

Untersuchung der Selbstzündung adiabatisch verdichteter Kraftstoff-Luft-Gemische

Von Max Scheuermeyer

Wie F. A. F. Schmidt vorhin ausgeführt hat, wurde von ihm auf Grund früherer Untersuchungen¹⁾ festgestellt, daß sowohl für die Druck- und Temperaturabhängigkeit des Zündverzugs als auch der zum Klopfen führenden Reaktionsvorgänge eine Beziehung mit annähernd denselben Kennzahlen verwendet werden kann. Aus Zündverzugsmessungen an flüssig eingespritzten Kraftstoffen ergab sich unter überschlägiger Berücksichtigung des Verdampfungsvorgangs ein Verhältnis von Druck- und Temperaturabhängigkeit, wie es in ähnlicher Größenordnung auch im Motor festgestellt wurde. Im Gegensatz dazu folgerten früher Jost und Teichmann auf Grund ihrer damaligen Versuche sowie der von Tizard und Pye durchgeführten Messungen über die Selbstzündung in gasförmigen Kraftstoff-Luft-Gemischen, daß die zum Klopfen führenden Reaktionen wesentlich nur von der Temperatur abhängig sind, und daß der im Motor festgestellte Einfluß des Ladedrucks auf das Klopfen nur ein indirekter Temperatureinfluß sein könne. Die letztgenannte Deutung des Druckeinflusses im Motor würde einen so starken Einfluß des Wärmeübergangs voraussetzen, daß die im heutigen Hochleistungs-Otto-Motor gemessenen Gütegrade des motorischen Arbeitsprozesses von 85 bis 90 % nicht erreicht werden könnten. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß in den durch den Gütegrad erfaßten Verlusten von 10 bis 15 % nicht nur die Verluste durch Wärmeableitung, sondern auch die von unvollkommener Verbrennung, endlicher Verbrennungsgeschwindigkeit usw. herrührenden enthalten sind.

Die Zündverzugsmessungen der zuletzt genannten Autoren wurden in Temperaturbereichen durchgeführt, die Zündverzügen von etwa $\frac{1}{100}$ s, d. h. bei einer Motordrehzahl von 3000 U/min einer halben Umdrehung entsprechen. Die entscheidenden Vorgänge im Motor spielen sich jedoch

¹⁾ F. A. F. Schmidt: Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündverzug und Klopfvorgang, VDI-Forschungsb. 392; Ders.: Neue Untersuchungen zur Ermittlung der Einzeleinflüsse beim Klopfvorgang im Motor. Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforsch. H. 54.

in etwa $\frac{1}{10}$ dieser Zeitdauer ab, so daß sich die Notwendigkeit ergab, Untersuchungen in dem Temperaturbereich durchzuführen, der für das Klopfen im Motor maßgebend ist, d. h. bei Zündverzügen von etwa $\frac{1}{1000}$ s und darunter.

Zu diesem Zweck wurde im Jahre 1937 von Herrn Nußelt an der Technischen Hochschule München im Auftrage der DVL eine Apparatur zur adiabatischen Verdichtung gebaut und später auch in der DVL eine ähnliche Versuchseinrichtung entwickelt.

Als Aufgabe war die exakte Messung sehr kurzer Zündverzüge, die in ihrer Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Luftüberschuß die absolute Klopfneigung des Kraftstoffs kennzeichnen, gestellt. Wenn dann weiterhin durch eine motorische Messung als eine Art Eichung die speziellen Eigenschaften des Motors, wie z. B. Gemischbildung, Wirbelung, Wärmeübergang, Ventil- und Zündkerzenanordnung usw., erfaßt werden, so besteht damit — wie F. A. F. Schmidt ausgeführt hat — die Möglichkeit einer einfachen Kennzeichnung der Kraftstoffe hinsichtlich ihres Klopfverhaltens im Motor. Der hierfür erforderliche Versuchsaufwand ist bedeutend geringer als bei den für Flugmotorenkraftstoffe üblichen Klopfmessungen nach dem DVL-Überladeverfahren, insbesondere kann das Kennfeld des Kraftstoffs mit sehr geringen Kraftstoffmengen aufgenommen werden. Dies ist z. B. für die Kraftstoffentwicklung von besonderer Bedeutung, bei der im allgemeinen während der einzelnen Entwicklungsstufen nur geringe Mengen anfallen.

Für eine derartige absolute Kennzeichnung der Kraftstoffe mußte eine Versuchseinrichtung zur annähernd adiabatischen Verdichtung geschaffen werden, an die gegenüber den bisher bekanntgewordenen Apparaturen in bezug auf hohe Geschwindigkeit der Verdichtung und geringen Wärmeübergang erheblich gesteigerte Anforderungen zu stellen waren. Es war zunächst zu klären, inwieweit durch sehr schnelle Verdichtung der Einfluß der bereits während der Verdichtung anlaufenden Reaktionen auf die Größe des zu messenden Zündverzugs praktisch ausgeschaltet werden kann, wobei der Einfluß der Wärmeabgabe durch die Wahl eines möglichst großen Zylinderdurchmessers gering zu halten ist. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Mitteilung einiger Versuchsergebnisse, die an der DVL-Apparatur über den Einfluß der Verdichtungs geschwindigkeit und des Wärmeübergangs gewonnen wurden; mögliche Folgerungen in reaktionskinetischer Hinsicht sollen zu gegebener Zeit behandelt werden.

Die von Tizard und Pye¹⁾ verwendete Apparatur stellt ein gestrecktes Einkurbelgetriebe dar, bei dem der Kolben mit Kolbenstange zu einem gegebenen Zeitpunkt durch den Kurbeltrieb in Bewegung gesetzt und in senkrechter Lage ausgeklinkt und festgehalten wird. Abgesehen von den mechanischen Schwierigkeiten bei höheren Drehzahlen liegt der grundsätzliche Nachteil dieses Verfahrens darin, daß die größte Kolbengeschwindigkeit — ähnlich wie bei normalen Kolbenmaschinen — etwas vor Hubmitte auftritt und von da ab allmählich auf Null absinkt.

Da erst gegen Ende der Verdichtung mit einem u. U. wesentlichen Anlaufen chemischer Reaktionen zu rechnen ist, ist zur Erzielung einer zu diesem Zeitpunkt möglichst hohen Geschwindigkeit diejenige Antriebsart am günstigsten, bei der die Antriebskraft während des ganzen Hubes auf den Kolben wirkt. Dies kann z. B. mit Antrieb durch Druckluft, der bei der Versuchseinrichtung der DVL gewählt wurde, erreicht werden²⁾.

