

Q. 28

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 511

Motor und Kraftstoffe

(Vortrag, gehalten auf der Treibstofftagung in Ludwigshafen/Rh. am 18. Juli 1942)

Übersicht: Ausgehend von einer Betrachtung über den Zusammenhang des Aufbaues von Kohlenwasserstoffen mit dem Energiegehalt und anderen für die technische Anwendung wichtiger physikalischer Daten werden die motorischen Arbeitsverfahren beschrieben. Bei den Kraftstoffen für Otto-Motoren wird neben Fragen des Dampfdruckes und der Siedekurve vor allem die Klopferscheinung und ihre Bekämpfung besprochen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Bewertung von Flugmotorenkraftstoffen zweckmässig in den entsprechenden grossen Zylindern erfolgt, da von der Oktanzahl her nicht auf die Leistungen geschlossen werden kann, die durch Überladung bis zur Klopfgrenze aus den Kraftstoffen gewonnen werden kann.

Bei den Dieselkraftstoffen wird vor allem die Zündwilligkeit behandelt, die jedoch in ihrer Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der Motoren nicht der Klopfestigkeit bei Otto-Kraftstoffen entspricht. Zu hohe Zündwilligkeit führt sogar zu geringerer Leistung. Ausreichende Zündwilligkeit ist jedoch wegen des Anlassens erwünscht.

Abgeschlossen am: 15. Juli 1942 Gr.

Bearbeiter: Cbering. F. Penzig

Die vorliegende Ausfertigung 6 enthält

22 Textblätter

5 Bildblätter

Verteiler					
Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1)	24.10.42	Dr. Penzig			
2)		Dr. Penzig			
3)		Dr. Penzig			
4)		Dr. Penzig			
5)		Dr. Penzig			
6)		Dr. Penzig			
7)		Dr. Penzig			
8)	28.10.42	Dr. Penzig			
9)		Dr. Penzig			
10)		Dr. Penzig			
11)		Dr. Penzig			

10455

Motor und Kraftstoff

(Vortrag, gehalten auf der Treibstofftagung in Ludwigshafen/Rh.
am 18. Juli 1942.)

Will man die wechselseitigen Beziehungen von Motor und Kraftstoff betrachten, so muß man sich zunächst die Frage vorlegen, warum wir gerade die Stoffe als Kraftstoffe verwenden, die heute zum Betrieb von Flug- und Fahrzeugmotoren üblich sind. Man könnte annehmen, daß dies nur durch den Zufall begründet sei, durch den in der Erdrinde im wesentlichen aus Kohlenwasserstoffen bestehende organische Substanzen aufbewahrt wurden, aus denen ohne große Mühe Betriebsstoffe gewonnen werden können. Es gibt aber zu denken, daß man auch bei der Herstellung von Kraftstoffen aus Kohle sich nur wenig von dem natürlichen Vorbild entfernt. Die Kohlenwasserstoffe müssen also eine besondere Eignung besitzen und die folgende Zusammenstellung zeigt auch, daß tatsächlich sehr enge Beziehungen zwischen den Eigenschaften der Kohlenwasserstoffe und den Anforderungen der Verbrennungsmotoren in unserer Verkehrstechnik bestehen.

1. Kohlenstoff und Wasserstoff haben, auf die Gewichtseinheit bezogen, hohe Verbrennungswärmen, die für den Wasserstoff die höchste, überhaupt mögliche ist, während die des Kohlenstoffs nur durch die Verbrennungswärmen der seltenen Stoffe Beryllium, Bor und Lithium übertroffen wird.
2. Kohlenstoff und Wasserstoff verbinden sich in so vielgestaltiger Weise, daß je nach den Anforderungen Stoffe vom Gas bis zur zähen Flüssigkeit hergestellt werden können.
3. Kohlenwasserstoffe liefern beim Verbrennen gas- und dampfförmige Stoffe, die die im Motorenbau üblichen Werkstoffe nicht an greifen.
4. Kohlenwasserstoffe besitzen auch als Schmierstoffe hervorragende Eigenschaften.

Es treffen hier also Eigenschaften, die für die motorische Verwendung wertvoll sind, mit einer bemerkenswerten Fülle zusammen. Von ihnen hängt die jetzige Gestalt unserer Verbrennungsmotoren weitgehend ab.

Von der aus einer gegebenen Kraftstoffmenge freiwerdenden Energie hängt die Reichweite von Fahrzeugen und Flugzeugen ab. Die Heizwerte der Kohlenwasserstoffe und auch der Alkohole sind in Bild 1, bezogen auf die Gewichtseinheit, dargestellt. Im allgemeinen nimmt der Heizwert mit dem Wasserstoffgehalt zu. Die Grenzen des Heizwertes flüssiger Kraftstoffe liegen etwa bei 10500 kcal/kg. Höhere Heizwerte werden nur von Gasen erreicht, die unter Druck gespeichert werden müssen, wie z.B. Propan, Butan oder auch Methan. Bezieht man den Heizwert nicht auf die Gewichts-, sondern auf die Raumeinheit, so sind die wasserstoffärmeren Aromaten gegenüber den Paraffinen im Vorteil. Man wird deshalb bei Auswahl des Kraftstoffes zu berücksichtigen haben, ob das mitzuführende Gewicht von Bedeutung ist, oder ob die Aufgabe besteht, mit dem Inhalt eines gegebenen Behälters eine möglichst große Strecke zurückzulegen.

