

Die Verbrennungskraftmaschine

Herausgegeben von Prof. Dr. Hans List, Graz

Heft 1

Vorwort und Einführung

Von

Prof. Dr. H. List VDI

Graz

Die Betriebsstoffe für Verbrennungskraftmaschinen

Von

Dr. A. v. Philippovich

Berlin

Mit 20 Textabbildungen

Die Gaserzeuger

Von

Dipl.-Ing. K. Schmidt

Oberingenieur der Humboldt-Deutz-Motoren A. G.

Mit 37 Textabbildungen



Springer-Verlag Wien GmbH

1939

Die Verbrennungskraftmaschine

Herausgegeben von

Prof. Dr. **Hans List** VDI
Graz

Heft 1

Vorwort und Einführung
—
**Die Betriebsstoffe für
Verbrennungskraftmaschinen**
—
Die Gaserzeuger



Springer-Verlag Wien GmbH
1939

Vorwort und Einführung zum Gesamtwerk

Von

Prof. Dr. H. List VDI

Graz



Springer-Verlag Wien GmbH

1939

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten**

Copyright 1939 Springer-Verlag Wien

Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Vienna 1939

ISBN 978-3-662-27981-6 ISBN 978-3-662-29489-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-29489-5

Vorwort.

Als ich mir die Aufgabe stellte, ein allgemeines Werk über die Verbrennungskraftmaschinen herauszugeben, das im neueren Schrifttum fehlt, war es mir klar, daß eine auf eigene Erfahrung gegründete Darstellung eines so umfangreichen Gebietes über die Kräfte und Erfahrungen eines einzelnen geht und die Zusammenarbeit mehrerer Verfasser erfordert. Durch eine weitgehende Teilung des Stoffes konnte die Mitarbeit jedes Verfassers auf sein engeres Fachgebiet beschränkt werden, in dem er Erfahrungen aus erster Hand vermitteln kann. Vielfach wurde sie ihm dadurch neben angestrebter, schaffender oder forschender Tätigkeit überhaupt erst ermöglicht.

Die Erkenntnisse und Erfahrungen, die beim Bau von Verbrennungskraftmaschinen im Laufe der Entwicklung angesammelt wurden, sind nur zum kleinen Teil im einschlägigen Schrifttum veröffentlicht. Der weitaus größte Teil liegt im reichen Erfahrungsschatz der Motorenbauunternehmen und ist der Allgemeinheit nicht zugänglich. Es schien mir daher vor allem notwendig, diese Erfahrungen dem Werk in möglichst großem Umfange zu erschließen. Dazu war es erforderlich, Träger derselben, Fachkollegen aus der Praxis des Motorenbaues zur Mitarbeit zu gewinnen. Der besondere Nachdruck, den ich auf die Bearbeitung der nicht vorwiegend theoretischen oder Sonderfragen behandelnden Abschnitte durch Verfasser aus der Industrie legte, hat auch noch die folgenden Gründe:

Derjenige, der Motoren schöpferisch gestaltet oder am Versuchsstand Entwicklungsarbeit leistet, steht dauernd im Wettbewerb nicht nur mit den anderen Unternehmen des eigenen Landes, sondern infolge Ausfuhr und Rüstung mit dem Motorenbau der ganzen Welt. Die gestellten Aufgaben sind klar, Erfolg oder Fehlschlag ist aus wenigen, einfachen Größen ersichtlich. Es ist daher unmöglich, den Schwierigkeiten auszuweichen, die sich dem eindeutig bestimmten Fortschritt entgegenstellen. Die Mittel, durch welche er erzwungen wird, sind gleichgültig, die geistvollsten Überlegungen, Erkenntnisse und Untersuchungen sind für das Unternehmen wertlos, wenn sie nicht den Erfolg bringen, wenn nicht Brennstoffverbrauch, Leistung, Betriebssicherheit und Baustoffaufwand dadurch günstiger werden. Ein zäher Kampf muß um jeden Schritt nach Vorwärts geführt werden. Dabei entscheidet nicht der Umfang des Wissens, sondern sein richtiger Einsatz, das Gefühl für die Vorgänge in der Maschine und richtige Schlüsse aus den Erfahrungen. Der in der Entwicklung tätige Fachmann ist zur Anspannung aller seiner Kräfte gezwungen. Er muß alle Hilfsmittel benutzen, die ihm der neueste Stand seines Fachgebietes bietet, und wird daher ständig auf diesem Umschau halten nach neuen Erkenntnissen und Erfahrungen.

Aus diesen Gründen wird er dem, der sich mit dem Rüstzeug des Motorenbaues ausstatten will, ein guter Führer sein, der ihm nicht nur die eigenen Erfahrungen vermittelt, sondern ihm auch aus der Fülle dessen, was Entwicklung und Forschung bietet, die zweckmäßigste Auswahl treffen läßt. Bei dieser wird er Wesentliches vom Unwesentlichen zu trennen vermögen, die einzelnen Erkenntnisse, Theorien und Erfahrungen in einer gewissen Perspektive sehen und vor allem das in den Vordergrund stellen, was beim Bau von Maschinen wesentlich und wichtig ist.

Der Motorenbau hat während seiner Entwicklung mehrere Abschnitte durchlaufen. Im ersten wurden die grundlegenden Gedanken gefaßt, die Arbeitsverfahren im wesentlichen festgelegt und betriebsbrauchbar, aber keineswegs am günstigsten in den ersten Maschinen verwirklicht. Der Fortschritt war zu dieser Zeit an das Erfinden grundsätzlich neuer Lösungen und an mühevoll, tastendes Versuchen gebunden, durch welches die wesentlichsten Zusammenhänge geklärt wurden. Theoretische Erkenntnisse und Verfahren hatten dabei nur geringe Bedeutung.

Im heutigen Stand der Entwicklung ist das Grundsätzliche im allgemeinen entschieden. Die mit den Arbeitsverfahren erreichbaren Ziele wurden theoretisch abgesteckt und dabei gefunden, daß die neuzeitliche Maschine ihnen schon sehr nahegekommen ist. Sprunghafte Verbesserungen sind demzufolge nicht zu erwarten, wohl aber Verfeinerungen in der Durchführung der Arbeitsverfahren und in der Ausführung der Maschine. Ferner gewinnen Sonderfragen, wie z. B. die Anpassung von Motor und Brennstoff zur Erweiterung der Brennstoffgrundlage, an Bedeutung.

Die Forschung, die anfänglich ein vom Motorenbau nahezu unabhängiges Dasein geführt hat, steht jetzt in enger Verbindung mit ihm. Die Erkenntnisse, die sie in mühevoller Kleinarbeit gesammelt, die theoretischen Verfahren, die sie entwickelt hat, finden zunehmende Anwendung im Motorenbau. Denn viele Vorgänge in der Maschine lassen sich bereits rechnerisch mit genügender Wirklichkeitstreue erfassen und vielfach ist es möglich, auf theoretischem Wege die Grenzen des Erreichbaren festzulegen und die Ausichten von neuen Richtungen in der Entwicklung zu beurteilen. Es durfte daher, wie im wirklichen Motorenbau, so auch in einem Abbild desselben, wie es das vorliegende Werk sein soll, die Mitarbeit des Forschers nicht fehlen. Der Darstellung von Forschungsergebnissen und den theoretischen Abschnitten mußte ein breiter Raum gewidmet werden.

Die Bearbeitung eines Gebietes durch mehrere Verfasser erfordert eine zweckmäßige Teilung des Stoffes. Dabei sollen größere Wiederholungen vermieden, Geschlossenheit der einzelnen Teilgebiete und eine raumsparende Darstellung erreicht werden. Das Werk besteht aus zwei ungefähr gleich großen Teilen, von denen der erste die Arbeitsvorgänge, der zweite die Gestaltung umfaßt. In beiden Teilen wurden geeignete Gebiete herausgegriffen und für alle Motorbauarten gemeinsam dargestellt. Auch in dem dann noch verbleibenden Stoff wurde auf Querverbindungen über mehrere Bauarten besonderer Wert gelegt. Die einzelnen Abschnitte wurden im übrigen unabhängig voneinander bearbeitet und sind für sich abgeschlossen. Das findet seinen Ausdruck auch in der Teilung des Werkes in eine größere Zahl von Heften, die einzeln erscheinen und einzeln bezogen werden können. Dadurch wird Benutzung und Bezug erleichtert und es werden unabhängige Neuauflagen einzelner Abschnitte möglich.

Der Inhalt setzt zum Teil die an Hochschulen vermittelten allgemeinen theoretischen und fachlichen Kenntnisse des Maschinenbaues voraus. Aber auch derjenige, der die Theorie nicht beherrscht, wird aus dem reichen Erfahrungsstoff des Werkes Nutzen ziehen können.

Ich freue mich, daß es möglich war, das Werk in einer Zeit entstehen zu lassen, die an alle die im Motorenbau oder in der einschlägigen Forschung tätig sind, ganz außerordentliche Anforderungen stellt. Es ist mir eine angenehme Pflicht, vor allem den einzelnen Verfassern für ihre Mitarbeit zu danken. Weiters schulde ich Dank den Unternehmen, die bereitwilligst Zeichnungen und Erfahrungen zur Verfügung stellten, dem Verlag Springer, der auf meine Pläne und Wünsche verständnisvoll einging und ganz besonders aber Herrn Direktor Dr.-Ing. Dr. h. c. EMIL FLATZ der Humboldt-Deutz-Motoren A. G., der die Freundlichkeit hatte, das Werk in vielfacher Hinsicht zu fördern.

Graz, im Dezember 1938.

H. List.

Zur Einführung.

Von
Prof. Dr. H. List.

In den Wärmekraftanlagen wird die Wärme einem gas- oder dampfförmigen Arbeitsstoff zugeführt, der in Kolbenmaschinen durch statische, in Turbinen durch dynamische Kräfte Arbeit leistet. Bis jetzt ist es noch nicht gelungen, betriebsbrauchbare Verbrennungsturbinen zu entwickeln, es werden daher im nachfolgenden ausschließlich die Verhältnisse bei Kolbenmaschinen behandelt.

Die Arbeitsvorgänge im Zylinder einer Kolbenmaschine sind Zustands- und Mengenänderungen des Arbeitsstoffes, die sich periodisch wiederholen. Die einzelnen Vorgänge reihen sich in bestimmter Folge aneinander, bis nach Durchlaufen eines *Arbeitsspiels* der Ausgangszustand wiederhergestellt wird und eine neue Periode beginnt. Zur Ermittlung der Gesetze, die für die Umwandlung von Wärme in Arbeit in der Maschine gelten, kann man ein Arbeitsspiel gedanklich durch einen Kreisprozeß ersetzen, bei welchem der gleiche Druckverlauf und damit die gleiche Arbeitsleistung wie in der Maschine durch Zustandsänderungen erzielt wird, die allein durch Wärmezufuhr und -abfuhr und durch die Kolbenbewegung verursacht werden, während die Menge des Arbeitsstoffes gleich bleibt. Der Wirkungsgrad η eines solchen Kreisprozesses ist das Verhältnis von geleisteter Arbeit zur zugeführten Wärme. Mit Hilfe der Thermodynamik erhält man dafür einen sehr einfachen Ausdruck:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Darin ist T_1 die mittlere Temperatur der zugeführten, T_2 die mittlere Temperatur der abgeführten Wärme. Gute Wirkungsgrade erfordern demnach Wärmezufuhr bei hoher, Wärmeabfuhr bei tiefer Temperatur.

Die Wärme wird in nahezu allen Wärmekraftanlagen durch Verbrennung erzeugt. Während sie aber in Dampfkraftanlagen von den Verbrennungsgasen im Kessel erst auf den Arbeitsstoff (Dampf) übertragen und durch diesen der Maschine zugeführt wird, entsteht sie in der Verbrennungskraftmaschine durch Verbrennung im Zylinder am Ort und zum Zeitpunkt ihrer Verwendung, sowie unmittelbar im Arbeitsstoff. Die Ausschaltung von Übertragung, Aufspeicherung und Fortleitung macht die Ausnützung der hohen Verbrennungstemperaturen als Zufuhrtemperaturen (T_1) des Arbeitsvorganges möglich, ohne daß durch sie große Wärmeverluste und untragbare Erhitzungen von Bauteilen verursacht würden. Die Verbrennungskraftmaschine hat daher auch einen besseren Wirkungsgrad als alle übrigen Wärmekraftmaschinen.

Aus den thermodynamischen Untersuchungen folgt weiter, daß ein hoher Wirkungsgrad eine kurzzeitige Wärmezufuhr während der Kolbenbewegung in der Nähe des äußeren Totpunktes voraussetzt. Für die Verbrennung steht demnach nur ein kleiner, mit zunehmender Drehzahl abnehmender Zeitraum zur Verfügung.

Voraussetzung für genügend rasche Verbrennung ist innige Mischung eines genügend reaktionsfähigen Kraftstoffes mit Luft. Am einfachsten und besten lassen sich Brenngase und solche flüssige Kraftstoffe mit Luft mischen, die bei der Mischungstemperatur

vollständig verdampfen (Leichtkraftstoffe). Schwersiedende Kraftstoffe (Schwerkraftstoffe) müssen zur raschen Verbrennung im flüssigen Zustand fein zerstäubt werden und günstige Verbrennungsbedingungen vorfinden, wie sie z. B. bei hoher Luftvorwärmung gegeben sind. Bei der motorischen Verbrennung von festen Brennstoffen kann man zwei Wege einschlagen: Durch Vergasung in Gaserzeugern kann der feste Brennstoff in einem Brenngas übergeführt werden, das sich leicht im Motor verbrennen läßt, oder ein geeigneter pulversisierter Brennstoff wird ähnlich wie die flüssigen Schwerkraftstoffe unmittelbar verbrannt. Der Kohlenstaubmotor als Beispiel der zweiten Art wurde in neuerer Zeit zur Betriebsreife entwickelt.

Durch Verdichtung des Arbeitsstoffes im Zylinder (Ladung) vor der Verbrennung ist es möglich, die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr T_1 zu heben. Die Verbrennung beginnt dann bei einer Temperatur, die höher liegt als die, bei welcher die Ladung der Maschine zugeführt wird. Der Temperatursturz der Verbrennungswärme, welcher ihren Arbeitswert vermindert, wird dadurch kleiner. Erst durch die Verdichtung konnten die hohen, überlegenen Wirkungsgrade der Verbrennungskraftmaschine erzielt werden. Bei allen gebräuchlichen Arbeitsverfahren wird die Ladung daher nach dem Einströmen in den Zylinder durch die Bewegung des Kolbens zum äußeren Totpunkt verdichtet. Während und nach der Verbrennung dehnen sich die hocherhitzten und dementsprechend hochgespannten Gase aus und geben dadurch Arbeit an den Kolben ab. Vermindert man diese um die Verdichtungsarbeit und den Arbeitsverlust durch den Ladungswechsel (siehe später), so erhält man die *innere Arbeit* der Maschine, die sich aus dem Indikator-diagramm bestimmen läßt.

Alle Arbeitsverfahren haben diesen gleichen, grundsätzlichen Verlauf. Unterschiede zeigen sie nur in bezug auf Zeitpunkt und Art der Mischung von Kraftstoff und Luft.

Beim *Otto-Verfahren* ist die Mischung im Zeitpunkt der Zündung vollkommen beendet.

Bei Gasmaschinen und Vergasermotoren für flüssige Leichtkraftstoffe erfolgt die Mischung außerhalb des Zylinders. Dieser wird mit einem brennfertigen Gemisch gefüllt. Zunehmende Verbreitung finden heute Einspritzmotoren, bei denen der Leichtkraftstoff vor Beginn der Verdichtung in den Zylinder eingespritzt, dabei zerstäubt und unter Verdampfung mit der Luft gemischt wird.

Das Gemisch wird beim Otto-Verfahren durch eine gesteuerte Einrichtung, fast immer durch einen elektrischen Funken entzündet. Die Flamme pflanzt sich von der Zündstelle aus im Brennraum fort. Die Brenngeschwindigkeiten sollen dabei weder zu klein noch zu groß sein, es ist sowohl schleichende als auch schlagartige, klopfende Verbrennung zu vermeiden. Die Gefahr des Klopfens erfordert eine von der Natur des Kraftstoffes, der Brennraumform und anderen Verhältnissen abhängige obere Begrenzung der Verdichtung, damit aber auch des Wirkungsgrades, der mit der Verdichtung steigt. Das Bestreben des Brennstoffchemikers und des Motorenbauers geht daher dahin, Brennstoffe und Brennraumformen zu entwickeln, die für hohe Verdichtungen geeignet sind und daher hohe Wirkungsgrade geben.

Das Anwendungsgebiet des Otto-Verfahrens umfaßt alle Gasmaschinen und alle Motoren für Leichtkraftstoffe.

Beim *Diesel-Verfahren* wird Luft im Zylinder so hoch verdichtet, daß sie sich über den Zündpunkt des flüssigen Kraftstoffes erhitzt. Dieser wird in der Nähe des äußeren Totpunktes eingespritzt und dabei fein zerstäubt. Er entzündet sich in der heißen Luft ohne besondere Zündeinrichtung. Zerstäubung, Mischung und Verbrennung übergreifen sich. Die Verdichtung ist durch die Brenngeschwindigkeit nach oben nicht begrenzt, da man den zeitlichen Verlauf der Verbrennung durch den der Einspritzung beeinflussen kann. Eine untere Grenze ist durch die Notwendigkeit sicherer Zündung des Kraftstoffes gegeben. Die Verdichtung ist im allgemeinen wesentlich höher als beim Otto-Motor. Dadurch sind die Wirkungsgrade besser, aber auch die Drücke höher als bei diesen. Leichte Verdampfbarkeit des Brennstoffes ist zur Gemischbildung nicht erfor-

derlich, ja wegen der Neigung solcher Brennstoffe zu schlagartiger Verbrennung unerwünscht, der Diesel-Motor verarbeitet daher ausschließlich billige Schwerkraftstoffe.

Zur Mischung steht nur kurze Zeit zur Verfügung. Die Entwicklung der dabei beteiligten Organe ist daher eine außerordentlich schwierige Aufgabe, um so mehr als mit Rücksicht auf Laufruhe, Höchstdruck und Wirkungsgrad ein möglichst beherrschter Verbrennungsverlauf verlangt werden muß.

Bei unvollständiger Verbrennung im Diesel-Motor scheidet sich Kohlenstoff ab. Dieser setzt sich an den Zylindergleitflächen ab und beeinträchtigt dadurch deren Schmierzustand und damit den Betrieb der Maschine. Stärkere Grade von unvollständiger Verbrennung sind demnach im Diesel-Motor unzulässig. Beim Otto-Motor sind die unvollständig verbrannten Stoffe gasförmig, daher für die Gleitflächen unschädlich. Aus diesem Grunde und wegen der ungünstigeren Mischungsverhältnisse erfordert das Diesel-Verfahren höhere Luftüberschüsse als das Otto-Verfahren. In der Einheit des Hubraumes kann daher bei gleicher Drehzahl mit dem Diesel-Verfahren weniger Kraftstoff verbrannt und trotz besseren Wirkungsgrades weniger Leistung erzeugt werden als mit dem Otto-Verfahren. Da bei letzterem außerdem die Drücke niedriger sind, ist es für *Leichtmotoren* besser geeignet. Für *Leichtkraftfahrzeuge* und als *Flugmotoren* werden daher mit nur wenigen Ausnahmen Otto-Motoren verwendet. Das Diesel-Verfahren hingegen beherrscht das Gebiet der Großmaschine und der ortsfesten Motoren für flüssige Kraftstoffe bis herab zu kleinen, aber nicht kleinsten Leistungen. In zunehmendem Maße werden auch schnellaufende Fahrzeug-Diesel-Motoren gebaut. Insbesondere werden Triebwagen und schwere Lastkraftwagen heute fast ausschließlich mit den wirtschaftlich überlegenen Diesel-Motoren betrieben.

Nach der Arbeitsleistung ist die verbrannte Ladung für die Maschine wertlos. Sie muß daher entfernt und durch frische Ladung ersetzt werden. Man bezeichnet diesen Vorgang als *Ladungswechsel*. Er ist von besonderer Bedeutung, denn von der Menge der frischen Ladung, die in den Zylinder gelangt, hängt die Leistung der Maschine unmittelbar ab. Der Ladungswechsel wird nach zwei Verfahren durchgeführt:

Beim *Viertaktverfahren* stehen für den Ladungswechsel zwei Hübe, d. i. eine volle Umdrehung, zur Verfügung. Gesteuerte Aus- und Einlaßöffnungen (Ventile, Schieber usw.) werden nacheinander so freigegeben, daß der Kolben nach dem Arbeitshub zunächst die Abgase während der Bewegung zum äußeren Totpunkt nach außen drängt, beim darauffolgenden Hub frische Ladung, Gemisch oder Luft ansaugt. Infolge des großen Zeitaufwandes kann der Ladungswechsel beim Viertaktverfahren auch bei hohen Drehzahlen recht vollkommen durchgeführt werden. Die Ausnützung der Maschine wird hingegen dadurch herabgesetzt, daß sie während der Hälfte der Zeit als Niederdruckpumpe arbeitet.

Man wendet daher neuerdings dem *Zweitaktverfahren* immer stärkere Beachtung zu. Dem Ladungswechsel werden dabei nur Bruchteile des Verdichtungs- und Arbeitshubes eingeräumt und dadurch die Dauer eines Arbeitsspieles auf eine Umdrehung beschränkt. Demnach wird bei gleicher Drehzahl in gleicher Zeit die doppelte Zahl von Arbeitsspielen wie beim Viertakt erzielt. Die meisten Zweitaktmotoren arbeiten mit Schlitzsteuerung. Ein- und Auslaßöffnungen sind Schlitze in der Zylinderwand, werden vom Kolben gesteuert und in der Nähe des inneren Totpunktes geöffnet. Am Ende des Arbeitshubes werden zunächst die Auslaßschlitze freigegeben. Dadurch entweicht ein Teil der Abgase infolge ihres Überdruckes ins Freie, der Rest wird durch frische Ladung verdrängt. Diese wird vorverdichtet und strömt infolge ihres Überdruckes durch die Einlaßschlitze in den Zylinder. Verluste an frischer Ladung durch die Auslaßschlitze sind während dieses Spülvorganges unvermeidlich. Die zeitliche Zusammendrängung des Ladungswechsels beim Zweitakt erschwert seine erfolgreiche Durchführung insbesondere bei hohen Drehzahlen. Zur Vorverdichtung der Ladung wird eine Spülpumpe benötigt, die nur bei kleinen, billigen Motorbauarten durch Kolbenunterseite und Kurbelgehäuse gebildet werden kann, sonst gesonderte Bauteile erfordert. Dadurch,

daß ein Teil des Verdichtungs- und des Arbeitshubes für den Ladungswechsel benötigt wird, verringert sich die Arbeitsausbeute je Arbeitsspiel gegenüber der Viertaktmaschine mit gleichem Hubvolumen. Bei Otto-Motoren mit äußerer Gemischbildung sind die Ladungsverluste während der Spülung mit Brennstoffverlusten verbunden. Das Zweitaktverfahren ist daher für solche Motoren wenig geeignet und wird bei diesen nur bei kleinsten Leistungen häufiger angewendet.

Der Anwendungsbereich des Zweitaktverfahrens liegt vorzugsweise im Gebiet der Groß-Diesel-Maschinen. Im zunehmenden Maß baut man auch Diesel-Motoren mittlerer und kleiner Leistung als Zweitaktmotoren. Entwicklung und Forschung bemühen sich, das Anwendungsgebiet zu erweitern, vor allem es auch auf den Schnellauf auszudehnen.

Eine Steigerung des Erfolges des Ladungswechsels gegenüber dem soeben beschriebenen „natürlichen“ Ablauf bei Viertakt und Zweitakt ist möglich durch die *Aufladung*. Bei dem von außen ansaugenden Viertaktmotor und dem schlitzgespülten Zweitaktmotor ist der Druck im Zylinder zu Beginn der Verdichtung annähernd gleich dem Außendruck. Bei der aufgeladenen Maschine wird dieser Druck erhöht und damit Ladungsmenge und Maschinenleistung vergrößert.

Beim Viertakt läßt sich die Aufladung ohne grundsätzliche Änderung der Steuerung durch Vorschalten eines Verdichters durchführen. Dieser kann entweder mechanisch von der Maschine oder unter Ausnützung der Abgasenergie durch eine Abgasturbine angetrieben werden.

Der Zweitakt bedarf zur Aufladung einer Ergänzung der Schlitzsteuerung durch zusätzliche, nicht vom Kolben gesteuerte Abschlußorgane oder einer Steuerung von Ein- und Auslaß durch verschiedene Organe. Die Aufladung ist hier baulich im allgemeinen weniger einfach ausführbar als beim Viertakt.

Der zulässigen Aufladung sind Grenzen durch die zunehmende Beanspruchung der Triebwerke, bei Otto-Motoren auch vielfach durch die mit der Aufladung steigende Klopfneigung gezogen.

Im Anschluß an die Besprechung der grundsätzlichen Vorgänge in der Verbrennungskraftmaschine ist es notwendig, auf eine Erscheinung hinzuweisen, die für Bau und Betrieb von allergrößter Bedeutung ist. Es ist der *Wärmeübergang*. Zwischen dem arbeitenden Gas und den begrenzenden Wänden findet ein Wärmeaustausch statt. Würde man die Wände nach außen isolieren, wie dies bei der Dampfmaschine gebräuchlich ist, so würden sie annähernd die zeitlich mittlere Gastemperatur annehmen. Diese liegt so hoch, daß man mit Rücksicht auf Materialfestigkeit und Schmierung der Zylindergleitflächen gezwungen ist, die Wandtemperatur durch Ableitung der Wärme nach außen durch Kühlung abzusinken. Die Kühlung muß um so wirksamer sein, je stärker die Wände durch die Gase beheizt werden. Die übergende Wärme nimmt zu mit der Zahl der Arbeitsvorgänge in der Zeiteinheit, daher mit der Drehzahl. Sie ist beim Zweitakt größer als beim Viertakt und vor allem auch abhängig vom Bewegungszustand der Gase im Zylinder. Der Wärmefluß nach außen bedingt Temperaturgefälle in den Bauteilen, demnach verschiedene Dehnungen und bei starrem Zusammenhang des Materials Wärmespannungen. Diese nehmen im allgemeinen mit dem Wärmefluß und den Wärmewegen zu. Es werden daher bei Großmaschinen, bei Schnellläufern und bei Zweitaktmotoren die mit dem Wärmeübergang zusammenhängenden Forderungen an die Gestaltung der Bauteile besonders vordringlich. Vielfach wird die Dauerleistung der Maschine durch den zulässigen Wärmefluß durch ihre Teile begrenzt.

Gegenüber diesen Auswirkungen des Wärmeüberganges tritt sein Einfluß auf den Wirkungsgrad meist in den Hintergrund, trotzdem der Verlust durch Abströmen wertvoller Wärme von hoher Temperatur keineswegs unbedeutend ist.

Als Kühlmittel verwendet man Flüssigkeiten (vor allem Wasser) und Luft. Es ist besonders bei Luftkühlung oft schwierig, für ausreichenden Wärmeübergang durch entsprechende Gestaltung und Größe der Oberflächen sowie genügende Geschwindigkeit der Luft zu sorgen.

Aus der vorstehenden Darstellung ergibt sich die Einteilung der Abschnitte im ersten Teil des Werkes.

Im Heft 1 werden die Betriebsstoffe und die meist dem Motorenbauer zufallende Gestaltung von Gaserzeugern zur Vergasung fester Brennstoffe behandelt. Es folgen die überwiegend theoretischen Abschnitte, Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschinen in Heft 2 und Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine in Heft 3. Daran schließt sich in Heft 4 die Besprechung des Ladungswechsels an.

In den Heften 5, 6 und 7 werden die Gemischbildungs- und Verbrennungsvorgänge in Gasmaschinen, Benzinmotoren und Diesel-Motoren mit Einschluß der zugehörigen baulichen Einrichtungen behandelt. Um auf die Besonderheiten im Aufbau der Gasmaschinen in den späteren Abschnitten über die Gestaltung nicht wieder zurückkommen zu müssen, wurden diese in Heft 5 aufgenommen, so daß dieses eine in sich geschlossene Darstellung der Gasmaschinen enthält.

Die Gestaltung von Verbrennungskraftmaschinen ist infolge der Eigenart der sich dabei stellenden Aufgaben ein Sondergebiet, das allein mit den Lehren des allgemeinen Maschinenbaues nicht beherrscht werden kann und daher eine eigene Darstellung erfordert.

Die Beanspruchung der von den heißen Gasen bespülten Bauteile ist gekennzeichnet durch gleichzeitiges Wirken von mechanisch und thermisch bedingten Spannungen. Erstere werden durch die mechanischen Kräfte, letztere durch den Wärmefluß, der infolge Wärmeübergang und Kühlung durch den Baustoff geht, hervorgerufen. Ihre gleichzeitige Beherrschung wird dadurch erschwert, daß sich aus beiden Spannungsarten widersprechende Forderungen ergeben. So wird z. B. in dem einfachen Fall der Zylinderwand die mechanische Beanspruchung durch den Innendruck mit zunehmender Wandstärke kleiner, wohingegen die Wärmespannungen mit der Wandstärke zunehmen. Die Verhältnisse werden um so schwieriger, je stärker die Wärmespannungen hervortreten und je weniger einfach die Bauteile geformt sind. Dadurch sind bei thermisch hoch beanspruchten Maschinen, z. B. bei Großmaschinen, besondere Richtlinien bei der Formgebung zu beachten, wie unter anderem nachgiebige Verbindung von Baustoff, der im Betrieb verschiedene Temperaturen annimmt, weitgehende Trennung von kraft- und wärmebeanspruchten Teilen.

Die hohen Drücke in der Maschine bedingen hohe Belastungen der Gleitflächen, für die nur beschränkter Raum zur Verfügung steht. Unter besonders ungünstigen Umständen arbeiten Kolben- und Zylinderflächen bei der *Tauchkolbenbauart*, die bei kleinen und mittleren Leistungen ausschließlich verwendet wird. Diese Gleitflächen haben erhebliche Seitendrucke bei oft großen Gleitgeschwindigkeiten, zwangsläufig knapper Schmierung und starke Wärmewirkung zu übertragen. Außerdem wechseln die Kolbentemperaturen mit der Belastung, so daß die Einhaltung eines gleichmäßigen, günstigsten Spiels zwischen den Flächen unmöglich wird. Die Gestaltung des Kolbens gehört daher zu den schwierigsten Aufgaben im Motorenbau. Bei Großmaschinen kann ein sicherer Betrieb mit Tauchkolben überhaupt nicht mehr erzielt werden. Dem Kolben muß dann die Übertragung des Seitendruckes abgenommen, zur *Kreuzkopfbauart* übergegangen werden.

Aber auch die Beanspruchung der Triebwerkslager liegt weit höher, als dies im allgemeinen Maschinenbau üblich ist. Durch reichliche Schmierung und Kühlung, entsprechende Gestaltung und Verwendung hochwertiger Lagerstoffe, können trotzdem betriebssichere Verhältnisse geschaffen werden.

Die Schwierigkeiten der Gestaltung werden beim Bau von *Leichtmotoren* für Kraftfahrzeuge und vor allem bei Flugmotoren noch wesentlich gesteigert. Knappe Verwendung von Baustoff, daher äußerste Ausnutzung desselben wird hier zur zwingenden Forderung. Die Beanspruchung der Bauteile muß an die zulässigen Grenzen nahe herangerückt, diese selbst müssen soweit als möglich hinaufgeschoben werden.

Bei der Formgebung hat man Sorge zu tragen, daß Spannungsspitzen, z. B. Kerbwirkungen, möglichst vermieden werden und der Baustoff gleichmäßig zur Kraftaufnahme herangezogen wird. Hierzu ist Klarheit über den Spannungsverlauf in den Teilen notwendig, die man sich durch die wirklichkeitsgetreue Festigkeitslehre zu verschaffen sucht. Zu dieser hat der Verbrennungskraftmaschinenbau wesentliche Anregungen gegeben. Weiters sind Blindkräfte, Querfortleitung von Kräften (Biegungsspannungen!) möglichst zu vermeiden und Kraftschlüsse am kürzesten Weg anzustreben. Starke Kraftwechsel, die für den Baustoff ungünstig sind, können vielfach durch Vorspannungen herabgemindert werden. Zu diesen und ähnlichen Richtlinien, die im Leichtmotorenbau besonders betont werden, kommt die Verwendung von hochwertigen Baustoffen. Durch die Forderung nach solchen hat die Verbrennungskraftmaschine befruchtend auf die Entwicklung von Sonderstählen hoher mechanischer, thermischer und chemischer Widerstandsfähigkeit, von Leichtmetallen hoher Festigkeit und von hochbeanspruchbaren Lagermetallen eingewirkt. Von beiden Seiten, von der Gestaltung und von der Entwicklung der Baustoffe, wurden daher die Voraussetzungen für den neuzeitlichen Leichtmotor geschaffen.

Durch die Aufladung erhält das Bestreben nach Erhöhung der zulässigen Triebwerksbeanspruchung besonderen Antrieb, denn jede Erhöhung des zulässigen Zylinderdruckes wirkt sich bei der aufgeladenen Maschine fast im gleichen Verhältnis auf die Leistung aus.

Besondere Aufgaben stellen mehrzylindrige Maschinen. Die Aufteilung der Leistung auf mehrere kleine Zylinder führt zu einer Verkleinerung der thermischen Beanspruchung und zu einer Verringerung des Gewichtes. Außerdem können Rücksichten auf erschütterungsarmen Gang durch den besseren Massenausgleich und auf das gleichmäßige Drehmoment für die Wahl der Mehrzylinderbauart maßgebend sein. Mit Ausnahme von kleinen ortsfesten Maschinen und Krafradmotoren werden fast alle Motoren mehrzylindrig ausgeführt. Bei Mehrzylindermotoren müssen die Schwingungen der Pleuellwelle, die Steifigkeit des Gestells gegenüber den inneren Kräften, der Massenausgleich und die Reguliereigenschaften vor allem beachtet und untersucht werden.

Schließlich ergeben sich auch verschiedene Gestaltungsprobleme aus der Verwendung der Maschine, z. B. bei Flugmotoren, aus der Forderung nach möglichst kleinem Luftwiderstand.

Der zweite Teil des Werkes enthält die Gestaltungslehre. Die Vielzahl der zu behandelnden Fragen, die erforderliche eingehende Besprechung der Bauteile und des Aufbaues der Maschine machten es notwendig, den Umfang dieses Teiles annähernd gleich dem des ersten Teiles zu halten.

Die grundsätzliche Behandlung der besonderen Probleme der Gestaltung von Verbrennungskraftmaschinen wurden in zwei Heften zusammengefaßt und vorangestellt.

In den folgenden zwei Heften sind die Bauteile und der Aufbau von Schnellläufern besprochen. Ein weiteres Heft behandelt den Aufbau und die Sonderteile von ortsfesten und Schiffsmaschinen mittlerer und großer Leistung.

Den Abschluß des Werkes bildet ein Heft mit einer Zusammenstellung von Verbrauchszahlen, Angaben über die Abnutzung von Teilen und ähnlichen Betriebsdaten, die sowohl beim Bau als auch bei der Verwendung der Maschinen von Nutzen sein werden.

Die Betriebsstoffe für Verbrennungskraftmaschinen

Von

Dr. A. von Philippovich
Berlin

Mit 20 Textabbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1939

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	3
A. Die Verbrennung	3
I. Begriff der Verbrennung	3
II. Grund für die Verwendung der Verbrennung zur Energielieferung	4
III. Ablauf der Verbrennung	6
1. Zündung	6
2. Die normale Verbrennung	8
3. Die klopfende Verbrennung	9
IV. Motorbetriebsbedingungen	10
V. Die Verbrennungsluft	12
B. Kraftstoffe	15
I. Gasförmige Kraftstoffe	15
II. Feste Brennstoffe zur unmittelbaren Verbrennung im Motor	18
III. Flüssige Kraftstoffe	19
1. Die chemische Zusammensetzung	19
a) Aufbau der wichtigsten Kohlenwasserstoffverbindungen 20 — b) Alkohole 24.	
2. Die Herstellung	24
3. Flüssige Kraftstoffe für Otto-Motoren	26
a) Anforderungen 26 — b) Besprechung der Eigenschaften 26 — Klopfestigkeit 26 Prüfung der Klopfestigkeit 27 — Heizwert 31 — Flüchtigkeit 31 — Die Dampfdruckbestimmung nach REID 35 — Die Harzbildung und der Harzgehalt 35 — Bestimmung der Lagerbeständigkeit bzw. des Harzgehaltes 36 — Kältebeständigkeit 37 — Korrosion 38 — c) Grenzwerte der Anforderungen an Benzine 38 α) Kraftwagenbenzine 38 — β) Fliegerbenzine 39 — d) Eigenschaften von handelsüblichen Benzin 41.	
4. Flüssige Kraftstoffe für Diesel-Motoren	41
a) Allgemeine Anforderungen 41 — b) Besprechung der Eigenschaften 41. — α) Physikalische Eigenschaften 41 — β) Verbrennungseigenschaften 43 — Heizwert 43 Flüchtigkeit 43 — Zündverhalten 43 — Prüfen der Zündwilligkeit von Dieselmotoren 47 — c) Grenzwerte von Anforderungen an Dieselmotoren 49 d) Eigenschaften von Handelsdieselmotoren 50.	
C. Schmierstoffe	51
1. Die Schmierstoffe	51
2. Die chemische Zusammensetzung der Schmierstoffe	52
3. Allgemeine Anforderungen an die Schmierstoffe	53
4. Besprechung der Eigenschaften	53
Zähigkeit (Viskosität) 53 — Beständigkeit 55 — Ölkohlebildung 56 — Korrosion 56 Wärmeaufnahme (spezifische Wärme) 57 — Besondere Prüfverfahren für Schmierstoffe 57 — Alterung des Öles 57 — Rückstandsbildung 58 — Auswahl der Schmierstoffe 58.	
5. Grenzwerte der Anforderungen an Schmierstoffe	60
D. Zusätze zu Kraftstoffen und Schmiermitteln	60
I. Kraftstoffzusätze	60
1. Erhöhung der Klopfestigkeit	62
2. Steigerung der Lagerbeständigkeit	64
3. Lösungsvermittler	65
II. Schmierölzusätze	65
1. Erhöhung der Kältebeständigkeit	65
2. Verbesserung der Viskositätskurve	65
3. Verbesserung der Schmierfähigkeit	66
4. Hemmstoffe	66
E. Kühlmittel	66
F. Ausblick auf die weitere Entwicklung der Betriebsstoffe	67
Schrifttum	68

Einleitung.

In der folgenden Darstellung der Betriebsstoffe ist der Versuch gemacht worden, die neuesten Erkenntnisse auf diesem Gebiet so zusammenzufassen, daß dem Ingenieur die wichtigsten Beziehungen zwischen Motor und Betriebsstoff verständlich werden. Es konnte dabei ohne eine übermäßige Erweiterung des Rahmens allerdings nicht von den einfachsten Tatsachen der Chemie ausgegangen werden. Aus dem gleichen Grunde mußten eine Reihe von Zusammenhängen zwischen physikalischen Eigenschaften und praktischem Verhalten der Betriebsstoffe unerwähnt bleiben. Auch die allgemeine Prüfung derselben konnte deshalb nicht im einzelnen mit aufgenommen werden. Es war notwendig, sich auf die Besprechung von besonderen Untersuchungsverfahren zu beschränken. Für die einfachen, chemischen Untersuchungen sei auf die knappe, aber sehr gute Zusammenfassung der DIN-Blätter hingewiesen, die sich in den Richtlinien für den Einkauf und die Prüfung von Schmiermitteln, Verlag Stahleisen, Düsseldorf (Neuaufgabe 1938) findet. Die eingehende Beschreibung der für Kraftstoffe üblichen chemischen Prüfverfahren ist in dem Buch von D. HOLDE, „Kohlenwasserstofföle und Fette“, 7. Auflage, Berlin: Julius Springer, 1933, enthalten. Die sehr wichtigen amerikanischen Vorschriften zur Prüfung der Betriebsstoffe sind in dem Band „On Petroleum and Lubricants“ der American Society for Testing Materials (ASTM), Philadelphia 1937, niedergelegt, der jedes Jahr neu erscheint.

Es ist angebracht, an dieser Stelle auch auf einige englische Werke hinzuweisen, denen leider deutsche Gegenstücke fehlen und die alle umfassende Literaturnachweise enthalten:

The Science of Petroleum, Oxford Press 1938, ein vierbändiges Handbuch sämtlicher Fragen des Petroleums von vielen Autoren, herausgegeben von A. E. DUNSTAN.

C. ELLIS: The chemistry of Petroleum Derivatives, New York: The chemical Catalog Cie. 1934, eine ausgezeichnete Übersicht der Chemie des Petroleums. Derselbe: Bd. II, New York: Reinhold Publishing Cie. 1937.

A. W. NASH u. D. A. HOWES: Fuel, its Preparation and Application, London: Chapman and Hall 1935, eine hervorragende Monographie der Kraftstoffe.

A. Die Verbrennung.

I. Begriff der Verbrennung.

Die Definition der Verbrennung wird im folgenden nach G. JUST¹ gegeben:

Unter Verbrennung im engeren Sinne versteht man die Vereinigung beliebiger Stoffe mit gasförmigem, molekularem Sauerstoff, wobei als Verbrennungsprodukte Oxyde der verbrennenden Stoffe entstehen. Als charakteristische Begleiterscheinungen pflegt man Erglühen der Stoffe und Flammenbildung zu erwarten. In der Tat werden diese auch bei allen sich sehr schnell abspielenden Oxydationen durch Sauerstoff eintreten (rasche Verbrennung). Aber auch langsame, ohne wesentliche Temperatursteigerung,

¹ Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Bd. 10, S. 218/219. Jena: Gustav Fischer. 1915.

verlaufende Oxydationen mit gasförmigem Sauerstoff bezeichnet man als Verbrennung, und zwar im Gegensatz zur raschen als langsame Verbrennung. Der Begriff der Verbrennungsvorgänge ist aber in verschiedener Richtung noch zu erweitern. Zunächst müssen solche chemische Prozesse eingeschlossen werden, bei denen der Sauerstoff nicht in molekularer gasförmiger Form an der Reaktion teilnimmt, sondern bei denen er durch sauerstoffhaltige Verbindungen geliefert wird. Es findet in solchen Fällen also lediglich ein Übergang des Sauerstoffs von einem Stoff auf den andern statt. Auch hier unterscheidet man wieder, je nachdem die Geschwindigkeit des Vorganges hohe Temperatur, Erglühen und Leuchterscheinung mit sich bringt oder nicht, zwischen rascher und langsamer Verbrennung. Schließlich sind Verbrennungsvorgänge im weiteren Sinne nicht an die Teilnahme von Sauerstoff gebunden, sondern dieser kann auch vertreten werden durch andere Stoffe, wie etwa das Chlor oder den Bromdampf; allerdings wird hier die Bezeichnung Verbrennung meist nur in den Fällen gewählt werden, in denen der rasche Verlauf die charakteristischen Leucht- und Flammenerscheinungen veranlaßt.

