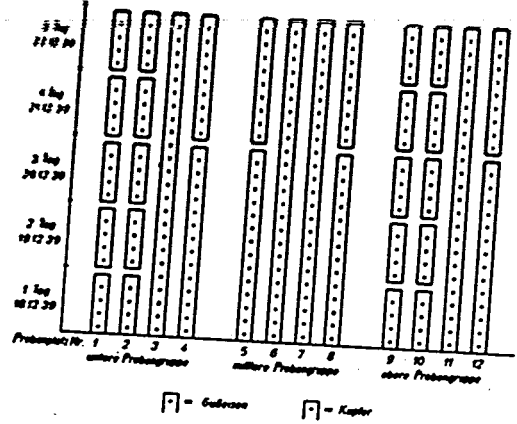


Bild 5. Verteilung der Proben in einem Gestell

Nach Beendigung der betreffenden Einzelversuche wurden die Proben zurückgewogen, nachdem sie mit Hilfe von Alkohol und Azeton von Wasser und Ruß und entsprechend DIN 4850 von anhaftenden Korrosionsprodukten befreit waren.

Über den verwendeten Treibstoff wird bei den Versuchsergebnissen das Notwendige gesagt.

D. Versuchsergebnisse

I. Ergebnisse der Versuche mit Gußeisen

Diese Versuche wurden mit einem aus einer öffentlichen Tankstelle bezogenen Einheitstreibstoff ausgeführt, der rosa gefärbt war und nach Kresol roch, also offenbar Bleitetraäthyl und Braunkohlenschwefelbenzin enthielt. Der Treibstoffverbrauch bei den täglichen 5 Betriebsstunden war etwa 13 Liter.

Außerlich wurde folgendes beobachtet:

An der Versuchsstelle A (360...425°) liefen die Proben stahlblau an und bedeckten sich mit nur wenig Ruß.

An der Versuchsstelle B (160...190°) setzten sich Öl und Ruß auf den Proben ab, die dadurch schwarz gefärbt wurden.

An der Versuchsstelle C (50...90°) wurden die Proben von Wasser, Öl und Ruß naß und schmierig. Mitunter war brauner Rost zu erkennen.

Ein Unterschied im Aussehen der Proben nach den verschiedenen Versuchszeiten wurde nicht beobachtet.

Die gefundenen Gewichtsverluste sind in Bild 6 zeichnerisch dargestellt.

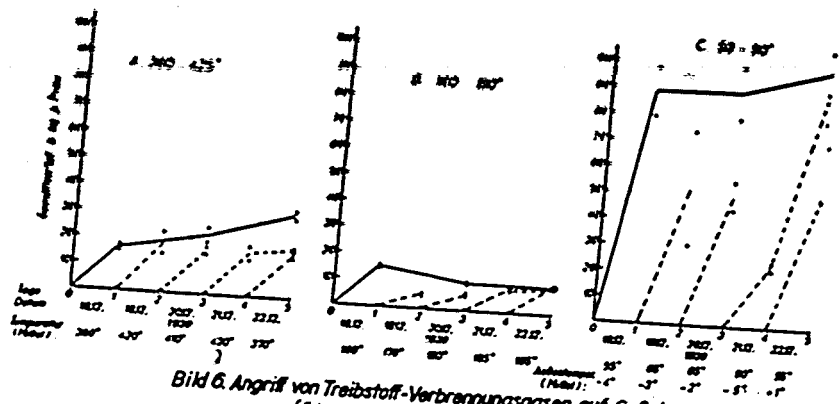


Bild 6. Angriff von Treibstoff-Verbrennungsgasen auf Gußeisen (Schwefel-Gehalt des Treibstoffs: > 0,06%)

Nach diesen Werten läßt sich das Folgende sagen:

1. Zu den Versuchen bei 360...425° (Versuchsstelle A):
 - a) Die gefundenen Werte sind gut reproduzierbar.
 - b) Die Korrosionsgeschwindigkeit bei 5 Tage lang korrodierten Proben ist am 1. Tage etwa 4 mal so hoch wie in den 4 folgenden Tagen. Die am 1. Tage entstehenden Korrosionsprodukte üben also eine deutliche Schutzschicht aus.
 - c) Eine Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit am 2...5. Tag ist nicht zu erkennen. Die Korrosionsgeschwindigkeit bleibt vielmehr ziemlich konstant etwa 1,2 g/m² je Tag Gewichtsabnahme (entsprechend 0,06 mm je Jahr Dickenabnahme⁺).
 2. Zu den Versuchen bei 160...190° (Versuchsstelle B):
 - a) Die Reproduzierbarkeit⁺⁺ der Korrosionswerte der täglich neu angesetzten Proben ist beträchtlich schlechter als bei 360...425°.
- ⁺ Die Dickenabnahme ist in allen Fällen in mm je Jahr auf jeder Probenseite angegeben.
⁺⁺ Unter "Reproduzierbarkeit" ist hier weniger die Übereinstimmung der Einzelwerte an einem Tage als die Wiederholbarkeit der Werte zu anderer Zeit verstanden.

b) Trotz der schlechten Reproduzierbarkeit der Tageswerte läßt sich eindeutig aus den gefundenen Werten schließen, daß die Korrosion in höchstens 3 Tagen so langsam wird, daß ihre Zunahme mit den angewandten Verfahren nicht mehr festgestellt werden kann. Diese starke Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit beruht vermutlich auf der Absetzung von Öl und Ruß auf den Proben, die bei 360...425° nicht erfolgt.

3. Zu den Versuchen bei 50...90° (Versuchsstelle C):

- a) Die Reproduzierbarkeit der Werte an den einzelnen Tagen ist bei dieser Versuchsreihe noch schlechter als bei der vorigen, was vermutlich darauf beruht, daß zu den bei den vorigen Reihen wirkenden Versuchsschwankungen noch das Folgende kommt: Bei 360...425° und bei 160...190° wird die Korrosion wahrscheinlich vorwiegend durch die Verbrennungsgase selbst hervorgerufen. Bei 50...90° aber tritt zu dieser Korrosion noch das atmosphärische Rosten während der Betriebspausen hinzu, das gerade während der Versuchstage sehr stark von der Außentemperatur abhing. Genau lassen sich die Zusammenhänge aus den bisherigen Versuchen nicht erkennen. Immerhin fällt auf, daß bei der tiefsten Außentemperatur (-5°) auch die bisher geringste Korrosion gefunden wurde.
- b) Bei 50...90° können Korrosionen auftreten, die das mehrfache von denen bei 360...425° und 160...190° betragen, was wahrscheinlich darauf beruht, daß bei 50...90° flüssiges Wasser bei der Korrosion mitwirkt.
- c) Die Bildung von Schutzschichten aus Korrosionsprodukten, Öl und Ruß ist noch unklar. Während bei den 5 Tage lang korrodierten Proben die Korrosionsgeschwindigkeit stark abnimmt, nimmt sie bei den 2 Tage lang (am 21.12. und 22.12.1939) korrodierten Proben am 22.12.1939 zu (89 - 23 = 66 mg gegen 50 mg bei nur am 22.12.1939 korrodierten Proben). Es ist anzunehmen, daß weitere Versuche hier Klärung bringen.
- d) Die absolute Größe des Angriffs ist sehr beträchtlich. Sie erreicht bis zu 27 g/m² je Tag, entsprechend 1,4 mm je Jahr.

