

Vorreaktionen im Otto-Motor bei abgestellter Zündung

Von Ernst Schmidt und Egon Muhlner

Vorgetragen von E. Schmidt

A. Einleitung

Im Verbrennungsmotor mit Gemischsaugung treten bekanntlich schon vor Einsetzen der Zündung Reaktionen auf, die die eigentliche Verbrénnung einleiten und die sich bei genügend hoher Verdichtung bis zur Selbstentzündung steigern können. Für den Mechanismus der Verbrennung sind diese Vorreaktionen von wesentlicher Bedeutung. Vor allem hängen von ihnen der Zündverzög und die im Motor als Klopfen bekannte besondere Form der Selbstzündung ab.

Zum Studium der Vorreaktionen hat man Gas-Luft-Gemische in einem geschlossenen Behälter erhitzt und den zeitlichen Verlauf des Druckanstiegs für verschiedene Anfangstemperaturen gemessen¹⁾. Bei Anfangstemperaturen von 200 bis 300° C treten hierbei teilweise Oxydationen auf, die von Lumineszenzerscheinungen begleitet sein können und daher auch als kalte Flammen bezeichnet werden. Diese Oxydationen setzen bei höheren Kohlenwasserstoffen erst nach einer endlichen Zeit, der sogenannten Induktionszeit, ein, die je nach den Versuchsbedingungen zwischen Bruchteilen von Sekunden und Stunden liegen kann. Die Reaktion beschleunigt sich durch die gebildeten Verbindungen. Die Umsatzgeschwindigkeit überschreitet ein Maximum und nimmt dann wieder bis auf Null ab, falls sie sich nicht etwa bis zur Selbstzündung steigert. Im allgemeinen wird aber nur ein Bruchteil des verfügbaren Sauerstoffes umgesetzt, und dann schläft die Reaktion wieder ein.

Andere Versuche wurden an strömenden Gemischen durchgeführt, die kurze Zeit auf hohe Temperatur gebracht und rasch wieder abgekühlt werden. Die chemische Analyse der Verbrennungsprodukte läßt dann den Umsatz erkennen. Dabei wurden außer CO₂ und CO Aldehyde und Peroxyde festgestellt.

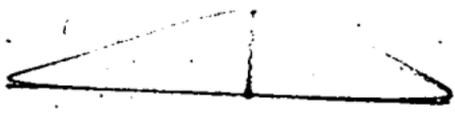
¹⁾ Vgl. W. Jost: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Berlin 1939.

... die ...
 ... die ...
 ... die ...
 ... die ...
 ... die ...

Mehrere Versuche führten Peletier und Mitarbeiter, wie mit einem C. F. E. Prüfmotor bei 900 U/min an einem Gemisch von 70% n-Heptan und 30% n-Heptan, also von der Oktanzahl (O.Z.) 70. Die Vorreaktionen waren an einer Ausbeulung des Indikatorgrammes während des Expansionshubes erkennbar. Die Wirkung nahm mit zunehmender Anreicherung des Gemisches zu und war am größten bei einem Brennstoffverhältnis von 1,3, wenn unter Brennstoffverhältnis das Verhältnis der wirklichen Brennstoffmenge zur stöchiometrischen verstanden wird. Wir vermeiden den bei Luftmangel irreführenden und auch kaum wenig glücklichen Ausdruck der Luftüberschußzahl, denn bekanntlich hat die Luftüberschußzahl den Wert $\lambda = 1$ bei stöchiometrischer Verbrennung; also wenn der Luftüberschuß gerade Null ist. Besser bezeichnet man die Luftüberschußzahl als Luftverhältnis, dessen Kehrwert dann das Brennstoffverhältnis ist.) Abbildung 1 zeigt ein solches

Abb. 1

Versetztes Indikator-diagramm mit Vorreaktionen von drei Kraftstoffen verschiedener Oktanzahl nach Peletier



von Peletier mit einem optischen Indikator aufgenommenes versetztes Diagramm, bei dem die Arbeitsspiele dreier Kraftstoffe verschiedener Oktanzahl übereinander geschrieben sind. Die linke Seite entspricht der Kompression, die rechte der Expansion. Man erkennt deutlich die je nach dem Kraftstoff verschieden starke Ausbeulung der Expansionslinie durch die Vorreaktionen. Mit zunehmendem Isooktangehalt, also stei-

¹⁾ P. Mondain-Monval: Comptes Rendus, Bd 192 (1931) S. 1158, und Chemie et Industrie, Bd 27 (1932) S. 770.

²⁾ L. A. Peletier, G. C. van Hoogstraten, J. Smittenberg und P. L. Kooyman: Chaleur et Industrie, Bd 20 (1939) S. 120.

gender Oktanzahl, geht die Ausbeute des Drahtraumes in der Regel nach zurück. Die gleiche Wirkung hat der Zusatz von Bleistrauchöl. Weitere Versuche führten die Verfasser an einem kleinen Zweitaktmotor mit 1500 Umdrehung durch, bei dem nicht indiziert sondern die Temperatursteigerung des Gemisches beim Durchgang durch den Motor gemessen wurde. Der Zylinder konnte elektrisch auf verschiedene Temperaturen vorgeheizt werden. Es ergab sich, daß bei 150 °C Ansaugtemperatur und Zylindertemperaturen von 200 bis 300 °C ein Gemisch mit 65% Isooktan im Brennstoff (O. Z. 65) sich um etwa 30 °C erwärmt, während ein solches mit 43% Isooktan (O. Z. 43) das um etwa 50 °C tut. Die Kondensation des austretenden Gemisches ergab neben unverändertem Brennstoff wasserlösliche Bestandteile im Betrage von etwa 5% des ursprünglichen Brennstoffes. Im wasserlöslichen wurden etwa 30% Peroxyde gefunden.

Über diese Messungen hat Broeze auf der öffentlichen Sitzung der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung im Mai 1939 zusammenfassend berichtet¹⁾. Da die Versuche an wenigen Brennstoffgemischen aus Isooktan und *n*-Heptan und nur in einem begrenzten Bereich von Versuchsbedingungen durchgeführt wurden, erschien ihre Erweiterung aussichtsreich. Im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring wurden daher neue Versuche angestellt.

B. Neue Versuche über Vorreaktionen im Otto-Motor bei abgestellter Zündung

I. Die Versuchsanordnung

Beim Aufbau der Versuchsanlage wurde besonderer Wert auf definierte und reproduzierbare Versuchsbedingungen gelegt, soweit das an einem laufenden Motor überhaupt möglich ist.

Als Versuchsmotor dient der vom Forschungsinstitut für Kraftfahrzeuge und Fahrzeugmotoren der Technischen Hochschule Stuttgart gebaute flüssigkeitsgekühlte Kraftstoffprüfmotor²⁾ mit einem Zylinder von 101 mm Bohrung und 130 mm Hub, entsprechend einem Hubraum von 1,04 l. Einen Schnitt durch den Zylinderkopf dieses Motors zeigt Abbildung 2. Mantel und Kopf des Zylinders bestehen aus Gußeisen mit ein-

¹⁾ J. H. Broeze, H. van Driel und L. A. Peletier: Betrachtungen über den Klopfvorgang im Otto-Motor. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, H. 9, S. 187, Berlin 1939.

²⁾ P. Schmidt, Neue Kraftfahr-Ztg, Bd 13 (1938) S. 79.

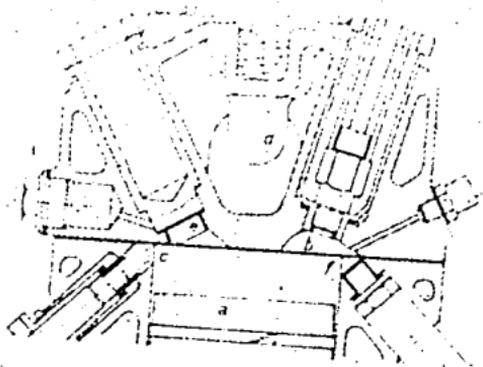


Abb. 2

Schnitt durch den Zylinderkopf des Versuchsmotors

- a. Kolben
- b. Quarzdruckmeßdose
- c. Quarzfenster
- d. Ventil-Erhaltungsabfuhrung
- e. und f. Anschluß-tuben, die beim Versuch durch Blindstopfen verschlossen waren

gegossenen Kühlkanälen. Der Kolben ist aus Leichtmetall. Ein- und Auslaßventil sind gleich und stehen senkrecht im Zylinderdeckel. Das Auslaßventil öffnet 47° vor unterem Totpunkt und schließt 7° nach oberem Totpunkt. Das Einlaßventil öffnet 7° vor oberem Totpunkt und schließt 47° nach unterem Totpunkt. Dabei gelten die Winkelangaben für den Öffnungsbeginn bzw. für das Ende des Schließens der Ventile. Der Verbrennungsraum hat die Form eines flachen Kreiszyinders. Die Kanäle zur Zu- und Abfuhr des Gemisches haben die übliche Form von Krümmern mit 90° Umlenkung. Das Verdichtungsverhältnis kann in weiten Grenzen von $\epsilon = 5,0$ bis 25 geändert werden. Im Zylinder und Zylinderkopf befinden sich, wie Abbildung 2 erkennen läßt, im ganzen 4 Stutzen, in die Quarzdruckmeßdosen für das Indizieren, Thermoelemente, Quarzfenster usw. eingesetzt werden können. Die nicht benutzten Öffnungen wurden durch Stopfen geschlossen, welche auch den Kanal bis zum Zylinder fast vollständig ausfüllten.

