

Probleme der Verbrennung

Grundsätzliche Möglichkeiten für die Beurteilung des Verbrennungs-
verhaltens der Otto-Kraftstoffe
von Alexander von Philippovich

Die Messung des Klopfverhaltens adiabatisch komprimierter Treibstoff-
Luft-Mischungen in Motor und Prüfgerät; Beiträge zu einer einheitlichen
Bewertung von Kraftstoff und Motor
von Hermann Teichmann

Einige Wünsche der Kraftstoffhersteller an den Flugmotor
von Karl Dehn

Grundsätzliche Untersuchungen über den Zündvorgang von Kraftstoffen
von Fritz A. F. Schmidt

Untersuchung der Selbstzündung adiabatisch verdichteter
Kraftstoff-Luft-Gemische
von Max Scheuermeyer

Flammen- und Schlierenaufnahmen der Verbrennung in Rohren
von Ernst Schmidt, H. Steinicke und U. Neubert

Versuche über die langsame Oxydation einiger Olefine und Ketone und
den Einfluß von Blei auf die Kohlenwasserstoffoxydation
von Ludwig von Müffling

Zur Berechnung der Dissoziationsgleichgewichte in Verbrennungsgasen
von Gerhard Damköhler und Rudolf Edse

VORTRÄGE

gehalten auf der Arbeitstagung
am 3. Dezember 1942
Sitzungsperiode 1942/43

Einführung

E. Schmidt: Ich eröffne die Arbeitstagung der Arbeitsgruppe für Verbrennungsfragen und heiße Sie im Namen der Akademie herzlich willkommen. Wie Sie aus dem Programm ersieht, behandelt die Tagung die Probleme der Verbrennung zunächst in ihren unmittelbaren Beziehungen zum Motor. Es werden die Möglichkeiten der Beurteilung des Verbrennungsverhaltens von Kraftstoffen und die Wünsche der Kraftstoffhersteller für den Flugmotor besprochen werden. Dann folgen einige Vorträge, die sich auf Messungen und Arbeiten beziehen, bei denen die Versuche sozusagen am vereinfachten Modell, in Bomben und ähnlichen Dingen vorgenommen werden. Weiter folgen Vorträge über Flammenaufnahmen im Eigenlicht der Verbrennung und bei Schlierenbeleuchtung, über die Reaktionskinetik der Verbrennung sowie über die Bestimmungen von Dissoziationsgleichgewichten. Ich gebe als erstem Vortragenden Herrn von Philippovich das Wort.

Grundsätzliche Möglichkeiten für die Beurteilung des Verbrennungsverhaltens der Otto-Kraftstoffe

Von Alexander von Philippovich

1. Sinn von Untersuchungen

Man führt Untersuchungen von Stoffen zu technischen Zwecken ganz allgemein durch, um die Eignung für eine bestimmte Verwendung zu prüfen, um die Gleichmäßigkeit zu überwachen oder um die beabsichtigte Änderung von Eigenschaften bei Forschung und Entwicklung zu verfolgen. Der Zweck einer Untersuchung beeinflußt die Untersuchungsweise, weil verschiedene Prüfweisen den beabsichtigten Zwecken auch verschieden angemessen sind. Dementsprechend muß man bei Prüfverfahren besonders zwischen Anwendungs(Eignungs-)test und Eigenschaftstest unterscheiden.

Hersteller und Verbraucher haben ein verschiedenes Interesse an der Untersuchungsweise: Der Hersteller will Untersuchungsverfahren, die ihm freie Wahl der wirtschaftlich günstigsten Rohstoffe und Herstellungsverfahren sichern, die Stoffe also nicht in ihren Eigenschaften allzu sehr festlegen, die z.T. nur lockere Beziehungen zur Praxis aufweisen; er ist also für den Anwendungs(Eignungs-)test. Demgegenüber will der Verbraucher gerade die Festlegung der Stoffeigenschaften, um Schwankungen der Qualität und damit Störungen des Betriebs zu vermeiden, weil er nur in der Gleichmäßigkeit der Lieferung auf Grund von Eigenschaftsforderungen die Gewähr für gleichmäßiges Verhalten der Stoffe zu besitzen glaubt. Hätte man einwandfreie Untersuchungsverfahren, so wäre dieser Widerstreit behoben; solche Verfahren müssen entweder auf Grund von Anwendungs-(Eignungs-) oder von Eigenschaftsprüfungen eine Beurteilung gestatten.

