

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

Zu Beginn der hier vorzutragenden Versuche im Winter 10/41 konnte die Erscheinung des Klopfens im Otto-Motor soweit als geklärt angesehen werden, daß als Ursache dieses Vorgangs eine Vorreaktion im unverbrannten Gemischanteil der Motorladung anzusehen war, deren explosiver Verlauf zu den bekannten, unerwünschten Begleiterscheinungen¹⁾ dieser Reaktion führte. Es war vor allem W. Jost, der, von reaktionskinetischen Überlegungen ausgehend, als verantwortliche Ursache der Klopferscheinung die zu Selbstzündung führenden Vorreaktionen im unverbrannten Gemischanteil der Motorladung ansprach, und an Hand umfassender Beschreibungen der Oxydationsreaktionen von Kohlenwasserstoffen sowie eigenen Versuchen dieser Deutung der Klopfreaktion hervorragend zu weitgehender Anerkennung verhalf²⁾. Dabei dürfte es

¹⁾ Vgl. hierzu: E. Schmidt, Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg II. 9 (1939).

Als Ursache des Klopfgeräusches und des Leistungsabfalls eines klopfenden Motors werden hier die Stoßwellen diskutiert, die im Anschluß an die Selbstzündung des letzten Teils der Ladung (unverbrannter Gemischrest) zum Ausgleich der bei dieser Verbrennung im eigenen Volumen lokal auftretenden hohen Spitzendrücke entstehen. — Die klopfende Verbrennung (Selbstzündung) eines Kraftstoff-Luft-Gemisches erfolgt nun unter praktischen Bedingungen stets mit einer endlichen, wenn auch sehr hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Selbstzündung von 600 bis 1800 m pro Sekunde. Dabei entsteht dann immer eine Stoßwelle, die im allgemeinen eine höhere Amplitude aufweisen dürfte als die dem Druckausgleich dienende sekundäre Stoßwelle. Die Abbildung 1 zeigt schematisch die mit einem Kathodenstrahlrecorographen bei der Selbstzündung eines adiabatisch komprimierten Kraftstoff-Luft-Gemisches beobachteten Stoßwellen. Eine ideale Raumexplosion bei Selbstzündung ist bisher nicht beobachtet worden. Es bliebe zu überlegen, inwieweit diese unmittelbar mit der Selbstzündung gekoppelte Stoßwelle, die vielfach den Charakter einer Detonation aufweisen kann, als Ursache der mit dem Klopfen im Motor verbundenen Sekundärerscheinungen anzusehen ist.

²⁾ W. Jost, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Berlin, 1939.

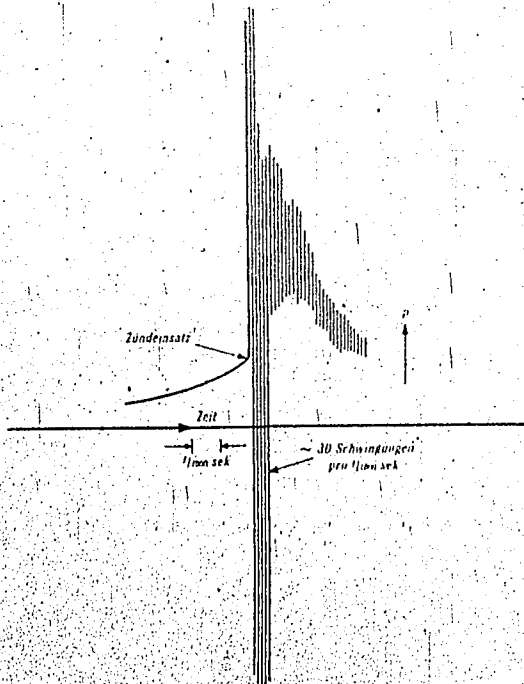


Abb. 1

Schematische Wiedergabe des Druckdiagramms (Kathodenstrahl-sillograph) eines durch adiabatische Verdichtung zur Selbstzündung gebrachten Kraftstoff-Luft-Gemisches. (Der Übersicht halber sind nur $\frac{1}{10}$ der Schwingungen eingetragen.) Der Durchmesser des Reaktionsraumes beträgt 50 mm

sich bei diesen Vorgängen im wesentlichen um Ketteneaktionen mit Kettenverzweigung handeln¹⁾.

Über die Abhängigkeit der Klopf- bzw. Selbstzündungsreaktion vom Druck und von der Temperatur lagen bisher keine allgemein überzeugenden Versuche vor; dementsprechend waren hierüber auch keine einheitlichen Auffassungen vorhanden²⁾.

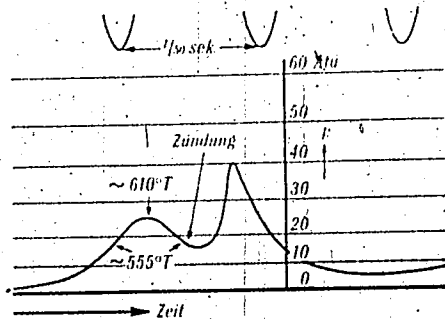


Abb. 2

Druckaufnahme (Schleifenzillograph) eines adiabatisch komprimierten Kraftstoff-Luft-Gemisches. 50/50 % Heptan-Isooktan. Die Zündung erfolgt bei zurückgehenden Kolben. Ausgangsdruck 3 at, $95^{\circ}C$; Gemisch sehr fett

¹⁾ Die Abbildung 2 zeigt die Druckaufnahme eines adiabatisch komprimierten Kraftstoff-Luft-Gemisches (Schleifenzillograph). Wie aus der Aufnahme ersichtlich, erfolgt die Selbstzündung erst bei zurückgehendem Kolben, also bei fallenden Drücken und Temperaturen im Gemisch. Hierbei kann es sich bei der Selbstzündung nicht um eine Wärmeeexplosion gehandelt haben. Das zeitliche Anwachsen der Reaktionsgeschwindigkeit bis zur Explosion auch bei abnehmenden Temperaturen des Gemisches erfolgt wahrscheinlich durch Kettenverzweigung. Eine Zuordnung des Reaktionsgeschehens zu Druck und Temperatur allein, ohne Berücksichtigung der zeitlichen Vorgeschichte, wird, wie aus dem Beispiel erhellt, sinnlos. Der aus der Aufnahme ersichtliche langsame Druckanstieg nach Zündensatz entspricht der räumlichen Ausbreitung der lokal einsetzenden Selbstzündung, nicht dem zeitlichen Verlauf der Reaktion in einem Gaselement, wie aus der (hier nicht angeführten) optischen Aufnahme ersichtlich. Für reaktionskinetische Schlussfolgerungen aus Druckaufnahmen ohne optische Registrierung ist dies immer zu beachten.

²⁾ Vergleiche hierzu die Vorträge und Diskussionen auf der Herbsttagung des Verbrennungs-Ausschusses der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, 1941. Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforsch. (1942) H. 54.

Während der Motorfachmann aus der Erfahrung heraus der Klopfneigung eines Treibstoffs schon immer eine scheinbar hohe Druck- und relativ geringe Temperaturabhängigkeit zugeschrieben hatte, sprachen u. a. die von Tizard und Pye¹⁾ sowie Jost und Teichmann²⁾ unter motorähnlichen Versuchsbedingungen vorgenommenen Zündverzugsmessungen adiabatisch komprimierter Kohlenwasserstoff-Luft-Mischungen mehr für eine geringe Druck- und hohe Temperaturabhängigkeit der für das Klopfen im Motor verantwortlichen Selbstzündung des unverbrannten Gemischfestes³⁾.

Bei dem engen Zusammenhang zwischen der Klopferscheinung und der Leistungsgrenze des Otto-Motors⁴⁾ der heute allgemein als bekannt vorausgesetzt werden darf, ist die Bedeutung einer Klärung dieser Fragen offensichtlich. — Wenn wir auch heute dank einer hochentwickelten chemischen Industrie und ihrer engen Zusammenarbeit mit Luftfahrtinstituten über größere Mengen hochklopfester Kraftstoffe verfügen, so kann doch nicht übersehen werden, daß beim heutigen hohen Entwicklungsstand des Motors eine immer bessere Anpassung von Motor und Treibstoff aneinander, mit dem Ziel einer weiteren Steigerung der Lei-

¹⁾ Tizard u. Pye, Phil. Mag. Bd 44 (1922) S. 79 sowie Bd 1 (1926) S. 1094.

²⁾ Jost, Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg., H. 9. (1939); Teichmann, Elektrochem. Bd 47 Nr. 4 (1941) S. 297.

³⁾ Wenn im folgenden von der Druck- und Temperaturabhängigkeit der Selbstzündung- und Klopfreaktion die Rede ist, so ist dabei zu beachten, daß der Charakter der Reaktion (zeitlicher Ablauf vom Start bis zur Zündung) hierbei nicht zum Ausdruck kommt, sondern im Interesse der Anschaulichkeit immer nur der äußere Gesamtverlauf bis zum Zündeinsatz qualitativ beschrieben wird. Geht z. B. ein Kraftstoff-Luft-Gemisch unter sonst gleichen Bedingungen (Druck und zeitlicher Vorgeschichte) einmal bei 390° C und ein andermal bei 550° C in Zündung über, so wird man der Gesamtreaktion in diesem Falle die Temperaturabhängigkeit 0 zuweisen. Bei 390° C wird nun diese Zündung außerordentlich heftig, bei 550° C dagegen milde erfolgen. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß im unteren Temperaturbereich eine außerordentlich steile Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit mit der Zeit statt hat (Kettenverzweigung), während bei der höheren Temperatur die Reaktion schon mit hoher Geschwindigkeit startet, mit der Zeit aber nur gering anwächst, um dann nach derselben Induktionszeit in Zündung überzugehen (siehe auch Abbildung 21). Die Induktionszeit ist in beiden Fällen gleich groß und zeigt die Temperaturabhängigkeit 0 (Gesamtreaktion). Die Startreaktion dürfte eine erhebliche Temperaturabhängigkeit aufweisen. Die Folgereaktionen bis zum Zündeinsatz sind aber verschieden und weisen in ihrer isothermen Reaktionsbeschleunigung (Kettenverzweigung) einen negativen Temperaturkoeffizienten auf.

⁴⁾ von Philippovich, Elektrochem. Bd 42 (1936) S. 472; (Bunsenagung 1936).

stung und vor allem der allgemeinen Wirtschaftlichkeit des Motorverfahrens, ohne eine umfassende Klärung des motorischen Verbrennungsablaufs selber immer schwieriger erreichbar wird.