Eine Berechnung des Heizwertes lediglich aufgrund des Gehaltes an Kohlenstoff und Wasserstoff, wie sie gelegentlich vorgeschlagen wird, ist nicht möglich. Wie das Bild zeigt, hat die Art des Aufbaues, für die die mehrfachen Bindungen der Olefine und Acetylene kennzeichnende Beispiele sind, einen erheblichen Einfluß auf den Heizwert. Je nach Zusammensetzung ergibt sich also für die Benzine ein Streuband, dessen Breite eine genauere Bestimmung ausschließt. Soll also nicht mit den Schätzwerten für 10400 kcal/kg für paraffinische und 10000 für stark aromatische Benzine gerechnet werden, so ist eine experimentelle Bestimmung des Heizwertes unerlässlich.

Der Heizwert der flüssigen Kraftstoffe hat nur eine Bedeutung für die Reichweite, jedoch keinen Einfluß auf die mit einer bestimmten Maschine erzielbaren Leistungen. Es ergibt sich nämlich, daß der Energie-Inhalt eines Kraftstoff-Luftgemisches im stöchiometrischen Verhältnis bei allen üblichen flüssigen Kraftstoffen, die etwa von C_5 bis C_8 reichen, praktisch gleich ist (Bild 2). Bei den Gasen (Äthan, Methan) dagegen sinkt der Gemischheizwert merklich ab. Die Minderleistung von Fahrzeugen, die mit Generatorgas betrieben werden, ist allerdings hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß die Generatorgase stark mit Stickstoff und Kohlensäure verunreinigt sind. Kohlenoxyd hat einen sehr guten Gemisch Heizwert, der noch über dem des Cetans liegt. Der Gemischheizwert der Alkohole liegt zwar etwas tiefer als der der Benzine, doch

wird praktisch mit Alkoholgemischen sogar eine höhere Leistung erzielt, die jedoch physikalisch durch die hohe Verdampfungswärme des Alkohols begründet ist. Der Methylalkohol hat beispielsweise eine dreimal höhere Verdampfungswärme wie Benzin. Durch die Verdampfung entsteht also eine Abkühlung und damit eine Verdichtung des Gemisches.^{x)}

Für den Motorbetrieb hat der Wasserstoffgehalt des Kraftstoffes auch ansehnliche Bedeutung, als hiervon der Luftbedarf bei der Verbrennung abhängt. Bei vergleichenden Versuchen auf dem Prüfstand ist es erforderlich, diese Größe zu kennen. Es wird nun zuweilen vorgeschlagen, die hierzu erforderliche Elementar-Analyse dadurch überflüssig zu machen, daß man aus der Wichte Schlüsse auf den Wasserstoffgehalt zieht (Bild 3). An den Beispielen der reinen Stoffe ist deutlich zu erkennen, daß eine Abhängigkeit nur für Kohlenwasserstoffe bestimmter Gruppen besteht. Demzufolge kann bei den Benzinen nicht von der Wichte auf den Wasserstoffgehalt geschlossen werden. Für genauere Untersuchungen ist deshalb auch hier eine Analyse unerlässlich.

Die Umwandlung der Verbrennungswärme in mechanische Arbeit geht nun so vor sich, daß in dem allseitig geschlossenen Verbrennungsraum des Motors der Kraftstoff nach Mischung mit Luft entzündet wird, und die freiwerdende Wärme einen Temperaturanstieg und damit eine Druckerhöhung bewirkt.

Die Luft wird vor der Verbrennung mit dem Kraftstoff zweckmäßig verdichtet, da der Wirkungsgrad hierdurch erheblich beeinflusst wird. Man kann sich den Arbeitsvorgang im T-S-Diagramm vereinfacht so vorstellen (Bild 4 rechts), daß nach adiabatischer Verdichtung (1-2) die Wärmezufuhr erfolgt und zwar bei möglichst unveränderter Größe des Raumes (2-3). Anschließend folgt die adiabatische Dehnung (3-4). Der Wärmeverlust dieses Prozesses ist durch die Fläche A-1-4-B dargestellt. Das Diagramm läßt deutlich erkennen, daß durch höhere Verdichtung die Arbeitsfläche 1-2'-3'-4' in einem günstigeren Verhältnis zur entsprechenden Verlustfläche A-1-4'-B' steht. Es kann also aus einer gegebenen Kraftstoffmenge ein höherer Anteil als mechanische Arbeit gewonnen werden.

^{x)} Nähere Erläuterungen zum Gemischheizwert siehe Anhang.

Die Fläche 1-4-5 bzw. 1-4'-5' entspricht dem Verlust, der dadurch entsteht, daß in den Motoren die Dehnung nur unvollständig erfolgt und die Gase sich, ohne Arbeit zu leisten, in die Atmosphären entspannen. Durch Anordnung von Abgasturbinen kann auch dieses Druckgefälle noch nutzbar gemacht werden.

In der verdichteten Luft wird der Kraftstoff verbrannt. Wie dies geschieht, ob sich also schon während der Verdichtung ein zündfähiges Gemisch aus Luft und Kraftstoff im Zylinder befindet und entsprechend dem Otto-Verfahren mit einem elektrischen Funken gezündet wird, oder ob man nach Diesel nur reine Luft verdichtet und zwar so hoch, daß der im richtigen Zeitpunkt eingespritzte Kraftstoff sich selbst entzündet, ist hier zunächst gleichgültig. In jedem Falle bedeutet die Energiezufuhr eine Temperaturerhöhung und damit eine Drucksteigerung.