2. Anforderungen an ein Prüfverfahren

Ein brauchbares Prüfverfahren muß folgende Anforderungen erfüllen:

1. Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse, ausdrückbar in einem zahlenmäßigen Wert,
2. Einfachheit,
3. geringe Zeitdauer,
4. geringe Stoffmenge.

3. Möglichkeiten zur Prüfung des Verbrennungsverhaltens

Unter Verbrennungsverhalten kann man vielerlei verstehen: Beim Otto-Motor bezeichnet man damit meist das verbrennungsmäßig bestimmte Kurzzeitverhalten, insbesondere das Klopfen. Im Gegensatz dazu umfaßt das Dauerverhalten Ringstecken, Rückstandsbildung und Ventilkorrosion sowie Angriff des Kolbenmaterials. Beim luftgekühlten Motor ist der Unterschied zwischen Kurzzeitverhalten und Dauerverhalten weniger ausgeprägt als beim wassergekühlten. Hier soll nur das Kurzzeitverhalten, und zwar das Klopfen besprochen werden.

Das Klopfen ist als chemische Reaktion durch die Natur der Kraftstoffe und durch die herrschenden Reaktions- bzw. Betriebsbedingungen bestimmt. Kennt man also beide genau, so müßte sich der Klopfvorgang eindeutig erfassen lassen, ohne daß man besondere Motorversuche durchführt; andererseits wird man mehr oder weniger starke Streuungen oder Abweichungen der theoretischen von den wirklichen Ergebnissen bekommen. Es ist deshalb die Frage, ob diese Voraussetzung erfüllt ist oder nicht.

Was die Natur der Kraftstoffe anbelangt, so muß man die Eigenschaften unterteilen in reine Stoffeigenschaften (Materialkonstanten) und in solche, die komplexer Natur sind. Beispiele für die ersten sind spezifisches Gewicht, Refraktion, Molekulargewicht, spez. Wärme, Verdampfungswärme, Zähigkeit, Oberflächenspannung, Dipolmomente usw., während als komplexe Eigenschaften die Flüchtigkeit, das Kaltverhalten, die Selbstzündungseigenschaften, die Oxydierbarkeit usw. bezeichnet werden können. Die ersten sind die einzigen Eigenschaften, die man als Konstanten bezeichnen kann, weil ihre Werte vom Versuchsgerät unabhängig sind. Dagegen haben Zahlenwerte für die komplexen Eigenschaften nur einen Sinn, wenn man das Versuchsgerät mitnennt — und gerade diese Eigenschaften sind es, die praktisch die größte Bedeutung besitzen. Überdies sind die Kraftstoffe stets Gemische verschiedener Be-

standteile, so daß die Konstanten den arithmetischen Mittelwert der Einzeleigenschaften darstellen; man kann solche additiven Eigenschaften auch als integrale bezeichnen. Im Gegensatz hierzu gibt es im komplexen Verhalten, besonders bei der Selbstzündung, der Schmierung und der Korrosion Eigenschaften, die man nur als differentielle bezeichnen kann, weil sie im Gesamtgemisch auch dann merklich werden, wenn nur ein ganz kleiner Bestandteil sie aufweist.

Die Charakteristik der Kraftstoffe wird also aus zwei verschiedenen genauen Gruppen bestehen: der exakten Messung meist physikalischer Werte sowie der weniger genauen Bestimmung komplexer (mehr chemischer) Eigenschaften. Es ist gut, sich dabei zu erinnern, daß auch eine weitgehende Übereinstimmung physikalischer Daten keine Gewähr für chemisch gleiches Verhalten gibt, wie die folgende Gegenüberstellung von Langmuir (zitiert nach Schlenk und Bergmann, Lehrbuch der org. Chemie, Wien und Leipzig, Franz Deuticke, 1932, S. 369) zeigt (Abbildung 1). Dieses Beispiel betrifft allerdings einen extremen Fall, soll aber davor warnen, mit der Auswertung rein physikalischer Kenn-daten zu unvorsichtig zu sein.

