

Probleme der Verbrennung im Motor

(Bericht über die Sitzung des Ausschusses
für Verbrennungsfragen am 3. Juli 1940)

Von Ernst Schmidt

Im folgenden gebe ich einen zusammenfassenden Bericht über eine Arbeitstagung des Ausschusses für Verbrennungsfragen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, die am 3. Juli 1940 in Berlin stattfand und sich mit Problemen der Treibstoffe und ihrer Verbrennung im Motor befaßte.

Die Verbrennung im Otto-Motor unterscheidet sich bekanntlich von der Verbrennung in Gasfeuerungen durch den höheren Anfangsdruck und die höhere Anfangstemperatur des Brennstoffluftgemisches sowie vor allem dadurch, daß sie nicht bei konstantem Druck, sondern nahezu bei konstantem Volumen verläuft. Trotz dieser abweichenden Umstände ist der Ablauf der Verbrennung im Motor nicht grundsätzlich anders als in Gasfeuerungen, wenn auch erhebliche quantitative Unterschiede z. B. der Verbrennungsgeschwindigkeit und der Verbrennungstemperatur bestehen. Unter gewissen Umständen kann aber an Stelle des gewöhnlichen ziemlich ruhigen Ablaufs eine andere Art, die sogenannte klopfende Verbrennung, auftreten, die sich durch metallisch harte Schläge im Motor kundtut. Das Klopfen verursacht hohe mechanische und thermische Beanspruchungen, die den Bestand des Motors gefährden, und setzt außerdem den Wirkungsgrad herab¹⁾. Es muß daher verhindert werden. Steigert man die Leistung eines gegebenen Zylinders durch Aufladen oder durch stärkere Kompression, so fängt er schließlich an zu klopfen, und zwar je nach der Art des Brennstoffes früher oder später. Das Klopfen begrenzt also die Leistung eines gegebenen Motors.

Die große Erhöhung der Motorleistungen in den letzten Jahren ist wesentlich dadurch erfolgt, daß es gelang, die Klopfgrenze hinaufzurücken. Das wurde außer durch konstruktive Maßnahmen, wie z. B. zweckmäßige Form des Verbrennungsraumes, wirksamere Kühlung im Bereich des Auspuffventils usw., vor allem durch Entwicklung klopfleisterer Brennstoffe erreicht.

¹⁾ Siehe auch die ausführliche Darstellung der physikalischen und chemischen Vorgänge bei der Verbrennung im Motor in Heft 9 der Schriftenreihe der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung.

Den Grad der Klopfestigkeit mißt man durch Vergleich des Brennstoffes mit einem Gemisch aus dem sehr klopfesten Isooktan C_8H_{18} und dem wenig klopfesten *n*-Heptan C_7H_{16} in einem Versuchsmotor mit veränderlichem Verdichtungsverhältnis. Der Beginn des Klopfens wird entweder einfach abgehört oder mit dem sogenannten Springstiftindikator gemessen. Beginnt ein Brennstoff bei demselben Verdichtungsverhältnis zu klopfen wie reines Isooktan, so hat er die Oktanzahl 100, klopft er ebenso leicht wie reines *n*-Heptan, so hat er die Oktanzahl 0. Ein Brennstoff mit der Oktanzahl 87 z. B. hat ein Klopfverhalten wie ein Gemisch aus 87% Isooktan und 13% *n*-Heptan. Für klopfestere Brennstoffe als Isooktan bestimmt man die Oktanzahl durch Mischen mit weniger klopfesten Brennstoffen bekannter Oktanzahl und Anwenden der Mischungsregel. Ergibt z. B. ein Brennstoff gemischt im Verhältnis 1:1 mit einem Brennstoff von der Oktanzahl 80 die Oktanzahl 100, so hatte er allein die Oktanzahl 120. Die so gemessene Oktanzahl nennt man auch »Misch-Oktanzahl«.

Neuerdings wird an Stelle des Verdichtungsverhältnisses oft der Druck oder die Temperatur der Ladeluft geändert, bis Klopfen eintritt, und dadurch die Oktanzahl bestimmt. Dieses Verfahren benötigt keinen Prüfmotor veränderlichen Verdichtungsverhältnisses, sondern kann an beliebigen Einzylindern durchgeführt werden und kommt den Verhältnissen im wirklichen Motor näher.

Den Einfluß der Oktanzahl auf die Motorleistung zeigt folgendes Beispiel: Bei dem gleich gehaltenen Verdichtungsverhältnis 1:7 steigert die Erhöhung der Oktanzahl von 73 auf 87 den zulässigen Ladedruck von 1,0 auf 1,5 at, wobei in beiden Fällen eine Ladelufttemperatur von 100° angenommen ist. Dadurch wächst der mittlere Nutzdruck von 7 auf 13 at, die Leistung erhöht sich also bei unverändertem Hubraum des Motors allein durch den besseren Kraftstoff um über 80%.

