

U. 12.

Die Eigenschaften der Flugkraftstoffe und ihre Prüfung

Von Prof. Dr.-Ing. W. WILKE, Ludwigshafen a. Rh.,
unter Mitarbeit von Ing. F. JANTSCH, Ludwigshafen a. Rh.

Die Kenntnis der Eigenschaften von Flugkraftstoffen ermöglicht, sie nach ihrer Eigenart und mit bestem Wirkungsgrad einzusetzen. Es wird ein Überblick über den derzeitigen Stand unserer Kenntnis der Flugkraftstoffe gegeben und die Prüfung der Gütekenziffern behandelt. Hierbei sind diejenigen Prüfverfahren, die in die „Bauvorschriften für Flugmotoren (BVM)“ aufgenommen wurden, bevorzugt behandelt; hinsichtlich ihrer Durchführung ist jedoch auf die Bauvorschriften verwiesen.

I. Kraftstoffe für Otto-Flugmotoren

1. Klopffestigkeit
2. Flüchtigkeit
3. Reinheit
4. Energiegehalt
5. Beständigkeit
6. Sonstige Eigenschaften

II. Kraftstoffe für Diesel-Flugmotoren

1. Zündwilligkeit
2. Reinheit
3. Energiegehalt
4. Beständigkeit
5. Zähigkeit
6. Sonstige Eigenschaften

Abgeschlossen am 15. Mai 1940

524

Die Eigenschaften der Flugkraftstoffe und ihre Prüfung

I. Kraftstoffe für Otto-Flugmotoren

1. Klopfestigkeit

- a) Erklärung des Klopfvorganges
 - a) Physikalische Deutung
 - b) Chemische Deutung
- b) Kraftstoff und Klopfneigung
 - a) Chemischer Aufbau und Klopfverhalten
 - Hochklopfste Isoparaffine
 - Aromaten
 - Alkohole
 - Äther
 - Andere Kraftstoffanteile
 - b) Klopfhindernde Zusätze
 - Bleitetraethyl
 - Bleiempfindlichkeit
 - Herstellung
 - Andere metallorganische Gegenklopfmittel
 - Aromatische Amine
- c) Die motorischen Bedingungen für das Kraftstoffklopfen
 - Einflüsse der Betriebsbedingungen
- d) Klopfmessung
 - Klopfverhalten des Motors
 - Klopfmessung ohne Motor

Keine Eigenschaft der Kraftstoffe ist für ihre Beurteilung so bedeutungsvoll wie die Klopfneigung. Es ist daher auch natürlich, daß die Erforschung des Klopfvorganges stets im Mittelpunkt der Untersuchungen über die Kraftstoffeigenschaften gestanden hat. Die Klopfestigkeit der Kraftstoffe bestimmt in erster Linie die Leistung und den Verbrauch der Motoren, und klopf-schwache Kraftstoffe können im Betrieb schwere Schädigungen hervorrufen. Für die Entwicklung der Flugmotoren auf höchste Leistung ist die Klopfestigkeit der Kraftstoffe direkt eine Voraussetzung geworden. Ebenso wie die Erforschung des Klopfvorganges ist auch die Messung der Klopfestigkeit ein Gegenstand eifriger Untersuchung. Während wir aber im ersten Fall zu einer gewissen Klärung gekommen sind, befinden wir uns hinsichtlich der Messung der Klopfestigkeit, insbesondere der Kraftstoffe für Flugmotoren, im Augenblick in einem wenig befriedigenden Zustand.

Den Klopfvorgang erkennt man rein äußerlich im Betrieb durch ein helles, scharf klingendes Geräusch, das sich ähnlich anhört, wie wenn metallische Teile aufeinander schlagen, so daß man auch ursprünglich die Erklärung des Klopfens hierin zu finden hoffte. Doch erkannte man bald, daß die Ursache der Geräusche im Verbrennungsablauf zu suchen ist. Die Folgen des Klopfens machen sich im Betrieb in einer starken, sich ständig steigenden Erwärmung des Zylinders und in einem Leistungsabfall bemerkbar, der bei starkem Klopfen sogar zum Stillstand des Motors führen kann.

In erster Linie ist die Verdichtung für das Klopfen bestimmend; je höher die Verdichtung, desto stärker das Klopfen. Ferner tritt bei niedriger Drehzahl und voller Last ein Klopfen auf, und es verschwindet, wenn die Drehzahl steigt oder die Last vermindert wird. Auch durch Vorstellen der Zündung kann das Klopfen herbeigeführt werden. Ebenso ist ein heißer Motor oft die Ursache des Klopfens.