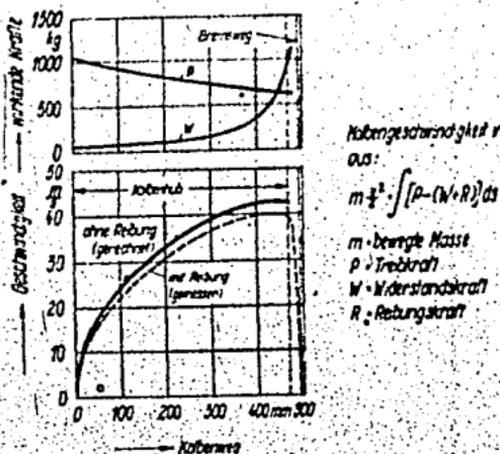


Abb. 1

Beispiel für den Kräfte- und Geschwindigkeitsverlauf abhängig vom Kolbenweg bei der DVL-Versuchseinrichtung zur annähernd adiabatischen Verdichtung. Druck der Antriebsluft 26 ata. Anfangsdruck der Verdichtung 1 ata

¹⁾ H. T. Tizard und D. E. Pye, Phil. Mag. (1926) S. 1094.

²⁾ Bei der von H. Teichmann beschriebenen Versuchseinrichtung wird zum Antrieb des Kolbens ein Fallgewicht benutzt, womit sich gegenüber der Anordnung von Tizard und Pye grundsätzlich günstigere Verhältnisse ergeben. Jedoch sind hier der erreichbaren Endgeschwindigkeit durch die praktischen Möglichkeiten für die Ausführung der Fallhöhe und des Fallgewichts verhältnismäßig enge Grenzen gezogen. Vgl. H. Teichmann, Reaktionskinetische Untersuchungen zum Klopfborgang II, Z. Elektrochem. 47 (1941) S. 297.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Zusammenhang zwischen den wirkenden Kräften und der Kolbengeschwindigkeit bei der DVL-Apparatur. Setzt man zunächst die Reibungskraft gleich Null, dann erhält man die resultierende Treibkraft als Differenz zwischen der vom Antriebsdruck herrührenden Treibkraft P und der durch die Verdichtung des zu untersuchenden Gemisches bedingten Widerstandskraft W . Im Schnittpunkt von P und W liegt das Maximum der Geschwindigkeit. Der aus der Wuchtgleichung ermittelte Geschwindigkeitsverlauf ist in der Abbildung unten dargestellt (ausgezogene Kurve). Zum Vergleich ist der unter denselben Bedingungen gemessene Geschwindigkeitsverlauf gestrichelt eingetragen. Aus dem Unterschied der beiden Kurven kann die Reibungskraft R rückwärts ermittelt werden. Beispielsweise ergibt sich unter den gezeigten Verhältnissen bei Beginn der Verdichtung eine Reibungskraft von 200 kg, was einem Antriebsdruck von 5 at entspricht.

Um in dem für das Anlaufen der Reaktionen maßgebenden Bereich eine möglichst hohe Geschwindigkeit zu erhalten, ist es zweckmäßig, den Verlauf von P und W so abzustimmen, daß der Schnittpunkt der Treibkraft mit der Widerstandskraft bei Hubende liegt. Dies kann entweder

durch Höherlegung der P -Kurve auf Grund höheren Antriebsdrucks oder durch einen flacheren Verlauf der P -Kurve bei größerem Volumen der Antriebsluft erreicht werden (bei unendlich großem Druckluftbehälter verläuft P horizontal).

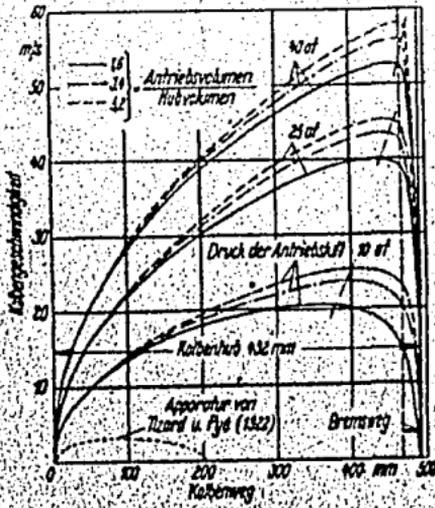


Abb. 2

Kolbengeschwindigkeit abhängig vom Hub bei der DVL-Apparatur für verschiedene Drücke der Antriebsluft und für verschiedenen Rauminhalt der Antriebsluft.

Meßergebnisse über den Verlauf der Kolbengeschwindigkeit für verschiedene Drücke der Antriebsluft sowie für verschiedenen Rauminhalt des Druckluftbehälters sind in Abbildung 2 abhängig vom Kolbenhub dargestellt. Die plötzliche Abbremsung des Kolbens erfolgt etwa 20 bis 25 mm vor Hubende bei einem Gesamthub von 492 mm. Es ist ersichtlich, daß noch bei einer Höchst-

geschwindigkeit von 20 m/s die Geschwindigkeit schon vor der Abbremsung des Kolbens abnimmt. Zum Vergleich ist in Abbildung 2 links unten der Geschwindigkeitsverlauf bei der Verdichtungsapparatur von Tizard und Pye mit einer Höchstgeschwindigkeit von etwa 3 m/s vor Hubmitte gestrichelt eingezeichnet; die von Jost und Teichmann benutzte Apparatur weist eine Höchstgeschwindigkeit von etwa 10 m/s auf. Demgegenüber wird bei der DVL-Apparatur bei einem Antriebsdruck von 40 at in einem großen Bereich vor Ende der Verdichtung eine Kolbengeschwindigkeit von über 50 m/s erreicht.

Die Auswirkung der Geschwindigkeit der Verdichtung auf die Größe des Zündverzugs und damit der Einfluß der während der Verdichtung ablaufenden Reaktionen ist in Abbildung 3 dargestellt; die Abbildung zeigt

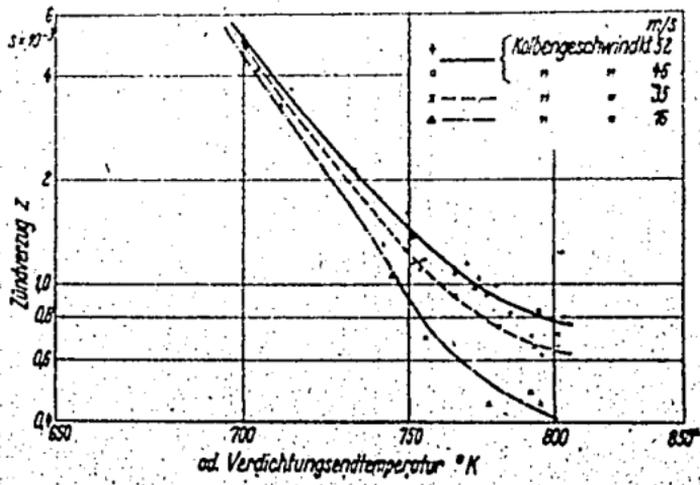


Abb. 3
Zündverzüge von n-Heptan abhängig von der Verdichtungsendtemperatur
bei verschiedener Verdichtungs geschwindigkeit

