

Neue Untersuchungen zur Ermittlung der Einzeleinflüsse beim Klopfvorgang im Motor

Von Fritz A. F. Schmidt

Zur Aufklärung der Ursachen des Klopfvorganges im Motor wurden in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt Untersuchungen in einer Bombe, in einer Verdichtungsapparatur und in einer Spezialapparatur durchgeführt.

Die Versuche waren so aufgebaut, daß eine weitgehende Trennung der im Motor auftretenden Vorgänge in Einzeleinflüsse möglich war. Zu diesem Zwecke wurden sowohl die Vorgänge bei der Tropfenbildung, Verdampfung und Gemischbildung als auch die chemischen Vorgänge unter möglichst klarliegenden Versuchsbedingungen untersucht.

Bei den Auswertungen wurde angenommen, daß der Reaktionsvorgang in einem beschränkten Temperaturbereich durch eine mittlere Reaktionsgleichung dargestellt werden kann, und zwar wurde, um die Vorgänge, die sich während der Verbrennung abspielen, der Rechnung zugänglich zu machen, zunächst angenommen, daß die Reaktionsgeschwindigkeit eines bestimmten Kraftstoff-Luft-Gemisches nur vom Druck und von der Temperatur abhängig ist und in dem betreffenden Temperatur- und Druckbereich durch die Beziehung

$$\frac{d[B]}{dz} = \frac{p^n d}{e^{b/T}}$$

wiedergegeben werden kann. Für den Zündverzug ergab sich daraus die Beziehung

$$z = \frac{e^{b/T}}{p^n} a \cdot \beta.$$

In diesen Gleichungen sind b , n und a empirisch ermittelte Konstanten, die im Gegensatz zu den Konstanten der entsprechenden aus reaktionskinetischen Betrachtungen abgeleiteten Gleichung für die Reaktionsgeschwindigkeit keine spezielle physikalische Bedeutung besitzen. Der Faktor β ergibt sich bei der Integration und stellt eine Funktion

der Temperatur und der Größe b dat. Würde man den Wert a nicht berücksichtigen, also den Zündverzugs empirisch durch die Gleichung

darstellen, so würden sich hier für a und b etwas andere Werte ergeben, als in der Gleichung für die Reaktionsgeschwindigkeit.

Bei diesen früher durchgeführten vergleichenden Untersuchungen über Zündverzug und Klopfvorgang wurde weiter angenommen, daß das Klopfen in dem Augenblick eintritt, in dem die Reaktionsgeschwindigkeit sehr groß wird. Dabei konnte festgestellt werden, daß es möglich ist, die Gesetzmäßigkeit des Klopfvorganges im Motor bei Änderung der Verdichtung, des Druckes und der Temperatur der Ladeluft und des Zündzeitpunktes für einen bestimmten Kraftstoff bei konstantem Luftüberschuß durch eine einzige Beziehung wiederzugeben, wobei für die Reaktionsgeschwindigkeit der obige empirische Ansatz zugrunde gelegt wurde. Dabei konnte eine gute qualitative Übereinstimmung der motorischen Ergebnisse mit den Zündverzugsmessungen festgestellt werden.

Aus den Klopfversuchen können die Konstanten der Gleichung für die Reaktionsgeschwindigkeit näherungsweise abgeschätzt werden. Wenn auch gewisse Unsicherheiten bei der Bestimmung der Temperaturen im Motor und durch die Einflüsse der Wandwirkung und andere durch den praktischen Motorbetrieb bedingte Umstände vorhanden sind, so müssen die so ermittelten Werte zwar nicht mit großer Genauigkeit, aber jedenfalls in der Größenordnung richtig sein. Auch waren bei Versuchen in der Bombe die ermittelten Konstanten verschiedener Kraftstoffe sowohl in ihrer Größenordnung als auch in ihrer relativen Veränderung dieselben wie bei den Motorversuchen. Durch die Auswertungen konnte noch nicht festgestellt werden, ob die Reaktionsgeschwindigkeit eine eindeutige Funktion des augenblicklichen Druckes und der augenblicklichen Temperatur ist und inwieweit während des Zündverzugs eine Temperatursteigerung auftritt. Es konnte jedoch geschlossen werden, daß der Klopfvorgang in einem beschränkten Druck- und Temperaturbereich durch eine Reaktion erklärt werden kann, deren Geschwindigkeit in der Größenordnung durch den reziproken Wert einer Druckpotenz und eine e -Funktion der Temperatur wiedergegeben werden kann. Die Eigenschaften des Kraftstoffes im Hinblick auf die Druck- und Temperaturunabhängigkeiten des Reaktionsvorganges, die in den aus den Zündverzugs-

