

Grundsätzliche Untersuchungen über den Zündvorgang von Kraftstoffen

Von Fritz A. F. Schmidt

In den folgenden Ausführungen werden neue Untersuchungen über den Zündvorgang bekanntgegeben, die sich an frühere Arbeiten über dieses Thema anschließen, in denen zum Zwecke der Ermittlung der grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten des Zündverhaltens verschiedener Kraftstoffe im Hinblick auf den Klopfvorgang eine Reihe von Untersuchungen am Motor, in einer Bombenapparatur und in einer Apparatur zur adiabatischen Verdichtung durchgeführt wurden, wobei die Erkenntnisse, die aus den Arbeiten von Ricardo, Pyc, Broeze, Wileke und Schnauffer u. a. bekannt sind, Berücksichtigung fanden. Die Untersuchungen gingen einerseits von einer Analyse der Vorgänge im Motorzylinder beim Klopfvorgang, andererseits von der Auswertung von Zündverzugsmessungen auf Grund einer theoretischen Betrachtung über den Zündvorgang aus. Aus den Gesetzmäßigkeiten, die für den Zündverzug gelten, wurde schon früher eine Beziehung ermittelt, welche das dem Zündvorgang zugrunde liegende Reaktionsgeschehen unter gewissen Voraussetzungen, auf die später noch eingegangen wird, in der Gesamtheit kennzeichnet. Als erste Stufe dieser Arbeiten wurden die Ergebnisse von Zündverzugsmessungen bei verschiedenen Drücken und Temperaturen für mehrere Kraftstoffe mit guter Annäherung durch die Formel

$$z = \frac{e^{b/T}}{p^a} \cdot a'$$

dargestellt (Abbildung 1). Die Abweichung der mit der Formel berechneten Werte (gestrichelte Kurven) von den Versuchspunkten ist innerhalb eines großen Bereichs gering. Weiterhin wurde auf Grund einer schon früher näher beschriebenen Untersuchung eine Beziehung ermittelt, die der obenstehenden empirischen Formel formal ähnlich ist, aber noch einen Faktor enthält, der eine evtl. vorhandene Temperatursteigerung während des Reaktionsvorgangs und die dadurch auftretende Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit berücksichtigt.

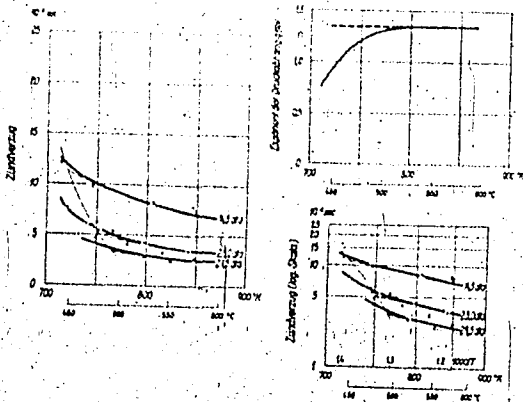


Abb. 1

Zündverzug des Kraftstoffes B 4, abhängig von der Temperatur für verschiedene Drücke bei annähernd adiabatischer Verdichtung des Kraftstoff-Luft-Gemisches

Die zur Errechnung dieses Faktors anzuwendende Beziehung hängt von dem Ausmaß der Wärmeentwicklung während des Zündvorgangs ab¹⁾. Schon bisher vorliegende Messungen des Druckverlaufs während des Zündverzugs in einer Verdichtungsapparatur lassen die allgemeine Annahme, daß während des Zündverzugs in Verbindung mit Kettenreaktionen Temperatursteigerungen auftreten, deren Ausmaß vorläufig noch nicht festliegt, als berechtigt erscheinen. Diese Messungen lassen weiterhin darauf schließen, daß es sich um Kettenreaktionen handelt, bei denen im allgemeinen die Wärmeentwicklung nur gering ist.

Auch die Auswertung der Motorversuche erlaubt kein endgültiges Urteil darüber, ob infolge der zur Zündung führenden Reaktionen schon während der Induktionsperiode eine Temperatursteigerung auftritt, weil die rechnerische Erklärung der Versuchsergebnisse mit und ohne Berücksichtigung einer Temperaturerhöhung möglich ist.

¹⁾ Für den theoretischen Fall, daß die Reaktionsgeschwindigkeit nur von Druck und Temperatur abhängig ist, ist die Berechnung des Faktors exakt und einfach möglich. Im vorliegenden Fall kann auf Grund des vorhandenen Versuchsmaterials die Auswertung in dieser Richtung zunächst nur als vorläufig angesehen werden.