In den letzten Jahren sind dementsprechend die Anforderungen an die Kraftstoffe dauernd gestiegen. Die amerikanische Luftwaffe fordert heute von ihrem Brennstoff die Oktanzahl 97, während sie sich noch im Jahre 1930 mit Oktanzahl 70 begnügte.

In einem Vortrag »Über Aromatenkraftstoffe« behandelte M. Pier die Entwicklung der Kraftstoffe hoher Oktanzahl besonders in Deutschland.

Untersucht man den Zusammenhang zwischen dem chemischen Aufbau der Kraftstoffe und ihrer Klopfestigkeit, so findet man, daß bei den normalen Paraffinen, die den Hauptteil der natürlichen Öle bilden, die

Klopffestigkeit mit der Länge der geraden Ketten und damit also mit steigendem Molekulargewicht und steigendem Siedepunkt stark abnimmt. Die Isoparaffine mit ihren verzweigten Ketten verhalten sich dagegen viel günstiger. Je gedrängter und symmetrischer der Aufbau des Moleküls ist, um so besser ist das Klopfverhalten, wie Tabelle 1 für

Tabelle 1

	Summen- formel	Struktur- formel	Siede- punkt °C	Schmelz- punkt °C	Satt- gewicht bei 20°C	Mol- gewicht	H-Gehalt in Gew.-% des Stoffes	Mengen H ₂		Al.- Al.- zahlen- zahl
								WT/kg	WT/Lr.	
Isopentan	C ₅ H ₁₂		28	-24	0,620	72,0	16,6	10650	6600	90
Neohexan (2,2-Dimethylbutan)	C ₆ H ₁₄		50	-100,1	0,649	86,1	16,3	10600	6900	105
Triptan (2,2,3-Triethylbutan)	C ₇ H ₁₆		81	-25	0,686	100,1	16,0	10550	7240	125
Isooktan (2,2,4-Triethylpentan)	C ₈ H ₁₈		99	-107,4	0,692	114,1	15,8	10500	7260	100
Isododekan	C ₁₂ H ₂₆		193		0,737	170,2	15,3	10500	7750	93













Physikalische Daten einiger Isoparaffine

einige Stoffe zeigt. Außer dem Isooktan, dem verabredungsgemäß die Oktanzahl 100 zukommt, ist daran das Neohexan mit 105 und besonders das Triptan mit 125 zu beachten. Diese Stoffe werden in Amerika zu Fliegerkraftstoffen benutzt. Man stellt sie durch Polymerisieren und Hydrieren aus den ungesättigten Kohlenwasserstoffen her, welche beim Cracken der amerikanischen Rohöle in großer Menge anfallen.

In Deutschland liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Aus unseren synthetisch hergestellten Kraftstoffen lassen sich Isoparaffine nur schwer gewinnen, dagegen lassen sie sich verhältnismäßig leicht in aromatische, d. h. ringförmige Kohlenwasserstoffe verwandeln, deren einfacher Vertreter das Benzol ist. Auch die ringförmigen Verbindungen haben hohe Oktanzahlen, wie die Zusammenstellung einiger Eigenschaften reiner Aromaten in Tabelle 2 zeigt. Benzol selbst kommt wegen seines zu hoch liegenden Erstarrungspunktes nicht in Frage, wohl aber die höheren Aromaten.

Ein solches aus Steinkohle hergestelltes Aromatisierungsbenzin gibt z. B. bei der Luftüberschußzahl $\lambda = 0,9$, also in der Nähe des Leistungsmaximums eine um 50% höhere Leistung als das bisher bei uns benutzte