Für die verschiedenen Arten der Verbrennungsvorgänge seien einige Beispiele gegeben. Verbrennung im engeren Sinne kann eintreten, wenn Wasserstoff oder Kohlenoxyd mit Luft oder Sauerstoff gemischt werden. Wird ein solches Gasgemisch angezündet, so verbrennt es ungeheuer rasch unter Flammenerscheinung. Wird es hingegen nur auf etwa 200 bis 300° erwärmt, so findet eine langsame Vereinigung der Gase unter Bildung von Wasser und Kohlensäure statt. Wird z. B. Steinkohle an der Luft entzündet, so brennt sie mit Flamme unter Erglühen, läßt man sie ruhig an der Luft liegen, so nimmt sie Sauerstoff auf und oxydiert sich langsam.

Rasche Verbrennung durch gebundenen Sauerstoff haben wir z. B. beim Thermitverfahren, bei dem Eisenoxyd mit Aluminiumpulver gemischt und angezündet wird. Die ganze Mischung brennt unter lebhafter Feuererscheinung ab, wobei Aluminiumoxyd und metallisches Eisen entstehen. In ähnlicher Weise wird bei der Entzündung des Schießpulvers Kohle durch den Sauerstoff des Salpeters verbrannt. Schließlich sei hier noch das Stickoxyd als sauerstofflieferndes Gas genannt. Bringt man stark glühende Holzkohle oder brennenden Phosphor in eine Atmosphäre reinen Stickoxyds, so erlischt die Flamme nicht, sondern die Verbrennung setzt sich unter intensiver Leuchterscheinung fort, wobei das Stickoxyd den nötigen Sauerstoff hergibt. Auch Schwefelkohlenstoff läßt sich in Stickoxyd auf diese Weise verbrennen.

Als Beispiel für Verbrennungen ohne Sauerstoff seien einige Reaktionen mit Chlor genannt. Legt man ein Stückchen trockenen Phosphor auf einen Eisenlöffel und hält diesen in eine mit Chlor gefüllte Flasche, so entzündet er sich und brennt mit schwach leuchtender Flamme. Es entsteht dahei Phosphorpentachlorid. Auch feines Pulver von Arsen oder Antimon brennt in einer Chloratmosphäre unter Erglühen. An der Luft angezündetes Leuchtgas brennt im Chlor unter starker Rußabscheidung.

Für den Motor interessiert nur die rasche Verbrennung, d. h. also die unter Flammenerscheinung ablaufende schnelle Oxydation geeigneter Stoffe, die so gelenkt werden muß, daß sie möglichst vollkommen zu den Verbrennungsendprodukten führt.

II. Grund für die Verwendung der Verbrennung zur Energielieferung.

Bei der Energiegewinnung für technische Zwecke mittels chemischen Reaktionen sind zwei Faktoren von ausschlaggebender Bedeutung: die mit einer bestimmten Stoffmenge erzielbare Energiemenge und der dafür gezahlte Preis. Untersucht man die möglichen chemischen Reaktionen auf ihre Wärmeentwicklung und vergleicht man die technisch in Frage kommenden, so sieht man, daß von diesen die Verbrennung bei weitem die größten Werte gibt. Einen Ausschnitt aus einer solchen Zusammenstellung zeigt die Zahlentafel 1.

Zahlentafel 1. Energien verschiedener Reaktionen.

Reaktionen	Reaktionswärme		Mol.-Gew.	Bemerkungen
	kcal/kg	kcal/Mol.		
$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{F}_2 = \text{HF}$	3750	75,6	20,1	gelöst
$\text{Li} + \frac{1}{2} \text{F}_2 = \text{LiF}$	5540	143,7	25,94	„
$\text{Na} + \frac{1}{2} \text{F}_2 = \text{NaF}$	3240	136	42,00	„
$\text{K} + \frac{1}{2} \text{F}_2 = \text{KF}$	2370	138,1	58,10	„
$\text{Mg} + \text{F}_2 = \text{MgF}_2$	4235	264,3	62,32	fest
$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{Cl}_2 = \text{HCl}$	1070	39,3	36,47	flüssig
$\text{S 6 fest} + \frac{5}{2} \text{Cl}_2 = \text{SbCl}_5$	350	104,9	299,1	—
$\text{P weiß} + \frac{5}{2} \text{Cl}_2 = \text{PCl}_5$	504	105,0	208,34	fest
$\text{Srh} + \text{O}_2 + \text{Cl}_2 = \text{SO}_2\text{Cl}_2$	666	89,4	139,99	flüssig
$2 \text{Li} + \text{Srh} = \text{Li}_2\text{S}$	2680	123,1	45,88	gelöst
$2 \text{Li} + \text{Srh} + 2 \text{O}_2 = \text{Li}_2\text{SO}_4$	3162	348,5	109,97	„
$\text{Mg} + \text{Srh} + 2 \text{O}_2 = \text{MgSO}_4$	2670	322,8	120,39	flüssig
$2 \text{Na} + \text{Srh} + 2 \text{O}_2 = \text{Na}_2\text{SO}_4$	2310	328,1	142,07	gelöst
$\text{NH}_3 \text{ (Gas)} + \text{HF (Gas)} = \text{NH}_4\text{F}$	957	35,4	37,04	„
Oxydation (Verbrennung).				
$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$ (bei 0° C)	3775	68,52	18	flüssig
$\text{C amorph} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_2$	2215	97,8	44	gasförmig
$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$, berechnet auf H_2	34050	68,52	2,016	flüssig
$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$, berechnet auf 1 kg C	8150	97,8	12	gasförmig
$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$, berechnet auf 1 kg C	2475	29,7	12	„
$\text{Li}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Li}_2\text{O}$	7260	173,6	29,88	fest
$\text{Li}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Li}_2\text{O}$, bezogen auf 1 kg Li_2	12500	173,6	13,88	„

Die Verbrennung kann verschieden erfolgen: indem man den Verbrennungssauerstoff mitführt oder der umgebenden Luft entnimmt. Die Sprengstoffe und Raketentreibstoffe, die den Verbrennungssauerstoff in sich enthalten, liefern, wie Zahlentafel 2 zeigt, nur einen Bruchteil derjenigen Energie, die in dem gleichen Gewicht eines Brennstoffes verfügbar ist.

Zahlentafel 2. Verbrennungsenergien von Sprengstoffen und Brennstoffen je Kilogramm. (Mit und ohne Verbrennungsluft bzw. Sauerstoff.)

Stoff	Oberer Heizwert kcal/kg	Oberer Heizwert kcal je kg Gemisch	
		mit Luft	mit Sauerstoff
<i>Sprengstoffe:</i>			
Sprengelatine	1520	—	—
Nitroglycerin	1450	—	—
Schießbaumwolle (13,4% N_2)	1050	—	—
Pikrinsäure	800	—	—
Trinitrotoluol	720	—	—
Schwarzpulver	600—700	—	—
Knallquecksilber	420	—	—
<i>Brennstoffe:</i>			
Wasserstoff	34050	963	3810
Kohlenstoff	8150	656	2220
Hexan	11501	709	2539
Methylalkohol	5322	714	2130
Äthylalkohol	7068	708	2291
Acetylen	12112	851	2975

Sowohl erzielbare Wärmemenge, dafür anzusetzender Preis, als auch das für Verkehrsmittel sehr wichtige Gewicht sprechen also für die Verwendung der Verbrennung mit Luftsauerstoff als Energie liefernden Vorgang.

Aus den beiden Zusammenstellungen ist zu ersehen, daß auch in Zukunft, wenn man von den noch ungeklärten Möglichkeiten des Atomzerfalles absieht, die Verbrennung die Grundlage der Energiegewinnung sein wird.

III. Ablauf der Verbrennung.

Verbrennung ist nur dort möglich, wo sich Sauerstoff und Brennstoff berühren, bei festen und flüssigen Brennstoffen daher nur an deren Oberfläche, bei dampf- und gasförmigen Brennstoffen in einem Gemisch mit Luft. Um den für die motorische Verbrennung notwendigen raschen Ablauf zu erzielen, sind große Berührungsoberflächen erforderlich. Demnach werden flüssige Brennstoffe zur Verbrennung im Motor fein zerstäubt, feste pulverisiert, dampf- und gasförmige Brennstoffe gleichmäßig mit Luft gemischt.

Die Verbindung des Brennstoffes mit dem Sauerstoff erfolgt auch bei tiefen Temperaturen. Sie vollzieht sich dabei jedoch außerordentlich langsam. Erst bei höheren Temperaturen steigert sich die Reaktionsgeschwindigkeit zur wahrnehmbaren, rasch ablaufenden Verbrennung, wie sie allein für den Motor in Betracht kommt.

Ist ausreichend Sauerstoff vorhanden, dieser gut mit dem Brennstoff gemischt und bleibt die Temperatur während der Reaktion genügend hoch, so wird die Verbrennung vollkommen. Die Abgase enthalten dann nur restlos oxydierte Bestandteile, die keinen Sauerstoff mehr aufnehmen können. Ist eine der vorerwähnten Bedingungen nicht gegeben, so bleiben noch brennbare Bestandteile in den Abgasen zurück, die Verbrennung wird unvollkommen, die chemische Energie des Brennstoffes wird nicht restlos in Wärme verwandelt.

1. Zündung.

Zur Einleitung der Verbrennung muß Brennstoff und Luft durch Energiezufuhr von außen auf die Zündtemperatur erwärmt werden. Wenn diese erreicht ist, beginnt die sichtbare Verbrennung und läuft sich selbst beschleunigend ohne äußere Energiezufuhr weiter, bis sie, je nach den Verhältnissen, mehr oder minder vollkommen beendet ist.

Bei der Zündung im Motor unterscheiden wir zwei Fälle:

Bei der *Fremdzündung* wird einem brennfertigen Gemisch an einer Stelle durch einen elektrischen Funken oder durch heiße Wandteile Energie zugeführt. Die von den ersten reagierenden Teilen abgegebene Wärme entzündet die benachbarten Schichten und die Reaktion pflanzt sich auf diese Weise von dem Zündort ausgehend im Gemisch fort.

Bei der *Selbstentzündung* wird zunächst nur der eine Reaktionspartner, die Luft (Sauerstoff), durch Energiezufuhr über den Zündpunkt des Brennstoffes erhitzt. In diese Luft wird dann der Brennstoff eingebracht, erwärmt sich an derselben und entzündet sich ohne weitere Wärmezufuhr von außen. Im Motor erfolgt die Erhitzung der Luft durch Verdichtung. In Laboratoriumsgeräten zur Prüfung des Zündverhaltens von Brennstoffen meist wird die Luft oder der Sauerstoff indirekt beheizt.

In den verschiedenen Motorarten erfolgt die Zündung nach folgendem Schema:

Fremdzündung.

- | | |
|------------------------|------------------------------|
| 1. Elektrischer Funken | Otto-Motor, Hesselman-Motor. |
| 2. Glühstelle | Glühkopfmotor. |

Selbstzündung

Diesel-Motor, Kohlenstaubmotor.

Vom Überspringen des Funkens bei der Fremdzündung bis zur Erfassung größerer Gemischmengen durch die Verbrennung, die im Diagramm durch den Beginn des Druckanstiegs sichtbar ist, vergeht eine gewisse Zeit, die man als *Zündverzögerung* bezeichnet.

Die Zündung wird durch sehr viele Einzelfaktoren beeinflusst. Bei Otto-Motoren hängt die Zündfähigkeit vor allem vom Mischungsverhältnis ab. Der Gehalt an Brennstoff im Gemisch muß zwischen der oberen und unteren Zündgrenze liegen, damit das Gemisch zündfähig ist.

Vergleichszahlen für die Zündgrenzen in einer $2^{1/2}$ -l-Bombe sind in der Zahlentafel 3 zusammengestellt.

Beim Diesel-Motor mit Selbstzündung wird durch die Verdichtung zunächst nur die Luft erhitzt. Der in diese Luft eingespritzte, fein zerstäubte Brennstoff benötigt zur teilweisen Verdampfung, chemischen Aufbereitung und Erwärmung auf die Zündtemperatur eine gewisse Zeit, die man gleichfalls als *Zündverzug* bezeichnet.

Für den Zündvorgang ist beim Diesel-Motor die Selbstzündungstemperatur des Brennstoffes von großer Bedeutung, da sie ein gewisses Maß für die notwendige Höhe der Verdichtung und für die Größe des Zündverzuges gibt.

Eine Selbstzündung des Gemisches im Otto-Motor muß vermieden werden. Die zulässige Höhe der Verdichtung im Otto-Motor hängt daher von der Selbstzündungstemperatur des Kraftstoffes dann ab, wenn nicht schon vor dem Auftreten der Selbstzündung unerwünschte Verbrennungserscheinungen (Klopfen) die Verdichtung begrenzen. Vielfach bezeichnet man auch fälschlich als Selbstzündung bei Otto-Motoren eine Fremdzündung durch glühende Wände oder glühende Ölkohleteile. Diese bewirkt ein Weiterlaufen der Maschine trotz abgestellter, elektrischer Zündung.

Eine Zusammenstellung der Selbstzündungstemperaturen verschiedener Kraftstoffe zeigt die Zahlentafel 4. Die Zahlen sind wegen der vielen auf die Selbstzündung wirkenden Einflüsse nur als Vergleichswerte benutzbar.

Zahlentafel 3. Zündgrenzen (nach WHEELER) von Gas- und Dampfluftgemischen.

	Gehalt des Gemisches an Brennstoff	
	untere Grenze Vol.-%	obere Grenze Vol.-%
<i>1. Gase:</i>		
Wasserstoff	4,1	71,5
Kohlenoxyd	12,5	73,0
Methan	5,6	14,8
Äthan	3,1	10,7
Propan	2,2	7,4
Butan	1,7	5,7
Pentan	1,4	4,5
Äthylen	3,0	22,0
Acetylen	3,3	52,3
<i>2. Dämpfe:</i>		
Benzol	1,5	5,6
Toluol	1,4	5,4
Äthylalkohol	4,4	—
Äthyläther	2,0	5,0
Aceton	2,25	9,6
Schwefelkohlenstoff ...	4,2	—

Zahlentafel 4. Niedrigste Selbstzündungstemperaturen von Gasen (nach BRÜCKNER).

Gas	In Luft °C	In Sauerstoff °C	Gas	In Luft °C	In Sauerstoff °C
Wasserstoff	530	450	Propylen	455	(420)
Kohlenoxyd	610	590	Butylen	445	(400)
Methan	645	645	Acetylen	335	350
Äthan	530	(500)	Cyan	850	800
Propan	510	490	Schwefelwasserstoff	290	220
Butan	490	(460)	Leuchtgas	560	(450)
Äthylen	540	485			

(Mischungsverhältnis zum Teil unsicher; eingeklammerte Werte geschätzt.)

Niedrigste Selbstzündungstemperaturen von Dämpfen (Luft 1at, Mittelwerte).

	°C		°C
Pentan	550	Cyklohexan	550
Hexan	540	Naphthalin	700
Heptan	520	Tetralin	520
Methanol	500	Phenol	700
Äthylalkohol	450	Benzin	480—550
Diäthyläther	180	Gasöl	330—350
Aceton	500	Paraffin	400
Schwefelkohlenstoff	100	Schmieröl	380—420
Benzol	700	Rohöl	400—450
Toluol	620	Steinkohlenteeröl	600—700
Xylol	580		

Niedrigste Selbstzündungstemperaturen fester Brennstoffe.

	°C		°C
Braunkohlenstaub	150—170	Steinkohlenhalbkoks	350—450
Steinkohlenstaub	140—220	Gaskoks	450—600
Holzkohle, weich	250—300	Zechenkoks	550—650
„ „, hart	300—450	Hüttenkoks	600—750
Zuckerkohle	300—350	Pechkoks	550—600
Braunkohlenschwelkoks	300—400	Graphit	700—850

Der starke Einfluß des Druckes auf die Selbstentzündungstemperatur ist aus Abb. 1 zu entnehmen.

2. Die normale Verbrennung.

Beim *Otto-Motor* breitet sich die Verbrennung vom Ort der Zündung verhältnismäßig langsam durch das ganze zündfähige Gemisch aus. Diese Ausbreitung der Flamme kann auf rein thermischem Wege durch Wärmeübergang von der Flammenfront auf die nicht

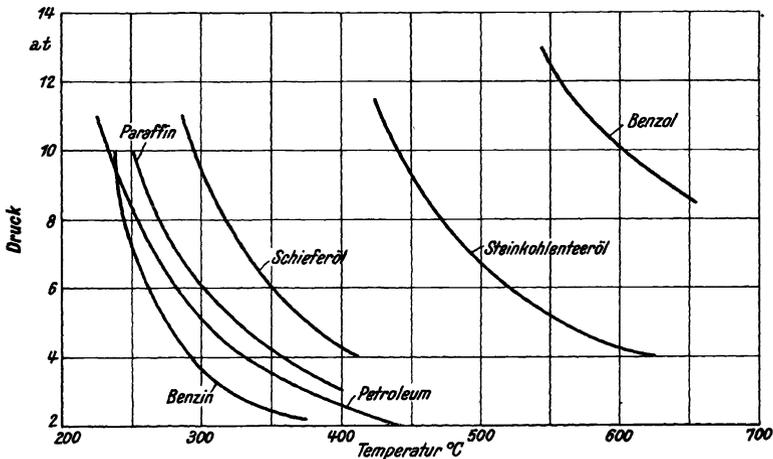


Abb. 1. Der Einfluß des Druckes auf die Selbstentzündungstemperatur (nach TAUSS u. SCHULTZ).

verbrannten Teilchen erfolgen, wobei die eigentliche Reaktion nach BONE über eine Anlagerung von Sauerstoff (Voroxydation) und primäre Alkoholbildung (Hydroxylierung) oder nach LEWIS, AUFHÄUSER und RICE über einen thermischen Zerfall mit nachfolgender Oxydation der Bruchstücke abläuft. Eine Möglichkeit der Erklärung der Vorgänge ist die Annahme von Kettenreaktionen, d. h. Reaktionen bei denen immer ein aktiver Reaktionspartner (z. B. atomarer Sauerstoff oder Wasserstoff) neu gebildet wird und die Reaktion fortführt. Dabei kann man sich die Fortpflanzung der Reaktion so vorstellen, daß aktivierte Atome in die benachbarten Schichten eindringen und die Reaktion in diesen einleiten. Solche Kettenreaktionen erhöhen die Energie eines Systems nicht gleichmäßig, wie es z. B. bei rein thermischen Vorgängen der Fall ist, sondern nur an bevorzugten Stellen. Sie werden stark durch die Abmessungen und das Verhältnis Oberfläche/Rauminhalt der Reaktionsgefäße beeinflusst.

Die Meinungen darüber, ob die Verbrennung in homogener (d. h. rein gasförmiger) oder in heterogener (d. h. an der Grenze zwischen gasförmiger und flüssiger oder fester) Phase verläuft, sind geteilt und es kann keine als bewiesen gelten. Da bei leichtflüchtigen *Otto-Kraftstoffen* die Verdampfung im allgemeinen recht vollständig ist und Klopferscheinungen (siehe später) auch in rein gasförmiger Phase auftreten können, ist es wahrscheinlich, daß die Verbrennung hier in gasförmiger Phase verläuft.

Die Flamme pflanzt sich bei der normalen Verbrennung mit einer Geschwindigkeit fort, die von dem vor ihrer Front herrschenden Zustand (Druck, Temperatur, chemische

Zusammensetzung des Gemisches) und vom Mischungsverhältnis zwischen Brennstoff und Luft abhängt. Diese Geschwindigkeit beträgt im Motor etwa 6 bis 20 m/sek. Sie ist etwa in der Mitte des Flammenweges am größten und wird am Ende desselben wieder kleiner. Sie erreicht viel größere Werte als im ruhenden Gemisch in der Bombe, weil die heftige Gasbewegung (Wirbelung) im Motor einen außerordentlichen Einfluß ausübt. Neben Druck und Temperatur des unmittelbar vor der Flammenfront befindlichen Gemisches ist seine chemische Zusammensetzung an dieser Stelle von sehr großer Bedeutung. Diese hängt ab von der vor der eigentlichen Zündung ablaufenden Voroxydation.

Besonders bei der Verbrennung im *Diesel-Motor* ist die Bedeutung der Voroxydation, die während des Zündverzuges erfolgt, sehr groß, da die einmal einsetzende Flamme wohl viel mehr eine Folge thermischer Aktivierung als von Kettenreaktionen, also chemischer Aktivierung und deshalb für den zeitlichen Gesamtablauf der Verbrennung unwesentlich und unbeeinflussbar ist.

Der wirkliche Verlauf der Verbrennung ist derzeit noch nicht genau bekannt, wahrscheinlich überlagern sich verschiedene Einzelreaktionen und überwiegt je nach den Umständen die eine oder die andere.

3. Die klopfende Verbrennung.

Der Klopfvorgang besteht sowohl im *Otto-Motor* wie auch im *Diesel-Motor* in einer überschnellen Verbrennung von Gemischteilen. Dadurch steigt der Druck im Zylinder sehr plötzlich und das löst im Triebwerk und an den Zylinderwänden schlagartige Geräusche aus, durch welche diese Erscheinung die Bezeichnung „Klopfen“ oder „Klingeln“ erhalten hat.

Beim *Otto-Motor* tritt das Klopfen nach anfänglich normaler Verbrennung eines Teiles des Gemisches im unverbrannten Restgemisch auf, wenn darin die Bedingungen für eine überrasche Fortpflanzung der Verbrennung oder Selbstzündung gegeben sind.

Beim *Diesel-Motor* ist es die plötzliche Zündung des eingespritzten Kraftstoffes, die bei langen Zündverzügen verspätet einsetzt (und dann eine größere Menge Gemisch erfaßt als bei geringerem Zündverzug), die Klopfen bewirkt.

Demnach verursacht eine zu hohe Reaktionsgeschwindigkeit des Brennstoffes im Otto-Motor klopfende Verbrennung. Im Diesel-Motor hingegen wird klopfende Verbrennung von zu geringer Zündgeschwindigkeit, zu großem Zündverzug verursacht. Die Verhältnisse liegen also bei beiden Motorarten gerade entgegengesetzt.

Beim Klopfen im Vergasermotor erhöht sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Flamme von 6 bis 20 m/sek bei normaler Verbrennung auf wesentlich höhere Werte, die mit einer Ausnahme mit 300 bis 500 m/sek angegeben werden. Die Geschwindigkeit bei einer wirklichen Detonation liegt um 2000 m/sek und dürfte beim Klopfen wahrscheinlich nicht erreicht werden.

Zur Erklärung der klopfenden Verbrennung im *Otto-Motor* ist die Annahme von Kettenreaktionen deshalb besonders geeignet, weil sie zwanglos die Beeinflussung der Verbrennung durch Zusätze deutet. Denkt man sich nämlich eine Reaktion, die unter Neubildung eines die Reaktion weiterführenden aktiven Bestandteiles (z. B. atomaren H_2 oder O_2) abläuft, so ist es klar, daß sie durch Zugabe dieses Bestandteiles selbst oder eines ihn liefernden Stoffes beschleunigt, oder eines diese aktiven Bestandteile vernichtenden Stoffes gebremst werden kann. Dementsprechend wirken solche Stoffe klopf-fördernd, welche die Oxydationsreaktion beschleunigen; dagegen verhindern jene Stoffe das Klopfen, die die Oxydationsreaktion hemmen (sogenannte „Klopfbremsen“).

Kettenreaktionen laufen um so rascher ab, je größer die Zahl und die Länge der Ketten ist. Während man sich die Wirkung der klopf-fördernden Stoffe durch eine Vermehrung der Kettenzahl deuten kann, ist die entgegengesetzte Wirkung der Klopfbremsen durch Kettenabbruch verständlich.

Der Übergang der nicht klopfenden normalen in die klopfende Verbrennung kann so gedacht werden, daß zuerst die Zahl und Länge der Ketten gering ist. In diesem Zeitpunkt ändert der Zusatz eines Gegenklopfmittels den Verbrennungsablauf nicht nennenswert. Mit weiterschreitender Verbrennung jedoch nimmt die Zahl der Ketten zu, wenn Druck, Temperatur und Voroxydationszustand des unverbrannten Gases dies möglich machen, es tritt Klopfen („Detonation“) ein und die Verbrennung erreicht ganz andere Geschwindigkeiten als im normalen Falle. Dieser Teil der Verbrennung kann durch kettenabbrechende Zusätze, wie Bleitetraäthyl, weitgehend beeinflußt werden; die Wirkung ist aber vor allem in der Beeinflussung der Voroxydation des nicht verbrannten Anteils zu suchen, während die eigentliche Verbrennung nicht beeinflußt wird.

Die praktische Bedeutung der klopfenden Verbrennung ist je nach der Bauart des betreffenden Motors sehr verschieden. Während bei kräftig gebauten Lastwagenmotoren mit guter Kühlung auch längere Beanspruchung durch Klopfen keinen Schaden ergibt, äußert sich das Klopfen in den leicht gebauten und hochbeanspruchten Flugmotoren in kurzer Zeit in Temperatursteigerungen von Kerzen, Kolben und Zylinder, die zum Abbrennen der Kerzen, Ventilstörungen, Durchbrennen der Kolben und damit zum Versagen des Motors führen können. Ob diese Temperatursteigerungen infolge erhöhter Wirbelung oder verstärkter Strahlung eintreten, ist noch nicht sicher gestellt, wenn auch vieles für die erste Annahme spricht. Durch die Temperatursteigerungen wird auch das Schmieröl verändert und dadurch oft Festkleben der Kolbenringe verursacht. Weniger bedenklich als die Temperatursteigerungen sind die schädlichen Folgen des Klopfvorganges, die infolge der höheren Verbrennungsdrücke rein mechanisch auftreten. Diese Beanspruchungen sind ebenso wie die raschen Veränderungen des Schmieröls durch die klopfende Verbrennung noch recht wenig zahlenmäßig untersucht oder zumindest öffentlich behandelt worden.

IV. Motorbetriebsbedingungen.

Die Verbrennungsmotoren bewirken die Umwandlung der bei der Verbrennung entstehenden Wärme in mechanische Arbeit, d. h. die Überführung der regellosen Bewegung der Gasmoleküle in eine gerichtete. Der thermische Wirkungsgrad gibt das Verhältnis von in einem vollkommenen Motor geleisteter Arbeit zur entwickelten Wärme an. Er kann für Otto-Motoren annähernd durch die Gleichung

$$\eta_v = 1 - \frac{1}{\epsilon^k - 1}$$

ausgedrückt werden, worin ϵ das Verdichtungsverhältnis, k das Verhältnis der spezifischen Wärmen des Arbeitsmediums bei konstantem Druck und konstantem Volumen darstellt. Der Wirkungsgrad nimmt also mit steigender Verdichtung zu, so daß man sich bemüht, ihn auf diese Weise möglichst hoch zu treiben. Damit steigert man aber gleichzeitig die Verdichtungsendrücke und -temperaturen und die mittleren Arbeitsdrücke und -temperaturen. Da eine Erhöhung von Druck und Temperatur aber eine gesteigerte Reaktionsfähigkeit der Luft gegenüber dem Kraftstoff (und Schmieröl) bewirkt, nimmt bei Otto-Motoren die Gefahr einer ungewollt raschen Verbrennung — des Klopfens — in gleicher Richtung zu. Ähnlich wirkt sich die Erhöhung der Leistung durch Vergrößerung des Zylindervolumens und durch Anwendung von Vorverdichtung aus, weil dabei entweder der Wärmeübergang an die Wand verringert wird, d. h. das Gas infolge der größeren räumlichen Abmessungen verhältnismäßig weniger mit der Wand in Berührung kommt und dadurch weniger gekühlt wird, oder größere Energiemengen in den gleichen Raum pro Zeiteinheit gelangen. Nur die Steigerung der Drehzahl wirkt sich umgekehrt aus; die für die Verbrennung und für die Ausbildung der Klopferscheinung verfügbare Zeit wird ja dadurch verkürzt. Auch sinkt mit steigender Drehzahl der Füllungsgrad, so daß der Verdichtungsenddruck geringer wird. Indirekte Steigerung der Leistung durch Anwendung von Heißkühlung und damit kleineren, weniger Luftwiderstand bietenden Kühlern in

Flugzeugen wirkt sich in einer stärkeren Beanspruchung der Kraftstoffe aus. Wärmestauungen im Verbrennungsraum haben dieselbe Wirkung.

Bei der Betrachtung der motorischen Vorgänge ist es gut, sich die außerordentlich kurzen Zeiten vor Augen zu halten, in denen sie ablaufen. Bei Drehzahlen von 2000/min stehen z. B. je nach der Motorbauart etwa der vierte oder dritte Teil einer Umdrehung, d. s. 0,0075 bis 0,010 Sekunden für die Verbrennung zur Verfügung. In ähnlich kurzen Zeiträumen muß in Otto-Motoren das Gemisch für die Verbrennung gebildet werden, während bei Diesel-Motoren dafür noch kürzere Zeiten zur Verfügung stehen, da ja die erste Gemischbildung nur durch den Zündverzug von dem Zeitpunkt der Verbrennung getrennt ist.

Die Bildung des zündfähigen Gemisches geschieht je nach dem verwendeten Kraftstoff in verschiedener Weise. Eine Übersicht der Verfahren zur Gemischbildung gibt die folgende Zusammenstellung:

Verfahren zur Gemischbildung.

Motor	Kraftstoff	Mischeinrichtung	Gemischbildung	
			Zeit	Ort
Otto-Motor	Gas	Mischkammer	Ansaughub	vor dem Zylinder
	Benzin	Vergaser	"	" " "
		Einspritzpumpe	"	{ vor dem Zylinder im Zylinder
Glühkopfmotor	Petroleum	" "	Verdichtungshub	im Zylinder
	Gasöl			
Hesselman-Motor	Leichtöl	" "	Saughub oder Verdichtungshub	" "
	Gasöl			
Diesel-Motor	Gasöl	" "	Ende des Verdichtungs-, Beginn des Arbeitshubes	" "
Staubmotor	Kohlenstaub	Mischkammer	" " "	" "

Bei *Otto-Motoren* ist der Einfluß des Mischungsverhältnisses auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme von Bedeutung. Abb. 2 nach CHAPMAN zeigt, daß vor allem bei Kohlenwasserstoffen der Bereich der gut brennbaren Mischungen sehr klein ist. Daher ist es notwendig, daß beim Otto-Motor mit Vergaser oder mit Benzineinspritzung stets ein solches Gemisch hergestellt wird. Die der Luft zugemischte Brennstoffmenge liegt dabei in der Nähe des theoretischen Wertes. Bei etwas größeren Werten, welche die Regel sind, spricht man von fetten, bei geringeren Werten, als dem theoretischen Mischungsverhältnis entspricht, von mageren Gemischen. Neuerdings geht man in der Luftfahrt dazu über, bei geringen Belastungen magere Gemische zu verwenden. Die unvollkommene Verbrennung, wie sie fette Gemische geben, ist beim Otto-Motor technisch tragbar, da dabei außer den normalen Abgasbestandteilen nur CO, H₂ und CH₄ entstehen, Gase, die den Motorbetrieb nicht beeinträchtigen.

Beim *Diesel-Motor* bildet sich dagegen bei unvollkommener Verbrennung Ruß, der sich auf den Betrieb ungünstig auswirkt. Der Diesel-Motor muß daher stets bei annähernd vollkommener Verbrennung, also immer mit Luftüberschuß betrieben werden.

Durch die hohe Erwärmung der Luft sind die Bedingungen auch für die Verbrennung kleinster Ölmengen in derselben gegeben. Der Mischungsbereich hat bei Diesel-Motoren demnach zwar eine obere Grenze, die von der Vollkommenheit der Gemischbildung im Motor abhängt, stets aber im Luftüberschußgebiet liegt, jedoch keine untere Grenze.

Bei der Bemessung des Mischungsverhältnisses geht man stets von der theoretischen Luftmenge aus. Bei gegebener chemischen Analyse des Kraftstoffes läßt sich sein Luftbedarf rechnerisch ermitteln (siehe Heft 2). W. A. OSTWALD hat gezeigt, daß man aus der

Auspuffanalyse mit genügender Genauigkeit auf das Kraftstoff-Luftgemisch rückschließen kann. Dies wurde neuerdings durch eingehende Versuche in USA. bestätigt.

Die Einregelung des richtigen Mischungsverhältnisses geschieht bei *Otto-Motoren*, bei bekannter chemischer Zusammensetzung des Kraftstoffes, durch Luft- und Kraftstoffmessung während des Betriebes, ein recht umständlicher Weg. Einfacher ist die Einregelung durch Bestimmung der Abgaszusammensetzung mittels physikalischer

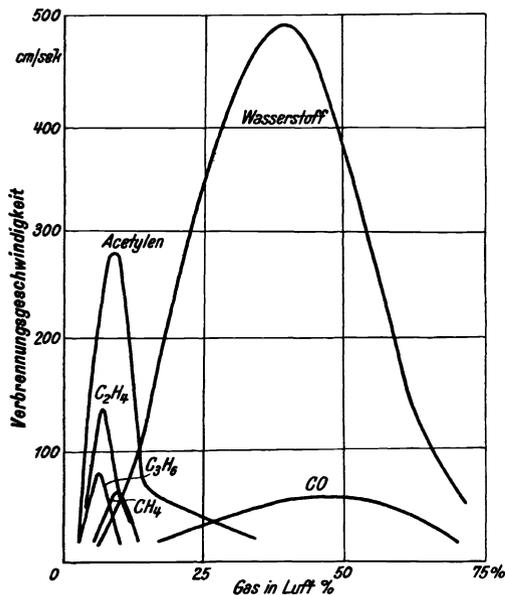


Abb. 2. Verbrennungsgeschwindigkeit von Gas-Luftgemischen verschiedener Konzentration.

Verfahren. Dabei wird die Wärmeleitfähigkeit der Abgase zur Kennzeichnung verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit von CO , O_2 und N_2 ist fast dieselbe wie die von Luft. Dagegen besitzt CO_2 die halbe, H_2 aber die siebenfache Leitfähigkeit der Luft; deshalb sind diese Bestandteile der Abgase ausschlaggebend für deren Wärmeleitfähigkeit. Im Gebiet des Kraftstoffüberschusses kann man mit diesem Verfahren, das z. B. von HARTMANN und BRAUN und auch von der Cambridge-Gesellschaft in ihren Geräten verwendet wird, eine recht brauchbare Kontrolle des Kraftstoffverbrauches erreichen.

Für das Verhalten der Betriebsstoffe sind die Bedingungen von größter Bedeutung, unter denen sie arbeiten müssen. Am wichtigsten sind dafür: Drücke, Temperaturen und Reaktionszeiten (Drehzahlen) für die Kraftstoffe, Temperaturen und Lagerdrücke für die Schmieröle. Eine zahlenmäßige Erfassung aller dieser Werte würde die Beurteilung des voraussichtlichen Verhaltens der Betriebsstoffe wesentlich erleichtern, wenn auch noch nicht restlos ermöglichen.

Denn für die Eignung der Kraftstoffe spielen auch andere Verhältnisse, z. B. die Wirbelung (d. h. die Gasbewegung im Zylinder) eine wichtige Rolle, die sehr schwer zahlenmäßig erfaßt werden kann. Ebenso ist für die Schmieröle die Frage der Ölverteilung im Motor, der Wärmeabfuhr, des Gaszustandes im Kurbelgehäuse von sehr großer Bedeutung, und auch diese Angaben können nur schwer eindeutig und einfach gemacht werden. Es wird aber notwendig sein, diesen Verhältnissen nachzugehen, wenn man den Bestwert in der Ausnützung der Betriebsstoffe und in der Konstruktion der Motoren erreichen will. K. NEUMANN [8] und F. A. F. SCHMIDT [9] haben in dieser Richtung wertvolle Beiträge geliefert.

Eine — unvollständige — Übersicht auf diesem Gebiet gibt die Zahlentafel 5. Sie soll später durch weitere Angaben nach Möglichkeit ergänzt werden.

V. Die Verbrennungsluft.

Luft, oder richtiger Sauerstoff, ist der eine Reaktionspartner der Verbrennung. Der Zustand der Luft ist deshalb für den Verlauf der Reaktion von größter Bedeutung. Bei der Beurteilung des Einflusses des Außenzustandes ist aber zu beachten, daß dieser nur zum Teil maßgebend ist für den Zustand, in dem die Luft in den Zylinder gelangt.

Die Temperatur beeinflusst das Klopfverhalten der Kraftstoffe. Bleibt die Luftdichte trotz Steigerung der Temperatur dieselbe, so wird die Klopfgefahr entsprechend gesteigert. Welchen Einfluß die Temperatur der Luft auf die zulässige Zähigkeit des Öles hat, zeigt schon die Unterteilung der Öle in Sommer- und Winteröle. Er ist so groß, daß man ver-

Zahlentafel 5. Beanspruchung der Betriebsmittel.

Verwendung des Motors	Flugzeuge				Personenwagen				Last- und Triebwagen				Ortsfeste und Schiffsanlagen			
	Arbeitsverfahren (Brennstoff)		Kühlung		Otto (flüssig)		Diesel		Otto (flüssig)		Diesel		Otto (flüssig)		Diesel	
	Luft, Wasser	Luft, Wasser	Luft, Wasser	Luft, Wasser	Luft, Wasser	Luft, Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	
Drücke:																
Ausagedruck	0,9 ÷ 0,95	1,0	at		0,9	0,9	0,95	0,9	0,9	0,9	0,95	0,9	0,9	0,9	0,95	
Aufwindung	1,4	1,5	"		7,4 ÷ 9,9	7,4 ÷ 9,9	35 ÷ 45	7,4 ÷ 9,9	7,4 ÷ 9,9	7,4 ÷ 9,9	35 ÷ 45	7,4 ÷ 9,9	7,4 ÷ 9,9	7,4 ÷ 9,9	30 ÷ 45	
Verdichtungsdruck	8 ÷ 12	30 ÷ 60	"		$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 18 \div 22$	$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 18 \div 22$	$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 5 \div 6$	$\epsilon = 12 \div 14$	
Verbreunungsdruck	30 ÷ 60	55 ÷ 100	"		35 ÷ 42	35 ÷ 42	55 ÷ 60	35 ÷ 42	35 ÷ 42	35 ÷ 42	55 ÷ 60	35 ÷ 42	35 ÷ 42	55 ÷ 60		
Mittlerer effektiver Druck	7 ÷ 12	6 ÷ 11	"		7,5 ÷ 8	7,5 ÷ 8	5,5 ÷ 7,5	6 ÷ 7	6 ÷ 7	6 ÷ 7	5,5 ÷ 7,5	6 ÷ 7	6 ÷ 7	5,5 ÷ 7,5		
Gleichförmichkeitsleistung:																
Kolben	5,5		kg/cm ²		3,5 ÷ 4,5	3,5 ÷ 4,5	6,5 ÷ 7,5	6 ÷ 7	6 ÷ 7	6 ÷ 7	6,5 ÷ 7,5	6 ÷ 7	6 ÷ 7	6,5 ÷ 7,5	5,5 ÷ 6,5	
Kreuzkopf	500 ÷ 600		"		225 ÷ 300	225 ÷ 300	250 ÷ 350	240 ÷ 320	240 ÷ 320	240 ÷ 320	250 ÷ 350	240 ÷ 320	240 ÷ 320	250 ÷ 350	250 ÷ 320	
Kolbenbolzen	150 ÷ 180		"		80 ÷ 120	80 ÷ 120	120 ÷ 150	120 ÷ 150	120 ÷ 150	120 ÷ 150	120 ÷ 150	120 ÷ 150	120 ÷ 150	120 ÷ 150	140 ÷ 160	
Plienlager	100		"		55 ÷ 85	55 ÷ 85	70 ÷ 75	60 ÷ 75	60 ÷ 75	60 ÷ 75	70 ÷ 75	60 ÷ 75	60 ÷ 75	70 ÷ 80	70 ÷ 80	
Kurbelwellenlager			"													
Temperaturen:																
Ausgangstemperatur	— 56 bis + 50	— 56 bis + 50	° C		— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	— 20 bis + 50	10 bis 20	10 bis 20
Temperatur nach Lader	20 ÷ 120	20 ÷ 80	"				20 ÷ 80				20 ÷ 80				70	70
Verdichtungsangfangstemperatur	50 ÷ 180	50 ÷ 100	"				50 ÷ 100				50 ÷ 100					
Verdichtungsangendtemperatur	250 ÷ 400	500 ÷ 800	"				500 ÷ 800				500 ÷ 800					
Verbreunungsangendtemperatur	2000 ÷ 2500	1500 ÷ 2200	"				1500 ÷ 2200				1500 ÷ 2200					
Auspufltemperatur	900 ÷ 1100	500 ÷ 700	"				500 ÷ 700				500 ÷ 700					
Zylinderwandtemperatur	80 ÷ 220		"				80 ÷ 220				80 ÷ 220					
Zylinderdeckeltemperatur	150 ÷ 260		"				150 ÷ 260				150 ÷ 260					
Kolbenbodenstemperatur	300 ÷ 350		"				300 ÷ 350				300 ÷ 350					
Milz (Band)	380/250		"				380/250				380/250					
Ausladventiltemperatur	700 ÷ 850		"				700 ÷ 850				700 ÷ 850					
Kühlung:																
Kühlmittel																
Eintrittstemperatur	130°	130°	° C		65 ÷ 75	65 ÷ 75	130°				130°				15 ÷ 20	15 ÷ 20
Austrittstemperatur	140°	140°	"		80 ÷ 90	80 ÷ 90	140°				140°				70 ÷ 80	70 ÷ 80
Wärmemengen	250 ÷ 450	200 ÷ 320	keal/PS/St.		650 ÷ 750	650 ÷ 750	200 ÷ 320				650 ÷ 750				600 ÷ 700	600 ÷ 650
Schmieröl:																
Eintrittstemperatur	40 ÷ 80	50 ÷ 80	° C		90	90	50 ÷ 80				90				60	60
Austrittstemperatur	60 ÷ 120	60 ÷ 90	"		120	120	60 ÷ 90				120				70	70
Umlauf	0,5 ÷ 4	1 ÷ 3	1/PS/St.		30 ÷ 70	30 ÷ 70	1 ÷ 3				30 ÷ 70				8 ÷ 10	8 ÷ 10
Wärmemenge	30 ÷ 70	30 ÷ 70	keal/PS/St.				30 ÷ 70								20 ÷ 80	20 ÷ 80

¹ Erwärmte Luft hinter dem Kühler. * Bei Glykolbetrieb.

sucht, ihn in Gegenden mit gleichmäßig kalten Wintern (Kanada) durch Verwendung von solchen Ölen auszugleichen, die bei der Betriebstemperatur dieselbe Zähigkeit aufweisen wie die Sommeröle im Sommer.