Hat man nun die Zündverzugsweite in Abhängigkeit von Druck und Temperatur entsprechend der obenstehenden Formel durch Kurven dargestellt, so kann man aus der daraus ermittelten Formel die für die mittlere scheinbare Reaktionsgeschwindigkeit maßgebenden Kennwerte zahlenmäßig bestimmen. Die beschriebene Auswertungsmethode gestattet somit, aus Zündverzugsmessungen, die einen speziellen Fall des Zündvorgangs darstellen, die Konstanten für die allgemeine Gesetzmäßigkeit zu ermitteln, die die Geschwindigkeit der Gesamtheit der Reaktionsvorgänge von Druck und Temperatur pauschal durch den Wert $\frac{D''}{p^b T^n} d$ kennzeichnet. Die Werte b , n und d sind nur für einen beschränkten Druck- und Temperaturbereich praktisch konstant, so daß auch ihre Anwendung auf einen bestimmten Druck- und Temperaturbereich beschränkt bleibt.

Es kommt darauf an, die Vorgänge bei der Zündung durch möglichst einfache Formeln wiederzugeben, die bei gegenüber der Messung in Apparaturen veränderten Bedingungen, wie sie im Motor vorkommen, wieder angewendet werden können. Wenn auch gewisse Vereinfachungen nötig sind, spricht doch die Möglichkeit, die Versuchsergebnisse nach der vorliegenden Auswertungsmethode rechnerisch mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen, dafür, daß die angewendete Methode eine zulässige Vereinfachung bei der Kennzeichnung der Reaktionsvorgänge bei der Selbstzündung darstellt. Es handelt sich demnach bei diesem Verfahren um eine Näherung, wobei sich auf Grund weiterer Messungen noch Abwandlungen der Methode ergeben können. Genauere Untersuchungen, insbesondere mit verschiedenen Kraftstoffen, sind im Gange.

Im einzelnen gedenken wir auf die theoretischen Zusammenhänge, die durch unsere neuen experimentellen Befunde nahegelegt werden, an dieser Stelle nicht einzugehen; dies bleibt einer künftigen Mitteilung vorbehalten.

Um auf Grund der beschriebenen Methode die den Kraftstoff kennzeichnenden Zahlenwerte zu ermitteln und um die Richtigkeit und die Brauchbarkeit dieser Werte für eine Kennzeichnung des Klopfvorgangs zu überprüfen, mußten auf Grund von Auswertungen von Motorversuchen vor allem diejenigen Bereiche ermittelt werden, die für den Motor von Bedeutung sind.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich im wesentlichen auf die Betrachtungen im unverbrannten Gemisch vor der Flammenfront. Abbil-

Abbildung 2 zeigt zwar, daß die Grenzen zwischen unverbranntem und verbranntem Gemisch unregelmäßig sind, die Aufnahmen zeigen aber immerhin, daß eine gute Trennung zwischen verbranntem und unverbranntem Gemisch möglich wird.

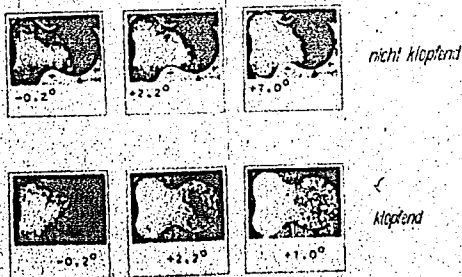


Abb. 2

Aufnahmen von Flammenbildern bei nichtklopfender bzw. klopfender Verbrennung nach Withrow und Raßweiler (SAE-Journ. 39 [1936] 301/02)

Um zu zeigen, welche Temperatur- und Druckbereiche in Betracht kommen, ist in Abbildung 3 als Beispiel für einen Motorversuch bei klopfender Verbrennung der Druck- und Temperaturverlauf eines Arbeitszyklus dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist der Druckverlauf im Zylinder und daneben zur Festlegung des Klopfensatzes der Verlauf des ersten Differentialquotienten¹⁾ des Drucks nach der Zeit wiedergegeben. Aus dem Druckverlauf wurde auf Grund einer Näherungsrechnung der Temperaturverlauf im unverbrannten Gemischteil berechnet. Die gezeichneten beiden Temperaturkurven beziehen sich auf den Verdichtungsvorgang ohne Zündung und auf den Temperaturverlauf in dem von der Flammenfront verdichteten und unverbrannten Gemisch. Eine

¹⁾ Neuerdings wird zur Messung des Klopfensatzes der zweite Differentialquotient verwendet, da man damit bessere Ergebnisse bekommt, wie Seeber und Lichtenberger gezeigt haben.

