

Verbrennungsfragen

Bericht des Obmannes der Arbeitsgruppe für Verbrennungsfragen

Die Arbeitsgruppe für Verbrennungsfragen gab auf der Arbeitstagung am 3. Dezember 1942 in Vorträgen und Aussprachen einen Überblick über die in ihrem Bereich laufenden Arbeiten und die dabei erzielte Ergebnisse.

Im Vordergrund standen diesmal die praktisch besonders wichtige Fragen der Beurteilung von Kraftstoffen und ihres Verhaltens im Motor. Nur bei einigen Kraftstoffen, wie z. B. den Alkoholen und bei Benzol, ist es möglich, sie durch Angabe der chemischen Formeln ihrer wenigen Bestandteile und deren Mischungsverhältnis zu kennzeichnen. Von solchen Einzelfällen abgesehen sind sowohl die natürlichen wie die synthetischen Kraftstoffe Gemische aus außerordentlich vielen Verbindungen, deren Mischungsverhältnis sich bei den unvermeidlichen kleinen Schwankungen der Herstellungsbedingungen und der Raffinationsverfahren dauernd ändert, so daß kaum 2 Kraftstoffe, die nicht aus demselben Behälter stammen, tatsächlich als gleich im chemisch-physikalischen Sinne angesehen werden können. Wegen der Unmöglichkeit der chemischen Charakterisierung ist man entweder auf Untersuchungsmethoden angewiesen, die gewisse physikalisch definierte von der Art der Versuchseinrichtung unabhängige Größen messen, oder auf Verfahren, die das komplexe von einer ganzen Reihe von Einzeleinflüssen bedingte Verhalten des Kraftstoffs im Motor an einer den praktischen Versuchsbedingungen möglichst angepaßten Versuchseinrichtung zu erfassen versuchen. Eine Übersicht über die grundsätzlichen Möglichkeiten der Kennzeichnung der praktisch wichtigsten Kraftstoffeigenschaft, nämlich des Klopfverhaltens, gab Herr von Philippovich. Nach den bisher vorliegenden Untersuchungen erscheint die Selbstzündung eines Gemisches durch adäquate Verdichtung als die zur Kennzeichnung des Klopfverhaltens geeignete physikalisch definierbare Stoffeigenschaft, wenn bei ihrer Bestimmung die im Motor vorhandenen Bedingungen (Druck, Temperatur, Versuchsdauer, Größe des Reaktionsraums) eingehalten werden. Weitere Untersuchungen an verschiedenen Meßeinrichtungen sind dabei sehr

wünscht um sicherzustellen, daß das Selbstzündungsverhalten unabhängig von den Besonderheiten des Meßgeräts ist. Zur vollständigen Beurteilung des Klopfverhaltens braucht man dann noch eine Charakterisierung des Motors, die der schwierigere Teil ist, denn sie muß die zahlreichen Einflüsse der Konstruktion und der Betriebsweise umfassen.

Über in Rechlin durchgeführte Versuche an einer Einrichtung zur adiabaten Verdichtung und ihren Vergleich mit Motorversuchen berichtet Teichmann. Dabei wurde das Kraftstoff-Luft-Gemisch durch einen mit Preßluft angetriebenen Kolben verdichtet und die Selbstzündung durch das Eigenlicht der Verbrennung in Abhängigkeit von der Kolbenstellung und damit vom Verdichtungsverhältnis ermittelt. Im Gegensatz zu älteren Messungen wurde der Druck- und Temperaturbereich und auch die Geschwindigkeit des Druckanstiegs ebenso gewählt, wie sie bei der Verbrennung im Motor im unverbrannten Gemisch auftreten, wenn dieses durch die vorher verbrannten Gemischteile verdichtet wird. Trägt man in einem Temperaturdruckdiagramm mit eingezeichneten durch Rechnung ermittelten Adiabaten des Kraftstoff-Luft-Gemisches einerseits die Zustände des Gemisches ein, bei denen in der Versuchsanlage die Selbstzündung erfolgt, andererseits die Zustände des unverbrannten Gemischrestes im Motor bei Beginn des Klopfens, so findet man eine in Anbetracht der Ungenauigkeit solcher Motorversuche recht befriedigende Übereinstimmung. Damit ist gezeigt, daß die Selbstzündung bei adiabater Kompression, wenn dabei die gleichen Zustände und dieselbe Geschwindigkeit des Druckanstiegs eingehalten werden wie im Motor, das Klopfverhalten des Kraftstoffs kennzeichnet. Dabei ist es grundsätzlich gleichgültig, ob die Prüfung des Kraftstoffs im Motor oder in der Versuchsanlage mit adiabater Verdichtung erfolgt. Andererseits erscheint es auch möglich, die Klopfneigung des Motors zu kennzeichnen durch Messung seines zeitlichen Druckverlaufs, der stets zusammen mit den Anfangsbedingungen des angesaugten Gemischs dessen Zustandsverlauf bestimmt. Erreicht ein unverbrannter Gemischrest bei der Verdichtung das Gebiet der Selbstzündung und bleibt darin genügend lange, bevor er von der normal fortschreitenden Flammenfront erfaßt wird, so klopft der Motor.