messungen bestimmten Konstanten zum Ausdruck. Einmal ist es notwendig die Auswirkungen der Motorversuche in der gleichen Form festzustellen.

Die im Motor durchgeführten Versuche über den Einfluß des Ladedruckes und der Ladedufttemperatur auf den Klopfvorgang waren nur so zu erklären, daß der Druckeinfluß gegenüber dem Temperatureinfluß von entscheidender Bedeutung ist. Dieses Ergebnis steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen physikalischer Untersuchungen einiger Autoren, insbesondere kam Jost¹⁾ auf Grund seiner Messungen zu dem Ergebnis, daß die Reaktionsgeschwindigkeit beim Klopfen empfindlich nur von der Temperatur abhängt. Jost hielt den bei unseren Auswertungen berücksichtigten starken Druckeinfluß, - - wonach einer Druckänderung von 50% Temperaturänderungen bis 100° äquivalent waren - - für reaktionskinetisch völlig unmöglich²⁾. Nach seiner Ansicht ist der Einfluß des Ladedruckes auf das Klopfen im Motor in Wirklichkeit überwiegend ein indirekter Temperatureinfluß, da die Temperatur im Zylinder bei der Überladung aus verschiedenen Gründen steigen muß. Wenn ein solcher Einfluß auch in geringem Umfang vorhanden ist, so erscheint es doch vollkommen ausgeschlossen, auf diese Weise mit den von Jost angegebenen Werten für den Temperatur- und Druckeinfluß auf die Reaktionsgeschwindigkeit den Druck- und den Temperatureinfluß auf das Klopfverhalten des Motors und die Ergebnisse der in der DVL durchgeführten Bombenuntersuchungen auch nur annähernd zu erklären.

Um diese Widersprüche aufzuklären und um die für das Klopfen maßgebenden physikalischen Grundvorgänge zu ermitteln, wurden weitere Untersuchungen in Angriff genommen, die insbesondere dem Einfluß des Druckes auf den Klopfvorgang galten. Zu diesem Zwecke wurden Parallelversuche jeweils mit denselben Kraftstoffen an zwei Apparaturen zur Ermittlung des Selbstzündungsverhaltens und an einem Motor in Angriff genommen. Es wurden somit folgende Versuchsreihen durchgeführt:

1. Zündverzugsmessungen bei verschiedenen Drücken und Temperaturen in einer geheizten Bombe mit Einspritzung flüssigen Kraftstoffes,

¹⁾ Bericht der Lilienthal-Gesellschaft für Luftfahrtforschung über die Tagung »Betriebsstoffe für Hochleistungsmotoren«, Febr. 1939 in Bremen.

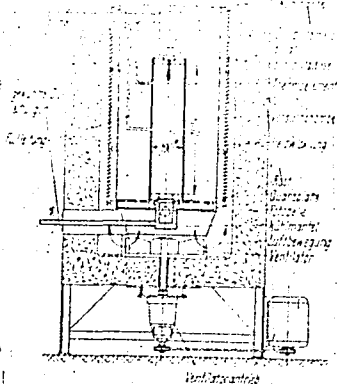
²⁾ Heft 9 der Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, Berlin 1939, S. 259, »Physikalische und chemische Vorgänge bei der Verbrennung im Motore.

2) Zündverzugsmessungen bei verschiedenen Drücken und Temperaturen in einem Apparat, der eingehend beschrieben ist in der Abhandlung nach dem Verfasser in *Annalen der Physik* 1911, 37, 1, 107 und 108.

3) Motorversuche bei verschiedenen Drücken und Temperaturen der Ladung.