Eigenschaft	Stickstoff (N ₂)	Kohlenoxyd
Molekulargewicht	28.0	28.0
Gasdichte (O ₂ = 1)	0.8751	0.8749
Flüssigkeitsdichte bei Siedepunkt	0.796	0.793
spez. Wärme C _p bei 20° C	0.250	0.250
Schmelzpunkt	— 210° C	— 207° C
Siedepunkt	— 195° C	— 190° C
Krit. Druck (Atm)	33.5	34.6
Krit. abs. Temperatur	127°	134°
Wärmeleitfähigkeit bei 0° C	56 × 10 ⁻⁶	53 × 10 ⁻⁶

Abb. 1

Eigenschaften von Kohlenoxyd und Stickstoff

Die Prüfung von Eigenschaften zur Erfassung der Klopfestigkeit ist schon vielfach vorgenommen worden. Es sei nur an die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung (Aromatengehalt), an die Beziehung: mittlere Siedetemperatur: spezifisches Gewicht (Glüezahl von Mücklich und Conrad) und an den Parachor (Marder) erinnert. Bei diesen Beziehungen sind stets solche Eigenschaften verwendet worden, die integraler

Natur sind. Da aber das Klopfen durch differentiale Bestandteile wesentlich beeinflusst wird, kann natürlich keine Übereinstimmung erwartet werden. Deshalb waren solche Verfahren aussichtsreicher, die die wesentlich komplexe Eigenschaft oder richtiger das komplexe Verhalten des Kraftstoffs zu erfassen versuchten, das sich bei der motorischen Verbrennung auswirkt, weil es ja auch differentielle Eigenschaften enthüllt. Die in Frage kommende Eigenschaft ist die Selbstzündung, aber auch nicht als einfache Temperaturfunktion, sondern als eine Temperatur-Zeit-bzw. Konzentrationsfunktion. So sind Zündverzugsmessungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt worden (z. B. Jost und Teichmann), wurde die Selbstzündungstemperatur und der Druckanstieg in der Bombe gemessen (Brown und Watkins), die Temperatur und die Sauerstoffkonzentration bestimmt (Jentzsch), ohne daß bisher eine befriedigende Übereinstimmung von Laboratoriumsversuch und Motor erhalten worden wäre. Am klarsten hat wohl Jentzsch seinerzeit die Forderung ausgesprochen, die Motoren auf ihren Verdichtungsdruck auszumessen und damit eine Charakteristik des Motors zu erreichen. Seine Gleichsetzung Sauerstoffblasenzahl = Konzentration = Druck ist allerdings willkürlich und dadurch sowie durch unbeherrschbare Apparateneinflüsse wurde die Brauchbarkeit seines bestehend einfachen Geräts für die laufende Abnahme von Kraftstoffen zunichte. Von allen Verfahren dieser Art versprechen jene am meisten, die den motorisch wichtigen Vorgang am eindeutigsten nachahmen. Da dieser offenbar in einer adiabatischen Selbstzündung des unverbrannten Restgases besteht, sind Verfahren zur adiabatischen Zündung von Kraftstoffen in geeigneten Apparaturen am aussichtsreichsten. Vom Institut für Betriebsstoff-Forschung (DVL) wurde aus diesem Grunde schon seit langer Zeit in Zusammenarbeit mit den Herren Jost und Teichmann versucht, durch Vergleich motorischer Ergebnisse mit dem derart bestimmten Zündverhalten zu einer Klopfcharakteristik der Kraftstoffe zu gelangen. Leider hat der Krieg die Arbeiten abgebrochen, so daß sie erst mit starker Verzögerung jetzt wieder aufgenommen werden können.