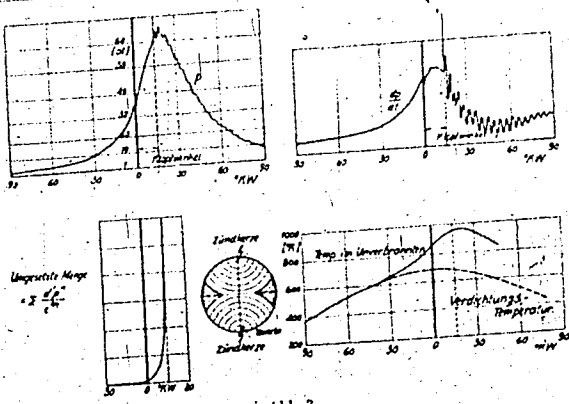


Abb. 3

Druck- und Temperaturverlauf im unverbrannten Gemisch während eines Arbeitsspiels bei klopfender Verbrennung

spezielle Annahme darüber, wie im einzelnen die Reaktionsvorgänge erfolgen, ist nicht erforderlich. Es genügt die Annahme, daß zu dem Zeitpunkt, bei dem das Klopfen im Zylinder beobachtet wird, mit einer Reaktion, die der obenstehenden Gesetzmäßigkeit gehorcht, die Reaktionsgeschwindigkeit sehr groß wird, so daß in diesem Zeitpunkt der Eindruck einer plötzlichen Entflammung entsteht.

Ich möchte darauf hinweisen, daß diese Temperaturkurven mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, jedoch ist die Genauigkeit ausreichend, um damit den in Frage kommenden Temperaturbereich überschlüssig zu ermitteln. Sofern es sich um vergleichende Untersuchungen und Versuchsreihen handelt, die unter den gleichen Bedingungen vorgenommen sind, treten etwaige Fehler der Auswertung bei allen Versuchen in ähnlicher Form auf, so daß wenigstens ein Vergleich der relativen Änderungen bei Änderung der Betriebsbedingungen möglich wird. Es sei zunächst angenommen, der Temperaturverlauf im Unverbrannten sei richtig bestimmt. Dann müßte für jede Phase des Verdichtungs Vorgangs dieses unverbrannten Gemischrestes die Umsetzung durch die Reaktion mit Hilfe der obenstehenden Beziehung ermittelt werden. Da für die Umsetzung eine e -Funktion ($e^{1/T}$) maßgebend ist und für die

Größe b Werte in der Größenordnung von 5000 (2000 bis 15000) in Betracht kommen, ist die Veränderung der Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur u. U. außerordentlich stark. Betrachtet man einen Vorgang mit dem Exponenten $b = 10000$, so verdoppelt sich die Reaktionsgeschwindigkeit schon bei einer Änderung der Temperatur von 36° (von 700 auf 736° K); betrachtet man einen Exponenten mit 5000, so verdoppelt sich die Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Temperaturdifferenz von 75° (von 700 auf 775° K). Daraus geht hervor, daß unter der Annahme eines konstanten Wertes b die chemische Umsetzung im ersten Teil der Verdichtung vernachlässigbar wäre. Beispielsweise wären bis zum Kurbelwinkel 10° v. o. T. bei einem konstanten Exponenten $b = 5000$ und $n = 2$ weniger als 1% dessen umgesetzt, was bis zu dem Kurbelwinkel, in dem im Indikatordiagramm das Klopfen beobachtet wurde, im ganzen umgesetzt ist. Tatsächlich ändern sich jedoch die Werte b und d mit der Temperatur u. U. erheblich, und zwar sind nach den gezeigten Versuchsergebnissen die Umsetzungen bei tiefen Temperaturen tatsächlich noch geringer, als sie auf Grund von einer derartigen Überschlagsrechnung erscheinen. Auch für den Fall erheblich höherer Reaktionsgeschwindigkeiten im Gebiet tiefer Temperaturen sind für den Klopfvorgang tatsächlich die Vorgänge, die sich im Temperatur- und Druckgebiet in der Nähe des Totpunkts abspielen, so entscheidend, daß mit den für diesen Bereich gültigen, aus Zündverzugsmessungen ermittelten Konstanten der Motorklopfvorgang bei Änderung der Verdichtung, bei Änderung der Vorzündung oder bei Änderung von Druck und Temperatur der angesaugten Luft mit ausreichender Genauigkeit rechnerisch erklärt werden konnte. Die Abschätzung der Fehlermöglichkeiten bei dieser Auswertung hat gezeigt, daß, wie schon früher mehrfach betont, nur mit gleichzeitiger Berücksichtigung des Temperatureinflusses und des Druckeinflusses auf den Reaktionsvorgang, und zwar durch das Verhältnis der beiden Einflüsse, das Verhalten des Kraftstoffs im wesentlichen gekennzeichnet werden kann.