Mit einer ebenfalls mit Preßluft betriebenen Apparatur zur adiabaten Verdichtung mit Kolbengeschwindigkeiten bis etwa 50 m/s wurde in Berlin bei der DVL gearbeitet, worüber Herr F. A. F. Schmidt und M. Schettermeyer berichteten. Die damit gewonnenen Versuchsergeb-

nisse bestätigen die Notwendigkeit, in den tatsächlichen Zustandsbereichen des unverbrannten Gemischs im wirklichen Motor, also bei Temperaturen zwischen 700 und 1000° C und bei Drucken zwischen 50 und 100 at zu arbeiten. Frühere Messungen bei Temperaturen im Bereich von 300 bis 400° C, wo die Temperaturabhängigkeit groß und die Druckabhängigkeit klein ist, verleiteten daher zu dem unzutreffenden Schluß, die Reaktionsvorgänge beim Klopfen im Motor seien praktisch nur von der Temperatur abhängig und vom Druck nur so weit, als dieser auch die Temperatur steigere. Die Klärung des Druckeinflusses ist aber von besonderer praktischer Wichtigkeit, weil davon die zulässige Leistungssteigerung durch Aufladen abhängt.

Über einige Wünsche der Kraftstoffhersteller an den Flugmotor sprach K. Dehn gleichsam als Gegenstück zu den früher einmal von Herrn Neugebauer in einem Akademievortrag behandelten Wünschen des Motorenbauers an den Treibstoff. Die Steigerung der Literleistung des Flugmotors auf etwa das Doppelte in den letzten 10 Jahren ist zu einem wesentlichen Teil der Verbesserung der Klopfestigkeit der Kraftstoffe zu danken. Der Kraftstoffentwicklung sind aber gewisse Grenzen durch die Beschaffungsgrundlagen gesetzt. Das Ausland stützt sich auf seine umfangreiche Ölförderung, aus der es durch Raffinieren, Kracken und Polymerisieren hochklopfeste Isoparaffine, insbesondere Isooktan gewinnt.

In Deutschland gelang es, in den vorhandenen Hochdruckhydrieranlagen Hochleistungskraftstoffe auf der Basis der sehr klopfesten Aromaten herzustellen. Daneben wird auch Isoparaffin aus den beim Hydrieren anfallenden Gasen gewonnen. Auf dieser Grundlage, die sich in den nächsten Jahren kaum ändern wird, kommen wir zwangsläufig zu einem Kraftstoff von etwa 40 Vol. % Aromaten, 20 Vol. % Isoparaffinen und 40 Vol. % eines Restbenzins der Oktanzahl 65 bis 75, dem noch Bleitetraäthyl zur Steigerung der Klopfestigkeit zugesetzt wird. Erfreulicherweise liegt der durch das Klopfen begrenzte zulässige Nutzdruck unserer aromatischen Hochleistungskraftstoffe nicht unerheblich über den entsprechenden Kraftstoffen unserer Gegner auf Isoparaffingrundlage. Allerdings sinkt die Leistungsgrenze bei den aromatischen Kraftstoffen mit zunehmender Ladelufttemperatur stärker ab als bei den Paraffinen. Daraus folgt die Notwendigkeit der Verwendung von Ladeluftkühlern für die immer mehr steigenden Aufladedrücke. Das Klopfverhalten ist aber nicht nur eine Frage des Kraftstoffs, sondern auch der Konstruktion des Motors. Günstig erscheint hier der englische Schiebermotor, der wegen

