

Übertragbarkeit der Resultate von Laboratoriumsuntersuchungen über die Selbstzündung von Treibstoffen auf motorische Verhältnisse

Von Heinz Rögner

In den letzten Jahren hat die Deutung des Klopfvorgangs als Selbstzündung eines Restteils unverbrannter Ladung allgemein Anerkennung gefunden. Entsprechend dieser Vorstellung ist für das Einsetzen des Klopfens von entscheidender Bedeutung einerseits der physikalische Zustand des unverbrannten Gemischrestes, also seine Temperatur, Dichte, Zusammensetzung, ferner die Zeit, während der das Gemisch sich in diesem Zustand befindet, anderseits die Neigung des Kraftstoff-Luft-Gemisches zur Selbstzündung unter den vorgegebenen Bedingungen.

Über die Untersuchung der Selbstzündung adiabatisch verdichteter Kraftstoff-Luft-Gemische, die im Institut für Physikalische Chemie in Leipzig durchgeführt wurde, hat Herr Jost in seinem Vortrag berichtet. Die Neigung zur Selbstzündung, als deren Maß die Induktionszeit gewählt wurde, hängt bei den bisher besonders sorgfältig geprüften paraffinischen Kraftstoffen sehr stark von der Temperatur, dagegen im Vergleich hierzu nur sehr schwach von der Dichte und der Gemischzusammensetzung ab. Als Anhalt läßt sich aus den Angaben des vorhergehenden Vortrags etwa das folgende Zahlenverhältnis angeben: Eine Änderung der Dichte um 50% entspricht einer Änderung der absoluten Temperatur um 1 bis 2% in der Wirkung auf die Induktionszeit.

Die Ergebnisse von Motorversuchen lassen sich ganz summarisch dahin zusammenfassen, daß der Einfluß von Temperatur, Dichte, Gemischzusammensetzung auf das Klopfen von gleicher Größenordnung ist; damit sei nur ausgedrückt, daß man keine der drei Größen gegenüber den beiden anderen vernachlässigen darf. Zur Untersuchung der Frage, ob sich dieses Verhalten eines Kraftstoffes im Motor aus dem Selbstzündungsverhalten erklären läßt, wird man mit der Betrachtung des physika-

fischen Zustandes des unverbrannten Gemischrestes beginnen müssen. Das Ziel ist also die Ermittlung der genauen Werte für die einzelnen Zustandsgrößen im Restvolumen.

Eine erste Näherung kann man z. B. durch Annahme einer sehr raschen Verbrennung im oberen Totpunkt und Vernachlässigung der Wärmeübertragung gewinnen; die Temperatur und Dichte des Restgemischs läßt sich dann berechnen aus der theoretischen Endtemperatur des verbrannten Gases, dem Wert der spezifischen Wärme des Gemisches und dem Molzahlenverhältnis vor und nach der Verbrennung. Mit fortschreitender Verbrennung steigt die Temperatur und Dichte im unverbrannten Rest über die durch die Kolbenbewegung erreichte Verdichtungs-temperatur hinaus weiter an. Als Beispiel gibt Abbildung 1

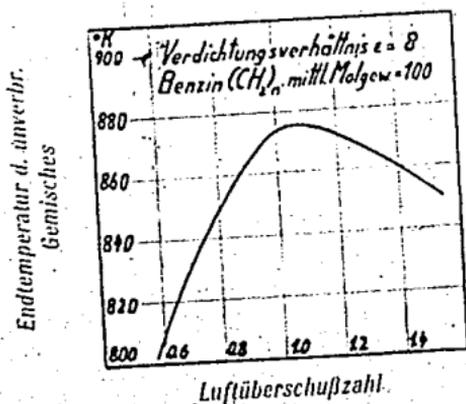


Abb. 1

Berechnete Endtemperatur des unverbrannten Gemisches in Abhängigkeit vom Luftüberschuß

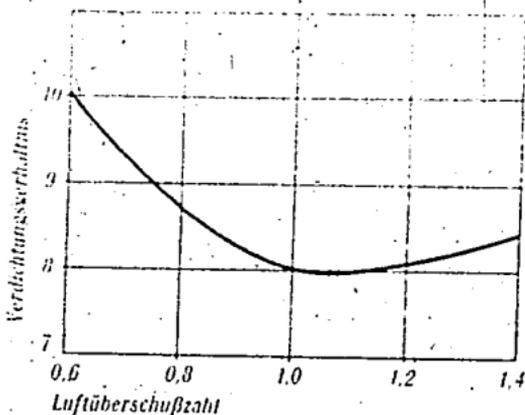
die berechnete Endtemperatur des letzten (unendlich kleinen) Gemischrestes in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl λ wieder für ein Benzin vom mittleren Molekulargewicht 100 und der Bruttozusammensetzung $(CH_2)_n$. Die zur Berechnung herangezogenen Werte für die spezifische Wärme des unverbrannten und verbrannten Gases wurden der Arbeit von H. Kühl, Dissoziation von Verbrennungsgasen und ihr Einfluß auf den Wirkungsgrad von Vergasermaschinen, VDI-Forschg. Heft 373, entnommen.