Tabelle 2

	Summen- Formel	Struktur- Formel	Siede- punkt °C	Schmelz- punkt °C	Spez. Gew. bei 20°C	Mol. Gew.	H-Gehalt in Gew.-% des Stoffes	Heizwert H _u		M.-M. Misch- oktan- zahl
								WEAg	WELE	
Benzol	C ₆ H ₆		80,4	+6	0,879	78,05	7,3	9630	8450	98
Toluol	C ₇ H ₈		110,3	-14	0,867	92,08	8,7	9780	8450	99
o-Xylol	C ₈ H ₁₀		144	-37	0,881	106,08	9,5	9825	8550	95
m-Xylol	C ₈ H ₁₀		139	-64	0,884	106,08	9,5	9780	8420	100
p-Xylol	C ₈ H ₁₀		138	+15	0,881	106,08	9,5	9780	8420	101
Aethylbenzol	C ₈ H ₁₀		136	-94	0,887	106,08	9,5	9770	8460	100
1,3,5-Tri- methylbenzol (Mesitylen)	C ₉ H ₁₂		165	-49	0,885	120,1	10,0	9800	8460	109
1,4-Diethyl- benzol	C ₈ H ₁₂		182	<-20	0,882	120,1	10,0			110
n-Propylbenzol	C ₉ H ₁₂		159	-99,2	0,882	120,1	10,0	9890	8500	101
n-Butylbenzol	C ₁₀ H ₁₄		183	-81,2	0,881	134,1	10,5			99
1,2-Diethyl- benzol	C ₁₀ H ₁₄		183	-88	0,881	134,1	10,5	9898	8550	118
1,4-Diethyl- benzol (Naphthalin- benzol)	C ₁₁ H ₁₆		187	-20	0,889	148,2	10,8	9948	8540	120

Physikalische Daten einiger Aromaten

Fliegerbenzin mit der Oktanzahl 87 und noch um 10% mehr als ein Kraftstoff mit 50% Isoparaffinen und der Oktanzahl 100.

Eine Hydrieranlage, die Benzin von der Oktanzahl 87 herstellt, läßt sich durch Ändern der Arbeitsbedingungen und des Katalysators mit ganz geringen apparativen Änderungen auf die Erzeugung aromatischer Kraftstoffe umstellen. Auch durch Dehydrieren von Paraffinen lassen sich solche Kraftstoffe herstellen, dabei kann man sogar die Oktanzahl von 87 auf 100 steigern. Es gibt also Benzine der Oktanzahl 100, die sich durch Hydrieren von Paraffinen oder durch Dehydrieren von aromatischen Kraftstoffen durch eine synthetische

Dabei haben die Aromaten gegenüber den Isoparaffinen noch den wichtigen Vorteil des höheren Heizwertes je Volumeneinheit, denn im heutigen Flugzeug ist Raumersparnis wichtiger als Gewichtersparnis. Ein weiterer Vorteil der Aromaten ist der geringere Wasserdampfgehalt ihrer Abgase, wodurch die verräterische Eisfahnenbildung hinter dem Flugzeug in den oberen Luftschichten erst um einige hundert Meter höher einsetzt als bei den Benzinen.

Die Beurteilung eines Kraftstoffes nach seiner Oktanzahl und deren Bestimmung in einem Motor kommt zwar den praktischen Verhältnissen einigermaßen nahe, aber sie ist vom wissenschaftlichen Standpunkt aus unbefriedigend, denn man möchte die Klopfneigung lieber durch eine physikalisch deutbare Größe kennzeichnen.

Da der Klopfvorgang mit sehr harten Stoßwellen verbunden ist, lag es nahe, ihn als detonative Verbrennung zu deuten, wobei man dann vielleicht Beziehungen zwischen Klopfneigung und Detonationsgeschwindigkeit erwarten durfte. Diese Auffassung ist heute widerlegt, vor allem durch die Tatsache, daß der Zusatz von Mitteln, die das Klopfen sehr stark beeinflussen, auf die detonative Verbrennung ohne merkliche Wirkung ist.

Man deutet daher den Klopfvorgang heute als Selbstzündung eines Gemischrestes, der durch die Ausdehnung der zuerst verbrannten Gemischteile auf Zündungstemperatur gebracht wurde. Erfolgt diese Selbstzündung schnell genug, d. h. mit genügend kleiner Induktionszeit, so treten in dem Gemischrest durch die Verbrennung plötzlich hohe Drucke auf, die sich als stello Druckfronten ausbreiten und beim Auftreffen auf die Wände des Verbrennungsraumes die harten Klopfschläge verursachen.

Damit Klopfen auftritt, muß die Selbstzündung des Restes so schnell oder, wie der Chemiker sagt, mit so kleiner Induktionszeit erfolgen, daß er verbrannt ist, bevor die von der Zündkerze ausgehende gewöhnliche Flammenfront den ganzen Verbrennungsraum durchlaufen hat. Die Selbstzündung geht dann auch so rasch vor sich, daß man nicht mehr gleichen Druck im ganzen Zylinder Raum annehmen darf.

Die geschilderte Auffassung des Verbrennungsvorganges legt Beziehungen zwischen dem Klopfverhalten im Motor und der Selbstzündung bei adiabatischer Verdichtung nahe. Über Versuche dieser Art berichtet Herr W. Jost. Er verdichtete das Gas-Luft-Gemisch adiabatisch mit Hilfe eines durch Fallgewichte beschwerten Kolbens und bestimmte die In-

duktionszeit, d. h. die Zeit vom Ende der Kompression bis zum Auftreten der sichtbaren Verbrennung.