II. Ergebnisse der Versuche mit Kupfer

Zugleich mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen Versuchen mit Gußeisen wurden in denselben Versuchsgestellten Versuche mit Kupfer ausgeführt (vgl. Bild 5). Die beiden Metalle waren also genau denselben Bedingungen ausgesetzt.

Außerlich zeigten die Kupfer-Proben das folgende Verhalten:

An der Versuchsstelle A entstand auf den meisten Proben eine braune Schicht von Korrosionsprodukten, die in manchen Fällen bläulich erschien. Ruß war auf den Proben nur wenig vorhanden. Bei höheren Temperaturen über 400° haftete die Schicht gut an; unter 400° hingegen blätterte sie ab (vgl. Bild 3). Auch bei den beiden Proben von 5 Tagen Versuchsdauer, auf denen sich am 2., 3. und 4. Tage eine gut anhaftende Schicht gebildet hatte, trat am 5. Tage (370°) wieder Abblätterung ein.

An der Versuchsstelle B wurden die Proben rußig und schmierig. Korrosionserscheinungen waren nicht sichtbar.

An der Versuchsstelle C sahen die Proben ähnlich aus wie bei B, nur daß sich bei C noch Wasser auf den Proben absetzte.

Die gefundenen Gewichtsverluste sind in Bild 7 zeichnerisch wiedergegeben.

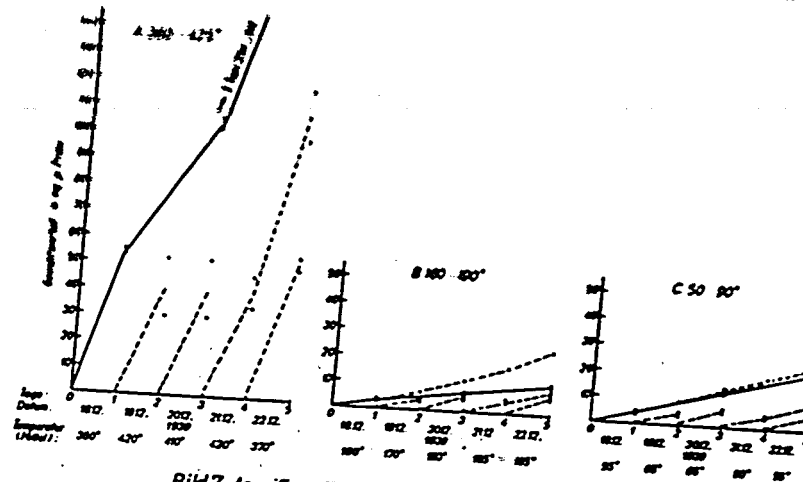


Bild 7. Angriff von Treibstoff-Verbrennungsgasen auf Kupfer
(Schwefel-Gehalt des Treibstoffs: > 0,05%)

Nach diesen Werten läßt sich das Folgende sagen:

1. Zu den Versuchen bei 360...425° (Versuchsstelle A):
- a) Die Tageswerte sind im Mittel ausreichend reproduzierbar, wenn auch beträchtliche Schwankungen der Einzelwerte vorkommen.
- b) Eine eindeutige Schutzschicht-Bildung läßt sich aus den vorliegenden Werten nicht erkennen. Im Gegenteil deuten die meisten Werte darauf hin, daß keine Schutzschichtbildung vorliegt. Es scheint allerdings so, als ob die 3 Tage (18., 19. und 20.12.) korrodierten Proben Schutzschichtbildung aufweisen (Korrosion dieser Proben am 19.12. und am 20.12.: 103 - 54 = 49 mg gegen die Summe der Korrosion der nur am 19.12. und am 20.12. korrodierten Proben: 41 + 41 = 82 mg). Dieser Befund könnte sich aus den oben beschriebenen Abblätterungserscheinungen erklären, denn die genannten 3 Tage korrodierten Proben sind die einzigen, bei denen die Schicht wirksam sein konnte, während bei den anderen mehr als ein Tag korrodierten Proben am letzten Tag die Schicht abblätterte.
- c) Die absolute Höhe der Korrosionsgeschwindigkeit kann sehr erheblich sein und bis zu 23 g/m² je Tag oder etwa 1 mm je Jahr betragen.

2. Zu den Versuchen bei 160...190° (Versuchsstelle B):

- a) Die Reproduzierbarkeit an den einzelnen Tagen ist zwar bei den Extremwerten ziemlich schlecht (am 5. Tage doppelt so hohe Werte wie am ersten Tag), zur Beurteilung aber doch ausreichend.
- b) Die Versuche ergeben eine eindeutige Schutzschicht-Bildung, die vermutlich zu einem wesentlichen Teil auf Öl-Abscheidung zurückzuführen ist. Man kann diese Schutzschicht-Bildung veranschaulichen, wenn man die Einzel-Korrosionswerte vom 1. bis 5. Tag zusammensählt und als fortlaufende Kurven einträgt, wie das in Bild 7 B geschehen ist. Diese Kurve liegt beträchtlich über der Kurve der durchgehend korrodier-ten Proben. Wenn sich auf diesen keine Schutzschicht gebildet hätte, müßte sie sich mit der Kurve der Summe der täg-lichen Einzelwerte decken (vgl. 3 b).
- c) Die absolute Höhe der Korrosionsgeschwindigkeit ist gering. Wegen ihrer bei längerer Versuchsdauer wahrscheinlich noch eintretenden Verringerung läßt sich nur sagen, daß sie weni-ger als etwa 0,7 g/m² je Tag oder 0,03 mm je Jahr beträgt.

3. Zu den Versuchen bei 50...90° (Versuchsstelle C):

- a) Die Reproduzierbarkeit der Werte ist befriedigend.
- b) Eine Schutzschicht-Bildung tritt bei 50...90° nicht auf, was sich daraus ergibt, daß die Kurve der Werte mehrere Tage korrodierter Proben sich mit derjenigen der Summe der Tages-werte nahezu deckt (vgl. 2 b).
- c) Die absolute Höhe der Korrosionsgeschwindigkeit ist mäßig. Sie beträgt etwa 1,7 g/m² je Tag oder 0,08 mm je Jahr.

III. Schwefelbestimmungen in den Verbrennungsgasen

Wie bereits vorn gesagt, wurden die Verbrennungsgase durch destilliertes Wasser in einer Waschflasche geleitet, dessen Schwe-felgehalt nach dreistündigem Durchleiten der Verbrennungsgase und Oxydation mit Bromsalzsäure als Bariumsulfat bestimmt wurde. Am 5. Tage wurden dem destillierten Wasser vor dem Durchleiten etwa 10 cm³ Wasserstoffsperoxyd-Lösung (33 %ig) zugesetzt. Es wurden gefunden:

Am	bei einem Treibstoffverbrauch von	g Schwefel
1. Tage	8,4 l	
2. "	7,2 l	0,81
3. "	7,2 l	0,97
4. "	7,4 l	0,77
5. "	7,7 l	1,06
		4,77

Nach diesen Werten enthält der verwandte Treibstoff mehr als 0,06 % Schwefel.