Auf Grund dieser Betrachtungen wurden die Zündverzugsmessungen vorwiegend in Temperaturbereichen bei Temperaturen von 400 bis 700° C durchgeführt. Die Messungen wurden einerseits für einheitliche Stoffe, wie n -Heptan und Methan, durchgeführt und andererseits für die praktisch interessierenden Kraftstoffe B0, B4 und neuerdings auch für die besonders wichtigen aromatischen Kraftstoffe. Als Beispiel für die Aromaten

wurde zunächst der Kraftstoff C2 gewählt, da dieser Kraftstoff einen verhältnismäßig großen Anteil von Aromaten enthält und daher die dabei auftretenden Eigenschaften deutlich genug zeigt.

Ich möchte zunächst die Ergebnisse, die mit dem Kraftstoff B4 gewonnen wurden, mitteilen. In Abbildung 1 sind neben den Messungen meines Mitarbeiters Lonn in der Bombe auch die Messungen von Lindner eingetragen¹⁾. Die Abbildung zeigt die Tendenz, daß der Zündvorgang im Gebiet geringer Temperaturen, die — wie vorhin erwähnt — für den

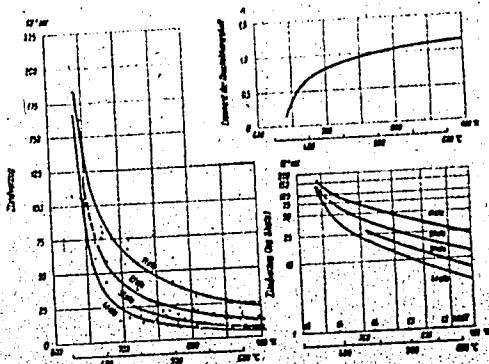


Abb. 4

Zündverzögerung des Kraftstoffes B4, abhängig von der Temperatur für verschiedene Drücke bei Einspritzung des flüssigen Kraftstoffes in eine Bombe.

Zündvorgang beim Klopfen nur von geringer Bedeutung sind, hauptsächlich von der Temperatur und nur sehr wenig vom Druck abhängig ist. Im mittleren Bereich, der im wesentlichen dem Motorbetriebszustand entspricht, sind sowohl die Temperatur als auch der Druck von entscheidender Bedeutung, und bei sehr hohen Temperaturen wird der Einfluß des Drucks immer mehr überwiegend. Ich hatte schon bei frü-

¹⁾ Es ist besonders bemerkenswert, daß die Kurven der beiden Verfasser verhältnismäßig gut übereinstimmen, obwohl die Bomben verschieden groß und die übrigen Versuchsanrichtungen wesentlich verschieden waren.

herer Gelegenheit darauf hingewiesen, daß diese Erscheinung von uns wenigstens für die Kraftstoffe, die technisch hauptsächlich interessieren, als allgemeine Regel beobachtet wurde.

Daneben sind die Ergebnisse mit demselben Kraftstoff logarithmisch dargestellt, und zwar ist über $(1/T)$ der Logarithmus des Zündverzugs aufgetragen. Die Neigung der Kurven ist in dieser Darstellung dem Wert b verhältnis, wie man sich durch Logarithmieren der Gleichung für den Zündverzug leicht überzeugen kann.

Die in der Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse sind bei Einspritzung flüssigen Kraftstoffs in Bomben gewonnen. Zur Ermittlung der für die Gasreaktion maßgebenden Größen aus diesen Diagrammen müßte der Einfluß des Verdampfungsvorgangs vorher rechnerisch ermittelt werden. Um die damit verbundenen Unsicherheiten auszuschalten, wurden die Zündverzugswerte auch in einer Apparatur, die eine sehr rasche adiabatische Verdichtung des Kraftstoff-Luft-Gemisches gestattet¹⁾, ermittelt. Die Auswertung derartiger Meßergebnisse, die beispielsweise für den Kraftstoff B4 in Abbildung 5 dargestellt sind, ist erheblich einfacher.