Zündverzüge von n-Heptan abhängig von der Temperatur für verschiedene Geschwindigkeit der Verdichtung im log z-1/T-Diagramm unter sonst gleichen Verhältnissen. Im Gebiet kurzer Zündverzüge bei hohen Temperaturen ist — insbesondere bei Geschwindigkeiten zwischen 15 und 45 m/s — ein erheblicher Einfluß der Zeitdauer der Verdichtung zu erkennen. Z. B. wird bei 800° K für n-Heptan mit einer Verdichtungs-

geschwindigkeit von 16 m/s ein Zündverzug von 0,0001 s gemessen gegenüber 0,0003 s bei 16 m/s. Bei der Messung kurzer Zündverzüge mit Kolbengeschwindigkeiten von etwa 15 m/s und darunter treten also derart große Abweichungen auf, daß auch bei vergleichenden Betrachtungen insbesondere mit verschiedenen Kraftstoffen die Zuverlässigkeit der aus derartigen Messungen gezogenen Schlußfolgerungen beeinträchtigt wird. Man erkennt, daß die scheinbare Aktivierungsenergie, die durch die Neigung der Zündverzugskurve gegen die Horizontale gegeben ist, bei geringerer Verdichtungsgeschwindigkeit zu groß gemessen wird. Es ist zwar möglich, diesen Fehler abzuschätzen und durch entsprechende Korrekturglieder zu berücksichtigen, jedoch ist dieses Verfahren ziemlich umständlich und ungenau.

Im Bereich der hier benutzten Geschwindigkeiten von etwa 50 m/s und darüber ist dagegen — wie die Messungen zeigen — der Einfluß der Kolbengeschwindigkeit auf den zu messenden Zündverzug so gering, daß man in diesem Bereich eine weitgehende Unabhängigkeit der Absolutwerte von der Versuchsapparatur erhält.

Um einen Überblick über den Einfluß der Wärmeabgabe an die Zylinderwände zu erhalten, wurde die abgeführte Wärmemenge bei derartigen Versuchseinrichtungen am Beispiel der DVL-Apparatur nach dem von H. Pfrim¹⁾ angegebenen Verfahren rechnerisch verfolgt und hierbei insbesondere der Einfluß von Zylinderdurchmesser und Verdichtungsgeschwindigkeit untersucht. Da für eine derartige Rechnung verschiedene Annahmen notwendig sind, sind naturgemäß die Absolutwerte mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Im vorliegenden Fall handelt es sich jedoch im wesentlichen um eine vergleichsweise Betrachtung unter verschiedenen Bedingungen, so daß die Ergebnisse in dieser Hinsicht als ausreichend angesehen werden können. Die in Abbildung 4 dargestellten abgeführten Wärmemengen in v. H. der Änderung der inneren Energie während der Verdichtung sind Mindestwerte, die nur auf Grund der Wärmeleitfähigkeit des Gases berechnet wurden, während die Konvektion und die Strahlung unberücksichtigt blieb. Die in der Abbildung stark gezeichneten Linien stellen — abhängig vom Kolbendurchmesser — die Wärmeableitung bis zum Ende der Verdichtung und die dünn gezeich-

¹⁾ H. Pfrim: Nichtstationäre Wärmeübertragung in Gasen, insbesondere in Kolbenmaschinen, VDI-Forschungsh. 413, sowie: Der Wärmeübergang bei schnellen Druckänderungen in Gasen, Forsch. Ing.-Wes., Bd 13 Nr 4 (1912).

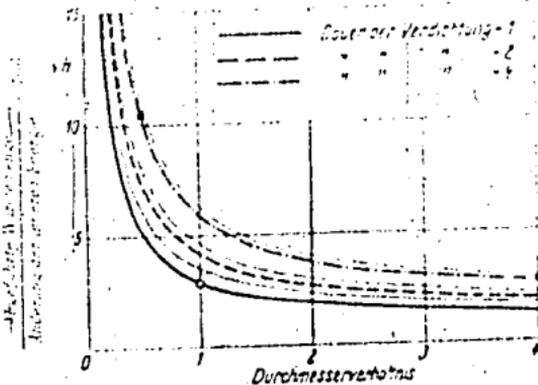


Abb. 4

Wärmeabgabe abhängig vom Zylinderdurchmesser für verschiedene Verdichtungszeiten
 (gerechnet nach H. Pfried, VDI-Forschungsheft Nr. 413)

neten Linien bis zum Zündensatz dar. Der Rechnung wurde das Druck-Zeit-Diagramm eines Versuchs bei 0,43 ata Anfangsdruck und 78° C Anfangstemperatur mit einem Zündverzug von 0,001 s zugrunde gelegt. Bei dem Versuch betrug die Kolbengeschwindigkeit gegen Ende der Verdichtung etwa 40 m/s (ausgezogene Linien); die gestrichelt und strichpunktirt gezeichneten Kurven beziehen sich unter sonst gleichen Verhältnissen auf eine Verdichtung, die zweimal bzw. viermal so lange Zeit benötigt, so daß die strichpunktirten Kurven einer Geschwindigkeit von etwa 10 m/s entsprechen. Mit einem Durchmesser der DVL-Apparatur von 80 mm (in der Abbildung gleich 1 gesetzt) wurde im Hinblick auf die abgegebene Wärmemenge und die erreichbare Verdichtungsgeschwindigkeit ein Optimum angestrebt. Es ist ersichtlich, daß eine weitere Vergrößerung des Zylinderdurchmessers nur noch einen geringen Vorteil in bezug auf die Wärmeabgabe bringt. Die abgeführte Wärmemenge ergibt sich zu etwa 2,8 v. H., was nach Pfried einer Temperaturerniedrigung der Kernschicht — in der die Zündung erfolgt, da sie gegenüber der Wand heißer ist — um 3,4° entspricht. Bei einem Durchmesser von 40 mm und nur 10 m/s Höchstgeschwindigkeit der Verdichtung erhält man bereits eine Wärmeabfuhr von über 10 v. H. und damit eine Absenkung der Kerntemperatur, die weit außerhalb der bei den Messungen erreichbaren Versuchsgenauigkeit liegt. In Wirklichkeit ist die abgeführte Wärmemenge in diesem Fall noch höher, weil ja — wie vorhin erwähnt wurde —

bei vierfacher Zeitdauer der Verdichtung der letzte Teil des Hubes, in dem am meisten Wärme abgeführt wird, mehr als das Vierfache der entsprechenden Zeit erfordert.