IV. Ergebnisse einiger Vorversuche mit wahrscheinlich schwefelarmen Treibstoff

Für die Versuchsreihe, die vor der unter D II, III aus-führlich beschriebenen Reihe ausgeführt worden war, war zum größ-falls aus einer öffentlichen Tankstelle stammte und "reinen" Ben- zingeruch hatte. Da dieser Treibstoff sehr viel weniger angriff Vorversuchsreihe ebenfalls beschrieben. Die Ausführung der Versu- che war die gleiche wie bei der Hauptversuchsreihe, nur daß die Versuchsdauer 3 Tage umfaßte und der Motor täglich 6 Stunden in Betrieb war. Am dritten Tage war bei dieser Reihe bereits der wahrscheinlicher stärker schwefelhaltige Treibstoff verwendet wor- den, mit dem auch die in den vorigen Abschnitten beschriebenen Ver- suche ausgeführt worden waren, und zwar in einem Gemisch mit dem zuerst verwendeten Benzin von etwa 8 : 1, so daß der Schwefelge- halt des an diesen Tage verwendeten Benzins mehr als 0,05 % be- der Hauptversuchsreihe. Abblätterungen der Korrosionsprodukte bei Kupfer wurden jedoch nicht beobachtet.

Die gefundenen Werte sind in Bild 8 und 9 wiedergegeben. Sie bestätigen die Ergebnisse der Hauptversuchsreihe in allen we- sentlichen Punkten. Sehr auffällig ist aber der viel stärkere An- griff bei der Hauptreihe, den Gußeisen bei niedriger und Kupfer bei hoher Temperatur erleidet, während in den anderen Fällen die Korro- der Vorversuchsreihe am 3. Tage, an dem ein Gemisch der beiden Treibstoff-Arten verwendet wurde, der Angriff auf Eisen bei tiefer- eren und auf Kupfer bei hoher Temperatur stärker als an den beiden ersten Tagen.

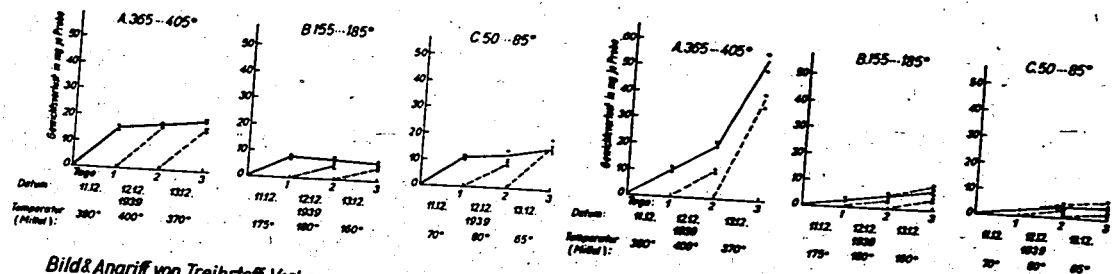


Bild 8. Angriff von Treibstoff-Verbrennungsgasen auf Gußeisen (Treibstoff am 1. u. 2. Tag: wahrscheinlich Schwefel-arm am 3. Tag: >0,05 % Schwefel)

Bild 9. Angriff von Treibstoff-Verbrennungsgasen auf Kupfer (Treibstoff am 1. u. 2. Tag: wahrscheinlich Schwefel-arm am 3. Tag: >0,05 % Schwefel)

+) Treibstoff-Analysen waren im ursprünglichen Versuchsplan nicht vorgesehen, sollen jedoch in Zukunft ausgeführt werden.

Hieraus ergibt sich eine starke Abhängigkeit des Angriffs durch Treibstoff-Verbrennungsgase von dem Treibstoff, und zwar gerade in den Fällen besonders starken Angriffs. Dementsprechend scheint es zur Erkennung und Verhütung möglicher Schäden durch Treibstoff-Verbrennungsgase erforderlich, grundsätzlich die Abhängigkeit des Angriffs dieser Gase auf Metalle von der Art des Treibstoffs zu untersuchen.

E. Bedeutung der beobachteten Erscheinungen für die Praxis

Zwei der im vorigen Abschnitt beschriebenen Erscheinungen können eine beträchtliche Bedeutung für die Praxis haben, und zwar der Angriff des Eisens bei niedriger Temperatur und der Angriff des Kupfers bei hoher Temperatur.

Über den Angriff des Eisens bei niedriger Temperatur (Zerstörung von Heiztöpfen und Auspuffrohren) ist das Erforderliche bereits S. 2 und S. 3+) gesagt.

Der Angriff des Kupfers bei hoher Temperatur kann an zwei Stellen zu Schäden führen, und zwar 1. an dem Kupferblech der Dichtung zwischen Zylinderblock und Zylinderkopf, und 2. an den Ventil-Führungsbuchsen, die häufig aus Rotguß bestehen. Das Kupferblech der Dichtung ist mitunter nur 0,1 mm dick. Es ist also denkbar, daß bereits nach einem Monat Betriebsdauer dieses Blech durchgefressen wird, was Undichtigkeiten der Zylinder und der Ventile (durch hineingelagerte Asbestfasern) zur Folge haben könnte. An den Ventil-Führungsbuchsen ist zwar auch ein Angriff zu erwarten, doch kann dieser kaum zu beträchtlichen Schädigungen führen.

Allgemein ist hierzu noch das Folgende zu sagen:

1. Da im Zylinder die Temperatur während des Betriebes fast immer höher ist als 400° , ist es wohl möglich, daß infolge besserer Schutzschicht-Bildung aus Korrosionsprodukten im Zylinder der Angriff geringer ist als bei 400° .
2. Die starken Angriffe treten offenbar nicht bei allen Treibstoff-Arten auf, sondern vermutlich nur bei solchen mit hohem Schwefelgehalt.

F. Zusammenfassung

Es wird eine Versuchsanordnung beschrieben, bei der der Angriff strömender Treibstoff-Verbrennungsgase auf Metalle bei etwa 400° , 180° und 70° leicht zahlenmäßig verfolgt werden kann. Als

(+) Bei Stahl sind nicht wesentlich andere Erscheinungen zu erwarten als bei Gußeisen. Versuche mit Stahl sind vorgesehen.

Metalle wurden Gußeisen und Kupfer verwendet. Über den Angriff der Gase von handelsüblichen Treibstoffen auf diese Metalle wurde das Folgende gefunden:

1. Gußeisen wird bei etwa 400° mäßig angegriffen. Die anfangs immerhin beträchtliche Korrosionsgeschwindigkeit nimmt nach einem Tag auf etwa 0,06 mm je Jahr ab.

Bei etwa 180° wird der Angriff bald so gering, daß er nicht mehr festgestellt werden kann.