Eine weitere, wenn auch geringe Steigerung des Druckes wird dadurch hervorgerufen, daß durch die Verbrennung Gase mit größerem Volumen entstehen. Wie Bild 5 zeigt, ist diese Volumenvermehrung bei den üblichen Benzinen nur gering. Bei Alkoholen kann sie sehr bedeutend sein und zweifellos trägt sie auch zu der hohen Leistung bei, die beim Betrieb von Motoren mit Alkoholen und Alkoholmischungen beobachtet wird.

Wenn es auch für die Energieumsetzung grundsätzlich gleichgültig ist, nach welchem Arbeitsverfahren der Kraftstoff zur Verbrennung kommt, so stellt doch die technische Anwendung so verschiedenartige Anforderungen an ihre Eigenschaften, daß man die Kraftstoffe in solche für Otto- und solche für Dieselmotoren einteilen muß.

Der Kraftstoff für Otto-Motoren muß leicht mit Luft mischbar, also leicht verdampfbar, weiterhin aber thermisch so beständig sein, daß er seine Oxydation erst beginnt, wenn der Zündfunke das Kommando gibt. Der Dieselmotorkraftstoff hingegen soll thermisch wenig beständig sein, damit man die Luft, in der er sich entzünden soll, durch Verdichten nicht allzu hoch erhitzen muß. Bild 6 zeigt nämlich, daß durch Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses zwar beliebig hohe Temperaturen in der Ladung erzeugt werden können, daß hierdurch der Wirkungsgrad aber kaum gesteigert wird. Tatsächlich wachsen die technischen Schwierigkeiten mit höherer Verdichtung, sodaß bei Verdichtungen über das Verhältnis 1:12 kein Gewinn zu erzielen ist.

Otto-Kraftstoffe.

Die wesentlichste Eigenschaft der Otto-Kraftstoffe ist ihre thermische Beständigkeit, zunächst sollen aber erst kurz einige Eigenschaften besprochen werden, die ebenfalls erfüllt sein müssen.

Da beim Otto-Verfahren der Kraftstoff sich während des Ansaugens und Verdichtens, also schon vor der Verbrennung, in der Luft befindet, so muß er einen ausreichenden Dampfdruck haben. Möglichst großer Dampfdruck ist wünschenswert, um im Winter auch im kalten Motor eine gute Gemischbildung zu haben. Hoher Dampfdruck aber verursacht Dampfblasenbildung in Leitung und Vergaser bei warmer Maschine oder in großer Höhe. Die Menge der Leichtflüchtigen in einem für den Winter bestimmten Benzin ist auch dadurch begrenzt, daß bei allzu hohem Dampfdruck die Verdampfungsverluste während der Bereitstellung im Sommer zu groß werden. Auch der sogenannte 10%-Punkt der Siedekurve gibt einen Anhalt über den mittleren Dampfdruck (Bild 7). Aus seiner Lage kann auch auf die Temperatur geschlossen werden, bei der Anlassen eines kalten Ottomotors noch möglich ist.

Das andere Ende der Siedekurve ist ebenfalls aus motortechnischen Gründen festgelegt. Der Kraftstoff darf keine, oder doch nur in geringem Umfang, Stoffe enthalten, die einen bei den gegebenen Verhältnissen unzureichenden Dampfdruck haben, da sich diese Anteile dann im Zylinder niederschlagen, für die Verbrennung also verloren gehen und überdies die Schmierung des Kolbens schädigen. Die Erfahrung hat gezeigt, daß Fahrbenzine einen Siedeschluß von etwa 200° , Flugbenzine einen solchen von etwa 160° haben sollen. Der Wunsch, die Siedegrenzen trotzdem nach oben zu erweitern, hat verschiedene Ursachen.

Durch Aufnahme von höher siedenden Stoffen konnte, wenigstens in früheren Zeiten, ein billigerer Kraftstoff erzeugt werden, wie er z.B. als Traktorentreibstoff handelsüblich war. In den Zeiten nach 1918 wurden nun massenhaft sogenannte Schwerölvergaser angeboten, die meist mit besonders starker Heizung des Kraftstoffes und des Gemisches arbeiteten, um die Bildung eines zündfähigen Kraftstoff-Luftgemisches zu erzwingen. Brauchbar waren nur die Heizplattenvergaser, bei denen der Kraftstoff in Gegenwart von Luft ver-

dampft und teilweise gespalten wurde (Bild 8). Die Kokrückstände auf der Heizplatte müssen von Zeit zu Zeit entfernt werden.

Derartige Vergaser sind jedoch nur anwendbar, wenn an der Heizplatte eine ausreichende Temperatur vorhanden ist. Da die Heizung durch die Abgase erfolgt, ist diese Bedingung nur in der Nähe von Vollast gegeben. Derartige Einrichtungen sind allenfalls für gleichmäßig arbeitende Zugmaschinen brauchbar, es besteht aber keinerlei Aussicht, daß auf dieser Grundlage von der jetzt erprobten Lage der Siedekurve abgegangen werden kann.