Es war die Aufgabe, die mit diesen Versuchsreihen festgestellten Kennzahlen möglichst auf einheitlicher Basis zu vergleichen.

Abb. 1



Versuchsbombe zur Untersuchung des Selbstzündungsverhaltens von Kraftstoffen

Die von meinem Mitarbeiter Franke gebaute Bombe der Abbildung 1 unterscheidet sich von bisher bekannten Versuchsapparaturen im wesentlichen dadurch, daß es mit ihr möglich ist, Temperaturen bis über 1000° abs einzustellen. Zur Herstellung eines gleichmäßigen Temperaturniveaus wurde die ganze Bombe in einem großen Heizofen untergebracht. Sie ist für Einspritzung des Kraftstoffes in flüssigem Zustand oder für Einblasen in gasförmigem Zustand eingerichtet. Der Zündvorgang konnte mit Fotozelle und mit Druckmessung verfolgt werden. Durch eine sorgfältige konstruktive Durchbildung der Auslösvorrich-

³⁾ H. T. Tizard und D. R. Pye, *Phil. Mag.* (6) 44 (1922) 79; (7) 1 (1926) 1094.

⁴⁾ W. Jost, *Zs. Elektrochem. u. angew. physikal. Chemie* 47 (1941) 262; H. Teichmann, *Chemica*, 47 (1941) 297.

Versuchseinrichtung
zur Untersuchung
der Selbstzündung
von Kraftstoff-
dampf-Luft-
Gemischen (an-
nähernd adiabatische
Verdichtung)



ungen und Meßapparaturen wurde die Erzielung genauer Messungen ermöglicht.

In Abbildung 2 ist die von meinen Mitarbeitern Scheuermeyer und Steigerwald entwickelte Apparatur zur annähernd adiabatischen Verdichtung dargestellt. Während Tizard und Pye zur Bewegung des Kolbens einen Kurbeltrieb verwendeten, bei dem der Kolben in der oberen Totpunktlage ausgeklinkt und festgehalten wurde, und Jost zur Bewegung des Kolbens ein Fallgewicht benutzt, wird hier der Kolben durch Preßluft beschleunigt⁵⁾. Diese Anordnung ermöglicht bei einfachem Aufbau und sehr kurzen Verdichtungszeiten ein sehr genaues Arbeiten. Wegen des verhältnismäßig großen Zylinderdurchmessers von 80 mm — Jost arbeitet mit Durchmessern von 30 bis 53 mm — ist hier der Wandeinfluß geringer. Weiter wurden bei der neu geschaffenen Apparatur Vorkehrungen für einen möglichst genau definierten Anfangszustand getroffen. Die ganze Apparatur konnte vorgewärmt werden, und es konnte auch ein gegenüber dem atmosphärischen Zustand höherer oder geringerer Druck eingestellt werden, womit eine Druck- und Tem-

⁵⁾ Eine Versuchseinrichtung wurde nach demselben Prinzip schon früher an Lehrstuhl von Herrn Nusselt in München im Auftrag der DVL gebaut.

per. turvariation in großen Bereichen möglich war. Über die Versuche
 worden im einzelnen in der Mitarbeiter Form und Strömung abge-
 rufen.

Bei beiden Apparaturen wurde die Verdichtung so durchgeführt, daß der Druck
 und Temperaturbereich, in dem die Motorarbeiten ablaufen, möglichst
 wurde, so daß die in beiden Apparaturen gewonnenen Ergebnisse un-
 mittelbar mit Versuchen im Motor verglichen werden können.