Einen Überblick über grundsätzliche Schwierigkeiten der motorischen Klopfersforschung, besonders in Hinblick der Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf andere Betriebsbedingungen und Anregungen sowie Zielsetzungen für die mehr labormäßige Erforschung dieser Probleme gab u. a. vor allem von Philippovich (DVL)¹⁾.

Den Standpunkt, daß es sich bei der im Motor beobachteten starken Druckabhängigkeit der Klopfreaktion um einen realen Einfluß des Druckes auf die zum Klopfen führende Selbstzündungsreaktion des unverbrannten Gemischanteils der Motorladung handeln mußte, vertrat u. a. vor allem F. A. F. Schmidt (DVL). Durch zum Teil noch nicht veröffentlichte Zündverzugsmessungen adiabatisch komprimierter Treibstoff-Luft-Mischungen konnte F. A. F. Schmidt in Übereinstimmung mit Zündverzugsmessungen bei Bombeneinspritzversuchen²⁾ auch diesen Druckeinfluß auf die Selbstzündungsreaktion nachweisen³⁾.

Auch die von Rothrock und Spencer⁴⁾ an Hand umfangreichen motorischen Versuchsmaterials formelmäßig dargestellten Zusammenhänge zwischen der Gasdichte, temperatur und der Klopfneigung einer Kraftstoff-Luft-Mischung im Motor sind hier zu erwähnen.

Bei der Schwierigkeit, Motor- und Brennstoffaktoren in ihrem Einfluß auf das Klopfverhalten im praktischen Motor sauber voneinander zu trennen, ist es schwer, über das Druck- und Temperaturverhalten der Selbstzündung bzw. Klopfreaktion eine überzeugende eindeutige Klärung

¹⁾ Siehe Anmerkung 4 auf Seite 22.

²⁾ F. A. F. Schmidt, VDI-Forschungsh. 392 (1938); Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschung H. 9 (1939).

³⁾ Schon hier sei darauf hingewiesen, daß der in den höheren Temperaturbereichen (vor allem im Motor) beobachtete starke Druckeinfluß dadurch so stark in Erscheinung tritt, weil die Temperaturabhängigkeit des Selbstzündungsvorgangs in diesen Gebieten klein wird. Die absolute Größe des Druckeinflusses auf die Reaktionsgeschwindigkeit bleibt praktisch konstant und ist ung. prop. $p^{1,2}$, also noch nicht einmal so groß wie bei einer normalen bimolekularen chemischen Reaktion. Der meßbare Druckeinfluß in den unteren Temperaturbereichen liegt, bedingt durch die hier vorherrschende hohe Temperaturabhängigkeit, meistens innerhalb der experimentellen Fehlergrenzen. Hier dürfte Druckverdoppelung im allgemeinen einer Temperaturerhöhung von 12° C äquivalent sein, in den Temperaturbereichen oberhalb 400° C dagegen einer solchen bis zu 200° C und mehr.

⁴⁾ Als neuere Arbeit: A. M. Rothrock, Ind. Engng. 48 (1941) S. 51.

allein von der Motorseite aus zu erhalten¹⁾, andererseits konnte es auf die Dauer auch keine befriedigende Lösung dieser Fragen bedeuten, wenn man alle hier auftretenden Widersprüche nur schwer erfassbaren sekundären Temperatureffekten im Motor zuschrieb²⁾.

Zur Beseitigung der zwischen der Klopfmessung im Motor und der Selbstzündungsmessung in Laborgeräten gefundenen scheinbaren Widersprüche hinsichtlich des Druck- und Temperaturverhaltens dieser Reaktionen schien es erst einmal wichtig, Selbstzündungsmessungen von Treibstoff-Luft-Mischungen in denjenigen Druck- und Temperaturgebieten und unter den Zeitbedingungen vorzunehmen, bei denen das Klopfen im praktischen Hochleistungsmotor wirklich stattfindet. (Hierbei sollen sekundäre motorische Temperatureffekte vorerst unberücksichtigt bleiben.)

Die Abbildung 3 zeigt ein Druck-Temperaturdiagramm mit dem Druck in at als Abszisse und der abs. Temperatur als Ordinate. Die in dieses Diagramm eingetragenen gekrümmten Kurven zeigen, welche Druck- und Temperaturgebiete und damit Reaktionsgebiete ein fortlaufend komprimiertes Treibstoff-Luft-Gemisch mit dem $\kappa = 1,314$ (C_p/C_v) in Abhängigkeit von beliebigen Ausgangsdrücken und Temperaturen durchlaufen muß³⁾. Die Zahlen am rechten Bildrand zeigen als willkürliche

¹⁾ Da jede Betriebsänderung, vor allem auch eine Änderung der Überladung, den Wärmezustand des Motors beeinflusst, ist es schwer, den reinen Druckeinfluß auf die Klopfreaktion ohne sekundäre Temperatureinflüsse im Motor zu erhalten.

²⁾ Wie später gezeigt wird, ist es grundsätzlich möglich, die Temperatur-, Druck- und Zeitabhängigkeit der Klopfreaktion sowohl im Motor wie auch im Prüfgerät übereinstimmend zu messen, wenn beide Male die Vorgeschichte des untersuchten Kraftstoff-Luft-Gemisches bis zum Zündensatz gleich ist. Komplizierungen können auftreten, wenn im Motor mit hoher Ventilüberschneidung, hoher Drehzahl, starker Wandkühlung und fetter Gemischstellung Gemischaufbereitungseffekte auftreten, die im Prüfgerät nicht reproduziert werden können. (Unter obigen Bedingungen erfolgt die Kraftstoffverdampfung im Motor so langsam, daß der Kraftstoffdampf eine niedrigere Temperatur gegenüber seiner Umgebung aufweist als es dem adiabatischen Druckanstieg im Motor entspricht, wobei vorzeitiges Klopfen auftreten kann.) Siehe hierzu die Beobachtungen von Francke, DVL, bei Motorversuchen mit hoher Ventilüberschneidung; DVL-Berichte.

³⁾ Dabei ist es gleichgültig, in welchem Punkt einer Adiabaten $\left(\frac{p}{T^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = \text{konst}\right)$ mit der Kompression begonnen wurde.

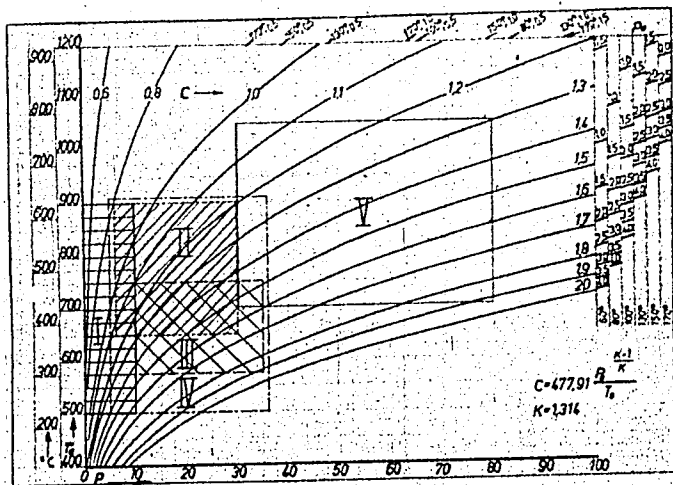


Abb. 3

Druck-Temperaturdiagramm mit eingetragenen Selbstzündungsbereichen:
 Rechteck I = Townend
 Rechteck II = F. A. Schmidt und M. Schenermeyer
 Rechteck III = Jost und Teichmann
 Rechteck IV = Einspritzversuche in Bomben
 Rechteck V = Klopfbereich im Motor

Beispiele die Lage einiger so durch Ausgangsdruck und -temperatur festgelegter Adiabaten¹⁾.

In Abbildung 4 ist in das p,T-Diagramm die Lage der Spitzendrucke eingetragen, wie sie im Verbrennungsraum des BMW 132-Prüfmotors und des DB 601-Vollmotors bei variierten Betriebsbedingungen gemessen wurden. Die sichelförmigen kleinen Kurven zeigen dabei den Verlauf der Spitzendrucke im BMW 132 in Abhängigkeit von der Gemischstärke bei jeweils konstanten Betriebsbedingungen. Der niedrigste Druck entspricht magerer Gemischeinstellung; mit zunehmender Verfettung nimmt

¹⁾ Das Verhältnis der spezifischen Wärmen $C_p/C_v = 1,314$ entspricht dem mittleren Wert eines stöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Gemisches bei ung. 400°C. Bei höheren Temperaturen und fetterer Gemischeinstellung nimmt dieser Wert ab. Bei der Eintragung von Meßworten in ein solches Diagramm ist dies zu beachten. Für die qualitative Übersicht über das Klopfverhalten von Kraftstoff-Luft-Mischungen über den gesamten praktischen Arbeitsbereich des Motors und darüber hinaus (Entwicklung) ist ein solches Diagramm aber vorzüglich geeignet.

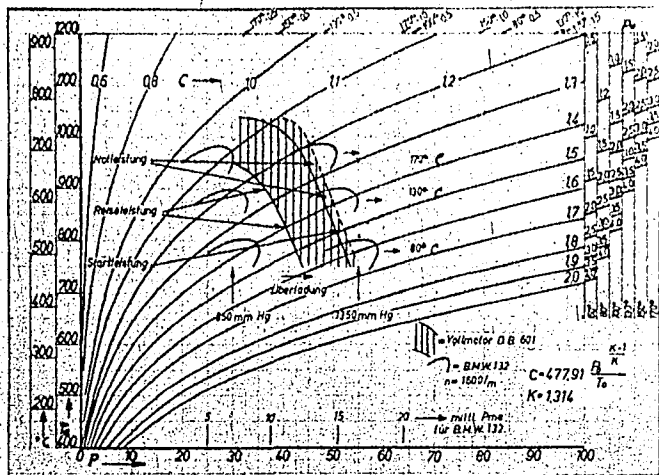


Abb. 4

Spitzendruckbereiche im BMW 132 Prüfmotor und DB 601 Vollmotor
(unverbranntes Restgemisch)

der Spitzendruck zu, um schließlich langsam wieder abzufallen. Bei Erhöhung der Überladung verschieben sich die Spitzendrucke nach rechts, bei ansteigenden Ausgangstemperaturen nach oben in dem gezeigten Diagramm.