Die höchste Temperatur erreicht das Gemisch bei der Zusammensetzung $\lambda = 1,05$; bei wachsendem Brennstoffüberschuß nimmt die Temperatur stark ab, weniger stark bei Luftüberschuß. Aus den Angaben der Abbildung 1 wurde zu jedem Wert der Luftüberschußzahl das

jenige Verdichtungsverhältnis errechnet, welches zur gleichen Endtemperatur des unverbrannten Restes führt (Abbildung 2). Aus den

Abb. 2

Berechnetes
Verdichtungs-
verhältnis zur
Erreichung einer
konstanten
Endtemperatur

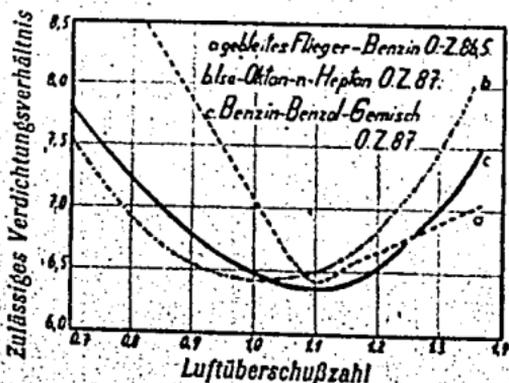


Selbstzündungsversuchen wird die Annahme nahegelegt, daß unabhängig von der Gemischzusammensetzung Klopfen bei einer bestimmten Temperatur auftritt; hat z. B. das höchstzulässige Verdichtungsverhältnis eines Brennstoffes bei stöchiometrischer Zusammensetzung den — von uns willkürlich gewählten — Wert 8, so sollten die zulässigen Verdichtungsverhältnisse für andere Gemischzusammensetzung gerade auf der in Abbildung 2 dargestellten Kurve liegen.

Zum Vergleich mit Erfahrungen aus dem Motorbetrieb diene die Abbildung 3, Kurve b, die sich ebenfalls auf einen rein paraffinischen

Abb. 3

Einfluß der Luft-
überschuszahl
auf das zulässige
Verdichtungs-
verhältnis
(F. Seeber)



Brennstoff bezieht. Luftmangel und -überschuß lassen eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses in etwa gleichem Maße zu. Rein qualitativ

ist also der Verlauf der gemessenen und berechneten Klopfgrenzkurven ähnlich. Bei einer Verbesserung der Berechnung muß man weitere Größen berücksichtigen, die eine Verknüpfung zwischen Endtemperatur und Luftüberschubzahl im Motor bedingten; hierzu gehören vor allem Flammengeschwindigkeit und Restgaswärme. Die Flammengeschwindigkeit zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei $\lambda < 1$, d. h. im Gebiet mäßiger Überfettung; jede Herabsetzung derselben führt bei festgehaltener Zündzeitpunkt zu einem geringeren Spitzendruck, also auch zu einer drigeren Endtemperatur des unverbrannten Ladungsrestes. Hiet ab dürfte sich die günstige Wirkung eines starken Luftüberschusses auf das Klopferhalten erklären lassen.

Im Motor wird stets eine sehr starke Druckabhängigkeit des Klopfens festgestellt. Die Größenordnung sei der Abbildung 4 entnommen. Die

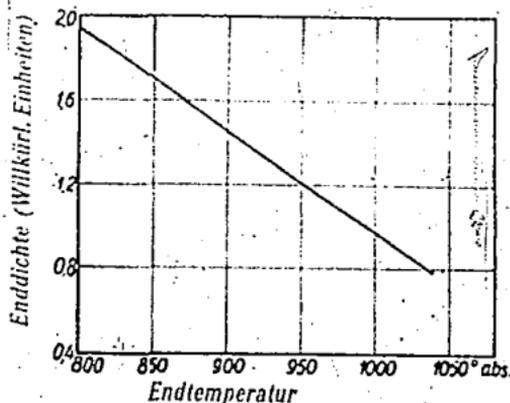


Abb. 4

Berechnete Endtemperatur und Enddichte im unverbrannten Gemischrest (Rothrock und Biermann)

Zahlen dieser Abbildung sind in folgender Weise gewonnen. Es wurde die Ansaugtemperatur variiert, zu jeder Temperatur der Ladedruck bestimmt, bei dem hörbares Klopfen auftrat, aus den zusammengehörigen Werten für Ansaugtemperatur, Ladedruck, Verdichtungsverhältnis, Gemischzusammensetzung wurde dann die Dichte und Temperatur im letzten Rest der unverbrannten Ladung berechnet; die Gerade gibt also die Wertepaare für theoretische Endtemperatur und Enddichte an der Klopfgrenze an. Nach diesen Angaben wäre zur Kompensation einer Druckerhöhung um 50% eine Temperaturerniedrigung um etwa 90°, also 10% des Absolutwertes erforderlich, damit die Klopfgrenze nicht überschritten wird.

Bei der Diskussion des Druckeinflusses wird man von vornherein den Wärmeübergang zu berücksichtigen haben. Jede Heraussetzung des

Ladedruck erhöht die Wärmelast des Motors, damit die Wandtemperaturen, und durch diesen Wärmeübergang die Temperatur des Frischgases. Wir haben unter Heranziehung verschiedener experimenteller Untersuchungen am Motor über den Wärmeübergang eine orientierende Abschätzung durchgeführt; danach kann durch Erhöhung des Ladedrucks um 50% die absolute Temperatur des unverbrannten Restgemisches um maximal 3 bis 4% gesteigert werden.

Die Klopfgrenzkurven, von denen ein Beispiel in der Abbildung 3 wiedergegeben war, werden im allgemeinen in der Weise aufgenommen, daß auf konstante Klopfstärke eingestellt wird. Die Annahme scheint berechtigt, daß zur Erzeugung konstanter Klopfstärke ein annähernd konstanter Energiebetrag in den Druckwellen im Gasraum enthalten sein muß. Je höher die Gemischdichte ist, desto kleiner muß das klopfend verbrennende Volumen sein, damit ein gleichbleibender Energiebetrag in Form von Druckwellen auftritt; um so später darf also auch erst die Selbstzündungstemperatur des Gemisches erreicht werden im unverbrannten Anteil. Mit der Ladedruckerhöhung muß also eine Erniedrigung der Anfangstemperatur verbunden sein, damit tatsächlich erst in einem späteren Zeitpunkt der Verbrennung die Selbstzündung einsetzt. Eine Überschlagsrechnung ergibt, daß eine Dichteerhöhung um 50% bei sehr starkem Klopfen mit einer Erniedrigung der Anfangs- oder Verdichtungsendtemperatur um maximal 3% verbunden sein muß, damit die Energie der Klopferschwingungen konstant bleibt.