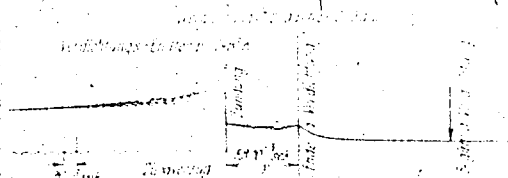


Abb. 3

Beispiel eines Versuchs zur Bestimmung der Selbstzündung

In Abbildung 3 ist das Diagramm eines Zündversuchs bei adiabatischer
 Verdichtung dargestellt. Beginn und Ende der Verdichtung sowie die

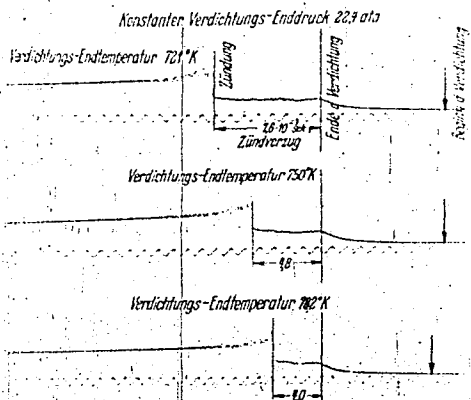


Abb. 4

Abhängigkeit des Zündverzugs von der Verdichtungs-Endtemperatur

Zündverzugszeit sind anzusehen. Die Zündung setzt hier im Falle der Zündverzugszeit plötzlich ein.

In Abbildung 5 sind die Druckverläufe für die verschiedenen Verdichtungsdrücke dargestellt. Man sieht, daß bei den höheren Drücken die Zündung plötzlich einsetzt, während bei den niedrigeren Drücken ein allmählicher Übergang zu beobachten ist.

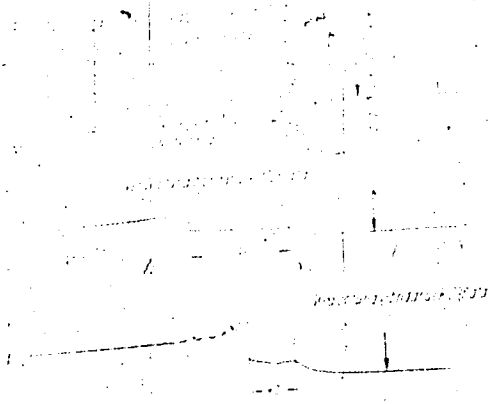


Abb. 5
Abhängigkeit des Zündverzugs vom Verdichtungsdruck

In Abbildung 5 sind 3 Versuche bei verschiedenen Drücken, aber konstanter Verdichtungsendtemperatur dargestellt. Im oberen Bild ist bei 10,6 at Verdichtungsdruck deutlich ein langsamerer Zündensatz als bei den höheren Drücken zu erkennen. Die Zündung setzt nicht plötzlich sondern allmählich ein, d. h. bei sehr geringen Drücken und langen Zündverzugszeiten geht die plötzliche Zündung allmählich in einen langsamen Zündensatz über, so daß vom eigentlichen klopfähnlichen Zündensatz ein stetiger Übergang zu langsamer Verbrennung feststellbar ist.

Der Druckverlauf während des Zündverzugs ermöglicht gewisse Rückschlüsse auf den Verlauf der Reaktion. Es wurde schon früher darauf hingewiesen, daß der zeitliche Verlauf der Reaktion im einzelnen und auch der Temperaturanstieg während des Reaktionsvorganges nicht dem Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit zu entsprechen braucht, da es fraglich ist, ob die schon erwähnte Annahme, nach der die Reaktions-

geschwindigkeit eine eindeutige Funktion des augenblicklichen Druckes und der augenblicklichen Temperatur ist, genau zutrifft. Tatsächlich können nach der Theorie der Kettenreaktionen die oben erwähnten Gemische im Gemisch, die bereits vor dem betrachteten Zeitpunkt entstanden sind, und von dem Verlauf von Druck und Temperatur vor dem betrachteten Zeitpunkt abhängen, von entscheidendem Einfluß auf die Reaktionsgeschwindigkeit sein. Die oben gezeigten Abbildungen 4 und 5 lassen darauf schließen, daß dies tatsächlich der Fall ist. Gewisse Abweichungen können auch darin begründet sein, daß der Vorgang im Verbrennungsraum örtlich verschieden ist. Von Zeise⁶⁾ wurde schon früher darauf hingewiesen, daß unter Umständen bei dem Gesamtvorgang der Zündung in Anlehnung an Beobachtungen in Röhren zwischen einem Teil, der der langsamen Vorreaktion entspricht, und einem zweiten Teil, der der verschieden verlaufenden Zündreaktion entspricht, zu unterscheiden ist. Durch die Vorreaktion, während der nur eine geringfügige Temperatursteigerung vorhanden ist, wird die eigentliche spontane Zündung vorbereitet.