Man erkannte auch, daß weiterhin die Natur der Kraftstoffe eine ganz bedeutende Rolle für das Auftreten des Klopfens spielt. Insbesondere sind die Gruppen der aromatischen Kohlenwasserstoffe (klopfest) und der aliphatischen Kohlenwasserstoffe (klopf-schwach) bestimmend für die Güte des Kraftstoffes. Sowohl die motorischen Bedingungen als auch die Zusammensetzung des Kraftstoffes sind in Abschnitt c und d eingehend behandelt.

a) Erklärung des Klopfvorganges

a) Physikalische Deutung

Es hat langwieriger Versuche bedurft, bis es gelungen ist, physikalisch die Klopferscheinungen mit einiger Sicherheit zu deuten. Man erkannte schon frühzeitig, daß die Ladung im Motor von einer anfänglich geregelten langsamen Verbrennung zu einer praktisch momentanen Verbrennung des Ladungsrestes übergeht. Entzündet man z. B. in einer Bombe oder einem Rohr ein ruhendes Brenngemisch, so wird von der Zündquelle aus eine Flammenfront ausgehen, deren Geschwindigkeit von verschiedenen Faktoren, wie Mischungsverhältnis, Anfangsdruck und -temperatur der Ladung abhängt. Abb. 1 zeigt die Verbrennungsgeschwindigkeit für ein Benzin-Luftgemisch, das in einer Bombe verbrannt wurde. Die hier beobachteten Geschwindigkeiten von höchstens 2 bis 3 m/s sind aber im Verbrennungsraum des Motors besonders infolge der Durchwirbelung der Ladung während des Kompressionshubes bedeutend höher. Wenn auch der Vorgang im Motor ähnlich verläuft, so ist die Flammenfront nicht glatt, sondern durch Verwirbelung und die Gestalt des Brennraumes zerklüftet und unregelmäßig. Insbesondere durch die Verwirbelung nimmt die Verbrennungsgeschwindigkeit bedeutend höhere Werte an und steigt bis auf 20 bis 40 m/s, also bis auf den zehnfachen Betrag. Vor der Flammenfront befindet sich der unverbrannte Gasrest, der durch Ausdehnung der bereits verbrannten Gase eine starke Druck- und Temperaturerhöhung erfährt. Auch durch Wärmefluß von der heißen Flamme her steigt die Temperatur. Diese Umstände können nun zu einer plötzlichen Verbrennung des Gasrestes führen.

Für das Auftreten der momentanen Verbrennung, d. h. des Klopfens, bestehen zwei Anschauungen. Die erste nimmt an, daß durch die günstigen Verbrennungsbedingungen im Ladungsrest die langsame Verbrennung in eine detonierende Verbrennung übergeht, d. h. daß eine Detonationswelle entsteht, die mit ihrer charakteristischen Geschwindigkeit von 2000 m/s im Verbrennungsraum sich fortplant. Beim Auftreffen auf die Wandungen entsteht dabei das Klopfgeräusch.

Tatsächlich haben auch russische Forscher, die ein schmales Quarzfenster über dem Verbrennungsraum eingebaut hatten, mit Hilfe eines Films eine Verbrennungsgeschwindigkeit von 2000 m/s im Gasrest gemessen. Hieraus könnte man also auf das Auftreten der Detonationswelle schließen. Das Ergebnis dieser Messungen wird aber dadurch unsicher, daß infolge der Lage des Beobachtungsfensters, das nur 5% des Verbrennungsraumes senkrecht zur Flammenfront zu beobachten erlaubte, Sekundärverbrennungen gemessen wurden, die zu Trugschlüssen Anlaß gaben.

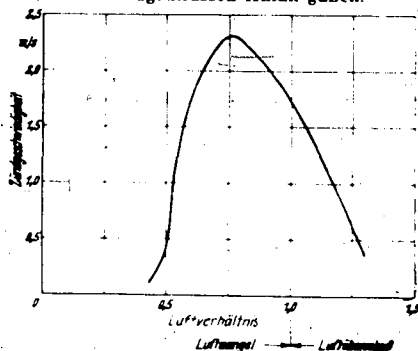


Abb. 1 Zündgeschwindigkeit von Benzindampf in Luft (Bombenversuche) nach Neumann.