Untersucht wurde das Verhalten von *n*-Heptan-Luftgemischen mit verschiedenen Zusätzen, die nach Erfahrungen am Motor das Klopfen fördern oder hindern. Es ergab sich, daß die Klopförderer (Amylnitrit, Aethylnitrat und Azetonperoxyd wurden benutzt) tatsächlich die Induktionszeit auf die Hälfte bis auf $\frac{1}{3}$ verkürzen. Die Klopfhinderer (Anilin und Eisenkarbonyl) verlängern sie dagegen um 50 bis 100%. Bleitetraäthyl hat wider Erwarten nur einen sehr geringen, bei höheren Anfangstemperaturen des Gemisches sogar verschwindenden Einfluß auf die Induktionszeit, der vielleicht mit der im Motor beobachteten geringen Bleiempfindlichkeit gerade des Heptans zusammenhängt.

Auffallend war weiter, daß Anilin die Induktionszeit etwa ebenso stark verlängert wie Eisenkarbonyl. Im Motor dagegen wirkt bei üblichen Benzinmengen Eisenkarbonyl etwa 50- und Bleitetraäthyl etwa 100mal so stark klopfhindernd wie Anilin.

Es besteht also zwar in großen Zügen eine qualitative Beziehung zwischen der Induktionszeit bei Selbstzündung durch adiabatische Kompression und dem Klopfverhalten eines Brennstoffes im Motor, aber im einzelnen ist doch noch vieles unklar, besonders was den Einfluß der Betriebsbedingungen des Motors betrifft.

Die wichtigste Größe ist dabei die Temperatur des Unverbrannten, sie hängt ab von der Anfangstemperatur des Gemisches vor der Verdichtung und vor allem auch von der Wärmezufuhr durch heiße Wandteile des Verbrennungsraumes während des Aussaugens und Verdichtens. Über diese Wärmezufuhr ist unter den vielfältigen Verhältnissen beim Motor kaum etwas Allgemeingültiges auszusagen. Es ist daher besonders wichtig, diese Erwärmungsverhältnisse des Unverbrannten im Motor eingehend zu studieren.

In der Ansprache wiesen F. A. F. Schmidt und Lindner besonders auf den Einfluß des Druckes auf den Klopfvorgang hin, der nach ihrer Ansicht durch die adiabatische Temperatursteigerung erklärbar zu sein scheint. Überwiegend ist es jedoch das Klopfverhalten, das die Temperatur des Unverbrannten festlegt. Es ist daher nicht ohne weiteres anzunehmen, daß man sich über die nach verschiedenen Umständen auf den Klopfvorgang zurück zu führende Temperatur des Unverbrannten durch die Beobachtung des Klopfens allein bei seiner Veranschaulichung durch den Verlauf von der Größerenkurve von $\frac{1}{10}$ sec

beobachtete, während sie im Motor bei $\frac{1}{1000}$ sec liegen. Schätzt man die in dieser Zeit bei 400 bis 500° durch Spaltung von Kohlenwasserstoffen gebildete Zahl der Radikale und vergleicht sie mit der gleichzeitig durch Zerfall von Bleitetraäthyl gebildeten Anzahl, so findet man im letztgenannten Falle eine weit größere Zahl. Vom Standpunkt der Theorie der Reaktionsketten, die gerade in den Radikalen die Förderer der Verbrennung sieht, ist das höchst merkwürdig. Es sind also noch viele Dinge beim Klopfvorgang zu klären, bevor man die Wirkung der Klopfhinderer wirklich versteht.

Über in Graz ausgeführte Versuche mit Benzineinspritzung in einem Zweitakt-Otto-Motor gab Herr H. List einen Bericht. Gegenüber der Benzineinspritzung bei dem Viertakt-Otto-Motor ist das Problem insofern schwieriger, als weniger Zeit für die Gemischbildung zur Verfügung steht.

Die Versuche wurden in einer Bombenapparatur mit konstantem Volumen ausgeführt, wobei geändert werden konnte:

- die räumliche Verteilung des Brennstoffes durch Wahl verschiedener Düsen,
- die Wirbelung der Luft,
- die Wandtemperatur der Bombe,
- die Zeitspanne zwischen Einspritzung und Zündung.

Untersucht wurde die Vollständigkeit der Verbrennung zunächst bei theoretischer Luftmenge in Abhängigkeit von der Dichte der Luft in der Bombe. Die aus Bilanzen der C- und O₂-Gehalte der Abgase gewonnenen Ergebnisse zeigt Abbildung 1. Man sieht, daß mit wachsender Luftdichte die Verbrennung besser wird, wahrscheinlich weil der Einspritzstrahl stärker abgebremst wird und keine Tropfen mehr auf die Wand fallen.