In Abbildung 3 sind diejenigen Druck- und Temperaturbereiche eingetragen worden, in denen das Selbstzündungsverhalten von Kraftstoff-Luftmischungen bereits nach den verschiedensten Methoden untersucht worden ist, gleichzeitig ist der Temperatur- und Druckbereich (Abbildung 4) kenntlich gemacht, in dem Klopfen im Motor beobachtet wird. Dabei wird gut ersichtlich, daß im eigentlichen Klopfbereich des Hochleistungsmotors, also in einem Druckbereich von 30 bis 80 at und Temperaturen von 700 bis 1100° K, Selbstzündungsmessungen bisher noch nicht vorgenommen worden sind.

Schon die Versuche von Townend und Mitarbeitern¹⁾ hatten gezeigt, daß auch in höheren Druckgebieten mit einem komplizierten Verlauf der Selbstzündungsreaktion gerechnet werden konnte (Abbildung 5), wenn auch diese Versuche nicht unter motorischen Bedingungen vorgenommen waren und entsprechend ihrer Zeitdauer durch Wandeneinflüsse beeinflußt waren. Die Abbildung 5 zeigt den Druck- und Temperaturverlauf von Selbstzündungsmessungen stöchiometrischer Kohlenwasserstoff-Luft-Mischungen bei 1 sec Zündverzug.

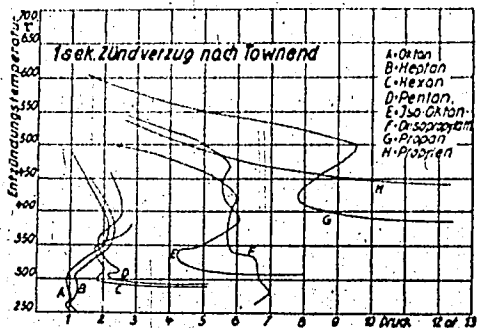


Abb. 5

Selbstzündungseinsatz stöchiometrischer Kraftstoff-Luft-Mischungen bei 1 Sekunde Zündverzug in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Nach Townend und Mitarbeitern; J. chem. Soc. 1938

Auch Selbstzündungsmessungen bei Einspritzversuchen in Bomben ließen einen komplizierten Verlauf dieser Reaktion in ihrer Druckabhängigkeit vor allem bei Leichtbenzin erwarten, waren aber in ihrer Bewertungsmöglichkeit für Otto-Motoren ebenfalls nicht eindeutig²⁾.

¹⁾ Townend und Mitarbeiter, Proc. roy. Soc., London, A Bd 141 (1933) S. 484; Bd 143 (1934) S. 168; Bd 146 (1934) S. 118; Bd 154 (1936) S. 95; Bd 158 (1937) S. 415; Bd 160 (1937) S. 174.

²⁾ Die Abbildung 6 von Zündverzugsmessungen bei Einspritzversuchen in der Bombe (Lindner, Sebr. der Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg. H. 9, 1939) zeigt sehr schön, wie mit steigender Temperatur die Temperaturabhängigkeit der Selbstzündungsreaktion abnimmt. Der Druckeinfluß wird dadurch (Umbiegen der verschiedenen Drucken zugehörigen Zündverzugskurven) deutlich, nimmt aber in seiner absoluten Größe kaum

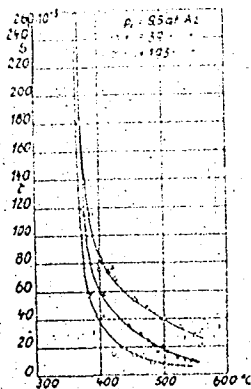


Abb. 6

Zündverzugsmessungen in der Benzol nach Lindner (vgl. Schriften der Akademie der Luftfahrtforschung, Heft 9, 1939)

War nun aber ein derartig komplizierter Druck- und Temperaturverlauf der Klopfreaktion auch in hohen Druckgebieten vorhanden, so war Übereinstimmung zwischen Selbstzündungsmessungen in Laborgeräten (ohne Fremdzündung allein durch adiabatische Kompression) und dem Motorverhalten der Klopfreaktion nur dann zu erwarten, wenn die Vorgeschichte des zu untersuchenden Gasgemisches bis zum Einsatz der Klopfzündung selber beide Male gleichgehalten wurde, d. h. wenn beide Male sowohl im Motor wie im Prüfgerät in gleichen Zeiten dieselben Druck- und Temperaturgebiete durchlaufen wurden.

Durch den motorischen Verbrennungsablauf bedingt, erfolgt der Kompressionsanstieg im unverbrannten Gemischanteil der Motorladung nach einer höheren Potenz in Abhängigkeit von der Zeit (Abbildung 7). Die-

zu, wie irrtümlich durch das Auseinanderlaufen der Kurven vermutet werden kann. Im unteren Temperaturbereich, in dem 12°C Temperaturerhöhung im Mittel einer Druckverdoppelung äquivalent sind, liegt der meßbare Druckeinfluß weitgehend innerhalb der Fehlergrenzen der Methodik. (Bei reaktionskinetischen Schlußfolgerungen wird dies nicht immer beachtet; siehe auch H. Zeise, MTZ (1942) H. 9, S. 351.)

selben Bedingungen in einem Prüfgerät nachzualimen ist relativ einfach, indem man einen mit Preßluft angetriebenen Kolben mehr oder weniger stark beschleunigt in einen mit dem zu untersuchenden Gasgemisch gefüllten einseitig geschlossenen Zylinder hineinschiebt.

Gleiche Kompressionsgeschwindigkeit, wie in einem bei konstanten Betriebsbedingungen (Drehzahl, Vorzündung, Wirbelung usw.) arbeitenden Motor ist dann vorhanden, wenn beide Male in der Zeiteinheit ein im Mittel gleicher prozentualer Anstieg des Kompressionsverhältnisses oder des Drucks der Temperatur des Gemisches erfolgt.

Da im praktischen Motor oder auch Prüfmotor die im Verbrennungsraum maximal erreichbare Verdichtung des unverbrannten Gemischrestes in erster Näherung eine Funktion des vorgegebenen Verdichtungsverhältnisses durch den Kolben und der Verbrennungswärme des Gemisches ist, so ist bei zeitlich gleichem Auftreten des Spitzendrucks und auch sonst konstanten motorischen Betriebsbedingungen (Drehzahl usw.) und gleicher Gemischstärke die so definierte Kompressionsgeschwindigkeit für einen Motor eine Konstante und weitgehend von den Gemischansaugdaten, wie Druck und Temperatur (bei nicht zu großer Variation der letzteren), unabhängig¹⁾.

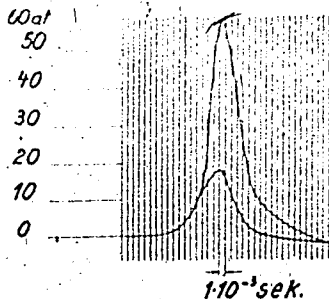


Abb. 7
Zeitlicher Druckverlauf im BMW 132. Prüfmotor (Arbeitstakt mit und ohne Fremdzündung)

¹⁾ D. h. in einem bei konstanten Betriebsbedingungen arbeitenden Motor, werden im unverbrannten Gemischanteil der Motorladung unabhängig von den Ausgangsdaten des angesaugten Gemisches in gleichen Zeiten dieselben absoluten Druck- und Temperaturintervalle durchlaufen. Die maximal erreichten absoluten Drucke und Temperaturen sind natürlich von den Ausgangsdaten des angesaugten Gemisches abhängig. (Exakt geht außer der Kolbenkompression und der Verbrennungswärme des Gemisches, die unabhängig von den Betriebsbedingungen des Motors sind, wenn auch in geringem Maße der Ausgangsdruck und die Ausgangstemperatur in den zeitlichen Kompressionsverlauf ein.)

Von den oben angeführten Gesichtspunkten ausgehend wurde folgendes Meßgerät entwickelt: Abbildung 3. Alle technischen Einzelheiten sind der schematischen Skizze zu entnehmen. Der Versuchszyylinder 1 wird mit dem zu untersuchenden Gasgemisch bei genau einstellbaren Ausgangsdaten gefüllt¹⁾ und durch einen mit Preßluft angetriebenen

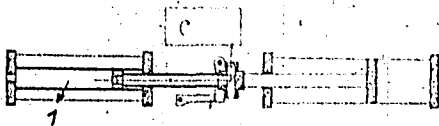


Abb. 3

Schematische Skizze eines Prüfgerätes für adiabatische Kompression von Kraftstoff-Luft-Mischungen mit mechanisch-optischer Registereinrichtung des Zündensatzes im Reaktionsraum, in Abhängigkeit von der Kolbenbewegung

Kolben fortlaufend und praktisch adiabatisch bis zum Zündensatz komprimiert. Um den Kompressionsvorgang genauestens und reproduzierbar bis zur Klopfzündung kontrollieren zu können, wurde zur Registrierung desselben auf die Verwendung jeglicher Zusatzgeräte außer zu Hilfsmessungen verzichtet und der Vorgang mechanisch-optisch auf einem Film aufgenommen. Die Kolbenstange des Kompressionskolbens und der Kolben selber sind zu diesem Zwecke durchbohrt und diese Bohrung nach dem Reaktionsraum hin durch ein Quarzfenster abgeschlossen. Das kreuzförmig ausgebildete Verbindungsstück der Kolbenstangen ist ebenfalls mit einer Bohrung versehen und mit einem rechtwinklig brechenden Prisma sowie einer Optik ausgerüstet, die auf einer darüber befindlichen Phototrommel das während des Kompressionsvorgangs aus dem Reaktionsraum kommende Licht abbildet. Um auch ohne Leuchterscheinung im Reaktionsraum den Kolbenweg auf diese Weise registrieren zu können, ist in der Mitte des Quarzfensters im Kolbenboden eine kleine Glühbirne als Zusatzbeleuchtung angebracht, die beim Einsatz der Zündung im Reaktionsraum überstrahlt wird. Durch diese einfache Anordnung kann sowohl der Kompressionsvorgang wie auch der Zündensatz im Reaktionsraum auf ein und denselben Film zeitlich genau verfolgt und parallaxenfrei zueinander aufgezeichnet werden²⁾.

¹⁾ Das zu untersuchende Gasgemisch wird für eine größere Versuchreihe in einem herzbaren Gasometer hergestellt und vor Versuchsbeginn sorgfältig analysiert.

²⁾ Gleichseitig ist es möglich, durch einen in die Stirnseite des Versuchsraumes eingebauten Quarzdruckgeber den aus der Kolbenwegregistrierung berechneten Druckverlauf durch direkte Messung qualitativ zu kontrollieren.

Der Durchmesser des Reaktionszylinders beträgt 50 mm. Die ganze Anlage ist sehr stabil gebaut und fest verankert, um die entsprechend den Dimensionen der Anlage auftretenden Druckstöße bis zu 7 Tonnen erschütterungsfrei abfangen zu können. Der Kolben wird nicht abgefangen, sondern durch den auftretenden Explosionsdruck abgebrems.