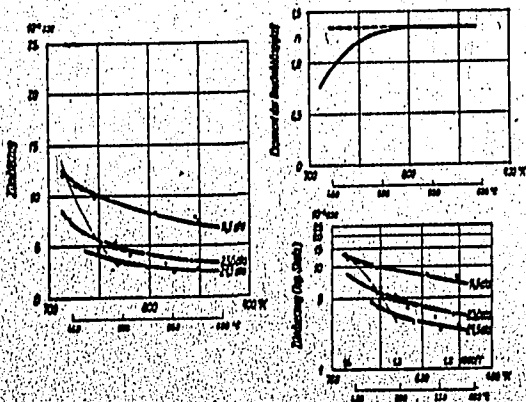


Abb. 5

Zündverzug des Kraftstoffes B4, abhängig von der Temperatur für verschiedene Drücke bei annähernd adiabatischer Verdichtung des Kraftstoff-Luft-Gemisches.

¹⁾ Die Apparatur wurde von den Herren M. Scheuermeyer und H. Steigerwald entwickelt.

Die Auswertung nach der oben beschriebenen Methode erstreckt sich nun darauf, den Exponenten b' im Werte $e^{b'/T}$ und den Exponenten n im Faktor p^n zu ermitteln. Wie schon früher erwähnt, braucht der Wert b noch nicht notwendig mit den entsprechenden Werten der formelmäßigen Darstellung des Zündverzugs b' übereinstimmen. Es hängt davon ab, ob durch die Reaktionen während des Zündverzugs schon Wärme frei wird. Die ermittelten Kennwerte n sind in der Abbildung rechts oben wiedergegeben. Die Temperaturabhängigkeit ist aus der Neigung der Kurven in der logarithmischen Darstellung zu entnehmen. Man sieht, daß bei tiefen Temperaturen die Druckabhängigkeit gering ist, bei höheren Temperaturen und vor allem in dem für den Motor in Betracht kommenden Bereich beträgt der Exponent für die Druckabhängigkeit etwa 0,8 bis 1,3. Die Temperaturabhängigkeit, die durch den Exponenten b' gekennzeichnet wird, ist andererseits wieder bei geringen Temperaturen groß und bei höheren Temperaturen erheblich geringer.

Aus den gezeigten Darstellungen ist ersichtlich, daß die zur Beurteilung des Klopfvorgangs im Motor herangezogenen Messungen des Zündvorgangs in besonderen Versuchseinrichtungen, wie Verdichtungsapparaturen, unter allen Umständen in dem richtigen Bereich von Druck und Temperatur durchgeführt werden müssen, weil man sonst zu Meßergebnissen kommt, die zu dem motorischen Verhalten in vieler Hinsicht in Widerspruch stehen. Versuchte man beispielsweise mit Hilfe der Messungen des Zündverzugs im Temperaturbereich von 300 bis 400° das motorische Verhalten zu erklären, so würde man wegen der starken Temperaturabhängigkeit und der sehr geringen Druckabhängigkeit der Zündverzugsmessungen in diesem Bereich zu dem Schluß kommen, daß der Klopfvorgang im Motor praktisch nur von der Temperatur abhängig sein müßte. Damit ist auch zu erklären, daß Jost auf Grund seiner bei geringen Temperaturen durchgeführten Messungen zu dem von unserer Feststellung grundsätzlich abweichenden Ergebnis gekommen ist, der Klopfvorgang im Motor sei in erster Annäherung allein von der Temperatur abhängig, und die beim Motor festgestellte Druckabhängigkeit sei im wesentlichen als indirekter Temperatureinfluß zu erklären. Diese Messungen in geringen Temperaturbereichen geben zwar wertvolle Aufschlüsse über die Reaktionsvorgänge in diesem Bereich, jedoch darf man nicht so argumentieren, daß man daraus schließt, die Reaktionsvorgänge beim Klopfvorgang im Motor seien annähernd allein von der Temperatur abhängig, denn in dem für den Motor wichtigen Temperaturbereich ist der

Druckeinfluß auch bei Zündverzugsmessungen, wie Abbildung 4 zeigt, sehr erheblich und der Temperatureinfluß viel geringer als in dem der Messung von Jost zugrunde liegenden Bereich. Eine eindeutige Klarstellung dieser Frage ist deshalb von entscheidender Bedeutung, weil die Druckabhängigkeit des Klopfvorgangs praktisch der wichtigste Einfluß ist, denn ein hoher zulässiger Ladedruck ist im wesentlichen gleichbedeutend mit hoher Leistung.

Es ist sehr erfreulich, daß die inzwischen bekanntgewordenen Messungen von Teichmann mit unseren Ergebnissen in dieser Hinsicht gut übereinstimmen, so daß die Frage der Druckabhängigkeit weitgehend im Sinne unserer obigen und früheren Überlegungen geklärt sein dürfte.