Bei einer zweiten Versuchsreihe, deren Ergebnisse Abbildung 2 enthält, wurde die Luftdichte mit 6,5 kg/m³ konstant gehalten und der Luftüberschuß geändert. Dabei ergab sich ein Maximum der Verbrennung bei einem Luftüberschuß von 1,1 bis 1,2. Bei höheren Luftüberschüssen wird die Verbrennung wieder schlechter, wobei der zunehmende Anteil des Rußes am Unverbrannten zu bemerken ist, der bis über die Hälfte des Unverbrannten steigt. Die Verbrennung im Zweitaktmotor mit Benzineinspritzung liegt danach zwischen der des Otto-Motors, der bei ungenügender Luftmenge Unverbranntes wesentlich in Form von Gasen (CO und H₂) hinterläßt, und der des Dieselmotors, bei der das Unverbrannte wesentlich als Ruß auftritt.

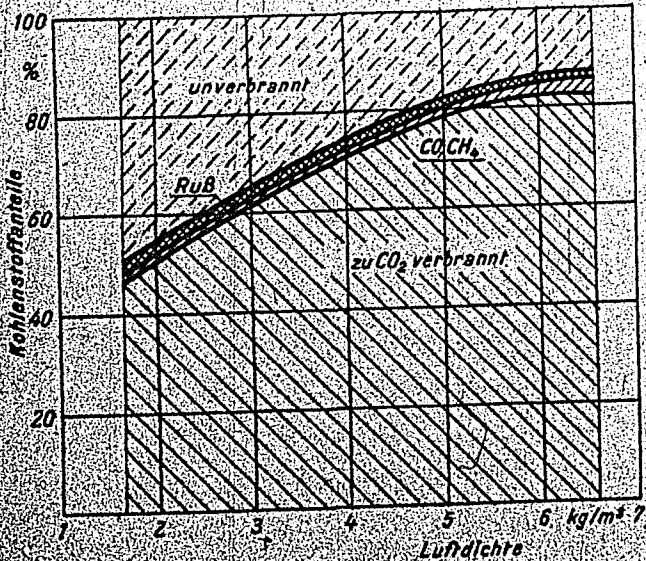


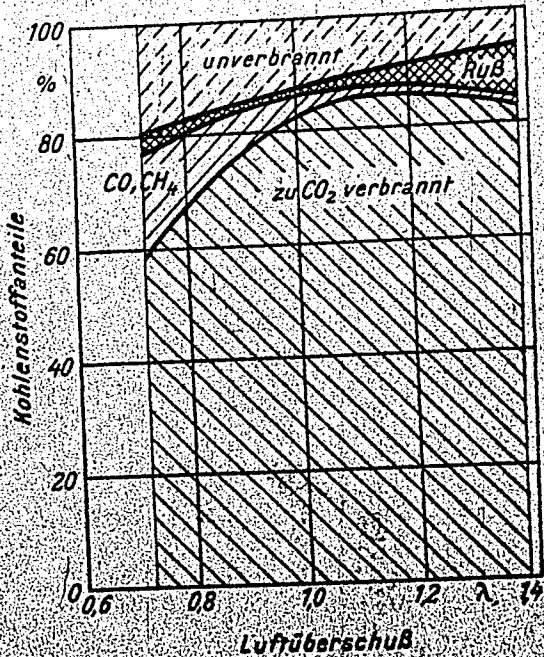
Abb. 1

Verteilung der Kohlenstoffe im Abgas bei verschiedener Luftdichte und theoretischer Luftmenge (Luftüberschusszahl 1). Viellochdüse mit 40 Bohrungen zu 0,2 mm ϕ

Über in Braunschweig im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring durchgeführte und in Angriff genommene Arbeiten berichteten E. Schmidt und G. Danköhler in 2 Vorträgen. Das gemeinsame Ziel dieser Arbeiten ist das tiefere Eindringen in den Mechanismus der Verbrennung; denn nur auf diesem Wege wird sich auch dem Problem des Klopfens auf den Grund kommen können.

Das wichtigste Hilfsmittel der Untersuchung der Verbrennung im Motor ist die Druckmessung, aber sie kann meistens tragheitslos erst dann gemacht werden, wenn man sich mit dem Klopfer untersucht will. Die genaue Kenntnis der Vorgänge im Zylinder mit längerer Zeit bekannt zu sein, ist ein Ziel, das im Hinblick auf die Untersuchung dieser Vorgänge im Motor von großer Wichtigkeit ist. Die Untersuchung dieser Vorgänge ist ein sehr schwieriges Problem, das eine sorgfältige Wiedergabe der Ergebnisse in der Form von Diagrammen und Tabellen erfordert, die im folgenden dargestellt werden sollen.