Die folgende Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt aus einer so gewonnenen Filmaufnahme¹⁾. Der Film bewegt sich in der Abbildung von rechts nach links, der Kolben von unten nach oben. Der unterbrochene

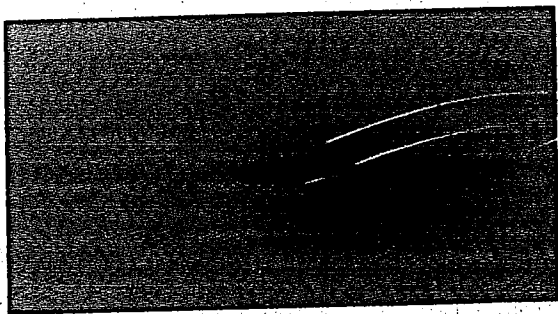


Abb. 9

Optisch-mechanische Filmaufnahme der adiabatischen Kompression eines Kraftstoff-Luft-Gemisches bis zum Zündensatz: Verstärkung der den Kolbenweg markierenden dünnen geneigten Linie. Man beachte das wiederholte Aufleuchten nach der Zündung. Kraftstoff: OZ. 50 bis 60. Ausgangsdruck: 1 at, Ausgangstemperatur: 150° C

¹⁾ In der Reproduktion ist das wiederholte Aufleuchten (breiter Leuchtstreifen) des Quarzfensters im Anschluß an den Zündensatz nicht deutlich sichtbar. Dies Aufleuchten wird durch eine Stoßwelle hervorgerufen (siehe Abbildung 1). Die Frequenz dieser Stoßwelle entspricht einer Geschwindigkeit derselben bis zu 1800 m/sec. Die Härte dieser Stoßwelle nimmt mit steigender Temperatur beim Zündensatz stark ab. Bei Druckaufnahmen mit einem Schleifenoszillographen, der infolge seiner Trägheit schnelle Druckstöße nicht anzeigen kann, macht sich die Härte dieser Stoßwellen in einer Verzerrung bemerkbar, die bei Zündensatz einem scheinbar negativen Druckverlauf entspricht. Die Größe dieser Verzerrung scheint proportional der Stoßhärte zu sein. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen solche Druckaufnahmen mit dem Schleifenoszillographen. Es ist ersichtlich, daß die Verzerrung mit zunehmender Temperatur im Gasgemisch beim Zündensatz zurückgeht.

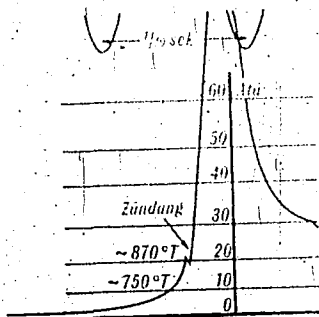


Abb. 10

Druckdiagrammaufnahme (Schleifenszillograph) eines adiabatisch bis zum Zündeinsetz komprimierten Kraftstoff-Luft-Gemisches. (O. Z. 50. Ausgangsdruck: 1 at, Ausgangstemperatur: ung. 150°C .) Die geringe Verzerrung beim Zündeinsetz entspricht einer Stoßwelle geringer Härte

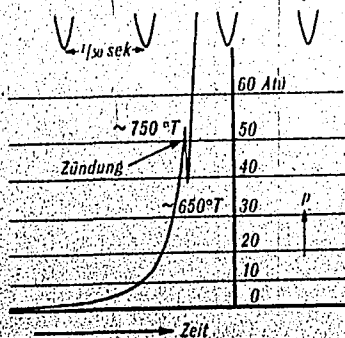


Abb. 11

Druckdiagrammaufnahme (Schleifenszillograph) eines adiabatisch bis zum Zündeinsetz komprimierten Kraftstoff-Luft-Gemisches. (O. Z. 50. Ausgangsdruck: 3 at, Ausgangstemperatur: 100°C .) Die starke Verzerrung beim Zündeinsetz entspricht einer sehr harten Stoßwelle

Eichstrich im unteren Teil der Abbildung stellt gleichzeitig eine Zeit- und Wegmarkierung dar. Die Mitten zweier heller Markierungen liegen $\frac{1}{1000}$ sek auseinander. Beim Überschreiten dieses Eichstrichs durch die den Kolbenweg markierende geneigte Linie in der Abbildung sind vom Kolben 232 mm von einer gesamten Zylinderlänge von 281 mm zurückgelegt worden. Der Zündeinsetz im Reaktionsraum macht sich in der

Abbildung jetzt einfach durch eine Überstrahlung (Quarzfenster) der den Kolbenweg markierenden Linie (Glühbirne) bemerkbar. Wie der Abbildung zu entnehmen, ist so der zeitliche Kompressionsverlauf bis zum Zündeinsetz aus der Neigung des Kolbenwegs zum Eichstrich vollständig meßbar. Bei ansteigender Kompressionsgeschwindigkeit werden, wie ebenfalls aus der Abbildung ersichtlich, beim Klopfinsatz höhere Kompressionsverhältnisse erreicht. Aus der Abbildung 11a ist der bei einigen Versuchen aus dem gemessenen Kompressionsverhältnis berechnete zeitliche Druck- und Temperaturverlauf im Gasgemisch kurz vor dem Klopfinsatz zu ersehen¹⁾.

Für eine exakte Zuordnung derartiger Versuche zu im Motor gemessenen Klopfgrenzen ist es an sich notwendig, daß sowohl die im Motor wie im Prüfgerät gemessenen bzw. berechneten Druck- oder Temperaturkurven in ihrem zeitlichen Verlauf bis zum Klopfinsatz zur Deckung gebracht werden können. Da

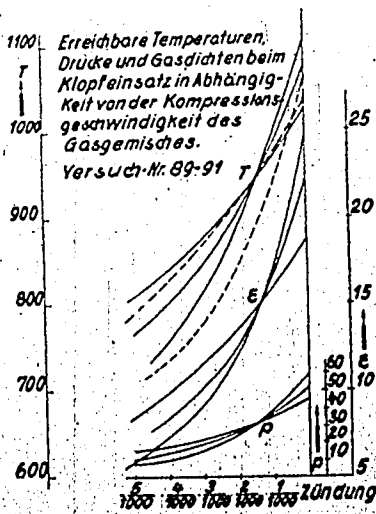


Abb. 11a

Abhängigkeit des Zündeinsetzes (rechte Koordinate) von der Kompressionsgeschwindigkeit eines Kraftstoff-Luft-Gemisches. Die Abszisse rechnet die Zeit in $\frac{1}{1000}$ sek. vor Zündung

¹⁾ Bei sehr hohen Kompressionsgeschwindigkeiten können Komplikationen durch die vom Kolben ausgehenden Verdichtungswellen entstehen.

praktisch erst die Temperaturgebiete von 500° abs. an in ihrem Einfluß auf das Reaktionsgeschehen im untersuchten Gemisch von Interesse sind, genügt es aber vielfach, mit einem mittleren Wert des Kompressionsverlaufs in einem begrenzten Temperaturintervall vor dem beobachteten Klopfensatz zu arbeiten.

Eine derart vorgenommene Auswertung von Versuchen ist aus Abbildung 12 zu ersehen. In dieser Abbildung sind für ein stöchiometrisches Isooktan- und Höhenkraftstoff-Luft-Gemisch die aus den gemessenen Kom-

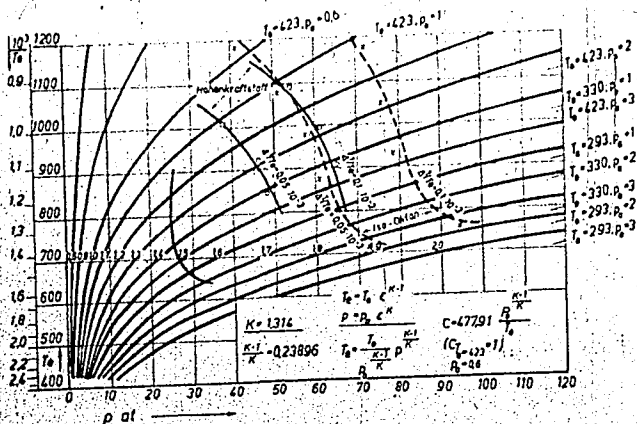


Abb. 12

Klopfgrenzkurven zweier stöchiometrischer Kraftstoff-Luft-Mischungen bei zwei Kompressionsgeschwindigkeiten. (Gemessene Zündensatzpunkte im Prüfgerät)

pressionsverhältnissen bei gleichem zeitlichen Kompressionsverlauf die beim Klopfensatz berechneten Temperaturen und Drucke in Abhängigkeit von den Ausgangsdrücken und -temperaturen des untersuchten Gasgemischs eingetragen worden, wobei die bei gleicher Kompressionsgeschwindigkeit (oder besser -beschleunigung) gemessenen Klopfensatzpunkte durch Kurven miteinander verbunden sind. Abbildung 12 zeigt für beide Kraftstoffe so gemessene Klopfgrenzkurven für je zwei unterschiedliche Geschwindigkeitsbedingungen der Kompression.

Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist der Klopf-einsatzpunkt in dem gezeigten Drucktemperaturdiagramm durch die Kompressionsgeschwindigkeit und die Lage der Adiabaten bestimmt, auf der sich Druck und Temperatur während der Kompression im Gemisch bewegen. Gleichgültig ist, bei welchen Drucken und Temperaturen auf dieser ein

Gemisch kennzeichnenden Adiabaten $\left(\frac{p_c}{T_c} \cdot \frac{\epsilon-1}{\epsilon} = \text{Konst} \right)$ mit der Kompression begonnen wurde. (In der Praxis gilt dies natürlich nur, solange man mit der Ausgangstemperatur vor der Kompression in Gebieten bleibt, wo keine merkliche Reaktion im Gasgemisch stattfindet¹⁾).

Abbildung 13 zeigt so im Motor BMW 132 und Prüfgerät bei vergleichbarer Kompressionsgeschwindigkeit aufgenommene Klopfgrenzkurven zweier Treibstoffe: Et 110 und DHD in Abhängigkeit von den Ausgangstemperaturen und -drucken der Gemische. Die Klopfgrenzkurven im BMW 132 wurden so bestimmt, daß die bei konstanten Betriebsbedingungen an der Klopfgrenze gemessenen mittleren Spitzendrücke in Abhängigkeit von den Ausgangsdaten des Ansatzgemisches in gleicher Weise wie die im Prüfgerät gemessenen Klopf-einsatzpunkte in das Diagramm eingetragen wurden²⁾. (Diese Versuche sind von der DVL durchgeführt.)