Bei etwa 70° kann der Angriff hingegen sehr beträchtlich werden und bis zu 1,4 mm je Jahr betragen.

2. Kupfer kann bei etwa 400° sehr stark angegriffen werden. Die Korrosionsgeschwindigkeit kann bis zu etwa 1 mm je Jahr betragen. Eine eindeutige Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit infolge Schutzschicht-Bildung aus Korrosionsprodukten tritt nicht ein.

Bei etwa 180° beträgt der Angriff etwa 0,03 mm, bei 70° etwa 0,08 mm je Jahr.

3. Die Art des Treibstoffes, im besonderen sein Schwefelgehalt, scheint für den Angriff auf Eisen bei 70° und den Angriff auf Kupfer bei 400° eine große Rolle zu spielen. Die unter 1 und 2 genannten sehr starken Angriffe sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß der für diese Versuche verwendete Treibstoff (handelsüblicher Einheitstreibstoff Dezember 1939) besonders stark schwefelhaltig war.

Die Versuche werden fortgesetzt.

124

VAK

Versuchsanstalt
für
Schiffbau
Technische Hochschule
Berlin

Auftrags-Nr. 2695

SF 12

Reg.-Nr.

341

Reichsamt für Wirtschaftsprüfung
Vierjahresplaninstitut für Kraftfahrzeuge
an der Technischen Hochschule Berlin.

000834

Zwischenbericht
über die
Erprobung eines Faserstoff-Ölreinigers.
im Auftrage
des
Reichsluftfahrtministeriums Abtlg. GLC-E 8.

11 Seiten Text
7 Seiten Abbildungen

Sachbearbeiter:
Dipl.-Ing. H. Schwarz

März 1944

VAKVorschau
für
Kraftfahrzeuge
Technische Hochschule
Berlin**Erprobung eines Faserstoff-
Ölreinigers**

- 1 -

000335

Der auf Veranlassung des Reichsluftfahrtministeriums im Vierjahresplaninstitut für Kraftfahrzeuge an der Technischen Hochschule Berlin entwickelte und von der Firma Deutsche Vergasergesellschaft hergestellte Faserstoff-Ölreiniger hat den Zweck, das Motoröl der Kraftfahrzeuge während des normalen Betriebes laufend soweit von den unangenehmsten Verunreinigungen zu befreien, daß außer der Nachfüllung des im Fahrbetrieb verbrauchten Öles ein Ölwechsel überflüssig wird.

Durch einen im Jahre 1942 gemachten Vorversuch an 32 Fahrzeugen wurden eine Reihe schwacher Punkte der Filterkonstruktion aufgezeigt. In dem vom Institut gegebenen Vorbericht Reg.-Nr. 297 vom August - Oktober 1942 wurden die Ergebnisse dieses Versuches festgelegt und angegeben, wie es gelang, die aufgetretenen Schwierigkeiten zu beseitigen.

Aufgrund der vollkommen befriedigenden Schlussergebnisse dieses Vorversuches soll nun durch einen Grossversuch an 160 Fahrzeugen die Einführungsreife des Faserstoff-Ölreinigers nachgewiesen werden. Gleichzeitig soll hierbei bestimmt werden, nach welcher Betriebskilometerzahl ein Auswechseln des Filtereinsatzes bei den einzelnen Fahrzeugen entsprechend dem zur Anwendung gelangenden Kraftstoff notwendig ist.

Durch das Entgegenkommen des Reichspostministeriums, der Berliner Verkehrsbetriebe sowie der Kraftverkehr Sachsen A.G. konnten neben den durch den Chef des Kraftfahrzeugwesens im Reichsluftfahrtministerium bereitgestellten Kraftfahrzeugen eine große Zahl von Kraftfahrzeugbauarten in den verschiedensten Gegenden des Grossdeutschen Reiches mit allen z.Zt. zur Verfügung stehenden Betriebsstoffen in den Versuch einbezogen werden.

72

VfKVorschauwerk
für
Kraftfahrzeuge
In. Ausland: Kraftfahrzeuge
D. 100**Erprobung eines Faserstoff-
Ölreinigers**

- 1 -

000335

Der auf Veranlassung des Reichsluftfahrtministeriums im Vierjahresplaninstitut für Kraftfahrzeuge a. d. Technischen Hochschule Berlin entwickelte und von der Firma Deutsche Vergasergesellschaft hergestellte Faserstoff-Ölreiniger hat den Zweck, das Motorenöl der Kraftfahrzeuge während des normalen Betriebes laufend soweit von den anfallenden Verunreinigungen zu befreien, daß außer der Nachfüllung des im Fahrbetrieb verbrauchten Öles ein Ölwechsel überflüssig wird.

Durch einen im Jahre 1942 gemachten Vorversuch an 32 Fahrzeugen wurden eine Reihe schwacher Punkte der Filterkonstruktion aufgezeigt. In dem vom Institut gegebenen Vorbericht Reg.-Nr. 297 vom August - Oktober 1942 wurden die Ergebnisse dieses Versuches festgelegt und angegeben, wie es gelang, die aufgetretenen Schwierigkeiten zu beseitigen.

Aufgrund der vollkommen befriedigenden Schlussergebnisse dieses Vorversuches soll nun durch einen Grossversuch an 160 Fahrzeugen die Einführungsreife des Faserstoff-Ölreinigers nachgewiesen werden. Gleichzeitig soll hierbei bestimmt werden, nach welcher Betriebskilometerzahl ein Auswechseln des Filtereinsatzes bei den einzelnen Fahrzeugen entsprechend dem zur Anwendung gelangenden Kraftstoff notwendig ist.

Durch das Entgegenkommen des Reichspostministeriums, der Berliner Verkehrsbetriebe sowie der Kraftverkehr Sachsen A.G. konnten neben den durch den Chef des Kraftfahrzeugwesens im Reichsluftfahrtministerium bereitgestellten Kraftfahrzeugen eine große Zahl von Kraftfahrzeugbauarten in den verschiedensten Gegenden des Grossdeutschen Reiches mit allen z.Zt. zur Verfügung stehenden Betriebsstoffen in den Versuch einbezogen werden.

/2

VFKVorschau
Nr.
Kraftfahrzeuge
Technische Beschreibung
Bauart**Erprobung eines Faserstoff-
Ölreinigers**

- 2 -

000536

Durchführung der Versuche:

Für die Durchführung der Versuche wurden bestimmt:

- 1) Durch den Chef des Kraftfahrwesens im Reichsluftfahrtministerium:
 - a) Im Bereich der Kraftfahrtechnischen Schule der Luftwaffe Rudolstadt:
Einbau von 10 Ölreinigern in einige Fahrzeuge der Schule,
 - b) im Bereich des Luftgaukommandos XII:
Ausrüstung von 15 mLkw Henschel Typ '33 mit Diesel-Antrieb,
 - c) im Bereich des Luftgaukommandos VI:
Ausrüstung von 10 mLkw DB L 4500 S mit Diesel-Antrieb sowie 11 mLkw Henschel 33, Nora, Otto-Betrieb.
- 2) Durch das Reichspostministerium:
 - a) im Bezirk Warthegau:
3 Gräf u. Stift - Omnibusse mit Treibgasbetrieb,
3 " " " mit Sauggasbetrieb,
3 Vomag Holzgas-Generator-Fahrzeuge,
10 Phänomen - Granit 25
6 Daimler-Benz 170 V,
 - b) im Bereich Berlin - Potsdam:
5 Phänomen - Granit 25 Otto-Betrieb,
8 " " 30 " " "
1 Mercedes 170 V Anthrazit-Generator-Betrieb.
 - c) im Bereich Karlsruhe:
15 Daimler-Benz O-4000 Diesel Betrieb
 - d) im Bezirk Augsburg:
10 Phänomen-Granit 25 Otto-Betrieb.