Mit steigendem *Luftdruck* erhöht sich die Klopfneigung der Verbrennung. Das ist insbesondere bei dem Betrieb von Motoren mittels vorverdichteter Luft (Aufladung) zu beachten.

Die *Luftfeuchtigkeit* verringert die Klopfneigung. Die Motorleistung sinkt bei zunehmender Luftfeuchtigkeit, da bei gleichem Außendruck entsprechend dem Teildruck des Wasserdampfes eine kleinere Luftmenge in den Zylinder gelangt. Der Einfluß auf die Klopfneigung ist nicht unbedeutend, aber geringer als der Einfluß der Temperatur und des Druckes. Den Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Klopfneigung, gemessen in Octan-Werten (siehe später), zeigen Untersuchungen, bei welchen Änderung des Wasserdampfdruckes um 25,4 mm Hg, Unterschiede der absoluten Klopfneigung von 5,1 bis 10,8 Octan-Werten ergaben. Bleibenzin war dabei am empfindlichsten [10].

Bei den großen Mengen Luft, die von den Verbrennungskraftmaschinen angesaugt werden, spielt ihre *Reinheit* für den Zustand der Motoren eine wichtige Rolle. Rauch in Industriegegenden, Staub auf Landstraßen und Flugplätzen, Salzwasser bei Schiffsmaschinen können die Schmierung ebenso verschlechtern wie Verunreinigungen der Kraftgase. Die festen Verunreinigungen, die meist kieselsäurehaltig sind, wirken schleifend und werden vor allem in den Ölschlammablagerungen gefunden. In besonders ungünstigen Fällen können dadurch sogar nach einleitendem Festsitzen von Kolbenringen Kolbenfresser verursacht werden. Auf gute Reinigung der Ansaugluft ist deshalb zu achten. Der zulässige Staubgehalt kann mit zirka 0,01 bis 0,03 g/Nm³ angegeben werden.

Welchen Einfluß Staub in der Ansaugluft haben kann, zeigt die Zahlentafel 6 nach ROBERTSON [11], in welcher der Abrieb von Kolbenringen mit reiner Luft (1 und 2) und der mit staubiger Luft (3) unter allerdings etwas verschiedenen Bedingungen verglichen ist.

Zahlentafel 6. Abrieb von Kolbenringen in Millimetern.

	Reine Luft		Staubige Luft
	1	2	3
Fahrstrecke km	14 150	13 350	3 050
Abnutzung, radial:			
1. Dichtungsring mm	0,038	0,025 ¹	0,05—0,06
2. „ „	0,025	0,018 ¹	0,038—0,05
3. „ „	0,025 ¹	0,018 ¹	—
4. Ölabbstreifring „	0,038 ¹	0,025 ¹	0,09—0,10
Abnutzung, axial:			
1. Dichtungsring „	0,013 max	0,013 max ¹	0,025—0,038
2. „ „	0,013 „ ¹	0,005 „ ¹	0,013—0,025
3. „ „	0,013 „ ¹	0,005 „ ¹	—
4. Ölabbstreifring „	0,013 „ ¹	0,013 „ ¹	0,007—0,013

In Schiffsmotoren findet man mitunter erhebliche Mengen von Salz im Schmieröl, das von angesaugtem Kochsalz der Meeresluft herrührt. Die Korrosion wird dadurch sehr verstärkt; man verhindert sie am besten, indem man durch gute Luftreinigung das Eindringen von Kochsalz vermeidet. Besonders wichtig wird die Reinigung der Ansaugluft bei Schleppern für die Landwirtschaft, überhaupt bei Betrieb in staubiger Umgebung.

Die Luftreiniger arbeiten entweder naß, halbtrocken oder trocken. Bei der *nassen* Reinigung wird der Luftstrom in möglichst feiner Verteilung durch Wasser oder eine andere geeignete Flüssigkeit geleitet. Die Flüssigkeit verbraucht sich und muß rechtzeitig er-

¹ Expander-Ringe, d. h. Ringe, deren Spannung durch eine hinterlegte gewellte Blattfeder erhöht wird.

setzt werden. Die *halbmassen* Reiniger leiten den Luftstrom gegen ölbenetzte Prallflächen, an denen die Fremdstoffe haften bleiben. Die Wirkung ist gut, muß aber überprüft werden. *Trockene* Reiniger verwenden entweder das Schleuderprinzip oder Filtertücher. Das Schleudern gelingt mit einfachen Mitteln durch entsprechende Führung des Luftstromes, hat aber nur wenig Wirksamkeit, da nur die allergrößten Teilchen entfernt werden. Besser wirken Filtertücher, die aber gegen Feuchtigkeit recht empfindlich sind. *Kombinierte* Reiniger, die zuerst mittels Schleudern die groben und darnach mit ölbenetzten Prallflächen die feinen Staubteilchen entfernen, arbeiten sehr zuverlässig.

Nach einer Untersuchung von DÜLL ergibt sich für Fahrzeuginnenluftreiniger folgendes Bild:

Reinigungsart	Raumbedarf	Gewicht	Wirkung	Wartung
1. Naß (Flüssigkeit)	groß	groß	gut	erfordert Sorgfalt
2. Halbnaß (ölbenetzt)	mittel	mittel	sehr gut	etwa alle $\frac{1}{4}$ Jahre
3. Trocken: a) Schleuderreiniger	gering	gering	mittel	nicht notwendig
b) Tuchfilter	groß	mittel	gut	sehr empfindlich!
4. Kombinierte Reiniger	mittel	mittel	sehr gut	sehr wenig

DÜLL rechnet im Straßenverkehr bei Personautos mit einer Staubaufnahme für je 1000 km von rund 1 g/Zylinder, die einen Abrieb des Zylinders von etwa 0,01 mm verursacht.

B. Kraftstoffe.

I. Gasförmige Kraftstoffe.

Die Gase für den Motorbetrieb sind sehr verschiedenen Ursprungs. Sieht man vom Wasserstoff ab, der elektrolytisch zur Energiespeicherung hergestellt werden sollte, so entstehen sie bei der Zersetzung von Brennstoffen oder von anderen organischen Stoffen durch Erhitzung (Leuchtgas, Schwelgas), Krackung (Krack- oder Spaltgas), bakteriellen Zerfall (Faulgas) oder durch unvollkommene Verbrennung (Kraftgas, Hochofengas). Die durch thermische und bakterielle Zersetzung entstandenen Gase sind sehr heizkräftig, weil sie entweder fast nur aus Kohlenwasserstoffen mit einem Heizwert von 7000 bis 15000 kcal/Nm³ bestehen,

Zahlentafel 7. Heizwerte und Gemischheizwerte von flüssigen und gasförmigen Treibstoffen.

Bezeichnung	Unterer Heizwert		Luftbedarf		Gemischheizwert kcal/m ³ ¹	Daraus errechneter Leistungsverlust in %
	kcal/kg	kcal/m ³ ¹	m ³ /kg ¹	m ³ /m ³		
Tankstellenbenzin (86:9:3:4,7)....	9850 ²	—	11,64	—	836 ³	—
Gemisch (65/35)	10200 ²	—	11,98	—	843 ³	+ 0,8
Propan	11000	19900	13,2	23,8	803	— 3,9
Butan	10900	25900	13,0	31,0	810	— 3,1
Leuna-Treibgas	10950	22600	13,1	26,9	810	— 3,1
Reinmethan	—	7860	—	9,5	747	— 10,7
Motorenmethan ⁴	—	9180	—	10,8	777	— 7,1
Leuchtgas ⁴	—	3480	—	3,7	742	— 11,3
Generatorgase						
Holz ⁴	—	1256	—	1,2	571	— 31,7
Holzkohle ⁴	—	1019	—	0,89	539	— 35,5
Steinkohlenschwelkoks ³	—	1146	—	1,06	556	— 33,5

¹ m³-Angaben bei 15° und 735 mm Hg.

² Verdampfungswärme berücksichtigt.

³ Die Hälfte des Brennstoffes als verdampft angenommen.

⁴ Angaben nach RIXMANN [14].

wie Erdgas, Krackgase und Hydriergase, oder nur wenig nicht brennbare Bestandteile enthalten. Einen geringeren Heizwert haben Schwelgase, wie Braunkohlenschwelgas, Leucht- und Steinkohlengas, infolge des Gehaltes an CO₂. Die eigentlichen Kraftgase, Hochofengichtgas, Generatorgas und Wassergas sind infolge ihres erheblichen Gehaltes an Stickstoff viel weniger heizkräftig (1000 bis 2500 kcal/Nm³). Kraftgase und Zersetzungsgase können unter normalem Druck oder komprimiert verwendet werden.

Für den Vergleich verschiedener gasförmiger Brennstoffe ist nicht nur der Heizwert, sondern vor allem der Gemischheizwert maßgebend, da davon die chemische Energie der Zylinderfüllung abhängt. In der Zahlentafel 7 sind diese Werte mit dem theoretischen Leistungsverlust (gegenüber Benzinbetrieb ohne Verdichtungsänderung) nach Angaben von v. HÜHN [12] zusammengestellt.

Für den Kraftverkehr spielt der Heizwert des Gases und sein Gemischheizwert die größte Rolle. Gase, die bei der Verdichtung flüssig werden, also hohe Dichte erhalten und in kleinen Behältern untergebracht werden können, sind den anderen weit überlegen. Außerdem ist die Reinheit des Gases von großer Bedeutung. Vor allem darf es keine festen Bestandteile enthalten. Der Gehalt an Schwefelverbindungen und ungesättigten Verbindungen ist zu begrenzen. Wasser ist ebenfalls ein unerwünschter Bestandteil, weil es die Kältebeständigkeit der Gase verringert.

Im folgenden werden kurz die Kraftgase sowie die verdichteten und verflüssigten Treibgase besprochen. Zum Vergleich sind die wichtigsten Werte dieser Gase in der folgenden Zahlentafel 8 zusammengestellt.

Zahlentafel 8. a) Durchschnittliche Zusammensetzung der technischen Brenngase [nach K. BUNTE: GWF 74, 941 (1931)].

Art des Gases	Leuchtgas	Steinkohlengas	Kokereigas	Wassergas	Normengas der Vorkriegszeit	Stadtgas Normengas	Steinkohlengas Wassergas	Ölkarburiertes Wassergas	Generatorgas	Gichtgas	
Oberer Heizwert kcal/Nm ³	5900	5500	4650	2700	5060	4300	3100	3970	1280	950	
Unterer Heizwert kcal/Nm ³	5260	4900	4130	2460	4430	3830	2800	3620	1215	940	
Zusammensetzung	CO ₂ %	2	2,0	2,1	6,8	2,8	4,0	5,0	6,0	5,9	7,5
	schwere Kohlenwasserstoffe %	4	3,5	2,1	—	2,9	2,0	0,2	3,8	—	—
	CO %	8	8,5	6,2	38,5	16,6	21,5	34,5	33,5	28,5	29,0
	H ₂ %	50	52,5	53,3	49,5	50,0	51,5	48,5	44,5	12,8	2,5
	CH ₄ %	34	30,0	25,0	0,2	25,1	17,0	5,5	8,0	0,3	—
N ₂ %	2	3,5	11,3	5,5	2,6	4,0	6,3	4,2	52,5	61,0	
Spez. Gew. (Luft = 1)	0,41	0,40	0,41	0,56	0,44	0,47	0,54	0,58	0,88	0,99	
Sauerstoffbedarf m ³ /m ³	1,15	1,06	0,893	0,44	0,966	0,795	0,534	0,72	0,21	0,16	
Luftbedarf (Mindestluftmenge) m ³ /m ³	5,50	5,09	4,27	2,12	4,62	3,81	2,55	3,45	1,01	0,75	
Rauchgasmenge, feucht m ³ /m ³	6,23	5,80	4,98	2,68	5,30	4,45	3,14	4,08	1,81	1,59	
Rauchgasanalyse bei vollkommener Verbrennung mit der theoretischen Luftmenge	CO ₂ %	9,0	8,8	8,0	16,9	10,0	10,9	14,5	14,5	19,2	23,0
	H ₂ O %	20,9	21,2	22,0	18,6	20,5	20,6	19,1	17,6	7,4	1,6
	N ₂ %	70,1	70,0	70,0	64,5	69,5	68,5	66,4	67,9	73,4	75,4
	Gemischheizwert kcal/Nm ³	810	804	784	788	790	796	782	812	604	537

Eine Gegenüberstellung der Eigenschaften von Benzin und von Gasen gibt die Zahlentafel 9 nach RIXMANN [14].

Als verflüssigte Gase kommen praktisch vor allem Propan und Butan, bzw. die entsprechenden Olefine¹ in Frage. Technisch fallen diese Gase bei der Krackung von Erdöl,

¹ Vgl. Abschnitt flüssige Kraftstoffe.

Zahlentafel 9. Zusammenstellung der für den motorischen Betrieb wichtigsten Kenngrößen der Treibstoffe.

Kraftstoff	Raumgewicht	Zusammensetzung ^a bzw. Elementar- analyse %	Unterer Heizwert		Theoretischer Luftbedarf	Gemischtheil ^b Wert kcal/Nm ³	Mischungsverhältnis ^c (Gemischtheilwert kcal/Nm ³)			Praktisch nutzbare Grenze des Verdichtungsverhältnisses		Oktanzahl etwa
			kcal/kg	kcal/Nm ³			Beste Leist.- Ver- stärkung	Spar- samer Ver- brauch	Motor läuft unruhig	Im Otto-Motor	Im umgebaute Diesel-Motor	
Benzin (handelsüblich) ¹ .	0,736 kg/l	80,7 C 14,2 H 5,1 O	10040	—	10,8 Nm ³ /kg	928	1 (928)	1,1 (845)	1,3	rd. 1:6	—	76 ⁶
Benzin-Benzol (handels- üblich), Gemisch „Aral“ ¹ .	0,783 „	83,2 C 11,8 H 5,0 O	9740	—	10,35 „	940	1 (940)	1,1 (856)	1,3	„ 1:7	—	90 ⁶
Flüssiggas (handelsüblich).	rd. 2,22 kg/Nm ³	47—55 Propan 42—36 Butan 1—3 Olefine 10—6 Rest ⁶	11000	—	12,0 „	885	0,94 (876)	1,14 (775)	1,4	„ 1:7	rd. 1:8,5	105—110 ⁶
Propan, rein	1,96 kg/Nm ³	100 C ₃ H ₈	11040	21600	12,05 Nm ³ /kg	880	—	—	—	rd. 1:7	1:40	125 ⁷
Butan, rein	2,6 kg/Nm ³	100 C ₄ H ₁₀	10920	28400	11,92 Nm ³ /kg	888	—	—	—	1:6,8	Klopfgrenze	90 ⁷
Methan, rein	0,717 kg/Nm ³	100 CH ₄	11970	8560	9,5 m ³ /m ³	815	—	—	—	rd. 1:7	Klopfgrenze	—
Motoren-Methan (handelsüblich)	0,915 kg/Nm ³	rd. 64 Methan „ 16 Äthylen „ 14 Athan „ 2,5 CO ⁴	10960	10000	10,8 m ³ /m ³	847	1,04 (817)	1,18 (727)	1,7—1,8	rd. 1:7	rd. 1:10	—
Leuchtgas (Berliner Stadtgas)	0,603 kg/Nm ³	49,8 H ₂ 14,8 CO 17,9 CH ₄ 2,1 C ₂ H ₆	—	3800	3,7 m ³ /m ³	808	0,97 (803)	1,2 (699)	rd. 4	1:7	1:7—1:8	100 ⁶
Saug- gas aus	Holz	22,8 CO 18,6 H ₂ 2,3 CH ₄	—	1370	1,2 m ³ /m ³	623	0,95 (608)	1,02 (616)	—	1:9—1:10	1:9—1:10	—
	Holzkohle	29,6 CO 7,8 H ₂	—	1110	0,89 m ³ /m ³	586	1 (586)	1,15 (548)	—	1:9—1:10	1:9—1:10	—
Steinkohlen- schwelkoks ..	—	27—30 CO 13—10 H ₂ 1—1,2 CH ₄	—	1250	1,06 m ³ /m ³	605	—	—	—	1:9—1:10	1:9—1:10	—

¹ Mit Spirit vermischt.

² Bei Gasen sind nur die brennbaren Bestandteile angegeben.

³ Schwere Kohlenwasserstoffe und gelöstes Gas.

⁴ Außerdem 0,6% H₂ und 0,3% C₃H₈.

⁵ Nach Versuchen am Motor.

⁶ Nach dem CFR-Research-Verfahren [25].

⁷ Nach dem ASTM-Verfahren (CFR-Motor-Verfahren).

in geringer Menge bei der Benzinsynthese an. In der Natur kommen sie in großem Ausmaß im Erdgas vor. Neben den Begrenzungen an Schwefelverbindungen und Ammoniak ist Freiheit von elementarem Schwefel und Mercaptanen erwünscht. Der Gehalt an ungesättigten Verbindungen soll etwa 10 Gewichtsprozent nicht überschreiten. Die Kältebeständigkeit soll etwa bei -30°C liegen, wozu vor allem geringster Wassergehalt notwendig ist. Die wichtigsten Eigenschaften von Propan, Normalbutan und Isobutan zeigt die Zahlentafel 10.

Zahlentafel 10. Eigenschaften von Propan, Normalbutan und Isobutan.

Chemische Formel	Propan $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_3$	Normalbutan $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_3$	Isobutan $\text{CH}_3 \cdot \text{CH}(\text{CH}_3)_2$
Spez. Gew. (bezogen auf Luft).....	1,521	2,004	2,004
„ „ („ „ Wasser 15°C)	0,509	0,582	0,567
Schmelzpunkt $^{\circ}\text{C}$	-189,9	-135	-145
Siedepunkt	-44,5	0,5	-10,2
Verdampfungswärme (beim kritischen Punkt) kcal/kg	107	96	94
Unterer Heizwert, kcal/Nm ³	21 700	28 200	28 900
„ „ kcal/kg	11 000	10 900	10 900
Zündgrenzen Vol.-%	2,3—9,5	1,9—8,4	1,9—8,4
Dampfdruck, ata, 20°C	8,8	2,1	3,3
Kritischer Druck at.....	45	35,7	—
Kritische Temperatur	95,6	153,2	134
Theoretischer Luftbedarf m ³ /m ³	23,8	31,0	31,0
Klopffestigkeit, Oktanzahl (Research-Motor).....	125	99	91

Für die Verwendung verflüssigter und verdichteter Gase spielt das Flaschengewicht eine große Rolle. Es beträgt bei Wasserstoff etwa 5 kg/1000 kcal, geht auf 0,7 bis 1,5 kg bei Methan zurück, erreicht aber erst beim Flüssiggas Werte, die mit 0,11 bis 0,16 kg annähernd an das Gewicht eines Benzintanks herankommen, den man mit etwa 0,03 kg/1000 kcal einsetzen kann.

II. Feste Brennstoffe zur unmittelbaren Verbrennung im Motor.

Feste Brennstoffe gelangen in Verbrennungsmotoren entweder direkt, z. B. im Kohlenstaubmotor, oder nach der Vergasung zur Verwendung.

Da die Vergasung an anderer Stelle behandelt wird, sollen hier nur *Brennstoffe zur unmittelbaren Verbrennung* im Motor besprochen werden.

Die kennzeichnenden Größen für die Verwendbarkeit fester Brennstoffe im Motor sind: Heizwert, Selbstzündungstemperatur, Zündverzug, Korngröße und vor allem Menge und Art der Asche, von der im wesentlichen die Abnutzung abhängt, die eines der größten Probleme des Kohlenstaubmotors darstellt. Wenn der Kohlenstaubmotor sich auch noch in der Entwicklung befindet, seien hier doch einige Angaben über die erforderlichen Eigenschaften des Kohlenstaubs gemacht.

Nach Zahlentafel 11 sinken die Selbstzündungstemperaturen mit dem Druck und mit der Mahlfeinheit, allerdings nur bis zu einem gewissen Grade.

Zahlentafel 11. Selbstzündungstemperaturen in $^{\circ}\text{C}$ von Kohlenstaub nach SUWA.

Feinheit	Druck in kg/cm ²			
	5	10	20	30
Geht durch ein Sieb mit 100—200 Maschen/cm ²	544	510	488	439
„ „ „ „ „ 200—250 „	510	465	438	420
„ „ „ „ „ über 250 „	493	438	404	394

Die untersten Selbstentzündungstemperaturen von Kohlenstaub waren in der Bombe nach Versuchen von WENTZEL bei 10,2 kg/cm² Druck:

Zahlentafel 12. Unterste Selbstzündungstemperatur von Kohlenstaub bei 10,2 kg/cm².

Kohlenstaubart	Feinheit Durchgang durch Sieb mit 6265 Maschen/cm ²	Wasser %	Asche %	Flüchtige Bestandteile (ohne H ₂ O) %	Selbstzündungstemperatur °C
<i>Mitteldeutsche Braunkohle:</i>					
Gemahlener Brennstoff	62,65	11,5	9,5	48,0	290—300
Elektrofilterstaub	85,10	11,5	9,5	48,0	290—300
<i>Ruhrsteinkohle</i>	84,14	2,29	13,79	27,9	480
<i>Magerkohle-Anthrazit</i>	83,20	1,5	10,0	8,0	600

Die Selbstentzündungstemperatur ist demnach um so niedriger, je mehr flüchtige Bestandteile die Kohle enthält.

Die unteren *Zündgrenzen* liegen bei Kohlenstaub bei etwa 17,2 g/m³, d. h. 58 m³ Luft für 1 kg (Meldau); scharfe obere Grenzen gibt es nicht.

Der *Zündverzög* von Kohlenstaub ist von der Dichte der Verbrennungsluft und von der Höhe der Selbstzündungstemperatur abhängig und wird durch die Größe der kleinsten Körner bestimmt. Nach Versuchen von WENTZEL beträgt er in der Bombe 0,01 bis 0,03 sek, nach den motorischen Versuchen der I. G. in Oppau betrug aber die gesamte Hauptverbrennungsdauer (Zeit von Beginn bis Ende des Druckanstieges) nur 0,003 bis 0,015 sek, während WENTZEL in der Bombe etwa die vier- bis zehnfachen Werte fand. WAHL hält deshalb Drehzahlen von 1000 bis 2000 U/min beim Kohlenstaubmotor für erreichbar, während WENTZEL als obere Grenze 400 U/min annahm.

Die erforderlichen *Korngrößen* liegen bei etwa 0,005 bis 0,06 mm, entsprechend der Mahlfeinheit von Feuerungskohlenstaub.

Zur Bewertung des *Aschegehaltes* wird die Aschenmenge in Gramm je 10000 kcal Heizwert angegeben. Diese *Aschenzahl* beträgt dann bei Steinkohlen (Gas- und Gasflammkohle) mit 6 bis 7% Asche rund 90 bis 100. Aschenzahlen von 150 bis 200 führen schon zu Störungen. Um den Abrieb auch zu erfassen, schlägt Wahl [17] vor, „Schleifzahlen“ unter Berücksichtigung der Härte der Aschenbestandteile zugrunde zu legen, die sich aus dem 1000fachen Gehalt an Al₂O₃, 120fachen Gehalt an SiO₂ und 37fachen Gehalt an Fe₂O₃ summieren lassen. Er macht einen Vorschlag, überschlägige Gesamtverschleißzahlen zu verwenden, die sich folgendermaßen errechnen:

$$G = A \left(100 + \frac{S}{500} - Fl + K \right),$$

worin *A* die Aschenzahl, *S* die Schleifzahl, *Fl* in Prozent der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen (ohne Wasser und Asche), *K* eine vorläufig nicht einzusetzende Größe für die Erfassung bisher nicht geklärter Einflüsse ist.

Durch Schwimmaufbereitung oder Windsichtung der Kohle läßt sich eine *Entaschung* durchführen. Besser wirkt noch die Extraktion nach PORR und BROCHE, die allerdings mit größerem Aufwand arbeitet. Der Kohlenstaubmotor ist derzeit noch auf die Verwendung ascheärmer Kohle angewiesen.

III. Flüssige Kraftstoffe.

1. Die chemische Zusammensetzung.

Wie bereits in der Einleitung besprochen wurde, haben von allen Brennstoffen die *Kohlenwasserstoffe* die höchsten Verbrennungswärmen. Dementsprechend spielen sie auch die Hauptrolle unter den Treibstoffen und unter diesen wiederum die aus dem natürlichen Erdöl gewonnenen, wenn auch synthetische Produkte zunehmende Bedeutung besitzen.

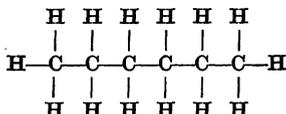
Die Kohlenwasserstoffe haben je nach ihrem molekularen Aufbau sehr verschiedenartige Verbrennungseigenschaften, so daß man sie darnach unterscheiden muß. Eine kurze Übersicht über die wichtigsten Gruppen gibt die folgende Zusammenstellung:

a) Aufbau der wichtigsten Kohlenwasserstoffverbindungen.

α) Paraffine C_nH_{2n+2} .

Normalparaffine. Die Kohlenstoffatome der Paraffine sind kettenförmig gebunden.

Beispiel: n-Hexan:



Die Paraffine haben den höchstmöglichen Gehalt an Wasserstoff. Aus der verhältnismäßig schwachen Bindung der einzelnen Kohlenstoffatome aneinander folgt ein leichter

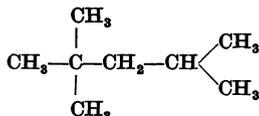
Zahlentafel 13. Paraffine.

Formel	Name	Struktur	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C (760 mm Hg)	Spez. Gewicht
CH_4	Methan	CH_4	— 182,5	— 164	—
C_2H_6	Äthan	$CH_3 \cdot CH_3$	— 183,6	— 84,1	—
C_3H_8	Propan	$CH_3 \cdot CH_2 \cdot CH_3$	—	— 45	0,536°
C_4H_{10}	n-Butan	$CH_3 \cdot (CH_2)_2 \cdot CH_3$	— 139,0	0,6	0,600°
	Isobutan	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ CH-CH_3 \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} $	— 145	— 10,2	—
<i>Pentane</i>					
C_5H_{12}	n-Pentan	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	— 129,7	36,02	0,6263 ^{20°}
	Isopentan	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ CH \cdot CH_2 \cdot CH_3 \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} $	— 160	27,95	—
	Tetramethylmethan	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ C \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} $	— 20	9,5	—
<i>Hexane</i>					
C_6H_{14}	n-Hexan	$CH_3 \cdot (CH_2)_4 \cdot CH_3$	— 95,34	68,70	0,6594 ^{20°}
	2-Methylpentan	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ CH \cdot (CH_2)_3 \cdot CH_3 \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} $	—	62	0,6583 ^{17°}
<i>Heptane</i>					
C_7H_{16}	n-Heptan	$CH_3 \cdot (CH_2)_5 \cdot CH_3$	— 90,62	98,38	0,6838 ^{20°}
	2,2,3-Trimethylbutan	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ (CH_3)_2 \cdot CH \cdot C \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} $	— 25,4	80,9	0,6945 ^{18°}
<i>Octane</i>					
C_8H_{18}	n-Octan	$CH_3 \cdot (CH_2)_6 \cdot CH_3$	— 56,82	125,59	0,7028 ^{20°}
	2,2,3-Trimethylpentan	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ CH_3 \cdot C \cdot CH \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} $	—	110,2	0,7173 ^{20°}
	2,2,4-Trimethylpentan (Iso-Octan)	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ CH_3 \cdot C \cdot CH_2 \cdot CH \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagdown \\ \\ \diagup \\ CH_3 \end{array} $	— 107,8	99,3	0,6918 ^{20°}
C_9H_{20}	n-Nonan	$CH_3 \cdot (CH_2)_7 \cdot CH_3$	— 53,70	150,72	0,7178 ^{20°}
$C_{10}H_{22}$	Dekan	$CH_3 \cdot (CH_2)_8 \cdot CH_3$	— 29,68	174,02	0,7301 ^{20°}

Zerfall, daher hohe Zündneigung. Im Otto-Motor sind diese Stoffe ungünstig, da sie zum Klopfen neigen, im Diesel-Motor günstig, da sie kleine Zündverzögerungen geben. Sie haben hohen Heizwert/kg, dafür aber niederes spezifisches Gewicht (geringeren Heizwert/Liter).

Isoparaffine. C_nH_{2n+2} . Isoparaffine haben verzweigte Kohlenstoffketten und den höchstmöglichen Gehalt an Wasserstoff.

Beispiel: 2,2,4-Tri-Methyl-Pentan:

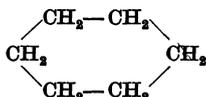


Die Zündneigung der Isoparaffine ist von der Zahl und Art der Verzweigungen abhängig, aber viel geringer, als bei den Paraffinen (die zur Unterscheidung auch Normalparaffine genannt werden). Sie sind daher in Benzin mittel gut bis sehr gut, in Dieselölen nicht gut brauchbar. Ihr Heizwert ist sehr hoch, das spezifische Gewicht niedriger.

β) Naphthene (C_nH_{2n}).

Naphthene haben ringförmige Kohlenstoffanordnung und sind wasserstoffgesättigt.

Beispiel: Cyclohexan:



In bezug auf die Zündneigung liegen die Naphthene zwischen den normalen und den stark verzweigten Paraffinen. Sie sind somit in Benzin gut, in Dieselölen schlecht brauchbar. Ihr Heizwert liegt unter dem der Paraffine, aber erheblich über dem der Aromaten. Das spezifische Gewicht ist etwas höher als das der Paraffine, aber viel niedriger als das der Aromaten.

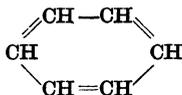
Zahlentafel 14. Naphthene.

	Formel	Stedepunkt °C	Spez. Gew.
Cyclopentan	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_2 \qquad \text{CH}_2 \\ \backslash \quad / \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \end{array}$	50—50,7	0,7506
Methyl-cyclopentan	$C_5H_9 \cdot CH_3$	70—72,2	0,7474
1,1-Dimethyl-cyclopentan	$C_5H_8 \cdot (CH_3)_2$	87,5	0,7552
1,1,2-Trimethyl-cyclopentan	$C_5H_7 \cdot (CH_3)_3$	113—113,5	0,7729
Cyclohexan	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_2 \qquad \text{CH}_2 \\ \backslash \quad / \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \end{array}$	80—80,2	0,7869
Methyl-cyclohexan	$C_6H_{11} \cdot CH_3$	103	0,7695
Äthyl-cyclohexan	$C_6H_{11} \cdot C_2H_5$	123,5	0,7772
1,1-Dimethyl-cyclohexan	$C_6H_{10} \cdot (CH_3)_2$	125	0,7851
1,1,3-Trimethyl-cyclohexan	$C_6H_9 \cdot (CH_3)_3$	138,5—139	0,7664
1,2,4,5-Tetramethyl-cyclohexan	$C_6H_8 \cdot (CH_3)_4$	169—170	0,8111

γ) Aromaten. C_nH_{2n-6} .

Die Aromaten haben ringförmige Kohlenstoffanordnung, aber immer eine Doppelbindung neben einer einfachen, sie sind also mit Wasserstoff nur teilweise gesättigt.

Beispiel: Benzol:



Die Zündneigung der Aromaten ist sehr gering, ihr Heizwert je 1 kg nieder und ihr spezifisches Gewicht hoch. In Benzenen sind sie sehr gut, in Dieselölen schlecht brauchbar.

Eine Ausnahmestellung unter den Kohlenwasserstoffen nehmen die Aromaten deshalb ein, weil sie bei der Steinkohlenverkokung und Leuchtgasgewinnung in großen Mengen erhalten werden und in Form von Motorenbenzol seit langem in den Ländern mit entwickelter Steinkohlenindustrie für den Betrieb von Otto-Motoren Verwendung finden. Die einzelnen Verbindungen des raffinierten Motorbenzols sind nach HOFFERT und CLAXTON etwa folgendermaßen verteilt:

Zusammensetzung von Motorenbenzol.

Reinbenzol	70	Vol.-%	70,9	Gew.-%
Toluol	18	„	17,8	„
Xylole	8	„	7,9	„
Paraffine und Olefine	3,5	„	2,8	„
Schwefelverbindungen	0,5	„	0,6	„

Dazu ist zu bemerken, daß die Zusammensetzung stark mit der Art der Verkokung (Retorten, Kammerofen, Großkammerofen usw.) zusammenhängt. Mit steigendem Gehalt an Reinbenzol (Gefrierpunkt + 5,49° C) rückt der Kristallisationspunkt des Motorbenzols nach oben. Ein ziemlich brauchbares Maß dafür ist in der Menge Destillat zu finden, die bei 90° C übergeht. Man hat z. B.:

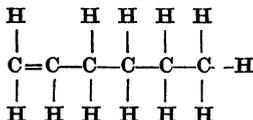
für 80% Destillat bei 90° C einen Kristallisationsbeginn von — 3° C,
„ 70% „ „ 90° C „ „ „ — 7° C,
„ 60% „ „ 90° C „ „ „ — 9° C,
„ 50% „ „ 90° C „ „ „ — 12° C,
„ 40% „ „ 90° C „ „ „ — 15° C,
„ 30% „ „ 90° C „ „ „ — 20° C.

Zahlentafel 15. Aromaten.

		Schmelzpunkt	Siedepunkt	Spez. Gewicht 20° C
<i>Monoalkylbenzole</i>				
Benzol	C_6H_6	+ 5,4	80,18	0,8799
Toluol	$C_6H_5 \cdot CH_3$	— 92,4	110,8	0,8656
Äthylbenzol	$C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH_3$	— 92,8	136—138	0,8673
n-Propylbenzol	$C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_3$	—	158	0,8617
Isopropylbenzol	$C_6H_5 \cdot \begin{array}{l} CH_3 \\ \\ CH \\ \\ CH_3 \end{array}$	—	153	0,8620
n-Butylbenzol	$C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_3$	—	180	0,8612
<i>Di-Alkylbenzole</i>				
o-Xylol	$CH_3 \cdot C_6H_4 \cdot CH_3$	— 29	144,6	0,8812
m-Xylol	$CH_3 \cdot C_6H_4 \cdot CH_3$	— 54	139	0,8655
p-Xylol	$CH_3 \cdot C_6H_4 \cdot CH_3$	+ 15	138	0,8611
o-Methyl-Äthylbenzol	$CH_3 \cdot C_6H_4 \cdot C_2H_5 \cdot CH_3$	—	164,8—165	0,8841
1:4-Methyl-Isopropylbenzol (Cymol)	$CH_3 \cdot C_6H_4 \cdot \begin{array}{l} CH_3 \\ \\ CH_2 \\ \\ CH_3 \end{array}$	— 75	177,3	0,8568
<i>Tri- und Poly-Alkylbenzole</i>				
1,2,3-Trimethylbenzol	$\begin{array}{l} CH_3 \\ \\ CH_3 \\ \\ C_6H_3 \cdot CH_3 \end{array}$	—	175,3	0,8949
1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	$\begin{array}{l} CH_3 \\ \\ CH_3 \\ \\ C_6H_3 \cdot CH_3 \end{array}$	— 53,5	164,8	0,8634
Penta-Methylbenzol	$(CH_3)_5 \cdot C_6H$	+ 53	231	0,8472 (107°)

δ) Olefine (ungesättigte Verbindungen). C_nH_{2n} , C_nH_{2n-2} usw., je nach Zahl der Doppelbindungen.

Beispiel: Hexen-(1), α -Hexylen:



Die Olefine haben meist geradlinige Ketten, seltener verzweigte oder ringförmige Anordnung. Ihr spezifisches Gewicht ist ziemlich hoch, ihr Heizwert nieder, ihre Zündneigung meist gering. Brauchbarkeit in Benzenen gut (außer die leichtverharzenden Di-Olefine mit zwei Doppelbindungen), in Dieselölen schlecht.

Zahlentafel 16. Olefine.

Formel	Name	Struktur	Siedepunkt (760 mm Hg)	Spez. Gewicht 20° C
C_2H_4	Äthylen	$CH_2=CH_2$	— 105	—
C_3H_6	Propylen	$CH_2=CH \cdot CH_3$	— 48,2	—
C_4H_8	α -Butylen	$CH_2=CH \cdot CH_2 \cdot CH_3$	— 5	—
C_5H_{10}	1-Penten	$CH_2=CH \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_3$	30,2	0,6420
C_6H_{12}	1-Hexylen	$CH_2=CH \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_2 \cdot CH_3$	63,4—63,7	0,6732
C_7H_{14}	1-Heptylen	$CH=CH \cdot (CH_2)_4 \cdot CH_3$	94,9	0,6993
C_8H_{16}	1-Octylen	$CH_2=CH \cdot (CH_2)_5 \cdot CH_3$	121,5—122,5	0,7158
$C_{16}H_{32}$	Ceten (1 Hexadecylen)	$CH_2=CH \cdot (CH_2)_{13} \cdot CH_3$	265—295 ¹	0,781/82

Diolfine (mehrfach ungesättigte Kohlenwasserstoffe).

	Struktur	Siedepunkt	Spez. Gewicht
Butadien	$CH_2=CH \cdot CH=CH_2$	— 4 (— 5)/713	—
2-Methylbutadien (Isopren)	$CH=C \cdot CH=CH_2$ CH_3	33,9—35,3/750	0,6006
2,3-Dimethylbutadien	$CH=C-C=CH_2$ $CH_3 CH_3$	68,8/750	0,7262

Die natürlichen Erdöle enthalten alle diese Kohlenwasserstoffe in verschiedenem Mischungsverhältnis; synthetische Produkte weisen die gleichen Stoffe in anderem Mischungsverhältnis auf. In den meisten einfach destillierten Produkten sind Naphthene und Paraffine mit etwa 85% weitaus in der Überzahl, nur etwa 15% sind aromatisch oder ungesättigt. Erdöle verschiedener Herkunft sind in dem Diagramm Abb. 3 so eingetragen, daß ihre ungefähre Zusammensetzung ersichtlich ist. Die paraffinischen und naphthenischen Erdöle enthalten in den niederen Fraktionen viel paraffinische und naphthenische Kohlenwasserstoffe, während die asphaltischen in den höheren Fraktionen Asphalte, d. h. hochmolekulare Kohlenwasserstoffe mit wenig Wasserstoff und hochmolekulare sauerstoffhaltige Stoffe aufweisen. Die ungefähre chemische Zusammensetzung typischer Benzine und Benzin-Benzolgemische zeigt die folgende Zusammenstellung:

Benzin	H	C	Benzin-Benzol	H	C
paraffinisch	14,5—15,0%	84—85,0%	60/40 Vol.	12,0%	88,0%
naphthenisch	14,0%	86,0%	Motorenbenzol	8,5%	90,5%
aromatisch	13,5%	86,5%			

¹ Technisches Produkt.

b) Alkohole.

Die Alkohole spielen eine geringere, aber doch beachtenswerte Rolle unter den Otto-Kraftstoffen. Bisher war es vor allem der Äthylalkohol ($\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{OH}$) mit einem Siedepunkt von $78,3^\circ \text{C}$, der in Gemischen mit Benzin und Benzol Verwendung fand. Neuerdings wird in Deutschland auch Methylalkohol ($\text{CH}_3 \cdot \text{OH}$) mit einem Siedepunkt von $64,5^\circ \text{C}$ gebraucht. Die Alkohole weisen bei normalem Betrieb eine sehr geringe Zündneigung auf und sind dementsprechend hochklopfest. Sie neigen allerdings dazu, bei hohen Beanspruchungen des Motors Selbstzündung zu verursachen, ohne zu klopfen.

Im Gemisch mit anderen Stoffen finden auch Äther, d. h. durch Wasserabspaltung aus Alkoholen erhaltene Verbindungen mit einem Brückensauerstoff Verwendung. Äthyläther, der schon bei 25°C siedet ($\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{O} \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_3$), wird z. B. in Südafrika

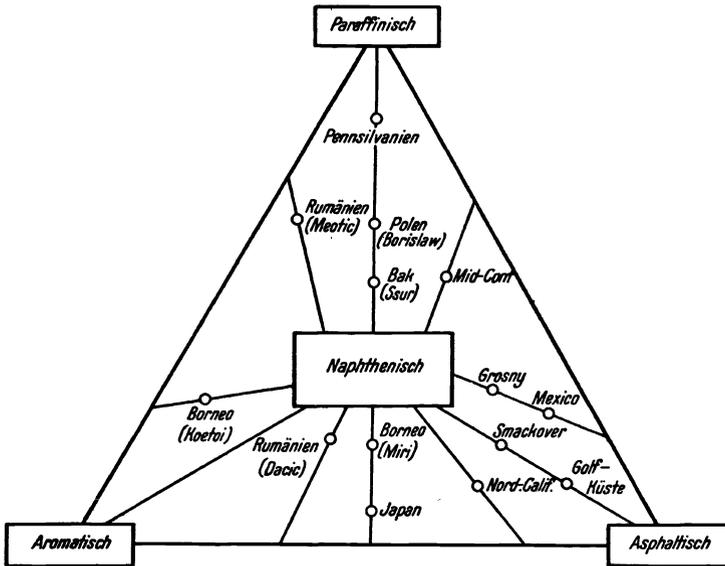


Abb. 3. Ungefähre Zusammensetzung verschiedener Rohöle (nach GAUSE).

verwendet. Isopropyläther ($\text{CH}_3)_2 \cdot \text{CH} \cdot \text{O} \cdot \text{CH} \cdot (\text{CH}_3)_2$ mit dem Siedepunkt $67,5^\circ \text{C}$ und spezifischem Gewicht $0,724/20^\circ \text{C}$ wird neuerdings als Zusatz zu Flugbenzin hoher Klopfestigkeit (Octanzahl 100) empfohlen und möglicherweise in Zukunft eine Rolle spielen. Die Heizwerte der Alkohole liegen naturgemäß weit unter denen der Kohlenwasserstoffe; mit zunehmendem Molekulargewicht steigt zwar der Heizwert, in derselben Reihe nimmt aber die Klopfestigkeit ab.