Der Wärmeübergang bewirkt, daß der gemessene, der adiabatischen Verdichtungsendtemperatur zugeordnete Zündverzug, in Wirklichkeit einer geringeren Temperatur entspricht, wobei dieser Unterschied um so größer ist, je höher die Anfangstemperatur ist. Die dadurch bewirkte Abweichung im Verlauf der Zündverzugskurven ist jedoch in dem für den Motor interessierenden Bereich wegen der hier im allgemeinen geringen Temperaturabhängigkeit der Reaktion nicht von so großem Einfluß. Dagegen spielt in diesem Bereich der Fehler in der Messung des Zündverzugs, dadurch verursacht, daß die Reaktionen bereits im letzten Teil der Verdichtung anlaufen, während der Zündverzug erst vom Ende der Verdichtung an gemessen wird, eine wesentliche Rolle; dieser Fehler ist im Verhältnis um so größer, je kleiner der Zündverzug ist. Bei der meist üblichen Darstellung des Zündverzugs im halblogarithmischen Diagramm ($\log z-1/T$) bewirkt der Fehler in der Temperaturmessung eine Verschiebung der Zündverzugskurve horizontal nach rechts, der Fehler im Zündverzug eine Verschiebung der Kurve vertikal nach unten, so daß in dem von links nach rechts abfallenden Ast der Kurven sich beide Fehler zum Teil ausgleichen können. Da sich der letztgenannte Fehler im Absolutwert des Zündverzugs um so stärker auswirkt, je kleiner der Zündverzug ist, so überwiegt bei kleinen Zündverzügen die Verschiebung nach unten. Damit wird die scheinbare Aktivierungsenergie — wie schon erwähnt — größer, als sie in Wirklichkeit ist. Dies erkennt man aus Abbildung 5 an Hand von Zündverzugsmessungen der DVL an *n*-Heptan, die eine scheinbare Aktivierungsenergie E von 26,3 Kcal ergeben. Im Vergleich dazu erhält man aus den bisher bekanntgewordenen Messungen von Tizard und Pye¹⁾ sowie von Jost und Teichmann²⁾, die bei geringerer Kolbengeschwindigkeit und größerem Wärmeübergang durchgeführt wurden, den Wert E zu 37,7 Kcal. Für alle Messungen wurde einheitlich die adiabatische Endtemperatur unter Berücksichtigung der Veränderlichkeit der spezifischen Wärmen bestimmt.

Indem für das Klopfen im Motor interessierenden Druck- und Temperaturbereich wurden in der DVL eingehende Zündverzugsmessungen u. a. auch mit *n*-Heptan durchgeführt, die die anläßlich der Tagung im vorigen

¹⁾ S. z. O.

²⁾ S. z. O.

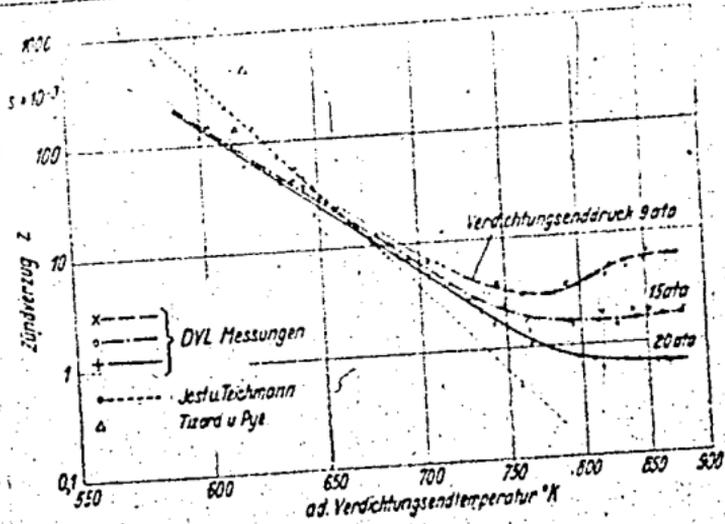


Abb. 5
Zündverzögerung von n-Heptan abhängig von der Verdichtungsendtemperatur

Jahr gezeigten vorläufigen Ergebnisse voll bestätigt haben. Aus den im rechten Teil der Abbildung 5 dargestellten Ergebnissen ist der stetige Übergang von den großen nahezu druckunabhängigen Zündverzögerungen im Bereich geringer Temperaturen zu den kleinen, aber stark druckabhängigen Werten bei höheren Temperaturen ersichtlich. Im Bereich hoher Temperatur ist nicht allein eine geringe Temperaturabhängigkeit feststellbar, sondern es ist vielmehr mit abnehmendem Verdichtungsdruck praktisch eine Temperaturunabhängigkeit (z.B. bei einem Verdichtungsdruck von 15 ata) und z.B. bei 9 ata bereits ein negativer Temperaturkoeffizient!) zu erkennen, auf den auch Herr Teichmann heute morgen hingewiesen hat.

Zusammenfassend ergibt sich, daß durch besondere Maßnahmen mit der Versuchseinrichtung der DVL zur annähernd adiabatischen Verdichtung mit am Ende der Verdichtung festgehaltenen Kolben Messungen von Zündverzögerungen durchgeführt werden konnten, die als absolute Kennzeichnung des Kraftstoffs gelten können. Die Messung von Zündverzögerungen

1) Vgl. hierzu die theoretischen Überlegungen bei H. Zetsch: Das physikalisch-chemische Problem der motorischen Zündung von Gasgemischen II. Z. Elektrochem. 47 (1941) S. 779; Schr. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschung, II. 54, S. 122/123.

unter möglichst weitgehender Annäherung an ideale Verhältnisse, d. h. bei unendlich schneller Verdichtung und bei einem Wärmeübergang Null, ist auch deshalb besonders wichtig, weil damit durch genauere Erfassung der Zustandsgrößen des verdichteten Gemischs während des Zündverzugs weitere Aufschlüsse über den Reaktionsvorgang zu erhalten sind. Es sei in diesem Zusammenhang auf die zuletzt in Abbildung 5 rechts gezeigte Erscheinung verwiesen, derzufolge bei hohen Temperaturen und geringen Drücken ein negativer Temperaturkoeffizient bei *n*-Heptan gemessen wurde, oder auch auf die Tatsache, daß bei technischen Kraftstoffen bei hohen Temperaturen und geringen Drücken im Diagramm des Zündverzugs kein plötzlicher Zündensatz festzustellen ist, sondern vielmehr ein allmählicher Verbrennungseinsatz mit starker Temperaturentwicklung erfolgt. Zur Klärung derartiger Erscheinungen sind in der DVL Untersuchungen im Gange, bei denen der Temperaturverlauf während des Zündverzugs im einzelnen verfolgt werden soll, wobei der Einfluß des Wärmeübergangs dadurch ausgeschaltet werden kann, daß Versuche mit adiabatisch verdichteten Kraftstoff-Luft-Gemischen im Vergleich zu Kraftstoff-Stickstoff-Gemischen durchgeführt werden und hierbei der Temperaturverlauf während der dem Zündverzug entsprechenden Zeit möglichst genau, sei es unmittelbar durch besonders dünne Widerstandsthermometer oder mittelbar aus dem auf piezoelektrischem Wege mit besonderer Eichung aufgenommenen Druckverlauf, bestimmt wird. Hierbei und über die Meßverfahren im einzelnen soll an anderer Stelle berichtet werden¹⁾.