Der Vergleich der Ergebnisse, die in Abbildung 6 dargestellt sind, zeigt, daß sowohl in der Bombenapparatur als auch in der Verdichtungsapparatur Druck- und Temperaturabhängigkeiten gemessen wurden, die ziemlich gut den Werten, die aus früheren überschlägigen Berechnungen aus den motorischen Untersuchungen geschlossen werden mußten, entsprechen. Diese gute Übereinstimmung war wegen der nicht genau kontrollierbaren Einflüsse des Wärmeübergangs, der ungleichmäßigen Verteilung des Gemisches im Zylinder und der Einflüsse der speziellen konstruktiven Ausbildung des Motorzylinders u. a. nicht zu erwarten; es hätte selten die Übereinstimmung der Größenordnung der Kennzahlen genügt. Vor allem zeigten die Untersuchungen, daß die Druckabhängigkeit mit von entscheidender Bedeutung für den Reaktionsvorgang ist. Aus Abbildung 6 ergibt sich z. B., daß in dem Druck- und Temperaturbereich, der für das Klopfen im Motor in Betracht kommt, einer Verdoppelung des Druckes eine Änderung des Zündverzugs etwa im Verhältnis 0,4 : 1 entspricht. Einer Änderung des Druckes von 1 : 2 entspricht also eine Temperaturänderung von über 100°. Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse bestätigen nochmals die schon früher⁷⁾ getroffene Feststellung, daß durch Zusatz von Blei die grundsätzlichen Eigenschaften

⁶⁾ H. Zeise, Zs. Elektrochem. u. angew. physikal. Chemie 47 (1941) 779.

⁷⁾ F. A. F. Schmidt, VDI-Forschgsb. 392, S. 12.

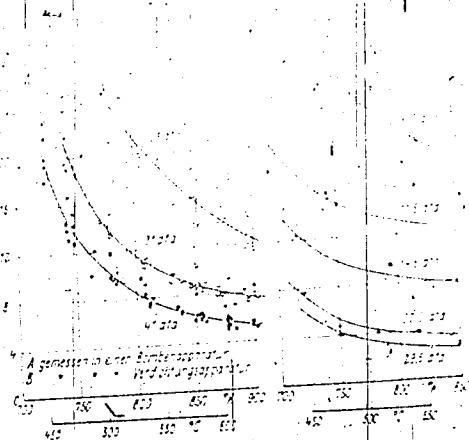


Abb. 6
Zündverzögerung von B_1 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

ten des Kraftstoffes in bezug auf die Druck- und Temperaturabhängigkeit
des Reaktionsvorganges im wesentlichen erhalten bleiben, daß jedoch im
ganzen Bereich durch den Bleizusatz eine Verringerung der Reaktions-
geschwindigkeit auftritt.

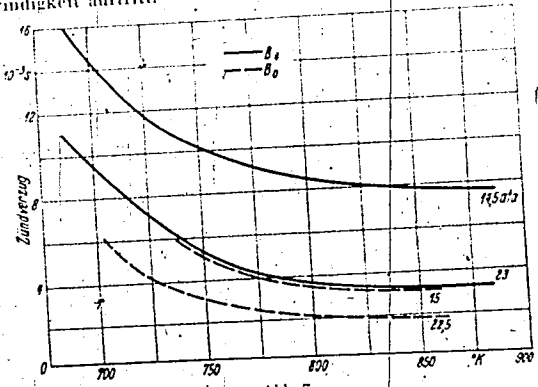


Abb. 7
Zündverzögerungswerte von B_0 und B_1 gemessen in einer Verdichtungsapparatur

Diese Messungen stehen nun in erheblichem Widerspruch zu den Ergebnissen, die aus den Untersuchungen von Jost und von Teichmann bekannt wurden, bei denen eine sehr große Temperaturabhängigkeit und eine geringfügige und in erster Annäherung, temperaturunabhängige Druckabhängigkeit gefolgert wurde.