Die Zusammenfassung der Wirkung des Wärmeübergangs und der Dichteabhängigkeit der Klopfenergie liefert das Resultat, daß eine Druckerhöhung um 50% mit einer Temperaturerniedrigung um maximal 6 bis 7% gekoppelt sein muß, damit das Klopfen nicht verstärkt wird. Die im Motorversuch gefundene Temperaturerniedrigung, die zur Kompensation desselben Druckanstiegs erforderlich ist, beträgt etwa 10%. Die Größenordnung der indirekten Druckwirkung ist also durchaus vergleichbar mit der des beobachteten Druckeinflusses. Es muß offen gelassen werden, ob daneben noch andere indirekte Einflüsse des Druckes auf die Selbstzündung im unverbrannten Rest im Motor auftreten. Selbst wenn man der Selbstzündung ein anderes Temperatur- und Druckgesetz als das von uns vorausgesetzte zugrunde legen würde, müßten die dargestellten indirekten Druckeinflüsse bei der Diskussion des Materials aus Motorversuchen berücksichtigt werden.

Der Vergleich zwischen Klopfen und Selbstzündung der Endlichte läßt sich also nicht dem beschriebenen System als wesentliche Züge des Verhältnisses von Endlichte zu Motor zuordnen. Die Erscheinung der Selbstzündung der Endlichte ist zu erklären, wenn man sich die Deutung, die sowohl nach dem allgemeinen als auch nach dem besonderen Verhalten vor allem bei festem Drehmoment, als auch über den Zustand des unverbrannten Brennraums im Motor vorfindet.

Die Ermittlung der für das Klopfen üblichen beiden Größen, wie Endtemperatur, Endlichte des unverbrannten, für die Vorbereitung des Gemisches zur Verfügung stehende Zeit im Motor kann außer auf direktem, vielleicht auch auf indirektem Wege geschehen durch Lötung eines Motors durch Kraftstoffe. Der Grundgedanke eines solchen Verfahrens sei im folgenden näher erläutert. Angenommen, das Löschen des Klopfens im Motor hänge von drei Größen — etwa den drei oben genannten: Endtemperatur T , Endlichte ρ , zur Verfügung stehende Zeit τ — ab, Klopfen tritt auf für bestimmte zusammengehörige Werte der drei Veränderlichen, die Klopfgrenze läßt sich also ganz allgemein durch einen Ausdruck $f_1(T, \rho, \tau) = 0$ beschreiben, wobei der Index I angeben soll, daß diese Klopfgrenzfläche zu einem Brennstoff I gehört. Man kann die Veränderlichen als Achsen eines rechtwinkligen Koordinatensystems O wählen.

Berechnet man dieselben Größen Endtemperatur usw. aus Messungen am Motor, so werden die Werte mit einer gewissen systematischen Abweichung behaftet sein, wir bezeichnen sie daher besonders mit T' , ρ' , τ' . Trägt man T' , ρ' , τ' ebenfalls als Achsen eines rechtwinkligen Systems I auf, so entsprechen sich also nicht die Punkte mit denselben Koordinaten in beiden Systemen; d. h. die berechneten und die wahren Werte der drei Größen fallen nicht zusammen; oder, was dasselbe ist, wir schreiben ein und demselben wahren Wertetripel in verschiedenen Motoren ganz verschiedene Wertetripel zu. Ein Punkt im System der wahren Werte läßt sich nun durch die Klopfgrenzflächen dreier geeignet gewählter Kraftstoffe festlegen, die sich gerade in diesem Punkt schneiden. Gehen wir zum System der berechneten nicht korrigierten Werte über, so erscheint hier dieser Punkt P als P_I , die drei Klopfgrenzflächen, die durch P führten, müssen sich jetzt auch in Punkt P_I des Systems I schneiden, ebenso in dem P entsprechenden Punkt P_{II} eines Motors II. Die Schnittpunkte der Klopfgrenzflächen dreier Brennstoffe für verschiedene Motoren geben also an, daß in diesen Schnittpunkten

den verschiedenen Kraftstoffen, die in den verschiedenen Punkten der Leistungskurve vorgegeben sind, wobei die verschiedenen Motoren zu verschiedenen Punkten zugeordnet werden. Wird dann für einen Motor die Klopfgrenzzucke einer bestimmten Kraftstoffes aufgenommen, so läßt sich die Fläche dieses Kraftstoffes für die übrigen Motoren voraus berechnen dadurch, daß sie durch die Punkte gelegt wird, die den auf ihr liegenden Punkten im ersten Motor gleichwertig sind.

Man benutzt bei diesem Verfahren also die Kraftstoffe selbst zur Anzeige eines bestimmten physikalischen Zustands im unverbrannten Ladungsrest, wobei unter physikalischem Zustand hier die Gemischaufbereitung für das Klopfen entscheidenden Größen zu verstehen ist. Wir setzen bei diesen Überlegungen voraus, daß die Unterschiede im Verhalten verschiedener Motoren gegenüber denselben Brennstoffen auf den verschiedenen physikalischen Zustand in diesen Motoren zurückzuführen sei, der etwa durch die konstruktiven Eigenheiten jedes Motors bestimmt ist und der von den verschiedenen Kraftstoffen gewissermaßen vorgefunden wird. Tatsächlich werden aber die einzelnen Kraftstoffe noch diesen physikalischen Zustand mitbestimmen; wird dieser Einfluß sehr stark, so verliert das geschilderte Verfahren natürlich seine prinzipielle Richtigkeit.