¹⁾ M. Schouermeyer und H. Steigerwald: Die Messung des Zündverzugs verdichteter Kraftstoff-Luft-Gemische zur Untersuchung der Klopfneigung, erscheint in der MITZ.

Aussprache

von Weber: Im Anschluß an die Vorträge über die adiabatische Kompression möchte ich kurz über Versuche berichten, die bei Herrn Jost in Leipzig und neuerdings in Straßburg gemacht werden. Die Messung der Selbstzündung bei der adiabatischen Kompression ist Grundlagenforschung, wie das Herr von Philippovich heute schon nannte, in dem Sinn, daß sie gestattet, die Grundvariablen: Druck, Temperatur, Gemischzusammensetzung und Verweilzeit, die man im Motor immer nur in einer komplexen Abhängigkeit voneinander hat, unabhängig zu messen und dadurch den Vorgang im Motor zu analysieren. Dieser Gewinn bleibt auch dann, wenn es vorläufig nicht gelingen sollte, direkt von der Messung bei der adiabatischen Kompression zu einem Prüfverfahren für die Treibstoffe zu kommen oder wenn dieses Verfahren sich vorläufig nicht vorteilhaft durch kürzere Arbeitszeit von den Motorversuchen unterscheiden sollte.

Wir haben unsere Versuche ausgedehnt auf schärfere Bedingungen, nämlich höhere Temperaturen und kürzere Zündverzüge. Was zunächst die Abhängigkeit vom Druck betrifft, so fanden wir sie unter der 2. Potenz, die Herr Jost immer schon als wahrscheinlichere obere Grenze angenommen hatte. Interessant ist aber dabei doch, daß beträchtliche relative Unterschiede bestehen. Bei i-Oktan ist die Abhängigkeit vom Druck etwa von der 1,7., bei n-Heptan von der 0,8. Potenz. Die Abhängigkeit von der Temperatur fanden wir nie so gering, wie namentlich auf dem einen Diagramm, das Herr F. A. F. Schmidt zeigte. Wir haben Messungen auch mit einer Preßluftapparat bei größeren Kolbengeschwindigkeiten begonnen, stehen dabei allerdings erst am Anfang. Immerhin können wir sagen, daß der Zündverzug für i-Oktan bis zu etwa 0,002 bis 0,0015 sec herab die Temperaturabhängigkeit größer zeigt. Endgültiges können wir aber noch nicht sagen. Zur Diskussion würde es beitragen, zu wissen, nach welchem Verfahren Herr Scheuermeyer die Zündung angenommen hat. Wenn die Zündung an einer Stelle einsetzt — und das ist wahrscheinlich, weil man infolge der Wirbelung doch kein thermisch ganz homogenes Gemisch herstellen kann —, so wird man den Druckanstieg als Folge der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme erst nach einer gewissen Zeitspanne merklich finden, die um so mehr ins Gewicht fällt, je kürzer der Zündverzug im ganzen ist, so daß die Kurven des $\log Z/T$ -Diagramms nur durch diesen Effekt zur Waagerechten umbiegen können, wenn man den Zündzeitpunkt durch den Druckanstieg indiziert.

Wesentlich war für unsere Arbeiten noch ein Gesichtspunkt, den wir schon seit einiger Zeit verfolgen, das ist die Zündhärte. Wenn man von der klopfenden Verbrennung schlechtweg als von einer Selbstzündung spricht, setzt man voraus, daß die Selbstzündung eines adiabatisch komprimierten Gemisches immer eine für den Motor zu rasche Verbrennung mit sich führt. Die Annahme, daß nach dem Umsatz eines Bruchteils der Energie und nach der Erwärmung des Gemisches um einige 100°C der größere Restteil praktisch momentan abbrennen muß, scheint plausibel. In Wirklichkeit ist das nach unseren Beobachtungen nicht der Fall. Wir könnten das zunächst quali-

tativ feststellen durch Flammenaufnahmen auf der rotierenden Trommel durch ein spaltförmiges Fenster. Wir fanden in manchen Fällen einen scharfen Einsatz der Lichterscheinung, in anderen ein Vorleuchten und dann einen scharfen Einsatz der Hauptelligkeit; wir haben aber auch gefunden, daß die Zündung ganz allmählich im Verlauf von 0,001 sec auf ihre höchste Stärke kommt. Mit dem Klopfen hat eine solche Erscheinung nichts zu tun, weil keine Stoßwellen auftreten können. Die Bilder zeigen übrigens charakteristische Fälle, in denen es sich nicht um Flammenfortpflanzung handeln kann, sondern es wird ein größerer Gaskern homogen erfaßt. Die Zündhärte ist nun wieder verschiedenartig abhängig von der Temperatur und vom Druck, und wir hoffen, durch Weiterverfolgung dieser Phänomene zur Beseitigung von Widersprüchen, die jetzt noch vorhanden sind, beitragen zu können.

F. A. F. Schmidt: Zu der von Herrn von Weber an Herrn Scheuermeyer gerichteten Frage über die Messung des Zündverzugs bei unseren Untersuchungen möchte ich vorweg bemerken, daß der Zündensatz im allgemeinen aus dem Druckanstieg, aber auch mit Hilfe einer Photozelle bestimmt wurde. Die Messung mit Photozelle ist genauer, wenn die Photozelle entsprechend empfindlich ist, jedoch erreicht man auch mit der Druckmessung in den meisten Bereichen eine ausreichende Genauigkeit. Zur Klärung dieser Frage wurden im Institut von Herrn Nusselt von Herele an der Technischen Hochschule München schon früher Zündverzugsmessungen mit beiden Methoden durchgeführt. Es ergab sich dabei, daß in dem uns interessierenden Bereich der Unterschied bei beiden Meßverfahren sehr gering ist.