Den gesamten Aufbau der Versuchsanordnung zeigt Abbildung 3. Die Luft wird bei a aus unter der Versuchshalle liegenden Kanälen mit recht gleichmäßiger, am Thermometer b ablesbarer Temperatur angesaugt, sie passiert einen Kammerluftmessér c und tritt dann in den $0,1 \text{ m}^3$ großen Druckausgleichskessel d ein. Von hier strömt sie durch eine Ansaugleitung von 65 mm lichter Weite und 0,7 m Länge, in die zwei elek-

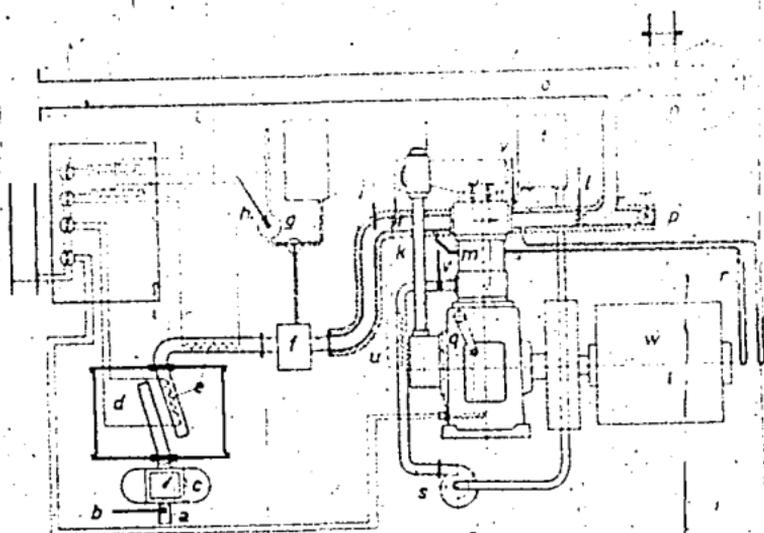


Abb. 3

Aufbau der Versuchsanordnung

- | | |
|--|--------------------------------------|
| a Lufteintritt | m Versuchsmotor |
| b Thermometer | n Lüfter |
| c Kammerlüftmesser | o Bohr zur Luftbimischung |
| d Druckausgleichsbehälter | p Ventil |
| e elektrische Heizungen | q Kurbel zur Verdichtungsverstellung |
| f Vergaser | r Flüssigkeitsmanometer |
| g Meßgefäß für Kraftstoff | s Kühltstoffpumpe |
| h Kraftstoffthermometer | t Kühltstoffbehälter |
| i nacktes Thermometer in Ansaugleitung | u Kühltstoffheizung |
| k Thermometer mit Rippenfühler für angesaugtes Gemisch | v Kühltstoffthermometer |
| l Thermometer mit Rippenfühler für Auspuff | w Gleichstrompendelmaschine |

trische Heizungen *e* eingebaut sind, zum Vergaser *f* (Bauart Sum), dessen Drehschieberdrossel im allgemeinen ganz geöffnet war. Der Kraftstoffverbrauch wird in üblicher Weise volumetrisch durch Auslaufen aus einem geeichten Glasgefäß *g* gemessen. Mit Hilfe der aräometrisch bestimmten Wichte des Kraftstoffes ergibt sich dann das verbrauchte Gewicht. Um dabei stets die wahre Temperatur des Kraftstoffes einsetzen zu können, war in das Meßgefäß ein Thermometer *h* eingeschmolzen.

Vom Vergaser strömt das Gemisch zum Motor durch eine etwa 1 m lange und 68 mm weite, gut wärmeisolierte Leitung, in die kurz vor dem Zylinderkopf ein gewöhnliches Thermometer *i* und ein mit einem besonderen Rippenfühler versehenes Thermometer *k* eingebaut ist. Um etwa mit gerissene Kraftstofftröpfchen auszuschleudern, besitzt die Leitung zwe

Krümmen von 90° Umlenkung. Nach Durchgang durch den Motor *m* tritt das Gemisch in die ebenfalls isolierte Abgasleitung, in die wieder ein Thermometer *t* mit Rippenfühler eingebaut ist, um seine Austrittstemperatur zu messen. Dann wird das Gemisch durch den Lüfter *u* abgesaugt, nachdem ihm durch das Rohr *o* ein Vielfaches an Luft beigemischt ist. Durch ein Ventil *p* kann man Gemisch zur Beobachtung austreten lassen. Das Verdichtungsverhältnis des Motors kann durch Heben und Senken des Zylinderblockes mit Hilfe der Kurbel *q* verstellt werden. Dabei ermöglichen federnde Stücke das Nachgeben der Anschlußleitungen. Zur Messung der Drücke des Gemisches vor und hinter dem Motor dienen die Flüssigkeitsmanometer *r*. Das Kühlmittel wird durch die Pumpe *s* über den Behälter *t* umgewälzt. In seinem Kreislauf sind die elektrische Heizung *u* und vor und hinter dem Zylinder Thermometer *v* eingebaut. Als Kühlmittel wurde technisches Glykol benutzt. Der Umlauf war mit 0,2 kg/sec so rasch, daß die Ein- und Austrittstemperatur des Kühlmittels sich um nicht mehr als 0,2° unterschieden. Die Temperatur des ganzen Zylinderblockes kann also als einheitlich angenommen werden. Als Schmieröl wurde Aeroshell-Mittel benutzt, seine Temperatur wurde mit Hilfe einer im Kurbelgehäuse liegenden wasserdurchflossenen Kühlschlange konstant gehalten. Als Antrieb des Ver-

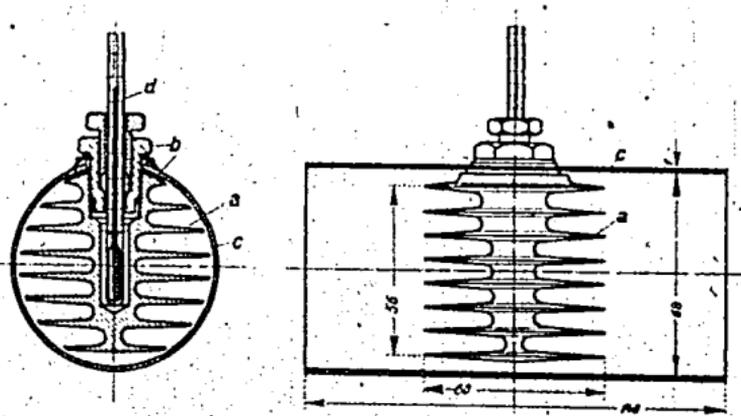


Abb. 4

Thermometer mit Rippenfühler aus Aluminium zur Messung der Gemischtemperatur vor und hinter dem Zylinder

- a Rippenkörper aus Aluminium
- b Faserstücke
- c Rohrlitung
- d Thermometer

suchsmotor, diente eine Gleichstrompendelmaschine für Drehzahlen bis 2500 Umdr./min., deren Moment durch Auswiegen mit Gewichten gemessen werden konnte.

Die Rippenfühler zur Messung der Temperatur des Gemisches vor und hinter dem Zylinder zeigt Abbildung 4, sie sind aus Aluminium gedreht und besitzen eine große vom Gemisch berührte Oberfläche, um die Temperatur über den Strömungsquerschnitt einwandfrei zu ermitteln. Der Rippenkörper ist vom Rohr durch Fiberstücke thermisch isoliert; seine das Quecksilbergefäß des Thermometers aufnehmende Bohrung ist mit Öl gefüllt.

2. Durchführung der Versuche

Abgesehen von den besonders zum Studium des Einflusses geänderter Betriebsbedingungen angestellten Messungen wurden alle Versuche unter den folgenden Bedingungen gefahren:

Die Drehzahl betrug	1800 Umdr./min
die Gemischtemperatur	140° C
die Kühlmitteltemperatur	140° C
die Öltemperatur	75° C
der Öldruck	2,4 atü.

Das Erreichen des stationären Betriebszustandes des Motors dauerte etwa 2 Stunden. Erst dann konnte mit den Messungen begonnen werden. Jeder einzelne Versuchspunkt erforderte durchschnittlich 45 Minuten Einlaufzeit.

Vor jeder Messung mit Gemisch wurde zunächst ein Versuch mit reiner Luft gefahren. Bei gleich gehaltener Eintrittstemperatur von 140° C lag die Austrittstemperatur der reinen Luft bei Verdichtungsverhältnissen von etwa $\epsilon = 6$ meist bei 145° C, doch schwankte dieser Wert von Tag zu Tag um wenige Grad vermutlich infolge kleiner Änderungen des Motorzustandes. Bei Beginn der ganzen Untersuchungen lag die Austrittstemperatur sogar um 2 bis 3° unter der Eintrittstemperatur. Um die Wirkung dieser Schwankungen auszuschalten, wurde die Temperatursteigerung Δt des Gemisches stets von der unmittelbar vorher gemessenen Austrittstemperatur der reinen Luft an gezählt. Nach dem Luftversuch wurde durch Öffnen der Vergaserdüsen Kraftstoff zugegeben, wobei durch Regeln der Heizung der Ansaugluft die Gemischtemperatur vor dem Zylinder stets auf 140° C blieb. Mit stufenweise steigender Kraftstoffmenge wurde eine Reihe von Versuchen jeweils für ein Verdich-

ungsverhältnis durchgeführt. Dann wurde dasselbe für andere Verdichtungsverhältnisse wiederholt. Das Verdichtungsverhältnis ist dabei in der üblichen Weise, d. h. als das Verhältnis der vom Kolben in den beiden Totlagen abgegrenzten Volumina angegeben.

In dieser Weise wurden einige Kraftstoffe mit verschiedener Oktanzahl durchgemessen. In ergänzenden, jeweilig nur an einem Kraftstoff angestellten Messungen wurde dann der Einfluß einer Änderung der Betriebsverhältnisse untersucht. Daneben wurde die Verminderung des Drehmomentes des treibenden Pendelmotors durch die Vorreaktionen ermittelt.