/3

010837

- 3) Durch die Berliner Verkehrsbetriebe:
20 Büssing C4 Omnibusse mit Freigasbetrieb.
- 4) Durch die Kraftverkehr Sachsen A.G.:
- 9 Vomag 4,5 Ltr. Holzgas-Generator-Fahrzeuge,
 - 2 leichtere Vomag-Generator-Lkw,
 - 1 Daimler-Benz Anthrazit-Generator-Fahrzeug,
 - 6 Opel-Blitz Otto-Betrieb,
 - 4 schwerere Fahrzeuge mit Otto-Betrieb.

Um ein Verstopfen der Drosseldüse vor allem bei Generatorfahrzeugen zu verhindern, wurde inzwischen das im Vorbericht erwähnte Fingerhutsieb vom Institut in Zusammenarbeit mit der Deutschen Vergasergesellschaft weiter entwickelt. Das Ergebnis dieser Entwicklungsarbeit zeigt Abb. 1. Das feinmaschige Sieb ist im Zapfen einer Ringmutter angebracht, der zugleich als Halter der Drosseldüse dient. Die Ringmutter ist mit zwei Rohranschlüssen für Ölzuführung und Manometerleitung ausgestattet. Der gesamte Ringnippel wird in den unten am Filtergehäuse befindlichen Stutzen eingeschraubt und kann durch Anbringung verschiedener Unterlagscheiben in jeder gewünschten Richtung (der praktischen Ölzuführung entsprechend) angebracht werden. Durch einfache Demontage dieses gesamten Schwenkanschlusses ist eine leichte Reinigungsmöglichkeit von Sieb und Drosseldüse erreicht worden.

Während für den Vorversuch die benötigten Filterbeutel vom Institut in Einzelanfertigung hergestellt wurden, war dies für den Grossversuch nicht mehr möglich. Durch das Institut wurde zur Anfertigung der benötigten Filterbeutel die Privat-Industrie herangezogen. Die Fa. Bellmann u. Co. in Berlin und die Fa. Hutter u. Schrantz in Wien erklärten sich bereit, die Fertigung der nötigen Filtereinsätze auf vorhandenen oder neu konstruierten Pressen zu übernehmen.

VFAKVersuchsanstalt
für
Kraftfahrzeuge
Technische Universität
München**Erprobung eines Passatstoff-
Ölreinigers**

- 4 -

000938

Die ersten dieser serienmäßig gepressten Filtereinsätze von 320 gr. Gewicht wurden im Institut vor dem Einsatz im Grossversuch auf dem Prüfstand untersucht, wobei versucht wurde, Altöl zu reinigen. Nach mehrmaligen vergeblichen Versuchen gelang es beiden Firmen in Zusammenarbeit mit dem Institut die Pressung des Zellwollmaterials so vorzunehmen, daß die Pullung die vorgeschriebenen Maße hinsichtlich Gewicht, Höhe und Durchmesser einheitlich hat und bei Durchtritt des Öles durch diesen Filtereinsatz ein gleichmäßiges geringes Quellen desselben nach allen Seiten eintritt, so daß es fest an den Seitenwänden des Filtergehäuses anliegt, so daß das gesamte Öl durch die Zellwollpackung tritt.

Versuche auf dem Prüfstand ergaben die volle Wirksamkeit dieser Filtereinsätze. Stark verschmutztes Altöl war nach der vorgesehenen Zeit von sämtlichen Schmutzteilen gereinigt.

Ein Teil der für den Großversuch bereitgestellten Ölreiniger-Gehäuse wurde am Zufluss mit einem von der Firma Bellmann vorgeschlagenen Röhrchen versehen (Abb.2), auf welches der Filtereinsatz gedrückt wird, so daß das durchfließende Öl direkt in denselben eintritt, wodurch die Möglichkeit eines seitlichen Vorbeitretens zwischen Filtereinsatz und Gehäusewand weiterhin verringert wird.

Die Einbauvorschriften für die Filtergehäuse am Motor oder unter der Motorhaube wurden von der Deutschen Vergasergesellschaft an die einzelnen Versuchsträger gegeben.

Die Zahl der in die einzelnen Fahrzeugarten einzubauenden Filtergehäuse wurde vom Institut folgendermassen festgelegt:

Fahrzeuge mit Flüssiggas-Betrieb:

bis 3,6 Ltr. Hubraum

über 3,6 " "

1 Filter

2 "

/5

VfKVorschau
für
Kaufverträge
technische Zeichnungen
BauErprobung eines Faserstoff-
Ölreinigers

- 5 -

000839

Fahrzeuge mit Benzin-Betrieb:

bis 2,5 Ltr. Hubraum	1 Filter
über 2,5 - 5,0 Ltr. Hubraum	2 "
" 5,0 Ltr. Hubraum	3 "

Fahrzeuge mit Diesel-Betrieb:

bis 3 Ltr. Hubraum	2 Filter
über 3 Ltr. Hubraum	3 "

Fahrzeuge mit Gas-Betrieb:

Lkw ohne Ausnahme	3 Filter
Pkw " "	2 "

Diese Zahlen wurden entsprechend dem Schmutzanfall bei dem Betrieb mit den verschiedenen Betriebsstoffen aufgrund der im Vorversuch gewonnenen Erfahrungen festgelegt.

Nach vorgenommenem Einbau der Filtergehäuse bei den einzelnen Versuchsträgern wurde durch Sachbearbeiter des Instituts die Regulierung der Durchflussmenge vorgenommen, soweit bei den Versuchsträgern die Möglichkeit vorhanden war, wurde bei den einzelnen Motoren die Ölwanne durch Aus-spülen gereinigt und mit frischem Motorenöl versehen. Die durch jeden Ölreiniger fließende Ölmenge wurde mit Hilfe der dafür vorgesehenen Drosseldüse auf einen mittleren Wert von rd. 30 l/h eingestellt. Dieser Wert muss sich bei be-triebswarmem Motorenöl und einer Fahrgeschwindigkeit von 40 bzw. 60 km/h (für Lkw bzw. Pkw) ergeben. Besonderes Augenmerk ist darauf zu richten, daß der Öldruck die zuläs-sige unterste Grenze nicht unterschreitet. Gegebenenfalls ist er durch Nachstellen des Überdruckventils der Ölpumpe entsprechend zu erhöhen.