Zu der Frage der Druckabhängigkeit des Reaktionsvorgangs möchte ich nochmals, wie bereits im vorigen Jahr, ausdrücklich darauf hinweisen, daß die Druckabhängigkeit durch den absoluten Wert des Druckexponenten keinesfalls gekennzeichnet ist, sondern wir haben besonderen Wert darauf gelegt, zu betonen, daß das Verhältnis der Druckabhängigkeit zur Temperaturabhängigkeit entscheidend ist. Selbst eine Druckabhängigkeit entsprechend einem Exponenten des Drucks von 1 oder 2 kann u. U. verschwindend sein, wenn die Temperaturabhängigkeit sehr stark ist (beispielsweise einer scheinbaren Aktivierungsenergie von 20 bis 30 Kcal entspricht). Die Druckabhängigkeit wird erst dann bedeutend, wenn die Temperaturabhängigkeit — wie es bei unseren Messungen der Fall war — so gering ist, daß sie in ihrer Auswirkung wenigstens in derselben Größenordnung wie die Druckabhängigkeit liegt. Deshalb ist eine Bewertung durch den Absolutwert des Exponenten nicht möglich. Somit kann von einer Gleichheit der von Herrn von Weber angeführten Versuchsergebnisse mit meinen Messungen nicht gesprochen werden, auch wenn die Druckexponenten dieselben sind, weil die Temperaturabhängigkeiten weitergehend verschieden sind; im Gegenteil, die Folgerungen sind tatsächlich grundsätzlich verschieden, weil hierfür das Verhältnis der Druckabhängigkeit zur Temperaturabhängigkeit maßgebend ist.

Besüglich der Härte des Zündensatzes konnten wir auf Grund unserer Versuche ebenfalls feststellen, daß sie in den verschiedenen Druck- und Temperaturbereichen verschieden ist. Im Gebiet kleinerer Drücke ist bei den untersuchten Kraftstoffen eine geringere Härte des Zündensatzes mit allmählichem Druckanstieg während des Zündverzugs feststellbar; im Bereich höherer Drücke ist eine große Härte bei plötzlichem Zündensatz vorhanden.

von Philippovich: Ich möchte nochmals zurückkommen auf den Faktor Charakteristik der Stoffe und Charakteristik der Motoren. Die Stoffcharakteristik hat ja nur einen Sinn, wenn wir sie auf den Motor übertragen können, und es handelt sich nun darum, wie der Motor charakterisiert wird. Mir scheint deshalb lediglich wichtig zu fragen, wie wird der Motor charakterisiert, gibt es für den Motor eigentlich einen Begriff einer Konstante, in dem man die verschiedenen Betriebsbedingungen anbringen kann, oder hat der Motor für die verschiedensten Betriebsbedingungen verschiedene Konstanten. In diesem Zusammenhang wäre es interessant zu wissen, ob bei den Versuchen mit Teileinspritzung im nicht klopfenden Gebiet im Vergleich zur gewöhnlichen Einspritzung Diagramme aufgenommen worden sind. Es zeigt sich ein sehr starker Unterschied der Klopfgrenze, der offenbar erheblich sein müßte in den Diagrammen des nicht klopfenden Gebiet.

F. A. F. Schmidt: Bei Untersuchungen mit aufgeteilter Einspritzung wurden keine Diagramme aufgenommen.

Scheuermeyer: Zu der von Herrn von Philippovich angeschnittenen Frage über Zustandsgrößen im unverbrannten Gemisch möchte ich noch bemerken, daß die Verbesserung der Klopfgrenze zum größten Teil auch ein Einfluß der Gemischbildung ist.

In der folgenden Abbildung (die anläßlich der Sitzung selbst wegen Zeitmangels nicht mehr gezeigt werden konnte) ist nach Messungen von P. Kornacker, DVL, der Einfluß der Gemischbildung auf das Klopfen gezeigt:

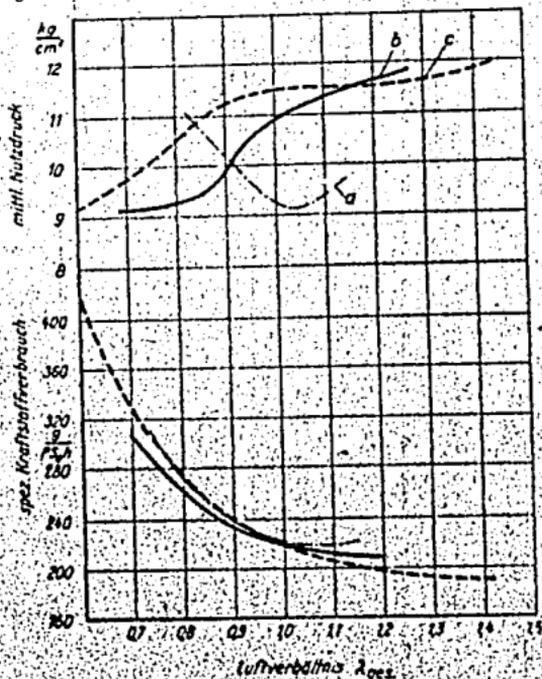


Abb. 1

Die Abbildung zeigt den mittleren Nutzdruck an der Klopfgrenze sowie den spezifischen Kraftstoffverbrauch, abhängig vom Luftverhältnis, bei verschiedener Überschneidung der Ventilsteuerzeiten und bei Verwendung verschiedener Einspritzdüsen.

- a) Offene L'Orange-4-Loch-Düse, Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 6,1$, Überschneidung der Ventilsteuerzeiten 50° Kurbelwinkel.
- b) Offene L'Orange-4-Loch-Düse, Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 7,2$, Überschneidung der Ventilsteuerzeiten 110° Kurbelwinkel.
- c) Geschlossene 5-Loch-Düse, Gemischschichtung, Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 7,2$, Überschneidung der Ventilsteuerzeiten 110° Kurbelwinkel.

Ponzig: Bei der Beurteilung der Klopfestigkeit von Kraftstoffen stellt die Gemischbildung eine Bedingung dar, auf die geachtet werden muß. Wir haben von Herrn F. A. F. Schmidt gehört, daß durch Unterteilung der Einspritzung, wobei ein Teil der Kraftstoffmenge sehr spät eingespritzt wird, eine wesentliche Verbesserung des Klopfverhaltens eintritt.

Wir haben ähnliche Versuche, wenn auch unter anderen Bedingungen, durchgeführt und sind grundsätzlich zu gleichen Ergebnissen gekommen. Ähnliche Ergebnisse wurden auch erzielt, wenn man die Einspritzung nicht unterteilt, sondern die gesamte Menge geschlossen, aber zu einem späteren Zeitpunkt als üblich einspritzt. Man kann also durch Beeinflussung der Gemischbildung die Lage von Klopfgrenzkurven beeinflussen.