Wollte man die aus den Zündverzugsmessungen gewonnenen Ergebnisse so genau wie möglich auf den motorischen Vorgang anwenden, so müßte man für jeden Punkt der Zustandsänderung des unverbrannten Gemisches die jeweiligen für diesen Zustand gültigen Kennwerte anwenden. Für eine überschlägige, für technische Zwecke meist ausreichende Kennzeichnung genügt es jedoch, wenn man den Bereich, der für die jeweiligen Motorversuche in Betracht kommt, durch eine einheitliche Formel mit konstanten Werten b und n zusammenfaßt. Man kann sich z. B. an Hand der Abbildung 4 leicht durch Vergleich der durch die Formel dargestellten Kurven mit den Meßpunkten überzeugen, daß die Darstellung der Zündverzugswerte in diesen Bereichen in vielen Fällen für die praktische Anwendung mit ausreichender Genauigkeit möglich wird.

Benutzt man die aus den Zündverzugsmessungen im richtigen Bereich ermittelten Kennwerte zur überschlägigen Nachrechnung motorischer Versuche, so kommt man zu dem Ergebnis, daß durch die Zündverzugsmessungen und ihre Auswertung das motorische Verhalten auch in gewissen Einzelheiten gekennzeichnet wird. Als Beispiel seien Messungen mit vorwiegend aromatischen Kraftstoffen und solche mit sehr geringem Anteil von Aromaten miteinander verglichen.

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse von Zündverzugsmessungen eines aromatenreichen Kraftstoffs C 2 und eines Kraftstoffs B 4 mit verhältnismäßig geringem Aromatengehalt gegenübergestellt. Die Kurven zeigen ein ähnliches Zündverhalten des Kraftstoffs, wie es aus Klopfmessungen, die an vielen Stellen durchgeführt wurden, schon bekannt ist. Erfahrungsgemäß ist im Motor die Klopfgrenzkurve abhängig von der Temperatur um so steiler, je mehr Aromaten der Kraftstoff enthält, wobei allerdings

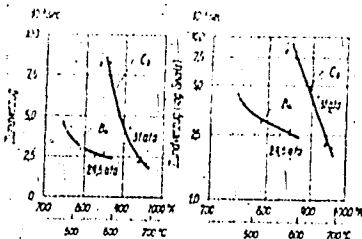


Abb. 6

Zündverzögerung eines aromatenarmen und eines aromatenreichen Kraftstoffs, abhängig von der Temperatur bei annähernd adiabatischer Verdichtung des Kraftstoff-Luft-Gemisches

auch der Luftüberschuß eine gewisse Rolle spielt. Ein ähnliches Zündverhalten ergibt sich aus den in der Abbildung dargestellten Versuchsergebnissen.

Bei aromatenarmen Kraftstoffen ist die Temperaturabhängigkeit im ganzen betrachteten Temperaturbereich gering, während bei dem aromatenreichen Kraftstoff eine stärkere Temperaturabhängigkeit auftritt. Es zeigt also schon die Betrachtung der Meßergebnisse, wie gut durch das Verhältnis der Druck- und Temperaturabhängigkeit des Zündvorgangs das motorische Verhalten dargestellt wird. Beweiskräftig wird diese Übereinstimmung erst durch die schon früher erwähnte zahlenmäßige Übereinstimmung der Kennwerte in der Größenordnung und die richtige qualitative Veränderung bei Änderung der Kraftstoffe in beiden Fällen.

Den bisherigen Betrachtungen wurde konstanter Luftüberschuß zugrunde gelegt. Es blieb also noch zu untersuchen, wie groß der Einfluß des Luftüberschusses auf den Zündvorgang und damit auf den Klopfvorgang ist.

Abbildung 7 zeigt für die schon obenerwähnten Kraftstoffe C 2, B 4 und n-Heptan die Abhängigkeit des Zündverzugs vom Luftüberschuß bei konstanter Anfangstemperatur. Dabei ist natürlich darauf zu achten, daß die Temperatur nach dem Verdampfen des Kraftstoffs gleichgehalten wird, weil sonst im reichen Gebiet wegen der Verdampfung größerer Kraftstoffmengen eine kleinere Temperatur im unverbrannten Gemisch