VFAKVorschauverf. für
Kraftfahrzeuge
Forschungsinstitut
Stuttgart**Erprobung eines Faserstoff-
Ölreinigers**

- 5 -

000839

Fahrzeuge mit Benzol-Betrieb:	
bis 2,5 Ltr. Hubraum	1 Filter
über 2,5 - 5,0 Ltr. Hubraum	2 "
• 5,0 Ltr. Hubraum	3 "
Fahrzeuge mit Diesel-Betrieb:	
bis 3 Ltr. Hubraum	2 Filter
über 3 Ltr. Hubraum	3 "
Fahrzeuge mit Gaseratorgas-Betrieb:	
Lkw ohne Ausnahme	3 Filter
Pkw " "	2 "

Diese Zahlen wurden entsprechend dem Schmutzanfall bei dem Betrieb mit den verschiedenen Betriebsstoffen aufgrund der im Vorversuch gewonnenen Erfahrungen festgelegt.

Nach vorgenommenem Einbau der Filtergehäuse bei den einzelnen Versuchsträgern wurde durch Sachbearbeiter des Instituts die Regulierung der Durchflussmenge vorgenommen. Soweit bei den Versuchsträgern die Möglichkeit vorhanden war, wurde bei den einzelnen Motoren die Ölwanne durch Auspülen gereinigt und mit frischem Motorenöl versehen. Die durch jeden Ölreiniger fließende Ölmenge wurde mit Hilfe der dafür vorgesehenen Drosseldüse auf einen mittleren Wert von rd. 30 l/h eingestellt. Dieser Wert muss sich bei betriebswarmem Motorenöl und einer Fahrgeschwindigkeit von 40 bzw. 60 km/h (für Lkw bzw. Pkw) ergeben. Besonderes Augenmerk ist darauf zu richten, daß der Öldruck die zulässige unterste Grenze nicht unterschreitet. Gegebenenfalls ist er durch Nachstellen des Überdruckventils der Ölpumpe entsprechend zu erhöhen.

VAKVereinigung
der
Kraftfahrzeuge
Technische Hochschule
Dresden**Erprobung eines Paderstoff-
Ölreinigers**

- 6 -

000840

Bei der Einstellung wurden den Versuchsträgern eine Anzahl Protokollblätter übergeben. Ein Muster liegt diesem Bericht als Abb. 3 bei. Ferner wurden eine Reihe von Fläschchen, die besonders gezeichnet und fortlaufend nummeriert waren, überreicht. Diese Fläschchen dienen zur Aufnahme der nach gewissen Betriebs-Kilometern dem Motor zu entnehmenden Ölproben und werden dem Institut zur Vornahme der Ölanalysen laufend zurückgesandt. Bei dem z.Zt. laufenden Versuch werden Ölproben nach jeweils 1000 km bei flüssiggas-, benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeugen entnommen. Bei Fahrzeugen mit Generatorgasbetrieb erfolgt die Entnahme der Ölprobe nach jeweils 500 km, um entsprechend dem höheren Schmutzanfall bei diesen Fahrzeugen ein genaues Bild über die Wirkungsweise des Ölreinigers zu erhalten. Diese Werte wurden vom Institut in die Rubrik: Ölprobe zu entnehmen nach jeweils km im Protokoll vorgeschrieben. Ferner wurde vorgeschrieben, daß die Ölprobe jeweils aus der Rücklaufleitung hinter dem Filter zu entnehmen ist. Die Versuchsträger wurden gebeten, für diesen Versuch bei allen in Frage kommenden Fahrzeugen dieselbe Ölsorte, auch zur Nachfüllung des verbrauchten Motorenöles zu verwenden. Eine Null-Probe der von den einzelnen Versuchsträgern verwendeten Öle ist zur Analyse gegeben.

Die Auswechslung der Filterbeutel wurde entsprechend dem Schmutzanfall je nach dem Betriebsstoff für die Fahrzeuge verschieden festgelegt. Auch bei denselben Betriebsbedingungen wurden die Betriebs-km, nach welchen ein Auswechseln des Filterbeutels vorzunehmen ist, verschieden gehalten, um die obere Grenze für die Wirkungszeit zu ermitteln.

/7

VAK

 Versuchsbericht
 für
 Kraftfahrzeuge
 Technische Hochschule
 Berlin

 Erprobung eines Faserstoff-
 Ölreinigers

- 7 -

000841

Folgende Werte wurden vom Institut aufgrund der Ergebnisse des Vorversuches festgelegt und im Protokoll unter der Rubrik: Filterbeutel ist zu wechseln nach jeweils Betriebs-km, vorgeschrieben:

Platzwagen-Fahrzeuge	5000 und 7500 km
Otto-(Benzin) "	5000 und 7500 km
Diesel-	3000 und 5000 km

Generator-Fahrzeuge

Lkw	500, 1000 und 1500 km
Pkw	1000 und 2000 km

Über die weitere Ausfüllung der Protokolle wurden den Versuchsträgern vom Sachbearbeiter genaue Anweisungen gegeben.

Um bereits vor Eingang der gesamten Analysen der Ölrückstände einen Überblick über die Wirkung der Ölreiniger zu erhalten, wurden von den Ölmengen kleine Proben entnommen und augenscheinmässig auf Schmutzgehalt geprüft. Ferner wurden von diesen Versuchsölen Tropfproben auf Löschpapier gemacht (Abb. 4-7).

Vorläufige Versuchsergebnisse:

Bei der Einstellung des Öldurchflusses ergab sich bei den Phänomen-Motoren die Unmöglichkeit, den verlangten Durchfluss zu erreichen. Die höchsterreichbare Durchflussmenge betrug hier 2 l/h.

Z. Zt. der Fertigung dieses Berichtes liegen dem Institut Ölproben einzelner Versuchsträger vor. Von der Kraftfahrtechnischen Schule der Luftwaffe liegen Ergebnisse von 2 Fahrzeugen mit rd. 3000 km Laufstrecke vor.

/8

VAKVersuchsanleitung
für
Kraftfahrzeuge
Technische Hochschule
Dresden**Erprobung eines Faserstoff-
Ölreinigers**

- R -

JUL 842

Von Luftgaukommando XI liegen noch keine Ergebnisse vor.

Von Luftgaukommando VI wurden insgesamt von 10 Fahrzeugen Ölproben mit rd. 2000 km Fahrstrecke eingereicht.

Von der Reichspost wurden aus dem Bezirk Warthegau Ölproben von 11 Fahrzeugen mit z.Zt. 1000-3000 km Fahrstrecke übermittelt,

aus dem Bezirk Berlin-Potsdam von 14 Fahrzeugen mit 500-4000 km,

aus dem Bezirk Karlsruhe von 12 Fahrzeugen mit 1000-3000 km und dem Bezirk Augsburg von 10 Fahrzeugen mit rd. 2000 km Fahrstrecke übersandt.

Von den Berliner Verkehrsbetrieben liegen Ergebnisse von 19 Fahrzeugen mit 10-15000 km Fahrstrecke vor und von der Kraftverkehr Sachsen A.G. solche von 17 Fahrzeugen mit Fahrstrecken von rd. 5000 km je Fahrzeug.