Ein brauchbares Verfahren, hochsiedende Stoffe in Ottomotoren zu verarbeiten, besteht darin, daß man die Verweilzeit des Kraftstoff-Luftgemisches im Zylinder soweit verkürzt, daß kein Niederschlagen stattfinden kann. Nach dieser von Hesselmann angegebenen Arbeitsweise wird der Kraftstoff erst kurz vor der Entzündung, also erst gegen Ende der Verdichtung durch Einspritzen mit der Luft vermischt. Durch einen hochgezogenen Kolbenrand wird weiterhin eine Berührung des Kraftstoffes mit der Wand vermieden (Bild 9). Die Einbuße an Gemischbildungszeit sucht man durch kräftige Wirbelung auszugleichen. Ein solcher Motor vermag tatsächlich Kraftstoffe vom Benzin bis zum hochsiedenden Gasöl oder Teeröl zu verarbeiten, wenngleich er nicht die gleichen Gütewerte erreicht, wie der übliche Otto-Motor. Seine besondere Bedeutung liegt aber darin, daß er hochsiedende aromatische Stoffe, wie z.B. Teeröle, verarbeiten kann, für die bisher weder im Otto- noch im Dieselmotor eine Verwendung gegeben war. Auch im Glühkopfmotor, der in Deutschland weit verbreitet ist, können höher siedende Kraftstoffe verarbeitet werden. Ein Teil des Zylinderkopfes ist ungekühlt und bildet so eine heiße Retorte, in die der Kraftstoff eingespritzt wird. Die vorhin erwähnte Heizplatte ist also gewissermaßen in den Verbrennungsraum hineinverlegt. Die Zündung des Kraftstoffluftgemisches erfolgt durch die heißen Flächen des Glühkopfes. Als Otto-Motor benötigt auch der Glühkopfmotor klopffeste Kraftstoffe.

Die Entwicklung der Otto-Kraftstoffe befaßt sich heute in erster Linie mit den Eigenschaften, die für den Ablauf der Verbrennung wichtig sind. Der Dieselmotorkraftstoff soll sich in der erhitzten Luft selbst entzünden, während

der Otto-Kraftstoff, der schon lange vor seiner Entzündung mit der Luft vermischt wird, thermisch so widerstandsfähig sein soll, daß er sich nicht von selbst entzündet, sondern den Zündfunken abwartet. Die Reaktionen des Kraftstoffes mit dem Sauerstoff beginnen sofort nach der Vermischung, aber sie verlaufen im allgemeinen so gemächlich, daß sie nicht vor Einsetzen des Zündfunken zur Entflammung führen. Werden allerdings diese Vorreaktionen durch heiße Stellen im Verbrennungsraum, überhitzte Kerzen, Ventile, Dichtungs-ränder usw. beschleunigt, so kann das berüchtigte ungesteuerte Arbeiten des Motors bei abgeschalteter Zündung auftreten.⁺)

Die Vorreaktionen verlaufen so, daß Spaltungen, teilweise unter Sauerstoffanlagerung, eintreten, die eine Temperatursteigerung zur Folge haben und den Kraftstoff immer mehr der Selbstentzündung zuführen. Die Klopf-festigkeit nimmt also bereits vor der Entzündung ab und zwar umsomehr, je länger die Verweilzeit des Kraftstoff-Luftgemisches im Zylinder ist. Es läßt sich deshalb zeigen, daß der bereits erwähnte, mit Späteinspritzung arbeitende Hesselman-Motor geringere Anforderungen an die Klopfestigkeit der Kraftstoffe stellt als der normale Otto-Motor mit Saughubeinspritzung. Soweit sie das Ausschalten vorzeitiger Entzündung betrifft, wird die Forderung nach thermi-scher Beständigkeit während der Verdichtung vom üblichen Kraftstoff her stets erfüllt.

Es muß nun aber eine thermische Beständigkeit gefordert werden auch unter den erschwerten Bedingungen der Verbrennung selbst. Wird die verdichtete Ladung durch den Zündfunken entflammt, so muß der noch nicht verbrannte Teil beständig sein, d.h. sich nicht von selbst entflammen, obgleich er durch die Dehnung des verbrannten Ladungsanteils zusätzlich verdichtet und durch die freiwerdende Wärme erhitzt wird.

Die ruhige Verbrennung läuft nun so ab, daß die Flammenfront den ge-samten Verbrennungsraum durchläuft, bevor das unverbrannte Gemisch Zeit gefun-den hat, seine eigene Umsetzung bis zur Verbrennung zu entwickeln (Bild 10, links,

⁺) Beim Glühkopfmotor wird durch sorgfältige Abstimmung erreicht, daß die Zündung im richtigen Zeitpunkt erfolgt.

Die ausgezogene Kurve bedeutet den Umsatz durch die Flamme, während die gestrichelte Linie den Eigenumsatz anzeigt, der in diesem Falle zu langsam vor sich geht, um die Verbrennung zu beeinflussen. Unter diesen Bedingungen zeigt deshalb die Flammenaufnahme, daß in einem Rohr die Flamme gleichmäßig von unten nach oben fortschreitet. Der Film ist von rechts nach links bewegt zu denken.

Klopfen tritt nun ein, wenn, wie im Bild rechts angedeutet, die Geschwindigkeit des Eigenumsatzes im Raum vor der Flammenfront erheblich zunimmt. Es führt dies zu einer plötzlichen Entzündung des Gemischrestes, bevor die Flamme eine allmähliche Entzündung bewirkt. Es entstehen also vor der Flammenfront einer oder auch mehrere Flammenkerne, von denen aus die Verbrennung der Flammenfront entgegenläuft und diese durch den entstehenden Gegen- druck scheinbar aufhält, oder gar zurückdrückt. Trotzdem die Zusammensetzung und der Zustand der Restgase nicht einheitlich ist, und die Selbstzündung an einer oder mehreren Stellen beginnt, läuft die Verbrennung mit großer Geschwindigkeit ab, wobei das bekannte harte Klopfgeräusch hörbar wird.