Nun noch ein qualitativer Vergleich mit Ergebnissen von Motorversuchen. Abbildung 5 zeigt für zwei Motoren und drei Brennstoffe Klopf-

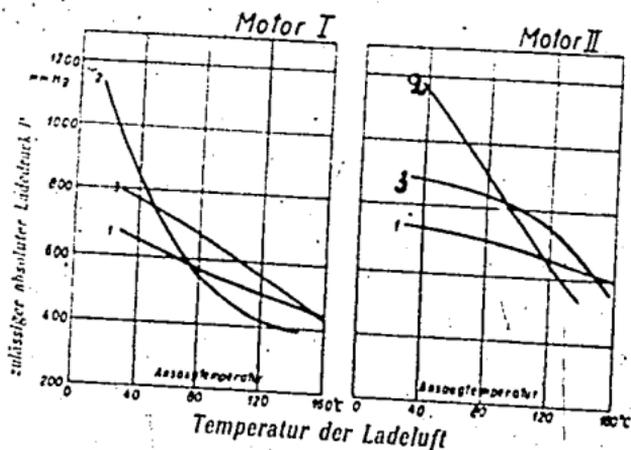


Abb. 5

Einfluß der Ansaugtemperatur auf den zulässigen Ladedruck

grenzkurven, die im Institut für Betriebsstoffforschung der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt aufgenommen wurden. Veränderlich sind Ansaugtemperatur und Ladedruck; noch nicht auf Ladedruckrate und Endlicht, unzureichend die entsprechenden wesentlichen mit der Verzerrung von Ordinate und Abszisse qualitativ gleiche das Bild dasselbe. Festzustellen ist beim Überlag von Motor I zum Motor II eine gleichsinnige Verschiebung sämtlicher Kurven, ihre gegenseitige Orientierung, etwa gekennzeichnet durch den Umlaufsinn des von den Kurven eingeschlossenen Dreiecks, bleibt erhalten; die Krümmung wird bei allen Kurven im gleichen Sinn geändert. Dieser qualitative Befund dürfte doch darauf hindeuten, daß tatsächlich der physikalische Zustand, den die Brennstoffe vorfinden, in beiden Motoren sehr verschieden ist, auch wenn man aus den Angaben über Ansaugtemperatur, Ladedruck usw. denselben Zustand errechnet. Es sei jedoch betont, daß hier die Abbildung offenbar einem verhältnismäßig einfachen Gesetz gehorcht. Die Zuordnung der Punkte kann auch so verwickelt sein, daß etwa eine Umkehrung des Umlaufsinn eines aus drei Klopfgrenzkurven gebildeten Dreiecks vorkommen kann. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die ganze Überlegung auf einen höherdimensionalen Raum übertragen werden muß, falls etwa mehr als drei Veränderliche für das Klopfen entscheidend sind.

Es schien uns nicht überflüssig, diese prinzipielle Überlegung einmal auszuführen, die bei einer Diskussion der Übertragungsmöglichkeiten von Versuchsergebnissen von einem Motor auf einen anderen doch wohl berücksichtigt werden müßte.

Aus-sprache

F. Schmidt: Ich möchte den Herren Jost und Buzoni für ihre Ausführungen, wie schon daran, daß die Schwingzeit der Übertragung der Motorverhältnisse auf die Versuche an anderen Apparaturen im wesentlichen in der unvollkommenen Kenntnis der Wärmeübertragung liegt. Allerdings sind die Hoffnungen, durch Messungen viel mehr zu erfahren, ziemlich klein, da sich am laufenden Motor schwer so genaue Versuche über die Wärmeübertragung anführen lassen, wie man sie hier braucht. Wir haben z. B. versucht, bei einem kleinen Motor die Wärmeübergangsverhältnisse während der Anzugsens zu messen. Wie man leicht einseht, muß der ohne Zündung nur mit Luft bei Grandantrieb laufende Motor wie eine Kältemaschine wirken. Er verdichtet die angezogene Luft adiabatisch und bringt sie kurzzeitig auf eine höhere Temperatur als die gekühlten Zylinderwände. Dabei gibt die Luft Wärme an die Wände ab, s. müßte also den Motor abgekühlt verlassen. Der Versuch zeigt aber, daß sie praktisch mit der gleichen Temperatur herauskommt, vielleicht weil der Kolben etwas wärmer wird als die Zylinderwand oder weil sie im Auslaßkanal wieder Wärme aufnimmt. Auf diese Weise kann man demnach nichts Genaues über den Wärmeübergang beim Auszugen erfahren.

F. A. F. Schmidt: Aus den Ausführungen von Herrn Jost war ersichtlich, daß er zu dem Schluß gekommen ist, daß der Einfluß des Druckes auf den zum Klopfen führenden Reaktionsvorgang nur gering ist und daß der Druckeinfluß, der im Motor beobachtet wird, im wesentlichen nur ein indirekter ist, der über die Temperatur zur Geltung kommt. Auswertungen von Motorversuchen, die in der DVL vor längerer Zeit durchgeführt wurden, haben jedoch zu dem Ergebnis geführt, daß diese indirekten Einflüsse den starken gemessenen Druckeinfluß beim Klopfen im Motor nicht erklären können. Die Frage, inwieweit der beim Motorversuch beobachtete Einfluß des Druckes auf das Klopfen nur ein indirekt über die Temperatur auf den Reaktionsvorgang wirkender Einfluß oder ein direkter Einfluß des Druckes auf die Reaktion ist, ist von Bedeutung, weil davon abhängt, welche Maßnahmen bezüglich der Konstruktion des Motors und bei der Entwicklung der Kraftstoffe zu ergreifen sind und wie das Prüfverfahren für den Kraftstoff aufzubauen ist.