Es liegen nun bei der späteren Einspritzung zwei Einflüsse vor. Einmal wirkt sich die Verkürzung der Vorweilzeit auf den Umfang der Vorreaktionen aus. Gleichzeitig aber tritt noch eine Verschlechterung der Gemischbildung ein, da bei der Vorweilzeit auch die Zeit für die mechanische Aufbereitung des Kraftstoffs verkürzt wird. Es tritt hierdurch, wie Herr F. A. F. Schmidt mitteilte, eine geringe Verschlechterung des Verbrauchs offensichtlich durch schlechtere Verbrennung auf. Wie unsere Versuche zeigen, ist aber selbst unter Berücksichtigung dieser Erhöhung des Verbrauchs eine Steigerung der Klopfestigkeit festzustellen. Durch derartige Verfahren kann man also die zur Startleistung nötige hohe Klopfestigkeit an Stelle durch Verfetten, durch Verschieben des Einspritzzeitpunkts erreichen.

Diese Tatsachen stehen nun im gewissen Gegensatz zu Versuchen, die Franke an einem DB 601 mit verschiedenen Ventilüberschneidungen durchführt. Es trat hier, und zwar nur bei aromatenarmen Kraftstoffen, ein Abnehmen der Klopfestigkeit bei Verminderung des Luftüberschusses ein. Erst bei sehr fetten Gemischen fand wieder ein Aussteigen der Klopfestigkeit statt (vgl. FB 1657, S. 49, Abb. 6). Diese Verfettungsempfindlichkeit der Paraffine ist überraschend und steht im Gegensatz zu dem, was wir bisher wußten.

Was hier nun interessiert, ist die Erklärung, die darin gesucht wird, daß bei reichen Gemischen die Gemischbildung schlecht sei und deshalb eine Abnahme der Klopfestigkeit auftrete. Diese Erklärung steht im Widerspruch zu dem, was ich eingangs erläuterte.

Ich möchte deshalb die Frage stellen, ob etwas Eindentigeres über den Einfluß der Gemischgüte auf die Klopfestigkeit bekannt ist.

von Philippovich: Ich glaube, man muß da etwas unterscheiden, und zwar ist es bei der Teileinspritzung so, daß ich in den letztverdrängenden Gemischrest einspritze und dadurch eine lokale physikalische Kühlung bekomme. Franke verwendet dagegen eine Erklärung chemischer Natur. Der Unterschied besteht darin, daß ich bei einer gewissen Anzahl von Tröpfchen an lokalen Stellen eine Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit bekomme, die zur Zündung führt, im anderen Fall aber die lokale Temperatur senke. Das sind zwei ganz verschiedene Sachen.

Penzig: Die Wirkung, die Herr F. A. F. Schmidt erwähnte, ist keineswegs daran geknüpft, daß man erst kurz vor oder auch während der Verbrennung einspritzt. Wie ich sagte, genügt bereits eine Verschiebung des Einspritzzeitpunkts in Richtung des Verdichtungsstadiums. Die Gemischbildungszeit und damit die Vorreaktionszeit sowie die Gemischgüte brauchen also nur etwas verändert zu werden, um die Wirkung zu erreichen.

Lindner: Ich glaube, daß die Deutung der Klopfneigung in den beiden Fällen, Teileinspritzung bzw. Ventilüberschneidung, wie sie Herr von Philippovich trifft, zutreffend ist. Bei Teileinspritzung wird gerade in den Teil des Brennraums, der zuletzt von der Verbrennung erfaßt wird, in dem also der Klopfvorgang abläuft, verspätet eingespritzt, so daß die Verweilzeit hier am kürzesten ist und damit die Klopfwirkung vermindert wird. Die Verschlechterung der Gemischbildung oder eine etwa auftretende stärkere Kühlung des Restgemisches halte ich für Sekundärerscheinungen, die gegenüber der Verkürzung der Verweilzeit von untergeordneter Bedeutung sind. Erstgenannte hat vor allem auf den Verbrauch Einfluß.

Mit zunehmender Ventilüberschneidung wird zweifellos, wie Herr Franke bereits angegeben hat, zufolge der verbesserten Innenkühlung des Zylinders die Gemischtemperatur im Zylinder herabgesetzt. Daß dadurch trotzdem eine erhöhte Klopfneigung insbesondere im Bereich des Luftmangels eintritt, begründet Herr Franke mit Versuchen von H. L. Callendar, auf die ich in einer früheren Veröffentlichung hingewiesen hatte. Danach treten Vorreaktionen (z. B. Peroxydbildung), die die Klopfneigung befördern, dann in erhöhtem Maße auf, wenn noch unverdampfte Kraftstofftröpfchen im Gemisch vorhanden sind, wofür durch die verstärkte Zylinderkühlung die Voraussetzungen gegeben sind. Callendar nimmt hier auf Grund der von ihm aufgestellten Kerntropfentheorie eine heterogene Reaktion an der Tröpfchenoberfläche an. Diese Theorie ist an sich sehr umstritten. Es besteht aber nach meinen Erfahrungen kein Zweifel, daß bei mangelnder Verdampfung, d. h. schlechter Gemischaufbereitung, Reaktionen dieser Art, die den Klopfvorgang befördern, auftreten.

Dankbühler: Die Reaktion an der Oberfläche eines Tröpfchens kann ja eigentlich nur dann eintreten, wenn der Teildampfdruck des Tröpfchens kleiner ist als der Gesamtdruck. Das ist eine Temperaturfrage.

Lindner: Für die Erklärung dieser Vorgänge ist die Annahme von Reaktionen an einer Flüssigkeitsoberfläche nicht erforderlich. Maßgebend ist, daß infolge der mangelnden Verdampfung Gebiete sehr starker Kraftstoffkonzentration, d. h. großen Luftmangels, vorhanden sind, in denen bekanntlich Vorreaktionen, die den Klopfvorgang befördern, besonders leicht auftreten.

Danköbler: Also keine Oberflächenreaktion, sondern eine Reaktion in der Diffusionszone.