Abb. 2

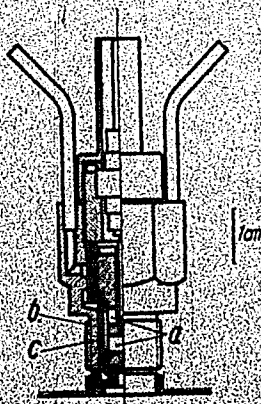


Verteilung des Kohlenstoffes im Abgas in Abhängigkeit vom Luftüberschuß bei einer Luftdichte von $6,5 \text{ kg/m}^3$. Viellochdüse mit 40 Bohrungen von $0,2 \text{ mm } \phi$

unmöglich machen. Man kann daher nicht unterscheiden, ob die beim Klopfen beobachteten Schwingungen Eigenschwingungen des Gasraums im Zylinder oder tatsächlich stehende Wellenfronten sind, wie es die vorher geschilderte Auffassung des Klopfvorgangs annimmt. Dazu treten durch den Einbau im Motor noch tiefere Eigenfrequenzen auf, die durch den verbindenden Gaskanal verursacht werden.

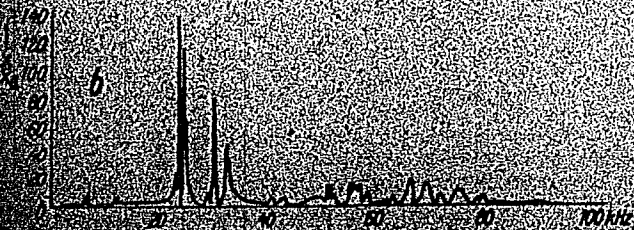
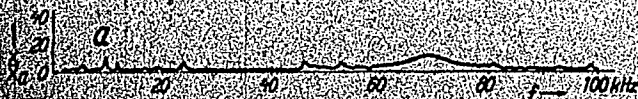
Bei den von uns entwickelten Quarzgebern wurden die Quarze so verkleinert, daß sie innerhalb des Zündkerzenkopfes von $14 \text{ mm } \phi$ Platz hatten, wobei in diesem Raum auch noch eine Wasserschleife angeordnet war. Abbildung 3 zeigt einen Schnitt durch das neue Gerät. Das Quarz hat nur einen Durchmesser von 6 mm , und das ganze Gerät ist noch größer als die übliche Zündkerze.

Abb. 3



Quarzdruckgeber hoher
Eigenfrequenz

- a) Quarz
- b) Rohrfeder
- c) Wasserkühlung



Aufnahmen der Resonanzkurven handelsüblicher Quarzgeber und des neuen Gerätes zeigt Abbildung 4. Die Resonanzkurven wurden dadurch aufgenommen, daß die Quarze mit Hilfe des reziproken piezoelektrischen Effektes durch einen Röhrensummer beliebiger Frequenz erregt und die Amplitude der Schwingungen nach der Methode des Kondensatormikrophons gemessen wurde. Dabei ließen sich noch Amplituden von 10^{-6} mm nachweisen. In den Kurven ist die Amplitudenvervielfachung durch Eigenschwingungen dargestellt. Die Wiedergabe ist nur so lange einwandfrei, als die Kurve waagrecht bei der Ordinate 1 verläuft. Wenn man unser Gerät ohne Wasserkühlung benutzt, wie es bei einmaligen Vorgängen z. B. an Versuchsbomben möglich ist, kann man noch erheblich weiterkommen, wie Abbildung 5 für 2 verschiedene Ausführungs-

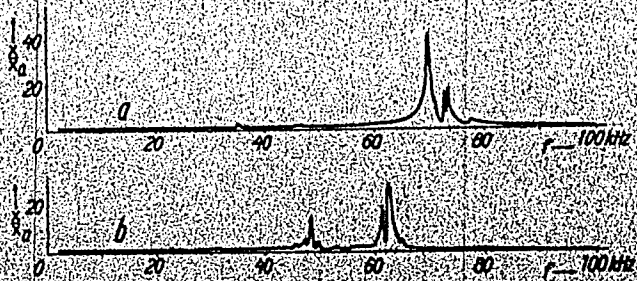


Abb. 5
Resonanzkurven von Quarzdruckgebern eigener Bauart
a) mit geschwächter Federhärte
b) mit veränderter Federhärte

formen zeigt. In diesem Falle erscheint es möglich, durch noch weitere Verkleinerung der Quarze die Eigenschwingungen bis auf 100000 Hz hinaufzurücken. Natürlich müssen auch die Verstärker und Anzeigeräte diesen hohen Eigenfrequenzen angepaßt werden.