3. Genauigkeit der Meßwerte

Die Betriebsbedingungen eines laufenden Motors lassen sich auch bei größter Sorgfalt nicht so genau über längere Zeit konstant halten wie etwa bei einem physikalischen Apparat. Die Reibungsverhältnisse ändern sich im Laufe des Betriebes durch Einlaufen und Abnutzung und hängen vor allem vom Schmiermittel ab, dessen Zustand durch wechselnde Bedingungen, durch Verschmutzung, durch Aufnahme von Kraftstoff usw. in unübersichtlicher Weise schwankt. Diese Unsicherheiten gehen unmittelbar in die Messung des Drehmomentes ein, beeinflussen über die Reibungswärme aber auch den Temperaturzustand des Motors. Zwar werden Zylinder und Zylinderdeckel durch das Kühlmittel auf nahezu konstanter Temperatur gehalten, aber der ungekühlte Kolben nimmt bei größerer Reibung eine höhere Temperatur an und gibt dann Wärme an die angesaugte Luft ab. Dadurch erklärt sich die von Tag zu Tag etwas wechselnde Austrittstemperatur beim Versuch mit reiner Luft, Glücklicherweise war aber die für die Auswertung benutzte Differenz zwischen Gemischaustrittstemperatur und der Luftaustrittstemperatur beim vorhergehenden Reinluftversuch erheblich besser zu reproduzieren. Unter diesen Umständen ergab sich bei Wiederholung des gleichen Versuches nach mehreren Tagen für diese Differenz ein möglicher Fehler von nur ± 1 bis 2° . Innerhalb einer zusammenhängend ohne Stillsetzen und Auskühlen des Motors durchgeführten Versuchsreihe war der Fehler nur etwa $\pm 0,4^\circ$. Die Fehler der einzelnen Thermometerablesung betragen dabei $\pm 0,2^\circ$. Das Brennstoffverhältnis konnte auf etwa $\pm 1/2\%$ genau bestimmt werden. Die Genauigkeit der Drehmomentmessung war $\pm 0,02$ kg, bezogen auf einen Hebelarm von 716 mm, aber die Reproduzierbarkeit einer Messung war nur auf $\pm 0,1$ kg möglich wegen der oben schon erwähnten Schwankungen der Reibungsverhältnisse.

4. Hilfsmittel für die Auswertung der Versuche

In den folgenden, die Versuchsergebnisse zusammenfassenden Kurventafeln ist das Verdichtungsverhältnis stets in der üblichen Weise als Verhältnis der vom Kolben in den beiden Totlagen abgegrenzten Volumina angegeben. Das wirkliche Verdichtungsverhältnis ist aber kleiner, da das Ansaugventil erst λ_7 nach dem unteren Totpunkt geschlossen ist. In Tabelle 1 sind das in üblicher Weise angegebene Verdichtungsverhältnis und das einem plötzlichen Schluß des Ansaugventils λ_7 nach dem unteren Totpunkt entsprechende berichtigte Verdichtungsverhältnis ϵ_7 einander gegenübergestellt. Die endliche Schließdauer des Ventils erhöht das tatsächliche Verdichtungsverhältnis etwas über ϵ_7 , andererseits setzt der Wärmeaustausch mit der Wand die Verdichtungs-

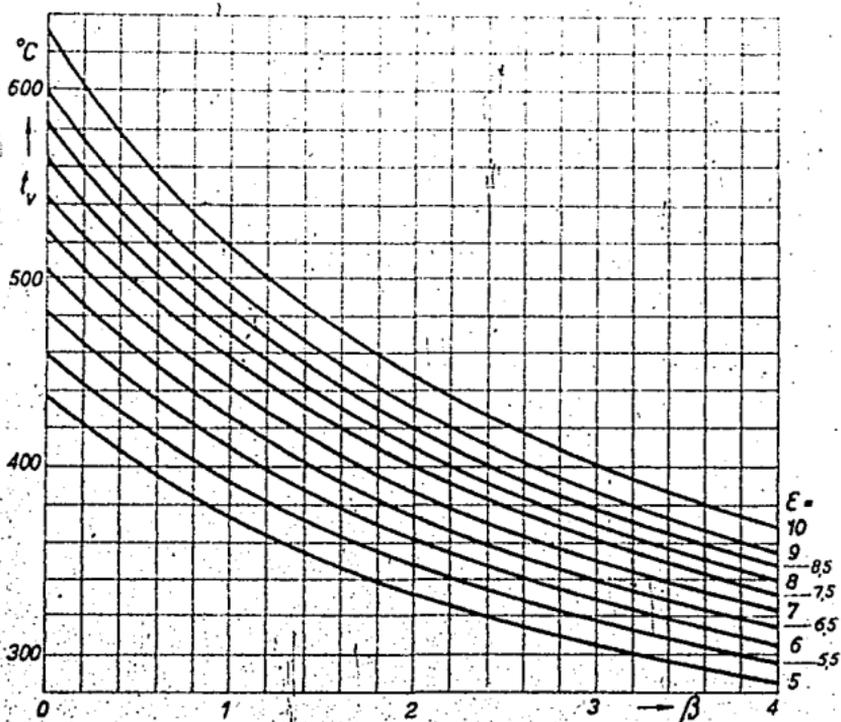


Abb. 5

Endtemperatur t_v der adiabatischen Verdichtung des Versuchsmotors in Abhängigkeit vom Brennstoffverhältnis β und vom Verdichtungsverhältnis ϵ für eine Anfangstemperatur des Gemisches von 140°C

endtemperatur etwas herab. Für die Berechnung der Verdichtungs- und Temperatur wird daher zweckmäßig mit ϵ und adiabatischer Verdichtung gerechnet.

Um für jeden Versuch am Motor schnell die Verdichtungs- und Temperaturen t_2 ermitteln zu können, sind diese in Abbildung 5 für eine Anfangstemperatur des Gemisches von 140°C in Abhängigkeit vom Brennstoffverhältnis β und vom Verdichtungsverhältnis ϵ dargestellt. Die Kurven sind unter Annahme adiabatischer Verdichtung mit dem richtigen Verdichtungsverhältnis ϵ_b berechnet, aber der leichteren Benutzung halber mit den üblichen Verdichtungsverhältnissen ϵ beschriftet. Als typischer Brennstoff wurde dabei Oktan zugrunde gelegt mit Werten für das Verhältnis der spezifischen Wärmen, die nach G. Dammköhler für eine mittlere Verdichtungs- und Temperatur von 500°C ermittelt wurden und die in Tabelle 2 für verschiedene Brennstoffverhältnisse angegeben sind. Die Kurven zeigen die recht erhebliche Änderung der Verdichtungs- und Temperatur mit dem Mischungsverhältnis.

Tabelle 1

Berichtigung der Verdichtungsverhältnisse

ϵ = Verdichtungsverhältnis, in üblicher Weise aus dem Verhältnis der Zylinderinhalte an den Totpunkten ermittelt.

ϵ_b = Verdichtungsverhältnis, berichtigt unter Berücksichtigung des verspäteten Ventilschlusses.

ϵ	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0
ϵ_b	4,52	4,96	5,40	5,84	6,28	6,72	7,16	7,60	8,04	8,92

Tabelle 2

Adiabatenexponent $\kappa = c_p/c_v$ eines Oktan-Luft-Gemisches
in Abhängigkeit vom Brennstoffverhältnis β

β	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
κ	1,360	1,322	1,298	1,274	1,252	1,239	1,225	1,211	1,200

Tabelle 3

Die untersuchten Kraftstoffe

Kraftstoff Nr.	Art des Kraftstoffes	Oktanzahl		Zusammensetzung, Anteile in Volumen-Proc.						Theoret. Heizwert je Kraftstoff	
		Nennwert	gemessen	Acetylen	Propen	Buten	Acetylen	Propen	Buten		
		O. Z.	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	
1	Handelsübliches „Grande-Benzin“	58	56,4	0	8	—	—	7,4	—	0	11,88
2	Ungebleites „Flieger-Benzin“	71	72,0	0	5	—	—	4,1	—	0	11,91
3	Fliegerkraftstoff I	87	—	—	—	—	—	17,0	—	0,07	11,74
4	Fliegerkraftstoff II	87	88,1	—	—	—	—	9,0	13,7	0,08	11,85
5	Fliegerkraftstoff III	87	90,6	—	—	—	—	8,5	11,2	0,09	11,86
6	Sonderkraftstoff	100	—	0	2	—	—	10,0	—	0,18	11,32
7	Isoktan rein	100	—	0	0	100	0	0	0	0	15,18
8	Äthylalkohol	99,5 ¹⁾	—	99,9	0	0	0	0	0	0	9,04
9	Benzol techn. rein	108 ²⁾	—	0	0	0	100,0	0	0	0	13,33 ³⁾
10	Eichbenzin I. G. 7 der I. G. Farben	44,6	44,6	0	0,6	77	2,4	20,0	0	—	15,0
11	Eichbenzin I. G. 7 + 1 cm ³ Pb (A) ₄ je l	74,5	73,1	0 ³⁾	0,6	77	2,4	20,0	0,1	—	15,0
12	Eichbenzin I. G. 7 + 1,53 cm ³ Eth je l	74,5	73,2	0	0,6	77	2,4	20,0	0,1	—	15,0
13	Kraftstoff Nr. 2 + 1,3 cm ³ Eth je l	87	87,8	0	5	—	—	4,1	—	0,085	14,94

¹⁾ Nach W. Jost: „Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen“, Berlin, Springer, 1930, S. 520.

²⁾ Extrapoliert aus Angaben der I. G.

³⁾ Für Techn. Benzol (mit etwas Toluol).

4. Versuchsergebnisse

a. Die untersuchten Kraftstoffe

Die bei den Versuchen benutzten Kraftstoffe sind mit ihren Haupteigenschaften in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Nummern am linken Rande der Tabelle dienen im folgenden zur kurzen Kennzeichnung der Kraftstoffe. Die Oktanzahlen sind nach der Motormethode ermittelt. Unter Nennoktanzahl ist die handelsübliche Angabe verstanden. Die gemessenen Oktanzahlen wurden freundlicherweise an einigen Kraftstoffen vom technischen Prüfstand Oppau der I. G. Farbenindustrie A.-G. mit dem I. G.-Prüfmotor für uns bestimmt. Bei der Zusammensetzung sind nur diejenigen Bestandteile in Volumprozenten angegeben, auf die sich die Analyse erstreckte. Eine Null bedeutet, daß der betreffende Bestandteil nicht vorhanden war, ein Strich dagegen, daß seine Menge nicht bestimmt wurde.