Daß noch andere Stoffe für den Motorenbetrieb vorgeschlagen wurden, wie z. B. wasserfreies Ammoniak in Italien, sei erwähnt; Bedeutung kommt diesen Vorschlägen in normalen Zeiten nicht zu.

2. Die Herstellung.

Mit der zunehmenden Leistungssteigerung der Otto-Motoren wurde die Bedeutung der Klopfestigkeit immer größer, so daß die Herstellungsverfahren sich dementsprechend einrichten mußten; die Erkenntnis, daß die Naturbenzine nicht die größte mögliche Klopfestigkeit aufweisen, führte dazu, daß in zunehmendem Maße synthetische Verfahren angewendet werden, um geeignete Kraftstoffe herzustellen. Während die Synthese im eigentlichen Sinne erst in letzter Zeit aus diesem Grunde aufgenommen wurde, ist schon seit langer Zeit eine Umwandlung schwerer Öle in leichtere durch Druckerhitzung, das sogenannte Kracken, üblich. Dabei werden die größeren Moleküle in kleinere aufgespalten

und man kann die Ausbeute an leichten Ölen (Benzin) steigern. Die Krackbenzine spielen in den Ländern mit reichlichen Vorräten an Erdöl dementsprechend eine immer größere Rolle; 1937 war die amerikanische Naturbenzinproduktion 44,3% gegen 47,2% Krackbenzin. Demgegenüber spielen die durch Schwelung aus den Kohlen erhaltenen Schwelbenzine nur eine sehr untergeordnete Rolle, und zwar auch in den Ländern mit großen Kohlevorkommen.

In England (Schottland) und Estland werden in geringerem Ausmaße Benzine aus Ölschiefer gewonnen. Viel wichtiger als diese sind die aus „feuchten“ Naturgasen durch Absorption, Wasch- oder Druckverfahren erhaltenen Naturgasbenzine, die im Jahre 1937 etwa 9% der amerikanischen Benzinproduktion ausmachten. Eine rasche Ausbreitung verzeichnet die Gewinnung von Polymerbenzinen, die durch Kondensation bzw. Polymerisation von ungesättigten Gasen, wie Äthylen und Propylen, erhalten werden. Ziemliche Bedeutung besitzen die Mischkraftstoffe und die mit Zusätzen versehenen Benzine.

In Ländern mit großer Steinkohlenindustrie wird viel Benzol als Kraftstoffbestandteil verwendet. Äthylalkohol wird in Ländern mit der Möglichkeit zu seiner Herstellung aus landwirtschaftlichen Produkten, wie Schweden, Italien, Deutschland, Ungarn, Frankreich usw. als Zusatz verwendet; ähnlich, nur weniger ausgedehnt, Methylalkohol. Zusatz von Bleitetraäthyl ist vor allem bei Fliegerbenzinen üblich, obwohl auch bei der Herstellung von Autobenzinen in steigendem Maße davon Gebrauch gemacht wird. Alle diese Kraftstoffe werden in schnellaufenden Vergaser- oder Einspritz-Otto-Motoren verwendet, da diese aber nur in Ausnahmefällen auf einen bestimmten Kraftstoff zugeschnitten sind, ist es notwendig, daß sich die Kraftstoffe den Anforderungen der Motoren anpassen. Der Unterschied in den Zollgebühren und Preisen läßt je nach der wirtschaftlichen Lage manchmal stärker, manchmal schwächer den Wunsch aufkommen, billigere, schwere Öle in Otto-Motoren zu verwenden. Die Aussichten dieser Bestrebungen sind mit Rücksicht auf die fortgeschrittene Entwicklung des Diesel-Motors sowie die Anlaß- und Ölverdünnungsschwierigkeiten nicht günstig zu beurteilen.

Der zwischen dem Otto- und dem Diesel-Motor stehende Hesselmann-Motor, der mittlere Verdichtungsdrucke hat und sowohl mit Einspritzung als auch mit Zündung arbeitet, gestattet eine erhebliche Verringerung der Klopfestigkeit des Kraftstoffes. Nach WILKE [22, 23] konnte ein Versuchsmotor nach dem HESSELMANN-Verfahren bei einer Verdichtung von 7,2:1 mit einem Kraftstoff der Octanzahl 60 kloppfrei betrieben werden, während er als Vergaser- (Otto-) Motor eine Octanzahl von 75 erforderte. Bei Verdichtungen von 6,0:1, wie sie dem jetzigen Automotormotor entsprechen, änderte sich der Grenzwert auf 50 gegen 65 bis 70. So erfreulich diese Tatsache auch ist, so wenig bedeutend ist die bisherige Verbreitung des Hesselmann-Motors. Aber die Aussicht, mit diesem Motor einerseits klopfwillige Leichtkraftstoffe, andererseits schwerzündende Dieseleibstoffe verbrennen zu können, spricht für eine ausgedehntere Verwendung in der Zukunft. Solange dieser Motor keine erhebliche Verbreitung besitzt, wird man allerdings Kraftstoffe wie die genannten nach Möglichkeit in andere, besser in den üblichen Motoren verwendbare umzuwandeln suchen.

Bei der Betrachtung der Herstellung von Kraftstoffen für den Diesel-Motor scheint der Hinweis zweckmäßig, daß der Diesel-Motor ursprünglich als Allesfresser gedacht war, sollte doch damit feingepulverte Kohle verbrannt werden. Die Erfahrung hat gelehrt, daß selbst für langsam laufende Diesel-Motoren von großer Leistung unverarbeitetes Rohöl nur bei bestimmten Vorsichtsmaßnahmen verwendet werden kann, die raschlaufenden Motoren der Kraftwagen, Motorboote und Flugzeuge aber stets einen besonders gereinigten Stoff brauchen. Diese Reinigung gelingt durch einfache Destillation — man gewinnt dadurch das sogenannte Gasöl, das derzeit schon an vielen Tankstellen in guter Qualität erhältlich ist. Mit der Steigerung der Drehzahlen wird aber wohl auch die Forderung nach bestimmten Zündwilligkeiten an Dringlichkeit zunehmen — unter anderem, weil damit die im Stadtverkehr sehr wesentliche Belästigung durch den Geruch schlecht verbrannten Gasöls bekämpft werden kann. Herstellungsmäßig interessiert

daran, daß man sich bemüht, jene Rohöle vor allem zur Gewinnung von Dieselölen zu verwenden, die nach der Zündwilligkeit gemessen dazu geeignet sind; dazu gehören die persischen, iraker und pennsylvanischen wie auch die russischen Erdöle von Grosny, aus denen durch einfache Destillation Gasöl gewonnen wird. Neuerdings werden aber auch Lösungsverfahren angewendet, die eine Trennung zwischen den im Diesel-Motor gut brauchbaren Paraffinen und den Aromaten und Naphthenen bewirken. Diese Vorschläge erstrecken sich auch auf die Braunkohlenteere, aus denen auf diese Weise recht brauchbare Dieselöle erhalten werden können. Weitaus das zündwilligste Dieselöl wird aber synthetisch nach dem Verfahren von FISCHER-TROPSCH gewonnen. Mengenmäßig spielt dieses Öl bis jetzt zwar nur eine geringfügige Rolle, für die Zukunft ist aber damit der Weg zu einer Versorgung der Welt mit einem idealen Dieseltreibstoff gewiesen.

3. Flüssige Kraftstoffe für Otto-Motoren.

a) Anforderungen.

Die wichtigste Eigenschaft der Kraftstoffe für Otto-Motoren ist die *Klopffestigkeit*. Man versteht darunter die Fähigkeit, einen Betrieb mit hoher Verdichtung und damit guter Brennstoffausnutzung ohne klopfende Verbrennung zu ermöglichen. Es ist dabei gleichgültig, ob der Brennstoff durch einen Vergaser angesaugt oder durch eine Pumpe in die Ansaugleitung oder in den Zylinder gespritzt wird (Benzineinspritzung). Die Kraftstoffe müssen demnach vor allem auf größte Klopffestigkeit gezüchtet werden.

Weiters verlangt man hohen *Heizwert*, um mit einer gegebenen Brennstoffmenge eine große Leistung erzielen und die mitzuführende Brennstoffmenge möglichst klein halten zu können.

Die *Flüchtigkeit* des Brennstoffes muß eine leichte Mischung mit der Luft ermöglichen und übermäßige Ausscheidungen von flüssigem Brennstoff im Zylinder verhindern. Auch bei niederen Temperaturen muß der Kraftstoff einwandfrei verdampfbar sein.

Weder bei der Lagerung noch bei der Verdampfung im Ansaugsystem dürfen *Ausscheidungen* von *Harz* (gum) auftreten. Der Kraftstoff darf erst bei tiefen Temperaturen dickflüssig werden oder Kristalle bilden, d. h. er muß gute *Kältebeständigkeit* besitzen und darf sich z. B. bei einem Gehalt an Alkohol nicht entmischen.

Tank-, Leitungs- und Vergaserbaustoffe dürfen nicht angegriffen werden, der Kraftstoff muß frei von *korrodierenden* Bestandteilen sein.

b) Besprechung der Eigenschaften.

Klopffestigkeit.

Unter Klopfen versteht man die erst nach der Funkenzündung und anfänglich langsamen Flammenfortpflanzung einsetzende, sehr rasche Verbrennung, die erst nach dem Totpunkt eintritt und in ihrem Charakter der Explosion von Gasen nahekommt. Die Selbstzündung, die manchmal damit verwechselt wird, setzt *vor* dem Totpunkt und vor dem Zündfunken ein. Sie nimmt mit zunehmender Drehzahl zu, während das Klopfen dabei meistens abnimmt.

Die Frage der Klopf- oder Kompressionsfestigkeit ist neuerdings aus verschiedenen Gründen immer dringlicher geworden. Einerseits genügte das ursprünglich verwendete Benzin, die einfach abdestillierten und raffinierten leichten Bestandteile des Erdöls (straight run) nicht mehr dem gesteigerten Bedarf, so daß man immer schwerere Anteile hineinmischte und damit schlechteres Klopfverhalten verursachte. Außerdem kamen die Krackverfahren auf, die andersartige Kraftstoffe lieferten und zur Bewertung ihrer Brauchbarkeit wieder nach der Klopffestigkeit als ausschlaggebender Faktor beurteilt wurden. Andererseits wurden im Laufe der Zeit die Betriebsbedingungen der Motoren sehr verschärft, um kleinere Leistungsgewichte zu erzielen, so daß ein Betrieb solcher Motoren mit den früher üblichen Kraftstoffen unmöglich wäre. Bei Beurteilung von Kraftstoffen und Motoren ist deshalb die Klopffestigkeit unbedingt mitzubedenken. Durch

die Möglichkeit, Benzin mit Zusätzen von Bleitetraäthyl oder Eisenkarbonyl in der Klopfestigkeit ganz wesentlich zu steigern, ist die Bedeutung der ursprünglichen Klopfestigkeit zwar geringer geworden (vgl. Absatz über Kraftstoffzusätze), aber trotzdem noch größer als die der anderen Kraftstoffeigenschaften.

Prüfung der Klopfestigkeit. Die ersten Versuche zur Messung der Klopfestigkeit führte RICARDO durch. Er verwendet einen 2-l-Motor, mit veränderlicher Verdichtung und gab als Wertzahl die höchste nutzbare Verdichtung an, d. h. jene Verdichtung, bei der unter bestimmten Betriebsbedingungen zuerst leichtes Klopfen eintrat und die Mehrleistung ihren Höchstwert erreichte. Diese Verdichtung war demnach durch Auf-

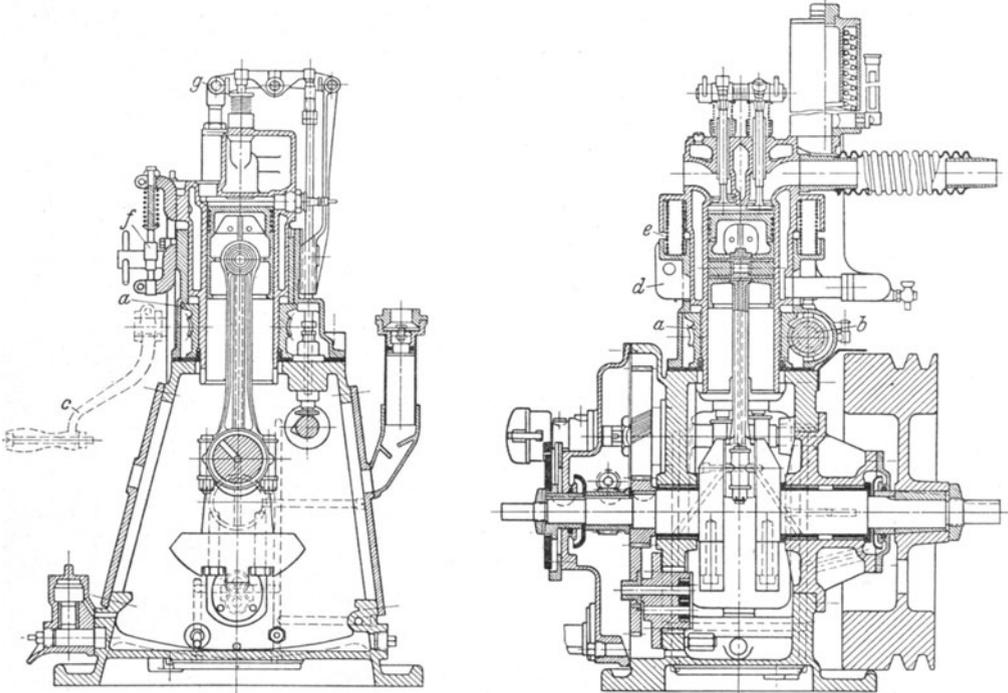


Abb. 4. Schnitt des CFR-Klopfprüfmotors.

a Schneckenrad; b Schnecke; c Handkurbel; d Klemm-Muffe; e Federn; f Feinmeßschraube; g Bügel.

nahme einer Leistungskurve zu erfassen. Wegen der kostspieligen Beschaffung dieses Motors wurden in der Folge verschiedentlich an anderen Motoren Drehzahl, Zündung, Leistung oder Drosselung als Maß der Klopfestigkeit verwendet, was große Verwirrung anrichtete. Allmählich entwickelten sich aus diesen Versuchen die Kraftstoffprüfmotoren, die entweder mit veränderlicher Drosselung oder veränderlicher Verdichtung arbeiteten.

Von den bekannten Bauarten seien erwähnt die Motoren von ARMSTRONG-WITWORTH (75 mm Bohrung, 89 mm Hub, Verdichtung durch Gegenkolben veränderlich), Delco s 30 (63,5 mm Bohrung, 117 mm Hub, feste Verdichtung, Drossel veränderlich) und vor allem der CFR-Motor (82,5 mm Bohrung, 114 mm Hub, Verdichtung veränderlich) Abb. 4, der allgemein als Prüfmotor verwendet wird. Neuerdings baut auch Daimler-Benz in Mannheim den von der I. G. Farbenindustrie entwickelten I. G. Klopfmotor (Abb. 5), der etwa dem CFR-Motor gleicht.

Als *Prüfverfahren* wird allgemein das von RICARDO vorgeschlagene Prinzip des Vergleiches mit Bezugskraftstoffen verwendet. Das Verfahren besteht darin, daß ein Gemisch aus einem bestimmten Brennstoff von hoher Klopfestigkeit und einem bestimmten Brennstoff von niedriger Klopfestigkeit von solcher Zusammensetzung hergestellt wird, daß es

im Klopfprüfmotor gleiches Klopfverhalten zeigt wie der zu prüfende Brennstoff. Als Vergleichsbrennstoff wird international ein Gemisch des klopfreudigen n-Heptans (C_7H_{16}) mit dem klopfesten Iso-Oktan (2,2,4-Trimethylpentan C_8H_{18}) oder darauf geeichter Bezugsbenzine verwendet.

Die Prüfung wird so durchgeführt, daß unter noch genauer angegebenen Bedingungen eine Mischung der Bezugskraftstoffe gesucht wird, die gleiche Anzeige im Klopfmeßgerät

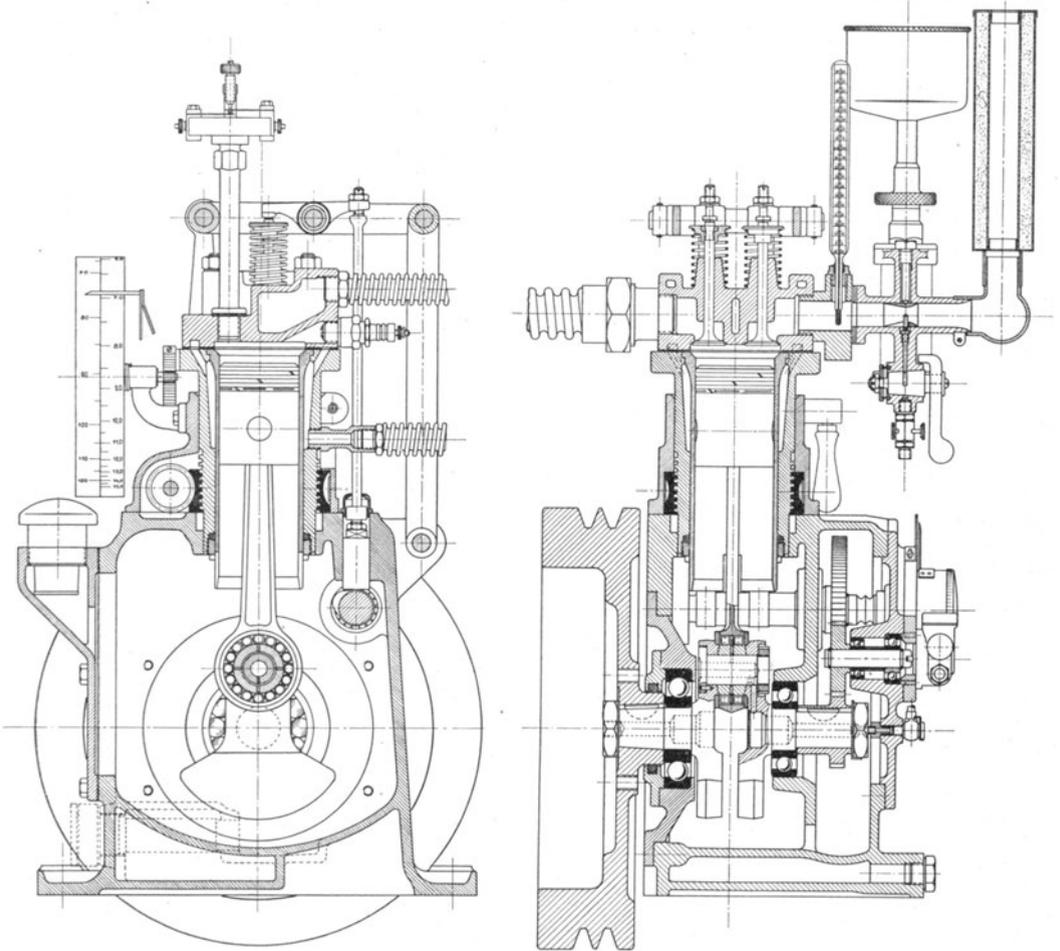


Abb. 5. Schnitt des I. G. Klopfprüfmotors.

gibt wie der zu untersuchende Brennstoff. Das Klopfmeßgerät Abb. 6 besteht aus einem Springstab (bauncing pin), der unten auf einer Membran aufruht. Bei einem plötzlich wirkenden Druckstoß, wie er beim Klopfen auftritt, wird der Stab nach oben geschneilt und schließt dadurch einen Kontakt. Die Anzahl der Druckstöße wird durch die über dem Kontakt gehende Strommenge, und zwar entweder durch ihre Wärmewirkung über ein Thermolement oder durch ihre elektrolytische Wirkung gemessen. Man läßt den Motor warm laufen und stellt dann die Verdichtung so ein, daß beim Betrieb mit dem zu prüfenden Kraftstoff bei Einstellung des Gemisches auf stärkstes Klopfen (denn es ist sowohl bei sehr fettem als auch bei sehr magerem Gemisch viel geringer als bei einem Luftüberschuß von rund 0,9) das stets auf Richtigkeit der Anzeige überprüfte Klopfmeßgerät einen Ausschlag von etwa 50 bis 60 Teilstrichen ergibt. Man schaltet dann auf ein

Gemisch von n-Heptan und Iso-Octan um, das der erwarteten Klopfestigkeit ungefähr entspricht und mißt nach neuerlicher Einstellung des Vergasers den erzielten Ausschlag; durch Verwendung eines zweiten Bezugsgemisches, das sich so vom ersten unterscheidet, daß der untersuchte Kraftstoff einen zwischen den Ausschlägen der Bezugsgemische liegenden Wert gibt, hat man die Möglichkeit, nach der Mischungsregel das genau dem

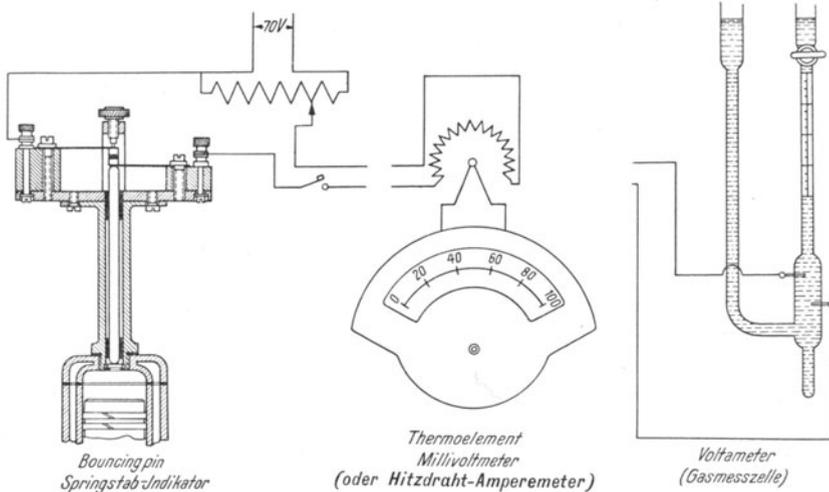


Abb. 6. Springstabindikator (bouncing pin) mit Anzeegeräten.

Prüfkraftstoff entsprechende Gemisch zu berechnen. Die Messung erfordert einmaliges gutes Einarbeiten und gewissenhafte Durchführung, ergibt aber dann recht gut reproduzierbare Werte.

Als Ergebnis der Prüfung erhält man die Volumsprozente Octan im gleichwertigen Gemisch. Das ist die bekannte *Octanzahl*. Bei ihrer Angabe ist es notwendig, das Prüfverfahren und den Motor mit anzuführen, da die Werte nicht gleich hoch ausfallen, wenn sie unter verschiedenen Bedingungen bestimmt werden. Die ursprünglich für den CFR-Motor geltenden Betriebsbedingungen (Researchverfahren) verglichen, mit den jetzt üblichen Motorverfahren, sind in Zahlentafel 17 dargestellt.

Zahlentafel 17. Betriebsbedingungen bei CFR-Motoren.

	Researchverfahren	Motorverfahren
Drehzahl-Min.	600	900
Kühlwassertemperatur	Siedekühlung 100°C (Kühlwasserpumpe)	Siedekühlung 96—102°C (Thermosyphon)
Zündung	auf beste Leistung	26° V. Z. bei 5 : 1 } automa- 22° „ „ „ 6 : 1 } tisch ein- 19° „ „ „ 1 : 7 } gestellt
Gemischtemperatur ...	nicht eingestellt	149 ± 1°C
Sonstige Änderungen..	—	Einlaßventil abgeschirmt

Bei den umfangreichen Versuchen am Union Town Hill ergab sich die Notwendigkeit, zur besseren Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem Verhalten der Kraftstoffe in amerikanischen Automobilen die ursprünglichen Betriebsbedingungen zu ändern. Das neu ausgearbeitete Prüfverfahren erhielt die Bezeichnung *Motorverfahren* und gilt derzeit international für die Prüfung der Kraftstoffe für Automobile, zum Teil auch für Flugmotoren, falls nicht für ein Land etwas anderes beschlossen wurde. Die außerordentlich

hohe Gemischvorwärmung ist bedenklich, und aus diesem Grunde werden die in Deutschland viel verwendeten Gemischkraftstoffe, wie Benzin-Benzol und Benzin-Alkohol, unterwertet. In Deutschland ist man deshalb auch noch nicht zur Verwendung des Motorverfahrens übergegangen. Auch in USA. selbst scheinen letzthin Bedenken gegen dasselbe aufgetaucht zu sein, doch sind offizielle Änderungen des Verfahrens bisher nicht bekannt geworden.

Zur Prüfung von Flugmotorenkraftstoffen hat man die CFR-Prüfmethode schon seit einiger Zeit durch eine andere zu ersetzen versucht. Der Grund dafür ist vor allem die Steigerung der Klopfestigkeit der Kraftstoffe auf Werte von 100 Octan und mehr. So schlägt BOERLAGE die zulässige Überladung (allowable boost ratio) in Millimeter Hg vor; EVANS, DODD und GARNER verwenden den bei der Verdichtung, bei welcher das Klopfen beginnt, gemessenen Verbrennungshöchstdruck in Pfund/Zoll², SERRUYS dagegen die Leistung unter bestimmten Bedingungen der Überladung. Das heißt, daß man wiederum die zur Erzielung der größtmöglichen Leistung erlaubten Betriebsbedingungen abgrenzt, wie es seinerzeit schon RICARDO mit der höchsten nutzbaren Verdichtung getan hat. Es ist fraglich, ob eine solche Bestimmung zum erstrebten Ziel einer praktisch allgemein anwendbaren Wertziffer führen wird. Solange man nicht als zweiten Faktor in die Motorprüfung an Stelle einer festgelegten Temperatur für Kühlung, Gemisch oder Ansaugluft die Prüfung über eine Temperaturskala einführt, werden stets Abweichungen vorkommen, wenn man die Ergebnisse auf Motoren verschiedenen Temperaturzustandes anwenden will. Dazu wäre allerdings noch ein anderer Umstand zu berücksichtigen, nämlich eine zahlenmäßige Erfassung der Temperatur- und Druckverhältnisse des gerade in Frage kommenden Motors, für den die Bestimmung der Klopfestigkeit eines Kraftstoffes durchgeführt wird [24]. Wahrscheinlich wird in Zukunft mehr Wert auf die Charakteristik der Motoren in dieser Richtung gelegt werden. Die Entwicklung wäre dann so zu erwarten, daß die Klopfprüfung nicht nur bei einem Punkt (d. h. ganz genau festgelegten Prüfbedingungen) erfolgt, sondern sich über einen größeren Temperaturbereich, z. B. des Gemisches, erstreckt. Nach Festlegung der in Frage kommenden, damit vergleichbaren Temperatur des Motors müßte dann die Beurteilung der Klopfestigkeit der Kraftstoffe aus dem Diagramm bei diesem Temperaturwert geschehen.

An dieser Stelle sei erwähnt, daß die sehr zahlreichen Versuche, die Verbrennungseigenschaften der Kraftstoffe ohne Versuch am Motor rein laboratoriumsmäßig zu erfassen, bisher zu keinen allgemein brauchbaren Ergebnissen geführt haben.

Die Beziehung zwischen Selbstzündungstemperatur und Klopfen wurde schon frühzeitig erkannt; ein einfacher Zusammenhang zwischen beiden besteht aber nicht. Deshalb wurde versucht, die Selbstzündungstemperatur als einen Faktor des Klopfens mit anderen Eigenschaften vereinigt als Maß zu verwenden. HAWKES hat dazu als erster die Zeit bis zum Eintritt der Zündung genommen, BROWN und WATKINS maßen außer der Selbstzündungstemperatur auch die Geschwindigkeit des Druckanstieges in einer Bombe und fanden im großen ganzen brauchbare Übereinstimmung mit dem Verhalten im Motor. JENTZSCH hat dann den Ausdruck: Selbstzündungstemperatur/Mindestsauerstoffblasenzahl je Minute in seinem Apparat bestimmt (den sogenannten Zündwert) und damit eine sehr interessante Methodik geschaffen, die bisher wohl die beste Übereinstimmung zwischen Laboratorium und Motor erbracht hat. Aber auch dieses Verfahren zeigt Abweichungen, die eine handelsmäßige Prüfung der Kraftstoffe damit unmöglich machen. Läßt man solche Abweichungen zu, so kann man auch die Beziehungen zwischen Siedekurve und spezifischem Gewicht verwenden, wie sie z. B. von MARDER empfohlen werden.

Eines darf bei der Beurteilung von Laboratoriumsverfahren und von Motoreergebnissen nicht außer acht gelassen werden; die große Zahl von Einflüssen, die auf das Klopfen einwirken und die wenigstens zum Teil bei der Laboratoriumsbestimmung berücksichtigt werden müssen, wenn das ganze Ergebnis nicht nur für einen Einzelfall gelten soll. Man wird also bei der weiteren Verfolgung der Laboratoriumsprüfung z. B. stets den ganzen Bereich der Temperaturen und der Mischungsverhältnisse des Luft-Kraftstoff-Gemisches

erfassen müssen, um nur zwei Einflüsse herauszugreifen. Die entsprechenden Werte des in Frage kommenden Motors werden dann ebenfalls bekannt sein müssen, um den Wert des betreffenden Kraftstoffes für diesen Motor zu beurteilen.

Heizwert.

Der Heizwert der Vergaserkraftstoffe ist sowohl bei reinen Kohlenwasserstoffen als auch bei Alkoholen um so größer, je höher ihr Wasserstoffgehalt ist. Beim Motorbetrieb ist der untere Heizwert maßgebend, weil das Verbrennungswasser ja nicht kondensiert, d. h. die Verdampfungswärme nicht ausgenützt wird. Die Grenzwerte bei Naturbenzinen liegen dafür zwischen 10350 und 10500 kcal/kg, für Krackbenzine zwischen 10000 und 10400 kcal/kg, für Motorbenzol zwischen 9500 und 9600 kcal/kg. Methylalkohol hat einen sehr geringen Heizwert von 4850 kcal/kg, Äthylalkohol ist mit 6400 kcal/kg schon etwas energiereicher. Isopropyläther nähert sich mit 8660 kcal/kg noch mehr den Heizwerten reiner Benzine. Synthetische Benzine liegen wie Naturbenzine, jedenfalls nicht merklich darüber, Braunkohlenbenzine mit ihrem hohen Gehalt an Olefinen entsprechen im Heizwert kaum den Krackbenzinen (9900 bis 10200 kcal/kg). Je kleiner das Molekulargewicht der Benzine ist, um so größer wird ihr Heizwert; will man mit einem gegebenen Gewicht größere Leistungen erzielen, so empfiehlt es sich, möglichst leichte Benzine zu verwenden. Eine Übertrumpfung der in solchen Stoffen enthaltenen Energien ist nur durch flüssigen Wasserstoff möglich. Dieser kommt jedoch wegen der Gefahren und Schwierigkeiten bei der Handhabung und beim Transport im allgemeinen nicht in Betracht. Eine Übersicht über die Verbrennungseigenschaften reiner, flüssiger Brennstoffe gibt Zahlentafel 18 (nach PYE).

Zahlentafel 18. Verbrennungseigenschaften flüssiger Brennstoffe (nach PYE).

Bezeichnung	Spez. Gew. 15° C	Unterer Heizwert		Verdampfungs- wärme kcal/kg	Theoret. Mischungs- verhältnis kg/kg	Volumsver- größerung durch die Verbrennung	Verbrennungs- wärme des theoretischen Gemisches kcal/Nm ³
		kcal/kg	kcal/l				
Benzin „D“	0,758	10430	7900	73	14,6	1,047	913,5
Pentan	0,629	10890	6850	83	15,25	1,051	961,6
Hexan (80%)	0,683	10690	7300	86	15,2	1,051	910,6
Heptan (97%)	0,689	10700	7370	75	15,1	1,056	911,9
Octan, rein	0,718	10670	7660	71	15,05	1,058	903,9
Benzol, rein	0,882	9640	8500	95	13,2	1,013	935,9
Toluol (99%)	0,868	9730	8440	84	13,4	1,023	927,9
Xylol (91%)	0,860	9890	8500	81	13,6	1,03	923,1
Cyclohexan (93%)	0,784	10440	8190	86	14,7	1,044	913,5
Äthylalkohol, rein	0,790	6540	5170	220	8,97	1,065	907,1
„ (95%) ...	0,812	6040	4900	246	8,4	1,065	873,5

Flüchtigkeit.

Die Kraftstoffe sind im allgemeinen Gemische aus zahlreichen chemischen Stoffen. Demzufolge haben sie keinen einheitlichen Siedepunkt, sondern sieden innerhalb eines mehr oder minder großen Temperaturbereiches. Man beurteilt ihr Siedeverhalten mittels der Siedekurve, durch welche das überdestillierte Gewicht in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt wird. Die nach dem ASTM-Destillationsverfahren gefundenen Siedekurven einiger Kraftstoffe sind in Abb. 7 zusammengestellt, das Verfahren ist in dem eingangs erwähnten Jahrbuch der ASTM beschrieben. Zur Angabe der Flüchtigkeit in einer einzigen Zahl werden die bei 5, 15, 25 ... 95 % Destillat abgelesenen Dampftemperaturen zusammengezählt und durch 10 geteilt; man erhält so die Siedekennziffer, die ungefähr der mittleren Siedetemperatur (average boiling point) entspricht.

Bei der — derzeit überwiegenden — Verwendung des Spritzvergasers ist es für den einwandfreien Betrieb von Otto-Motoren notwendig, daß das zündfähige Gemisch unter

allen Betriebsbedingungen in geeigneter Zusammensetzung im Vergaser hergestellt werden kann. Dazu muß die Verdampfbarkeit in der Kälte genügen, dabei aber in der Wärme nicht übergroß werden, damit nicht durch Dampfblasenbildung in den Brennstoffleitungen Störungen eintreten. Eine gute Beschleunigung des Motors, das ist seine Fähigkeit beim plötzlichen Öffnen der Drossel, rasch ein hohes Drehmoment abzugeben und hohe Drehzahlen zu erreichen, hat einen genügenden Gehalt des Brennstoffes an flüchtigen Bestandteilen zur Voraussetzung, es ist dazu eine gewisse Mindestflüchtigkeit notwendig. Das Siedende darf nicht zu hoch liegen, damit keine Kondensation von

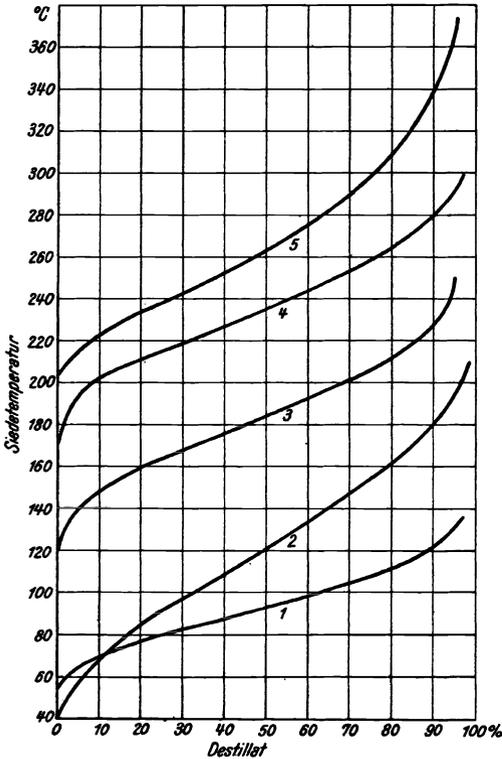


Abb. 7. Siedekurve einiger Kraftstoffe.

1 Fliegerbenzin; 2 Autobenzin; 3 Traktorentreibstoff;
4 Petroleum; 5 Gasöl,

Kraftstoff an den Zylinderwänden eintritt, die dann zu Schmierölverdünnung und endlich zum Lager- oder Kolbenfressen führen kann. Dagegen ist die Flüchtigkeit ohne wesentlichen Einfluß auf die Verteilung des Gemisches auf die einzelnen Zylinder. Dafür sind die konstruktiv bedingten Strömungsvorgänge im Ansaugsystem maßgebend.

Für die Verdampfbarkeit in der Kälte sind die leichtsiedenden Bestandteile ausschlaggebend. Ihre für den Betrieb eines bestimmten Motors notwendige Menge richtet sich aber nicht nur nach der Außentemperatur, sondern auch nach dem Mischungsverhältnis, dem Grade der Drosselung, der Anlaßdrehzahl, der Länge der Ansaugleitung usw., so daß keine allgemein gültigen Werte angegeben werden können. Für den Vergleich verschiedener Kraftstoffe untereinander in einem bestimmten Motor, bzw. unter gleichen Bedingungen ist das Diagramm Abb. 8 von EDGAR, HILL und BOYD recht brauchbar, das die Höchsttemperatur für 10% Destillat bei der ASTM-Destillation der Kraftstoffe angibt, bei welcher bei verschiedenen Ansauglufttemperaturen und einer Luftüberschußzahl von 2,0 bis 0,5, noch glattes Anspringen möglich ist. Die Angabe von EISINGER und CRAGOE, daß 5% Destillat bei 48,3° C (119° F) bei einer Luftüberschußzahl von 1,0

auch bei -40° C glatten Start ergeben müßte, stimmt nach Versuchen von G. G. BROWN nicht allgemein. Bis auf weiteres wird man sich begnügen müssen, in der angegebenen Beziehung einen ungefähren Anhalt für die Startmöglichkeit zu besitzen.

Zu großer Gehalt an leichtsiedenden Bestandteilen, der natürlich das Anlassen erleichtern würde, gibt Störungen wegen Dampfblasenbildung in Leitungen und Vergaser. Auch diese ist weitgehend von konstruktiven Einflüssen abhängig und nimmt mit der Temperatur der Leitungen und dem Ansaugunterdruck, bzw. mit abnehmendem Atmosphärendruck (z. B. in Flugzeugen) zu. Als Maß der Neigung zur Dampfblasenbildung ist wie für die Prüfung des Anlaßverhaltens der 10%-Punkt bei der Destillation brauchbar. Da aber die Dampfblasenbildung nichts anderes ist als das Wegsieden der leichten Bestandteile, ist die Messung des Dampfdruckes noch geeigneter für diesen Zweck. Sie wird meist nach REID vorgenommen. BRIDGEMAN und WHITE stellten 1931 fest, daß die damaligen Automobile bei heißem Wetter in ihren Kraftstoffleitungen so hohe Temperaturen erreichten, daß ein maximaler Dampfdruck von nur 0,5 at bei 38° C zulässig war. Der

Bereich der Leitungstemperaturen für befriedigendes Arbeiten von Kraftstoffen, d. h. gutes Starten und keine Dampfblasenbildung in den Leitungen umfaßt bei Kraftfahrzeugen etwa 60° C, sinkt aber bei Flugzeugen wegen der Abnahme des Außendruckes bei 7000 m Gipfelhöhe auf etwa 40° C.

Die Kraftstoffleitungen soll man konstruktiv so anordnen, daß ihre Temperatur möglichst tief bleibt und höchstens die Temperatur des 10%-ASTM-Punktes erreicht wird. Lange Saugleitungen bis zur Förderpumpe sind zu vermeiden. Der Kraftstoff soll — auch bei richtiger Lage seines 10%-Punktes — nicht zu viel Propan enthalten. Der Wunsch nach erweiterter Verwendung von Naturgasbenzin als Bestandteil des Autobenzins läßt von dieser Seite her den Wunsch nach verbesserten Kraftstoffsystemen immer nach-

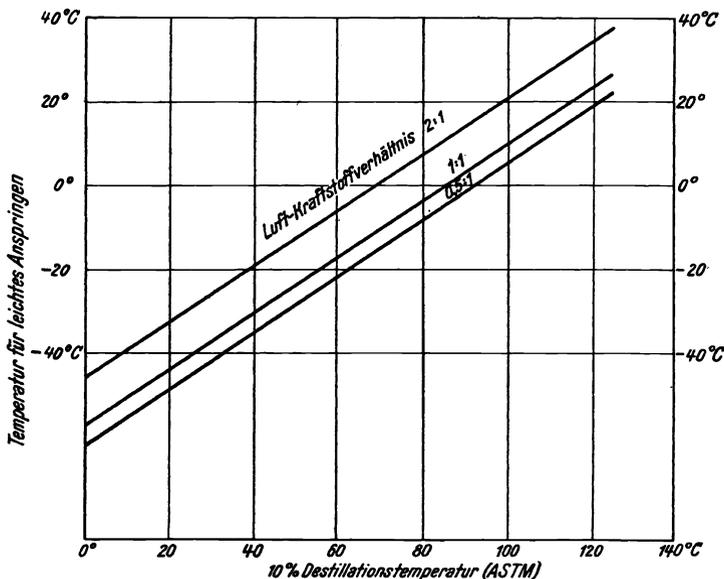


Abb. 8. Maximale 10%-Temperatur (bei ASTM-Destillation) und zulässige Abblättemperaturen.

haltiger werden; in gut angeordneten Leitungen könnten noch Benzine Verwendung finden, die in den jetzigen Kraftfahrzeugen unbedingt Störungen verursachen würden.