Die folgenden 12 Probeblättchen zeigen Tropfproben aus dem Versuch:

- Blatt 1:** Opel Blitz-Treibgas mit 2 Filtern nach 3000 km.
- Blatt 2:** Adler Pkw-Benzin-Betrieb mit 1 Filter nach 2500 km.
- Blatt 3:** Phänomen 2,5 Ltr. Treibgas, 1 Filter nach 1500 km,
- Blatt 4:** dasselbe nach 2500 km.
- Blatt 5:** Daimler-Benz 7,7 Ltr. Omnibus, 2 Filter Dieselbetrieb nach 2000 km.
- Blatt 6:** Vomag Holzgas (Imbert) 11,1 Ltr., 3 Filter, nach 3000 km. Wechsel der Filtereinsätze nach jeweils 500 km.
- Blatt 7:** Vomag Holzgas (Imbert) 11,1 Ltr., 3 Filter, nach 4000 km. Wechsel der Filtereinsätze nach jeweils 1000 km.

79

VAK

Versuchsanstalt
für
Kraftfahrzeuge
Kraftfahrzeuge
Kraftfahrzeuge

Erprobung eines Wasserstoff-
Ölreinzigers

- 9 -

000843

Blatt 8:

Vomag Holzgas (Imbert) 11,1 Ltr., 3 Filter,
nach 4000 km. Wechsel der Einsätze nach
jeweils 1500 km.

Blatt 9:

Büssing C4 Omnibus 9,2 Ltr. Flüssiggas,
2 Filter, nach 8000 km. Wechsel der Beutel
nach jeweils 5000 km.

Blatt 10:

Mercedes 1,7 Ltr. LLKW Flüssiggas, 1 Filter,
nach 2500 km.

Blatt 11:

Mercedes 1,7 Ltr. Anthrazit-Generator, 2 Filter,
nach 3000 km. Wechsel des Einsatzes nach
2000 km.

Blatt 12:

Ein neues Öl.

Aus den vorliegenden Analysen werden nachfolgend einige
bemerkenswerte Werte aufgeführt:

E/50	Nz.	Vz.	Wasser	Kraft- stoff	Asphalt %	Kohlen- stoff %	Asche %
1) 9,15	0,16	0,77	Spuren	Spuren	0,03	0,01	0,35
2) 10,11	0,08	0,98	"	"	0,02	0,03	0,14
3) 9,19	0,05	0,10	"	"	0,06	0,08	0,04
4) 13,72	0,53	-	"	"	0,04	0,03	0,07
5) 11,13	0,42	-	"	"	0,02	0,08	0,02
6) 9,14	0,55	-	kaum Sp.	kaum Sp.	0,02	Spuren	Spuren
7) 9,25	0,24	-	"	"	0,07	0,01	0,02

- 1) ist die Ölprobe aus einem Vomag-Holzgas-Kfz. nach 2500 km. Beutelwechsel nach 1500 km.
- 2) Ölprobe aus einem Vomag-Holzgas-Kfz. nach 2250 km. Beutelwechsel nach 1000 km.
- 3) Ölprobe aus einem Vomag-Holzgas-Kfz. nach 2500 km. Beutelwechsel nach jeweils 500 km.
- 4) Ölprobe aus einem Vomag-Holzgas-Kfz. nach 5000 km. Beutelwechsel nach jeweils 500 km.

/10

VAK

Vorschau
für
Kaufvertrag
Schweizerischer
BankErprobung eines Faserstoff-
Ölreinigers

- 10 -

000844

- 5) Ölprobe aus einem Vorag-Treibgas Omnibus nach 2200 km.
- 6) Ölprobe des von den Berliner Verkehrs-Betrieben normal verwendeten, im Schlegelapparat regenerierten Oles.
- 7) Öl aus einem Büssing C4 Omnibus nach 8000 km Fahrstrecke. Wechsel des Filtereinsatzes nach 5000 km.

Aus den Tropfproben ist zu ersehen, daß bei treibgas- und benzinbetriebenen Fahrzeugen das Öl nach der angegebenen km-Zahl noch praktisch sauber ist. Auch bei dieselbetriebenen Fahrzeugen hat das Filter den größten Teil des angefallenen Schmutzes aufgenommen. Bei Generatorenfahrzeugen, bei welchen der Einsatz nach 1500 km Fahrstrecke gewechselt wurde, zeigt sich starke Verschmutzung des Oles. Bei solchen, bei welchen der Einsatz nach 1000 km Fahrstrecke gewechselt wurde, ist die Verschmutzung des Oles noch als erträglich anzusehen, während bei einem Wechsel nach jeweils 500 km Fahrstrecke fast alle anfallenden Schmutzteilchen vom Filtereinsatz zurückgehalten werden. Bei den Phänomen-Motoren zeigt sich, daß der Durchfluss zu gering ist. Die im Betrieb anfallenden Schmutzteilchen können nicht vom Einsatz zurückgehalten werden, da Schmutzanfall und Durchflussgeschwindigkeit nicht im entsprechenden Verhältnis stehen. Zu denselben Ergebnissen kommt man bei Betrachtung der Analysen. Einem Aschegehalt von 0,35% bei Filtereinsatzwechsel nach 1500 km Fahrstrecke beim Generatorbetrieb steht ein solcher von 0,14 % bei Filterbeutelwechsel nach 1000 km Fahrstrecke gegenüber.

Der Aschegehalt der Öle des Generator-Fahrzeugs bleibt unter 0,1 % bei Filtereinsatzwechsel nach jeweils 500 km Fahrstrecke auch noch nach einer Betriebszeit von 5000 km, woraus ersichtlich ist, daß der Filtereinsatz in der Lage ist, die Verschmutzung des Oles, die im Fahrbetrieb von rd. 500 km eintritt, voll aufzunehmen.

/11

VAK

Vorschau
für
Kraftfahrzeuge
Technische Hochschule
Dresden

Erprobung eines Pasterstoff-
Ölreinigers

- 11 -

000845

Eine Gegenüberstellung der Analysen 6 u. 7 ergibt, daß im treibgasbetriebenen Fahrzeug nach rd. 9000 km Fahrstrecke das Öl immer noch einem regenerierten Öl gleichwertig ist. Bei zwei Fahrzeugen der Kraftfahrtechnischen Schule der Luftwaffe traten Motorschäden auf. Ob dieselben evtl. auf zu geringen Öldruck nach Einbau der Filter zurückzuführen sind, ist wahrscheinlich, aber nicht mit Bestimmtheit zu sagen.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse werden durch das Institut die Phänomen-Fahrzeuge aus dem Versuch gezogen, um Schäden an den Motoren zu vermeiden. Bei den Generatorfahrzeugen, bei denen bisher der Filtereinsatz nach 1500 km gewechselt wurde, wurde der Wechsel auf 500 km Fahrstrecke herabgesetzt.