Für die zweite Erklärung des Klopfens, die annimmt, daß im Gasrest Selbstzündungen auftreten, sind besonders die Messungen von Radweiler und Withrow sehr aufschlußreich gewesen. Sie haben zum erstenmal gezeigt, daß im Gasrest vor der Flammenfront neue Zündzentren auftreten, von denen aus die Entflammung nach allen Richtungen hin ausgeht und somit die Restladung praktisch momentan zur Entzündung bringt. Diese Messungen wurden so ausgeführt, daß mit einem Zeitlupen-Film der ganze durch ein Quarzfenster abgeschlossene Verbrennungsraum aufgenommen werden konnte. Dabei wurde auch der gesamte Verbrennungsablauf vom Auftreten des Zündfunken an beobachtet. Der Zeitpunkt und der Ort der ersten Zündzentren ist natürlich Zufälligkeiten unterworfen, da die Temperatur und die Gemischbildung zeitlich und örtlich im Verbrennungsraum verschieden sind. Diese Versuche zeigen schon klar, daß eine Detonationswelle nicht auftritt. Durch neuerliche Messungen von Weinhart ist nun direkt auch der Nachweis erbracht worden, daß im klopfenden Motor keine Detonationswelle auftritt. Weinhart untersuchte mittels der Ionisations-Methode, die auch schon Schnauffer angewandt, den Vorgang der Verbrennung, wobei der Ionisationsstrom auf einen Kathodenstrahl-Oszillographen für ein Spiel aufgezeichnet wurde. Er konnte zeigen, daß die Detonation im Rohr und die Klopferscheinungen im Motor einen grundsätzlich verschiedenen Verlauf des Ionisationsstromes haben. Auf Grund dieser physikalischen Deutung lassen sich nun auch die Erscheinungen, die im Betrieb auftreten, sehr gut erklären.

Durch die plötzliche Verbrennung entsteht für einen Augenblick ein Gebiet hohen Drucks, das einen Ausgleich mit dem geringeren Druck des anfangs schon verbrannten Teils herbeiführt, während bei einer normalen Verbrennung dauernd ein Druckausgleich zwischen dem verbrannten und unverbrannten Teil der Ladung besteht. Diese Druckstörung verursacht beim Auftreffen der Gasmassen auf die Zylinderwand die Klopfgeräusche. Durch die Stöße der Gasmassen und die damit verbundene Verwirbelung wird dann sowohl der Leistungsabfall als auch der erhöhte Wärmeübergang an die Wand hervorgerufen.

β) Chemische Deutung

Auch der chemische Ablauf der klopfenden Verbrennung läßt sich mit der physikalischen Deutung in Einklang bringen.

Im Kraftstoff-Luftgemisch erfolgt auch ohne Fremdzündung bei der Temperatur von 200–300° am Ende des Verdichtungsstabs eine, wenn auch verhältnismäßig geringe Reaktion. In Abb. 2 stellt die gestrichelte Linie den Umsatz in Abhängigkeit von der Zeit bei konstantem Volumen, also in der Nähe des Totpunktes dar. Die ausgezogene Linie gibt den Weg der Flammenfront bei Zündung (Fremdzündung oder an einer Stelle ausgehende Selbstzündung) wieder. Solange die Geschwindigkeit im Restgas kleiner ist als die kritische zur

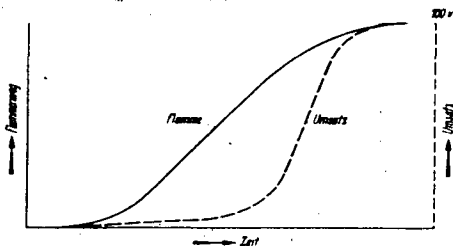


Abb. 2 Energieumsatz bei Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches

Selbstzündung führende, herrscht in der Flammenfront normale Verbrennung. Wird aber die Reaktionsgeschwindigkeit infolge der Eigenverbrennungswärme im Gasrest größer, so brennt schließlich der letzte Rest der Ladung momentan ab, noch bevor die Flammenfront ihn erreicht hat. Temperatur, Druck, Art und Ausbildung des Verbrennungsraumes beeinflussen die Reaktionsgeschwindigkeit.

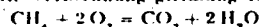
Die rein thermische, durch die Verbrennungswärme sich selbst steigende Reaktionsgeschwindigkeit reicht aber allein nicht zur Erklärung der Beobachtungen aus, z. B. des Einflusses der chemischen Konstitution der Kraftstoffe, der Zusätze usw.