Die Differenz in der Temperatur- und Druckabhängigkeit der so in Motor und Prüfgerät bestimmten Klopfreaktion ist bei den Fehlergrenzen beider Verfahren und den vorgenommenen Vereinfachungen nicht grundsätzlicher Art und kann durch genauere Versuchsauswertung des Motordiagramms wahrscheinlich behoben werden. An sich ist die Übereinstimmung zwischen der reinen Selbstzündungsreaktion im Prüfgerät und der Klopfreaktion im Motor so überzeugend, daß zur Deutung

¹⁾ Unterhalb 150° C wurden bei den untersuchten Kraftstoff-Luft-Mischungen auch bei längeren Verweilzeiten von Tagen bei den vorliegenden Versuchsbedingungen keine Vorreaktionen wahrgenommen.

²⁾ Der Gemischeinfluß auf die Klopfreaktion ist in Übereinstimmung mit allen anderen Beobachtungen vorwiegend ein thermischer. Im Motor macht er sich außerdem durch einen mehr oder weniger stark beschleunigten Verbrennungsablauf bemerkbar. Bei Berücksichtigung der veränderten spezifischen Wärmen ist der Konzentrationseinfluß auf die Selbstzündungsreaktion un- direkt proportional der Kraftstoffkonzentration; erst bei sehr fetter oder magerer Gemischeinstellung treten Anomalien auf.

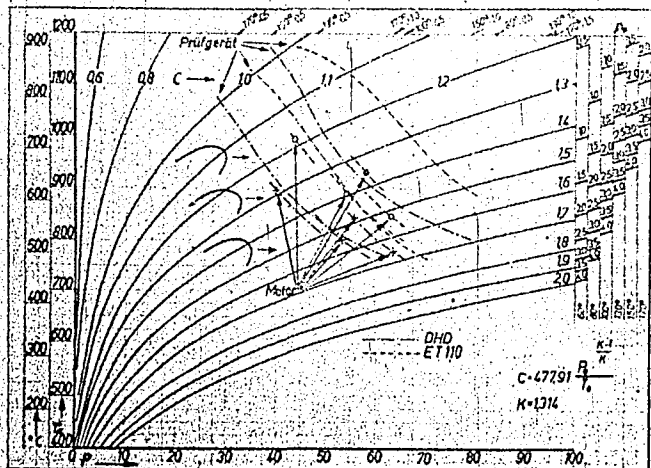


Abb. 13

Klopfgrenzkurven zweier Kraftstoff-Luft-Mischungen, aufgenommen im Motor BMW 132 und Prüfgerät.

Die im Motor bei ung. stöchlometr. Gemischeinstellung gemessenen Klopfzeitspunkte entsprechen der bei gleicher Kompressionsgeschwindigkeit im Prüfgerät gemessenen Zündzeitskurve (untere Kurve). Bei fetterer Gemischeinstellung erfolgt im Motor die Verbrennung schneller; entsprechend liegen diese Klopfzeitspunkte oberhalb dieser Kurve

der Klopferscheinung auf andere, wenn auch vorhandene physikalische und photochemische Effekte wohl verzichtet werden kann¹⁾.

Die Abbildung 14 zeigt noch eine Reihe im Zündprüfgerät von verschiedenen Treibstoffen aufgenommenen Klopfgrenzkurven, und zwar wieder für je zwei verschiedenen hohe Kompressionsgeschwindigkeiten²⁾.

¹⁾ Der vor allem in den oberen Temperaturbereichen schon vor der Zündung merklich werdende thermische Zerfall des Kraftstoffs, der Polymerisationsreaktionen mit Rußbildung zur Folge hat, läßt natürlich einen photochemischen Einfluß der Flammfront auf die Klopfreaktion zu.

²⁾ Die Temperaturabhängigkeit ergibt sich durch Schnitte parallel zur Ordinate, die Druckabhängigkeit durch Schnitte parallel zur Abszisse. Man beachte den geringen Unterschied in der Klopfbarkeit der durch die O.Z. 0 und 50 gekennzeichneten Kraftstoffe und den relativ großen Unterschied in der Klopfbarkeit der Kraftstoffe mit der O.Z. 50 bis 100.

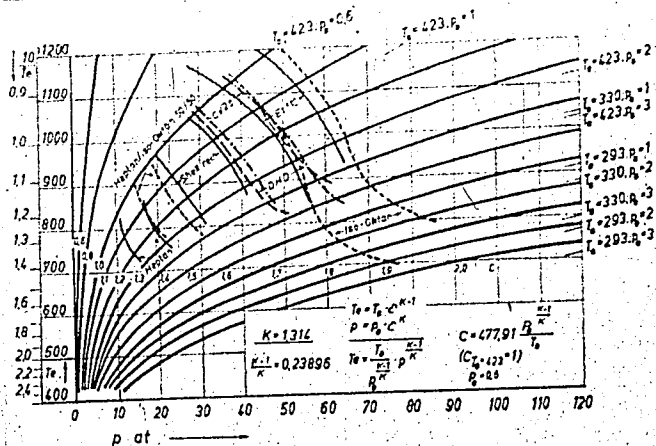


Abb. 14

Zündeinsatzgrenzen im Prüfgerät von Kraftstoff-Luft-Mischungen bei zwei Kompressionsgeschwindigkeiten

Die so im Motor wie auch im Prüfgerät ohne Fremdzündung übereinstimmend gefundene Druck- und Temperaturabhängigkeit der motorischen Klopfreaktion ist, wie gezeigt werden konnte, stark von dem zeitlichen Kompressionsverlauf des Treibstoff-Luft-Gemisches bis zum Klopf-einsatz abhängig und stellt daher sicherlich kein völlig eindeutiges Maß für die am Ort des Klopfesatzes selber ablaufende Reaktion dar. Wollte man den Vorgeschichteinfluß ausschalten, so müßte man bei Zündverzugsmessungen in den oberen Druck- und Temperaturbereichen bei normalen Apparatedimensionen mit mittleren Kolbengeschwindigkeiten von 100 bis 150 m/sek und einem Bremsweg des Kolbens von etwa 1 bis 2 mm arbeiten¹⁾.

Versucht man nun, sämtliche Erfahrungen und bekannten Versuchsergebnisse von Selbstzündungs- und Klopfmessungen miteinander in Ein-

¹⁾ Eine so vorgenommene Charakterisierung von Kraftstoffen, die sich nur auf Induktionszeiten bezieht, berücksichtigt natürlich nicht den Reaktionsablauf während des motorischen Kompressionsvorgangs. Es ist deshalb fraglich, ob derart überhaupt eine Übereinstimmung mit den motorischen Klopfverhalten von Kraftstoffen zu erreichen ist.

klung zu bringen, so dürften sich wahrscheinlich für den zeitlichen Ablauf der dem Klopfen im Motor zugrunde liegenden Oxydationsreaktionen folgende schematische Bilder ergeben.

Abbildung 15 zeigt schematisch den Geschwindigkeitsverlauf in dem bekannten Drucktemperaturdiagramm, wie er sich in einem isoparaffinischen Treibstoff-Luft-Gemisch nach einer Verweilzeit des Gemisches (bei den eingezeichneten Bedingungen) von etwa 10^{-4} sek einstellen dürfte. Die einzelnen Schattierungen entsprechen der Größenordnung nach ung. Zehnerpotenzen der Reaktionsgeschwindigkeit.

Die folgende Abbildung 16 zeigt dasselbe Gemisch nach einer Verweilzeit von rund 10^{-3} Sekunden. Im unteren Temperaturgebiet zwischen 500 und 700 Grad abs. ist ein Reaktionsgebirge herausgewachsen, welches

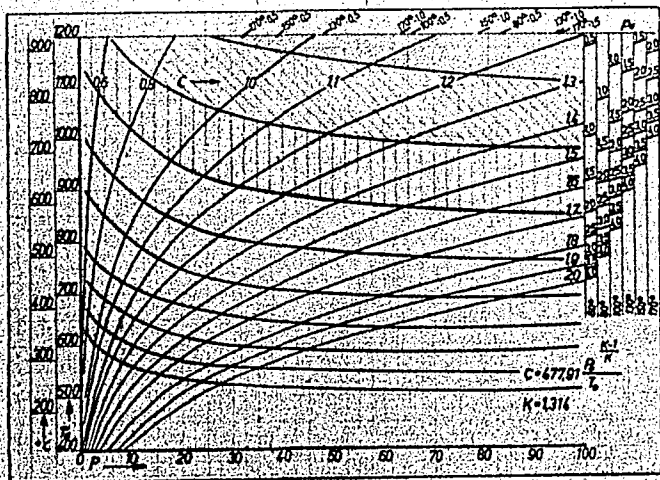


Abb. 15

Druck-Temperaturdiagramm mit eingezeichneten Reaktionsgebieten eines paraffinischen Kraftstoff-Luft-Gemisches. Die eingezeichneten Kurven entsprechen Zehnerpotenzen einer chemischen Reaktion mit einer Temperaturabhängigkeit prop. einer Aktivierungsenergie von ung. 30 Kal. und einer Druckabhängigkeit prop. $p^{1,2-1,5}$. Die schraffierten Bereiche stellen Reaktionsgebiete dar, in denen nach einer Verweilzeit des Gemisches bei diesen Bedingungen von 10^{-4} sek wahrscheinlich schon ein merklicher Umsatz statt hat.

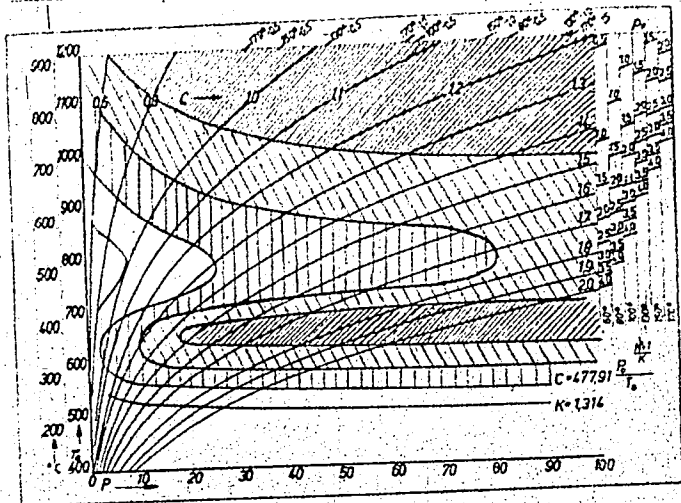


Abb. 16

Wahrscheinliche Geschwindigkeitsverteilung von selbst ablaufenden Oxydationsreaktionen eines paraffinischen Kraftstoff-Luft-Gemisches nach einer Verweilzeit von 10^{-3} Sekunden. Die Schraffierungen entsprechen wieder Zehnerpotenzen der Reaktionsgeschwindigkeit

seine Ursache in zeitlich besonders stark beschleunigten Reaktionen hat. In seinem Reaktionscharakter dürfte es den in den Niederdruckgebieten beobachteten kalten Flammen verwandt sein¹⁾. Auch das obere Reaktionsgebiet zeigt eine, wenn auch geringere Beschleunigung mit der Zeit und ist nach unten im Diagramm gerückt. Das Verhalten im Niederdruckgebiet bei langsamer ablaufenden Reaktionen ist nicht besonders hervorgehoben, da dasselbe durch Wandinflüsse bedingt stark von den jeweiligen Versuchsbedingungen abhängt.