Die bald erkannte Unmöglichkeit, mittels einfacher Laboratoriumsverfahren zu einer für die Praxis brauchbaren Genauigkeit der Klopfmessung zu gelangen, führte schon 1917 Ricardo dazu, die motorische Prüfung für diesen Zweck heranzuziehen. Wie sich der CFR-Motor später aus den ersten Prüfmotoren entwickelte und die Messung der Oktanzahl als gewissermaßen objektiver (d. h. von Motorbedingungen unabhän-

ziger) Wert ab danken mußte, um als einfacher konventioneller Wert ein bescheideneres, aber immer noch geachtetes Dasein zu führen, wurde öfters mitgeteilt. Der Wunsch nach einer dem Flugmotor näherstehenden Kraftstoffcharakteristik führte in USA zur Anwendung der mittleren Verbrennungstemperatur als Maß, obwohl dies ein Fehlgriff war. Denn die Temperatur des Zylinderkopfes ist mehr ein Maß des Dauer- verhaltens der Kraftstoffe als des Kurzzeitverhaltens. Tatsächlich wurden die Amerikaner durch diese Meß- weise von der Herstellung der Aro- maten auf die Herstellung der Iso- paraffine abgedrängt. Besser be- währte sich die Überladeprüfung im CFR-Motor, bei der gleich die starke Überlegenheit der Aromaten zum Ausdruck kam. Aber der Versuch, diese Prüfung auf die Prüfung von Kraftstoffen für den Flugmotor zu übertragen, scheiterte wegen ungenü- gender Übereinstimmung. Somit blieb nur die Untersuchung im Flugmo- toreinzylinder übrig, die auch 1937

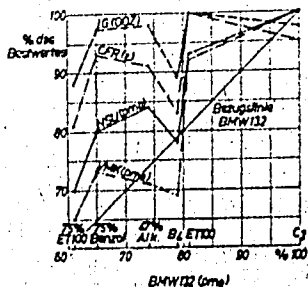


Abb. 2

Klopffwerte von 6 Kraftstoffen in ver- schiedenen Motoren

in der DVL für den vom RLM (Herrn Mücklich) eingeführten BMW-132- Einzylinder-Motor ausgearbeitet wurde. Der Versuch, die gleichen Ergeb- nisse in Kleinmotoren zu erhalten, war bisher wenig erfolgreich. Die Abbildung 2 zeigt die Klopf- werte von sechs typischen Kraftstoffen in einer Reihe von Motoren. Und zwar ist nicht nur die Reihenfolge der Be- wertung z. T. eine andere, son- dern es wird auch die Blei- empfindlichkeit der Kraftstoffe, vor allem der Aromaten wohl infolge der verschiedenen Dreh- zahlen und Temperaturen, unter Umständen anders beurteilt als

Erhöhung der Klopfestigkeit

von 75% VHT 302 + 25% VT 702 durch 0,2% BTA-Zusatz ($\alpha=1,1$)

Motor	Prozent	Meßgrößen
BMW	157	p/mg
VMK	148	"
NSU	50	"
CFR	45	t
IG	5	s (002)

Abb. 3

Bleiempfindlichkeit eines vorwiegend aromatischen Kraftstoffes

im 132-Motor (Abbildung 3). Für die verschiedensten Kraftstoffe scheint Versuchsmotor K mit Überladung, für gebleite Kraftstoffe üblicher Art der I. G.-Motor mit O. O. Z.-Verfahren geeignet zu sein.

In verschiedenen Flugmotoreinzylindern wurde aber ebenfalls keine vollständige Übereinstimmung erzielt, wenn Motoren sehr verschiedener Größe, Verdichtung und Ventilüberschneidung verglichen wurden.

Es ergibt sich also, daß bisher weder die Laboratoriumsverfahren noch die Motorprüfung in kleinen oder selbst in großen Motoren in der Lage sind, ohne weiteres allgemeingültige Aussagen über das Klopfverhalten von Kraftstoffen zu machen. Der Grund dafür ist einfach, daß die Bedingungen, unter denen die Kraftstoffe verbrennen, zu sehr voneinander abweichen bzw. daß die laboratoriumsmäßig bestimmten Stoffwerte in einem zu losen Zusammenhang mit dem Verbrennungsverhalten stehen. Für die Laboratoriumswerte ist das leicht verständlich; die einzige Ausnahme machen die Versuche mit adiabatischer Verdichtung; die deshalb auch am aussichtsreichsten erscheinen. — Anders ist es mit den Motorversuchen. Die Unterschiede, die sich hierbei ergeben, sind durch die motorischen Verschiedenheiten bedingt, auf die kurz eingegangen werden soll.