des Fehlens der Ventile größere Freiheit in der Gestaltung des Verbrennungsraums besitzt, wobei besonders wichtig der Fortfall des heißen Auslaßventils ist. Von großer Bedeutung ist eine ausreichende Kühlung des Zylinderkopfes, der Kerzen und des Kolbens. Eine einzige heiße Stelle kann den zulässigen Nutzdruck und damit die Leistung des Motors wesentlich herabsetzen. Vom Standpunkt des Klopfens sind kleine Zylinder und hohe Drehzahlen günstig. Wichtig ist auch die richtige Einstellung des Zündzeitpunkts für alle Zylinder eines Motors. Zündet nur ein Zylinder einige Kurbelwinkelgrade zu früh, so beginnt der Motor schon bei merklich kleinerer Leistung zu klopfen. Auch durch aufgeteilte Einspritzung, wie sie von der DVL vorgeschlagen wurde, läßt sich das Klopfverhalten verbessern. Weitere wichtige Fragen, die sowohl von den Eigenschaften des Kraftstoffs wie von der Motorkonstruktion abhängen, sind das Ringstecken und die Korrosion der Ventile. Dem Ringstecken wird begegnet durch Reinheit der Kraftstoffe und durch gute Wärmeabfuhr. Die Ventile werden vom Bleigehalt der Kraftstoffe angegriffen, wobei oberhalb 670°C der Angriff sprunghaft zunimmt. Auch hier ist also die gute Kühlung von entscheidender Bedeutung. In verschiedener Richtung müssen daher Motorenbauer und Kraftstoffhersteller sich ergänzen, wenn Deutschland auch in Zukunft in der Weiterentwicklung des Flugmotors seinen Gegnern überlegen bleiben soll.

In Braunschweig unter Mitarbeit von H. Steinicke und U. Neubert gemachte Aufnahmen der Verbrennung von Gas-Luft-Gemischen in einer Fensterbombe im Eigenlicht der Verbrennung und bei Schlierenbeleuchtung zeigte Herr E. Schmidt. Die Fensterbombe war etwa 1 m lang bei $2,4 \times 2,4\text{ cm}^2$ Querschnitt und wurde an einem Ende gezündet. Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Flamme wurde bei Eigenlicht aus der Neigung ihrer Spur auf einem quer zur Längsachse der Bombe bewegten Film bestimmt. Bei Schlierenbeleuchtung im durchfallenden Licht wurden durch Funkenfolgen Reihenbilder des Vorgangs gewonnen, aus denen man die Geschwindigkeit der Flammenfront ermitteln und viele Einzelheiten des Vorgangs ablesen kann. Die Bildfrequenz wurde bis auf $25\,000$ Bilder in der Sekunde gesteigert, wobei Bildfolgen bis zu 100 Bildern gelangen. Je nachdem die Zündung bei der einseitig offenen Bombe am offenen oder am geschlossenen Ende erfolgt, zeigen sich charakteristische Verschiedenheiten der Bilder, die sich wieder von denen der beiderseits geschlossenen Bombe unterscheiden. Man erkennt den großen Einfluß der Gasverschiebung und der dadurch bei höheren Reynoldseschen Zahlen

hervorgerufenen Turbulenz auf die sichtbare Flammengeschwindigkeit. An mit Sauerstoff unereicherten Gemischen wurden bei hohen Bildfrequenzen sehr große Flammengeschwindigkeiten gemessen, die sich in einigen Fällen bis zur Detonation steigerten. Dabei war im Schlierenbild sehr schön die bei schneller werdender Flamme sich vor ihr ausbildende Druckwelle erkennbar. Wenn die durch wachsende Turbulenz beschleunigte Flamme die Druckwelle einholte, trat gewöhnlich Detonation ein, erkennbar an der mit konstanter hoher Geschwindigkeit laufenden Detonationsfront und einer entsprechenden zurücklaufenden Retonationswelle. Sowohl die Detonations- wie die Retonationswelle zeigten starkes, die Schlierenbeleuchtung überstrahlendes Eigenlicht.