Für die Fähigkeit des Kraftstoffes, gute Motorbeschleunigung zu ermöglichen, ist folgendes zu beachten:

Plötzliches Drosselöffnen ergibt augenblicklich einen größeren Luftfüllungsgrad, aber nicht eine Füllung der Zylinder mit dem gleichen Luft-Kraftstoff-Gemisch, das aus dem Vergaser austritt, weil ein Teil des nicht verdampften Brennstoffes sich an die Wände der Saugleitung schlägt, längs derselben sich langsam fortbewegt und daher viel später in gleichem Maße in den Zylinder kommt, wie er beim Drosselöffnen aus der Düse des Vergasers austritt. Um diese Verzögerungszeit möglichst kurz zu halten, ist es notwendig, die Siedekurve als Ganzes nieder und dadurch den Niederschlag möglichst klein zu halten.

Einen sehr guten Einblick in die Verhältnisse geben die Versuche von G. G. BROWN, aus denen die Zusammenstellung in Abb. 9 entnommen ist. In dieser ist als wirkliche Flüchtigkeit das Verhältnis der Brennstoffgehalte von dem im Moment der Drosselöffnung aus der Düse austretenden und dem im Zylinder verbrannten Luft-Kraftstoff-Gemisch bezeichnet. Die Kurven geben die Beziehung zwischen ASTM-Destillationswerten und wirklicher Flüchtigkeit, für vollkommenen befriedigenden Betrieb bei bestimmten Verhältnissen an. Diese Ergebnisse können zwar nicht allgemein uneingeschränkt übertragen werden, erlauben aber eine recht gute Beurteilung der Flüchtigkeitsanforderungen an die Kraftstoffe.

Abb. 9 zeigt die Beziehung zwischen der Temperatur für eine bestimmte Menge Destillat nach der ASTM-Destillation (Spalte 2 in Zahlentafel Abb. 9) und der Temperatur des vom Motor angesaugten Gemisches, wenn der Vergaser ein Luft-Brennstoff-Gemisch im Gewichtsverhältnis 12:1 bis 6:1 herstellt. Kennt man also die ASTM-Siedekurve eines Benzins, so kann man aus dem Schaubild für die angegebenen Luft-Kraftstoff-Verhältnisse die Möglichkeit des Anlassens und Beschleunigens ablesen.

Kurve	ASTM %	Mischungsverhältnis Luft/Brennstoff im		Wirkliche Flüchtig- keit in Prozent	Betriebsverhalten Beschleunigung Anlassen
		Vergaser	Zylinder		
A	90	12:1	12,0:1	100	ausgezeichnet
	65	8:1	12,3:1	65	ausgezeichnet
B	65	12:1	18,5:1	65	befriedigend
	55	8:1	14,5:1	55	sehr befriedigend
	45	6:1	12,0:1	50	ausgezeichnet
C	35	12:1	21,8:1	55	möglich
	35	8:1	17,5:1	45	befriedigend
	35	6:1	14,3:1	42	sehr befriedigend
D	10	8:1	20,0:1	40	möglich
	10	6:1	16,0:1	37	befriedigend

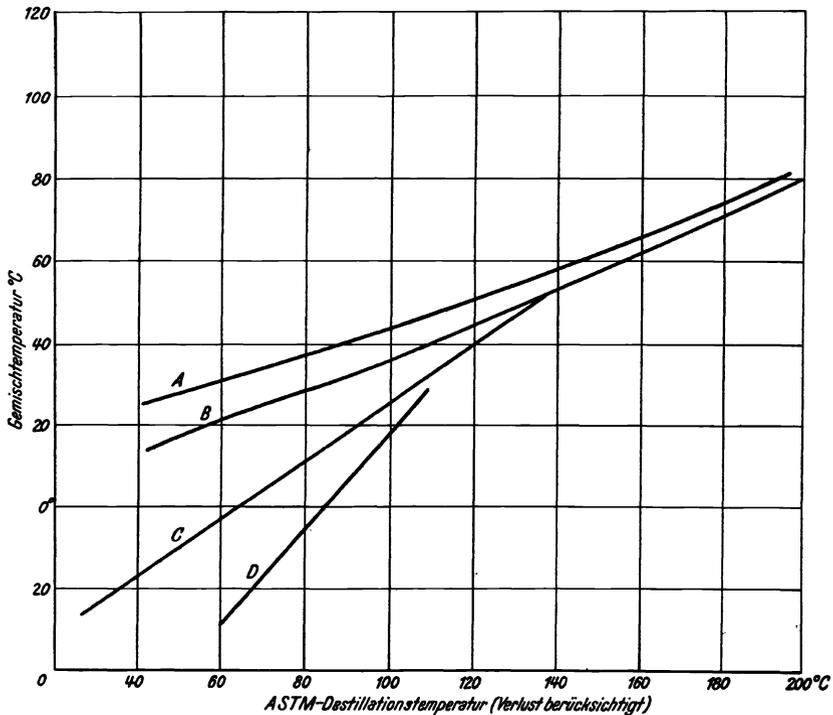


Abb. 9. Beziehung zwischen ASTM-Siedeverlauf und wirklicher Flüchtigkeit (nach G. G. BROWN).

Allerdings dürften die Verhältnisse bei Kraftstoffen mit hohen Verdampfungswärmen anders ausfallen, weil die ASTM-Destillation ja die zugeführte Wärmemenge nach der spezifischen und der Verdampfungswärme der Kraftstoffe so regelt, daß stets gleiche Mengen in der Zeiteinheit übergehen, während im Motor die pro Zeiteinheit verfügbare Wärmemenge bei den Versuchen eine konstante war. Auch spielen konstruktive Einflüsse eine große Rolle, sie können die Übertragbarkeit der Ergebnisse behindern.

In bezug auf Einzelheiten muß auf die sehr umfangreichen Versuche von G. G. BROWN, BRIDGEMAN und Mitarbeitern sowie EISINGER und Mitarbeitern verwiesen werden. Daß die Frage der Flüchtigkeit der Kraftstoffe noch nicht endgültig abgeschlossen ist, bewiesen die Vorträge auf der nur diesem Problem gewidmeten Tagung der SAE [27].

Die Dampfdruckbestimmung nach REID.

Zur Messung des Dampfdruckes wird in USA. ein verhältnismäßig einfaches Verfahren nach REID angewendet. Es besteht darin, daß in das Benzinglefäß in Abb. 10 unter Vermeidung von Verdunstungsverlusten Benzin eingefüllt wird. Dann wird die Bombe zusammengeschraubt, die Lufttemperatur im Luftgefäß gemessen. Nun erhitzt man sie in einem Wasserbad durch Eintauchen bis zur Unterseite des Manometers auf 37,8° C (100° F ± 0,5) so lange, bis beim Umschütteln nach Umdrehen des Apparats das Manometer nicht mehr ansteigt.

Zahlentafel 19. Kühlttemperaturen für Benzin und Benzinglefäß bei Probenahme zur Druckmessung.

Angenäherter Dampfdruck at	Für Einfüllen zulässige Höchsttemperatur °C
0,65	10° C
0,85	5° C
1,10	— 1° C
1,40	— 4° C
1,75	— 7° C
2,10	— 10° C

Zur Vermeidung von Verdampfungsverlusten muß bei der Probenahme durch Eingießen des Benzins (statt durch Untertauchen des Entnahmegefäßes im Brennstoff oder durch Druckprobeentnahme) der Kraftstoff erst auf eine entsprechend niedere Temperatur abgekühlt werden. Die nebenstehende Zahlentafel 19 gibt Angaben für diese Werte.

Vor jeder Bestimmung muß zur Entfernung von Benzinresten früherer Bestimmung die Luftkammer mit heißem Wasser (30 bis 40° C) ausgespült werden. Bei der Auswertung muß man den Druck der wasserdampfgesättigten Luft im Apparat abrechnen. Einen Anhalt für die Größe dieser Korrektur gibt die folgende Formel:

$$\text{Korrekturfaktor: } \frac{(P_a - P_t) \cdot (t - 37,8)}{273 + t} - (P_{37,8} - P_t) \cdot \frac{1}{735,5} \text{ kg/cm}^2,$$

worin P_a der Barometerstand in mm Hg, P_t der Druck des gesättigten Wasserdampfes bei $t^\circ\text{C}$ in mm Hg, t die ursprüngliche Temperatur der Luft, $P_{37,8}$ der Wasserdampfdruck bei 37,8° C in mm Hg ist.

Einzelheiten des Verfahrens sind in den ASTM-Standards on Petroleum Products and Lubricants zu finden, die von der ASTM in Philadelphia, Penna. herausgegeben werden.

Die Harzbildung und der Harzgehalt.

Während ein bereits vorhandener *Harzgehalt* sich auf das Ansaugsystem ungünstig auswirken, die Drossel verkleben, die Düse verstopfen und das Ansaugventil verschmutzen kann, hat die *Harzneubildung* im allgemeinen keine Bedeutung für den Motorbetrieb, sondern nur für das Lagerungsverhalten der Kraftstoffe. Aber auch vorhandenes Harz wird sich je nach den Betriebsbedingungen und der Motorkonstruktion in verschiedener Weise auswirken. Versuche von LIVINGSTONE, MARLEY und GRUSE zeigten, daß bei Temperaturen über 70° C im Ansaugsystem der Kraftstoff schon vor dem Einlaßventil vollkommen verdampfte und das Harz sich ablagerte; in diesem Falle wird die Störung auch bei größerem Harzgehalt gering sein. Bei kalter Ansaugleitung bleibt das Harz dagegen im nichtverdampften Kraftstoff, wird dann am Einlaßventil abgelagert und bildet auch zusätzlich Ölkohle bei der Verbrennung.

Die zulässigen Grenzwerte für den Harzgehalt liegen bei 6 bis 10 mg je 100 cm³ für Autobenzin, 3 mg je 100 cm³ für Fliegerbenzin. Die Zunahme des Harzes bei der Lagerung

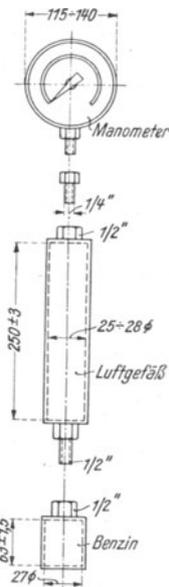


Abb. 10. Reidbombe zur Bestimmung des Dampfdruckes.

wird in Bombenversuchen geprüft, ohne daß bisher Einigkeit über das Verfahren bestände. Während Naturbenzine oder gesättigte synthetische Benzine große Beständigkeit aufweisen, neigen ungesättigte, vor allem Diolefine enthaltende Benzine stärker zur Harzneubildung. Die Entfernung solcher Stoffe ist besonders bei Krackbenzinen und bei Braunkohlenschwelbenzinen notwendig. Erwähnt sei, daß die Harzneubildung durch Spuren von gewissen Stoffen, wie z. B. Kupfer, außerordentlich beschleunigt werden kann. Vor allem bei Mischungen mit Alkohol können auf diese Weise schwere Störungen auftreten.

Bestimmung der Lagerbeständigkeit bzw. des Harzgehaltes.

Die Lagerbeständigkeit eines Kraftstoffes ist weniger physikalisch als chemisch bedingt, denn die vorkommenden Veränderungen bestehen nur zum geringen Teil in einer Verdunstung leichter Anteile, sondern vor allem aus einer oxydativen Polymerisation und Kondensation, die zur Harzabscheidung führen kann, und meist mit einem entsprechenden Abfall der Klopfestigkeit verbunden ist. Sie wird am besten durch Bestimmung des im Kraftstoff vorhandenen und des durch Oxydation neu entstehenden Harzes erfaßt. Dieses Harz ist gelb bis dunkelbraun und hat eine Konsistenz, die zwischen der eines klebrigen Öles und eines spröden Lackes schwanken kann. Es enthält merkliche Mengen von Sauerstoff und ist leicht in Alkohol, Aceton und Chloroform, schwer in Kohlenwasserstoffen löslich.

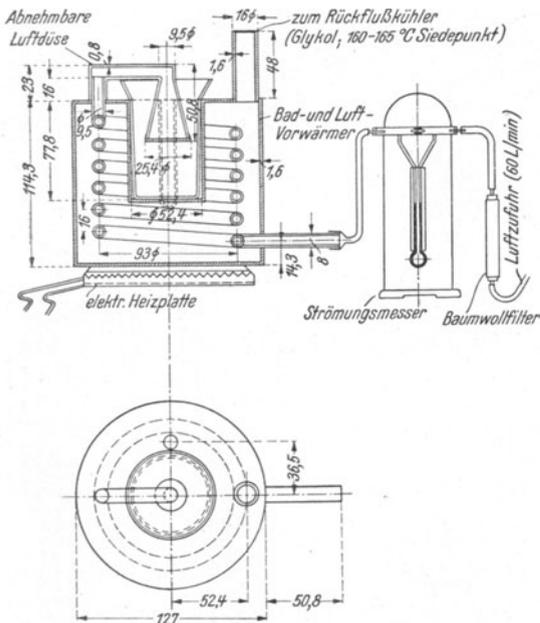


Abb. 11. ASTM-Apparatur zur Bestimmung des Harzgehaltes von Kraftstoffen.

Abdampfen des Kraftstoffes in Glasschalen. Allerdings wird gerade weil das erstere Verfahren zu scharf ist, kein Kraftstoff, der dabei gut abschneidet, im Betrieb Ventilstörungen geben, aber es kann ein darnach ungünstig beurteiltes praktisch brauchbar sein. Durch die zunehmende Verwendung von Krackbenzinen und Polymerbenzinen, die stärkeren Harzgehalt haben, ist es notwendig geworden, die Prüfung nicht überscharf zu gestalten. Man verwendet daher jetzt Glasschalen zur Harzbestimmung. Eine gemessene Menge Kraftstoff von einer eben übermittelten Sendung wird in eine saubere, halbrunde Glasschale von bestimmten Abmessungen gegeben und bei 110° C so verdampft, daß entweder Luft keinen Zutritt dazu hat (indem man eine Dampfatmosfera verwendet) oder bei Überleiten von Luft die Verdampfung innerhalb einer bestimmten Zeit ($\frac{1}{2}$ Stunde) erfolgt. Darnach wird der Rückstand in einem Trockenschrank bei 150° C eine Stunde lang erhitzt und nach 20 Minuten Abkühlen gewogen.

Um noch genauere Werte des vorhandenen Harzes zu erhalten, geht man in USA. dazu über, die Verdampfung durch Einbringen von 50 cm³ des Kraftstoffes in ein auf 160 bis 166° C erhitztes Bad zu beschleunigen. Dabei werden 60 l Luft/Minute übergeleitet. Die erhaltenen Werte liegen noch niedriger als die mit der einfachen Schalenmethode erhaltenen. Den Apparat zeigt Abb. 11.

Zur Beschleunigung der Harzbildung beim Laboratoriumsversuch, der die *Lagerbeständigkeit* erfassen soll, kann man Katalysatoren, höheren Druck und höhere Temperatur verwenden. Bisher werden nur die beiden letzteren benutzt. Da die Oxydation der Kohlenwasserstoffe zu Harzen, die vor allem bei ungesättigten, insbesondere diolefinischen Verbindungen einsetzt, erst nach längerer Zeit lebhafter wird, unterscheidet man eine Einleitungszeit (Induktionsperiode) vor der eigentlichen Reaktionszeit. Man kann nun entweder die Zeit messen, innerhalb welcher ein Kraftstoff beginnt Sauerstoff aufzunehmen, oder die Menge Harz, die sich innerhalb einer bestimmten, praktisch als Sicherheitsgrenze bekannten Zeit neu bildet. Die derzeit meistverbreitete Methode ist die Bombenmethode, bei der 200 cm³ Kraftstoff

Zahlentafel 20. Schlechte Reproduzierbarkeit von Lagerungsversuchen.

	Versuch 1	Versuch 2
Reines Benzin.....	4,1 mg	142,0 mg
80% Benzin, 20% Alkohol.....	7,5 „	50,2 „
45% Benzin, 40% Benzol, 15% Alkohol..	3,5 „	110,0 „
60% Benzin, 40% Benzol.....	4,5 „	53,0 „

in Glasgefäßen in einer Druckbombe mit 7 at O₂ 4 Stunden lang auf 100° erhitzt werden, wonach man in der vorgeschriebenen Weise auf neugebildetes Harz prüft. Einzelheiten der Versuchsdurchführung sind von CONRAD [29] angegeben.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Ergebnisse dieses Verfahrens mit der Praxis nicht sehr gut übereinstimmen. Das liegt zum Teil daran, daß schon die Wiederholung eines Laboratoriumsversuches Unstimmigkeiten ergibt, wie sich bei den sehr sorgfältig durchgeführten Versuchen von CONRAD zeigte. So hatten 4 Kraftstoffe bei Wiederholung eines Lagerversuches in 2 Fässern (Versuche parallel durchgeführt) nach 26 Monaten Harzmengen nach Zahlentafel 20.

Der Vergleich zwischen Lagerungsversuch und praktischem Lagerverhalten war nach CONRAD ebenfalls nicht vollkommen befriedigend, wie die Gegenüberstellung in Zahlentafel 21 beweist.

Immerhin ist bei den Versuchen das Ergebnis in der Richtung beweiskräftig, daß fast nie ein Kraftstoff in der Bombe zu gut beurteilt wurde; entspricht er also im Bombenversuch, so ist mit großer Wahrscheinlichkeit auch in der Praxis einwandfreies Verhalten vorauszusagen.

Zahlentafel 21. Harz Neubildung in der Bombe und bei Lagerung.

Kraftstoff	Harz in der Bombe mg/100 cm ³	Harz bei Lagerung mg/100 cm ³
Reines Benzin a.....	2,0	3,8
Reines Benzin b.....	25,0	5,0
80% Benzin c, 20% Äthanol reinst.....	650,0	7,5
80% Benzin c, 20% Äthanol und Beschleuniger.....	950,0	343,0
Motorenalkohol.....	2,0	3,2
Motorenbenzol.....	4,0	5,8

Als Bezugsstoff zur Beurteilung der Wirkung von oxydationshindernden Hemmstoffen wird neuerdings Cyclohexen vorgeschlagen [30]; man verwendet darnach Gemische aus Krackbenzinen mit Destillatbenzinen, die so eingestellt sind, daß ein Zusatz von 0,002% α -Naphthol darin die gleiche oder eine ganzzahlige vielfache Wirkung hervorruft, wie in Cyclohexen.

Kältebeständigkeit.

Die Kältebeständigkeit der Benzine ist sehr hoch; erst unter — 100° C tritt langsam Dickwerden und Verfestigung ein. Aromaten, wie Motorenbenzol, weisen demgegenüber höhere Gefrierpunkte auf, die etwa mit dem Gehalt an Reinbenzol ansteigen. Eine hier und da vorkommende Störung ist durch das Ausfrieren von im Kraftstoff gelösten Wassers verursacht, zu deren Abhilfe der Kraftstoff entweder vor dem Tanken getrocknet oder mit Alkoholzusatz verwendet werden muß. Zusatz von Alkohol oder ähnlichen, wasserlöslichen Stoffen kann allerdings die Gefahr der *Entmischung* vergrößern. Sie nimmt zu

mit der Menge nicht alkoholischer (oder nicht wasserlöslicher) Anteile, mit der Höhe der Siedekurve der Kohlenwasserstoffe, in bezug auf die chemische Zusammensetzung nach der Reihenfolge: Aromaten, Naphthene und Olefine, Paraffine, endlich mit dem Wassergehalt des verwendeten Alkohols (oder wasserlöslichen Bestandteiles).

Korrosion.

Die Korrosion durch Kraftstoffe muß unterteilt werden in die durch die unverbrannten Kraftstoffe und die durch die Verbrennungsprodukte. Korrosion durch unverbrannte Kraftstoffe wird meistens überdeckt durch einfache Wasserkorrosion. Besonders Leichtmetalle werden durch Wasser viel stärker angegriffen als durch Kohlenwasserstoffe, so daß einfache Trocknung oder Schutz gegen Wasseraufnahme die Korrosion verhindert. Die Verwendung von Alkoholgemisch verursacht anfänglich Lösung von Harzen, die bei Benzinbetrieb nicht löslich waren, und täuscht eine vermehrte Korrosion vor; es ist deshalb beim ersten Betrieb mit solchen Kraftstoffen notwendig, die Leitungen gut durchzuspielen. Alkoholgemische, insbesondere solche mit Methanol, neigen allerdings fraglos stärker zur Korrosion als Benzin oder Benzol. Vor allem bei längerem Stehenlassen von Leichtmetallvergasern mit solchen Gemischen können Störungen eintreten. Die Baustoffe müßten deshalb vor ausgedehnterer Anwendung auf ihre Korrosionsneigung und gegebenenfalls auf die Möglichkeit ihres Schutzes hin geprüft werden. Gute Entwässerung des Alkohols, die vor allem durch azeotropische Destillation oder auch durch Destillation über gebrannten Kalk erreicht wird, verringert den Korrosionsangriff sehr. Die Prüfung auf Korrosion geschieht meistens durch (z. B. 5stündiges) Erhitzen von Cu- und Aluminiumblechen in dem Kraftstoff und Berücksichtigung der erfolgten Oberflächenveränderung. Bei längeren Versuchen kann man unter Umständen Gewichtsveränderungen messen. Korrosion im Kurbelgehäuse durch die Verbrennungsprodukte ist eine Funktion verschiedener Bedingungen. In Frage kommt vor allem Gehalt des Brennstoffes an Schwefel, dessen Bedeutung allerdings überschätzt wurde, wie insbesondere EGLOFF nachwies. Nur bei sehr kalter Witterung ist ein Gehalt über 0,1% schädlich und auch da nur, wenn kein ununterbrochener Betrieb stattfindet oder die Betriebstemperaturen nieder liegen. EGLOFF hält einen Schwefelgehalt von 0,3 bis 0,4% für unbedenklich, wenn keine besonders ungünstigen Verhältnisse vorliegen. Neuere Versuche sprechen allerdings dafür, daß tatsächlich eine Erhöhung des Schwefelgehaltes im Brennstoff über 0,1% zu stark vermehrtem Angriff führen kann. Da die Korrosion durch die im Verbrennungswasser gelöste schwefelige Säure, bzw. durch daraus entstehende Schwefelsäure verursacht wird, handelt es sich darum, diese Lösung zu verhindern, indem man die Temperatur des Kurbelgehäuses über dem Taupunkt der Verbrennungsgase hält. Das gleiche gilt für die Verbrennungsprodukte des Alkohols, die oft wegen ihres Gehaltes an Essigsäure Korrosionen bewirken, die zu Anfressungen in den Auspuffleitungen führen. Anders ist es bei der Korrosion durch Bleibenzin, d. h. ethylisierten Benzin. Die Verbrennung ergibt hier Bleioxydbromid, das abgelagert wird und je nach den konstruktiven Verhältnissen und den klimatischen Bedingungen dank seiner Hygroskopizität Wasser anzieht. Die entstehende, vor allem bei Stillsetzung von Motoren beobachtete, konzentrierte wäßrige Lösung von Bleibromid greift Metall stark an. Schutz gibt außer kurzzeitigem Betrieb mit bleifreien Kraftstoffen vor dem Abstellen die rechtzeitige Verhinderung der Wasseraufnahme durch Einsprühen von luftabschließenden und neutralisierenden Lösungen, wie das F. G. 174 der Ethyl Co., das aus einer Lösung von 10% Aluminiumstearat, 5 bis 6% Triäthanolamin, 10 bis 12% n-Butanol und Specköl besteht. Abnutzung der Zylinder wird nicht nur durch Verschleiß, sondern auch durch Korrosion — vor allem beim Anlassen — verursacht.

c) Grenzwerte der Anforderungen an Benzine.

α) Kraftwagenbenzine.

Lieferbedingungen der amerikanischen Regierung und der USA.-Marine, die auch für sehr viele Privatverbraucher maßgebend sind, zeigen die folgenden Zusammenstellungen:

Stoff	USA.-Regierungsvorschriften		USA.-Marinevorschriften	
	Autobenzin	Spezialbenzin V M—571	7G2	7G2a
Datum	11. 9. 1929	21. 7. 1931	1. 2. 1930	1. 3. 1933
Allgemeine Anforderungen.....	Freiheit von Wasser und suspendierten Bestandteilen			
Destillation:				
Siedebeginn	—	—	—	—
10% Destillat	50—80° C	unter 70° C	60—80° C	unter 70° C
50% „	unter 140° C	„ 125° C	unter 140° C	„ 125° C
90% „	„ 200° C	„ 180° C	„ 200° C	„ 180° C
Siedepunkt	„ 225° C	—	„ 225° C	—
Gesamtdestillation	95%	—	95%	—
Rückstand	—	unter 2%	—	unter 2%
Korrosion: Nur sehr schwache Verfärbung eines blanken Kupferbleches nach 3 Stunden bei 50° C.				
Gesamtschwefel: In allen Fällen wird ein Schwefelgehalt unter 0,1% verlangt.				
Dampfdruck nach R ₁₀ D	—	unter 10 Pfd./Zoll ² bei 37,8° C	—	unter 10 Pfd./Zoll ² bei 37,8° C

In einer Ergänzung der Vorschrift für Autobenzin V-V-G 101 vom 21. 7. 1931 wird der 10%-Punkt auf mindestens 75° C und der Dampfdruck auf 12 Pfd./Zoll² gelegt und der Regierung das Recht vorbehalten, für Gegenden mit einer mittleren Januartemperatur über — 2,8° C Benzine mit Dampfdrücken über 10 Pfd./Zoll² abzulehnen, ebenso für die Monate Juni bis September solche mit einem Dampfdruck über 8 Pfd./Zoll².

Die klopf—theften Benzine der Ethyl Gasoline Corporation haben ab 1. März 1932 eine Mindestoctanzahl von 78. Benzine, die mit Bleitetraäthyl (siehe später) zur Erhöhung der Klopf—theftigkeit versetzt werden sollen, müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Schwefelgehalt unter 0,1%.
- Korrosion eines blanken Kupferblechs nicht mehr als sehr schwach nach 3 Stunden bei 50° C.
- Harzgehalt entsprechend den Anforderungen der Ethyl-Gesellschaft.
- Destillation: April—Oktober mindest 10% bis 70° C, 50% bis 140° C, 90% bis 200° C,
Oktober—April „ 10% „ 65° C, 50% „ 140° C, 90% „ 200° C.
- Dampfdruck vom 1. April bis 1. Oktober: unter 8 Pfd./Zoll²; vom 1. Oktober bis 1. April: unter 10 Pfd./Zoll².

β) Fliegerbenzine:

Zahlentafel 22. Fliegerbenzine.

Vorschrift	Englisches Luftfahrtministerium		Französisches Luftfahrtministerium		USA. Air Corps Y-3557/G
	DTD 224	DTD 230	Normes 340/1 2 Aeronef A	Normes 340/1 2 Aeronef	
Spez. Gewicht max.	0,79	0,79	0,78	0,78	—
Siedeverlauf:					
10% Destillat unter..	75° C	75° C	unter 75° C	unter 75° C	unter 75° C
20% „ „	—	—	über 75° C	über 75° C	—
50% „ „ unter..	100° C	100° C	unter 100° C	unter 100° C	—
90% „ „ „ ..	150° C	150° C	unter 150° C	unter 150° C	unter 135° C
96% „ „	—	—	—	—	—
Endpunkt max.	180	180	180	180	—
R ₁₀ D-Dampfdruck bei 37,8° C (100° F) max. .	in allen Fällen 0,5 at (entspr. 7 Pfund/Quadratzoll)				
Schwefelgehalt max.	0,15%	0,15%	0,15%	0,15%	0,10%
Vorhand. Harz max.	10 mg/100 cm ³	10 mg/100 cm ³	6 mg/100 cm ³	6 mg/100 cm ³	—
Harzneubildung max. . .	10 mg/100 „	10 mg/100 „	—	—	10 mg/100 cm ³
Kristallisationsbeginn unter	— 50° C	— 60° C	— 45° C	— 45° C	— 60° C
Bleihöchstgehalt	0	4 cm ³ /Imp. Gal.	—	0,8%	6 cm ³ /US. Gal.
Mindestoctanzahl	77	87	70	85	92 (nominell) ¹
Verfahren	CFR-Motormethode mit 260° F Gemischtemperatur				

¹ Bei Vergleich mit Substandard C7 der Standard Oil Development Company + 2 cm³ Pb/US. Gal. im abgeänderten CFR-Motor muß Kraftstoff gleichwertig sein, d. h. darf keine höheren, mittleren Verbrennungsraum-Temperaturen ergeben (1200 U/min; 166° Kühltemp., 30° V. Zdg.).

Zahlentafel 23. Otto-Kraftstoffe.

Bezeichnung	Spezifisches Gewicht (15° C)	Siedeverlauf		Siedende	Kennziffer: Mittlere Siedetemperatur	Wasserlöslich (Alkohol) %	Dampfdruck nach Reid 37,8° C	Octanzahl (CFB-Research-Methode) ¹	Jodzahl	Harz	
		Beginn	bis 100° C %								
1. Für Automobilmotoren:											
„Standard“	0,733	40	50	184	—	12	0,87 kg/cm ²	79,5	—	—	
Deutsches Benzin	0,742	37	49	197	107	15	—	75	—	—	
Baku-Benzin	0,751/52	—	27/30	148/163	111—113	—	—	70/71	—	—	
Grosny-I.-Benzin	0,723	44	35	180	—	—	—	54 (M.)	—	—	
Rumänisches Benzin	0,725	38	60	150	—	—	—	67—70 (M.)	—	—	
Braunkohlenbenzin	0,800	71	23	190	—	—	—	72 (M.)	—	26 mg/100 cm ³	
Hydrierbenzin:											
aus Braunkohlenteer	0,732/35	—	33/36	190/95	119/23	—	—	63/65	ca. 5	—	
„Steinkohle“	0,748/52	—	30/36	195	124/28	—	—	67/69	„ 5	—	
„Standard“-Gemisch	0,769	39	57	187	—	—	0,487 kg/cm ²	81	—	—	
Benzin-Benzol	0,786	58	57	180	—	9,9	—	79 (M.)	—	—	
Motorbenzol	0,872	82	77	160	—	—	—	über 100—109 (M.)	—	—	
2. Flugmotoren:											
B. P. Fliegerbenzin	0,719	42	62	150	—	—	—	72 (M.)	—	—	
„ „ + 0,13% Ethylfluid	0,719	42	62	150	—	—	—	86	—	—	
3. Für Traktoren:											
„Standard“	0,832/50	157° C	—	55	263° C (95%)	—	—	< — 50	43	10 600	
„Derop“	0,830	—	—	39	272° C	—	—	—	44	—	

¹ M. bedeutet, daß die Messung nach der Motormethode vorgenommen wurde.

d) Eigenschaften von handelsüblichen Benzin.

Eigenschaften von Benzin des Handels sind in der Zahlentafel 23 zusammengestellt.

4. Flüssige Kraftstoffe für Diesel-Motoren.

a) Allgemeine Anforderungen.

Die hauptsächlich von Dieselkraftstoffen verlangten Eigenschaften werden durch folgende Betriebsanforderungen bestimmt:

1. Der Kraftstoff muß bei allen Betriebsverhältnissen (z. B. niederen Temperaturen) zur Pumpe gefördert werden, ohne Tanks und Leitungen zu korrodieren oder die Pumpe zu schädigen.

2. Bei der Einspritzung muß er sich gut zerstäuben lassen. Die Düse darf nicht durch Verkokung verschmutzen.

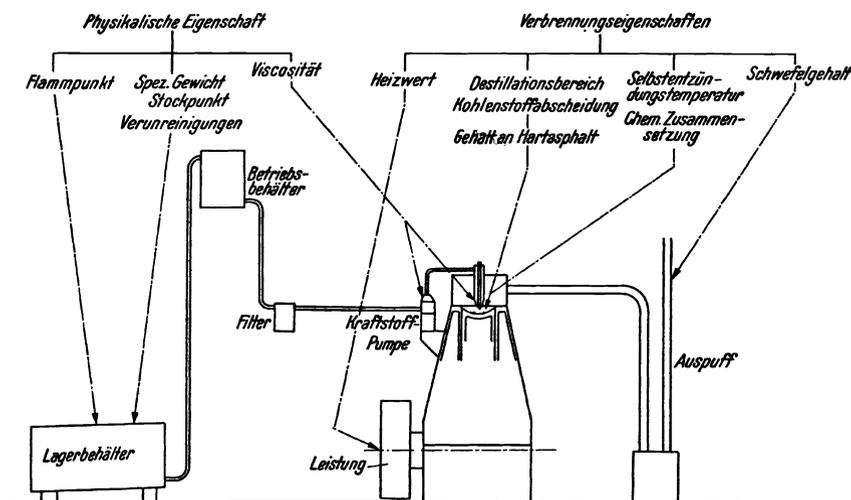


Abb. 12. Schema der für den Diesel-Motor wichtigsten Kraftstoffeigenschaften.

3. Beim Anlassen muß der Motor gleich anspringen, d. h. die Zündwilligkeit des Kraftstoffes muß genügen. Der Druckanstieg bei der Verbrennung darf nur gering sein, d. h. der Kraftstoff darf keine größere Zündverzögerung aufweisen. Endlich soll bei der Verbrennung möglichst wenig Rückstand entstehen.

4. Der Heizwert soll möglichst hoch sein.

Zur Kennzeichnung der für Dieseltreibstoffe wichtigen Eigenschaften eignet sich ein von EVERETT angegebenes Schema (Abb. 12) gut, in dem ihre Einflüsse auf die verschiedenen Bauteile dargestellt sind. Darnach werden die Eigenschaften eingeteilt in die physikalischen, die bis zum Eintritt in den Zylinder von Bedeutung sind, und die chemischen bzw. Verbrennungseigenschaften, die nachher eine Rolle spielen.

b) Besprechung der Eigenschaften.

α) Physikalische Eigenschaften.

Die *Zähigkeit*, d. h. der innere Widerstand, der auftritt, wenn man parallele Flüssigkeitsschichten gegeneinander verschiebt, ist ein Maß für die Möglichkeit, das Öl der Pumpe zuzuführen und in den Zylinder zu zerstäuben. Sie wird für Gasöle, die sehr niedere Viskositätsgrade aufweisen, besser in absoluter Zähigkeit (Centipoisen) als im technischen

Maß (z. B. ENGLER, SAYBOLT oder REDWOOD) ausgedrückt, weil dabei Unterschiede zum Ausdruck kommen, die sonst fast verschwinden, wie die folgende Gegenüberstellung zeigt.

Der Saugteil der Pumpe soll etwa unter einem Druck von 1 m Kraftstoffsäule stehen und die Leitungen müssen so bemessen sein, daß bei der gegebenen Zähigkeit des Kraftstoffes genügend davon zur Füllung des Pumpenhubes nachfließt. Auch wird dadurch vermieden, daß sich gelöste Luft ausscheidet. Wie mit abnehmender Zähigkeit die Leckverluste der Pumpe zunehmen, zeigt die Abb. 13 nach EVERETT. Die untere Grenze der Zähigkeit wird durch die Leckverluste, die obere durch die Zerstäubungsmöglichkeit bestimmt. Bei direkter Einspritzung nahm nach EVERETT mit einer Erhöhung der Zähigkeit von 1,45° E auf 2,92° E der notwendige Pumpendruck von 155 at auf 210 at zu.

Zahlentafel 24. Zähigkeit von Gasölen in Engler-Graden und Centipoisen bei 20°C.

Dieselloil 1	1,16° Engler	1,84 Centipoisen
"	2 1,18° "	2,18 "
"	3 1,22° "	2,33 "
"	4 1,44° "	4,67 "

Der *Flammpunkt* gibt ein Maß der Feuergefährlichkeit, indem er anzeigt, bei welcher Temperatur die Möglichkeit der Bildung explosiver Gemische eintritt. Er ist gesetzlich in den meisten Ländern festgelegt, in Deutschland für Gefahrenklasse III bei den Lagerungsvorschriften mit 55° C (Flammpunktprüfer ABEL-PENSKY). Sein Wert schwankt je nach dem Meßverfahren, das deshalb mit angegeben werden muß. Die Deutsche Reichsbahn gewährt für Dieselloil mit spezifischem Gewicht 0,835, Zähigkeit über 2,6° E und einen Flammpunkt (Prüfung im Tiegel) über 50° C einen ermäßigten Tarif F.

Das *spezifische Gewicht* gibt annähernd ein Maß für das Zündverhalten, weil man daraus auf den ungefähren Wasserstoffgehalt schließen kann. Je leichter der Kraftstoff ist, desto zündwilliger ist er im allgemeinen. Spezifisch schwere Kraftstoffe können jedoch

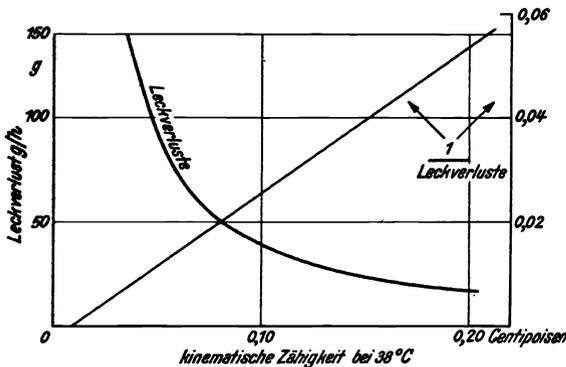


Abb. 13. Leckverluste und Zähigkeit von Dieselloilen.

bei gleicher Pumpeneinstellung mehr Leistung ergeben als leichtere, weil, nach dem Heizwert gemessen, größere Mengen befördert werden.

Der *Stockpunkt* gibt ein ungefähres Maß für die Kältebeständigkeit der Dieselloil, soweit es ihren Zufluß vom Tank zur Pumpe, d. h. das Fließen unter ihrem eigenen Gewicht anbelangt. Die Pumpmöglichkeit beurteilt man besser aus der extrapolierten Viskositätskurve oder der direkt unter einem entsprechenden Druck gemessenen Viskosität.

Die *Filtrierbarkeit*, vor allem bei tiefen Temperaturen, wird vorteilhaft gesondert bestimmt. HAGEMANN und HAMMERICH [33] drücken aus einem 300 cm³ Dieselloil enthaltenden Gefäß 200 cm³ mit 0,5 at Luftdruck durch 10 Kupfersiebe mit 0,1 mm Maschenweite mit einer Oberfläche von 6 × 6 mm und schlagen als *Filterindex* den Wert vor:

$$\text{Ausflußzeit mit Filter} / \text{Ausflußzeit ohne Filter.}$$

Verunreinigungen spielen sowohl bei kleineren als bei großen Motoren eine sehr große Rolle. Während die feinen Düsenbohrungen der kleinen Motoren gegen Verstopfungen empfindlicher sind als die größeren von Motoren hoher Leistung, ist der Verschmutzungsgrad bei dem Gasöl (das für kleine Motoren verwendet wird) viel kleiner als bei dem Dieseltreiböl der großen Motoren. Die Verunreinigungen bestehen aus Staub, Rost, Sand und Wasser, die während des Transports in das ursprünglich saubere Öl gelangen. Die Art der Verunreinigungen ist fast wichtiger als ihre Menge, Sand ist besonders gefährlich. Es ist dringend notwendig, den Kraftstoff vor seiner Verwendung zu reinigen, wie dies bei

größeren Anlagen durch Zentrifugieren oder sonst durch Absitzenlassen, gegebenenfalls unter Erwärmen durchgeführt wird. Paraffin, das den Stockpunkt erhöht und im Filter zu Störungen Anlaß geben kann, hat auf den Grad der Zerstäubung keinen Einfluß, wenn genügend vorgewärmt wird. Bei Mischung von Teerölen mit Erdölen können sehr unangenehme Ausscheidungen eintreten, die, ähnlich wie bei der Asphaltbestimmung mit Normalbenzin in Schmierölen, durch Ausfällung infolge verringerter Löslichkeit zustande kommen. Deshalb sind die Behälter vor Füllung mit andersartigem Dieselkraftstoff gut zu reinigen.

β) Verbrennungseigenschaften.

Der *untere Heizwert* der Dieselöle aus Erdöl liegt ziemlich gleichmäßig bei etwa 10200 bis 10250 kcal/kg. Heizöle haben etwas geringeren Heizwert, von 10000 bis 10200 kcal/kg, während der Heizwert der Steinkohlenteeröle zwischen 9150 und 9250 kcal/kg schwankt. Braunkohlenteeröle haben je nach ihrem Phenolgehalt verschieden hohen Heizwert, er erreicht beim Paraffinöl den Wert 10400 kcal/kg.

Die *Flüchtigkeit* ist in ihrem Einfluß nicht ganz geklärt. BOERLAGE gibt an, daß in manchen Motoren die schlechte Verteilung des Brennstoffes in der Luft bei leichtflüchtigen Stoffen eher zur Ansammlung größerer Mengen zündbaren Gemisches führt, das dann Klopfen verursacht. Allerdings verwendet man in Schnellläufern kleinerer Abmessungen Treibstoffe mit niedrigerer Siedekurve als in großen Langsamläufern, doch ist dies mehr eine Frage der Viskosität als der Flüchtigkeit.

Unter *Hartasphalt* wird ein Bestandteil mit erheblichem Sauerstoff- und Schwefelgehalt und hohem Molekulargewicht verstanden, der in einem vereinbarten, zwischen 60 und 90° C siedendem Benzin nicht löslich, hingegen in Benzol löslich ist. Hartasphalt kann in Dieselölen für große Maschinen in erheblichen Mengen verbrannt werden, ohne daß Störungen auftreten. In kleinen Schnellläufern führt er aber zu Ventilschwierigkeiten und Festsetzen der Kolbenringe.

Rückstandsbildung aus dem Kraftstoff ist zwar nicht die einzige, aber doch die Hauptursache der Düsenverstopfungen. Nachtropfen bei der Einspritzung kann auch bei gutem Gasöl zu Verkokungen führen.

Die Bestimmung des Verkokungsverhaltens nach CONRADSON gibt kein sehr befriedigendes Maß für das Verhalten des Kraftstoffes in der Düse; ein Vorschlag von HAGEMANN und HAMMERICH, Dieselkraftstoffe mit Luft zu erhitzen und die gebildeten Asphalt- und Kohlemengen zu messen, hat sich bisher nicht durchgesetzt. Dagegen ist der CONRADSON-Wert für die Beurteilung der Rückstandsbildung im Verbrennungsraum gut geeignet. Im allgemeinen beträgt der CONRADSON-Wert die Hälfte des Hartasphaltgehaltes.