<i>allgemeingültige Einflüsse</i>	<i>besondere Einflüsse</i>
<i>Verdichtungsverhältnis</i>	<i>Drehzahl</i>
<i>Ladeflößtemperatur</i>	<i>Gestaltung von Ansaug- und Auspuffleitung</i>
<i>Ventilüberschneidung</i>	<i>Gemischbildung</i>
<i>Auspuffgedruck</i>	
<i>Zündung</i>	
<i>Kühlmittemperatur</i>	
<i>Zylindervolumen</i>	

Abb. 4

Einflüsse auf das Klopfverhalten

Die wesentlichsten Einflüsse bei der adiabatischen Selbstzündung, die im Motor das Klopfen auslöst, sind Druck, Temperatur und Dauer.

Eine Übersicht der Motoreinflüsse, die diese Größe verändern, zeigt Abbildung 4. Wesentlich sind für die Beurteilung der Kraftstoffe auf ihr Klopfverhalten besonders jene Einflüsse, die eine

Umkehr oder Änderung der Bewertungsreihenfolge bewirken. Dementsprechend ist deshalb auch beim Vergleich von Motoren verschiedener Bauart oder von Einzylinder und Vollmotor ein Unterschied in der absoluten Höhe, z. B. der zulässigen Aufladung, weniger wichtig als eine solche Änderung in der Reihenfolge der Bewertung.

1. Allgemeine Lösung der Klopfmessung

Es ist zweifellos nicht möglich, auf die Dauer eine allgemeine Lösung dadurch zu erreichen, daß man bei einer Laboratoriums- oder Motorprüfung beharrt, ohne den jeweiligen Zustand des gerade in Frage kommenden Motors zu berücksichtigen, sondern man müßte eine exakte Stoffcharakteristik als Grundlage besitzen und diese für die gesamten Betriebsbedingungen des in Frage kommenden Motors auswerten. Als vollkommene Stoffcharakteristik muß man bei dem heutigen Stand unserer Kenntnisse einwandfreie Unterlagen über die adiabatische Selbstzündung bezeichnen; daß aber darüber hinaus noch eine Reihe anderer Kraftstoffeigenschaften die Verbrennung beeinflussen, ist klar. So wird die Art des Siedeverhaltens und die spez. bzw. Verdampfungswärme sehr wesentlich zum Ausdruck kommen. Immerhin kann man in grober Annäherung auch ohne deren Berücksichtigung durch die Selbstzündungsmessung eine befriedigende Charakteristik des Klopfverhaltens erwarten.

Als einwandfreie Unterlagen der adiabatischen Selbstzündung sind solche zu bezeichnen, die unter den Druck-, Temperatur- und Zeitbedingungen des Motors erhalten werden. Ergebnisse solcher Messungen in verschiedenen Apparaturen müßten voraussetzungsgemäß übereinstimmen, ja es erscheint geradezu notwendig, die Ergebnisse der einen Apparatur mit jenen einer anderen Apparatur zu vergleichen, um die Gewähr zu besitzen, daß nicht doch zufällige Einflüsse im Meßwert in Erscheinung treten. Messungen dieser Art müssen zum Klopfen in Beziehung gesetzt werden können. — Während die für das Klopfen maßgebende Reaktion eine reine Gasreaktion sein dürfte, ist die Glühzündung als heterogene Reaktion etwas ganz anderes und soll in diesem Zusammenhang nicht besprochen werden. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden zeigt sich schon darin, daß meist mit steigender Drehzahl das Klopfen abnimmt, während die Glühzündung stärker wird; Ursache ist wohl, daß der Füllungsgrad und die verfügbare Reaktionszeit für das Einsetzen der adiabatischen Selbstzündung immer weniger ausreichen, während die Wandtemperaturen wegen der größeren je Zeiteinheit umgesetzten Energiemengen ansteigen. Für die Berechnung der Selbstzündung gibt es eine Reihe von Formeln, von denen der Übersicht halber mit den zur Rechnung erforderlichen Meßgrößen in Abbildung 5 einige zusammengestellt sind.