Für die Beurteilung des Klopfvorganges ist es von entscheidender Bedeutung, ob die Druckabhängigkeit, die während des Klopfens im Motor gemessen wird, in erster Linie ein indirekter Temperatureinfluß oder ein direkter Druckeinfluß ist, der im Reaktionsvorgang des betreffenden Kraftstoffes begründet ist, denn die Beurteilung des Kraftstoffes wird ganz verschieden, je nachdem, ob man annimmt, daß nur die Höhe der Aktivierungswärme den Klopfvorgang beeinflußt oder auch die Druckabhängigkeit des Reaktionsvorganges. Auch die am Motor zu ergreifenden Maßnahmen sind verschieden, je nachdem, ob man einen indirekten Einfluß der Temperatur auf den Reaktionsvorgang oder einen direkten Einfluß des Druckes des Gemisches annimmt.

Aus den vorliegenden Messungen ergibt sich der Schluß, daß die verschiedenartige Druckabhängigkeit bei Verwendung verschiedener Kraftstoffe im Motor im Reaktionsvorgang nicht durch einen indirekten

Benzin mit Bleitetraäthyl $\epsilon=8$ $\lambda=0,9$ $\text{Wärmez. } 33^\circ \text{VDT}$
 ohne $\epsilon=6$ $\lambda=0,9$ $\text{Wärmez. } 33^\circ$
 Motorenmethan $\epsilon=8$ $\lambda=1,01+1,02$ $\text{Wärmez. } 50^\circ$

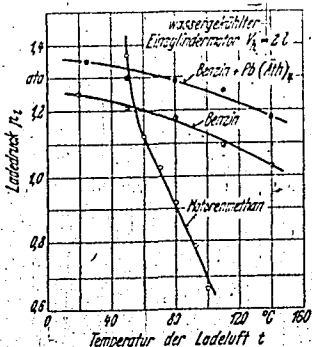


Abb. 8

Klopfgrenzen bei Änderung der Temperatur und des Drucks der angesaugten Luft für Motorenmethan und Fliegerbenzin

Temperaturinfluß begründet ist. Dabei sei nochmals auf die schon früher gezeigte Abbildung 8 hingewiesen. Nachrechnungen des motorischen Vorganges auch unter Berücksichtigung aller möglichen Fehlergrenzen gestatten eine Erklärung dieser Kurven nur unter der Annahme, daß die Druckabhängigkeit im Reaktionsvorgang begründet liegt. Für den Klopfvorgang im Motor ist weiterhin der Restgasanteil von Bedeutung. Dieser Anteil ist bei Überschneidung der Steuerzeiten gering, bei Bombenapparatur wurden zur Aufklärung dieser Frage Messungen des Zündverzuges durch Beimischung inerte Gase durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, daß für die Zündigenschaften im wesentlichen der Partialdruck des Sauerstoffes maßgebend ist. Beimischung von Stickstoff wirkt sich also bei konstantem Gesamtdruck in einer Verminderung des Partialdruckes des Sauerstoffes und in einer Verringerung der Zündwilligkeit aus. Beimischung von CO_2 hatte bei konstantem Partialdruck des Sauerstoffes nur einen geringen Einfluß.

Zur Zeit laufen weitere Untersuchungen, um möglichst in allen Einzelheiten die thermischen Einflüsse und die Einflüsse des Verdampfungsvorganges vom chemischen Vorgang zu trennen. Einen wesentlichen Beitrag zur Ermittlung des Einflusses des Verdampfungsvorganges liefert neben den Untersuchungen über die Tröpfchenverdampfung, über die