Die Reaktionsketten

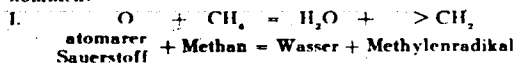
Die Theorie der Reaktionsketten stützt sich auf die Beobachtung der merkwürdigen „Explosionslücke“. Es kann nämlich bei bestimmter konstanter Temperatur, aber wechselndem Druck ein Gebiet vorhanden sein, in dem eine sonst explosive Mischung bestimmten Verhältnisses Kraftstoff Sauerstoff nicht explodiert. (Der Jentschische Zündwertprüfer versuchte diese Erscheinung auszuwerten.) Im einzelnen ist die Theorie der Reaktionskette noch strittig. Es soll jedoch im folgenden an zwei Beispielen der Grundgedanke näher erläutert werden.

I. Methanverbrennung als Beispiel einer Kettenreaktion ohne Verzweigung.

Die bekannte Verbrennungsgleichung für Methan



geht in dieser Weise praktisch nicht vor sich, weil dazu ein Dreierstoff, nämlich der Zusammenstoß von 1 Molekül CH_4 mit 2 Molekülen O_2 notwendig ist. Ein solcher Dreierstoff ist aber viel zu selten, um der Reaktion genügend Geschwindigkeit zu geben. Norrish hat daher für die Methanverbrennung folgenden Ablauf angenommen:



Methylenradikal + Sauerst. = Formaldehyd + atomarer Sauerstoff

Infolge thermischer Dissoziation des Sauerstoffmoleküls:

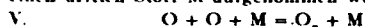


sind im Gas stets O-Atome zur Einleitung der Reaktion vorhanden. Diese O-Atome greifen das Methan unter Bildung des Methylenradikals an, und in der zweiten Reaktion reagiert das Methylenradikal sofort mit Sauerstoffmolekülen weiter, es entsteht dabei Formaldehyd und wieder ein Sauerstoffatom. Das Formaldehyd zersetzt sich bei der hohen Temperatur sogleich in Kohlenoxyd und Wasserstoff, die dann ihrerseits weiter verbrennen können.



Wesentlich für die Reaktionen I und II ist, daß diese Reaktionen sehr schnell verlaufen, weil äußerst reaktionsfähige Radikale daran beteiligt sind. Entscheidend ist weiter, daß das nach I verschwindende O-Atom nach II wieder zurückgebildet wird. Es kann also sofort weiter mit einem neuen Methan-Molekül reagieren, es wird erneut zurückgebildet und so bildet sich eine ganze Reaktionskette. Diese Kette bricht erst ab, wenn durch irgendeine Reaktion die Radikale entfernt werden. Sie können beispielsweise zur Gefäßwand diffundieren und sich dort mit anderen Radikalen vereinigen, oder es kann auch eine Rekombination im Gasraum stattfinden.

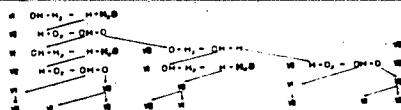
Diese Wiedervereinigungen im Gasraum erfordern jedoch einen Dreierstoß. Daher ist in Gleichung V ein dritter Reaktionsteilnehmer M (ein beliebiges Molekül oder eine Wand) nötig, der durch Reaktion in den angeregten Zustand M übergeht, damit die bei der Vereinigung der Radikale freiwerdende Energie abgeführt werden kann, da sonst das Molekül gleich wieder auseinanderfliegt. Bei den Reaktionen vielatomiger K.W.-Reste kann die Energie leicht innerhalb des Restes ohne einen dritten Stoff M aufgenommen werden.



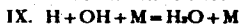
Solche Dreierstoß-Reaktionen sind im allgemeinen sehr selten, da es erforderlich ist, daß drei Partner im gleichen Moment zusammenstoßen. Ist nun bei Kettenreaktionen die kettenabbrechende Reaktion langsamer als die Neubildung von Radikalen, also im vorliegenden Fall von O-Atomen (Gleichung III), so steigt die Reaktionsgeschwindigkeit in kurzer Zeit immer mehr an, sie wird unendlich, d. h. eine Explosion tritt ein.

2. Wasserstoffverbrennung als Beispiel einer Kettenreaktion mit Verzweigung

Für die Wasserstoffverbrennung können folgende Reaktionschritte angenommen werden, wobei das anfangs auftretende Hydroxyl OH der Gleichung VI z. B. aus thermisch nach Gleichung V dissoziiertem Sauerstoff und Wasserstoff nach Gleichung III stammen möge:



Als kettenabbrechende Reaktion kommt in Betracht



Vom Beispiel der Methanverbrennung unterscheidet sich dieser Fall dadurch, daß als Reaktionsprodukte bei Gleichung VII und VIII zwei Kettenträger gebildet werden, während nur einer (Gleichung VI) verschwindet. Jeder dieser beiden Kettenträger setzt eine neue Kette in Gang, so daß die ursprüngliche Kette eine Verzweigung erfährt. Reaktionsketten mit Verzweigung können daher äußerst leicht zu einem explosiven Reaktionsverlauf führen.