Eine andere Aufgabe, die uns in Braunschweig beschäftigt hat, ist der Einfluß der Turbulenz auf die Verbrennungsgeschwindigkeit. Bekanntlich sind schnelllaufende Motoren mit sehr hohen Drehzahlen verhältnismäßig niedrige Verbrennungsgeschwindigkeiten von Metern pro Sekunde im Zylinder durchzuführen. Diese Geschwindigkeit erhöht sich, wenn man sich an den Zylinderwänden Turbulenz auftritt, die durch Brennkammer

unterscheiden muß, zwischen feinhälliger Turbulenz, deren Ballon Abmessungen von der Dicke der Brennzone haben, und größeren Ballen, welche die Brennfläche als Ganzes ausheulen. Durch beide Turbulenzarten wird die Verbrennungsgeschwindigkeit stark erhöht.

Bei nichtstationären Vorgängen, wie dem Fortschreiten der Verbrennung in Röhren, kommt dazu noch eine anlaufende Turbulenz, die durch die Bewegung der vor der Flammenfront hergeschobenen unverbrannten Gemischteile verursacht wird. In dieser anlaufenden Turbulenz ist der Grund für die bekannte Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit beim Fortschreiten von Flammen in Röhren zu suchen.

Als Versuchsmittel dienen uns dabei Röhre mit druckfesten Fenstern, die sowohl Aufnahmen im Eigenlicht der Verbrennung wie auch bei Funkenbeleuchtung gestatten. Eine solche Fensterbombe zeigt Abbildung 6. Aufnahmen von Flammenfronten im Eigengewicht zeigen die

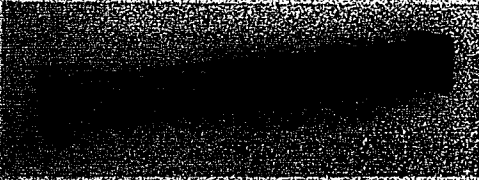


Abb. 6

Fensterbombe für
Verbrennungs-
versuche

Abbildungen 7 bis 9. Bemerkenswert ist dabei die manchmal beobachtete Periodizität der Flammensubstanz. Es liegt nahe, sie als überlagerte Eigenschwingung der Flamme anzusehen. Diese Erklärung ist aber

Abb. 7

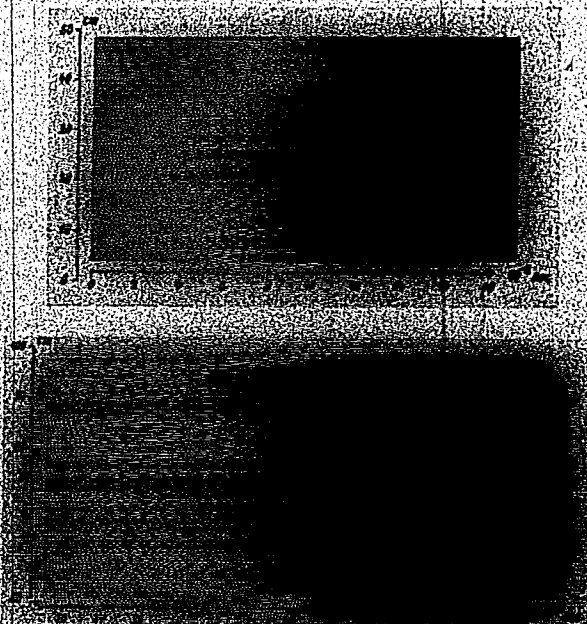
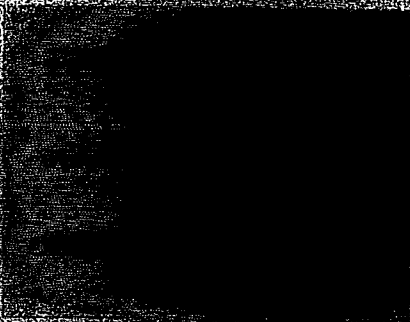


Abb. 1

Abbrennen eines Propan-Luft-Gemisches mit $\lambda = 11,5$ im drei-Zylinder-Motor

Abb. 2

Abbrennen eines Propan-Luft-Gemisches mit $\lambda = 11,5$ im drei-Zylinder-Motor. Die Kurve zeigt die Verbrennungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Winkel des Ventils.



sicher falsch, da die beobachteten Frequenzen viel niedriger sind, als der ersten Eigenschwingung entspricht. Nach unserer Meinung handelt es sich um den Einfluß von periodischen Wirbeln, die durch die Reibung der vor der Flammenfront hergeschobenen Gasmasse an die Wand abgelöst werden und die dann später auch das Ansteigen der Flammengeschwindigkeit verursachen.