Im übrigen zeigen die bisherigen Ergebnisse, daß das Filter eine ausreichende Reinigung des Motoröles auch unter den schwierigen Bedingungen des Generator-Betriebes ermöglicht. Ein Unterschied in der Wirkung der von der Firma Bellmann hergestellten Einsätze gegenüber denen von der Firma Hütter u. Schrantz ist nicht zu bemerken.

Eine Verstopfung eines Siebes oder einer Düse ist bisher nicht gemeldet worden. Auch ein Schaden an Armaturen, Rohrleitungen oder Schläuchen ist bisher nirgends aufgetreten.

Berlin-Charlottenburg, den 15.3.1944
Schw/ML.

Der Leiter des Institutes:
Dr.-Ing.habil. U. Schmidt

U. Schmidt

Der Sachbearbeiter:
Dipl.-Ing. H. Schwarz

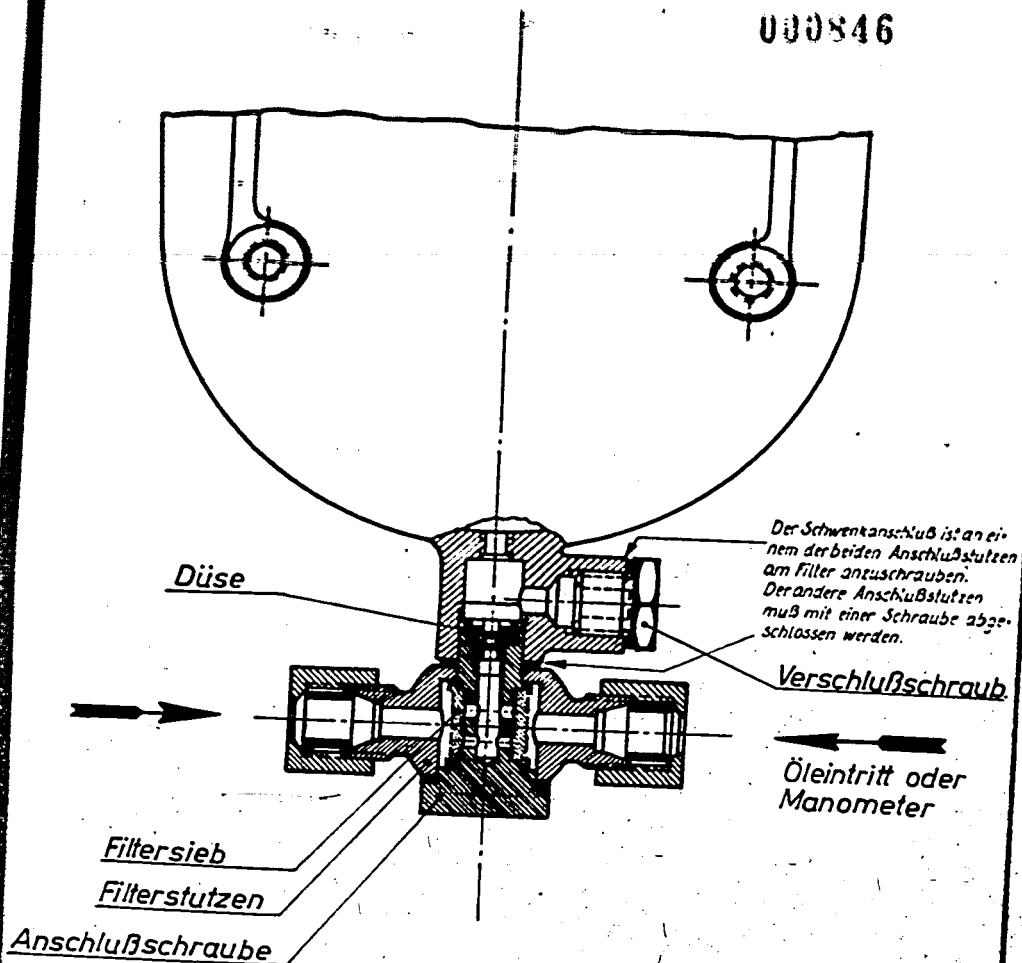
H. Schwarz

VAK

Verschleißteil
für
Kettenschmierung
Technische Zeichnung
Bauform

Abb.1

000846



Schwenkanschluß zum Ölfilter

VAK

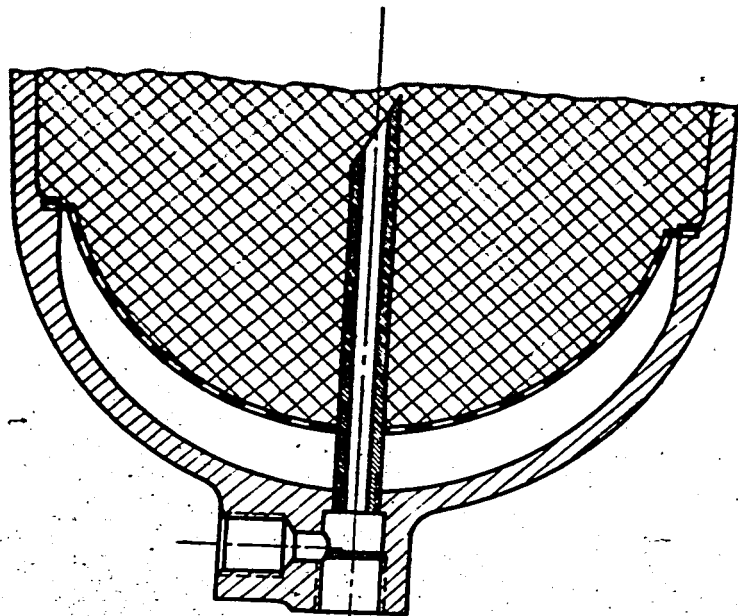
Vereinigung für
Vergasungsapparaturen
und Kraftfahrzeuge
Technische Hochschule
Darmstadt

Dr. ...

60

Abb. 2

010847



Öl-Filter mit eingesetztem Bellmann-Röhrchen

VfK

Vierjahresplan - Institut
für
Kraftfahrzeuge
Technische Hochschule
Berlin

Betrieb mit:		Generator-Anlage	Reiniger-Anlage	Versuchsträger:		Fahrzeug-Art	Motor-Fabrikat	Modell-Nr.	Ölverbrauch Liter pro km	Ölverbrauch Liter pro Stunde	Ölverbrauch Liter pro Stunde	
Filterbeutel ist zu wechseln nach		Reiniger-Anlage		Zahl der Filter		Durchfluß l/h Filter		Filter-Art		Versuchshöhepunkt bei km Stunde		
jeweils		Betriebskm		Ölprobe zu entnehmen nach		Betriebskm		jeweils		Sicht und Düsen sind zu reinigen auch		
Lfd. Nr.	Datum	km-Stand Fahrbeginn	km-Stand Fahrende	gefahrene km	Ölprobe Nr.	Siebe gereinigt*		Düsen kontrolliert*		Führer besatz ge- wünscht	Öl ausch- gefüllt	Bemerkungen
						1	2	3	1	2	3	
Bemerkungen:												
000848												
Abb.3												