Der *Schwefelgehalt* spielt keine allzu große Rolle. Bei niederen Betriebstemperaturen ist während des Anlassens allerdings die Möglichkeit zu verstärkter Korrosion gegeben, doch dürfte dies infolge der geringen Zeitdauer selten zu größeren Angriffen führen. Immerhin wird der Schwefelgehalt für Schnellläufer meist mit 1,0%, für Langsamläufer mit 2,0% begrenzt. Im Auslaßsystem kann Kondensation des Wassers in den Auspuffgasen zu Störungen Anlaß geben und sowohl Ventilstörungen als auch Anfressungen der Auspuffleitungen verursachen. Im Kurbelgehäuse auftretende Korrosionen sind meist durch kondensiertes Verbrennungswasser verursacht. Es empfiehlt sich zum Schutz dagegen die Schmieröltanks mit einem Ablaß zu versehen und abgesetztes Wasser zu entfernen, außerdem aber das umlaufende Öl durch Zentrifugieren, gegebenenfalls unter Zugabe von destilliertem heißen Wasser von gebildeter Mineralsäure zu befreien.

Korrosion von Kupfer- oder Messingteilen durch phenolhaltiges Teeröl ist nur durch Verwendung anderer Baustoffe zu vermeiden.

Das *Zündverhalten* ist die wichtigste Eigenschaft der Dieselkraftstoffe. Man versteht darunter die Neigung des Kraftstoffes, sich ohne Zündflamme, nur durch die bloße Erhitzung in Luft (oder Sauerstoff) zu entzünden. Maßgebend für die Beurteilung dieses Zündungsverhaltens bei gegebenen Bedingungen sind die niederste Temperatur, bei der

die Zündung erfolgt, und die Zeit, die nach Einbringen des Kraftstoffes bis zum Eintritt der Zündung verstreicht.

Die chemische Zusammensetzung spielt für das Zündverhalten eine große Rolle. Sie steht mit den verschiedenen physikalischen Eigenschaften des Kraftstoffes, wie spezifisches Gewicht, Flüchtigkeit und Zähigkeit, in Verbindung. Die Temperatur, bei der gleiche Volumen von Kraftstoff und wasserfreiem Anilin sich vollkommen mischen, heißt Anilinpunkt. Dieser steigt mit dem Gehalt an leicht zündendem Paraffin. Wenn man für den Vergleich von Dieselölen eine dieser Eigenschaften bei allen Ölen gleich groß wählt, ergeben sich für die anderen Eigenschaften entsprechende Unterschiede je nach der chemischen Zusammensetzung. Die Hauptgruppen der Kohlenwasserstoffe, paraffinische, naphthenische und aromatische Verbindungen, wechseln ihrer Menge nach in den einzelnen Erdölen und dementsprechend in den daraus gewonnenen Dieseltreibstoffen sehr stark. Man benutzt die Beziehung zwischen dem Zündverhalten und den verschiedenen durch die chemische Zusammensetzung gegebenen physikalischen Eigenschaften zu dessen Charakteristik. So haben BECKER und FISCHER [36] als Dieselindex den Wert

$$\text{Anilinpunkt in } ^\circ\text{F} \times \text{spezifischem Gewicht in API-Baumgraden}^1$$

für die Zündwilligkeit vorgeschlagen.

Die *Zähigkeitsdichtezahl* wurde zuerst von HILL und COATS eingeführt, später von MOORE und KAYE [35] abgeändert. Sie wird nach der folgenden Gleichung bestimmt: Spez. Gewicht bei $15,5^\circ\text{C} = 1,082 A - 0,0887 + (0,776 - 0,72 A) \times \log \log (KV - 4)$, worin A die Zähigkeitsdichtekonstante und KV die kinematische Zähigkeit in Millistokes bei $37,8^\circ\text{C}$ bedeutet.

Die *Zähigkeitsdichtekonstante* wird nach dem Vorschlag von HILL und COATS [34] aus folgender Formel errechnet:

$$\text{Zähigkeitsdichtekonstante} = \frac{10 G - 1,0752 \log (V - 38)}{10 - \log (V - 38)},$$

worin G das spezifische Gewicht bei $15,5^\circ\text{C}$ und V die SAYBOLT-Viskosität (d. h. Sekunden Auslaufzeit) bei $37,8^\circ\text{C}$ bedeuten. Die praktische Bedeutung der Zahlen ergibt sich aus den Grenzanforderungen der ASTM (vgl. Zahlentafel 26).

Ob eine derartige Rechnung wirklich Aussicht hat, wesentlich bessere Übereinstimmung zu ergeben als die einfache Dieselindexrechnung oder der Vorschlag von MARDER, muß sich noch erweisen. Es ist jedenfalls bezeichnend, daß diese Laboratoriumscharakteristik sich bereits in Vorschlägen der ASTM findet, um die Zündeigenschaften der Dieseltreibstoffe zu kennzeichnen.

HEINZE und MARDER verwendeten erst den spezifischen Parachor p , d. h. den Wert

$$p = \frac{1}{d} \cdot \delta^{\frac{1}{2}},$$

worin δ die Oberflächenspannung (mg/mm), d die Dichte (g/cm^3) ist. Durch Vergleich zwischen dem spezifischen Gewicht und der Cetenzahl kam aber MARDER zu der wohl etwas zu weit gehenden Folgerung, daß dieses allein bei Berücksichtigung des Molekulargewichtes einen genügenden Anhalt für das Zündverhalten der Dieselöle gebe [38]. BOERLAGE und BROEZE sind der Ansicht, daß die thermische Beständigkeit der Kraftstoffe, die ja durch die chemische Zusammensetzung bedingt ist, ausschlaggebend für ihr Zündverhalten sei, doch müsse man noch einen zweiten Faktor mitberücksichtigen, wie z. B. die Aktivierungsenergie der Bruchstücke.

Wichtig für die Beurteilung des Selbstzündungsverhaltens im Motor und in einem Laboratoriumsgerät ist die Tatsache, daß es von einer ganzen Reihe von Umständen abhängig ist. BOERLAGE und BROEZE [39] unterscheiden einen physikalischen und einen chemischen Zündverzug, die sich beide überschneiden. Der physikalische, der vor allem

¹ API = American Petroleum Institut.

bei schweren Treibstoffen in Frage kommt, setzt sich aus der Anwärmung der Tröpfchen, ihrer teilweisen Verdampfung und der Erhitzung der Dämpfe auf die Temperatur der Luft zusammen, während der im allgemeinen vorherrschende, chemische Zündverzögerung auf der rascheren oder langsameren Wärmeentwicklung infolge der Reaktion zwischen Kraftstoffdampf und Luft beruht. Die Erscheinung des Dieselmotorklopfens kommt dadurch zustande, daß eine übermäßige Menge Kraftstoff sich auf einmal entzündet, ähnlich wie beim Vergaserkraftstoff das Klopfen durch eine plötzliche Selbstzündung des unverbrannten Restgases nach der durch den Zündfunken eingeleiteten ruhigen Primärverbrennung entsteht. Man muß zwei Ursachen für eine solche Ansammlung zu großer Kraftstoffmengen unterscheiden:

1. Eine rein physikalische, die durch schlechte Verteilung des Kraftstoffes verursacht ist (leichtflüchtige Kraftstoffe können deshalb ungünstiger sein, als schwerflüchtige).
2. Eine chemische Ursache, bei der infolge des langen Zündverzuges viel Kraftstoff eingespritzt und verdampft wird, ehe die Zündung einsetzt.

Auch zu frühe Einspritzung kann großen Zündverzögerung und damit Klopfen ergeben. Nicht immer sind Kraftstoffe mit dem geringsten Zündverzögerung für einen bestimmten Motor am besten geeignet. So war z. B. ein bestimmter Wirbelkammermotor besser mit einem Kraftstoff mit hohem Zündverzögerung (Cetenzahl 30) als mit einem solchen mit niedrigerem Zündverzögerung (Cetenzahl 60) zu betreiben. Im allgemeinen ist aber kleiner Zündverzögerung für einen Dieselmotorkraftstoff erwünscht.

Bei der Verbrennung selbst unterscheiden BOERLAGE und BROEZE zwischen der direk-

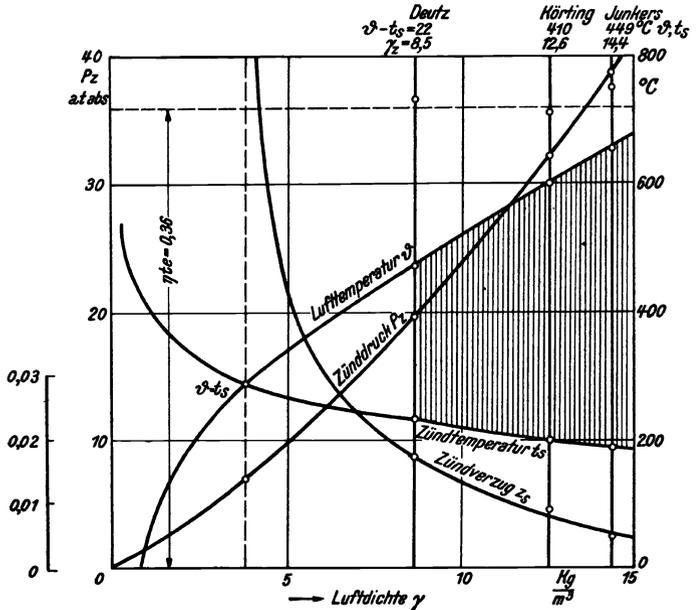


Abb. 14. Zündungswerte für kompressorlose Dieselmotoren (bei Vollast).

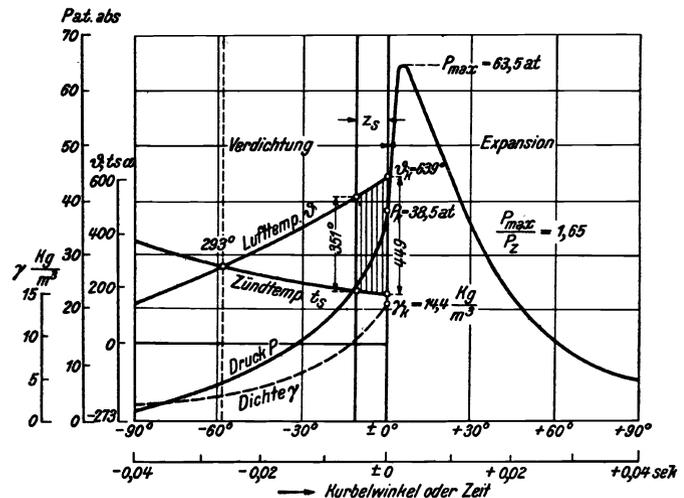


Abb. 15. Zündungs- und Verbrennungsvorgang in der Junkersmaschine (2 HK 160, Zweitakt, Hub 560 mm; Bohrung 160 mm, 377 U/min. Leistung Ne = 121 PS; Spritzbeginn 11° v. o. Tp. Zündverzögerung 0,00486 sek) nach NEUMANN.

	DEUTZ	KÖRTING	JUNKERS
Verdichtungsdruck	27,0	39,5	38,5
Zünddruck	19,5	32,0	38,5
Höchster Verbrennungsdruck	40,5	42,8	63,5
Drucksteigerung bei Verbrennung	2,39	1,34	1,65
Lufttemperatur bei Zündung	458	605	639
Zündtemperatur des Brennstoffes	238	195	190
Unterschied	220	410	449
Zündverzögerung	0,0181	0,00935	0,00486
Luftdichte bei Zündung	8,5	12,6	14,4

ten Oxydation (Hydroxylationstheorie von BONE und WHEELER), die für die Bildung von scharf riechenden aldehydischen Verbindungen und — bei plötzlicher Abkühlung der Flamme — von lackartigen Überzügen verantwortlich gemacht wird und der Aufspaltung und nachfolgenden Oxydation der Bruchstücke (nach AUFHÄUSER), die bei der Verbrennung flüssiger Kraftstoffteilchen eintritt und z. B. den blauen Rauch des Auspuffes sowie den weichen Ruß im Verbrennungsraum bildet. Der Verbrennungsablauf erfolgt außerordentlich rasch, da die Dauer des Verbrennungshubes bei hoher Drehzahl bis auf 0,003 sek absinkt. Interessant ist dabei, daß die Dauer des Zündverzuges mit steigender Drehzahl abnimmt, so daß er, in Kurbelwinkelgraden ausgedrückt, ziemlich gleich groß bleibt. Die Verhältnisse des Diesel-Motors zeigen gut zwei Diagramme von NEUMANN [33], in denen die Zündungs- und Ver-

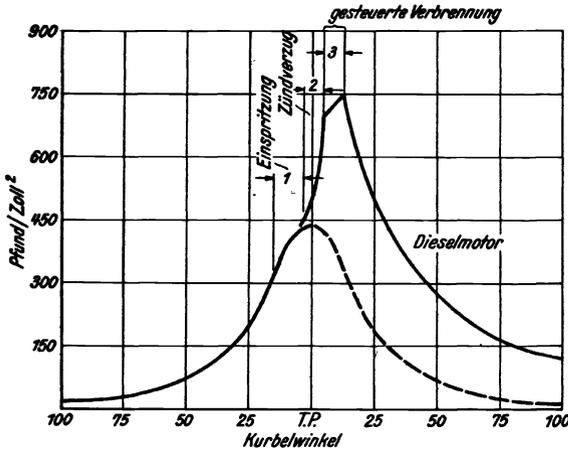


Abb. 16. Die drei Verbrennungsperioden im Diesel-Motor.

breunungsvorgänge im Diesel-Motor in Funktion von der Zeit und von der Luftdichte dargestellt sind (Abb. 14 und 15).

RICARDO teilt den Verbrennungsvorgang im Diesel-Motor in drei Phasen:

1. Die Verzugsperiode, die vom Einspritzbeginn bis zum Beginn der Verbrennung dauert und vom Kraftstoff, Druck und Temperatur der Luft, sowie der Drehzahl und dem Verteilungsgrad abhängt. Die Flamme ist zu klein, um alles Gemisch zu entzünden oder den Druck zu steigern.

2. Die Flammenausbreitungsperiode. Der dabei entstehende Druck wird bestimmt von dem Zündverzugs (der von der Drehzahl abhängt), der Menge des Kraftstoffes im Zylinder und vom Druck und Temperatur der Luft. Die Verbrennung ist sehr rasch und nicht beherrschbar, wenn man von der Möglichkeit der Vor- und Wirbelkammer absieht.

3. Periode der Verbrennung als Funktion der Einspritzung, in der die Verbrennung gesteuert werden kann. Ein Schema der Perioden gibt Abb. 16.

Beispiele für die motorische Auswirkung des Zündverzuges

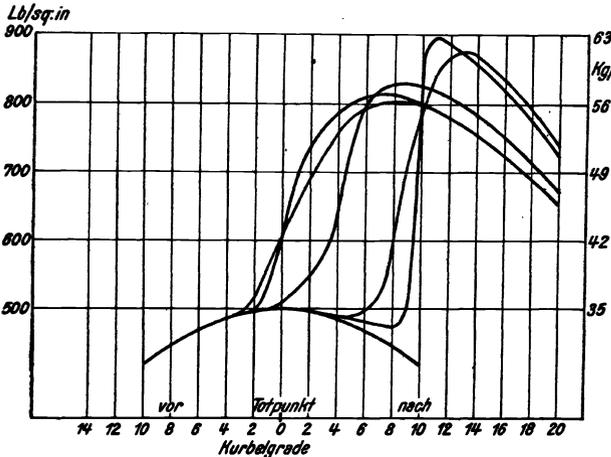


Abb. 17. Druckanstieg bei Verbrennung verschiedener Dieselmotorkraftstoffe. (Gleicher Einspritzbeginn.)

gibt die folgende Abb. 17, in der der Druckanstieg bei Verwendung verschiedener Kraftstoffe dargestellt ist. Man sieht, daß die Kraftstoffe mit hohem Zündverzugs, also später Entzündung einen sehr plötzlichen Druckanstieg geben.

Ursache des Klopfens ist aber nicht die absolute Höhe des Druckes, sondern die Steilheit des Druckanstieges. Überschreitet dieser eine gewisse Größe, so verursacht er die Klopfgeräusche, den rauhen Gang der Maschine und beansprucht das Triebwerk durch auftretende Schwingungen wesentlich höher als es den statischen Kräften entspricht.

Prüfung der Zündwilligkeit von Dieselmotorkraftstoffen. Die Beurteilung der Dieselmotorkraftstoffe auf ihre Brauchbarkeit im Motor wird derzeit vor allem in Versuchsmotoren bestimmt. Man kann in dieser Richtung zwei verschiedene Verfahren unterscheiden, je nachdem, ob sie die Anlaßmöglichkeit oder die Laufeigenschaften prüfen. Beide Verfahren sind aber von der Art des Prüfmotors abhängig, so daß es zur Übertragung der Ergebnisse auf Motoren anderer Bauart notwendig ist, die Motorkonstanten möglichst zu entfernen. Man tut dies, indem man bei beiden Verfahren Bezugskraftstoffe anwendet, ähnlich wie dies bei Vergaserkraftstoffen schon lange üblich ist. Nach einem Vorschlag von BOERLAGE und BROEZE nimmt man das zündwillige Ceten ($C_{16}H_{34}$) und das schwer zündende α -Methylnaphthalin. Neuerdings wird das Ceten durch das lagerungsbeständigere Cetan, den durch Wasserstoffanlagerung aus dem ungesättigten Cetan erhaltenen gesättigten Kohlenwasserstoff $C_{18}H_{38}$ ersetzt, das allerdings wieder den Nachteil eines hohen Schmelzpunktes ($20^{\circ}C$) hat. Die Eigenschaften von Ceten und Methylnaphthalin zeigt die folgende Tabelle:

Ceten:

ASTM-Destillation:

Siedebeginn	> $265^{\circ}C$
Endpunkt	< $295^{\circ}C$
Destillation zw. 270 u. $280^{\circ}C$..	> 90%
Schmelzpunkt	$3,8-4,2^{\circ}C$
Bromzahl (% Bromaufnahme)	$68-72$
Spezifisches Gewicht $20^{\circ}C$	$0,780-0,782$
Refraktion für D-Linie	$1,4420$
$n_{D_{20}}$ spez. Refraktion für D-Linie	$1,4400$

Methylnaphthalin:

ASTM-Destillation:

Siedebeginn > $230^{\circ}C$	90% innerhalb von $1,5^{\circ}C$
Endpunkt < $238^{\circ}C$	98% unter $238^{\circ}C$
Schmelzpunkt des Pikrates	$137-141^{\circ}C$
$n_{D_{20}}$ spez. Refraktion für D-Linie	$1,6165-1,6170$
Spezifisches Gewicht bei $20^{\circ}C$...	$1,0200-1,0190$

Der Gehalt an zündwilligem Ceten im Vergleichsgemisch mit gleichen Zündeigenschaften ist die *Cetenzahl* des Brennstoffes, die seine Zündwilligkeit bestimmt.

Man ermittelt sie nach folgendem Verfahren:

1. Anlaßverfahren (Fremdtrieb): Die Anglo Iranian Oil Cie. arbeitet so, daß sie einen Einzylindermotor bei genau festgelegten Kühlwasser- und Lufttemperaturen fremd antreibt und dann bei zunehmender Drosselung der Ansaugluft stets einmal Kraftstoff einspritzt, bis keine Zündung mehr eintritt. Der Ansaugunterdruck wird dann durch mehrmalige Wiederholung genau festgelegt und dient als Bezugspunkt. Es werden nun die Bezugskraftstoffe von bekannter Cetenzahl in einem solchen Verhältnis zusammengemischt, daß das Gemisch ebenfalls gerade bei diesem Druck nicht mehr zündet. Die bekannte Cetenzahl der Mischung entspricht dann der Zündwilligkeit des Kraftstoffes. POPE und MURDOCK treiben den auf Dieselbetrieb umgebauten CFR-Motor fremd an und erhöhen bei konstanter Kühlwasser- und Lufttemperatur das Verdichtungsverhältnis so lange, bis bei drei Sekunden währender Einspritzdauer eine Zündung erfolgt.

2. Laufeigenschaften. BOERLAGE und BROEZE verwenden den Zündverzög des laufenden Motors, indem sie entweder mit einer Neonlampe und einem Druckindikator oder mit einem optischen Indikator die Druckkurve aufzeichnen und den Kurbelwinkel zwischen Einspritzbeginn und Zündung ermitteln. Dabei sind als Spritzbeginn der Moment des

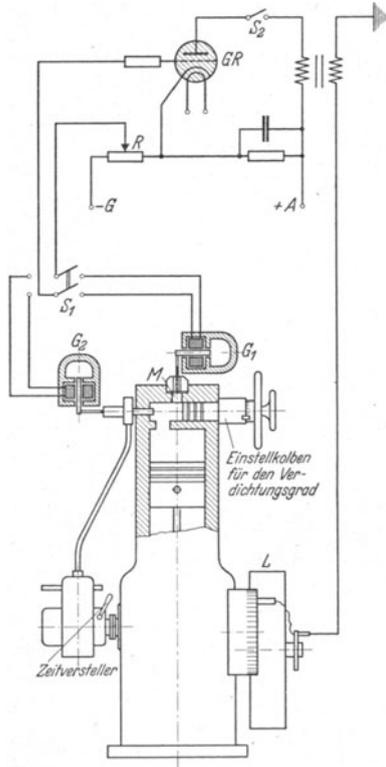


Abb. 18. Prüfmotor für Dieselmotorkraftstoffe nach SCHWITZER und HETZEL.

Nadelhubes an der Düse, als Zündbeginn der Moment gewählt, in dem der Druck um mehr als 1 at über den Verdichtungsdruck ansteigt. Ein anderer Weg ist, mit einem Springstabindikator Mischungen von Bezugskraftstoffen herzustellen, die gleiche Ausschläge ergeben. Dieses Verfahren hat aber den Nachteil ziemlich schwankender Ergebnisse infolge des wechselnden Zustandes des Springstabes. SCHWEITZER und HETZEL haben deshalb für den umgebauten CFR-Motor ein neues Verfahren (Abb. 18) gearbeitet, das sie als Prüfverfahren vorschlagen. Es verwendet die Verdichtung als Maß, und zwar wird diese so lange verändert, bis bei einem elektrisch gemessenen Einspritzbeginn von 18° v. T. die Zündung, die ebenfalls elektrisch gemessen wird, genau im Totpunkt einsetzt. In der Abbildung ist die Schaltung dargestellt, die einen Geber G_1 oder G_2 (Druckanzeige oder Spritzbeginn) wechselweise über den Schalter S_1 mit dem Gitter des Thyatronrohres GR verbindet. Bei Überschreiten einer durch den Widerstand R regelbaren Gittervorspannung leuchtet die Neonlampe L , die auf dem Schwungrad sitzt, auf. Der Unterschied zwischen Spritzbeginn und dem Punkt, bei dem der Verdichtungsdruck durch die beginnende Verbrennung überschritten wird, in Graden Kurbelwinkel ausgedrückt, ist der Zündverzug. Man macht sich täglich eine Eichkurve für Ceten-Methylnaphthalin-Gemische und bestimmt nach dieser die für ein bestimmtes kritisches Verdichtungsverhältnis eines Kraftstoffes zugehörige Cetenzahl. Die Bestimmung des Zündverzuges ist zur Beurteilung der Laufeigenschaften von Kraftstoffen recht geeignet und dürfte kaum durch eine andere Charakteristik ersetzt werden.

Man hat verschiedentlich versucht, durch Kombination der Selbstzündungstemperatur mit Versuchsbedingungen wechselnder Art eine Beurteilung des Motorverhaltens im Laboratorium zu erreichen, ohne bisher damit endgültig zum Ziele gekommen zu sein. So wurde in Farnborough bei gegebenen Bedingungen der Zündverzug in einer Bombe gemessen [44] oder von JENTZSCH [45] die zur Zündung in seinem Apparat erforderliche Sauerstoffblasenzahl/min in Beziehung gesetzt zu der Selbstzündungstemperatur:

$$\text{Zündwert} = \frac{t_{SZT}}{O_2\text{-Blasenzahl/Minute}}$$

Einige Werte beider Verfahren sind in Zahlentafel 25 zur Erläuterung angegeben.

Zahlentafel 25. Laboratoriumswerte für das Zündverhalten.

Zündverzug in Abhängigkeit von der Selbstentzündungstemperatur.

1. Farnborough (FOORD)

Gasöl a	Selbstentzündungstemperatur °C				Zündverzug sek
	Petroleum b	Dieselloil c	Dieselloil d	Kreosot e	
340	340	390	402	485	3,2
348	348	410	422	503	2
375	375	450	463	532	1
420	430	505	525	565	1/2
500	530	572	582	über 600	1/5

Die Kraftstoffe a und b weisen bei gleichen Zündverzügen die niedersten Temperaturen auf, sind also am zündwilligsten.

2. JENTZSCH:

	Selbstentzündungs- temperatur	Niederste O ₂ -Blasenzahl	Zündwert
Rumänisches Dieselloil	265	18	13,9
Rumänisches Spezial-Dieselpetroleum ..	254	24	10,1
Gasöl unbekannter Herkunft.....	276	48	4,7
Braunkohlenteeröl	290	50	5,7

Die mit wenig Sauerstoffblasen bei niedriger Temperatur zündenden rumänischen Diesellole sind viel zündwilliger als die beiden erst mit viel Sauerstoff bei hoher Temperatur zündenden anderen Öle.

Alle Prüfverfahren für Kraftstoffe haben nur dann Sinn, wenn ihre Ergebnisse mit dem praktischen Verhalten der Kraftstoffe in den Diesel-Motoren übereinstimmen.

Nach früheren Untersuchungen von BOERLAGE und anderen sollen die Diesel-Motoren in ihren Anforderungen nicht allzu verschieden sein. Die oben erwähnte Tatsache, daß ein Motor mit 30 Cetenzahl besser läuft als mit 60 Cetenzahl, ist aber ein Zeichen dafür, daß diese Annahme nicht allgemein zutrifft. Gemischbildung, Wärmeübergang, Drehzahl werden sich auf verschiedene Kraftstoffe, je nach ihrer Flüchtigkeit, Zähigkeit, chemische Stabilität usw., anders auswirken können. Solange diese Faktoren nicht bei der Auswertung von Prüfungsergebnissen mitberücksichtigt werden, ist eine gelegentliche starke Abweichung der Prüfwerte vom praktischen Verhalten unausbleiblich. Insbesondere sind bei Kraftstoffen mit Zusätzen, wie Amylnitrit, die allerdings vorderhand keine Rolle spielen, solche Unstimmigkeiten zu erwarten. Auch die Motor konstruktion (Einspritzung in den Zylinder oder in eine Vorkammer) wird bei der Auswertung jedenfalls mehr berücksichtigt werden müssen. Möglicherweise wird ähnlich wie bei den Vergasermotoren eine Zweiteilung der Prüfungsweise erfolgen. Sinnvoller wäre eine Entwicklung in der Richtung, daß die Prüfung ein Diagramm der Zündwilligkeit im Motor z. B. über die Temperatur aufstellt, das dann für die verschiedenen Betriebsbedingungen der Diesel-Motoren Anwendung finden könnte. Es ist nicht unmöglich, daß Laboratoriumsverfahren wieder einmal eine größere Rolle bei dieser Beurteilung spielen werden; sind ja schon jetzt erfolversprechende Ergebnisse vorhanden, die vor allem den Vorteil haben, gut reproduzierbar zu sein.

c) Grenzwerte von Anforderungen an Dieselkraftstoffe.

Im folgenden sollen einige Angaben über Dieselöle des Handels gemacht werden. Als Anhalt für die Anforderungen an Dieselkraftstoffe mögen die von der ASTM im Jahre 1937 aufgestellten Werte dienen:

Zahlentafel 26.¹ Dieseltreibstoff-Einteilung der ASTM (1937).

Bezeichnung	Flammpunkt min ² ° C	Wasser und Fremdstoffe max Vol.-%	Viskosität in Centistokes		Ver- kokung max %	Asche max %	Stock- punkt max ⁴ ° C	Schwe- fel	Basen Säuren	Zünd- ver- halten
			37,8° C min ² —max	50° C max						
1-D	46,1	0,05	2,3—7,5	—	0,2	0,02	1,7	5	keine	6
3-D	65,5	0,1	2,3—13,0	—	0,5	0,02	1,7	5	„	6
4-D	65,5	0,6	— 53,0	—	3,0	0,04	1,7	5	„	6
5-D	65,5	1,0	— —	215	6,0	0,08	1,7	5	„	—
6-D ⁷	65,5	2,0	— —	215 min bis 650 max	—	—	—	—	„	—

¹ Die Werte dieser Zahlentafel sind innerhalb der Fehlergrenzen der Prüfverfahren äquivalent. Da aber bisher die Beziehungen zwischen den Indizes und ihnen und dem praktischen Betrieb noch nicht vollkommen festgestellt sind, sollten diese Zahlen nur annähernd verwendet werden.

² Der Mindestflammpunkt soll liegen, wie angegeben oder wie die lokalen Feuersicherheitsvorschriften, Gesetze usw. es vorschreiben.

³ Für Zähigkeiten unter 35 sek SAYBOLT-Universal (2,3 Centistokes) bei 37,8° C können andere Meßverfahren als das SAYBOLT-Universal-Viskosimeter verwendet und die Ergebnisse umgerechnet werden.

⁴ Tiefere Stockpunkte können verlangt werden, wenn die örtlichen Verhältnisse es verlangen, um Lagerung und Verwendung zu erleichtern; allerdings muß man dann auch bei den Ölen 1-D und 3-D die Mindestzähigkeiten streichen, falls man einen Stockpunkt fordert, der unter 1,12° C liegt.

⁵ Soweit bekannt, braucht bezüglich der Verbrennungscharakteristik der Schwefelgehalt nicht berücksichtigt zu werden. Für diesen Fall, z. B. Motoren mit oft unterbrochenem Betrieb, werden folgende Grenzwerte empfohlen:

1-D: 1,5% maximal 4-D: 2,0% maximal
3-D: 1,5% „ 5-D: 2,0% „

⁶ Zündeigenschaften von Dieselölen (ASTM):

	1-D	3-D	4-D	
Cetanzahl nach Zündverzugsverfahren . .	45	35	30	mindestens
Dieselindex-Zahl	45	30	20	„
Zähigkeits-Dichte-Konstante	0,86	0,89	0,91	höchstens
Siedepunkts-Dichte-Zahl	188	195	200	„

⁷ Gleiche Anforderungen wie Heizöl Nr. 6.

Die amerikanischen Motorfirmen stellten ihrerseits Anforderungen für die Kraftstoffe auf, die in ihren Motoren Verwendung finden sollten. Die folgende Übersicht gibt die von HUBER und MURPHY [38] mitgeteilten Grenzwerte an.

Zahlentafel 27. Mittlere und Grenzwerte für Dieselloil
(nach Aufstellung amerikanischer Motorenfirmen).

Motorart		Viskosität °E bei 38°C	Schwefel- gehalt	Ver- kokung CONRAD- SON %	Hart- asphalt %	H ₂ O und Schlamm %	Destillat		
							10% °C	90% °C	End- punkt °C
Schnellläufer n > 1000 U/min	Mittelwerte	1,33—2,87	1,0	0,5	0,53	0,5	—	—	—
	Untere Grenze . .	1,10—1,47	0,2	0	0,05	0	232	304	343
	Obere Grenze . .	1,47—7,35	2,0	1,25	1,00	2,0	266	371	371
Mittelläufer 1000 > n > 500 U/min	Mittelwerte	1,51—2,75	1,0	1,0	0,3	0,6	—	—	—
	Untere Grenze . .	1,10—1,65	0,25	0	0,05	0	232	304	—
	Obere Grenze . .	2,75—7,35	2,0	1,5	0,50	2,0	266	371	—
Langsamläufer n < 500 U/min	Mittelwerte	1,54—3,67	1,2	2,0	0,5	0,9	—	—	—
	Untere Grenze . .	1,10—2,02	0,2	0,075	0,3	0	—	332	—
	Obere Grenze . .	2,75—8,08	2,0	10,0	0,7	4,0	—	371	371

Am wichtigsten ist die Cetenzahl, die für Schnellläufer zwischen 40 und 60, für Langsamläufer zwischen 35 und 50 liegen soll.

Die spezifischen Gewichte wurden zwischen 0,83 und 0,91, der Flammpunkt auf etwa 66° C festgesetzt. Der Kristallisationsbeginn soll 5 bis 8° C unter der Arbeitstemperatur liegen. Man sieht aus diesen Werten, daß sowohl über die Bedeutung der einzelnen Eigenschaften verschiedene Ansichten herrschen als auch die einzelnen Motorbauarten konstruktiv verschiedene Anforderungen stellen. Anders wären die sehr starken Schwankungen der Grenzwerte nicht zu erklären.

d) Eigenschaften von Handelsdieselloilen.

Eigenschaften von in Deutschland verkauften Handelsdieselloilen zeigt die folgende Zusammenstellung nach Werten der deutschen Petroleum A. G. Berlin, für deren Überlassung ich den Herren Dr. CHARPENTIER und MENASSE danke.

Zahlentafel 28. Eigenschaften von in Deutschland verkauften Dieselloilen.

Herkunft	Spezifisches Gewicht kg/l	Siedeverhalten			Flamm- punkt P. M. °C	Viskosität 20° C ° Engler	Neutralisa- tionszahl mg KOH/g	Oberer Heizwert kcal/kg	Anflin- punkt °C	Ceten- zahl	
		Siede- beginn °C	Destillat in % bis								
			250° C	300° C							350° C
Amerikanisch	850	210	30	75	95	75	—	1,6	10900	65	60
	855		35	80	—						
Venezolanisch	855	190	35	80	95	60	—	1,3	—	55	56
	875		205	55	85						
Russisch	855	200	5	25	75	55	1,4	0,2	10950	65	62
	875		205	30	75						
Persisch	840	220	5	70	95	90	1,4	0,0	10950	75	73
			10	75	100						
Polnisch	870	230	5	25	75	90	2,0	0,5	10800	70	—
	875		30	80	100						
Rumänisch	840	190	45	75	95	55	—	2,0	10950	60	65
	850		50	80	65						
Krackrückstand	870	205	80	95	—	75	1,2	0,0	10800	33	45

Fortsetzung der Zahlentafel 28.

	Spezi- fisches Gewicht (15° C)	Siedeverhalten Destillat bis				Viskosität 20° C ° Engler	Stock- punkt ° C	Flamm- punkt (PENSKY-MAR- TENS) ° C	Aschegehalt %	Oberer Heizwert kcal/kg	Cetanzahl	Dieselindex
		210° C %	250° C %	300° C %	350° C %							
„Derop“-Gasöl..	0,858	—	20	60	90	1,45	< — 40	76/78	—	—	65	—
Deutsches Gasöl.	0,870	—	36	79	Ende	—	< — 20	90	—	—	55/60	—
„Standard“-Gasöl	0,840	2	—	35	328	1,25/150	< — 20	70/100	—	—	—	55
Dieselöl	0,910	—	—	—	98	2,20	< — 18	95	0,03	10600	—	0,2

Synthetisch nach dem Verfahren von FISCHER-TROPSCH erhaltenes Dieselöl weicht in seinen Eigenschaften merklich von denen der Handelsdieselöle ab. Vor allem sind spezifisches Gewicht, Zähigkeit und Cetenzahl anders.

Ein solches Produkt hatte folgende Eigenschaften:

Name	Spezifisches Gewicht bei 20° C	Destillation			Flamm- punkt P. M. ° C	Zähigkeit 20° C ° Engler	C %	H %	Heizwert kcal/kg		Ceten- zahl
		212° C %	250° C %	300° C %					H _o	H _u	
		Beginn									
Kogasin 2	0,773	Beginn	40	80	86	1,4	84,8	15,2	11300	11500	75

Beim Motorbetrieb ist auf diese Unterschiede gegenüber dem gewöhnlichen Dieselöl Rücksicht zu nehmen.

C. Schmierstoffe.

1. Die Schmierung.

Schmieren heißt, durch Zugabe von geeigneten Stoffen (Schmiermitteln) das Gleiten von zwei Oberflächen aufeinander möglichst zu erleichtern. Das erfolgt durch die Ausbildung eines festhaftenden Ölfilmes wie bei der flüssigen Reibung bei niedriger Belastung oder durch das Zusammenwirken von Schmiermitteln und Schmierfläche derart, daß durch physikalische oder chemische Veränderung der Oberflächeneigenschaften das metallische Gleiten auf geringeren Widerstand stößt, wie es bei der Hochdruckbelastung geschmierter Flächen und halbflüssiger Reibung der Fall ist. Aus dieser Definition ist ersichtlich, daß Schmierung kein einheitlicher Begriff ist, sondern je nach den Bedingungen unter denen sie erfolgt, etwas ganz Verschiedenes sein kann. Im Gebiet der geringeren Belastungen spielt als das Maß der Schmiereignung von Ölen die Viskosität eine Rolle, soweit es sich um die reine flüssige Reibung handelt. Diese geht bei um so größeren Belastungen in das Gebiet der halbflüssigen Reibung über, je besser das Schmiermittel an den Schmierflächen haftet. Die Benetzungswärme, die bei der Benetzung von trockenen Metallen frei wird, ist ein Maß für diese Haftfestigkeit und nimmt deshalb mit steigender Belastbarkeit der Öle zu. Wenn zwei Öle bei gleicher Viskosität bei der gleichen Temperatur des Lagers verschiedene Reibungskoeffizienten ergeben, so führt man das auf die „Oiliness“ (Schmierfähigkeit) zurück, einen etwas dunklen Begriff, der neuerdings immer mehr zergliedert und unter anderem durch die Druckabhängigkeit der Viskosität erklärt wurde.

Die Schwierigkeit, den Vorgang der Schmierung — auch im Gebiet der flüssigen Reibung — genau zu verstehen, beruht vor allem darauf, daß man sich über die eigentlich herrschenden Bedingungen eines Lagers nicht im klaren ist. Sowohl die in dem Schmierfilm auftretenden Temperaturen als auch die dort herrschenden Drücke sind wenig bekannt. Nach neueren Messungen (Finch & Zahoorbux, Bowden) werden die Metalle selbst bei gar nicht allzu hohen Belastungen bis auf ihren Schmelzpunkt erwärmt. Nun kennt man die Oberflächenbeschaffenheit der Metalle noch sehr wenig und ist nicht unterrichtet über den Einfluß des Luftzutrittes. Es ist sicher, daß vielfach auftretende Störungen durch Reiboxydation, also durch Mitwirkung des Sauerstoffes zu erklären sind.

Dazu kommt im Verbrennungsmotor noch die starke Veränderung des Öles durch die im Verbrennungsraum und zum Teil auch im Kurbelgehäuse eintretende Oxydation und Verschmutzung, welche die Schmiereigenschaften des Öles dauernd beeinflußt. Kurz, eine Reihe von Einflüssen unbekannter oder wenig bekannter Art trübt die Klarheit des Bildes.

Wie erwähnt, ist man für die *flüssige* Reibung mit den Gesetzen der hydrodynamischen Schmiertheorie recht gut ausgekommen, doch wird es notwendig sein, bei hochbelasteten Lagern auch die Beziehung zwischen dem Druck im Schmierfilm und der dabei herrschenden Zähigkeit des Öles zu erfassen, um einwandfreie Berechnungsunterlagen zu besitzen. Auch die Filmdicke muß zur Festlegung der Belastbarkeit von Lagern berücksichtigt werden, da diese bei feiner Bearbeitung, welche dünne Filme möglich macht, mit sehr hohen Lasten anstandslos laufen können. Die *halbflüssigen* oder Grenzreibungen sind bisher mehr und mehr systematisch untersucht und so auch, wie z. B. von HEIDEBOECK, der Berechnung auf Grund der hydrodynamischen Lagertheorie erschlossen. Die *trockene* Reibung ist von Bedeutung bei Instrumenten (Diamantlagern), muß aber bei Motoren vermieden werden. Im Lager und im Zylinder ist trockene Reibung gleichbedeutend mit Fressen.

Ein Schmierstoff hat gute Schmierfähigkeit (Oiliness), wenn er bei halbflüssiger Reibung geringe Reibung und damit Reibungswärme ergibt. (Die Wärmeerzeugung spielt bei der Lagerreibung eine viel größere Rolle als der Leistungsverlust, der erst bei höheren Reibungswerten merkbar ist.) Man muß dabei unterscheiden zwischen Schmierfähigkeit und Belastbarkeit. Fette Öle haben z. B. recht gute Schmierfähigkeit (Oiliness), ohne aber große Lasten bei entsprechend hohen Temperaturen auszuhalten, wogegen Zusätze zu Höchstdruckschmierölen, wie chlorierte Ester, sowohl gute Schmierfähigkeit als auch hohe Belastbarkeit erzielen lassen. Die Messung der Schmierfähigkeit ist wegen der uneinheitlichen Natur des Schmiervorganges bisher nicht einwandfrei gelungen. Während es scheint, als könnte man für Höchstdruckschmiermittel den 4-Kugelapparat von BOERLAGE [49] und die Maschine der Society of Automotive Engineers (SAE-Maschine) [50] zur Bewertung heranziehen, ist für die Messung weniger belasteter Öle mit Verwendung anderer Maschinen zu rechnen. Gewisse Vorteile bietet die Maschine von THOMA [51]. Eine eingehende Beschreibung irgendeines Prüfapparats dürfte aber bei der noch recht ungeklärten Lage auf diesem Gebiete verfrüht sein. Man muß sich auch hier bewußt sein, daß die Ergebnisse der verschiedenen Prüfmaschinen von den eingehaltenen Prüfbedingungen, wie Druck, Drehzahl und Belastung, abhängen und nur dann eine praktische Bedeutung besitzen, wenn sie mit dem Verhalten der Schmiermittel unter vergleichbaren Bedingungen in Beziehung gesetzt werden.