Neben diesen mehr physikalischen Untersuchungen der Verbrennungsvorgänge muß man aber, wie G. Damköhler in seinem Bericht ausführte, auch mit den Methoden der chemischen Reaktionskinetik an das Problem herangehen.

Bei so raschen Vorgängen, wie sie dem Klopfen vorausgehen, liegt die Hauptschwierigkeit der Versuche darin, daß die Zeiten, welche man braucht, um die Reaktion einzuleiten und abzustoppen (Aufheizen, Mischen und Abkühlen), von derselben Größenordnung sind wie die Reaktionszeit selber (0,01 bis 0,001 sec). Zudem laufen die Reaktionen über Ketten unter Bildung hochaktiver und kurzlebiger Zwischenprodukte.

Für diese Arbeiten haben wir in Braunschweig eine nach dem Prinzip der Diffusionsflamme arbeitende Apparatur entwickelt, bei der die Ausgangsgase getrennt erwärmt, dann durch Mischung zur Reaktion gebracht und kurz darauf schnell abgekühlt wurden.

Durch Ähnlichkeitsbetrachtungen über die Strömungs- und Wärmeübergangsverhältnisse der Apparatur gelang es, beliebige genügend kurze und genau bekannte Zeiten für Anwärmen, Mischen und Abschrecken einzustellen. Mit dieser Apparatur hoffen wir, einen genaueren Einblick in den Verlauf der Reaktion zu bekommen.

Daneben werden Versuche am laufenden Motor mit abgestellter Zündung ausgeführt, wobei auf die eintretenden Vorreaktionen aus der Erwärmung des Gemisches geschlossen wird.

Aufgabe weiterer Arbeit wird es sein, die durch die rasche Abschreckung am weiteren Umsatz verhinderten Zwischenprodukte zu analysieren und daraus Schlüsse über den Ablauf der Verbrennung und seine Beeinflussung durch Zündung zu ziehen. Dazu müssen aber die Methoden der chemischen Analyse noch wesentlich ausgebaut und verbessert werden.

Wiederum ist die in Braunschweig durchgeführte Versuchsreihe über die Klopffrequenzen im Zusammenhang mit der Verbrennung, gestrichelt angedeutet, als ein Beispiel für die Anwendung der physikalischen Methoden zur Klärung der Vorgänge im Bereich der detonativen

Verbrennung die günstigsten Wirkungsgrade der Schubzeugung liegen, die denen stationär brennender Strahlrohröfen gleichkommen. Allerdings läßt sich außer bei Acetylen die detonative Verbrennung nur mit wasserstoffangereicherter Luft sicher erzielen.

Von besonderem Interesse ist auch das Übergangsgebiet von der gewöhnlichen Verbrennung in die detonative Form, wobei noch zu klären ist, ob die Beschleunigung der Verbrennung nur durch die zunehmende Turbulenz hervorgerufen wird oder ob dabei auch chemische Einflüsse mitwirken. Bei so rasch verlaufenden Vorgängen ist es notwendig, die Methoden der Gasdynamik anzuwenden.

An die Vorträge schlossen sich Aussprachen an, an denen sich außer den Vortragenden die Herren Eucken, Lindner, Lorenz, Nusselt, v. Philippovich, F. A. E. Schmidt, Tricbnigg und Zinner beteiligten. Dabei wurden die behandelten Themen besonders nach der meßtechnischen und der reaktionskinetischen Seite erweitert und vertieft. Außerdem wurde über Erfahrungen, Versuchseinrichtungen und Arbeitspläne verschiedener Stellen berichtet.

Blickt man auf die auf der Sitzung behandelten Probleme zurück, so ergibt sich, daß man von einem ins Einzelne gehenden Verständnis des Verbrennungsvorganges noch weit entfernt ist, wenn auch eine Reihe von Ansätzen zum Eindringen in den Mechanismus der Verbrennung von Gasgemischen vorhanden sind. Eines der wichtigsten Ergebnisse der bisherigen Forschung ist die Erkenntnis, daß die Verbrennung nicht einfach nach der chemischen Formel abläuft, sondern sich über eine Reihe von kurzlebigen Zwischenprodukten in Gestalt einer Reaktionskette vollzieht, deren einzelne Glieder wir nur unvollkommen kennen. Erst wenn es uns mit Hilfe geeigneter Analysemethoden, die chemischer oder spektroskopischer Art sein können, gelingt, diese wenig stabilen Zwischenstufen zu erfassen, dürfen wir hoffen, auch den eigentlichen Ursachen des Klopfens und der Wirkungsweise der klopfhindernden Mittel auf den Grund zu kommen.