In Fortführung der auf der vorjährigen Tagung der Arbeitsgruppe behandelten reaktionskinetischen Arbeiten berichtete L. v. Müffling über gemeinsam mit R. Maeb ausgeführte Versuche über die langsame Oxydation einiger Olefine und Ketone und den Einfluß von Blei auf die Kohlenwasserstoffoxydation. Dabei wurde das Gemisch für eine bestimmte Zeit von der Größenordnung einer oder weniger Minuten in einem elektrischen Ofen der Wirkung der gewünschten Versuchstemperatur ausgesetzt und dann die Reaktion durch plötzliches Entspannen in einen evakuierten Behälter abgebrochen. Aus dem gemessenen Sauerstoffverbrauch wurde auf den Umsatz geschlossen. Untersucht wurden zwei isomere Heptene, ein Äthylpenten und Diisobutylen, also lauter Kohlenwasserstoffe mit einer Doppelbindung. Im ganzen ergaben sich ähnliche Gesetzmäßigkeiten wie bei den Paraffinen. Insbesondere wurde auch der bei gewissen Reaktionsdauern beobachtete negative Temperaturkoeffizient wieder beobachtet, d. h. z. B. für Hepten ist bei 1 Minute Reaktionsdauer der Umsatz bei 400°C Versuchstemperatur geringer als bei 350°C . Bei dem sehr klopfesten Diäthylketon wurde ein solcher negativer Temperaturkoeffizient nicht gefunden, sondern es konnte durch vergleichende Messungen der Druckverlauf von Brennstoff-Luft-Gemischen mit Brennstoff-Stickstoff-Gemischen eine volle Parallelität zwischen thermischem Zerfall und Oxydation nachgewiesen werden. Bei genügender Reaktionsdauer — bei höheren Temperaturen sehr schnell — geht hier die Oxydation in Entzündung über. Weitere Messungen betrafen den Zusatz von Bleidampf und Bleitetraäthyl, wodurch die zur Entzündung führenden Oxydationen stärker verlangsamt werden als die bei einem Teilumsatz abenbleibenden.

Die Berechnung von Dissoziationsgleichgewichten ist eine immer wiederkehrende Aufgabe bei allen Untersuchungen über Verbrennungen, die bei genauer Berücksichtigung aller Gleichgewichte viel Rechenarbeit beansprucht. Die allgemeine Lösung führt auf Gleichungen hohen Grades, die sich doch nur durch Probieren lösen lassen, wobei eine Diskussion nötig ist, um aus der Mehrzahl der mathematischen Lösungen die eine physikalisch richtige herauszufinden. Man kann daher ebensogut mit dem Probieren schon bei den einfachen Gleichgewichtsbedingungen anfangen und erkennt dann sofort am Auftreten negativer Partialdrücke, wann man das Gebiet physikalisch möglicher Zustände verläßt.

Zur Erleichterung solcher Rechnungen hat G. Damköhler zusammen mit R. Edse ein Verfahren ausgearbeitet, das von den zwei probeweise angenommenen Partialdrücken des Wasserstoffs und des Sauerstoffs ausgeht und dazu alle anderen Partialdrücke an Hand einer Art von Rechenfahrplan bestimmt, wobei nur einfachste Rechenoperationen (Addition, Multiplikation, Division, Quadratwurzelziehen) vorkommen. Die angenommenen beiden Partialdrücke werden so lange variiert, bis der vorgegebene Gesamtdruck und das vorgegebene Verhältnis der Anzahl der Sauerstoffatome zur Anzahl der Kohlenstoffatome herauskommen, wozu wenige Durchrechnungen genügen. Das Verfahren läßt sich bei seiner Einfachheit von angelegerten Hilfskräften mit geringen mathematischen Kenntnissen durchführen.

Leider ist das Ergebnis aller solcher Dissoziationsrechnungen im Bereich hoher Temperaturen, wo bereits freie OH -Radikale auftreten, dadurch unsicher, daß das OH -Gleichgewicht um eine Größenordnung ungenauer bekannt ist als alle anderen notwendigen Gleichgewichte. Es ist daher im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig, eine Neubestimmung dieses Gleichgewichts in Angriff genommen.

Ernst Schmidt