Die Fliegerkraftstoffe Nr. 3, 4 und 5 mit der Nennoktanzahl 87 wurden eigentlich als Kraftstoffe gleicher Art bezogen. Da sich nicht unerhebliche Unterschiede erst bei der Auswertung der Vorreaktionsversuche zeigten, wurde versäumt, von Kraftstoff Nr. 3 die Oktanzahl nachprüfen zu lassen, sie wird aber zwischen 89 und 90 liegen. Von Kraftstoff Nr. 4 war nicht genügend vorhanden, um ein vollständiges Versuchsprogramm durchführen zu können, es wird daher von der Wiedergabe der Versuche abgesehen, zumal sie nicht wesentlich von den Ergebnissen der Kraftstoffe Nr. 3 und 5 abweichen.

Die Kraftstoffe Nr. 10, 11 und 12 bestehen aus dem gleichen Eichbenzin I. G. 7 der I. G. Farbenindustrie A.-G., aber bei Nr. 10 ohne Zusatz, bei Nr. 11 mit Zusatz von 1 cm^3 Bleitetraäthyl je Liter, bei Nr. 12 mit Zusatz von $1,53 \text{ cm}^3$ Ethylfluid je Liter. Da $1,53 \text{ cm}^3$ Ethylfluid gerade 1 cm^3 Bleitetraäthyl enthalten, ist also die zugesetzte Menge Bleitetraäthyl in beiden Fällen die gleiche.

Der Kraftstoff Nr. 13 ist der gleiche wie Nr. 2, aber mit Zusatz von $1,3 \text{ cm}^3$ Ethylfluid je Liter.

b. Abhängigkeit der Vorreaktionen von Gemischzusammensetzung und Verdichtungsverhältnis

Den typischen Verlauf der Temperatursteigerung eines Gemisches durch Vorreaktionen zeigt Abbildung 6 für einen Fliegerkraftstoff der Nennoktanzahl 87 mit $0,07\%$ Bleitetraäthyl, der in Tabelle 3 unter Nr. 3 angeführt ist. In Wirklichkeit wird, wie oben unter a angegeben, die

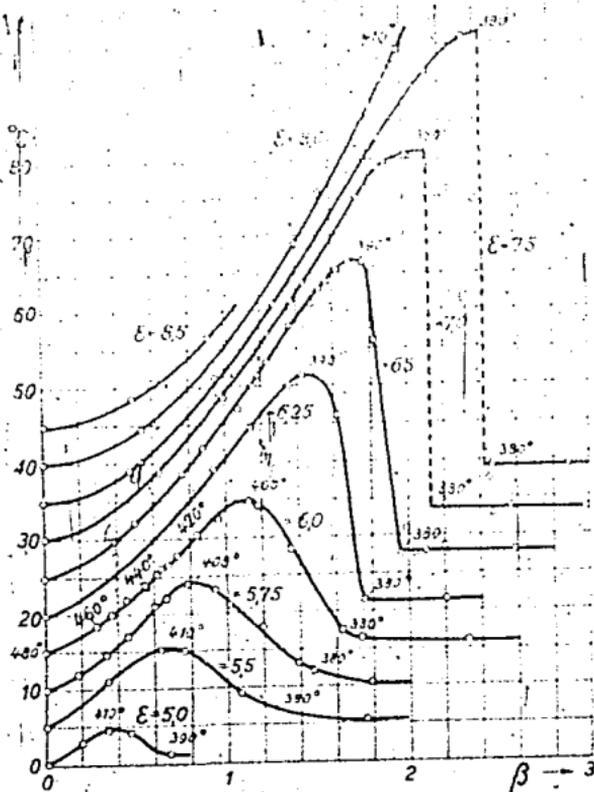


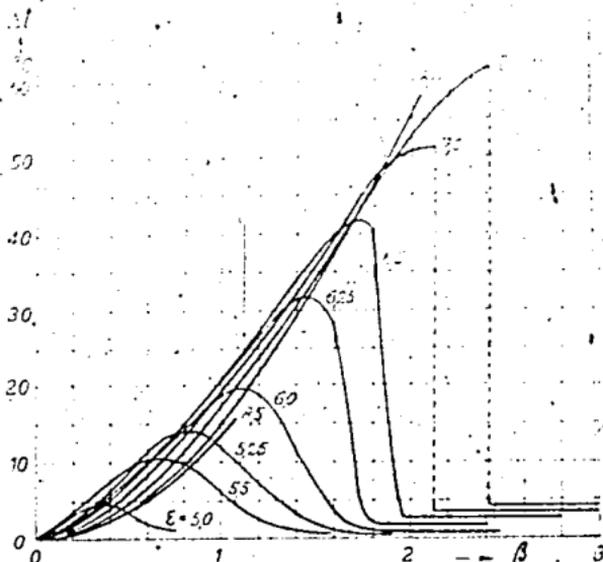
Abb. 6

Temperatursteigerung Δt des Kraftstoff-Luft-Gemisches durch Vorreaktionen für Kraftstoff Nr. 3 (O. Z. 87) in Abhängigkeit vom Brennstoffverhältnis β und Verdichtungsverhältnis ϵ bei $n = 1800/\text{min}$, Gemischeintrittstemperatur $t_{e'} = 140^\circ \text{C}$, Kühlmitteltemperatur $t_k = 140^\circ \text{C}$

(In Abb. 6 sind die Kurven der Deutlichkeit halber durch Parallelverschieben nach oben auseinandergezogen. In Abb. 7 sind sie in richtiger Lage übereinander gezeichnet. Die einzelnen Punkten der Abb. 6 beigeschriebenen Temperaturen sind die berechneten Höchsttemperaturen der adiabatischen Verdichtung)

Oktanzahl etwas größer gewesen sein. In der Abbildung ist für verschiedene Verdichtungsverhältnisse die von der Austrittstemperatur reiner Luft an gezählte Temperatursteigerung Δt des Gemisches über dem Brennstoffverhältnis β aufgetragen. Um die Lage und die für Motorversuche sehr geringe Streuung der vielen Versuchspunkte zu zeigen, sind die Kurven durch Parallelverschiebung nach oben auseinandergerückt. In Wirklichkeit beginnen sie alle im Koordinatenursprung. In Abbildung 7

Temperatursteigerung Δt des Kraftstoff-Luft-Gemisches durch Vorreaktionen für Kraftstoff Nr. 3 (O. Z. 37) in Abhängigkeit vom Brennstoffverhältnis β und Verdichtungsverhältnis ϵ ; bei $n = 1300$ min, Gemischeintrittstemperatur $t_e = 110$ C, Kühlmitteltemperatur $t_k = 110$ C.



sind dieselben Kurven aber ohne die einzelnen Meßpunkte in richtiger Lage übereinander gezeichnet. Die Vorreaktionen beginnen bei diesem Brennstoff merklich zu werden etwa bei einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 5$, sie nehmen mit steigendem Brennstoffverhältnis zunächst zu und zeigen hierbei ein ausgeprägtes Maximum bei einem sehr armen Gemisch von $\beta = 0,37$. Bei weiterer Zunahme des Brennstoffverhältnisses nehmen die Vorreaktionen wieder ab und sind bei $\beta = 1$, also gerade bei stöchiometrischem Gemisch praktisch verschwunden. Mit steigendem Verdichtungsverhältnis werden die Kurven der Übertemperatur höher, das Maximum verschiebt sich nach größeren Brennstoffverhältnissen und der Abfall der rechten Seite wird steiler. Bei einem Verdichtungsverhältnis von etwa $\epsilon = 7,0$ an geht der Abfall in einen unstetigen Sprung über, der auch bei wiederholten Versuchen stets an der gleichen Stelle auftritt. Links des Sprunges erhält man die höchsten Werte der Temperatursteigerung durch Vorreaktionen, rechts davon bei nur wenig größerem Brennstoffverhältnis sind die Vorreaktionen nahezu auf Null zurückgegangen, und es bleibt nur eine geringe, vom Brennstoffverhältnis praktisch unabhängige, aber mit steigendem Verdichtungsverhältnis etwas zunehmende Temperatursteigerung übrig. Erhöht man das Verdichtungsverhältnis auf $\epsilon = 7,5$, so verschiebt sich die Sprungstelle zu noch reicheren Gemischen, und ihre Höhe wird größer. Bei $\epsilon = 8,0$ gelingt es

nicht mehr, die Sprünzstelle von links her zu erreichen, sondern etwa bei dem Brennstoffverhältnis $\lambda = 2,2$ setzen erst im Auspuffrohr und dann auch im Zylinder Selbstzündungen ein, die im Zylinder durchaus harten Klopfstoßen abnichten. Bei $\lambda = 2,2$ können diese harten Selbstzündungen bereits unterhalb des stochiometrischen Brennstoffverhältnisses $\lambda = 1$ nach Eintreten solcher Selbstzündungen müßten die Versuche abgebrochen werden, da der Motor sich rasch erwärmt und knallend von selbst weiterlief. Nur wenn seine Drehzahl vom Antrieb her rasch um etwa 200 U/min gesteigert würde, gelang es, die Selbstzündungen wieder zu beseitigen, ähnlich wie auch das Klopfen durch Schnellerlaufenlassen beseitigt werden kann, wenn damit keine Temperaturerigerung verbunden ist.

Mit Hilfe der Abbildung 5 wurden die Endtemperaturen der adiabatischen Verdichtung für einige ausgewählte Punkte der Kurven der Vorreaktionen ermittelt und in Abbildung 6 eingetragen. Dabei zeigt sich folgendes:

Geht man von reichen Gemischen kommend zu kleineren Brennstoffverhältnissen, so beginnt für alle Verdichtungsverhältnisse das sprunghafte oder allmähliche Einsetzen der Vorreaktionen bei der gleichen Endtemperatur der adiabatischen Verdichtung von etwa 380° C. Das Maximum der Vorreaktionen tritt bei adiabatischen Verdichtungs-temperaturen von 380 bis 410° C auf. Links vom Maximum nimmt für jedes Verdichtungsverhältnis die adiabatische Verdichtungs-temperatur mit abnehmendem Brennstoffverhältnis weiter zu, wie das die an Kurve $c = 6,0$ angeschriebenen Temperaturen zeigen. Aus diesem Verhalten folgt, daß die Stärke der Vorreaktionen wesentlich durch die Endtemperatur der adiabatischen Verdichtung und — wie wir später bei den Versuchen über den Einfluß der Drehzahl sehen werden — deren Einwirkungsdauer bestimmt ist. Bei reicheren Gemischen tritt wegen ihres kleineren Adiabatenexponenten diese Temperatur erst bei größeren Verdichtungsverhältnissen auf, dafür ist aber wegen des höheren Brennstoffgehaltes der Umsatz und damit die Temperatursteigerung größer.