Das untere Reaktionsgebiet entspricht in seiner scheinbar geringen Druck- und hohen Temperaturabhängigkeit des Reaktionsgeschehens den Zündverzugsmessungen von Tizard und Pye sowie Jost und Teichmann, ebenfalls dem Selbstzündungsverhalten von Kraftstoff-Luft-Mischungen.

¹⁾ Townend, zit.: Anmerkung 1. S. 27.

wie man es bei Versuchen in Motoren ohne Fremdzündung findet¹⁾ und dem bei nicht zu kurzen Zündverzügen gefundenen Reaktionsverhalten bei Einspritzversuchen in Bomben²⁾.

Bei Heptan ist das untere Reaktionsgebirge viel stärker als bei Isooktan ausgebildet und erstreckt sich weit hinein in das Niederdruckgebiet, entsprechend dem bei Heptan schon bei Atmosphärendruck ausgebildeten Kaltflammegebiet. Noch ausgeprägter ist dies bei paraf-

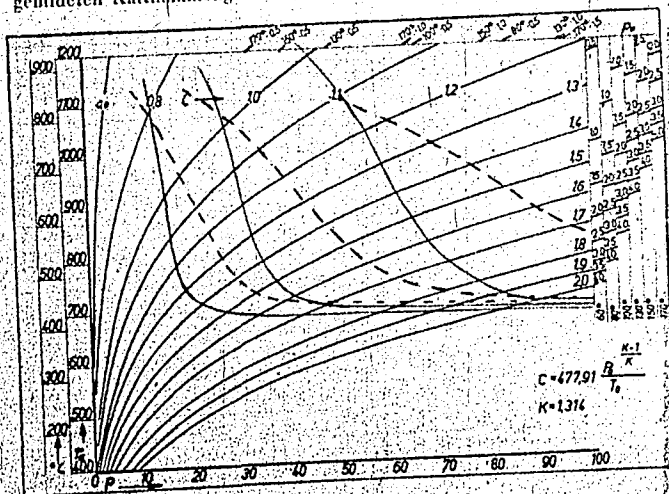


Abb. 17

Praktisch zu beobachtendes Zündverhalten von Kraftstoff-Luft-Mischungen. Die stark gekrümmten Kurven in der Abbildung stellen Zündverzögerungs- und Klopfgrenzlinien dar, wie man sie im Zündgerät und Motor bei fortlaufender, mit konstanter Geschwindigkeit vorgenommener Kompression beobachten kann.

¹⁾ E. Mühlner, Luftfahrtforsch., Bd 19 (1942) S. 249; vergleiche hierzu Abbildung 6. Es ist erachtlich, daß in einem Motor ohne Fremdzündung (untere Druckkurve) das Gemisch bei gleicher Drehzahl viel länger in dem kritischen unteren Temperaturbereich verweilt als mit Fremdzündung, wodurch schon hier Selbstzündungen auftreten können. Aus den Versuchen von Mühlner ist der negative Temperaturkoeffizient der zu Zündung-führenden Vorreaktionen oberhalb 390°C und der Zeiteinfluß gut ersicht.

²⁾ Lindner: siehe Abbildung 6.

finischen Dieselloren der Fall. Gleichzeitig ist in diesem Fall das obere Reaktionsgebiet nach unten verschoben, so daß ein ausgesprochen negativer Temperaturkoeffizient nur noch bei niederen Drucken zu beobachten sein dürfte, während die Überschneidung beider Reaktionszonen bei höheren Drucken hier zu extremen Zündgeschwindigkeiten schon in den Niederdruckgebieten führen kann. Ebenfalls nimmt die scheinbare Druckabhängigkeit dieser Stoffe in den unteren Temperaturgebieten zu. Auch bei Aromaten findet sich im unteren Temperaturgebiet eine vorgeschobene Reaktionszone zeitlich stark beschleunigter Reaktionen, ohne jedoch ins Niederdruckgebiet herabzureichen und weniger stark ausgeprägt. Das Verhalten praktischer Kraftstoffe dürfte entsprechend der Vielzahl vorhandener Kohlenwasserstoffe komplizierter sein und nicht so ausgesprochene Reaktionszonen aufweisen. Die gegenseitige Beeinflussung beider Reaktionszonen im mittleren Temperaturbereich wird nun zu einem Verlauf der Zündgrenzen führen, wie aus Abbildung 17

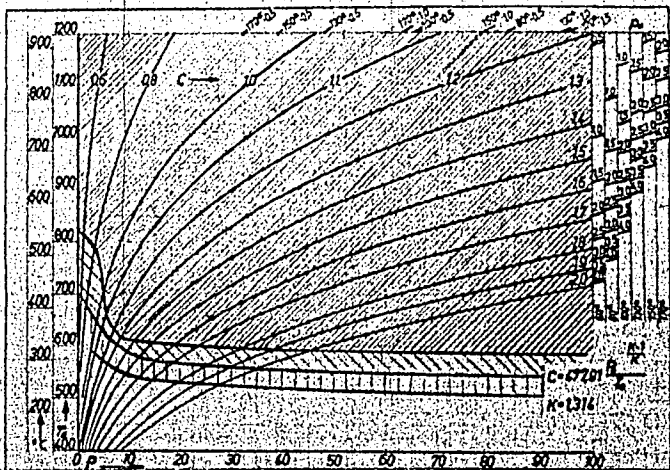


Abb. 18

Zündgrenzlinien paraffinischer Kraftstoff-Luft-Mischungen nach einer Verweilzeit von 10^{-3} Sekunden. Ein geringer Temperaturkoeffizient der Selbstzündungsreaktion ist bei längeren Induktionszeiten nur noch bei niedrigen Drucken zu beobachten

ersichtlich ist. Die eingetragenen Kurven entsprechen dem Druck- und Temperaturverhalten, wie man es im Motor wie auch im Prüfgerät messen kann¹⁾.

Abbildung 18 zeigt noch einmal den Reaktionsverlauf, wie man ihn nach einer Verweilzeit des Gemisches in den bezeichneten Gebieten nach 10^{-2} Sekunden erhält.

Sehr schön fügen sich in dieses Bild außer den bisher bekannten Zündverzugsmessungen einige zum Teil noch nicht veröffentlichte von F. A. F. Schmidt und Scheuermeyer zur Verfügung gestellte Zündverzugsmessungen adiabatisch komprimierter Kraftstoff-Luft-Mischungen ein (Abbildung 19).

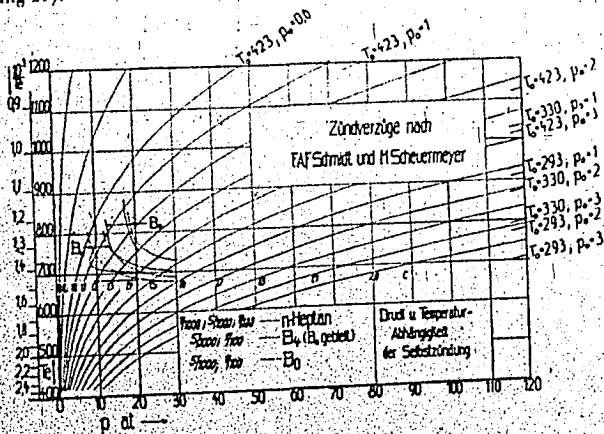


Abb. 19

Zündverzugsmessungen von Kraftstoff-Luftmischungen nach F. A. F. Schmidt und Scheuermeyer, Methode: adiabatische Kompression mit festgehaltenem Kolben im Versuchsbereich

Nach dem oben Angeführten dürften der Behandlung der Klopfreaktion als Selbstzündung des unverbrannten Gemischanteils im Motor keine grundsätzlichen Schwierigkeiten mehr im Wege stehen.

¹⁾ Vergleiche Abbildungen 12 bis 14.

Für eine einheitliche Beurteilung-gründlage von Treibstoff und Motor ergäbe sich damit folgendes: Jeder Treibstoff kann mit Hilfe des angeführten p. T-Diagramms in seinem Klopfverhalten für alle möglichen Drucks-, Temperatur- und Zeitbedingungen durch eine Kurvenschar für alle Motorbedingungen qualitativ beschrieben werden. Dabei muß hervorgehoben werden, daß es gleichgültig ist, ob diese Charakterisierung durch Messungen in einem Prüfgerät oder in einem Motor erfolgt¹⁾.

Zum anderen könnte jeder Motor durch direkte Messung des zeitlichen Druckverlaufs in seinem Brennraum in Abhängigkeit von beliebigen Betriebsbedingungen und Gemischsangsdaten umfassend qualitativ in seiner Klopfneigung beschrieben werden (Abbildung 1) (innerhalb desselben Diagramms)²⁾.

Bringt man jetzt Motor- und Kraftstoffdiagramm zur Deckung, so ergibt eine Zuordnung der im Motor bei den verschiedensten Betriebsbedingungen gemessenen Druckspitzen- und zugehörigen Kompressionsgeschwindigkeiten zu der bei den gleichen Bedingungen gemessenen Klopfneigung des Kraftstoffs eine umfassende qualitative Beurteilungsmöglichkeit der Eignung eines Treibstoffs für einen gegebenen Motor.

Scheint ein solches Verfahren auf den ersten Blick auch reichlich umständlich, so bleibt doch hervorzuheben, daß es nur einmal notwendig ist, einen Treibstoff oder Motor für alle vorkommenden Bedingungen durch eine umfassende Messung zu charakterisieren.