Um diese Widersprüche aufzuklären, wurden in der DVL weitere Untersuchungen durchgeführt, und zwar über die Selbstzündung in Bomben und weiterhin über die Selbstzündung in einer Apparatur zur annähernd adiabatischen Verdichtung von Brennstoff-Luft-Gemischen. In derartigen Einrichtungen wird nicht adiabatisch, sondern annähernd adiabatisch verdichtet. Diese Apparatur arbeitete ähnlich wie die von Jost und Tizard und Pye verwendete. Wir haben jedoch, um zu genaueren Ergebnissen zu kommen, ein größeres Verdichtungs-volumen gewählt. Diese in meinem Institut von den Herren Scheuermeyer und Steigerwald entwickelte Apparatur wurde mit einem Zylinderdurchmesser von 80 mm ausgeführt, während Herr Jost etwa 33 bis 50 mm Zylinderdurchmesser verwendet hat. Die Verdichtung des Kraftstoffdampf-Luft-Gemisches wurde mit Preßluft durchgeführt, um die Zeit für die Verdich-

...ung möglichst klein zu halten. Es wurden Messungen mit derselben Kraftstoffes durchgeführt, mit denen auch die Motorsversuche vorgenommen wurden, sei es mit BO, Bt und C.

Die Messungen ergaben eine sehr starke Druckabhängigkeit im Zündverhältnis. In Abbildung 1 sind links die Ergebnisse dargestellt, die in einer Bombe mit Einspritzung

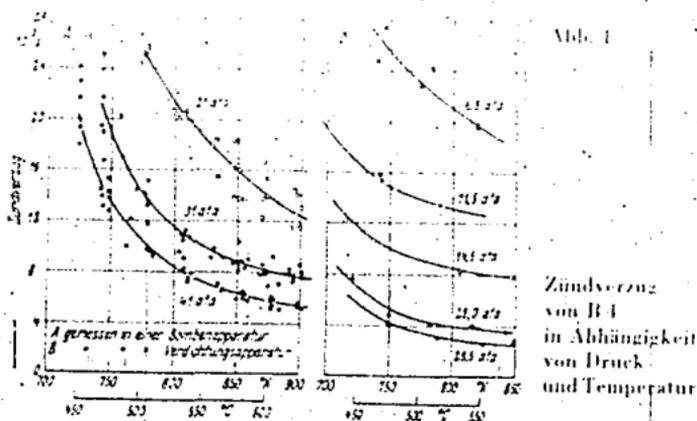


Abb. 1
Zündverzug von Bt in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

flüssigen Kraftstoffes gewonnen wurden. Die Kurven zeigen den Zündverzug bei Drücken von etwa 10, 30 und 20 at. In den so gemessenen Zündverzugswerten sind die Einflüsse der Verdampfung und der Gemischbildung mit enthalten. Auf der rechten Seite des Bildes sind die Ergebnisse mit der Apparatur zur annähernd adiabatischen Verdichtung dargestellt. Man sieht, daß auch in diesem Fall ein sehr starker Einfluß des Druckes vorhanden ist. Die Kurven beziehen sich auf Verdichtungsdrucke von etwa 6, 12, 15, 23 und 30 at. Die Absolutwerte des Zündverzugs sind selbstverständlich erheblich kleiner als die in der Bombe gemessenen, weil der Einfluß der Verdampfung wegfällt. Es zeigt sich, daß bei höheren Temperaturen der Temperatureinfluß geringer und der Druckeinfluß verhältnismäßig größer ist als bei geringen Temperaturen. Dieses Ergebnis wurde bei verschiedenen anderen Kraftstoffen ebenfalls festgestellt. Bei den bisher untersuchten Kraftstoffen war bei tiefen Temperaturen der Druckeinfluß immer geringer.

Damit war der Widerspruch gegenüber den Ergebnissen des Herrn Jost noch nicht aufgeklärt, weil dessen Versuche eindeutig zeigen, daß ein Druckeinfluß nicht vorhanden war. Aus diesem Grunde wurden die Versuche mit n-Heptan in unserer Apparatur unter ähnlichen Versuchsbedingungen wie bei Herrn Jost, aber in einem größeren Druck- und Temperaturbereich, wiederholt. Die Ergebnisse waren in dem Bereich, in dem Jost gearbeitet hat (bis etwa 400° C) ähnlich wie bei seinen Versuchen. In diesem Bereiche war der Druckeinfluß tatsächlich sehr gering. Bei höheren Temperaturen war er jedoch erheblicher, wenn auch bei n-Heptan viel geringer als bei den Kraftstoffen BO und Bt. Im allgemeinen wurde bei den untersuchten Kraftstoffen etwa der in Abbildung 2 dargestellte Verlauf des Zündverzugs bei verschiedenen Drücken gefunden. Ich möchte zum Vergleich die von Lindner in Zusammenarbeit mit uns bei der MAN mit Benzin (BO) durchgeführten Versuche erwähnen. Für den

Motor interessiert hauptsächlich der Temperaturbereich, in dem der Zündverzug in der Größenordnung von etwa 1/1000 sec bis etwa 3/1000 liegt, weil der Klopfvorgang im Motor in ähnlichen Temperaturbereichen vor sich geht. Die Jostschen Versuche wurden in einem Bereich durchgeführt, der Zündverzugswerten von etwa 3/1000 bis etwa 1/100 sec entspricht. Um einen direkten Vergleich mit diesen Versuchen möglich zu machen, wurden in der DVL Versuche mit *n*-Heptan auch in diesem Bereiche durchgeführt. Die Ergebnisse wird Herr Scheuermeyer in einer Abbildung zeigen.

Wir kamen also sowohl auf Grund unserer motorischen Auswertungen als auch auf Grund unserer Versuche mit der Apparatur zur adiabatischen Verdichtung zu dem Schluß, daß in verschiedenen Temperaturbereichen die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Reaktionsvorgänge bei der Selbstzündung von Kraftstoffen im allgemeinen nicht dieselbe ist. Jedoch wird es mit einer einigermaßen brauchbaren Annäherung wenigstens für praktische Zwecke möglich sein, in dem motorisch interessierenden Bereich zur Kennzeichnung der Kraftstoffe mit einer einzigen Beziehung für die Charakterisierung des Kraftstoffes auszukommen:

Es erscheint uns jedoch nicht möglich, auf Grund von Messungen mit Heptan allein zu allgemeinen Schlüssen bezüglich des Klopfverhaltens im Motor zu kommen, insbesondere wenn diese Messungen in einem Temperaturbereich durchgeführt wurden, der nicht den Verhältnissen im Motor entspricht.