Überraschend bleibt das sprunghafte Aufhören der Vorreaktionen bei höheren Verdichtungsverhältnissen. Es sieht so aus, als ob die Brennstoffmoleküle selbst bei genügender Konzentration Radikale einfangen und Reaktionsketten abbrechen.

Bemerkenswert ist auch der Kurvenverlauf links des Maximums. Hier liegen, wie Abbildung 7 zeigt, die Kurven mit höheren Verdichtungsverhältnissen unter denen mit niederen. Bei demselben Brennstoffverhält-

mit hat die stärkere Verdichtung auf der höheren Lufttemperatur bei einem geringeren Einlaß der Vorreaktion nach zur Folge, als die stärkere Verdichtung mit der kleineren Lufttemperatur. Die bei niedrigeren Lufttemperaturkoeffizienten von Reaktionen sind wiederholt zu beobachten. Auch auf die von Townsend und Mitarbeitern bei der Verflüssigung von Kohlenwasserstoff-Luftgemischen beobachteten beiden Zündgrenzen sei hier hingewiesen.

Die Verminderung des zum Antrieb des Motors erforderlichen Drehmomentes M_d durch die Vorreaktionen zeigt für den selben Kraftstoff die Abbildung 8. Die Abnahme entspricht im großen ganzen der Temperatursteigerung, doch sind diese Messungen wegen der veränderlichen Reibungsverhältnisse des Motors nur von beschränkter Genauigkeit.

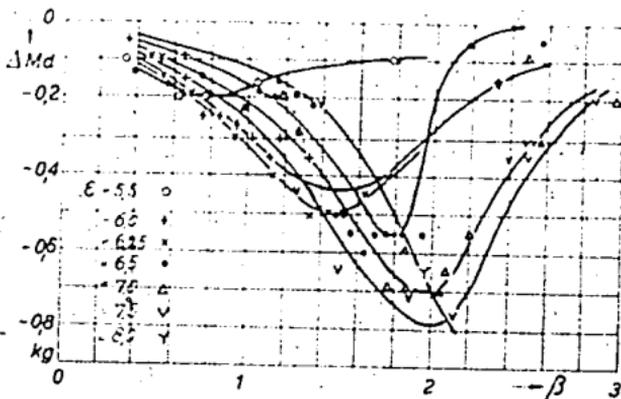


Abb. 8

Verminderung ΔM_d des notwendigen Antriebsdrehmomentes M_d des Motors durch Vorreaktionen bei Kraftstoff Nr. 3 in Abhängigkeit vom Brennstoffverhältnis β und Verdichtungsverhältnis ϵ . Als Ordinate ist in der Abbildung das Gewicht in kg am Hebelarm 0,716 m benutzt. Dem oberen Rande des Koordinatennetzes ($\Delta M_d = 0$) entspricht bei Kurve $\epsilon = 6.5$ ein Drehmoment $M_d = 2,75$ kg, dem unteren Rande ($\Delta M_d = 0,9$ kg) ein solches von $M_d = 1,85$ kg. Für die anderen Verdichtungsverhältnisse gelten etwas verschiedene Anfangswerte der Zählung des Drehmomentes M_d infolge von Änderungen der Reibungsverhältnisse des Motors.

c. Einfluß der Oktanzahl und der Kraftstoffzusammensetzung

Für ein handelsübliches Grundbenzin (Nr. 1 der Tabelle 3) mit der Oktanzahl 56,4 zeigt die Abbildung 9 die Temperatursteigerung durch Vorreaktionen. Der Charakter der Kurven ist ähnlich wie bei dem Kraftstoff Nr. 3 mit der Oktanzahl 87, aber bei demselben Verdichtungs-

Die Kurven zeigen die Temperaturverhältnisse der Vorreaktion vor dem Sprung im Verhältnis der Dichte zur Dichte des Gemischs oberhalb des Sprunges. Die Kurven sind durch die Kurven der Abbildung 7 für Kraftstoff Nr. 1 bei $\beta = 0,7$ und $\beta = 1,0$ mit den Kurven bei $\beta = 1,0$ und $\beta = 1,5$ für die bezeichneten Punkte der Kurven berechnet. Die Kurven zeigen die Temperaturverhältnisse vor dem Sprung im Verhältnis der Dichte zur Dichte des Gemischs oberhalb des Sprunges. Die Kurven sind durch die Kurven der Abbildung 7 für Kraftstoff Nr. 1 bei $\beta = 0,7$ und $\beta = 1,0$ mit den Kurven bei $\beta = 1,0$ und $\beta = 1,5$ für die bezeichneten Punkte der Kurven berechnet. Die Kurven zeigen die Temperaturverhältnisse vor dem Sprung im Verhältnis der Dichte zur Dichte des Gemischs oberhalb des Sprunges. Die Kurven sind durch die Kurven der Abbildung 7 für Kraftstoff Nr. 1 bei $\beta = 0,7$ und $\beta = 1,0$ mit den Kurven bei $\beta = 1,0$ und $\beta = 1,5$ für die bezeichneten Punkte der Kurven berechnet.

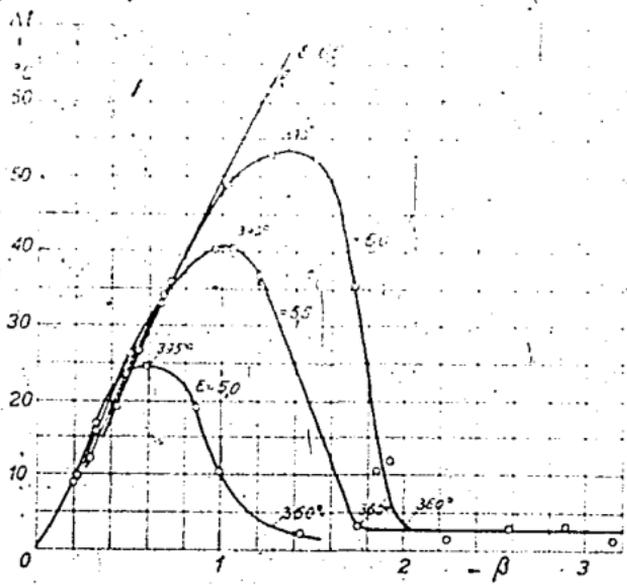


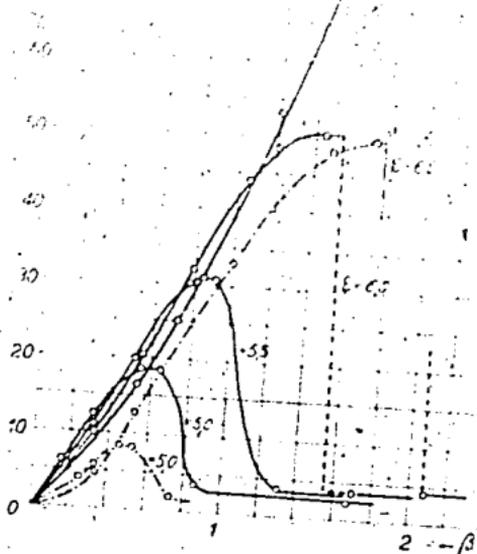
Abb. 9

Kraftstoff Nr. 1
(O. Z. 56,4)

verhältnis sind die Kurven mehr als doppelt so hoch, sie beginnen steiler, und die Kurven höheren Verdichtungsverhältnisses liegen anfangs nicht so tief unter denen mit geringerer Verdichtung. Sprungstellen lassen sich hier nicht mehr erreichen, da beim Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 6,5$ bei Temperatursteigerungen von etwa 70°C bereits Selbstzündungen auftreten.

Die Versuchsergebnisse an einem ungebleichten Fliegerbenzin der O. Z. 72 (Kraftstoff Nr. 2 der Tabelle 3) zeigt Abbildung 10. Aus diesem Kraftstoff wird durch Zusetzen von Bleiteträthyl Fliegerbenzin der O. Z. 87 hergestellt. Das Ausmaß der Vorreaktionen liegt, wie zu erwarten, zwischen den Werten mit O. Z. 56,4 der Abbildung 9 und mit O. Z. 87 der Abbildung 7. Beim Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 6,0$ erscheint wieder der Sprung. Bei $\epsilon = 6,5$ läßt sich die Sprungstelle von der Seite ärmerer Gemische her nicht mehr erreichen, da vorher Selbstzündungen auftreten. Ein Versuch mit reichem Gemisch von $\beta = 2,08$, bei dem die Vorreak-

Ausgezogene Kurven: Kraftstoff Nr. 2
 (O. Z. 72,0). Strichpunktierte Kurven:
 Kraftstoff Nr. 13 (O. Z. 87,8), aus Nr. 2
 durch Zusatz von 1,3 cm³ Ethylfluid
 je Liter hergestellt

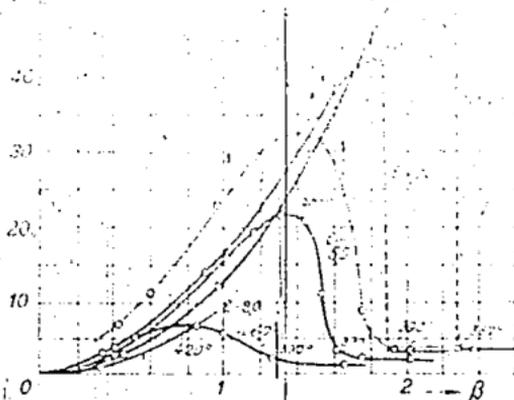


tionen schon wieder verschwunden sind, zeigt aber, daß die Sprungstelle
 dicht oberhalb $\beta = 2,0$ liegt.