Die Bedingungen, die eine Zündverzugsmessung erfüllen muß, um für den Motor gültige Aussagen zu machen, sind ungefähr: Drücke von 40

chemisch		motorisch	
Formel	benötigte Kochwerte	Formel	benötigte Kochwerte
Jost:		Flumb, Egerton:	
$\tau = A \cdot e^{E/RT}$	ΔE	$F = \gamma P_j r (P - P_0) dt$	γ, P, P_0, r, t
F.A.F. Schmidt:		Rollrock:	
$\tau = \frac{K \cdot e^{E/RT}}{P^n}$	K, E, n	$K_{gr} \frac{f \cdot D}{T_1} \left(1 + \frac{H}{C_v T_1 C E}\right)^2$	P_1
Todes:			
$\tau = \frac{e^{E/RT_0} RT_0^2 \cdot C_x}{k E Q}$	E, k, Q		

Abb. 5
Verschiedene Ansätze zur Ermittlung des Klopfverhaltens

bis 100 at, absolute Temperaturen zwischen etwa 600 und 1000 K sowie Versuchszeiten um 0,005 Sekunden und weniger, außerdem aber Abmessungen, die denen des Motors entsprechen. Diese Forderungen werden von den Apparaten von F. A. F. Schmidt und von Teichmann erfüllt, auf die in folgenden Vorträgen noch genauer eingegangen wird. Die Auswertung dieser Ergebnisse für den Motor setzt voraus, daß man Druck,

absolute Werte	komplexe Werte	komplexes Verhalten
Hub Bohrung Verdichtung Ladedruck Ladelufttemperatur Zündung	Verbrennungshöchstdruck Spitztemperatur effektiver Mitteldruck	Klopfverhalten Temperaturabhängigkeit Minimallage der Klopf- grenzkurve Gemischaußerleistung Wärmeübergang

Abb. 6
Motorcharakteristik

Temperatur und Reaktionszeit im Motor kennt. Die Zeiten ergeben sich ohne weiteres aus den Drehzahlen und der Zündstellung. Der Druck ist aus Diagrammen abzulesen, die Temperatur kann man aus der Temperatur der Ansaugluft und den Motorbedingungen abschätzen. Es ist also notwendig, die Motoren in dieser Richtung auszumessen. Allerdings ist das nicht ganz einfach. Der erste Schritt dazu ist wohl die Untersuchung von Einsylindermotoren, weil es schwer ist, Vollmotoren unter all den verschiedenen Bedingungen zu untersuchen.

Die Möglichkeiten der Motorearakteristik zeigt Abbildung 6. Die absoluten Werte sagen nicht genügend aus, wohl weil die Wirbelung und damit der Wärmeübergang, vielleicht auch der Einfluß von Restgasen, die Stellung der Zündkerzen usw. zu große Bedeutung besitzen. Verbrennungshöchst- und Spitzentemperatur sind bisher wegen Meßschwie-

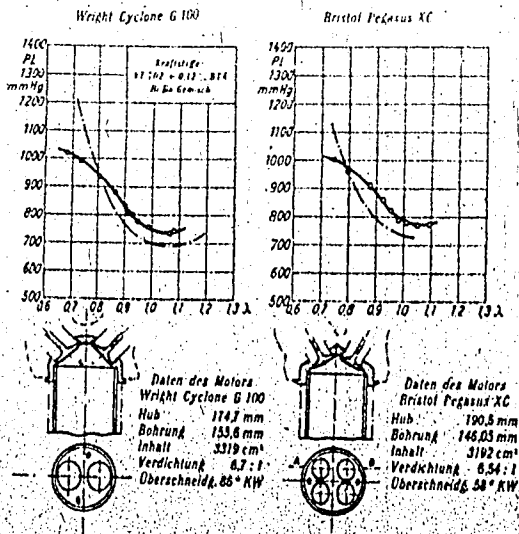


Abb. 7

Ähnliche Klopfgrenzkurven konstruktiv verschiedener Motoren bei gleichen Prüfbedingungen

rigkeiten nicht für diesen Zweck herausgezogen worden. Das komplexe Verhalten soll kurz besprochen werden. Man kann versuchen, es qualitativ und quantitativ für die Charakteristik zu verwenden. Qualitativ sind die folgenden Einzylinderversuche zu bewerten, bei denen Kraftstoffe typischer Art verglichen wurden.