Jost: Nach unserer Ansicht ist es unzulässig, aus Versuchen mit Einspritzung auf die Zündreaktion ohne weiteres Schlüsse zu ziehen, wofür auf meinen Augsburger Vortrag von 1938 und spätere Veröffentlichungen verwiesen werden kann¹⁾.

E. Schmidt: Ich glaube, daß man Versuche mit Einspritzen flüssigen Kraftstoffes doch wesentlich unterscheiden muß von Versuchen mit adiabatischer Verdichtung eines Gemisches. Denn die Verhältnisse sind in beiden Fällen so verschieden, daß man sie

¹⁾ In der Aussprache habe ich an dieser Stelle auch über die Urhebererschaft der auf diesem Gebiet verfaßten Arbeiten gesprochen. Ich bedauere diese auf irrthümlichen Voraussetzungen beruhenden Bemerkungen und habe sie deswegen in der Veröffentlichung fortgelassen.

In der Tat sind diese beiden Fälle, die man bei Zündversuchen
 wird immer wieder beobachten kann, die einzigen, die in der Theorie von Tem-
 peraturabhängigkeit und Druckabhängigkeit der Zündverzögerung zu erwarten sind.
 Anfangsstrack in einem Feuer von einem bestimmten Ausmaß, sind die Zündverzögerung
 demnach jetzt in seinem Bereich, er wird mit Messungen übereinstimmt hat. Diese Mes-
 sungen beziehen sich, wie schon Herr J. A. E. Sokolik angegeben hat, auf einen Be-
 reich, in dem die Zündverzögerung relativ groß sind. Hier kann man keine große Ab-
 hängigkeit vom Druck erwarten. Tatsächlich ist das schon von Sokolik in Tabelle I
 Versuchen geteilt worden, der über Temperaturbereiche unterschreibt, unter unter-
 sten mit langen Zündverzögerungen, bei denen praktisch nur eine Temperaturabhängigkeit
 vorhanden ist, einen mittleren -- etwa 400 bis 600 C. -- wo praktisch nur Druck-
 abhängigkeit vorhanden ist, und einen oberen -- etwa oberhalb 600 C. -- wo beide
 Abhängigkeiten bestehen. Der mittlere Bereich ist nicht überall im gleichen Maße
 vorhanden und gleich ausgeprägt. Es ist auch bemerkenswert, daß z. B. Stern, Kravetz
 und Sokolik fanden, daß ihre Messungen der H₂Oxydation mit Luft zwischen etwa
 ein Drittel Atmosphären und 15 Atmosphären und Temperaturen von etwa 400 und
 700 C. abgesehen von den allerkleinsten Drucken, sich nur durch eine Druckabhängig-
 keit lassen. Ein weiterer Parameter ist hier die Gemischzusammensetzung,
 also der Wasserstoffgehalt. Wenn die bei einem Wasserstoffgehalt gemessenen Zünd-
 verzögerungen gegen den Druck aufgetragen werden, ergibt sich eine einzige Kurve, unabhän-
 gig von der verwendeten Temperatur, bei anderer Zusammensetzung eine andere
 Kurve. Und das zeigt zugleich die große Bedeutung der Gemischzusammensetzung, die
 sich auch aus anderen Versuchen russischer und englischer Autoren ergibt. Ich nenne
 nur Townend und McCormac, die eine große Abhängigkeit des Zündverzögerung von der
 Zusammensetzung gefunden haben, z. B. einen sehr starken Einfluß von sehr kleinen
 H₂-Beimengungen zu CO-Luftgemischen, die die Zündtemperatur um etwa 150° er-
 niedrigen und ähnliches mehr.

Es kommt ganz auf den Bereich an, in dem man arbeitet, ob man eine vorwiegende
 Druckabhängigkeit, eine vorwiegende Temperaturabhängigkeit oder beide Abhängig-
 keiten nebeneinander findet.

Wenn nun auf der einen Seite sehr zahlreiche Versuche und theoretische Über-
 legungen vorliegen, auf der anderen Seite einige wenige Versuche, bei denen, wie

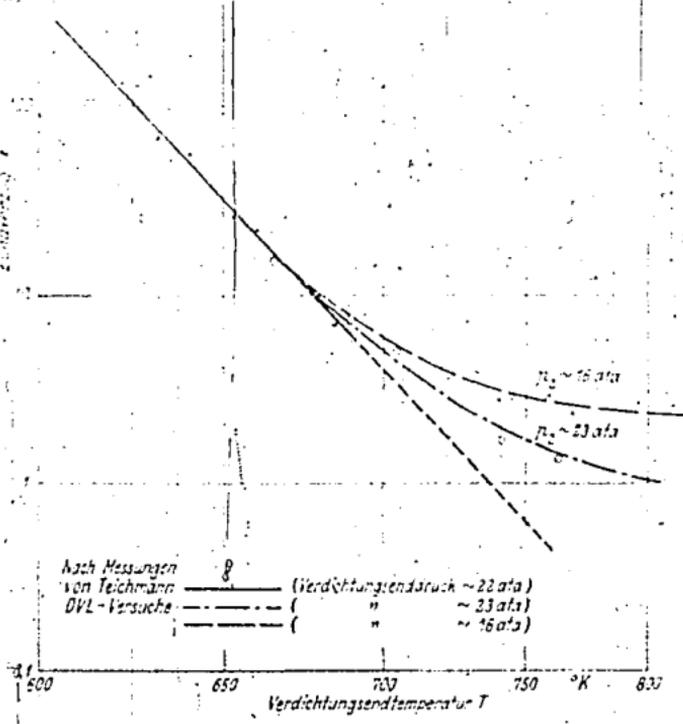


Abb. 3.