Leistung und Verbrauch des Motors ist dicht an der Klopfgrenze besonders günstig, da der Verbrennungsablauf beim nahezu unveränderlichen Raum erfolgt. Infolge der heftigen Wirbelung, die durch die Druckgefälle innerhalb des Verbrennungsraumes entsteht, wird jedoch beim Klopfen der Wärmeübergang in unerwünschter Weise verbessert, sodaß Überhitzungen des Verbrennungsraumes und besonders des Kolbens auftreten. Derartige Klopfschäden treten an den Stellen auf, an denen das Restgasgemisch entzündet. Eine Untersuchung des Werkstoffes ergibt dann, daß nicht allein thermische, sondern auch mechanische Einflüsse vorliegen. Beim Klopfen werden offensichtlich hochfrequente Gas-schwingungen angeregt, die eine mechanische Zermürbung des Kolbenwerkstoffes verursachen (Bild 11). Die Oberfläche des Kolbens ist, wie das Gefüge erkennen läßt, offenbar nicht geschmolzen. Die Abtragung wird also nicht durch Verdampfen und Verbrennen verursacht. Auf mechanische Einflüsse deuten auch die Hohlräume hin, die sich unter der Oberfläche bilden.

Die Vorstellung, die man sich jetzt vom Ablauf des Klopfens macht, befriedigt durchaus und bestätigt die Richtigkeit der bereits früher versuchs-mäßig gefundenen technischen Maßnahmen. So wurde gefunden, daß die Klopf-

neigung durch Anordnung mehrerer Zündkerzen vermindert werden kann, da hierdurch die Durchzündung durch Angriff zweier Flammfronten beschleunigt wird und sich Restgase zum mindesten nicht in größeren Mengen selbständig entzünden können (Bild 12). Auch eine zentrale Anordnung der Zündkerze ist vorteilhaft, da hierdurch die Brennwege verkürzt werden. Eine außerordentliche Verbesserung der Brennräume wird dadurch erzielt, daß man die Ladung an der heißesten Stelle, nämlich über dem Abgasventil zündet, und den Teil des Verbrennungsraumes, in dem die Ladung von der Flammenfront zuletzt ergriffen wird, die Gestalt eines engen Spaltes zwischen Kolben und Werkstoff gibt, sodaß der Gemischrest gut gekühlt wird (Bild 13). Eine weitere wichtige Maßnahme ist die sogenannte Ventilüberschneidung. Beim Gaswechsel-Vorgang läßt man Ein- und Auslaßventil eine gewisse Zeitspanne, die in Kurbelwinkelgraden angegeben wird, gleichzeitig offen, sodaß bei Motoren, die mit Überladung arbeiten, ein Ausspülen und somit Kühlen des Verbrennungsraumes bewirkt wird (Bild 14). Das Ausspülen des Zylinders ist nur möglich, wenn der Kraftstoff durch eine Einspritzpumpe erst dann mit der Luft vermischt wird, wenn der Spülvorgang beendet ist. Diese zur Kühlung benutzte Luftmenge wird umso größer, je länger beide Ventile gleichzeitig geöffnet bleiben. Der Füllungsgrad des Zylinders wird also scheinbar größer. In dem dargestellten Beispiel wird bei großer Ventilüberschneidung 10-15% mehr Luft in den Zylinder gefördert als seinen geometrischen Abmessungen entspricht. An diesen Beispielen ist zu erkennen, daß auch durch die Gestaltung des Motors eine Verminderung der Klopfneigung erzielt werden kann.

Das Bestreben des Motorenbaues geht nun dahin, mit hohen Verdichtungsverhältnissen zu arbeiten, um den Wirkungsgrad zu steigern. Weiterhin sucht man die Leistung des Motors dadurch zu erhöhen, daß man ein erhöhtes Ladungsgewicht durch Zuführung unter Druck in den Zylinder bringt. Beide Maßnahmen bedeuten höhere Anforderungen an die thermische Beständigkeit des Kraftstoffes. Für den Chemiker ergibt sich also die Aufgabe, Kraftstoffe zu schaffen, die reaktionsträge sind, oder aber Zusatzstoffe zu finden, die geeignet sind, die Eigenumsetzung zu hemmen. Wie sich die Kohlenwasserstoffe in Bezug auf die Klopfestigkeit, ausgedrückt in Oktanzahlen, verhalten, zeigt Bild 15.

Die gasförmigen n-Paraffine haben hohe Oktanzahlen. Mit zunehmender Kettenlänge nimmt ihre Klopfestigkeit jedoch erheblich ab. Das gleiche ist auch bei den Olefinen und Naphtenen der Fall. Verzweigte Paraffine haben auch im hohen Siedebereich gute Klopfestigkeit. Noch klopfester sind die Aromaten, deren Klopfestigkeit mit dem Siedepunkt ansteigt. Eine Bestimmung der Klopfestigkeit auf der Grundlage einer analytischen Untersuchung ist nicht möglich, ebenso können die Bemühungen mit Hilfe der Zündpunkte Schlüsse auf die Klopfestigkeit zu ziehen, als gescheitert angesehen werden. Die sicherste Bestimmung bleibt die Untersuchung in dem hierfür vorgeschriebenen Prüfmotor.