2. Die chemische Zusammensetzung der Schmieröle.

Man weiß über die chemische Zusammensetzung der natürlichen Schmieröle bisher recht wenig. Über die Verteilung der Paraffine, Naphthene und Aromaten sowie der Olefine in den Schmierölen hat man erst in der letzten Zeit etwas mehr Aufschlüsse erhalten, ohne daß diese schon recht sicher sind. Für die Beurteilung der eigentlichen Schmiereigenschaften genügen sie in keiner Weise, wenn man auch einige Schlüsse auf die Oxydationsbeständigkeit daraus ziehen kann. Als sicher kann man annehmen, daß geradlinige Paraffinkohlenwasserstoffe (Normalparaffine) in den Schmierölen nicht oder nur in sehr geringer Menge vorkommen. Die sogenannten paraffinischen Schmieröle, wie pennsylvanische, enthalten entweder nur Isoparaffine und Naphthene oder Naphthenringe mit Seitenketten paraffinischer Art. Die höchstgesättigten Schmieröle sollen der Formel $C_n H_{2n-2}$ entsprechen, also entweder eine größere Anzahl von Ringen enthalten oder mehrere Doppelbindungen. Eine summarische Analyse der Kohlenwasserstoffe auf Ringverbindungen und geradlinige Verbindungen nach VLUGTER, WATERMAN und VAN WESTEN ergab für ein pennsylvanisches Öl vom Molekulargewicht 512 einen Gehalt von:

8%	aromatischen Ringen,
15%	naphthenischen Ringen,
77%	paraffinischen Verbindungen.

Bei einem naphthenischen Öl mit dem Molekulargewicht 349 ergab sich die folgende Zusammensetzung:

32%	aromatische Ringe,
29%	naphthenische Ringe,
39%	Paraffinketten.

Diese Analyse gibt einen ungefähren Anhalt für die verhältnismäßigen Anteilsmengen der einzelnen chemischen Verbindungsgruppen.

Über die Zusammensetzung synthetischer Öle ist noch weniger bekannt als über die der natürlichen Schmieröle. Die Kohlenwasserstoffgruppen sind natürlich dieselben, aber ihre verhältnismäßigen Mengen in den Produkten verschiedener Art sind stark von der Art der Synthese abhängig. Gute synthetische Öle enthalten wohl in der Hauptsache Verbindungen aus Naphthenringen mit langen geraden Seitenketten.

Die fetten Öle, wie Rizinusöl und Specköl, enthalten pflanzliche oder tierische Fettsäuren, die mit Glycerin verestert sind. Unvermischt werden sie weniger gebraucht als in Verbindungen mit Mineralölen als sogenannte gefettete oder compoundierte Öle. Sie haben im allgemeinen eine günstige (geringe) Temperaturabhängigkeit der Viskosität und bessere Schmiereigenschaften als die rein mineralischen Produkte derselben Viskosität, meist aber größere Temperaturempfindlichkeit.

Die sogenannten Teerfettöle, Produkte aus Steinkohlenteeren, spielen für die Schmierung von Verbrennungsmotoren nur eine ganz untergeordnete Rolle. Die ungefähre Elementaranalyse von Schmierölen zeigt die folgende Zusammenstellung:

	H	C	O + S
paraffinisch	13,0 — 13,5 %	86,0 — 86,5 %	0 — 0,5 %
naphthenisch	12,0 — 13,0 %	86,5 — 86,8 %	0 — 1,0 %

Bei der Beurteilung von Schmierölen nach ihrer chemischen Zusammensetzung muß man bedenken, daß deren summarische Kenntniss zwar gewisse Hinweise für das Verhalten gibt, aber durch die Anwesenheit von absichtlich oder unabsichtlich enthaltenen Beimischungen recht unsicher ist. Neuere Versuche von verschiedenen Forschern zeigen immerhin, daß — unter diesem Vorbehalt — bei gleicher Zähigkeit die Öle mit der geringsten Dichte die größte Alterungsbeständigkeit und beste Schmierfähigkeit aufweisen. Aber die weitere Untersuchung der hier vorliegenden Probleme wird sicherlich noch viele Zusammenhänge zwischen chemischem Aufbau der Schmierölmoleküle und physikalischen Verhalten aufdecken müssen, ehe man einwandfreie Schlüsse von der Laboratoriumsuntersuchung (chemischen Zusammensetzung) der Schmieröle auf ihre praktische Eignung wird ziehen können.

3. Allgemeine Anforderungen an die Schmieröle.

Zweck der Schmieröle ist, die direkte Berührung und damit die trockene Reibung aufeinandergleitender Bauteile des Motors bei allen Betriebsbedingungen dauernd zu verhindern. Um das zu erreichen, müssen die Öle genügende Schmierfähigkeit besitzen, in der Kälte nicht zu dick, in der Wärme nicht zu dünn sein (d. h. guten Viskositätsverlauf besitzen), sie dürfen sich im Betrieb nicht zu rasch verändern und keine übermäßigen Mengen Kohle und Schlamm bilden, auch nicht korrodieren und sollen überdies die Wärme gut abführen und keinen zu hohen Verbrauch ergeben.

4. Besprechung der Eigenschaften.

Zähigkeit (Viskosität).

Unter der Einheit der Zähigkeit versteht man im CGS-System die innere Reibung eines Öles ausgedrückt durch die Kraft in Dyn, die notwendig ist, um eine Fläche von 1 cm² der Flüssigkeit über eine gleich große, 1 cm entfernte, durch dieselbe Flüssigkeit getrennte, parallel mit der Geschwindigkeit 1 cm/sek zu verschieben (1 Dyn gibt der Masse von 1 g die Beschleunigung von 1 cm/sek²). Diese Einheit heißt Poise und wird nur in den Kapillarviskosimetern bestimmt, während die gewöhnlichen Viskosimeter den Vergleich zu der Zähigkeit von Wasser vornehmen und dann das Verhältnis in Engler-Graden, Redwood-Graden oder Saybolt-Graden

ausdrücken. Die Zähigkeit kann man im Gebiet der flüssigen Reibung als Maß des Schmiervermögens annehmen. Vorteilhaft gibt man die Zähigkeit der Schmieröle in Poisen oder Centipoisen neben den bisher gebräuchlichen Engler-Graden (REDWOOD, SAYBOLT usw.) an.

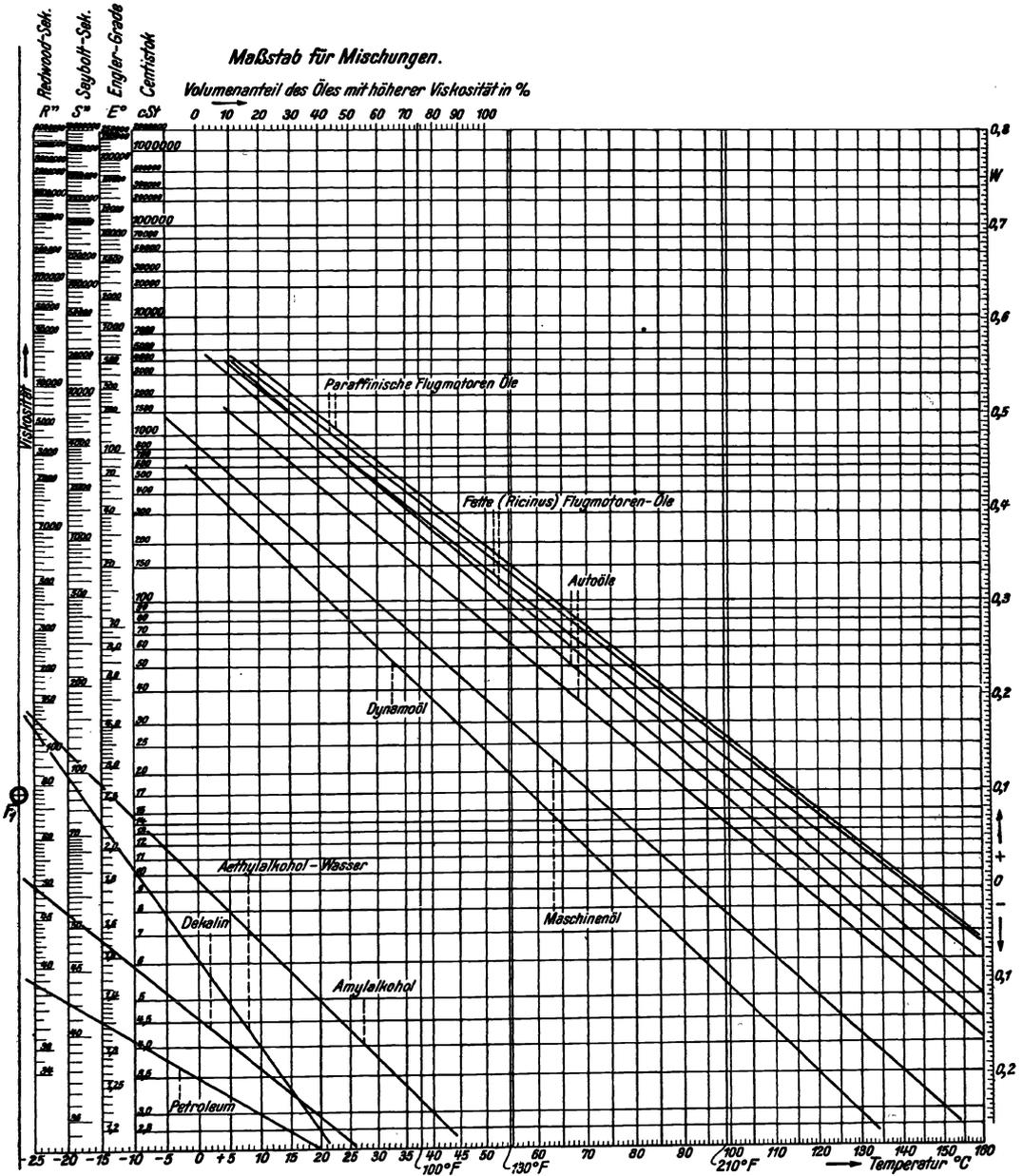


Abb. 19. Viskositätstemperaturblatt von UBBELOHDE-WALTHER.

Die Bestimmung der Zähigkeit in Kapillarviskosimetern an Stelle der konventionellen Viskosimeter bürgert sich immer mehr ein und wird im Laufe der Zeit die umständliche und ungenaue Umrechnung der konventionellen in absolute Werte durch deren unmittelbare Bestimmung ersetzen.

Zeichnet man die Viskositätswerte in ein Diagramm so ein, daß man als eine Koordinate den Logarithmus der absoluten Temperatur, als die andere den Logarithmus der absoluten Zähigkeit setzt, so erhält man gerade Linien (vgl. Abb. 19). Je flacher sie liegen, um so weniger temperaturabhängig ist die Zähigkeit. Die Zähigkeitstemperaturblätter von UBELLOHDE-WALTHER [52] verwenden eine solche Darstellung.

Als Maß des Zähigkeitsanstieges führten DEAN und DAVIS [53/54] den Viskositätsindex ein; sie setzen den Zähigkeitsanstieg von Gulf Coast-Öl (steile Kurve) zwischen 100 und 210° F gleich 0, den von pennsylvanischem Öl (flache Kurve) gleich 100 und kommen durch Interpolation für Peruöl zu einem Wert von 20, kolumbisches Öl von 40, Ost-Texasöl von 60 und Mid Continent-Öl von 80. Dieses Maß ist recht willkürlich (es gibt Werte unter 0 und über 100), hat aber den Vorteil großer Verbreitung und einer gewissen Anschaulichkeit. Da die Bestimmung aber die Kenntnis der Zähigkeit bei Temperaturen erfordert, die in Europa wenig gebräuchlich sind, ist eine vereinfachte Festlegung mit Hilfe von Schaubildern begrüßenswert, die von DOCKSEY, HANDS und HAYWARD [54a] vorgeschlagen wurde.

Den gleichen Zweck wie die Festlegung des Viskositätsindex verfolgt die Viskositäts-polhöhenangabe von C. WALTHER; sie geht von der nicht stets zutreffenden Annahme aus, daß sich für Öle gleicher Herkunft alle Linien der Viskositäten in einem Diagramm der beschriebenen Art in einem Schnittpunkt treffen, dessen Abstand von der *Grundlinie* als Polhöhe bezeichnet wird. Pennsylvanische Öle haben den Wert 1,6 bis 1,7, russische von etwa 2,7, Texasöle von 3,7.

Aus dem Linienverlauf kann man Zähigkeit extrapolieren, doch darf man nicht zu nahe an den Stockpunkt herangehen. Für die Interpolation eignen sich am besten die Meßwerte bei 20 und 100° C. Flache Viskositätskurven bedeuten relativ geringe Zähigkeit bei niederen, relativ hohe Zähigkeit bei hohen Temperaturen. Sie weisen zwar auch auf geringeren Verbrauch hin, doch ist die Art des Motors und des Betriebes dafür entscheidend, ob sie sich im Gebrauch auch genügend auswirken können. Man muß ja berücksichtigen, daß im Automobil, vor allem im Winter, die Ausgangszähigkeit schon nach kurzer Zeit infolge Ölverdünnung stark abfällt. Deshalb wurde auch vorgeschlagen, von vornherein Öle zu verwenden, die mit dünnen Anteilen vermischt (Iso-Vis-Öle) und in der Zähigkeit ziemlich gleichbleibend sind.

Je geringer die Zähigkeit des Öles ist, um so geringer sind auch die Reibungswiderstände. Genügt die Abdichtung der Kolbenringe bei Verwendung dünner Öle, so bringt dickes Öl nur dann Vorteile, wenn die thermische Beanspruchung des Motors hoch ist.

Das *Kälteverhalten* der Öle ist durch ihren Zähigkeitsverlauf und durch ihren Stockpunkt gekennzeichnet. Man muß dabei unterscheiden zwischen dem Fließen des Öles unter seinem eigenen Gewicht und *unter Druck*. Für das Fließen des Öles unter Druck gilt auch noch unterhalb des Stockpunktes die extrapolierte Zähigkeitskurve, wenn der Druck genügend hoch liegt. Der Stockpunkt selbst ist von der Vorbehandlung des Öles abhängig und kann durch Zusätze von z. B. Paraffin, einem hochmolekularen Kohlenwasserstoff, herabgesetzt werden; er ist im Gegensatz zu dem Fließen unter Druck ein Maß für das Fließen des Öles unter seinem eigenen Gewicht, schwankt aber mit der Weite der verwendeten Gefäße.

Das Erstarren der Öle ist ein kolloidchemischer Vorgang; die Zeit spielt deshalb eine große Rolle dabei, wie bei allen solchen Vorgängen. Man muß daher bei der Bestimmung des Fließpunktes unter Druck ebenso, wie bei der Bestimmung des Stockpunktes die Abkühlung bzw. Anwärmung unter ganz genau festgelegten Bedingungen durchführen, um einwandfreie Ergebnisse zu erhalten [55, 56, 57]. Rizinusöl z. B., das erst bei etwa — 20° C stockt, wenn man die übliche Bestimmung durchführt, gibt bei längerer Abkühlung auf — 15° C eine honigartige Masse, die erst um null Grad wieder auftaut. Verdünnung des Öles durch Kraftstoff, wie sie im Betrieb eintritt, erniedrigt den Stockpunkt.

Beständigkeit.

Unter *Beständigkeit* ist das Gleichbleiben der Qualität des Öles im Betrieb zu verstehen; insbesondere wird aber damit die Widerstandsfähigkeit gegen thermische Aufspaltung und gegen die Oxydation bezeichnet. Während die erstere zu einer Krackung

führen kann, die dann Viskositätsverringerng zur Folge hat und praktisch weniger in Frage kommt, hat die Oxydationsbeständigkeit mit der zunehmenden thermischen Belastung der Motoren steigende Bedeutung gewonnen. Die Folgen der Oxydation des Öles sind Viskositätszunahme, Bildung saurer, verseifbarer, harzartiger und fester (asphaltischer) Produkte, die sich entweder am Kolbenring, im Verbrennungsraum oder im Kurbelgehäuse ablagern können. Die Einwirkung des Sauerstoffes ist je nach der Zusammensetzung der Öle in der einen oder anderen Richtung stärker. Paraffinische Öle bilden mehr saure und verseifbare Produkte, wie z. B. innere Anhydride (Laktone), die im Öl gelöst bleiben. Naphthenische Öle geben — wahrscheinlich über primäre Peroxyde — erst harzartige Stoffe, die in Alkohol löslich sind, dann asphaltartige Stoffe, die in Öl löslich sind, und endlich hochmolekulare Produkte, die sich in Öl nicht lösen.

Entsprechend dem Gehalt der Öle an Paraffinen und Naphthenen ist ihr spezifisches Gewicht niedriger oder höher, so daß dieses bei gleicher Viskosität zu einem gewissen Grad als Bewertungsfaktor herangezogen werden kann. Die Ölveränderung im Kurbelgehäuse geht beim Otto-Motor nicht unbedingt der Neigung zum Kolbenringfestsitzen parallel. Während nämlich bei der Oxydation im Verbrennungsraum gleichzeitig eine der Flüchtigkeit des Öles entsprechende Verdampfung eintritt, bleibt die Siedekurve des Öles im Kurbelgehäuse im wesentlichen gleich. Da das oxydierte Öl aus dem Verbrennungsraum zum Kurbelgehäuse zurückfließt, wird es um so eher Kolbenringe verpichen, je mehr es bei gleich starker Asphaltbildung verdampft. Ein leichtflüchtiges Öl kann so bei hohen Temperaturen erheblich ungünstiger sein als ein schweres, selbst wenn es weniger zur Oxydation neigt.

Die Verschmutzung des Kurbelgehäuses wiederum kann bei zwei Ölen mit derselben Menge an Asphalt und Ölkohle sehr verschieden stark sein, je nachdem, ob die festen Teilchen gut oder schlecht suspendiert bleiben. Gefettete Öle und manche mineralischen Öle halten die Ölkohle sehr stark in Suspension, während andere mineralische Öle sie sofort ausschleudern und absetzen. Ein Anzeichen für die Neigung der Öle zur Suspension ist ihre Verfärbung im Betrieb; gut suspendierende werden vollkommen schwarz und fluoreszieren nicht, während schlecht suspendierende starke Fluoreszenz beibehalten. Für die bessere Bewahrung dieser oder jener Ölart ist die Motorkonstruktion auch zu berücksichtigen.

Neuerdings wird die Oxydationsbeständigkeit der Öle durch Zugabe von Inhibitoren stark verbessert, die rein chemisch den Sauerstoffangriff verhindern oder verzögern. Neben Zinnverbindungen werden rein organische Stoffe, wie Naphthylamin, α -Naphthol und ähnliche vorgeschlagen.

Ölkohlebildung.

Endprodukt der Oxydation von Ölen sind einerseits gasförmige Verbrennungsprodukte, andererseits feste Rückstände, wie Ölkohle. Diese bildet sich naturgemäß am meisten im Verbrennungsraum, hinterbleibt aber dort nur nach Maßgabe ihrer Reaktionsfähigkeit (Verbrennlichkeit) und ihrer Haftfestigkeit, so daß die einfache Verkokungsprüfung nicht unbedingt ein Maß für diese Menge sein muß. Die gebildete Ölkohlenmenge ist aber nicht nur von der Art des Öles, sondern auch sehr von der Art des Betriebes abhängig. Belastung, Art des Kraftstoffes, Vergasereinstellung usw. beeinflussen sie. Im allgemeinen bilden paraffinische Öle wenig, aber harte, naphthenische Öle mehr, aber lockere Ölkohle. Fette und gefettete Öle bilden ebenfalls sehr lockere, leichtverbrennliche Ölkohle. Dadurch ist wohl die schlechtere Bewahrung von paraffinischen Ölen, die mit Lösungsmitteln raffiniert sind, in Diesel-Motoren zu erklären.

Korrosion.

Korrosion durch Schmieröle tritt selten ein. Sie wird meist durch Verunreinigung anderer Art, wie Seewasser, Verbrennungsprodukte des Bleitetraäthylfluids und ähnliche Stoffe verursacht. Fette Öle können dank ihrem höheren Gehalt an freien Fettsäuren etwas stärker als reine Mineralöle auf Metalle einwirken, wesentlicher sind aber die Angriffe durch niedere Fettsäuren, wie Ameisensäure und Essigsäure, die bei der Verbrennung entstehen können. Die Schwefelverbindungen des Öles sind im allgemeinen harmlos. Bei

Verwendung von Bleibronze und fetten Ölen sowie von Cadmiumbronze und Mineralölen tritt in manchen Fällen durch Seifenbildung Lagerkorrosion ein.

Wärmeaufnahme (spezifische Wärme).

Für die Abfuhr der Wärme aus dem Motor ist die spezifische Wärme der Öle wesentlich. Bei gegebenem Ölumlaufl wird um so mehr Wärme abgeführt werden, je höher die spezifische Wärme des Öles liegt. Rizinusöl hat eine spezifische Wärme von 0,60 kcal/kg° C bei 50° C gegenüber 0,45 kcal/kg° C für asphaltbaische und 0,49 kcal/kg° C für paraffinische Mineralöle. Geht man also von der Verwendung von Rizinusöl zu der von Mineralöl über, so muß man den Ölumlaufl in Verhältnis der spezifischen Wärmen vergrößern.

Besondere Prüfverfahren für Schmieröle.

Die Erkenntnis, daß die allgemein üblichen Meßwerte für Schmieröle, wie spezifisches Gewicht, Flammpunkt, Aschegehalt, Säure- und Verseifungszahl, ja auch Viskosität, keine genügende Charakteristik des praktischen Verhaltens ergeben, führte dazu, daß neue Untersuchungsmethoden ausgearbeitet wurden. Die Messung der wichtigsten Eigenschaft der Öle, nämlich der Schmierfähigkeit, ist allerdings noch immer nicht einwandfrei durchführbar, obwohl stets neue Ölprüfmaschinen entwickelt werden. Dagegen sind für die Bestimmung der Alterungsbeständigkeit einige Verfahren entwickelt worden, die in der Folge kurz besprochen werden sollen.

Alterung des Öles.

Grundgedanke aller Alterungsverfahren ist die Erfassung der bei Oxydation des Öles entstehenden störenden Veränderungen. Im Motor wirken sich, wie erwähnt, asphaltartige Oxydationsprodukte am ungünstigsten aus. Man versucht deshalb meist, sie selbst oder ihre Auswirkung, nämlich die Viskositätserhöhung oder die Zunahme der Verkokung, zu erfassen. Zur Alterung wird entweder Luft oder Sauerstoff verwendet und die Beschleunigung der Veränderung durch erhöhte Temperatur, in manchen Fällen zusätzlich durch Katalysatoren, wie Kupfer, erzielt. Es ist klar, daß solche Verfahren vor allem für Öle Anwendung finden, die starken Beanspruchungen unterworfen sind. Aus diesem Grund sind wohl auch die Flugmotorenöle in erster Linie in dieser Weise geprüft worden. Von Verfahren seien erwähnt: dasjenige des englischen Luftfahrtministeriums, der Standard Oil Cie of Indiana, des französischen Luftfahrtministeriums, von EVERS und SCHMIDT, und endlich ein neuerer Vorschlag der deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt. Die Prüfbedingungen und Merkmale für die Bewertung dieser Verfahren gibt die folgende Zusammenstellung:

Zahlentafel 29. Oxydationsverfahren für Motorenöle.

Name	Ölmenge	Temperatur	Dauer	Behandlung des Öles	Auswertung
Engl. Luftfahrtministerium.	40 cm ³	200°	2 × 6 h	Durchleiten von 15 l/h	Viskosität u. Verkokungszunahme
Standard Oil of Indiana ..	300 „	172°	1	10 l/h	Zeit bis 10 u. 100 mg Asphalt
Franz. Luftfahrtministerium	200 „	140°	120 h	Schütteln	Viskositätserhöhung u. Petrolätherunlösliches
EVERS u. SCHMIDT	12,5 g	100°	1 h	Sauerstoff; Öl auf Cu-Katalysator	Sauerstoffverbrauch; Säurezahl
Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt	10 „	275°	4 h	Erhitzen in flachen Schalen	Flüchtigkeit u. Asphalt

¹ Zeit gilt als Maß der Alterungsneigung.

Zur Beurteilung von Ölen ist zu sagen, daß sie je nach dem Verfahren anders ausfällt. Die Werte des Indianaverfahrens und des englischen Luftfahrtministeriums sind ziemlich ähnlich; auch das DVL-Verfahren liegt in derselben Linie. Dagegen liefern die beiden mit Katalysatoren arbeitenden Verfahren erheblich andere Werte, vor allem das von EVERS und SCHMIDT, wenn man nur den Sauerstoffverbrauch als Maß nimmt. Wenn also auch noch einige Zeit vergehen wird, ehe man eindeutige Urteile über die Alterungsbeständigkeit der Schmieröle im Betrieb auf Grund solcher Prüfungen fällen wird können, ist doch damit zu rechnen, daß man jetzt schon in diesen ergänzenden Verfahren eine wertvolle Erweiterung der bisherigen Beurteilungsmöglichkeiten erhalten hat.

Rückstandsbildung.

Zur Prüfung der Rückstandsbildung werden derzeit zwei Verfahren angewendet: das von CONRADSON [62] und das von RAMSBOTTOM [63]. Beide messen die bei der Erhitzung von Öl unter mehr oder weniger gutem Luftabschluß entstehende Ölkohle. Sie geben also ein Bild der Verkokung unter anderen als den praktisch in Frage kommenden Verhältnissen, so daß ihre Übereinstimmung mit der im Motor selbst angetroffenen Ölkohlenmenge nicht erwartet werden kann. Immerhin geben sie einen Anhalt für die Beurteilung der chemischen Stabilität der Verbindungen, wobei das längere Anheizdauer benötigende Verfahren von CONRADSON vielleicht die Kondensations- und Polymerisationsneigung stärker zum Ausdruck bringt als das rascher verlaufende Verfahren von RAMSBOTTOM. Eine Übersicht der Arbeitsbedingungen gibt die folgende Zusammenstellung:

Zahlentafel 30. Prüfbedingungen der Verkokungsverfahren nach CONRADSON und RAMSBOTTOM.

	RAMSBOTTOM	CONRADSON
Ölmenge	10 g	3,75—4,25 g
Gefäß	Porzellantiegel	Glasgefäß mit kapillarer Öffnung
Anheizart	Gasbrenner	550° C heißes Metallbad
Dauer.....	20 Minuten	bis 10 Minuten nach Aufhören des Rauchens (etwa 30 Minuten)

Infolge der verschiedenen Bedingungen stimmen die Reihenfolgen der in beiden Apparaten erhaltenen Werte nicht überein. Auch mit dem Motor ist die Übereinstimmung schlecht, weil die darin einmal gebildete Ölkohle, je nach ihrer Reaktionsfähigkeit und Haftfestigkeit und nach den Betriebsbedingungen, wieder verschwindet.

Auswahl der Schmieröle.

Die Schmierung von Verbrennungsmotoren muß entsprechend der Eigenart des Betriebes nach anderen Gesichtspunkten vor sich gehen als die anderer Arbeitsmaschinen. Naturgemäß spielt die *Viskosität* als ungefähres Merkmal der Schmierfähigkeit eine Hauptrolle. CHAMPSAUR [64] hat eine recht brauchbare Einteilung der Öle darnach vorgenommen, die in der folgenden Zusammenstellung wiedergegeben ist.

Zahlentafel 31. Einteilung der Öle nach ihrer Viskosität (in Centipoisen) nach CHAMPSAUR.

Bezeichnung	Charakter des Öles	Absolute Viskosität		Beispiel
		50° C	100° C	
1	sehr dünn Nr. 1	10—20 Cp.	—	Mobiloil Arctic
2	dünn Nr. 2	21—30 „	—	
3	dünn Nr. 3	31—40 „	—	
4	halbdünn Nr. 4	41—60 „	—	
5	halbdick Nr. 5		10—15 Cp.	Mobil „ BB ”
6	dick Nr. 6		16—20 „	„ B
7	dick Nr. 7		21—25 „	
8	dick Nr. 8		26—40 „	

CHAMPSAUR schlägt für die Anwendung eine Einteilung der Öle nach ihrer Verwendung in folgender Form vor:

Viskositäten Nr. 1:	Sehr geringe Drücke, sehr hohe Geschwindigkeiten.
„ „ 2—3:	Geringe Drücke, hohe Geschwindigkeiten.
„ „ 4—5:	Mittlere Drücke, mittlere Geschwindigkeiten.
„ „ 8:	Sehr hohe Drücke, geringe Geschwindigkeiten.

Zahlenmäßige Angaben für die Drücke und Geschwindigkeiten werden nicht gemacht. Eine derartige Einteilung ist sehr erwünscht und wird im Laufe der Zeit wohl noch genauer durchgeführt werden, wenn die erforderlichen Werte für die verschiedenen Motoren regelmäßig festgestellt werden.

Die *Beständigkeit gegen Oxydation* ist der zweite Gesichtspunkt für die Wahl des Schmieröles. Sie hängt ab von der Art des Ausgangsstoffes und seiner Verarbeitung (oder dem verwendeten Zusatz). Paraffinische Öle werden am wenigsten, naphthenische mehr, asphaltische Öle und fette Öle am stärksten oxydiert, wenn keine Zusätze angewendet werden, die diese Eigenschaften beeinflussen. In allen den Fällen, wo die Reinigung des Motors mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, wird man zur Verringerung der Kosten wenig oxydierende Öle verwenden. Allerdings muß man dabei berücksichtigen, daß der Grad der Verschmutzung des Motors auch davon abhängig ist, ob die gebildeten Oxydationsprodukte an gefährlichen Stellen ausgeschleudert oder abgesetzt werden können. Für die Neigung zum Absetzen ist der Grad der Suspensionsfähigkeit von Bedeutung, der im allgemeinen ebenso wie die Emulgierbarkeit mit zunehmender Oxydierbarkeit steigt. Gefettete Öle können so trotz an und für sich stärkerer Oxydation einen besseren Motorzustand ergeben, als weniger oxydierende mineralische Öle.

Die dritte Eigenschaft, die eine Rolle beim Verbrennungsmotor spielt, ist die *Rückstandsbildung im Verbrennungsraum*. Bei der Oxydation des in den Verbrennungsraum dringenden Öles bilden sich kohleartige Ablagerungen von verschiedener Beschaffenheit aus den verschiedenen Ölen. Auch ihre Menge ist verschieden, je nach der Art des Öles. Man muß aber zwei Dinge unterscheiden: die Menge Kohlerückstand, die entsteht, und diejenige, die im Motor zurückbleibt. Während z. B. paraffinische Öle wenig Ölkohle bilden, ist diese hart und haftfähig, so daß sie sich allmählich auf dem Kolben und Zylinderwänden ansammelt, während die stärker zur Ölkohlebildung neigenden naphthenischen und gefetteten oder fetten Öle eine leicht haftende und weiche Ölkohle ergeben, die leicht ausgepufft werden kann.

Wichtig ist weiter das *Kälteverhalten* der Öle. Je nach der Notwendigkeit öfter in der Kälte zu starten, wird man mehr oder weniger Wert auf tiefen Stockpunkt und eine flache Viskositätskurve legen. *Die Abfuhr der Wärme* aus dem Motor ist ebenfalls zu berücksichtigen. Rizinusöl hat z. B. eine viel höhere spezifische Wärme als Mineralöl, kann also besser kühlen als dieses.

Die Grundsätze für die Schmierung der einzelnen Motorenarten sind im folgenden kurz zusammengestellt.

a) *Diesel-Motoren*. Bei getrennter Schmierung von Kolben und Zylinder sowie Hauptlagern kann man zwei Öle verwenden. Bis zu 50 PS/Zylinder empfiehlt CHAMPSAUR die Verwendung eines Öles der Nr. 3 nach seiner Einteilung; bei größeren Leistungen dagegen für den Kolben und Zylinder Nr. 4 und 5, für Wellenlager und Schubstangenlager hingegen Nr. 3 und 4. Zur Verringerung der Rückstandsbildung ist die Verwendung naphthenischer oder gefetteter Öle für die Zylinderschmierung empfehlenswert.

b) *Benzinmotoren*.

Zahlentafel 32.

Ölviskosität Nr. nach CHAMPSAUR	Motorbohrung	Motordrehzahl
2—4	unter 80 mm	über 3000/min
4—5	80—100 „	2500—3000/ „
5—6	über 100 „	etwa 2000/ „

5. Grenzwerte der Anforderungen an Schmieröle.

Die Schmiermittelanforderungen des deutschen Fachnormenausschusses von 1936 für Automobil-, Gas- und Diesel-Motoren zeigt die folgende Zusammenstellung:

Zahlentafel 33. Anforderungen an Schmieröle für Verbrennungsmotoren.

Eigenschaft	Automotoren				Gasmaschinen					
	Benzin		Schweröl		kleine		große			
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Raff.	Dest. ³	Viertakt		Zweitakt	
							Raff.	Dest. ³	Raffinat	
Zähigkeit b. 50°C	5—28° E	4—18° E	10—24° E	7—16° E	n. unter 3° E		n. unter 4° E			n. unt. 6° E
Flammpunkt	nicht unter 175° C				n. unt. 160° C		n. unt. 175° C			
Stockpunkt ¹	in allen Fällen nicht über 5° C									
Neutral.-Zahl ²	nicht über 0,3				n. über 0,3	1,5	n. über 1,5			
Wassergehalt	nicht über 0,1%				n. über 0,1%	0,2%	n. über 0,1%	0,2%		
Aschegehalt	nicht über 0,05%				n. über 0,05%	0,2%	n. über 0,05%	0,2%		
Hartasphalt	0	0			0	0,3%	0	0,3%		
Fettölzusatz	ist in allen Fällen gestattet									

Dieselmotorenöl.

Eigenschaft	Geforderte Eigenschaften Raffinat
Zähigkeit	nicht unter 6° E
Flammpunkt	nicht unter 175° C (200° C bei Dieselmotoren mit Verdichtern)
Stockpunkt	nicht über 5° C
Neutralisationszahl	nicht über 0,3
Wassergehalt	nicht über 0,1%
Aschegehalt	nicht über 0,05%
Hartasphalt	nicht über 0
Fettölzusatz	zulässig

Eigenschaften handelsüblicher Schmieröle sind in der folgenden Zahlentafel 34 zusammengestellt.

D. Zusätze zu Kraftstoffen und Schmiermitteln.

I. Kraftstoffzusätze.

Wie schon verschiedentlich erwähnt, entsprechen nicht alle Eigenschaften der Kraftstoffe höher gestellten Anforderungen. Man versucht mit Erfolg eine Verbesserung einzelner Mängel durch Zusätze von Stoffen in sehr geringer Menge. Am wichtigsten war das bisher bei der Steigerung von Klopfestigkeit und Lagerbeständigkeit. Daß man aber

¹ Es empfiehlt sich, im Winter Öle mit tieferem Stockpunkt oder mit entsprechendem Fließvermögen in der Kälte zu verwenden.

² Bei von ungebundener Mineralsäure und ungebundenem Alkali. Für jedes Prozent des zugesetzten Fettungsmittels ist eine Zunahme der N.-Z. um 0,3, bei Zusatz von Fettsäure um 2,0 über die zugelassene N.-Z. des angewendeten Mineralöles zulässig.

³ Für Zylinderschmierung empfiehlt sich die Verwendung von Destillaten wegen des Asche- und Asphaltgehalts nicht.

Zahlentafel 34. Eigenschaften von Schmierölen des Handels.

Bezeichnung	Spezifisches Gewicht bei 20° C	Flamm- punkt ¹ °C	Stockpunkt °C	Verseifungs- zahl	Neu- tral- sations- zahl	Conrad- son-Ver- kokung	Zähigkeit ° E			Pol- höhe	Indiana Oxidationstest Z = Zeit in h A = mg Asphalt/10 g Öl E = ° E bei 100° C
							20°	50°	100°		
A. Benzin-Automotoren		P. M.									
Derop A Winter	0,910	193	-36	0,28	0,05	0,14	29,5	5,1	1,6	2,7	
" B/S Sommer	0,911	222	-18,5	0,25	0,06	0,40	80,0	11,6	2,1	2,6	
" Z-Sonderqualität	0,911	226	-17	0,25	0,05	0,63	120,0	17,6	2,6	2,5	
Gargoyle Mobilöl A	0,896	o. T. 240	-10	—	—	0,35	51,8	9,3	2,01	—	{ Z 0 42 88,5 136 168 208 A 0 0 0 0 0 0 E 2,14 2,19 2,23 2,37 2,54 2,82
" " AF	0,902	243	-10	—	—	0,40	70,5	10,9	2,15	—	{ Z 0 42 67 88,5 136 144 A 0 0 0 0 0 0 E 2,91 3,36 3,74 4,18 6,63 7,59
" " Arctic	0,887	230	-19	—	—	0,18	31,2	6,2	1,75	—	{ Z 0 42 67 88,5 A 0 0 0 0 E 2,56 2,85 3,18 3,68
" " B	0,905	270	9	—	—	0,53	139	20,4	2,9	—	{ Z 0 42 67 88,5 A 0 0 0 0 E 2,56 2,85 3,18 3,68
" " BB	0,903	261	-11	—	—	0,54	104	15,3	2,4	—	{ Z 0 42 67 88,5 136 144 A 0 0 0 0 0 0 E 2,91 3,36 3,74 4,18 6,63 7,59
Essolub 20	0,879	236	-32	0,07	—	0,23	—	5,3	1,71	—	{ Z 0 42 67 88,5 A 0 0 0 0 E 2,56 2,85 3,18 3,68
" 40	0,881	262	-30	0,1	—	0,33	—	9,9	2,1	—	{ Z 0 42 67 88,5 A 0 0 0 0 E 2,56 2,85 3,18 3,68
" 50	0,885	278	-12	0,09	0,05	0,58	—	13,4	2,4	—	{ Z 0 42 67 88,5 A 0 0 0 0 E 2,56 2,85 3,18 3,68
" 503	0,891	277	-10	0,1	—	1,14	—	17,8	2,8	—	{ Z 0 42 67 88,5 A 0 0 0 0 E 2,56 2,85 3,18 3,68
B. Benzin-Flugmotoren											
a (gefettet)	0,916	217	-25	4,7	0,01	0,27	142	19,4	2,88	—	
b	0,896	224	-15	—	—	0,27	125	16,6	2,84	—	
c	0,890	247	+ 0,5	—	—	1,20	136	22,9	3,27	—	
C. Dieselmotoren		P. M.									
Derop D Winter	0,881	238	-18	0,25	0,02	0,84	45	8,4	2,0	1,9	
" DD/Sommer	0,897	247	-13	0,25	0,02	0,67	81	11,8	2,2	2,2	
Gargoyle DTLA 1 AA	0,891	272	4,0	—	—	1,4	—	22	3,36	—	
" " 1 BB	0,891	244	4,0	—	—	0,9	92	13,9	2,52	—	
" Extra Schw.	0,891	225	7	—	—	0,6	55	8,9	1,98	—	
" Vacme B	0,909	216	-16	—	—	0,3	72,8	9,1	1,97	—	
" " BB	0,907	238	8	—	—	1,0	105	14,0	2,35	—	
" Delnec 1	0,890	230	-16	—	—	0,16	53,3	6,8	1,8	—	{ Z 0 48 72 96 120 A 0 0 0 2 mg — E 1,80 1,89 1,99 2,10 —
" " 2	0,896	235	-12	—	—	0,22	50,5	8,8	2,0	—	{ Z 0 48 72 96 120 A 0 0 0 2 mg — E 1,80 1,89 1,99 2,10 —
" " 3	0,903	264	-10	—	—	0,31	78,2	12,2	2,2	—	{ Z 0 48 72 96 120 A 0 0 0 2 mg — E 1,80 1,89 1,99 2,10 —
" " 4	0,903	256	-10	—	—	0,37	120,1	16,0	2,6	—	{ Z 0 48 72 96 120 A 0 0 0 2 mg — E 1,80 1,89 1,99 2,10 —

für ortsfeste Motoren und Schiffs- Dieselmotoren.

¹ Nach PENSKY-MARTENS (P. M.) oder im offenen Tiegel (o. T.).

auch noch in anderer Richtung auf ähnliche Art Verbesserungen wird erzielen können, dürfte sicher sein. Es sei nur auf Mittel zur Erhöhung der Beständigkeit von Alkoholgemischen durch Lösungsvermittler hingewiesen. Auch die Vergrößerung der Zündwilligkeit von Dieselölen gehört hierher.

1. Erhöhung der Klopfestigkeit.

Man kann natürlich die Klopfestigkeit eines Stoffes dadurch steigern, daß man ihn mit einer anderen höheren Klopfestigkeit mischt. Diese Behandlung erzielt aber im allgemeinen nur eine nach der Mischungsregel zu errechnende Octanzahlerhöhung, ist also keine Beeinflussung des Verbrennungsvorganges des Ausgangsstoffes. Viel wirksamer sind solche Zusätze, die chemisch auf den Oxydationsverlauf einwirken. Über die Art der Beeinflussung besteht noch keine restlose Klarheit. Man kann vielleicht trotz gewisser Bedenken annehmen, daß die primäre Bildung von Oxydationsprodukten (Moloxiden) oder (Peroxyden) an der Oberfläche von schwer verdampfenden höher siedenden Bestandteilen des Kraftstoffes verhindert oder verzögert wird, so daß die ruhige Verbrennung den ganzen Verbrennungsraum durchläuft, ehe die Detonation einsetzen kann. Die wirksamen Stoffe kann man unterscheiden in organische und anorganische bzw. metallorganische. Ihre Wirksamkeit ist bei den besten Vertretern der organischen Stoffe (meist Amine) rund zehnmal größer, bei den metallorganischen Stoffen rund 100mal größer als die von Benzol. Einen genaueren Vergleich der Wirkung geben die folgenden Zusammenstellungen nach BOYD.

Zahlentafel 35. Vergleich der relativen Wirksamkeit verschiedener Gegenkopfmittel.