Der Ketten-Abbruch

Es wurde schon erwähnt, daß Abfangen der Kettenträger (H, OH, CH₃ usw.) die Reaktionsgeschwindigkeit hemmen muß, und daß dieser Abbruch der Kette an der Wand oder durch Zusammenstoß mit einem dritten Molekül erfolgen kann.

Wir müssen also einen Dreierstoß dreier Moleküle, der natürlich viel seltener ist, abwarten. Dreierstöße haben nun eine andere Druck-Abhängigkeit als Zweierstöße. Im Zusammenhang mit der begrenzten Lebensdauer der angeregten Zustände der Kettenträger und der vom Druck abhängigen Weglänge, d. h. Zeit bis zu einem neuen Zusammenstoß mit einem anderen Gasmolekül, auch mit der Wand, ist es begreiflich, daß die Reaktionsgeschwindigkeit in einem bestimmten Druck-Temperatur-Gebiet unter die Explosionsgeschwindigkeit sinken kann, weil die Kettenträger vernichtet werden. Wir können dann manchmal Produkte dieser langsamen Verbrennung abfangen und so den Reaktionsverlauf unter die Zeitlupe nehmen.

Es ist aus der Theorie ohne weiteres verständlich, daß eine Anlaufzeit beobachtet wird, bis die Reaktionsgeschwindigkeit genügend groß geworden ist. D. h. es liegt auch ein Einfluß der Temperatur und der Verweilzeit des Gemisches im Ansaugrohr vor. Die Form des Verbrennungsraumes ist auf das Abfangen der Radikale

durch die Wand von Einfluß. Geringe Zusätze wie Bleitetraäthyl, Eisencarbonyl usw. (die wahrscheinlich selbst Radikale bilden), können die eben entstandenen Kettenträger wegfangen, während andere Stoffe, wie Peroxyde, Kettenträger liefern und so Klopfen erzeugen.

Die Klopfestigkeit gewisser Kohlenwasserstoffe läßt sich dadurch erklären, daß bestimmte Reaktionsprodukte die Kettenträger abfangen, weil sie infolge einer neuen Reaktionsart die Verzweigung der Kettenträger verhindern. Es leuchtet ja ein, daß z. B. der Abbau eines Paraffins anders verläuft als der eines verzweigten Isoparaffins, wo an der Verzweigungsstelle nur ein oder gar kein Wasserstoffatom am Kohlenstoff sitzt, oder daß z. B. die Doppelbindung der Olefine begierig sein muß, Radikale anzulagern.

Die Reaktionsketten-Theorie läßt sich auch auf andere Reaktionen anwenden, z. B. die Schutzwirkung gewisser Inhibitoren (Stabilisatoren) bei der Alterung von Benzin, Öl, Gummi. Sie beruht zweifellos auf einem Kettenabbruch durch diese Stoffe. Diese Art negativer Katalyse ist also verschieden von der sogenannten Vergiftung mancher Katalysatoren durch Besetzung ihrer Oberfläche, z. B. durch Schwefel.

b) Kraftstoff und Klopfneigung

a) Chemischer Aufbau und Klopfverhalten

Die Klopfneigung eines Kraftstoffes ist in dem chemischen-Aufbau-seiner-Anteile begründet. Die Forschungen über die Zusammenhänge zwischen Klopfneigung und chemischer Konstitution erbrachten gewisse Gesetzmäßigkeiten, mit deren Hilfe in der Beurteilung und in der Herstellung klopfester Kraftstoffe neue Wege beschritten werden konnten.

Die Kraftstoffe für den Flugmotor sind derzeit fast ausschließlich Gemische aus Kohlenwasserstoffverbindungen mit 5 bis 12 C-Atomen. Dazu treten vereinzelt sauerstoffhaltige Verbindungen, wie Äther und Alkohole. Bei den Benzin ergeben Zahl und Anordnung der zugehörigen C- und H-Atome im Molekül folgende Gruppeneinteilung:

1. Kettenförmige (aliphatische) Kohlenwasserstoffe.
 - a) Kohlenwasserstoffe mit unverzweigten Ketten (Paraffine).
 - b) Kohlenwasserstoffe mit verzweigten Ketten (Iso-Paraffine).
2. Ringförmige (zyklische) Kohlenwasserstoffe.
 - a) Naphtene.
 - b) Aromaten.
 - c) Kohlenwasserstoffe mit Ringen, die auch andere Elemente als C enthalten können (heterozyklische Kohlenwasserstoffe).