Die in Abbildung 10, eingetragenen strichpunktierten Kurven gelten
 für Kraftstoff Nr. 13, der aus Kraftstoff Nr. 2 durch Zusatz von 1,3 cm³
 Ethylfluid je Liter, entsprechend 0,85 cm³ reinem Bleitetraäthyl her-
 gestellt wurde, wodurch die Oktanzahl auf 87,8 ansteigt. Der Vergleich
 dieser Kurven mit Abbildung 7 zeigt, daß der Kraftstoff durch den Blei-
 zusatz tatsächlich dem Kraftstoff Nr. 3 mit der O. Z. 87 ähnlich geworden
 ist. Die Kurven sind niedriger, und ihre Anfangsneigung ist darüber
 hinaus viel flacher geworden.

Die Messungen an einem gebleiten Fliegerbenzin der O. Z. 90,6 (Kraft-
 stoff Nr. 5 der Tabelle 3) zeigt Abbildung 11, die Kurven sind ganz ähn-
 lich denen des Fliegerbensins O. Z. 87 (Nr. 3 der Tabelle 3), nur sind die
 Vorreaktionen, wie zu erwarten, etwas geringer. Die strichpunktierte
 Kurve bezieht sich auf mit Sauerstoff angereicherte Luft, worauf wir
 später zurückkommen.

Ein so ausgeprägter Einfluß des Bleizusatzes ist aber keineswegs immer
 vorhanden, wie die in Abbildung 12 wiedergegebenen Versuche mit Eich-
 benzin der I. G. (Kraftstoff Nr. 10 der Tabelle 3) zeigen. Ohne Bleizusatz
 hat dieses Eichbenzin die Oktanzahl 44,6 und zeigt schon bei $\epsilon = 5,0$



Kraftstoff Nr. 10 (O.Z. 99,6). Die strichpunktierte Kurve gilt für Betrieb mit sauerstoffangereicherter Luft

starke Vorreaktionen, die bei diesem niedrigen Verdichtungsverhältnis für $\beta = 0,9$ schon zu Temperatursteigerungen von 65° führen. Die Kurve a in Abbildung 12 steigt fast geradlinig an und hat bereits unterhalb des stöchiometrischen Brennstoffverhältnisses ihre Sprungstelle.

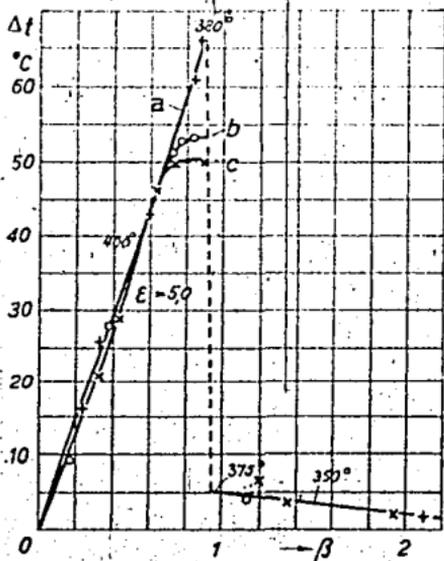


Abb. 12

Kraftstoff Nr. 10 (O.Z. 44,6) Kurve a
 Kraftstoff Nr. 11 (O.Z. 73,1) Kurve b
 Kraftstoff Nr. 12 (O.Z. 73,2) Kurve c
 Bei allen Kurven ist das Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 5$

Bei diesem Verdichtungsverhältnis tritt der Motor bei technischem Gemisch bereits vor Ablauf der Periode der Verbräunung. Der Zusatz von Bleitetraäthyl (Kraftstoff Nr. 12 der Tabelle 3) der Oktanzahl auf 100 setzt sich verändert, so daß ϵ im Verhältnis 10 zeigt, den Kofferserhalt weniger mit der stark spitzeren vor der Zündstelle wurde abgerundet, diese selbst blieb unverändert. Um die überraschende Lage des nachzuprüfen, wurde dem gleichen Kraftstoff (einem reines Bleitetraäthyl) zugesetzt (Kraftstoff Nr. 11 der Tabelle 3); das ist dieselbe Menge wie im Ethylfluid bei Kraftstoff Nr. 12, denn 1,73 cm³ Ethylfluid enthalten 1,0 cm³ Bleitetraäthyl. Mit dieser Mischung ergab sich aber fast dieselbe Kurve (c in Abbildung 12) wie mit Ethylfluid. Versuche mit anderen Verdichtungsverhältnissen konnten nicht geführt werden, da der Motor keine kleineren zuließ und da größere sehr bald zu Selbstzündungen führten.

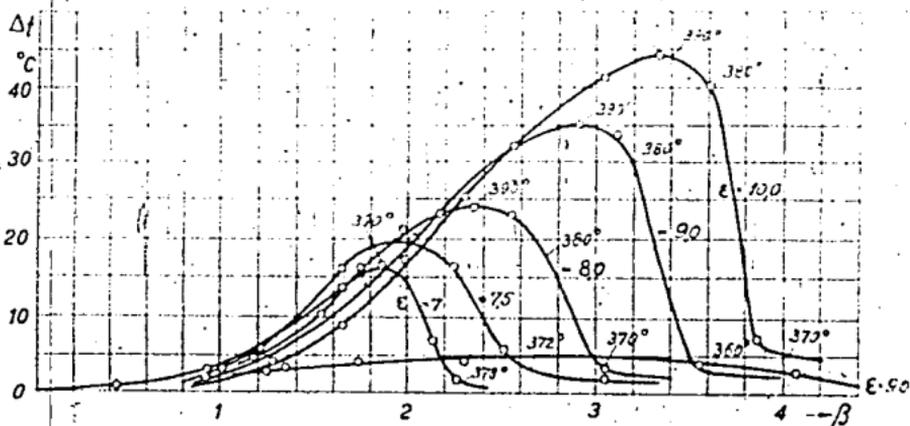


Abb. 13

Kraftstoff Nr. 7 (O. Z. 100) reines Isooktan. Die flache Kurve bei $\epsilon = 9,0$ gilt für Kraftstoff Nr. 6 (O. Z. 100) mit 40% Aromatengehalt

Für reines Isooktan mit der Oktanzahl 100 zeigt Abbildung 13 die Kurven der Temperatursteigerung. Die Art der Kurven ist wieder dieselbe, ihre Höhe bei dem gleichen Verdichtungsverhältnis ist aber wesentlich niedriger als bei Oktanzahl 87. Beim Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10$ ist der Verlauf der Kurve noch stetig und ohne Sprungstelle. Erhöht man die Verdichtung auf 11, so treten bereits bei Brennstoffverhältnissen von etwa 1 stark knallende Selbstzündungen auf, die das Erreichen einer Kurve mit Sprungstelle verhindern. Bemerkenswert ist die starke Ver-

Schreibung der ganzen Kurvenschere nach reiferen Gemischen hin. In der Nähe des stöchiometrischen Gemisches, also im Gebiet des adiabatischen Motorbetriebes, sind die Vorreaktionen sehr schwach.

In der Abbildung ist noch eine flache Kurve bei $\epsilon = 10.0$ aufgetragen, sie bezieht sich auf einen Sonderkraftstoff der Oktanzahl 100, aber mit etwa 10% Aromatengehalt, wahrscheinlich in Form von Benzol. Im Gegensatz zu aromatenreichen Kraftstoffen gleicher Oktanzahl sind hier die Vorreaktionen sehr gering.

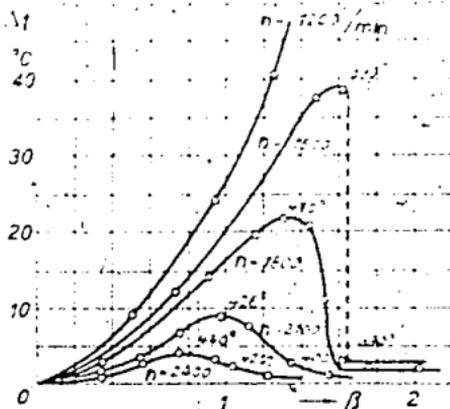
Bei reinem Benzol und bei Alkohol konnten Vorreaktionen nicht festgestellt werden, steigerte man bei Benzol die Verdichtung, so trat, ohne daß vorher Temperatursteigerungen zu beobachten waren, plötzlich Selbstzündung auf, und zwar bei 110° C Gemischeinlaßtemperatur und einer Drehzahl von 1800 min etwa bei $\epsilon = 11.0$. Ähnlich verhielt sich Alkohol, bei dem wegen der hohen Verdampfungswärme eine verstärkte Heizung des eintretenden Gemisches nötig war.

Aus dem Vorstehenden geht hervor, daß nur bei chemisch ähnlichen Kraftstoffen von einer einigermaßen eindeutigen Beziehung zwischen Oktanzahl und der Intensität der Vorreaktionen gesprochen werden kann. Die Untersuchung der Vorreaktionen läßt eben sehr viel mehr individuelle Eigentümlichkeiten des Kraftstoffes erkennen, als durch die Angabe einer einzelnen Größe, wie der Oktanzahl, zum Ausdruck gebracht werden können.

Eine gemeinsame Eigenschaft läßt sich aber aus allen aufgenommenen Kurven des Verlaufes der Vorreaktionen herauslesen, wenn man für die Kurvenpunkte mit Hilfe der Kurventafel Abbildung 5 die jeweiligen Höchsttemperaturen der adiabatischen Verdichtung ermittelt. In den Abbildungen sind diese Temperaturen einzelnen Kurvenpunkten beigeschrieben. Für dasselbe Verdichtungsverhältnis ϵ sinkt diese Höchsttemperatur mit zunehmendem Brennstoffverhältnis, weil damit auch der adiabatische Exponent kleiner wird. Überraschenderweise liegen aber die Maxima der Kurven für dieselbe Drehzahl bei allen untersuchten Kraftstoffen und allen Verdichtungsverhältnissen bei nahezu derselben Höchsttemperatur der adiabatischen Kompression von 390 bis 400° C. Auch die Temperaturen, bei denen von reichen Gemischen kommend die Vorreaktionen einsetzen, sind wenig verschieden und liegen zwischen 360 und 390° C. Daraus geht hervor, daß die Temperatur und, wie wir später sehen werden, deren Einwirkungsdauer die wesentlichen Einflußgrößen für die Vorreaktionen sind.