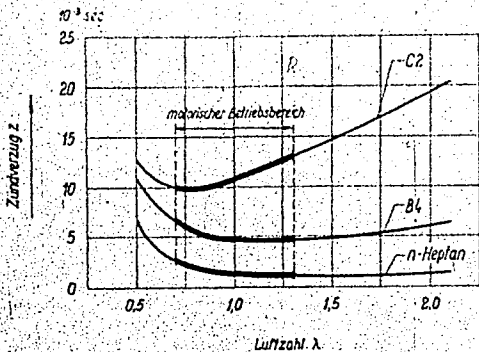


Abb. 7

Abhängigkeit des Zündverzuges von der Luftzahl λ für die Kraftstoffe C2, B4 und n-Heptan

Gemessen in Verdichtungsapparat bei einer Verdichtungsendtemperatur von $\sim 460^\circ \text{C}$ und einem Verdichtungsdruck von ~ 30 at

vor Beginn der Zündung vorhanden wäre als bei ärmeren Gemischen. Bei motorischen Auswertungen muß also bei der Temperaturberechnung die Verdampfung berücksichtigt werden. Die Abbildung zeigt, daß der Einfluß des Luftüberschusses zwar weniger stark ist als der Einfluß von Druck und Temperatur, aber doch innerhalb des in Frage kommenden Bereichs so wichtig ist, daß er in vielen Fällen nicht vernachlässigt werden kann, besonders dann, wenn sich bei einem Vergleich verschiedener Kraftstoffe der Einfluß des Luftüberschusses verschieden auswirkt. Unter Umständen wird es aber auch schon ausreichen nur dann besondere Angaben über die Abhängigkeit vom Luftüberschuß zu machen, wenn eine wesentliche Abweichung von einem mittleren Verlauf vorliegt.

Als Beitrag zur Klärung des Einflusses der Gemischzusammensetzung wurden von meinem Mitarbeiter Lonn auch Versuche an einer Bombe mit verschiedener Sauerstoffkonzentration durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 8 wiedergegeben sind. Die Darstellung zeigt, daß für den Zündverzug im wesentlichen der Partialdruck des Sauerstoffs maßgebend ist. Sichere Schlüsse über den Einfluß des Luftüberschusses kön-

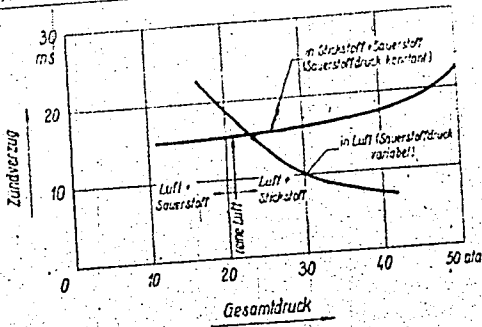


Abb. 8

Zündverzögerung des Kraftstoffes B4 bei verschiedener Sauerstoffkonzentration, gemessen bei Einspritzung des flüssigen Kraftstoffes in eine Bombe, Lufttemperatur $\sim 560^{\circ}\text{C}$

nen hieraus allerdings nicht gezogen werden, da bei Bombenversuchen der Luftüberschuß an der Stelle, an der zuerst die Zündung erfolgt, nicht bekannt ist.

Bei Verwendung des gleichen Motors, aber verschiedener Kraftstoffe zeigt der Verlauf der Klopfgrenzkurven bei Veränderung des Luftüberschusses erhebliche Verschiedenheiten. Diese scheinbare Verwirrung kann leicht auf die in den vorliegenden Abbildungen ersichtlichen eindeutigen und einfachen Gesetzmäßigkeiten zurückgeführt werden, wenn man die speziellen Eigenheiten der betreffenden Motoren studiert und berücksichtigt. Die Unterschiede treten hauptsächlich dadurch auf, daß im Motor je nach der Durchführung des Einspritzvorgangs — teils beabsichtigt, teils unbeabsichtigt — Gemischschichtungen vorhanden sind, die örtliche Temperaturunterschiede zur Folge haben. Daher ist bei Untersuchungen und Auswertungen, die grundsätzlichen Zwecken dienen, eine möglichst gleichmäßige Gemischbildung anzustreben. Um zu zeigen, daß durch eine sinngemäße Anwendung dieser Möglichkeiten auch Vorteile erreicht werden können, sind in Abbildung 9 Klopfgrenzkurven im gleichen Zylinder bei gleichem Mischungsverhältnis mit und ohne Gemischschichtung dargestellt. Die Schichtung des Gemische ist in der höher liegenden Kurve durch unterteilte Einspritzung hergestellt, d. h. der Kraftstoff wird in zwei Teilen nacheinander eingespritzt, wobei der