Am wichtigsten erscheint aber, daß sich ein solches Verfahren nicht auf den Kraftstoff beschränkt, sondern in gleicher Weise auch den Motor gewissermaßen praktisch in seiner Klopfneigung erfaßt; hierdurch ist eine grundsätzliche Möglichkeit gegeben, sowohl der motorischen wie auch der Treibstoffentwicklung eine einheitliche Ausrichtung zu geben.

Auf alle sich daraus ergebenden Punkte kann in diesem Zusammenhang nicht eingegangen werden, es sei nur kurz auf die hervorragende Bedeutung des Zeiteinflusses auf den Klopfvorgang hingewiesen; einer Verdoppelung der Geschwindigkeit des Brennablaufs im Motor, d. h. einer Verdoppelung der Kompressionsgeschwindigkeit entspricht im Mittel einer zulässigen Leistungssteigerung der Klopfgrenze bis zu 50%³⁾.

1) Vergleiche Anmerkung 2 S. 24 und Abbildung 13.

2) Vergleichende Klopfmessungen im Motor und Prüfgerät sind in Arbeit und haben bisher zu keinen Widersprüchen geführt.

3) Hierbei ist zu berücksichtigen, daß eine Drehzahlerhöhung am Motor mit einer Erhöhung des Wärmesustandes verbunden ist, wodurch die Vorteile einer Drehzahlerhöhung teilweise rückgängig gemacht werden.

Der in der Abbildung 17 in den mittleren Temperaturgebieten auftretende geringe Temperaturkoeffizient ist allein schon dadurch begründet, daß überhaupt Selbstzündungsmessungen in Temperaturgebieten von 1200° abs. vorgenommen werden können, wenn bei 700° abs. schon Induktionszeiten in der Größenordnung von wenigen 10^{-3} sek gemessen werden.

Für das Vorhandensein gänzlich verschiedener Reaktionsgebiete spricht auch die Beobachtung, daß die Härte des in den unteren Temperaturgebieten bei der Klopfzündung auftretenden Druckstoßes sehr viel stärker als in den oberen Gebieten ist; gleichzeitig findet hier eine vollständigere Verbrennung statt (Seite 22²⁾ und 31²⁾).

Dies spricht für das Vorliegen einer zeitlich stark beschleunigten in der Hauptsache isotherm anlaufenden Reaktion im unteren Temperaturbereich, die dann wahrscheinlich nicht in eine Wärmexplosion übergeht, wogegen auch der negative Temperaturkoeffizient spräche, sondern ihren weiteren Verlauf in der Hauptsache über Energieketten nehmen dürfte, wobei eine Gleichverteilung der Temperatur erst nach völligem Umsatz zu erfolgen braucht.

Der auftretende negative Temperaturkoeffizient kann seine Ursache in der Ablösung von Verzweigungsreaktionen durch stärker temperaturabhängige einfache Kettenreaktionen haben, wobei man im großen und ganzen wohl dieselben Überlegungen anstellen darf, wie sie von W. Joist zur Deutung des negativen Temperaturkoeffizienten in den niederen Druckgebieten angestellt worden sind¹⁾. Zu den gleichen Ergebnissen würde man kommen, wenn man im unteren Temperaturgebiet Gleichgewichtslagen instabiler als Kettenzentren wirkender Zwischenprodukte von nur kurzer Lebensdauer annimmt.

Wieweit der in den oberen Temperaturgebieten einsetzende thermische Zerfall für den negativen Temperaturkoeffizienten verantwortlich zu machen ist, ist bisher nicht eindeutig festgestellt.

In den oberen Temperaturgebieten scheint er jedenfalls eine erhebliche Rolle beim Selbstzündungsvorgang mitspielen.

¹⁾ Mathematisch gelangt man zu einer Formulierung der Druck- und Temperaturabhängigkeit der Klopfreaktion, wenn man derselben zwei miteinander konkurrierende Reaktionsfolgen zugrunde legt, deren isotherme Reaktionsbeschleunigung verschiedene Größenordnungen aufweist. Die Startreaktion ist dieselbe. Die Reaktionsfolgen zeigen verschiedene Temperaturabhängigkeiten. Es dürfte aber noch verfrüht sein, bei dem zur Verfügung stehenden Versuchsmaterial derartige Formulierungen aufzustellen.

Die folgende Abbildung 20 zeigt noch einmal eine Filmaufnahme der Klopfzündung eines aromatischen Kraftstoff-Luft-Gemisches. Auf ihr ist vor der eigentlichen harten Klopfzündung schon deutlich eine milde Vorverbrennung zu erkennen. Es handelt sich hier wahrscheinlich um eine Vorverbrennung der vom aromatischen Kern abgesprengten Teile von Seitenketten oder Wasserstoff. Seine Parallele dürfte diese Erscheinung evtl. in der im Motor beobachteten Glühzündung oder Frühzündung



Abb. 20

Zündelinsatzmessung eines adiabatisch komprimierten aromatischen Kraftstoff-Luft-Gemisches. (Die Punkte auf der Kompressionslinie gehören nicht zur Aufnahme.) Vor dem starken Zündelinsatz ist eine milde Vorverbrennung sichtbar.

haben. Daß der Aromatenkern während dieser Vorverbrennung, die ohne Stoßwelle verläuft zum Teil noch erhalten gewesen sein dürfte, geht daraus hervor, daß unter diesen Bedingungen und nach stattgehabter Klopfzündung ein qualitativ erheblicher Anteil des im Ausgangsstoff vorhandenen gewesenen Kraftstoffs nach vorhergegangenen Polymerisationsreaktionen jetzt als unverbrannter dichter Ruß vorliegt. Parallel hierzu dürfte wieder die Beobachtung am praktischen Motor sein, daß bei starkem Klopfen in den Auspuffgasen Ruß beobachtet wird. Bei Paraffinen ist diese Erscheinung nicht so ausgeprägt. Des weiteren ergeben

sich ausgesprochene Parallelen zwischen der Zerfallneigung und Klopf-
festigkeit von Aromaten allein oder in Mischung mit paraffinischen Kraft-
stoffen.

Über die im Anschluß an die Klopfzündung auftretende Stoßwelle
kann nichts Eindeutiges ausgesagt werden, da der für diese Messungen
benutzte Quarzdruckgeber den Vorgang wahrscheinlich nicht verzerrungs-
frei und ohne Störungen wiedergab. Die Frequenz der beobachteten
Schwingung (siehe Abbildung 11) entsprach einer Ausbreitungsgeschwin-
digkeit der Stoßwelle von 700 bis 1800 m pro Sekunde.

Die beim Klopfinsatz beobachteten Druckspitzen klingen während
der Schwingung schnell ab und betragen teilweise ein Mehrfaches der er-
warteten Werte. Mit der Beurteilung von Druckmessungen sollte man in
diesem Fall aber vorsichtig sein.

Der beobachtete Bleieinfluß spricht ebenfalls mit die beobachteten
Klopfstärken für einen zeitlich besonders stark beschleunigten Reaktions-
ablauf im unteren Temperaturgebiet. Der Bleieinfluß ist hier recht klein, um
im oberen Gebiet motorische Größenordnung anzunehmen. Abbildung 21

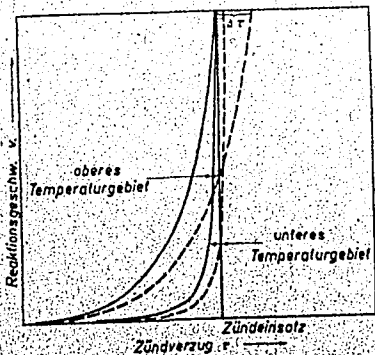


Abb. 21

Schematische Darstellung des Bleieinflusses auf Selbstzündungsreaktionen von Kraft-
stoff-Luft-Mischungen mit hoher und geringer Isothermer Beschleunigung der Reaktions-
geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit. (Ohne Blei gleich großer Zündverzug,
gleiche kritische Reaktionsgeschwindigkeit.) Eine Reaktionshemmung durch Bleisatz
führt zu einer starken Verlängerung des Zündverzuges bei der wenig zeitabhängigen
Reaktion

zeigt den zeitlichen Verlauf einer mehr oder weniger zeitlich stark beschleunigten Reaktion. Als Abszisse ist der Zündverzug, als Ordinate die Reaktionsgeschwindigkeit eingetragen. Wie aus der Abbildung ersichtlich, wirkt sich ein reaktionshemmender Einfluß auf eine stark mit der Zeit beschleunigte Reaktion nur gering auf den beobachteten Zündverzug aus, andererseits kann eine geringere Reaktionshemmung auf eine nur wenig mit der Zeit beschleunigt anwachsende Reaktion schon eine erhebliche Verlängerung des beobachteten Zündverzugs mit sich bringen. Das gleiche gilt für mehr oder weniger stark temperaturabhängige Reaktionen.

Der Einfluß der Gemischstärke auf den beobachteten Klopfvorgang ist bei nicht zu hoher Gemischstärkeänderung im wesentlichen in Übereinstimmung mit allen früheren Beobachtungen ein thermischer. Bei stärkerer Gemischvariation machen sich allerdings ausgesprochene Sonderinflüsse bemerkbar.

Es ist mir ein Bedürfnis, an dieser Stelle Herrn Mücklich vom Reichsluftfahrtministerium und Herrn Gießmann von der Erprobungsstelle der Luftwaffe in Rechlin und seinen Mitarbeitern zu danken. Durch Zurverfügungstellung von Arbeitsräumen und Mitarbeitern von seiten Herrn Gießmanns war es mir möglich, diese Arbeiten im Einvernehmen und mit Unterstützung durch die Forschungsführung durchzuführen. Herrn von Philippovich danke ich für seine stets tätige Mithilfe, den Herren W. Jost, E. Schmidt und F. A. F. Schmidt für ihr Interesse an dieser Arbeit.

Aussprache

E. Schmidt: Herr von Philippovich gab uns mit seinem Vortrag einen sehr guten Überblick über die Entwicklung der Prüfmethode und die heutigen Möglichkeiten zur Beurteilung von Kraftstoffen. Beachtlich erscheint mir die Trennung in die Stoffcharakteristik durch die adiabatische Selbstzündung und die Motorcharakteristik, die etwas verwickelter ist. Ich glaube aber, daß man bei der Charakteristik der adiabatischen Selbstzündung auch nicht umhin kommen wird, noch gewisse Normalisierungen vorzunehmen in bezug auf z. B. die Geschwindigkeit des Druckanstiegs, Dauer der Temperatureinwirkung usw. Da aber inzwischen eine ganze Reihe von Einrichtungen dieser Art an verschiedenen Stellen geschaffen sind, wird man bald sehen können, wie weit solche Einflüsse von Bedeutung sind. Ich danke ebenso Herrn Teichmann für seinen Vortrag, der schon eine ganze Reihe von Beurteilungsunterlagen für die Bewertung des Kraftstoffs durch die adiabatische Verdichtung gegeben hat und eröffne jetzt die Aussprache zu den beiden Vorträgen.