Die beschriebenen Versuche wurden des besseren Vergleiches halber mit Hilfe unter denselben auf Seite 14 angegebenen Versuchsbedingungen ausgeführt. Nun soll die Wirkung der Änderung dieser Bedingungen untersucht werden. Bei dem Kraftstoff Nr. 5 (O. Z. 90,6) wurde für das Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 6,5$ die Drehzahl geändert, während Gemischeintrittstemperatur und Kühlmitteltemperatur bei 140°C blieben. Das Ergebnis zeigt Abbildung 14; mit steigender Drehzahl nehmen die Vorreaktionen

Abbildung 14



Einfluß der Drehzahl n auf die Temperatursteigerung M durch Vorreaktionen des Kraftstoffes Nr. 5 (O. Z. 90,6) beim Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 6,5$, der Gemischeintrittstemperatur $t_e = 140^\circ\text{C}$, der Kühlmitteltemperatur $t_k = 140^\circ\text{C}$.

in sehr starkem Maße ab, und es bedarf, wie die in Abbildung 14 eingezeichneten gerechneten Endtemperaturen der adiabatischen Verdichtung zeigen, höherer Temperaturen zum Einsetzen der Reaktionen, wobei die wirklichen Endtemperaturen der Verdichtung bei höheren Drehzahlen wegen der kleineren Wärmeabfuhr an die Wände eher etwas höher sind. Daraus geht hervor, welche bedeutende Rolle die Einwirkungsdauer der Temperatur bei der Ausbildung der Vorreaktionen spielt. Bekanntlich nimmt auch die Klopfneigung von Motoren mit steigender Drehzahl ab, nur wird diese Erscheinung praktisch oft durch den Einfluß der unter sonst gleichen Bedingungen mit der höheren Drehzahl und damit höheren Leistung steigenden Temperatur der Ventile und Wände des Verbrennungsraumes überlagert.

Den Einfluß der Änderung der Gemischeintrittstemperatur t_e für $\epsilon = 6,5$, $n = 1800/\text{min}$ und eine Kühlmitteltemperatur $t_k = 140^\circ\text{C}$ zeigt Abbildung 15 für den Kraftstoff 5. Steigende Gemischeintrittstemperatur wirkt demnach ganz ähnlich wie eine Erhöhung der Verdichtung. Bei den Versuchen der Abbildung 16 wurde die Kühlmitteltemperatur t_k bei festgehal-

Abb. 15

Einfluß der Gemischeintritts-
temperatur t_e auf die Temperatur-
steigerung Δt durch Vorreaktionen
des Kraftstoffes Nr. 5 (O. Z. 90,6) bei
 $\epsilon = 6,5, t_e = 140^\circ \text{C}, t_k = 110^\circ \text{C}$

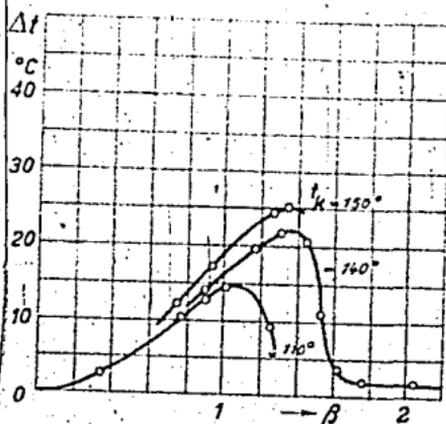
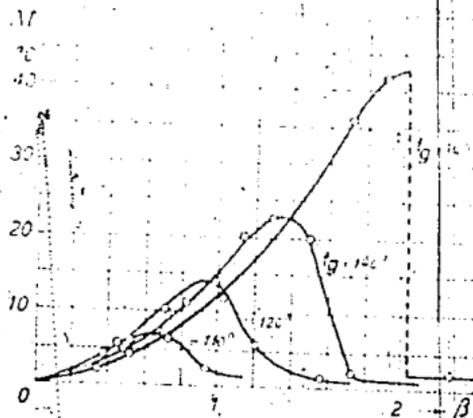


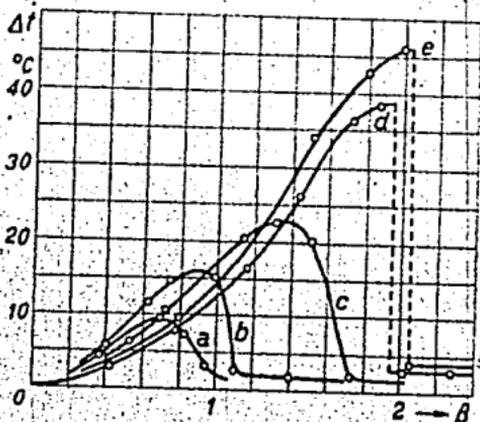
Abb. 16

Einfluß der Kühlmitteltemperatur t_k
auf die Temperatursteigerung Δt durch
Vorreaktionen des Kraftstoffes Nr. 5
(O. Z. 90,6) bei $\epsilon = 6,5,$
 $n = 1800 \text{ min}, t_e = 140^\circ \text{C}$

Abb. 17

Einfluß der Änderung verschiedener
Versuchsbedingungen auf die
Temperatursteigerung Δt durch
Vorreaktionen des Kraftstoffes Nr. 5
(O. Z. 90,6) bei $\epsilon = 6,5$

Kurve a: $n = 2100/\text{min}, t_e = 120^\circ \text{C}, t_k = 120^\circ \text{C}$
Kurve b: $n = 1800/\text{min}, t_e = 120^\circ \text{C}, t_k = 120^\circ \text{C}$
Kurve c: $n = 1800/\text{min}, t_e = 140^\circ \text{C}, t_k = 130^\circ \text{C}$
Kurve d: $n = 1800/\text{min}, t_e = 120^\circ \text{C}, t_k = 130^\circ \text{C}$
Kurve e: $n = 1650/\text{min}, t_e = 150^\circ \text{C}, t_k = 150^\circ \text{C}$



terer Gemischeintrittstemperatur verändert, und in Abbildung 17 sind beim Kraftstoff Nr. 5 bei konstantem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 6,5$ verschiedene Werte von Drehzahl, Gemischeintrittstemperatur und Kühlmitteltemperatur untersucht. Eine Steigerung der Kühlmitteltemperatur steigert demnach auch die Vorreaktionen, doch ist dieser Einfluß wesentlich kleiner als die Änderung der Gemischeintrittstemperatur, da er nur durch den Wärmeübergang von den Zylinderwänden her auf das Gemisch wirkt.

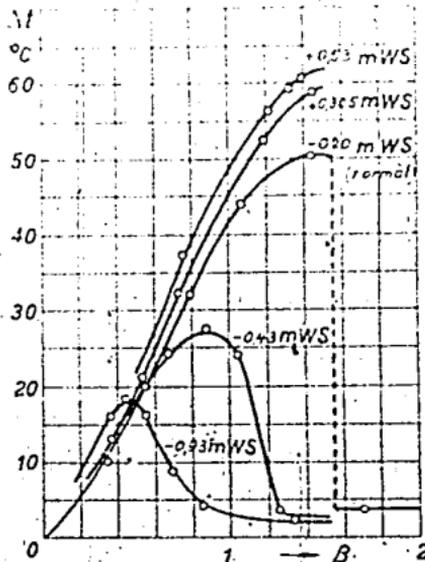


Abb. 18

Einfluß geänderten Druckes in der Ansaugleitung — angegeben in m Wassersäule Überdruck (+) oder Unterdruck (—) gegen die Atmosphäre — auf die Temperatursteigerung durch Vorreaktionen des Kraftstoffes Nr. 2 (O. Z. 72) bei $n = 1800/\text{min}$, $\epsilon = 6,0$, $t_g = 140^\circ \text{C}$, $t_k = 140^\circ \text{C}$

In Abbildung 18 sind schließlich noch Versuche mit geändertem Druck in der Ansaugleitung wiedergegeben. Der beobachtete große Einfluß des Druckes, besonders bei Unterdruck, ist aber vermutlich kein unmittelbarer, sondern auf Nebenumstände zurückzuführen.

Bei Kraftstoff Nr. 5 wurde auch ein Versuch mit sauerstoffangereicherter Luft gemacht. Bei einem Sauerstoffgehalt der angesaugten Luft vor dem Vergaser von 34 Volumprozent wurde für $\epsilon = 6,5$ die in Abbildung 11 strichpunktiert gezeichnete Kurve gemessen, wobei das Brenn-

stoffverhältnis auf die erhöhte Sauerstoffmenge bezogen ist. Die Vorreaktionen nehmen also etwa in dem Maße der Steigerung des Sauerstoffgehaltes zu. Das Maximum der Kernverschiebung dabei aber nicht merklich. Bei weiterer Erhöhung des Sauerstoffgehaltes auf 12 Volumprozent traten heftige Zündungen auf.

c. Indikatorzündlampe, chemische Untersuchungen und verschiedene Beobachtungen

Bei einigen Versuchen wurde der Druckverlauf im Zylinder mit einem Quarzdruckgeber über der Zeit aufgenommen. Solche Aufnahmen zeigt Abbildung 19, wobei mehrere Arbeitsspiele auf denselben Film geschrieben sind, der um eine nicht ganz synchron mit dem Versuchsmotor laufende Trommel gelegt war. Abbildung 19a wurde mit ungebleitem Fliegerbenzin (Kraftstoff Nr. 2 der Tabelle) mit O. Z. 72 bei $n = 1800$ min, $\epsilon = 6,5$, Gemischeintrittstemperatur 140, C. Kühlmitteltemperatur 110, C.

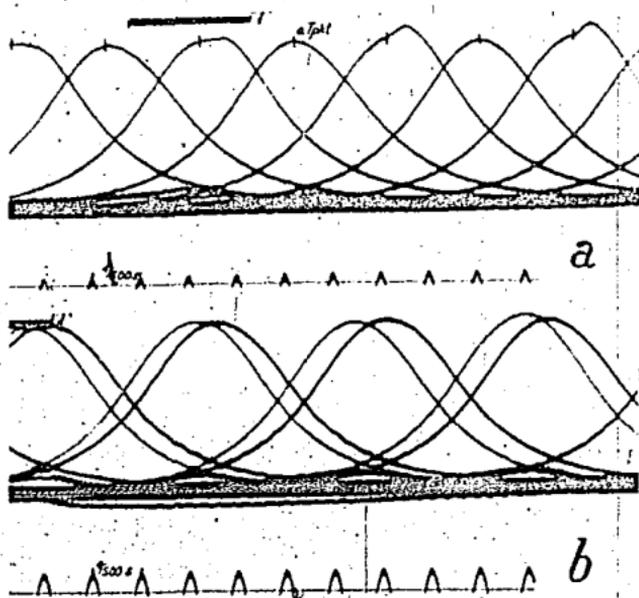


Abb. 19.