Einen völlig anderen Weg zur Beschaffung ausreichend klopfester Kraftstoffe stellt der Zusatz von Klopfbremsen zu den Benzinen dar, deren Wirkung man sich so vorstellt, daß sie den Ablauf der selbständigen Reaktionen hemmen. Sie wirken also als negative Katalysatoren. Von diesen metallorganischen Stoffen sind Eisenkarbonyl und Bleitetraäthyl die bekanntesten. Bild 16 läßt die Wirkung dieser Zusatzstoffe im Vergleich zu einigen anderen Verbindungen erkennen, die in großen Mengen zugesetzt werden und klopfeste Kraftstoffe darstellen.

Die Wirksamkeit der Antiklopfmittel ist auf verschiedene Benzine unterschiedlich, so werden paraffinische Benzine stärker beeinflußt als aromatische. Am wenigsten empfindlich sind die Olefine (Bild 17).

Der Vergleich von Kraftstoffmischungen untereinander ist stark von den gegebenen Bedingungen im Motor abhängig. So können Mischungen von Benzin mit Aromaten und solche mit Iso-Paraffinen unter gewissen Bedingungen klopfgleich, unter anderen jedoch verschieden sein. Man hat deshalb bestimmte Prüfbedingungen und Prüfmotoren festgelegt, die den Verhältnissen des praktischen Betriebes nahekommen und eine einheitliche Beurteilung gestatten.

Es hat sich nun ergeben, daß die Bedingungen, die in Flugmotoren herrschen, so weit von denen des Fahrbetriebes abweichen, daß eine sichere Beurteilung in den normalen Prüfmotoren nicht möglich ist. Es ist deshalb zweckmäßig, Kraftstoffe für Flugmotoren in den entsprechenden Zylindern selbst zu prüfen, da die Zylindergröße und die Temperaturen des Verbrennungsraumes von offenbar entscheidendem Einfluß auf die Bewertung des Kraftstoffes ist. Bei der Prüfung wird der Ladedruck festgestellt, bei dem der Motor zu klopfen beginnt. Ausserdem wird diese Untersuchung bei verschiedenen Kraftstoff-Luft-Verhält-

nissen vorgenommen und so im Gegensatz zum Einpunktverfahren der Oktanzahlbestimmung ein größerer Überblick über das Betriebsverhalten des Kraftstoffes gewonnen.

Durch das Überladen ändert sich nur die Wärmebeaufschlagung des Brennraumes, während die Verdichtungsendtemperatur unverändert bleibt. Die Verbrennungstemperatur wird ebenfalls nur durch das Kraftstoff-Luft-Verhältnis beeinflusst. Die mit ausreichend klopfestem Kraftstoff erzielbaren Leistungen wachsen mit der Überladung, da hierdurch das Gewicht der Ladung und somit dessen Energiegehalt gesteigert wird. Der Wirkungsgrad und damit die Kraftstoffverbräuche werden mit zunehmender Überladung günstiger, da der Reibungsverlust nicht in gleichem Maße zunimmt (Bild 18).^{x)} Es ist deshalb vorauszu-
sehen, daß bei Bestimmung der Klopfestigkeit durch Aufsuchen der Überladegrenze andere Ergebnisse erzielt werden, als bei der Oktanzahlbestimmung, bei der die Klopfgrenze durch Einstellung des Verdichtungsverhältnisses, also durch Veränderung der Verdichtungsendtemperatur, erzielt wird.

Das Bild 19 zeigt dementsprechend auch, daß Kraftstoffe, die bei der Oktanzahlbestimmung gleich klopfest befunden wurden, weit voneinander abweichende Grenzkurven haben können. Auch der Zusatz von Bleitetraäthyl wird nach dem Überladeverfahren ganz anders bewertet als die Oktanzahl vermuten läßt (Bild 20). Während die Oktanzahl beispielsweise nur um 8 Punkte zunimmt, wird die Überladefähigkeit durch den Zusatz soweit gesteigert, daß ein Leistungsgewinn von 50% erzielt werden kann, ohne daß Klopfen eintritt. Der Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Bewertung ist also beträchtlich.

Eine Voraussage des Verhaltens von Kraftstoffen in einem überladenen Flugmotor ist auf Grund der Oktanzahl in nur beschränktem Umfange möglich. Die Oktanzahlbestimmung wird bei einem Luftverhältnis von etwa 1,05 durchgeführt. Kraftstoffe, die im Prüfmotor gleiche Oktanzahlen haben, also bei einem Luftverhältnis von etwa 1,05 bei gleichem Verdichtungsverhältnis klopfen, brauchen aber keineswegs Überladegrenzkurven zu haben, die sich bei $\lambda = 1,05$ berühren.

x) In der Darstellung ist jedoch nicht berücksichtigt, daß der Motor sein Gebläse selbst antreiben muß, sodaß sich beim Vollmotor je nach den Kennlinien des Gebläses eine andere Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Überladung ergibt.

Hierzu wäre es notwendig, daß Druck und Temperatur der Ladeluft die gleichen wie beim Prüfmotor wären. Es ist dies notwendig, weil bekanntlich die Kraftstoffe je nach ihrer Zusammensetzung in ihrem Klopfverhalten verschieden durch die Temperatur der Ladung während des Ansaugens und Verdichtens beeinflußt werden. Da auch die übrigen Verhältnisse des Verbrennungsraumes eine Rolle spielen, kann also nur bei Verwendung desselben Motors vorausgesagt werden, daß Überladegrenzkurven von Stoffen gleicher Oktanzahl sich beim Luftverhältnis 1,05 berühren, also gleich bewertet werden. Hierbei gilt noch als zusätzliche Bedingung, daß die Klopfgrenzkurve mit dem Verdichtungsverhältnis bestimmt wird, das bei der Oktanzahlbestimmung als Klopfgrenze gefunden wurde.