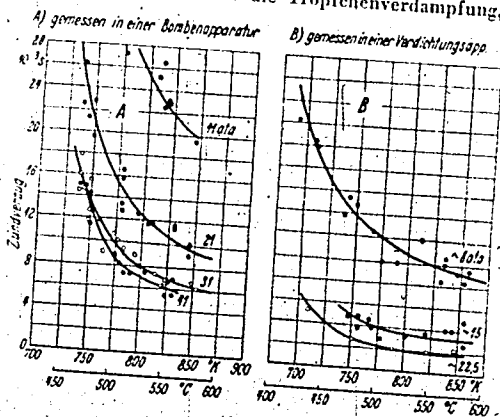


Abb. 9
Zündverzug von B_0 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

schon früher berichtet wurde, der Vergleich der Ergebnisse in der Bombenapparatur und in der Verdichtungsapparatur, weil unter sonst ähnlichen Verhältnissen in der Bombe flüssiger Kraftstoff eingespritzt wird während in der Verdichtungsapparatur verdampftes Gemisch vorhanden ist. Bei dem Vergleich ist es wesentlich, daß der Temperatureinfluß der Verdampfungswärme richtig eingesetzt wird. Schon eine oberflächliche Betrachtung zeigt, daß der Charakter der Druck- und Temperaturabhängigkeit eines bestimmten Kraftstoffes in beiden Fällen derselbe bleibt, daß jedoch vorwiegend mit Rücksicht auf den Verdampfungsvorgang die Zündverzugszeiten in der Bombe erheblich länger werden (Abbildung 9).

Abbildung 8 zeigt, daß sich die Druck- und Temperaturabhängigkeiten, die sich in der Bombe und in der Verdichtungsapparatur bemerkbar machen, auch im Motor in ähnlicher Form zeigen. Damit kann im Laufe der weiteren Entwicklung erwartet werden, daß es immer mehr möglich sein wird, durch die Bestimmung der Konstanten in der Beziehung

$$z = \frac{e^{kT}}{p^n} \cdot a'$$

allerdings unter Beibehaltung eines Motorversuches, die Eigenschaften des Kraftstoffes weitestgehend zu kennzeichnen. Damit wäre man dann in der Lage, mit einem einzigen oder wenigen¹⁾ Motorversuchen und im übrigen mit Hilfe der mit physikalisch-chemischen Apparaturen ermittelten Konstanten auszukommen, so daß es nicht erforderlich wäre, ganze Versuchsreihen zur Kennzeichnung des Kraftstoffes im Motor durchzuführen. Die motorischen Versuche müßten sich auf den Betriebspunkt beziehen, der für den praktischen Motorbetrieb am wichtigsten ist.

¹⁾ Wegen des Einflusses des Luftüberschusses.

Aussprache

E. Schmidt: Ich danke Herrn Schmidt für seine Ausführungen. Es ist zu bezaubern, daß man nun Bombenversuche bei höheren Temperaturen durchführen kann. Die neu-adiabatische Verdichtungsapparatur erlaubt Messungen in weiteren Bereichen als bisher. Ich möchte noch erwähnen, daß wir in Braunschweig eine ähnliche adiabatische Verdichtungsapparatur gebaut haben, die auch mit Preßluft betrieben wird. Sie sehen, wie ähnlichartig die Wege sind, die man an verschiedenen Stellen dabei naturgemäß geht, weil die Fragestellungen in der Luft liegen. Wir können aber noch nicht über Versuche berichten.

Jost: Das, was ich sagen will, kann ich sehr kurz fassen. Mit der Schlußfolgerung von Herrn Schmidt stimmen wir ganz überein. Wir haben nicht die Motorversuche ganz ausschließen, aber auf ein Mindestmaß beschränken wollen. Was die Druckabhängigkeit im Zündverzögerungsbereich anbetrifft, so möchte ich nur sagen, nach den Zahlen, die Herr Schmidt mitgeteilt hat, ist die Diskrepanz zwischen uns ein Streit um die Bedeutung der Worte „groß“ und „klein“: Nämlich unter einer Druckabhängigkeit umgekehrt proportional dem Druck verstehen wir eine kleine Druckabhängigkeit. Und eine solche Druckabhängigkeit hat Herr Teichmann bei uns auch gefunden. Die Versuche von Herrn von Weber haben eine kleinere Druckabhängigkeit ergeben; was ich heute vormittag an Zahlen für Reaktionsgeschwindigkeiten nannte, stimmt innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen mit dem Resultat von F. A. F. Schmidt für die Druckabhängigkeit überein. Lediglich möchte ich bemerken, daß wir die Temperaturabhängigkeit, die Herr Schmidt gefunden hat, nicht beurteilen können, soweit sie unterhalb der Zündverzögerung liegt, die wir gemessen haben. Aber wenn die von Herrn Schmidt gefundenen Werte richtig sind, dann entfällt die Deutung, daß es sich hierbei um die Temperaturabhängigkeit einer Reaktionsgeschwindigkeit handelt, welche für eine Wärmeexplosion maßgebend ist. Die angegebenen Werte können nicht wahren Aktivierungswärmen einer chemischen Reaktion sein.