Mit Quarzdruckgebern aufgenommene Druckzeitdiagramme der Vorreaktionen im Motor bei $n = 1800$ /min und dem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 6,5$

a) für ungebleites Kraftstoff O. Z. 72 (Nr. 2 der Tabelle 3)

b) für denselben Kraftstoff, aber mit Bleisatz und O. Z. 87,8 (Nr. 13 der Tabelle 3).

Die Zacken am unteren Rande sind Zeitmarken, ihr Abstand entspricht $1/500$ sec. Die Zeit läuft von links nach rechts.

betreffend den Gemisch von ... Δt , entsprechend einer Temperatursteigerung ... (vgl. Abbildung 10) aufgenommen. Die unregelmäßigen Höcker rechts neben den oberen Totpunkten der Kurven zeigen die Vorreaktionen. Bemerkenswert ist, daß sie nicht bei jedem Arbeitsspiel auftreten, sondern ziemlich genau jedes zweite Mal. Doch sind auch die Kurven ohne Höcker nicht ganz symmetrisch, sondern auf der Expansionsseite etwas völliger, d. h. die Vorreaktionen sind bei ihnen wohl angelaufen, aber nicht ganz zur Entwicklung gekommen. Wenn nur bei jedem zweiten Huh eine ausgebildete Vorreaktion eintritt und im Mittel eine Temperatursteigerung $\Delta t = 75$ beobachtet wird, so muß die Temperatursteigerung bei den wirksamen Hühben noch erheblich größer sein, wenn sie auch nicht dem doppelten Wert gleichkommt. Leider reicht die Genauigkeit der Diagramme und besonders der Lage der Totpunktmarke nicht aus, um den Anteil der einzelnen Arbeitsspiele an den Vorreaktionen genauer zu ermitteln.

Aus dem regelmäßigen Wechsel zwischen stark ausgeprägten und fast unmerklichen Vorreaktionen in Abbildung 19a kann man folgendes schließen: Die nach einer ausgeprägten Vorreaktion entstandenen Reaktionsprodukte, von denen ein Teil mit dem Restgas der neuen Ladung beigemischt wird, begünstigen das Einsetzen der Vorreaktionen nicht. Anders ist es aber bei einer nur schwach angelaufenen und vorzeitig abgebrochenen Vorreaktion. Hier haben die mit dem Restgas der neuen Ladung zugesetzten, aus den ersten Phasen der Vorreaktion stammenden Reaktionsprodukte offenbar einen stark fördernden Einfluß auf die Vorreaktionen des nächsten Arbeitsspieles. Durch diese Überlegungen wird der auch bei anderen Kraftstoffen beobachtete, mehr oder weniger regelmäßige Wechsel zwischen starken und schwachen Vorreaktionen verständlich. Von besonderem Interesse würde es sein, vergleichende chemische Analysen von Vorreaktionsprodukten verschiedener Entwicklungsstadien anzustellen.

Abbildung 19b zeigt den Druckverlauf, unter denselben Bedingungen wie in Abbildung 19a mit demselben Kraftstoff, aber nach Zusatz von 1,3 ccm Ethylfluid je Liter (Nr. 13 in Tabelle 3). Wie die strichpunktiierten Kurven in Abbildung 10 zeigen, geht die Temperatursteigerung Δt durch den Bleizusatz merklich zurück. Noch stärker ist aber die Wirkung auf den Druckverlauf: Der Höcker hinter dem oberen Totpunkt ist verschwunden, und die Kurve erscheint dem Auge fast symmetrisch, wenn sie auch bei der Expansion im Mittel höhere Drücke zeigt als bei der

Kompression. Der Bleiunatz beseitigt also die Vorreaktionen nicht, sondern er mildert sie nur und glättet die Plotzlichkeiten dieses Anstieges.

Aus den gemessenen Leuchtererscheinungen bei $\epsilon = 7,0$ ergibt sich, daß bei den Vorreaktionseffekten $\epsilon = 7,0$ der Verdichtungsdruck erreicht werden können. Es nimmt dann ein beachtlicher Teil von ϵ -Energie (etwa 15 bis 20% der Brennstoffmoleküle) an den Vorreaktionen teil. Bei sämtlichen Versuchen wurde in Übereinstimmung mit älteren Beobachtungen ein scharfer und stechender Geruch der Auspuffgase festgestellt. Die Auspuffleitung bedeckte sich mit einer braunen öligen Schmiere.

Bei dem I.G.-Eichbenzin (Nr. 10 der Tabelle 3) wurde auf unsere Veranlassung von G. Dankkötter und W. Eggersglöb eine chemische Analyse der Reaktionsprodukte durchgeführt, über die an anderer Stelle genauer berichtet wird¹⁾. Dabei lief der Motor bei dem Kompressionsverhältnis $\epsilon = 5,0$ mit einem Brennstoffverhältnis $\rho = 0,9$, Kühlmitteltemperatur 140°C , Gemischeintrittstemperatur 140°C , Drehzahl 1800/min und zeigte etwa 60° Temperatursteigerung durch Vorreaktionen (vgl. Abbildung 12 Kurve a). Die Austrittsgase wurden in hintereinander geschalteten Kühlfallen niedergeschlagen, die mit Eis, Methanoltrockeneis und flüssiger Luft gekühlt waren. Die Analyse ergab für ein Mol Kraftstoff, wenn man für diesen das Molekulargewicht 100 des Heptans annimmt, folgende in Mol je Mol Kraftstoff angegebenen Reaktionsprodukte: Aldehyde 0,141 (davon 0,084 Formaldehyd und 0,017 Acetaldehyd), Alkohole $< 0,05$, Säuren 0,024, Kohlensäure 0,0045, Wasser 1,07. Die Aldehyde bilden also, wie auch von anderer Seite festgestellt wurde, den Hauptbestandteil.

Ein bläuliches Leuchten im Zylinder wurde nur in einem Falle bei einem Sonderkraftstoff beobachtet, der als Zündbeschleuniger für Dieselöle verwandt wird und dessen Oktanzahl unter Null liegt. Dieser Kraftstoff hatte bei $\epsilon = 5,0$ und einer Gemischeintrittstemperatur von 110°C bereits sehr starke Vorreaktionen und zeichnete sich auch durch besonders scharfen Geruch des Auspuffs aus. Es ist aber nicht ausgeschlossen, daß schwache Leuchterscheinungen auch bei anderen Kraftstoffen auftreten und ihre Beobachtung nur durch Verölen des Fensters verhindert wurde. Bei einigen Versuchen reichte die Arbeit der Vorreaktionen aus, um den Motor ohne Zündung und ohne Antrieb im Gang zu halten, wobei er ohne Verbrennungsgerausch lief.

¹⁾ Zs. f. phys. Chem. Abt. B Bd 51 (1942) S. 157.

Bei den bisherigen Versuchen wurde die Zeit der Verbrennung peritakt benützte Methode der Untersuchung der Vorreaktionen durch die Temperatursteigerung des Gemisches im Motor ohne Zündung zu verfahren, unzulänglich reproduzierbare und quantitativ unsichere Ergebnisse zu erhalten. Nachdem uns das gelungen ist, wollen wir zunächst einen Überblick über das Verhalten verschiedener Brennstoffe und den Einfluß einer Änderung der Betriebsverhältnisse des Motors gewinnen. Dabei wurde nicht nur das Kompressionsverhältnis sondern auch die Gemischzusammensetzung in weiten Grenzen geändert. Die Ergebnisse geben eine erhebliche Erweiterung unseres Erfahrungsmaterials und lassen neue Zusammenhänge zwischen dem Klopfverhalten und dem Verlauf der Vorreaktionen erkennen. Die Messungen sollen auf weitere Kraftstoffe ausgedehnt werden in Verbindung mit einer genaueren chemischen Analyse der Reaktionserzeugnisse. Die dazu notwendige Verfeinerung der Methoden der chemischen Analyse ist bei uns bereits in Angriff genommen. Da bei dem bisherigen Motor von rund 11 Hubvolumen die vollständige Durchmessung eines Brennstoffes etwa 150 l benötigte und da die Größe des Motors auch recht lange Versuchszeiten erforderlich macht, sollen die Messungen in Zukunft an einem besonders gebauten kleineren Motor ausgeführt werden, der so konstruiert wird, daß er möglichst plötzlich verdichtet und entspannt, so daß das Gemisch eine gewisse Zeit auf einer möglichst konstanten und gut definierten Verdichtungsendtemperatur gehalten wird.

C. Zusammenfassung

An einem mit Fremdantrieb, aber ohne Zündung laufenden Viertaktmotor, der in üblicher Weise Kraftstoff-Luft-Gemisch ansaugt, wurden die Vorreaktionen einer Anzahl von Kraftstoffen untersucht durch Messung der Temperatursteigerung des Gemisches beim Durchgang durch den Motor. Die für zahlreiche Verdichtungsverhältnisse in Abhängigkeit vom Kraftstoffgehalt des Gemisches aufgenommenen Kurven der Temperatursteigerung zeigen für verschiedene Kraftstoffe charakteristische Unterschiede. Für Kraftstoffe verwandter Art nimmt die Temperatursteigerung durch Vorreaktionen zu mit abnehmender Oktanzahl. Zusatz von Bleitetraäthyl vermindert im allgemeinen die Temperatursteigerung durch Vorreaktionen ungefähr der Erhöhung der Oktanzahl entsprechend. Die Versuche wurden ergänzt durch Messungen des Druckverlaufs mit einem Quarzdruckgeber und durch chemische Analysen der Reaktionserzeugnisse.