Die Ergebnisse der Oktanzahlbestimmung setzen also genaue Einhaltung der vorgeschriebenen Bedingungen voraus. In ihrer Anwendung wird stillschweigend vorausgesetzt, daß man mit den Abweichungen vertraut ist, die durch die verschiedenen Anforderungen bedingt sind. Es ist weiterhin, sofern es sich um Benzine ähnlicher Art handelt, wie etwa bei der laufenden Produktion eines Hydrierwerkes bei hinreichender Erfahrung ohne weiteres möglich vorauszusagen, welche Folgen die Änderung der Oktanzahl für die Lage der Klopfgrenzkurven hat. In solchen Fällen kann also auf eine Nachprüfung im Überlademotor verzichtet werden. Bei neuartigen Benzinen oder Kraftstoffmischungen ist dies aber nicht zu vermeiden.

Immerhin ist es aber bei laufenden Untersuchungen zweckmäßig, die Betriebsbedingungen möglichst so zu wählen, daß die Ergebnisse mit den Anforderungen der Praxis übereinstimmen. Will man nicht die immerhin umständliche und kostspielige Prüfung in den großen Überlademotoren durchführen, so müssen also im kleinen Prüfmotor entsprechend abgewandelte Verfahren angewendet werden. Aus diesem Grunde wurde eine große Anzahl von verschiedenen Versuchsbedingungen entwickelt und empfohlen, von denen das Motor- und das Army air corps-Verfahren die bekanntesten sind. Ihre Ergebnisse entsprechen jedoch nicht den Bedingungen unserer heutigen Flugmotoren. Vom Technischen Prüfstand wurde deshalb eine neue als „Oppauer Verfahren“ bezeichnete Arbeitsweise entwickelt, bei der auch im kleinen Prüfmotor Flugbenzine unter gewissen Einschränkungen dieselbe Bewertung erfahren, wie in dem für Deutschland vorgeschriebenen DVL-Überladeverfahren in einem BMW-132-Einzyliermotor.

Bei der Verbrennung von Benzin mit metallischen Antiklopfmitteln entstehen Rückstände, die aus dem Motor entfernt oder unschädlich gemacht werden müssen. Beim Eisenkarbonyl waren die Ablagerungen des Eisenoxydes besonders an den Zündkerzen schädlich. sie waren Veranlassung zur Entwicklung hochfeuerfester Isolierkörper aus Sinterkorund, und sie gaben hierdurch die Anregung zur Entwicklung der heutigen hochwertigen Zündkerzen. Beim Bleitetraäthyl liegen die Verhältnisse insofern einfacher, als es gelingt, durch Hinzufügen von Brom- und Chlorverbindungen das Entstehen von Bleioxyd und metallischen Blei weitgehend zu vermeiden. Ein entsprechender Kunstgriff ist bei Eisenkarbonyl nicht möglich. Das entstehende Bleibromid, bzw. Bleichlorid, ist bei etwa 800° flüchtig, sodaß der größte Teil der Rückstände den Motor verlassen kann. Immerhin machen die noch im Motor verbleibenden Reste gewisse Vorkehrungen notwendig, da sie Metalle angreifen. Am meisten werden hiervon die Abgasventile betroffen, die mit ihren Temperaturen über 700° eine für den Angriff von Bleiverbindungen auf Eisen günstige Temperatur aufweisen. Hiergegen sucht man zunächst durch möglichst gute Kühlung anzukämpfen. Bei den sehr großen Ventilen der Flugmotoren wendet man hierbei eine besondere Kühlung mit metallischem Natrium an, das sich im hohlen Ventilschaft befindet.

Die Sitzflächen werden durch Aufschweißen von Stellite, einer aus Chrom und Kobalt bestehenden Legierung, geschützt. Da das Ventil nicht nur an den Sitzflächen sondern auch auf der gesamten, von Feuergasen umspülten Fläche angegriffen wird, ist man deshalb schon seit längerem dazu übergegangen, die Ventile vollständig mit einem korrosionsbeständigen Überzug zu versehen.

Dieselskraftstoffe.

Bei den Dieselskraftstoffen ist zweifellos die Zündwilligkeit die interessanteste Eigenschaft, obgleich auch die Siedelage, die Zähigkeit und das Verhalten bei Kälte manche interessante Frage stellen.

Wie schon ausgeführt wurde, geschieht die Energiezufuhr zu der in dem Zylinder eingeschlossenen Luft so, daß der Kraftstoff im richtigen Zeitpunkt, nämlich kurz vor Beendigung der Verdichtung, eingespritzt wird. Durch entsprechende Wahl des Verdichtungsverhältnisses muß hierbei dafür gesorgt

werden, daß die Lufttemperatur so hoch ist, daß der Kraftstoff sicher gezündet wird. Der eingespritzte Kraftstoff beginnt zu verdampfen und gleichzeitig tritt auch unter Spaltung und Anlagerung von Sauerstoff eine Reaktion auf. Nach einer Zeitspanne, die man den Zündverzug nennt, geht die Umsetzung in Entflammung über und zwar an der Außenseite des Strahles, wo eine besonders innige Mischung mit Luft gegeben ist. Der Kraftstoff verbrennt dann in dem Maße, wie er mit dem Sauerstoff der Luft in Berührung kommt. Durch gute Zerstäubung und heftige Wirbelung der Ladung sucht man zu erreichen, daß in der außerordentlich kurzen Zeit die zur Verfügung steht, Kraftstoff und Luft vollständig gemischt werden. Es muß aber trotzdem ein gewisser Überschuß an Luft vorhanden sein, da sonst unvollständige Verbrennung erfolgt. Der Dieselmotor erreicht also nicht die Leistung des Otto-Motors. Andererseits kann aber im Dieselmotor ohne Veränderung der Luftmenge jede beliebig kleine Kraftstoffmenge verbrannt werden, da im Auflösungsgebiet des Kraftstoff-Strahles stets die Zündgrenze erreicht wird.