Verbindung	Formel	Gewicht für gleiche Wirkung	Relative Wirksamkeit Mol ¹
Anilin	$C_6H_5 \cdot NH_2$	1	1
Benzol	C_6H_6	9,8	0,085
Toluol	$C_6H_5 \cdot CH_3$	8,8	0,112
Xylol	$C_6H_4(CH_3)_2$	8,0	0,142
Alkohol	$C_2H_5 \cdot OH$	4,75	0,104
Äthyljodid	$C_2H_5 \cdot J$	1,65	1,09
Diäthylselenid	$(C_2H_5)_2Se$	0,214	6,9
Diphenilselenid	$(C_6H_5)_2Se$	0,49	5,2
Diäthyltellurid	$(C_2H_5)_2Te$	0,075	26,6
Diphenyltellurid	$(C_6H_5)_2Te$	0,139	22,0
Triphenylphosphin	$(C_6H_5)_3P$	3,08	0,91
Triphenylarsin	$(C_6H_5)_3As$	2,44	1,35
Triphenylstibin	$C_6H_5_3Sb$	1,66	2,42
Teträthylzinn	$(C_2H_5)_4Sn$	0,66 ²	3,8 ²
Tetraäthylblei	$(C_2H_5)_4Pb$	0,029 ²	118
Diphenyldiäthylblei	$C_6H_5(C_2H_5)_2Pb$	0,041 ²	110 ²
Tetraphenylblei	$(C_6H_5)_4Pb$	0,080 ²	69,5 ²
Triäthylbismutin	$(C_2H_5)_3Bi$	0,135 ²	23,8 ²
Triphenylbismutin	$(C_6H_5)_3Bi$	0,22 ²	21,5 ²
Nickelcarbonyl	$Ni(CO)$	0,053 ²	35 ²
Dimethylkadmium	$(CH_3)_2Cd$	1,23 ²	1,25 ²
Titantetrachlorid	$TiCl_4$	0,64 ²	3,2 ²

Die relative Wirksamkeit verschiedener Stickstoffverbindungen als Gegenkopfmittel zeigt Zahlentafel 36.

¹ Wirkung des Zusatzes gleicher molarer Mengen.

² Der Wert für Zinntetraäthyl ist wegen Frühzündung infolge des Zündsatzes unsicher.

³ Diese Werte sind aus den ursprünglichen in die Anilinskala umgerechnet, so daß Bleitetraäthyl den Wert 118 statt 100 der Originalarbeit erhält.

Zahlentafel 36. Relative Wirksamkeit von Stickstoffverbindungen als Gegenklopfmittel.

Verbindung	Formel	a) Gewicht für die best. Wirkung g	b) Relative molekulare Wirksamkeit
Anilin	$C_6H_5 \cdot NH_2$	1	1
Cumidin	$(CH_3)_3 \cdot C_6H_5 \cdot NH_2$.	0,96	1,51
Diphenylamin	$(C_6H_5)_2NH$	1,21	1,5
m-Xylidin	$CH_3C_6H_3NH_2$	0,92	1,4
Monomethylanilin	$C_6H_5NHCH_3$	0,83	1,4
Toluidin	$CH_3C_6H_4NH_2$	0,94 ¹	1,22 ¹
Amylaminobenzol	$C_6H_{11}C_6H_4NH_2$	1,53	1,15
Äthylaminobenzol	$C_6H_5C_2H_4NH_2$	1,14	1,14
Aminodiphenyl	$C_6H_5C_6H_4NH$	1,6	1,14
Methyl-o-Toluidin	$CH_3C_6H_4NHCH_3$	1,15	1,13
n-Butylaminobenzol	$C_6H_5C_4H_9NH_2$	1,44	1,11
n-Propylaminobenzol	$C_6H_5C_3H_7NH_2$	1,32	1,10
Monoäthylanilin	$C_6H_5NHC_2H_5$	1,27	1,02
Mono-n-Propylanilin	$C_6H_5NHC_3H_7$	1,95	0,75
Äthylidiphenylamin	$C_6H_5N(C_6H_5)$	3,65	0,58
Mono-n-Butylanilin	$C_6H_5NHC_4H_9$	3,1	0,52
Diäthylamin	$(C_2H_5)_2NH$	1,59	0,495
Mono-Isoamylanilin	$C_6H_5NHC_5H_{11}$	7,1	0,248
Di-n-Propylanilin	$C_6H_5N(C_3H_7)_2$	7,15	0,27
Diäthylanilin	$C_6H_5N(C_2H_5)_2$	6,7	0,24
Dimethylanilin	$C_6H_5N(CH_3)_2$	6,2	0,21
Äthylamin	$C_2H_5NH_2$	2,4	0,20
Triäthylamin	$(C_2H_5)_3N$	7,95	0,14
Ammoniak	NH_3	2,0 (—)	0,09 (—)
Isopropylnitrit	$C_3H_7NO_2$	0,085 (—) ²	11,5 (—) ²

Als Vergleich diente Anilin in einer Menge von 3 Vol.-%. Messung wie oben. Die Spalte a enthält die Anzahl der Gramme, welche der Wirkung von 1 g Anilin entspricht; die Spalte b gibt an, welche Wirksamkeit die Zusätze gleicher molarer Mengen der einzelnen Stoffe besitzen.

Wegen seiner hohen Wirksamkeit hat sich das Bleitetraäthyl trotz seiner Giftigkeit durchgesetzt und wird vor allem für Fliegerbenzine allgemein verwendet, während das Automobilbenzin zwar in USA. und in einigen anderen Ländern, aber nicht in gleichem Umfang, wie Fliegerbenzin, äthylisiert wird. Bleitetraäthyl wird nicht rein verwendet, sondern zur Verringerung der Ablagerung von festen Bestandteilen (Bleioxyd) mit Bromverbindungen als Ethylfluid gemischt. Dessen Zusammensetzung schwankt, je nachdem, ob es für Automobile oder für Flugmotoren bestimmt ist, entsprechend der nebenstehenden Übersicht.

Die Zusatzmenge wird zur Berücksichtigung möglicher Änderungen der Zusammensetzung in Volumsprozent Bleitetraäthyl angegeben und beträgt bei Autobenzen etwa

Zahlentafel 37. Zusammensetzung von Ethylfluid (Nov. 1937) in Gewichtsprozenten.

Bezeichnung	Automobil C-Mischung rot	Flugmotor T-Mischung blau
Bleitetraäthyl	63,30	61,42
Äthylbromid	25,75	35,68
Äthylchlorid	8,72	—
Farbstoff	2,23	2,90
Petroleum und Rest		
Spez. Gew. (20° C)	1,671	1,755
Kältepunkt	— 23° C	— 10,5° C
Flammpunkt	über 110° C	über 110° C

Eigenschaften von Bleitetraäthyl:

Spez. Gew. 20° C	1,659
Siedepunkt	200° C (Zersetzung)
Gefrierpunkt	— 156° C

¹ Mittelwert der o-, m- und p-Verbindung.

² Nur Näherungswert. Organische Nitrate und Nitrite sind im allgemeinen Klopförderer, erstere stärker als letztere und die Alkylverbindungen wieder stärker als die Arylverbindungen. Chlor und Brom und einige Verbindungen fördern das Klopfen ebenfalls.

0,05%, bei Fliegerbenzinen für die Verkehrsluftfahrt 0,08%, für die Militärluftfahrt 0,16%. Eine weitere Erhöhung der Zusatzmenge würde die Klopfestigkeit nur mehr wenig oder gar nicht, die Gefahr der Ventil- und Kerzenstörungen durch die Ablagerung

von Bleiprodukten aber erheblich steigern. Die Wirkung von Bleitetraäthyl ist nicht bei allen Benzinen dieselbe; manche werden mehr, andere weniger verbessert, so daß man die Octanzahl von Gemischen aus gebleiten und ungebleiten Benzinen nicht genau voraussagen kann. Gegen Schwefelverbindungen ist Bleitetraäthyl sehr empfindlich, so daß mögliche Schwefelfreiheit des Benzins erwünscht ist.

Eisenkarbonyl wurde seinerzeit von der I. G. Farbenindustrie in Mischung mit Monomethylanilin (1 : 9) als Motyl in größerem Umfang verkauft. Die Eigenschaften des Eisenkarbonyls sind:

Spezifisches Gewicht (20° C) 1,47,
Siedepunkt 103° C,
Gefrierpunkt — 21° C.

Die Wirkung von Eisenkarbonyl erreicht annähernd die von Bleitetraäthyl. Der Grund dafür, daß es sich nicht in gleichem Maße durchsetzen konnte wie Bleitetraäthyl, liegt wohl einerseits in der an und für sich hohen Klopfestigkeit der

deutschen Automobilkraftstoffe zur Zeit seiner Einführung, vor allem aber daran, daß es in stärkerem Maße als Blei-(Ethyfluid), Ablagerungen auf Zündkerzen und Ventilen ergab, insbesondere, wenn die Belastungen der Motoren hoch waren. Es ist nicht unmöglich, daß geeignete Konstruktionen auch das Eisenkarbonyl besser verwendbar machen.

Von den anderen Gegenklopfmitteln seien nur die aromatischen Amine, wie Anilin, Monomethylanilin, Xylidin, Toluidin erwähnt, die etwa zehnmal so wirksam sind, als Benzol. Ihre Anwendung erfolgt nur in geringerem Umfange. Ihre Eigenschaften sind in der folgenden Zahlentafel zusammengestellt.

Zahlentafel 38. Eigenschaften organischer Amine.

Name	Spezifisches Gewicht	Siedepunkt	Gefrierpunkt	Mol.-Gew.
Anilin.....	1,022	184	— 6	93,06
Monomethylanilin	0,990	196	— 57	107,08
Toluidin (ortho-).....	1,004	201	— 24	107,08
Xylidin (1,3,4-).....	0,918	212	—	121,10

Abb. 20 gibt eine Zusammenstellung der Erhöhung der zulässigen Verdichtung für einige Gegenklopfmittel. Ethylfluid bzw. Bleitetraäthyl wirkt etwa wie Eisenkarbonyl.

2. Steigerung der Lagerbeständigkeit.

Mittel zur Erhöhung der Lagerbeständigkeit werden in Krackbenzinen in steigendem Maße verwendet. Sie wirken derart, daß sie die Bildung von Peroxyden verzögern und damit die Bildung von Harz sowie die Abnahme der Octanzahl verhindern. Die Wirkung der Zusätze ist offenbar auf den Einfluß der OH- und der NH₂-Gruppe zurückzuführen.

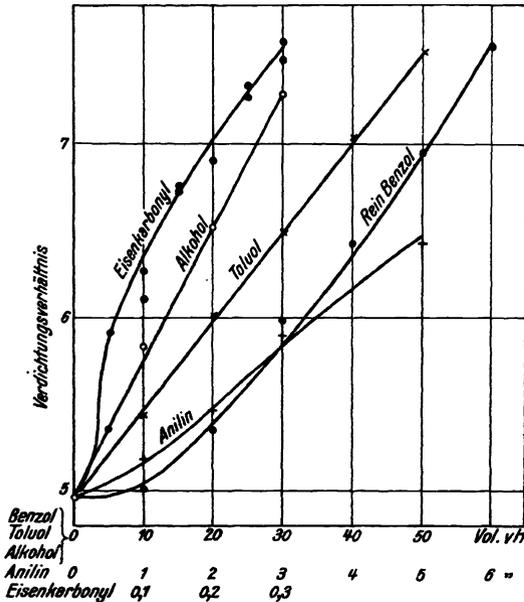


Abb. 20. Erhöhung der zulässigen Grenzverdichtung durch Gegenklopfmittel.

So sind Phenole und Amine, ausgeprägter aber substituierte Stoffe dieser Art, sehr gute Hemmstoffe. Besonders hervorzuheben sind: Pyrogallol, α -Naphthol, Hydrochinon, p-Kresol, Phenol-p-Benzylaminophenol, Catechol sowie der von der Universal Oil Products Cie vorgeschlagene Holzteerinhilator. Die Wirkung einiger dieser Zusätze zeigt die folgende Zusammenstellung nach Angaben von DRYER, EGLOFF und MOWBY. Neuerdings wird auch Alizarin in einer Menge von 0,002% als Hemmstoff empfohlen.

Zahlentafel 39. Wirkung von Hemmstoffen (pennsylvanisches Benzin, 5 Monate Dauer).

Name	Un- behand. Benzin	Pyro- gallol	Hydro- chin.	Catechol	α -Naph- thol	p-Cresol	Phenol	2-Amino 4-Nitro- phenol	Anilin	Holzteer	
Zusatz Gew.-%	0	0,0016	0,00138	0,00138	0,0018	0,0013	0,0012	0,0019	0,0012	0,0050	0,01
mg Harz/100 cm ² :											
Cu-Schalenverfahren	443	1	83	175	24	563	431	41	597	-4	5
Luftdüsenverfahren ¹	809	0	1	461	7	275	313	10	766	0	0
Farbe (SAYBOLT)	-11	+6	+4	-6	-1	-8	-11	-1	-5	+5	+5
Octanzahländerung . .	-15	+1	-2	-8	-	-	-10	-2	-12	0	0
Peroxydzahl ²	49,5	0,19	2,50	35,0	0,59	49,5	43,5	2,0	51,5	0,19	0,21

(Die Zahlen geben die Änderungen gegenüber dem Ausgangszustand an.)

Die Verwendung der Hemmstoffe hat eine ganz außerordentliche Bedeutung für die Verwendung der Krackbenzine. Bei sinngemäßer Anwendung ist es möglich, Krackbenzine, die stärker zu Abscheidungen neigen, fast genau so zu verwenden wie Naturbenzine oder gesättigte synthetische Benzine. Allerdings ist dabei zu beachten, daß katalytische Einwirkung von Metallen die Hemmstoffe zerstören und starke Harzbildung auslösen kann.

3. Lösungsvermittler.

Für diesen Zweck kämen vor allem solche Stoffe in Frage, die in beiden zu mischenden Kraftstoffen und in Wasser vollkommen löslich, aber nicht hygroskopisch sind. Da dies nicht restlos möglich ist, muß man ein Kompromiß schließen. Für Methanol (Methylalkohol) hat sich gezeigt, daß manche gemischte Stoffe bessere Wirkung haben als die addierte Wirkung der Einzelbestandteile erwarten lassen. Als solche kommen in Frage: höhere aliphatische und alizyklische Alkohole, höhere Ketone. Manche Phenole, wie o-Kresol und m-Xylenol, oder technische Xylenolgemische besitzen auch gute Wirkung, verbrennen aber schlecht und dürften Zündkerzenstörungen verursachen.

II. Schmierölszusätze.

1. Erhöhung der Kältebeständigkeit

kann man durch Zugabe von etwa 1% hochmolekularen kolloiden Kohlenwasserstoffen erreichen. Der Stockpunkt wird dabei bis um 15 bis 20°C herabgedrückt; man nimmt an, daß die Wirkung auf einer Verringerung der Kristallgröße des Paraffins und Abnahme der darin adsorbierten Ölmenge beruht. Der typische Vertreter dieser Stoffe, das Paraflow, wird durch Kondensation von chloriertem Paraffin mit Naphthalin erhalten. Die Wirkung ist bei dünnen Ölen besser als bei zähen.

2. Verbesserung der Viskositätskurve

im Sinne einer Verminderung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität erzielt man durch Zugabe eines anderen Stoffes ähnlicher Art, des Exanol, das aus den leichteren Anteilen von Krackbenzinen durch Polymerisation erhalten wird. Die Wirkung ist allerdings bei Ölen mit schlechtem Viskositätsindex besser als bei an und für sich guten Ölen.

¹ ASTM Proceedings 32 (Bd. 1), 407 (1932).

² Grammäquivalente aktiver m/1000 O Liter.

3. Verbesserung der Schmierfähigkeit

wird bei Ölen schon lange durch Zusatz von Fettsäure und fetten Ölen erreicht. Neuerdings wird auch die Verwendung von Bleioleat und von Methylchlorostearat empfohlen, das die Abnutzung stark verringern soll. Schwefel und chlorierte Kohlenwasserstoffe werden auch für die sogenannte Hochdruckschmiermittel herangezogen. Auf Graphit, der selbst schmierstoffartig wirkt und in Mengen von 0,1 bis 0,2% in kolloider Form zugesetzt wird, sei hier bloß hingewiesen.

4. Hemmstoffe

ergeben eine Verhinderung der Oxydation des Öles. Abgesehen von dem zu leicht flüchtigen und giftigen Bleitetraäthyl, werden Zinnverbindungen, Chromoleat, Naphthylamin, α -Naphthol, Metallnaphthenate und andere Stoffe verwendet. Das Patent Castrol enthält z. B. Chromoleat, um die Bildung fester Oxydationsrückstände zu verhindern.

E. Kühlmittel.

Das eigentliche Kühlmittel ist meist die Luft, die unmittelbar oder mittelbar verwendet wird. Sie selbst bereitet, abgesehen vom Staub, den sie manchmal mitführt, keine besonderen Schwierigkeiten. Bei der Flüssigkeitskühlung wird die Verbrennungswärme erst auf eine Flüssigkeit übertragen, die später vielfach durch Luft wieder zurückgekühlt wird; man spricht dann von Wasser- oder Glykolkühlung. Die Zusammensetzung der Kühlflüssigkeit kann sehr verschieden sein. Ihre Brauchbarkeit richtet sich darnach, wie sie die folgenden Anforderungen erfüllt:

1. Hohe spezifische Wärme.
2. Niederer Gefrierpunkt (beim Frieren keine Volumenvermehrung).
3. Hoher Siedepunkt.
4. Keine Abscheidung von Kesselstein, Zersetzungsprodukten usw.
5. Keine Korrosion.

Die Zusammenstellung zeigt, daß es ein ideales Kühlmittel nicht gibt. *Wasser* hat zwar hohe spezifische Wärme, aber auch einen hohen Gefrierpunkt; es scheidet Kesselstein — je nach dem Grade seiner Härte — ab und korrodiert. Um es zu verbessern, ist es notwendig, daß man alle diese Eigenschaften ändert. Die Senkung des Gefrierpunktes wird in der Regel durch Zugabe organischer wasserlöslicher Flüssigkeiten erreicht, wie Methylalkohol (Siedepunkt nur 65° C; überdies Neigung zur Korrosion), Äthylalkohol (Siedepunkt nur 78° C) sowie vor allem Glycerin (Siedepunkt 290° C) und Äthylenglykol (Siedepunkt 197° C). Die günstige Wirkung solcher Zusätze besteht nicht nur darin, daß sie die Temperatur der ersten Kristallabscheidung herabsetzen,

Gefrierpunkt von Wasser und Zusätzen in °C.

Zusatzmenge in Vol.-%	Äthyl- alkohol	Glykol	Glycerin
10	— 4	— 2,8	— 2,0
20	— 8,5	— 8,3	— 6
30	— 14,8	— 16,0	— 11
40	— 22,1	— 26,0	— 18
50	— 31,1	— 37,0	— 26

sondern vor allem in der Überleitung des gleichmäßigen Erstarrens des reinen Wassers in Blockform (unter Volumenvergrößerung) in einen Übergang zur salbenartigen Konsistenz. Eine Sprengwirkung wie bei gewöhnlichem Eis tritt deshalb trotz der auch hier vorhandenen Volumenvergrößerung nicht ein.

Die Wirksamkeit der wichtigsten Gefrierschutzmittel zeigt die obenstehende Zusammenstellung (nach ULLMANN).

Bei Verwendung von Gefrierschutzmitteln ist die Korrosion zu berücksichtigen. Maßnahmen dagegen sind die entsprechende Wahl der Baustoffe, Aufbringung von inaktiven Deckschichten, wie Phosphaten, Chromaten, Kadmium usw., oder von Überzügen, wie Einbrennlacken. Man kann aber auch Schutzkolloide einbringen, die als oberflächenaktive

Stoffe eine dünne Haut eines schützenden Kolloidfilms ausbilden. Ein Beispiel dieser Art ist das Korrosionsschutzöl, das von der Firma Shell als Zusatz zu Kühlwasser empfohlen wird.

Die Ablagerung von Kesselstein wird dadurch bekämpft, daß man enthärtetes Wasser verwendet oder daß man kolloidalen Graphit in das Kühlwasser gibt. Dabei ist zu bedenken, daß enthärtetes Wasser stärker korrodieren kann als das nicht enthärtete. Daher ist bei ersterem ein Korrosionsschutz sehr empfehlenswert.

Die Verwendung *anorganischer Salzlösungen* als Kühlmittel ist *nicht* sehr vorteilhaft, wenn man auch auf recht tiefe Gefrierpunkte kommen kann. Besser ist der Gebrauch der milchsauren Salze, die dem Wasser glyzerinähnliche Eigenschaften verleihen.

Für die *Kühlung bei höheren Temperaturen* kommt vor allem Äthylenglykol in Frage. Diese Kühlung spielt in der Luftfahrt eine gewisse Rolle, weil sie die Verwendung von kleineren Kühlern als bei der Wasserkühlung zuläßt. Die Leistung des Motors geht jedoch wegen des verringerten Füllungsgrades zurück und an die Klopffestigkeit der Kraftstoffe werden erheblich höhere Anforderungen gestellt als bei Wasserkühlung. Der Gefrierpunkt des meist etwa 3% Wasser enthaltenden Glykols liegt genügend tief (-12°C für das reine Produkt). Zur Verringerung der Korrosion muß ein Schutzstoff zugegeben werden. Äthylenglykol hat nur eine spezifische Wärme von 0,65, ist also wesentlich weniger wirksam als Wasser.

F. Ausblick auf die weitere Entwicklung der Betriebsstoffe.

Bis zum Weltkrieg hat man sich damit begnügt, die naturgegebenen Rohstoffe in geeigneter Weise zu raffinieren, d. h. entweder physikalisch oder chemisch auf Fertigprodukte zu verarbeiten. Um diese Zeit tauchte zuerst die Krackung auf, die dem Mangel an Benzin abhalf, aber neuartige Raffinationsverfahren erforderlich machte. Sie stellt den Beginn der chemischen Veränderung der Rohstoffe dar, die dann in der Synthese dazu führte, flüssige Betriebsstoffe aus Kohle oder kohlenstoffhaltigen Stoffen zu gewinnen, d. h. weitgehend unabhängig von der Natur der Ausgangsstoffe zu werden. Die Verwendung von Bleitetraäthyl, Eisenkarbonyl und von Hemmstoffen zur Erhöhung der Lagerungs- und Alterungsbeständigkeit sowie von Zusätzen, die die Schmierfähigkeit verbessern, war ein anderer Weg, die gesteigerten Ansprüche an die Betriebsstoffe zu erfüllen und die Decke der brauchbaren Naturprodukte zu strecken.

Derzeit kann man sagen, daß mengenmäßig nach wie vor das natürliche Erdöl weitaus die größte Bedeutung besitzt. Die Synthese erreicht nur wenige Prozente der Fabrikationsmengen aus Erdöl. Anders ist es, wenn man die Qualität der Beurteilung zugrunde legt. Sowohl Schmieröl als Kraftstoffe können synthetisch in besserer Qualität hergestellt werden, als wie sie die Natur liefert. In allen den Fällen, wo höchste Anforderungen gestellt und erfüllt werden müssen, wird also in Zukunft die Synthese auch in der Zeit genügender Erdölvorkommen unersetzlich sein. Je größer der Bedarf an Betriebsstoffen wird, um so wichtiger wird die Synthese auch für die Massenversorgung werden, wenn auch der Preis höher sein muß als der natürlicher Produkte. Ausgangsstoff wird zunächst nur die Kohle, Steinkohle oder Braunkohle sein. Immerhin ist für die fernere Zukunft die Aussicht tröstlich, daß auch andere organische Stoffe, wie Torf, Holz oder Zellulose, bei Anwendung der Synthese zu Betriebsstoffen der bisher üblichen Art umgearbeitet werden können. Ob es notwendig sein wird, das Schwergewicht dann noch mehr auf die Verwendung von Alkohol zu legen oder ob man besser nach einer Schwelung vergast und eine Synthese nach FISCHER-TROPSCH durchführt, wird erst auf Grund von Rentabilitätsberechnungen und je nach der Rohstofflage in dem betreffenden Land zu beurteilen sein. Zweifellos aber ist die Synthese aus der Versorgung der Welt mit Betriebsstoffen nicht mehr wegzudenken und wird ihre Bedeutung in Zukunft immer größer werden.

Die Verbesserung der naturgegebenen Rohstoffe durch chemische Umarbeitung erscheint nur mehr wenig ausbaufähig. Produkte, wie die mit dem Duo-Solprozeß (Lösungsverfahren mit Propan-Kresol) erhaltenen Schmieröle, oder die aus naphthenischen oder aromatenreichen Rohölen erhaltenen Fliegerbenzine stellen wohl die Reindarstellung der besten Betriebsstoffe vor, die in den Naturprodukten vorhanden waren. Eine weitere Verbesserung ginge nur über den Weg der Aufspaltung und des Wiederausammenfügens der Moleküle in der gewünschten Form, wäre also auch eine Art von Synthese, die etwa zu Polymerkraftstoffen und zu polymerisierten oder kondensierten Schmierölen führen würde.

Die Verbesserung der naturgegebenen und verarbeiteten Produkte durch Zusätze verschiedener Art ist hingegen ein weites Feld, auf dem noch manche Fortschritte zu erwarten sind. Allerdings setzt sie intensive Forschungsarbeit und Aufklärung der wechselseitigen Beziehungen zwischen Betriebsstoffen-Eigenschaften und Betriebsverhältnissen voraus, wozu eingehende Kenntnis der Betriebsbedingungen im Motor unerlässlich ist. Die Möglichkeit, die Betriebsstoffe im gewünschten Sinne zu verändern, wird deshalb weitgehend davon abhängig sein, in welchem Maße der Ingenieur und Chemiker durch genaueste Messungen der Betriebsbedingungen im Motor die Unterlagen für die Anpassung der Betriebsstoffeigenschaften an diese Verhältnisse liefern wird.

Schrifttum.

Allgemeines.

Siehe Einleitung.

Verbrennung.

1. TAUSZ, J. u. F. SCHULTE: Über Zündpunkte und Verbrennungsvorgänge im Diesel-Motor. Halle a. S.: Knapp. 1924.
2. CALLENDAR, H. L.: Dopes and Detonation. *Engineering* 121, 147, 182, 210 (1927).
3. BOERLAGE, G. D. u. J. J. BROEZE: Entzündung und Verbrennung im Diesel-Motor. VDI-Forsch.-Heft 336 (1934).
4. NEUMANN, K.: Untersuchungen an der Diesel-Maschine. *Z. VDI* 82, 765 (1932).
5. FOORD, F. A.: Spontaneous Ignition Temperatures of Fuel. *J. Inst. Petr. Techn.* 18, 533 (1932).
6. EGERTON, A. and GATES: Ignition of Substances; Igniting Temperatures; Characteristics of Petrol; Antiknock Action. *J. Inst. Petr. Techn.* 18, 244—299 (1927).
7. SCHAEFER D.: Neuere Anschauungen über motorische Entzündungs- und Verbrennungsvorgänge. *Jahrbuch der schiffbautechnischen Gesellschaft* 88, 181 (1932).

Motorbetriebsbedingungen.

8. NEUMANN K.: *Forschung* 1, 7 (1936). Kinetische Analyse des Verbrennungsvorganges 7, 52.
9. SCHMIDT, F. A. F.: *Z. VDI* 80, 769 (1936). Vergleichende Untersuchung der Verbrennungs- und Arbeitsvorgänge an Motoren verschiedener Arbeitsverfahren.

Luft.

10. MACGREGOR J. R.: *Oil a. Gas-J.* 28. I. 37, 35 (37), 164. Influence of humidity on Knock ratings.
11. ROBERTSON D. D.: *S. A. E. J.* 87, 375 (1935). Factors controlling the performance of pistons and piston rings.

Gasförmige Brennstoffe.

12. v. HUHN: Flüssiggasbetrieb. *Automob.-techn. Z.* 41, 233 (1938).
13. KNEEMER, M. H.: Deutsche gasförmige und feste Treibstoffe. *Z. VDI* 78, 1235 (1934).
14. RIXMANN, W.: Der Leistungsabfall gasgetriebener Fahrzeugmotore und die Wege zu seiner Verringerung. *Z. VDI* 81, 1357 (1937).
15. SCHULTE, F.: Auswahl der Brennstoffe für die Kohlenstaubmaschine. *Stahl u. Eisen* 55, 442 (1935).
16. GRIMME, W.: Über die Gewinnung und Eigenschaften von Flüssiggasen und ihre Verwendung als Treibstoff. *Angew. Chem.* 51, 265 (1938).

Feste Brennstoffe.

17. WAHL H.: Über Kohlenstaubmot.-Treibstaub. *Brennstoff-Chem.* 16, 201 (1935).

Flüssige Brennstoffe für Otto-Motoren.**Chemische Zusammensetzung.**

18. HOFFERT, W. H. and G. CLAXTON: Motor Benzole. National Benzole Association 1931.
19. NASE, A. W. and HOWES D. A.: The Principles of Motor Fuel Preparation and Application. London: Chapman & Hall. 1934.
20. BROOKS, B. J. in Science of Petroleum, 986: The chemical character of Petroleum and Petroleum Products.
21. MORELL, J. C. in Science of Petroleum, 996: The chemical composition of cracked gasolines.

Klopffestigkeit.

22. WILKE W.: Untersuchungen am Hesselman-Motor. Automob.-techn. Z. 41, 25 (1938).
23. WILKE W.: 18. Jahrbuch der Brennkrafttechnischen Gesellschaft, S. 18. Halle a. d. S., W. Knapp. 1938.
24. v. PHILIPPOVICH A.: Angew. Chem. 49, 625 (1936). Der Verbrennungsvorgang im Explosionsmotor.
25. GIESSMANN, W.: Z. VDI 80, 833 (1936). Die Klopffestigkeit der Leichtkraftstoffe.

Flüchtigkeit.

26. BLAIR, M. G. and R. C. ALDEN: Significance of ASTM Distillation Curves. Ind. Engng. Chem. 25, 559 (1933).
27. EISINGER, J. O. and D. P. BARNARD: A forgotten property of gasoline. S. A. E. J. 37, 293 (1935).
28. BROWN, G. G.: Motor Fuel Volatility. Ind. Engng. Chem. 22, 278 (1930) (m. E. M. SKINNER 649, 653, 672).

Harzbildung.

29. CONRAD C.: Lagerbeständigkeit von Kraftstoffen. Öl u. Kohle 11, 728 (1935).
30. DREYER, C. O. LOWRY, EGLOFF u. J. C. MORELL: J. Ind. Engng. Chem. 27, 315 (1935).
31. EGLOFF, G., MORELL, J. C. u. Mitarb.: Ind. Engng. Chem. 24, 1375 (1932); 25, 315, 804 (1935).
32. EGLOFF, G., MORELL, J. C. u. Mitarb.: Ind. Engng. Chem. 26, 497, 885 (1934); 28, 465 (1936).

Flüssige Kraftstoffe für Diesel-Motoren.**Filtrierbarkeit.**

33. A. HAGEMANN u. T. HAMMERICH: Neuzeitliche Prüfung von Kraftstoffen für den schnellaufenden Dieselmotor. Öl u. Kohle 12, 371 (1936).

Zündverhalten.

34. HILL, J. B. and H. B. COATS: Ind. Engng. Chem. 20, 641 (1928). The Viscosity-Gravity constant of petroleum lubricating oils.
35. MOORE C. C. and G. R. KAYE: Oil a. Gas J. 15. XI. 1934, S. 108. Entzündungseigenschaften von Dieseltreibölen.
36. BECHER A. E. and H. G. M. FISCHER: A suggested index of Diesel fuel performance. S. A. E. J. 35, 376 (1934).
37. Oil & Gas J. 35, H. 44, 16. (21. III. 1935).
38. MARDER, M.: Über die Bestimmung analytischer Daten von Mineralölen auf Grund aräometrischer Messungen. Öl u. Kohle 12, 1061 (1936).
39. BOERLAGE, G. D. u. J. J. BROEZE: J. Ind. Engng. Chem. 28, 1229 (1936). Combustion Qualities of diesel fuel.
40. NEUMANN, K.: Angew. Chem. 50, 225 (1937). Die Verbrennung in der Dieselmachine.
41. BOERLAGE, G. D. and J. J. BROEZE in Science of Petroleum, 2486: Light Diesel Fuels.
42. BOERLAGE, G. D. and J. BROEZE in Science of Petroleum, 2894: Combustion Research in Compression Ignition Engines.
43. L. J. Le Mesurier in Science of Petroleum, 2495: Diesel Fuel.
44. FOORD, F. A.: Ignition Temperatures of Fuels. J. Inst. Petr. Techn. 18, 533 (1932).
45. JENTZSCH H.: Die Selbstentzündung von Ölen und Brennstoffen. Z. VDI 68, 1150 (1924).

Anforderungen an Dieselkraftstoffe.

46. HUBNER, W. H. u. G. B. MURPHY: Nat. Petr. News 27, Nr. 33, 24/33 (1935).

Schmierstoffe.**Schmierfähigkeit.**

47. Science of Petroleum. Section 40, Abschnitt Lubricants, S. 2558—2678.
48. WOOD, P.: Contribution à l'Étude du Graissage. Paris: Delagrave. 1926.
49. BOERLAGE, G. D.: Engineering 186, 46 (1933). Four-ball testing apparatus for extreme pressure lubricants.
50. WOLF, H. R.: Proc. Amer. Petr. Inst. 1936, 17. Teil, III, 30. Increasingly Powerful E. P. lubricants needed for automotive rear axles.
51. THOMA: Mitt. d. hydraul. Inst. d. Techn. Hochsch. München, Heft 3, 145 (1929); Voitländer 4, 94 (1931).

Zähigkeit.

52. WALTHER, C.: Kennzeichnung der Schmieröle durch die Viskositäts-Polhöhe. Welt Petr. Kongress, Bd. II, 419 (1933).
53. DEAN, G. H. and E. W. DAVIS: Chem. metallurg. Engng. **86**, 618 (1929).
54. DEAN, G. H. and E. W. DAVIS: J. Inst. Petr. Techn. **18**, 212 A (1932). Viscosity Index and lubricating problems.
- 54a. DOCKSEY, P., C. H. HANDS and W. A. HAYWARD: I. P. T. **20**, 248 (1934).
55. VOGEL, H.: Erdöl u. Teer **3**, 33 (1928). Das Verhalten von Ölen beim Erstarren und Schmelzen.
56. ERK S.: Schmieröle bei tiefen Temperaturen. Z. VDI **76**, 33 (1932); Physik. Z. **88**, 449 (1937).
57. JORDACHESCU, M.: Annal Off. Nat. Combst. Liqu. **12**, 511, 735 (1937).

Beständigkeit.

58. PHILIPPOVICH, A. v.: Die Verwendung von Flugmotorenöl im Betrieb und ihre Prüfung. Öl u. Kohle **13** (1935, 1937).
59. GRUSE, W. A. and C. J. LIVINGSTONE: Engine Deposits; Causes and Effects, Symposium on Lubricants 1937, ASTM Philadelphia, Pa. S. 1.
60. MOUTTE, DIXMIER und LION, v. PHILIPPOVICH, MOERBEEK, HANSON und EGERTON: General Discussion on Lubrication and Lubricants: Gruppe IV, The Institution of Mechanical Engineers London 1937.
61. BRIDGEMAN, O. C.: S. A. E. J. **41**, 545 (1937). The problem of ring sticking in aviation engines.
62. CONRADSON: ASTM D 189—30.
63. RAMSBOTTOM: I. P. T. Standard Methode G. O. 9a. London 1929.

Auswahl der Schmieröle.

64. CHAMPSAUR: Le graissage, Paris, Delagrave 1934.

Zusätze zu den Betriebsstoffen.

Gegenklopfmittel.

65. BANKS, F. R.: Ethyl, J. Roy. aeron. Soc. **83**, 309 (1934).
66. MIDGLEY, F. and T. A. BOYD: Ind. Engng. Chem. **14**, 894 (1922).
67. CALINGAERT, G. in The Science of Petroleum, 3042: Antiknock Comp.

Hemmstoffe.

68. MARDLES, E. W. J. in The Science of Petroleum, 3033: Oxydants and antioxydants in the Petr. Ind.
69. MAVERICK, G. M. and R. G. SLOANE: Addition Agents for Motor Oils. Symposium on Lubricants ASTM, S. 53. Philadelphia 1937.

Zweitakt-Dieselmotoren kleinerer und mittlerer Leistung. Von Ing. Dr. techn. J. Zeman VDI, Wien. Mit 240 Abbildungen im Text. XI, 245 Seiten. 1935. (Verlag von Julius Springer - Wien.) RM 18.—; gebunden RM 20.—

Schnellaufende Dieselmotoren. Beschreibungen, Erfahrungen, Berechnung, Konstruktion und Betrieb. Von Marinebaurat a. D. Professor Dr.-Ing. O. Föppl, Braunschweig, Oberingenieur Dr.-Ing. H. Strombeck, Leunawerke und Professor Dr. techn. L. Ebermann, Lemberg. Vierte, neubearbeitete Auflage. Mit 143 Textabbildungen und 9 Tafeln, darunter Zusammenstellungen von Maschinen von AEG, Benz, Českomoravská-Kolben-Daněk A.-G., Daimler, Deutz, Germaniaerfert, Körting, L. Lang und MAN Augsburg. VI, 237 Seiten. 1929. Gebunden RM 14.85

Dieselmotoren in der Elektrizitätswirtschaft insbesondere für Spitzendeckung. Von M. Gereke, Augsburg. Mit 19 Textabbildungen. IV, 92 Seiten. 1932. RM 6.—

Der Bau des Dieselmotors. Von Professor Ing. Kamillo Körner, Prag. Zweite, wesentlich vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 744 Abbildungen im Text und auf 8 Tafeln. VI, 531 Seiten. 1927. Gebunden RM 66.15

Kompressorlose Dieselmotoren und Semidieselmotoren. Von M. Seiliger, Ingenieur-Technolog. Mit 340 Abbildungen und 50 Zahlentafeln im Text. VI, 296 Seiten. 1929. Gebunden RM 33.75

Schnellaufende Verbrennungsmotoren. Von Harry R. Ricardo. Zweite, verbesserte Auflage, übersetzt und bearbeitet von Dr. A. Werner und Dipl.-Ing. P. Friedmann. Mit 347 Textabbildungen. VIII, 447 Seiten. 1932. Gebunden RM 30.—

Die Brennkraftmaschinen. Arbeitsverfahren, Brennstoffe, Detonation, Verbrennung, Wirkungsgrad, Maschinenuntersuchungen. Von D. R. Pye. Übersetzt und bearbeitet von Dr.-Ing. F. Wettstädt. Mit 77 Textabbildungen und 39 Zahlentafeln. VII, 262 Seiten. 1933. Gebunden RM 15.—

Der Verbrennungsvorgang im Gas- und Vergaser-Motor. Versuch einer rechnerischen Erfassung der einzelnen Einflüsse und ihres Zusammenwirkens. Von Dr.-Ing. Wilhelm Endres. Mit 29 Textabbildungen. V, 80 Seiten. 1928. RM 6.12

Das Versuchs- und Meßwesen auf dem Gebiet des Kraftfahrzeugs. Von Professor Dr.-Ing. W. Kamm und Dr.-Ing. C. Schmid, Stuttgart. Mit 646 Textabbildungen. VIII, 312 Seiten. 1938. Gebunden RM 49.80

Das Kraftfahrzeug. Betriebsgrundlagen, Berechnung, Gestaltung und Versuch. Von Professor Dr.-Ing. W. Kamm, Stuttgart. Unter Mitarbeit von O. Hoffmeister, L. Huber, P. Riekert, C. Schmid und P. Schmid. Mit 484 Textabbildungen. XII, 237 Seiten. 1936. Gebunden RM 29.70

Einführung in die technische Thermodynamik. Von Professor Dr.-Ing. Ernst Schmidt, Danzig. Mit 182 Abbildungen im Text und 2 Dampftafeln. VIII, 314 Seiten. 1936. Gebunden RM 15.—

Hochleistungs-Gaserzeuger für Fahrzeugbetrieb und ortsfeste Kleinanlagen. Verhalten der Brennstoffe und des Gases, Berechnung und Aufbau der Gaserzeuger und Reinigungsanlagen, Wirtschaftliche Betrachtungen. Von Dipl.-Ing. H. Finkbeiner, Darmstadt. Mit 63 Abbildungen. IV, 99 Seiten. 1937. RM 9.—; gebunden RM 10.20

Bau und Berechnung der Verbrennungskraftmaschinen. Von Professor Otto Kraemer, Karlsruhe. Mit 179 Abbildungen. IV, 174 Seiten. 1937. RM 6.90

Spezifische Wärme, Enthalpie, Entropie und Dissoziation technischer Gase. Von Dozent Dr. phil. habil. E. Justi, Berlin. Mit 43 Abbildungen im Text und 116 Tabellen. VI, 157 Seiten. 1938. RM 18.—; gebunden RM 19.80

W-Tafel, Tabellen und Diagramme zur thermischen Berechnung der Verbrennungskraftmaschinen. Von Dozent Dr.-Ing. habil. O. Lutz, Braunschweig. Mit 20 Textabbildungen und 3 Tafeln. VI, 68 Seiten. 1932. RM 8.50

W-Tafel für Luft und Verbrennungsgase. Von Dozent Dr.-Ing. habil. O. Lutz und Dipl.-Ing. F. Wolf, Braunschweig. Mit 4 Abbildungen und 5 Kurventafeln im Text sowie einer zweifarbigen Tafel. 14 Seiten. 1938. RM 3.—

Ruhrkohlen-Handbuch. Ein Hilfsbuch für den industriellen Verbraucher von festen Brennstoffen des Ruhr-, Aachener und Saarbergbaues. Herausgegeben vom Rheinisch-Westfälischen Kohlen-Syndikat. Dritte, erweiterte Auflage. Mit 101 Abbildungen im Text und 51 Tafeln. 313 Seiten. 1937. Gebunden RM 4.50

Holzgasgeneratoren. Gesamtbericht des Ausschusses „Holz als Treibstoff“ über die I. Vergleichsprüfung für ortsfeste Holzgasgeneratoren. (ÖKW-Veröffentlichungen, Band 20.) Mit 88 Abbildungen (Diagrammen, Schnittzeichnungen, Lichtbildern) und 30 Zahlentafeln im Text und auf 17 Blättern. 1937. (Verlag von Julius Springer-Wien.) RM 5.—

Ersatztreibstoffe im Motorbetrieb. Vortrag gehalten am 13. Dezember 1935 auf der IX. Vollversammlung des Österreichischen Kuratoriums für Wirtschaftlichkeit. Von Prof. Dr. Paul Schläpfer, Zürich. (ÖKW-Veröffentlichungen, Band 15.) Mit 22 Figuren und 5 Tabellen. III, 24 Seiten. 1936. (Verlag von Julius Springer-Wien.) RM 2.—

Gesamtbericht über die Erste Internationale Alpenwertungsfahrt für Kraftfahrzeuge mit Ersatzbrennstoffen. (ÖKW-Veröffentlichungen, Band 16.) Mit 61 Abbildungen, 24 Diagrammen, 15 Tabellen und einer Karte. 107 Seiten. 1936. (Verlag von Julius Springer-Wien.) RM 10.—