Lindner: Herr Teichmann hat uns ein sehr schönes Auswertungsverfahren für die Bewertung der Kraftstoffe im Motor vorgeführt, das vor allem die bisherigen Schwierigkeiten über die Größenordnung des Druck- und Temperatureinflusses auf die Induktionszeit im Motor klarzustellen erlaubt. Das Verfahren wird zunächst einen wesentlichen Ausgangspunkt für die weitere Erforschung der Zusammenhänge von Kraftstoffeigenschaft und Motoreinfluß bilden können.

Besondere Schwierigkeiten bereitet bekanntlich die Beurteilung der Aromaten. Bei der Untersuchung vorwiegend aromatischer Kraftstoffe im Motor kann der Fall eintreten, daß der Motor mit steigender Drehzahl leichter klopft, obwohl die für die Einleitung des Klopfvorgangs zur Verfügung stehenden Zeiten kürzer werden. Diese mit zunehmender Drehzahl erhöhte Klopfneigung des Motors ist durch seinen erhöhten Wärmezustand bei Verwendung aromatischer Kraftstoffe zu erklären. Bei der Untersuchung in der adiabatischen Zündapparatur tritt dieser Temperatureinfluß nicht in Erscheinung, da jeweils nur eine Zündung vorgenommen wird und sich ein Beharrungszustand, wie er im Motor eintritt, nicht einstellt. Er könnte vielleicht durch geeignete Wahl der Anfangsbedingungen in der Apparatur berücksichtigt werden. Der Wärmezustand des Motors ist im vorliegenden Falle gegeben durch seinen Aufbau, er wird aber bestimmt durch die Wärmeabgabe an die Wände während des Umsatzvorgangs und ist somit auch eine Funktion des Kraftstoffs. Es erscheint mir daher fraglich, ob es — wie Herr Teichmann annimmt — möglich sein wird, die Motorcharakteristik in seinem Schaubild durch Eichung des Motors mit einem beliebigen Kraftstoff allgemein gültig festzulegen.

In diesem Zusammenhang sei auch auf den Vorgang der Frühzündung hingewiesen, der bei Aromaten eine wesentliche Rolle spielt. So neigt Benzol leicht zur Frühzündung, ohne daß die Klopferscheinung auftritt. Über diese Vorgänge, bei denen vermutlich der Einfluß heißer Wandungsteile die maßgebende Bedeutung besitzt und die für

die Bewertung der Kraftstoffe, da die Frühzündung für den Betrieb des Motors ebenso schädlich ist wie der Klopfvorgang, von großer Bedeutung sind, ist z. Z. noch sehr wenig bekannt. Ob hierbei heterogene Reaktionen an den Wandungen eine Rolle spielen, erscheint wegen der Kürze der im Motor zur Verfügung stehenden Zeiten fraglich. Die mit Hilfe von elektrisch beheizten im Motor eingebauten Drähten oder Platten gemessenen Glühzündungstemperaturen lassen bisher überhaupt keinen Zusammenhang mit der Neigung der Kraftstoffe zur Frühzündung erkennen.

Sehr interessant ist in diesem Rahmen das von Herrn Teichmann beobachtete abweichende Verhalten der aromatischen Kraftstoffe, in dem diese bereits vor dem eigentlichen, dem Klopfvorgang entsprechenden Durchzünden ein deutlich erkennbares Aufleuchten zeigen, das auf Vorreaktionen schließen ließ; aber gerade bei Aromaten, z. B. Benzol, haben sich bisher Vorreaktionen im üblichen Sinne nicht nachweisen lassen. Ich habe bei meinen früheren Bombenversuchen ähnliche Erscheinungen an Benzol-Luft-Gemischen im Bereich starken Luftmangels feststellen können. Hierbei trat zunächst von der Zündstelle aus die Fortpflanzung einer Flamme mit der für Bombenversuche üblichen Brenngeschwindigkeit auf, womit, wie der Druckverlauf zeigte, ein schon recht weitgehende Energieumsetzung verbunden war. Nachdem die Drucksteigerung fast zu Null geworden war und die Flammenfront die Wandungen der Bombe (nach gleichzeitig aufgenommenen Schlierenbildern der Front) erreicht hatte, trat ein plötzliches Durchzünden des Bombeninhalts mit steiler Drucksteigerung wie beim Klopfstoß ein. Auf ähnliche Erscheinungen haben in letzter Zeit auch amerikanische Forscher hingewiesen und daraus die Möglichkeit einer Klopfreaktion im Anteil hinter der Flammenfront abgeleitet. Diese Zusammenhänge sind zunächst noch vollkommen ungeklärt. Ich möchte aber hiermit zeigen, wie wichtig z. Z. nähere Untersuchungen vor allem im Motor selbst über das Verhalten der Aromaten sind, um daraus allgemeine Grundlagen für die Beurteilung der Kraftstoffe zu erhalten.

Scheuermeyer: Ich möchte noch eine kurze Bemerkung über den Zusammenhang zwischen den Messungen von Herrn Teichmann und den in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt durchgeführten Untersuchungen anfügen. Bekanntlich wurde bei den Zündverzugsmessungen der DVL das zu untersuchende Kraftstoff-Luft-Gemisch annähernd adiabatisch verdichtet, sodann der Kolben am Ende der Verdichtung abgebremst und festgehalten und der Zeitpunkt vom Ende der Verdichtung bis zum Zündeinsatz als Zündverzug gemessen. Bei den von Herrn Teichmann soeben mitgeteilten Versuchen wurde bis zum Zündeinsatz verdichtet. Es ergibt sich somit folgender Verlauf des Drucks über der Zeit:

Bei den Versuchen der DVL erfolgt ein Druckenstieg während der adiabatischen Verdichtung bis zum Festhalten des Kolbens, sodann bei annähernd konstantem Druck die Periode des Zündverzugs und anschließend der Zündeinsatz. Bei H. Teichmann wird nach dem gestrichelt gezeichneten Verlauf bis zum Zündeinsatz weiter verdichtet. Der von der DVL gemessene Zündverzug wird der adiabatischen Verdichtungsdrucktemperatur und dem entsprechenden Verdichtungsdruck zugeordnet (in der Abbildung mit Punkt 1 bezeichnet). Bei Teichmann gilt für den Zündeinsatz die in Punkt 2 herrschende Temperatur und der entsprechende Druck.

Trotzdem in beiden Fällen das Reaktionsgeschehen unter sonst gleichen Verhältnissen (gleiche Anfangstemperatur und gleicher Anfangsdruck) beginnt, wird die Kennzeich-

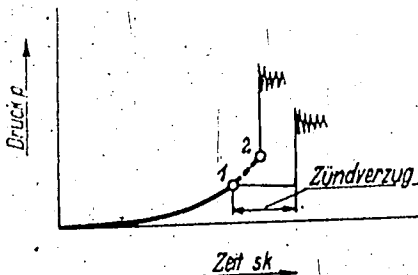


Abb. 1

nung des Reaktionsablaufs bei den Messungen von Teichmann und der DVL verschiedenen Drücken und Temperaturen zugeordnet. Da sich bei beiden Methoden die für den Zündvorgang zugrunde gelegten Druck- und Temperaturwerte auf verschiedene Phasen des Zündvorgangs beziehen, sind daher bei gleichen Verdichtungs- und Endtemperaturen und denselben Enddrücken die Ergebnisse in beiden Fällen nicht unmittelbar vergleichbar.

Der Zusammenhang der Ergebnisse beider Meßverfahren kann dadurch hergestellt werden, daß man entweder rechnerisch an Hand der von F. A. F. Schmidt mitgeteilten Beziehungen über die Reaktionsgeschwindigkeit mit den aus Zündverzugsmessungen ermittelten Kennwerten den Druck- und Temperaturverlauf von Punkt 1 zu Punkt 2 bestimmt oder vergleichsweise Versuche mit festgehaltenem Kolben und anschließend mit Verdichtung bis zum Zündensatz durchführt. Messungen dieser Art können mit der Versuchseinrichtung der DVL vorgenommen werden und sind zur Zeit in Vorbereitung.

Das wesentliche Ergebnis der von Herrn Teichmann durchgeführten neuen Versuche über das Selbstzündungsverhalten besteht darin, daß — entsprechend seinen nunmehrigen Feststellungen — in dem für das Klopfen im Otto-Motor in Frage kommenden Druck- und Temperaturbereich die Druckabhängigkeit der Reaktion im Vergleich zur Temperaturabhängigkeit von entscheidender Bedeutung ist. Damit ist volle Übereinstimmung mit den im vorigen Jahre von der DVL gezeigten Messungen vorhanden.

F. A. F. Schmidt: Wie schon Herr Scheuermeyer eben ausgeführt hat, wurde von Herrn Teichmann an Hand seiner Untersuchungen mit einem von der DVL verschiedenen Verfahren ebenfalls die von der DVL schon früher festgestellte, im Verhältnis zur Temperaturabhängigkeit bedeutende Druckabhängigkeit der Reaktionsvorgänge festgestellt.

Es ist sehr erfreulich, daß nunmehr in dieser wichtigen Frage Übereinstimmung herrscht. Die Druckabhängigkeit der Reaktion und damit der Einfluß des Ladedrucks auf die Klopfgrenze im Motor ist beim Hochleistungs-Otto-Motor deshalb von entscheidender Bedeutung, weil ja bekanntlich im praktischen Motorbetrieb die Leistung haupt-

sächlich durch den Ladedruck gegeben und auch begrenzt ist. Unsere Ergebnisse über den entscheidenden Einfluß des Drucks auf die zum Klopfen führenden Reaktionen wurden noch im vorigen Jahre stark angezweifelt, jedoch werden sie nunmehr durch die Messungen von Herrn Teichmann erneut bestätigt, so daß eine einheitliche Meinung auf diesem Gebiet vorhanden sein dürfte.

E. Schmidt: Da weitere Diskussionen nicht gewünscht werden, danke ich den Herren Vortragenden und Diskussionsrednern für ihre Bemerkungen, die gezeigt haben, daß wir auf dem Wege der Beurteilung des Kraftstoffs unabhängig vom Motor eine Methode gefunden haben, die wenigstens die zusätzlichen verwickelten Einflüsse des Motors zunächst ausschaltet und ein Verfahren gibt, mit dem man das Klopfverhalten des Kraftstoffs eindeutig charakterisieren kann.