Die Zeitspanne des Zündverzuges soll nun ein gewisses Maß nicht überschreiten, da sonst verhältnismäßig große Mengen des Kraftstoffes sich im Zylinder befinden und vor der Entzündung Zeit gefunden haben, sich hinreichend mit Luft zu mischen. Sie entzünden sich dann plötzlich, sodaß eine Erscheinung auftritt, die Ähnlichkeit mit der klopfenden Verbrennung des Restgasgemisches im Otto-Motor hat. Ist der Zündverzug dagegen klein, so setzt die Verbrennung bereits zu Beginn der Einspritzung ein und die Verbrennung verläuft ruhig.

Um den Zündverzug klein zu halten, wird man die Temperatur am Verdichtungsende möglichst hoch wählen, da hierdurch die Aufbereitungszeit des Kraftstoffes herabgesetzt wird. Dieses Hilfsmittel hat jedoch den Nachteil, daß durch höhere Verdichtungsverhältnisse auch der Höchstdruck der Verbrennung ansteigt. Die Folge ist eine Erhöhung der Reibungsverluste, die dazu führt, daß die Leistung absinkt. Wie aus Bild 21 hervorgeht, steigt die Leistung des Dieselmotors, wenn man das Verdichtungsverhältnis vermindert. Die höchste Leistung wird nahe der Grenze erzielt, an der die Verbrennungen beginnen, wegen unzureichend niedriger Zündtemperatur unsicher zu werden. Es geht daraus hervor, daß es nicht möglich ist, den Dieselmotor unter derartigen Verhältnissen zu betreiben. Hinzu kommt noch, daß der Zündverzug sehr stark temperatur-

abhängig ist und es folglich unmöglich wird, einen Motor zum Anlaufen zu bringen, wenn nicht die Verdichtungsendtemperatur um ein gewisses Maß über der Zündtemperatur des Kraftstoffes liegt. Immerhin geht das Bestreben des Motorenbaues dahin, mit möglichst niedrigen Verdichtungsverhältnissen auszukommen oder durch andere Maßnahmen die Spitzendrücke zu senken.

Von der chemischen Seite her kann zur Lösung dieser Aufgabe durch Schaffung eines möglichst zündwilligen Kraftstoffes beigetragen werden. Nachdem, was über die Vorgänge vor und bei der Verbrennung im Otto- und Dieselmotor gesagt wurde, ist es einleuchtend, daß im Dieselmotor sich diejenigen Kraftstoffe günstig verhalten, die für den Otto-Motor wegen mangelnder thermischer Beständigkeit ungeeignet sind. Geradkettige Paraffine sind also ausgezeichnete Dieselmotorkraftstoffe, während Olefine, Naphtene oder Aromaten weniger geeignete Stoffe sind. Cetan stellt praktisch den höchsten Wert an Zündwilligkeit dar, der mit Paraffinen zu erreichen ist (Bild 22). Noch höhere Paraffine scheiden wegen ihres zu hohen Schmelzpunktes aus. Eine eindeutige Bestimmung der Zündwilligkeit dieser Stoffe ist schwierig, weil einerseits das Auftreten von Peroxyden kaum vermieden werden kann, andererseits auch Isomere schwer auszuschalten sind. Alpha-Methyl-Naphtalin ist als Aromat sehr zündträge, sodaß aus diesem Stoff in Mischung mit Cetan-Vergleichsmischungen zur Messung der Zündwilligkeit hergestellt werden können. Man könnte auch daran denken, Heptan/Oktan-Mischungen hierfür zu verwenden, doch gleicht Heptan in der Zündwilligkeit nur einem guten Gasöl, sodaß hochwertige Dieselöle nicht unmittelbar verglichen werden können. Auch aus Gründen der Zähigkeit und des Dampfdruckes, die bei Cetan und Alpha-Methyl-Naphtalin besser den Verhältnissen im Dieselmotor entspricht, benutzt man zur Bestimmung der Zündwilligkeit diese Stoffe. Beide Bewertungsmaßstäbe stehen aber in einem bestimmten Verhältnis, das auf Bild 23 dargestellt ist. Wenngleich es nicht möglich ist, Dieselöle im Otto-Motor zu bewerten, so besteht doch durchaus die Möglichkeit, Benzin im Dieselmotor zu untersuchen. Da hierdurch jedoch neue Wertziffern geschaffen würden, würde die entstehende Verwirrung den Vorteil der Kraftstoffbewertung in nur einem Prüfmotor zweifellos aufheben.

Der Zündverzug eines Dieselmotorkraftstoffes soll zwar klein sein, doch hat diese Forderung in ihrem technisch erreichbaren Nutzen bei weitem nicht