Zündverzugszeit von *n*-Heptan-Luft-Gemischen, abhängig von der Verdichtungsendtemperatur für verschiedene Verdichtungsdrücke (vorläufige Versuchswerte, gemessen in einer Apparatur zur annähernd adiabatischen Verdichtung).

Betracht kommende Gebiet höherer Temperaturen unzulässig ist. Die Abbildung zeigt weiterhin die Druckabhängigkeit des Zündverzuges, die mit geringeren Endtemperaturen abnimmt. Die Druckabhängigkeit des Zündverzuges verschiedener Kraftstoffe in dem für den Motor in Betracht kommenden Druck- und Temperaturbereich wird in dem Vortrag von Herrn F. A. F. Schmidt behandelt.

Die Versuche mit *n*-Heptan sind zwar noch nicht abgeschlossen, die bisherigen Ergebnisse liegen jedoch eindeutig in der Richtung, die durch zahlreiche Versuche an anderen Kraftstoffen gefunden wurde.

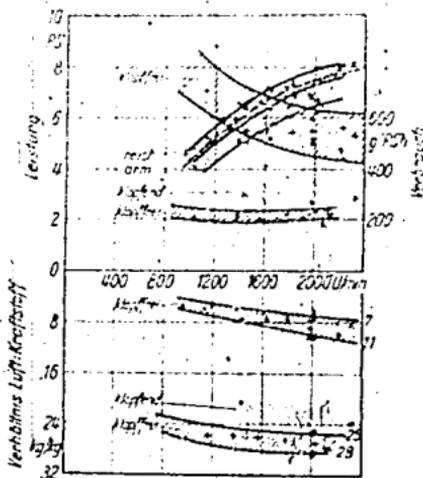
Bei den Versuchen über die Druckabhängigkeit des Zündverzuges wurde unter sonst gleichen Bedingungen der Anfangsdruck in weitem Bereich (etwa 1:5) verändert.

Kennung: Die Verwirklichung des Selbstzündungsbetriebs im gemischverdichtenden Motor ergibt den Vorteil eines wesentlich vereinfachten Motorbaus und ist somit die Voraussetzung für die Ausnutzung großer Zylinderzahlen bei hoher Schnelllastigkeit usw.

Im folgenden soll kurz über Untersuchungen des Fliegenschweizer-Instituts Stuttgart berichtet werden, die im Auftrag des Reichsamts für Wirtschaftsaufsicht durchgeführt wurden. Die Arbeiten erstrecken sich ausschließlich auf Versuche am Motor.

Die reine Selbstzündung bei Gemischverdichtung ist in jedem Fall zu erreichen, und zwar durch entsprechende Erhöhung der Zündwilligkeit des Kraftstoffes. Durch die Verdichtung im Motor wird die gesamte Ladung gleichmäßig erwärmt und brennt bei der Entzündung praktisch gleichzeitig ab. Deshalb treten hierbei heftige Klopferscheinungen auf. Abbildung 1 zeigt die Auswirkungen eines solchen klopfenden

Abb. 1



Leistung, Verbrauch, Mischungsverhältnis und Klopf-Verhalten bei Selbstzündung $r = 10$ 700 cm³ Hubraum

Selbstzündungsbetriebs auf den Kolben eines 200-cm³-Motors. Da die Auswirkungen dieses heftigen Klopfens, etwa durch entsprechende Behandlung von Kolben und Brennraumwänden, nicht vermieden werden können, so ist die Verwirklichung der Selbstzündung im gemischverdichtenden Motor nur dann möglich, wenn es gelingt, bei Erhaltung der Zündwilligkeit des Kraftstoffes das Klopfen selbst zu vermeiden.

Von den bekannten Mitteln zur Verringerung des Klopfens bringt die Beimischung von Gegenklopfmitteln zum Kraftstoff in einem Ausmaß, daß das Klopfen wirksam gehemmt wird, keinen Erfolg, da damit die Zündwilligkeit unter die zulässige Grenze herabgesetzt wird.

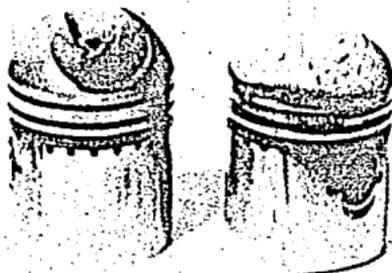
Versuche, durch Zerklüftung des Brennraumes eine ausreichende Steuerung des Verbrennungsablaufs zu erreichen und dadurch das Klopfen zu beseitigen oder zu verringern, scheiterten ebenfalls.

In der Veränderung des Kraftstoff-Luft-Gemisches besteht aber eine weitere Möglichkeit der Beeinflussung des Verbrennungsablaufs. Verändert man an einem Selbstzündungsmotor das Verhältnis von Kraftstoff zu Luft des angesaugten Gemisches, so stellt man zunächst fest, daß der Motor in einem wesentlich größeren Bereich des

Mischungsverhältnisses betriebsfähig ist als der gebräuchliche Zündermotor. Über den größten Teil des Bereiches zeigen sich die erwähnten heftigen Klopferscheinungen. Die Grenzen werden jedoch von einem verhältnismäßig schmalen Bereich nichtklopfender Selbstzündung gebildet, sowohl auf der kraftstoffreichen wie -armen Seite.