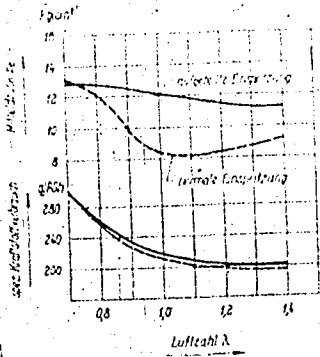


Abb. 9

Klopfgrenzkurve und spezifischer Kraftstoffverbrauch abhängig vom Luftverhältnis λ bei normaler und aufgeteilter Einspritzung (Gemischschichtung). DB 601-A-Einzylindermotor; Kraftstoff B 4, Verdichtungsverhältnis ε = 7.2

erste Teil des Kraftstoffs während der Saugperiode und der zweite Teil des Kraftstoffs am Ende der Verdichtungsperiode eingespritzt wurde. Dem Effekt der Gemischschichtung überlagert sich in diesem Falle noch ein Einfluß auf den Reaktionsvorgang, der dadurch entsteht, daß der zweite Teil des Kraftstoffs sehr spät eingespritzt wird, so daß der Verdampfungsvorgang und damit der Reaktionsvorgang erst verspätet anlaufen kann.

Die dadurch erreichte Verminderung der Klopfneigung ist in der Abbildung dargestellt. Diese Kurven sind aus einer Arbeit meines Mitarbeiters Kornacker über Gemischschichtung und aufgeteilte Einspritzung entnommen.

Aus den obenstehenden Ausführungen ist ersichtlich, daß im allgemeinen eine Kennzeichnung des Zündverhaltens des Kraftstoffs durch die drei konstanten Größen b , n und d in der Beziehung $\frac{e^{b/r}}{p^n} d$ ausreichend genau möglich sein wird. An Stelle der Größe des Werts d , der im Mittel die Absoluthöhe der Klopfestigkeit kennzeichnet, kann vorteilhafter ein Kennwert gewählt werden, der für einen bestimmten Wert der Temperatur und des Drucks die Reaktionsgeschwindigkeit kenn-

zeichnet. Dieser Wert kann wiederum annähernd gleichwertig durch eine Oktanzahl, die für diesen betreffenden Betriebszustand ermittelt ist, ersetzt werden. Diese Oktanzahl müßte jedoch abweichend von der bisher üblichen Oktanzahlbestimmung so ermittelt werden, daß dabei im unverbrannten Gemisch des Prüfmotors ähnliche Drücke und Temperaturen auftreten, wie sie in den Hochleistungsmotoren auftreten, für die die Kraftstoffe verwendet werden sollen. Diese neue Oktanzahl könnte somit prinzipiell nach derselben Methode wie bisher entweder in einem Hochleistungsmotor, wie zum Beispiel ein Motor, der für das DVL-Überladerverfahren verwendet wird, oder in einem kleineren schnellaufenden Prüfmotor, in dem der oben geschilderte Betriebszustand hergestellt wird, ermittelt werden.

Bei manchen Kraftstoffen wird es möglich sein, mit guter Genauigkeit zur Kennzeichnung an Stelle der beiden Werte b und n den Wert $\frac{b}{n}$ einzuführen, der dann mit einem anderen Buchstaben zu bezeichnen wäre. Die Frage, ob diese Vereinfachung allgemein durchführbar sein wird, kann erst nach Vorliegen sehr reichhaltigen Versuchsmaterials entschieden werden.

Es ist auch jetzt schon abzusehen, daß es Fälle geben wird, bei denen die Konstanz der Werte b und n in dem Bereich, der für den Flugmotor interessiert, nicht ausreichend ist. In diesen Fällen wird es dann u. U. erforderlich sein, für zwei Betriebsbereiche die beiden Werte anzugeben oder — wenn eine noch größere Genauigkeit gewünscht wird — kann der konstante Wert der Oktanzahl und zusätzlich je eine Kurve für b und n herangezogen werden. In diesem Fall wäre die Kennzeichnung auf einen Zahlenwert und zwei Kurven zurückgeführt.

Zusammenfassend komme ich zu dem Ergebnis, daß sich aus Zündverzugsmessungen drei sehr einfache Kennwerte ableiten lassen, die die Klopf Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe, besonders aber in bezug auf ihre verschiedenartige Druck- und Temperaturabhängigkeit ihrer Reaktionsvorgänge, mit guter Näherung kennzeichnen. Damit wäre es möglich, von der neuerdings üblichen Kennzeichnung der Kraftstoffe durch Kurvenschaubilder, die an speziellen Motoren gewonnen sind, wieder auf eine allgemeingültige Kennzeichnung zurückzukommen.