Ich möchte noch eine zweite Frage erörtern. Die Hauptsache, nämlich das Klopfen, scheint in zwei Dinge zu zerfallen, und zwar erstens in die Kennzeichnung des Kraftstoffs, den man ja mit der Bestimmung einer Zündverzugsstemperaturkurve kennzeichnen kann und zweitens in eine Charakterisierung des Motors. Da scheint mir der zweite Punkt wesentlich ungeklärt zu sein. Nun möchte ich noch fragen: Ist es so furchtbar schwer, diesen Motor zu charakterisieren? Tatsache ist, daß sich zwei gleiche Brennstoffe in zwei verschiedenen Motoren verschieden verhalten. Was bringt der Motor in diesen Klopfvorgang herein? Der Klopfvorgang besteht darin, daß das Unverbrannte verdichtet wird, und wenn ihm dann genug Zeit gelassen wird, durchzündet, d. h. wir haben es mit einer Konkurrenz zwischen Zündverzugszeit und Flammenlaufzeit im Motor zu tun. Wenn die Flamme schnell genug den Verbrennungsraum durchläuft, dann kommt es nicht mehr zum Klopfen, umgekehrt muß auch das verdichtete, noch unverbrannte Gemisch lang genug auf der hohen Temperatur gelassen werden, wofür der Wärmeübergang maßgebend ist. Beides aber, sowohl der Wärmeübergang als auch die Flammengeschwindigkeit, werden doch im Motor vermutlich wesentlich bestimmt durch die Turbulenz. Sie wird sich ja nun in den verschiedenen Motoren verschieden verhalten, und die Turbulenz hängt ja ab von der Drehzahl, von der Gestaltung des Verbrennungsraums usw. Wenn man nun verschiedene Motoren hinsichtlich des Klopfens charakterisieren will, sollte man da nicht einmal versuchen, den Turbulenzzustand in zwei laufenden Motoren, aber in ungesündeten Motoren, zu vergleichen, etwa durch Messung der Ansaug-, Auspuff- und Kühlwassertemperatur? Man könnte dann vielleicht irgendwelche Charakteristiken für den einzelnen Motor herausbekommen. Denn je größer die Turbulenz, desto größer die Erhöhung der Flammengeschwindigkeit und desto größer der Wärmeübergang. Das ist nur eine Frage, die man einmal mit erörtern kann.

Tschmann: Durch eine erhöhte Flammengeschwindigkeit wird nicht nur die dem Treibstoff zur Verfügung stehende Zündverzugszeit gekürzt, sondern, durch das Motorverfahren bedingt, ändern sich hierbei auch die Lage der Spitzendrücke zum oberen Totpunkt im Motordiagramm und damit die Spitzendrücke selber. Es ergeben sich dann wieder komplexe Vorgänge, die man nur durch Aufnahme des Druckdiagramms selber feststellen kann, wie ja auch die Flammengeschwindigkeit nicht allein durch die Turbulenz, sondern n. s. auch durch die Anzahl und Lage der Zündkerzen im Verbrennungsraum des Motors gegeben ist. Die Höhe des Spitzendrucks ist vom Zeitpunkt seines Auftretens zum oberen Totpunkt abhängig und um so höher, je näher derselbe am oberen Totpunkt auftritt.

Dankkühler: Ich habe nicht ganz verstanden. Ich betrachte jetzt einmal die Verbrennung als eine Gleichraumverbrennung. Dann wird es doch so sein, daß dem Unverbrannten und so weniger Zeit zur Verfügung steht, je schneller die Flamme läuft, und außerdem kann man doch annehmen, daß der jeweilige Druck nur vom Anfangsdruck im Moment der Zündung abhängt, von der jeweils abgebrannten Menge und vom Wärmeübergang an die Wand.

Teichmann: Wenn der Brennraum gleich groß ist. Er ist aber am kleinsten im oberen Totpunkt.

Meurer: Den Einfluß der Turbulenz auf das Klopfverhalten hat man bei der Umstellung von Dieselmotoren auf das Dieselmotorenverfahren bemerken können. Motoren, die für das Dieselmotorenverfahren zur Verbesserung der Durchwirbelung eine abgeschnürte Luftkammer besaßen und deshalb ein ungünstiges Klopfverhalten erwarten ließen, zeigten sich überraschend klopfest. Wir haben Otto-Motoren in Anlehnung an das MAN-Dieselmotorenverfahren gebaut, bei dem durch Anordnung des Brennraums im Kolben eine kräftige Verdrängerströmung auftritt, und es war auch hier festzustellen, daß ein Motor dieser Bauart mit 1,21 Zylinderinhalt klopfrei bis zu einem Verdichtungsverhältnis von 1:9,1 lief, während bei ähnlichen Motoren mit dem üblichen Brennraum unter den gleichen Betriebsbedingungen und mit dem gleichen Kraftstoff die Klopfgrenze schon bei 1:8 lag. Der Brennraum, in dem unzweifelhaft die stärkere Luftbewegung war, erwies sich also als klopfester, und es ist anzunehmen, daß der Unterschied durch die stärkere Turbulenz hervorgerufen wird.

F. A. F. Schmidt: Damit übereinstimmend wurde auch bei den Versuchen der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt der starke Einfluß der Turbulenz auf das Fortschreiten der Flammenfront und die Gemischbildung und damit auf den Klopfvorgang festgestellt.

Helmbold: Zur Frage der Turbulenz habe ich folgende Beobachtungen mitzuteilen: An zwei Viertakt-Otto-Einsylinder-Motoren von 2,7 l Hubvolumen war bei sonst gleichen Betriebszuständen einmal eine Vorzündung (bei bester Leistung) von 27° KW und zum anderenmal eine Vorzündung von nur 12° KW erforderlich. Im ersten Fall hatte der Motor einen BMW-Ventilsylinder und im zweiten einen BMW-Kugelschiebersylinder. Die Oberfläche des Brennraums vom Schieberzylinder war größer und räumlich durch zwei Kanäle zerklüftet. Der Temperaturzustand der Zylinderköpfe war bei beiden Arten gleichgehalten. Die Anordnung und Form des Einlaßkanals sollte beim schiebergesteuerten Zylinder einen geordneten technischen Wirbel den Frischgasen aufswängen, der auch während der Zündung noch vorhanden sein sollte. Der Einlaßkanal war während der Frischgasströmung über eine längere Zeit kreisrund und nicht durch Schieberkanten abgeblendet. Der Kanal lag parallel zum Kolbenboden und mündete tangential an die Zylinderwand des Brennraums. Beim ventilsteuerten Zylinder wird die Frischgasladung durch den in der Strömung stehenden Ventilteller in sich verwirbelt und die Bewegung der Gasladung nicht gerichtet. Die hierdurch gebildeten vielen kleinen Wirbel bleiben örtlich gebunden. Ich habe die

Anschauung, daß die Gemischbildung bei direkter Einspritzung gleichmäßiger wird, wenn statt einer Verwirbelung in sich eine einheitliche Strömung vorherrscht, weil die Kraftstoffteilchen nicht gleichmäßig über den Verbrennungsraum verteilt eingespritzt, aber durch die zirkulierende Strömung besser verteilt werden. Außerdem wird die Geschwindigkeit der Flammenfront zusätzlich durch die Art dieser Gasbewegung gefördert. Die Zündreaktion erfolgte hierbei ungewohnt schnell, ein Klopfen wurde nicht festgestellt.

Herr Dreyhaupt führte hier noch einige eigene Gedanken über das Zündproblem an, die bereits an anderer Stelle ausführlich veröffentlicht sind, worauf hier verwiesen werden kann¹⁾.

¹⁾ Dreyhaupt: Versuch einer allgemeinen Theorie der motorischen Zündvorgänge.
Habilitationsschr. Dresden 1940.
Ders., Forsch. Ing.-Wes. 11 (1940) S. 215.
Ders., MTZ 4 (1942) 333.