Auf Abbildung 4 sind diese Verhältnisse für einen wassergekühlten Einzylindermotor von 700 cm³ Hubraum dargestellt (Verdichtung 10, Oktanzahl ~ 5). Z. B. bei 2000 U/min ist bei sehr reicher Mischung unterhalb eines Verhältnisses Luft:Kraftstoff von 7 kol

Abb. 5



Kollenauffressungen
bei klopfender
Selbstzündung

Betrieb möglich, zwischen den Mischungsverhältnissen 7 bis 11 stellt sich klopfreier Betrieb ein. Bei Mischungsverhältnissen von 11 bis 25 ist der Selbstzündungsbetrieb stark klopfend. Mit weiterer Abmagerung des Gemisches, also über die bei Ottomotoren üblichen Mischungsverhältnisse hinaus, tritt zwischen Mischungsverhältnissen von 25 bis 28 wieder klopfreier Betrieb ein. Über 28 war kein Betrieb mehr möglich.

Im klopfreien armen Mischungsgebiet wurden für diesen Einzylindermotor Hubraumleistungen von 10 bis 12 PS/l erreicht. Die gemessenen Verbrauchszahlen sind über einen größeren Drehzahlbereich fast gleichbleibend und liegen bei rund 200 g/PS_h. Die Leistungen für reichen klopfreien Betrieb liegen etwas höher bei Verbrauchszahlen von 400 bis 800 g/PS_h. Im Klopfbetrieb entsprachen die gemessenen Leistungswerte etwa denen des reichen klopfreien Selbstzündungsbetriebs.

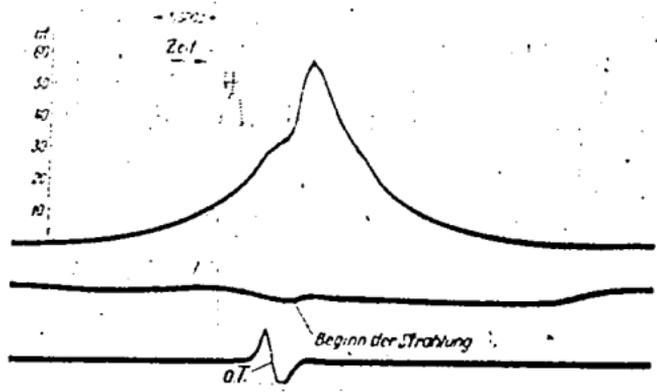
Die Aufnahme des Verbrennungsablaufs bei klopfreiem armen Betrieb (Abbildung 6) ergibt den Druckanstieg bei ~ 9° KW n. o. T. mit weichem Übergang und einer Zunahme von rund 2,5 atü/°KW. Der Höchstdruck von 50 bis 55 atü liegt bei ~ 17° KW n. o. T. ($\epsilon = 10$, Vollast).

Für einen wirtschaftlichen Selbstzündungsbetrieb kommt hauptsächlich der Betrieb im klopfreien armen Mischungsgebiet in Betracht. Eine praktische Anwendung des klopfreien Selbstzündungsmotors läßt eine Verbreiterung des schmalen klopfreien Bereichs erwünscht erscheinen, was in geringem Maße bis jetzt durch Zuschalten von Beikammern erreicht werden konnte.

Da eine so starke Verbreiterung des klopfreien Bereiches, daß der heutige Vergaser verwendbar wird, nicht erwartet werden kann, besteht eine der wichtigsten weiteren Aufgaben in der Entwicklung eines geeigneten Regelgeräts, das die jeweils erforderliche Gemischzusammensetzung liefert.

Abb. 4.

Druckverlauf und
Strahlung bei
Klopfreaktion
Selbstzündung
 $t = 10$; $n = 2$
2000 U. min; Vollast;
700 cm³ Motor



Jost: Zu den Versuchen von Herrn Scheuermeyer kann ich nichts sagen, denn erstens hat er über seine Methode, z. B. über die Bestimmung der Selbstzündung, keine Einzelheiten angegeben und zweitens beziehen sie sich nicht auf ein Gebiet, in dem wir gearbeitet haben.

Dann noch zu den Bemerkungen von Herrn Zeise. Zu den Versuchen von Serruys kann man auch ohne Experimente sagen, daß es sich hier nicht um katalytische Effekte handelt. Serruys hat vorsichtshalber einen Zylinderkopf auf der Innenseite mit verschiedenen Metallüberzügen versehen, ohne daß dies merkliche Unterschiede gegeben hätte. Bei den Versuchen mit H₂O ist bekannt, daß die Kinetik der CO-Reaktion durch kleine Mengen H₂ oder H₂-haltiger Gemische stark beeinflußt wird. Das fiel also völlig aus dem Rahmen dieser Dinge heraus und hat gar nichts damit zu tun. Die Versuche zur Kinetik der Wasserstoffoxydation sind nur bei niederen Drucken gemacht worden. Dann spielt die Wand eine Rolle, und man findet eine ganz andere Temperaturabhängigkeit, weil aktive Teilchen aus dem Gas an die Wand diffundieren und umgekehrt. Das kann man gar nicht mit Motorbedingungen vergleichen. Bei den Versuchen von Townend wurden Gase in vorgeheizte Behälter hineingelassen bei Induktionszeiten von Sekunden bis zu Stunden. Soweit mir bekannt, sind auch die Messungen von Sokolik so gemacht. Es ist weiter bekannt, daß eine Änderung des Gefäßmaterials auch die Beobachtungen ändert. Wie wir vor 7 oder 8 Jahren anfangen, uns mit der Kinetik der Klopfreaktion zu befassen, haben wir natürlich auch versucht, so zu messen, wie es im Laboratorium am bequemsten ist, nämlich bei gewöhnlichem Druck durch Einlassen in ein Gefäß oder in einer Strömungsanordnung. Wir fanden, daß man so nicht an die motorischen Bedingungen herankommt. Deshalb sind wir zur adiabatischen Verdichtung übergegangen. Dabei ergaben sich ganz andere experimentelle Befunde als alles, was in der Literatur zugänglich war. Zum Schluß haben wir gefunden, daß eigentlich Tizard und Pye das schon vorher gewußt hatten, so daß ein großer Teil der Klopforschung in der Zwischenzeit überflüssig gewesen wäre.