Abbildung 7 zeigt den ähnlichen Verlauf der Klopfgrenzkurven zweier konstruktiv verschiedener Motoren. Abbildung 8 veranschaulicht die sehr verschiedene Lage der Klopfgrenzkurve in zwei konstruktiv äh-

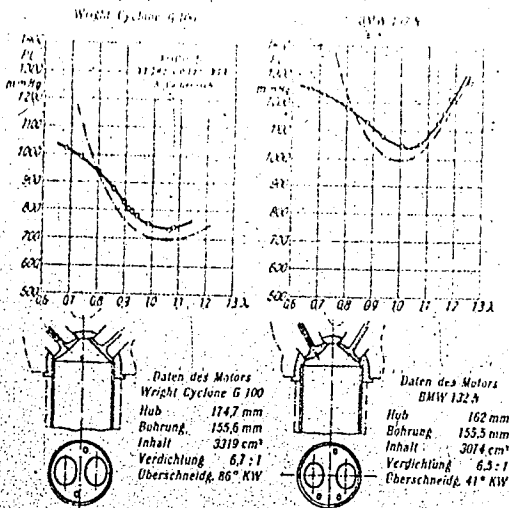


Abb. 8

Verschiedene Klopfgrenzkurven konstruktiv ähnlicher Motoren bei gleichen Prüfbedingungen

lichen Motoren, die durch den verschiedenen Wärmezustand verursacht wurde. Zur Charakteristik des Wärmezustands der Motoren kann man zu einem gewissen Grad auch die Steilheit der Klopfgrenzkurve verwenden, wie Abbildung 9 zeigt.

Außer in der steileren Klopfgrenzkurve zeigt sich die thermische Belastung auch in der stärkeren Erniedrigung des Klopfminimums bei einer bestimmten Erhöhung der Ladelufttemperatur. Auch die Gemischaufbereitung läßt sich zu einem gewissen Grad aus der Änderung des Klopfminimums mit der Temperatur ersuchen, wie die Versuche von Franke zeigen (Abbildung 10 und 11).

Quantitativ sollte die Charakteristik dadurch erreicht werden, daß eine konstante Steilheit der Kurve durch die richtige Mischung eines tempe-

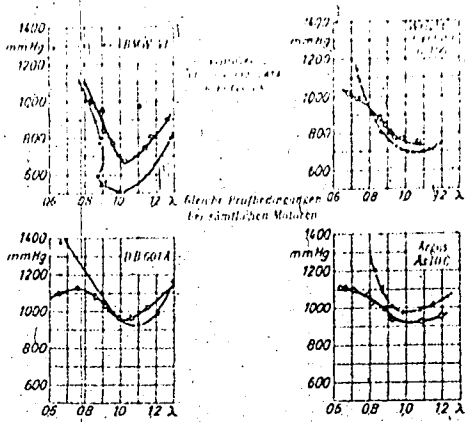


Abb. 9
Steilheit der Klopfgrenzkurven in verschiedenen Motoren

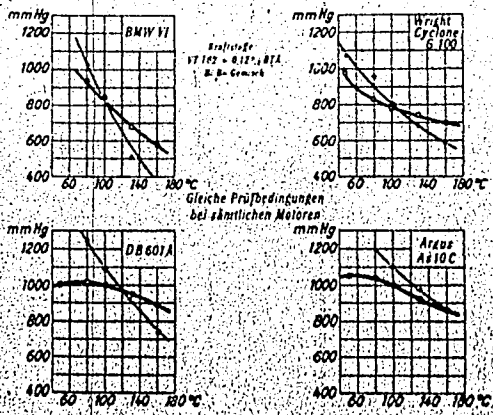


Abb. 10
Einfluß der Ladelufttemperatur auf den Tiefpunkt der Klopfgrenzkurve

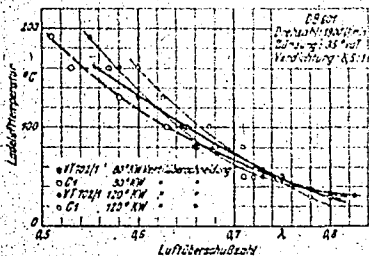


Abb. 11

Verschiebung des Tiefpunktes der Klopfgrenzkurve im Reichgebiet mit der Ladeflufttemperatur