F. A. F. Schmidt: Es handelt sich hier um die entscheidende Frage, ob die Druckabhängigkeit, die beim Klopfen im Motor beobachtet wird, im Reaktionsvorgang, der für den Kraftstoff kennzeichnend ist, begründet ist, oder ob der Druck nur indirekt, z. B. hauptsächlich über den Wärmeübergang, den Klopfvorgang beeinflusst. Es ist von großer Bedeutung, ob man die Druckabhängigkeit des Reaktionsvorganges — wie Jost annimmt — annähernd vernachlässigen kann oder ob der beim Klopfen festgestellte Druckeinfluß im wesentlichen ein direkter und wesentlicher Einfluß auf den Reaktionsvorgang ist, so daß also für die Beurteilung das Verhältnis der Druck- und Temperaturabhängigkeit des Reaktionsvorganges maßgebend ist. Es kann nicht von einer Gleichheit der Ergebnisse gesprochen werden, wenn der Absolutwert des Druckeinflusses bei Herrn Jost und bei mir etwa gleich groß gemessen wird¹⁾, wenn aber die für den

¹⁾ Druckexponent $n = 1,1$ bis $1,5$

Temperatureinfluß maßgebenden Exponenten¹⁾ sehr stark verschieden sind, denn es kommt im wesentlichen auf die relative Größe des Druckeinflusses zum Temperatureinfluß an.

Es liegt also hier zu entscheiden, ob man von Druckeinflüssen den bei dem Verbrennen mit Rücksicht auf die sehr starke Temperatureinflüßigkeit der ersten Näherung vernachlässigen kann, wie von Herrn Jost heute vormittag dargestellt wurde, oder ob man den Druckeinfluß relativ zum Temperatureinfluß als maßgebende Größe einflußig und bei der Kraftstoffprüfung unter allen Umständen berücksichtigen muß, wie ich in meinem Vortrag ausgeführt habe. Es ist daher eine grundsätzliche Verschiedenheit der Auffassungen vorhanden, da sie weder dem Sinne nach noch in ihren Auswirkungen übereinstimmen.

H. Teichmann: Ich hätte nur noch eine technische Frage an Herrn Schmidt. Haben Sie die Temperaturen, die Sie in den Diagrammen Zündverzögerung in Abhängigkeit von der Temperatur gezeigt haben, aus der jeweiligen Stellung des Kolbens beim Einsatz der Zündung oder aus einem vorgegebenen Kompressionsverhältnis bei festgehaltenem Kolben bestimmt?

Es ist doch sicherlich sehr schwierig, die Temperatur bei fortlaufendem Kolben zu bestimmen, da bei höheren Kompressionsverhältnissen schon 1/10 mm Spiel eine Temperaturänderung von ungefähr 20° bedingt. Oder haben Sie ein bestimmtes Kompressionsverhältnis vorgegeben und dann die Zeit gemessen bis zum Einsatz der Zündung?

F. A. F. Schmidt: Vor Beginn der eigentlichen Reihenversuche wurde die Apparatur systematisch untersucht. Die Endtemperatur der Verdichtung wurde aus dem gemessenen Verdichtungsverhältnis ermittelt und außerdem durch die gemessenen Drücke kontrolliert. Der genauere Wert ergibt sich aus der Ermittlung des Verdichtungsverhältnisses.

Teichmann: Also Sie haben den Kolben in einer bestimmten Stellung aufgefangen.

¹⁾ b in dem Ausdruck $\frac{b}{p^n}$

²⁾ Bei den Jost'schen Untersuchungen sehr groß, bei meinen Untersuchungen klein.