eines Indikators feststellte, unter welchen Bedingungen der Leistungskurve Klopfen eintrat. Nach dem Verfahren von A. W. Schmidt ist das nun möglich, ohne eine zusätzliche Bohrung zu benötigen, allerdings, ohne daß man Zahlenwerte für die Klopfstärke ansetzen kann, die die Grenze darstellt. Damit ist eine Grundlage der Vollmotoren-Charakteristik geschaffen, die von größtem Interesse für die Beurteilung von Neukonstruktionen oder konstruktiven Änderungen sowie von Kraftstoffen ist.

Obwohl man aus Versuchen dieser Art wichtige Rückschlüsse ziehen kann, ist doch die geforderte exakte Übertragbarkeit von Laboratoriumsversuchen auf den Motor nicht möglich. Deshalb müßte man zu einer exakteren Motorcharakteristik kommen, wie z. B. der Ausmessung der Verdichtung oder der Verbrennungshöchstdrücke bei den verschiedensten Bedingungen. Voraussetzung für eine solche Messung ist in vielen Fällen die Anwesenheit einer zusätzlichen Indikatorbohrung. Da diese Messung sicher immer steigende Bedeutung erhält, ist die Schaffung eines mit der Zündkerze vereinigten Indikators sehr wichtig und müßte unbedingt weiter verfolgt werden:

1. Nur die ideale adiabatische Selbstzündung ist eine Stoffkonstante im eigentlichen Sinne; bei ihrer praktischen Bestimmung muß man die Reaktionsbedingungen der Motoren einhalten, um richtige Werte zu erhalten.
2. Zur qualitativen Charakteristik des Klopfverhaltens nach Druck und Temperaturabhängigkeit kann die Eigenschaftsprüfung (z. B. Selbstzündung) ebenso wie die Motorenprüfung herangezogen

werden. Beide können also zur Gleichmäßigkeit-kontrolle dienen. Die Laboratoriumsprüfung hat den Vorzug kleiner Mengen.

Der für die Messung der Selbstzündung erforderliche Zeitaufwand und die Kompliziertheit der Messung scheint aber eine künftige Anwendung solcher Verfahren für die laufende Untersuchung auszuschalten. Bestätigt sich die Annahme, daß die adiabatische Selbstzündung die motorische Klopfneigung von Kraftstoffen einwandfrei zu erfassen gestattet, so wird eine Untersuchung dieser Art als Grunduntersuchung zur Beurteilung von Kraftstoffen und Motoren in Frage kommen.

3. Die vollkommene quantitative Übertragung von Motorergebnissen auf sämtliche Motoren, Kraftstoffe und Betriebsbedingungen ist ebensowenig möglich, wie die von Selbstzündungsmessungen. Bisher erscheint es aber leichter möglich, das Verhalten von Kraftstoffen in Motoren anderer Bauart nach Motormessungen als nach Laborversuchen vorauszusagen. Die Frage nach der Genauigkeit der Selbstzündungsmessung wird in dieser Richtung geprüft werden müssen. Die Verwendung kleiner Motoren wird Kosten und Kraftstoffmengen bei der Untersuchung verringern (Versuchsmotor K, O.O.Z.-Verfahren der I. G.).
4. Zur Erzielung einer allgemeinen Lösung ist der betreffende Motor zu charakterisieren. Dies muß sowohl nach Druck- und Temperaturempfindlichkeit als auch nach komplexen Eigenschaften, wie Vermagerbarkeit, Einfluß der Drehzahl, Bleiempfindlichkeit und ähnlichen geschehen, die die Reihenfolge der Bewertung umkehren können. Ein Zündkerzenindikator ist für die Ausmessungen der Vollmotoren dringend erwünscht.
5. Zur Erkennung des Klopfensatzes in Vollmotoren erscheint der Indikator von A. W. Schmidt sehr aussichtsreich.
6. Es ist nicht Sache der Kraftstoffprüfung, die exakte Lage von Reglerkurven der Vollmotoren für die einzelnen Kraftstoffe zu kontrollieren.