Bei den aliphatischen Kohlenwasserstoffen stellt man sich die Anordnung der Kohlenstoffatome in Form einer geraden oder verzweigten Kette aus aneinandergereihten Kohlenstoffatomen vor, die mit Wasserstoffatomen besetzt ist. Die zyklischen Kohlenwasserstoffverbindungen besitzen im Ring angeordnete Kohlenstoffatome.

In jeder Gruppe unterscheidet man gesättigte und ungesättigte Verbindungen. Gesättigt ist eine Verbindung dann, wenn jedes Kohlenstoffatom in seiner Wertigkeit durch Bindung an ein anderes oder an ein Wasserstoffatom voll gebunden ist. Ungesättigte Kohlenwasserstoffe enthalten Doppelbindungen zwischen den C-Atomen und sind daher wasserstoffärmer als gesättigte. Ungesättigte Kohlenwasserstoffe mit offener Kette bezeichnet man als Olefine.

Beispiele für die Bindungsformen von Kohlenwasserstoffen gibt Abb. 3.

Die Paraffine weisen verhältnismäßig schwache Bindung der einzelnen Kohlenstoffatome auf und zeigen ungünstiges Klopfverhalten. Mit zunehmender Wichte

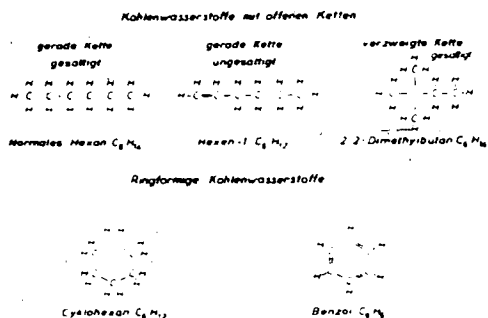


Abb. 3 Bindungsformen von Kohlenwasserstoffen

und steigendem Siedepunkt fällt ihre Oktanzahl und wird bei n-Heptan gemäß der Definition der Oktanzahl bereits Null. Die nachstehende Tafel 1 gibt eine Übersicht darüber.

Tafel 1: Oktanzahlen von normalen Paraffinen (Motor-Methode)

Paraffin	Formel	Molek.-Gew.	Siedepunkt	MOZ
Propan	C_3H_8	44	— 45°	125 ^{b)}
n-Butan	C_4H_{10}	58	— 1°	92
n-Pentan	C_5H_{12}	72	+ 36°	61
n-Hexan	C_6H_{14}	86	+ 69°	25
n-Heptan	C_7H_{16}	100	+ 98°	0
n-Oktan	C_8H_{18}	114	+ 126°	-17
n-Nonan	C_9H_{20}	128	+ 151°	-45

Für Iso-Paraffine, d. h. solche Paraffine, die bei gleichem C- und H-Gehalt und gleichem Molekulargewicht andere Anordnung der Atome zeigen, gilt diese Regel nicht, vgl. Tafel 2. Hier tritt mit steigendem Molekulargewicht und Siedepunkt keine Verschlechterung des Klopfverhaltens ein. Als Erfahrungsregel gilt, daß die Oktanzahl eines Kohlenwasserstoffes um so höher liegt, je enger die einzelnen Kohlenstoffatome durch Verzweigung im Molekül beieinander liegen und je größer die Symmetrie des Moleküls ist.

Tafel 2: Oktanzahlen von Iso-Paraffinen (Motor-Methode)

Kohlenwasserstoff	Molek.-Gew.	Siedepunkt	Konstitution	MOZ
Isobutan	58	-10°	<chem>CC(C)C</chem>	99
2-Methylpropan	72	+10°	<chem>CC(C)(C)C</chem>	116
Dimethylpropan	72	+10°	<chem>CC(C)(C)C</chem>	116
2-Methylbutan	72	+31°	<chem>CC(C)CC</chem>	90
Isooktan	114	109°	<chem>CC(C)(C)CC(C)(C)C</chem>	100

Die Olefine zeigen ebenfalls höhere Oktanzahlen bei den verzweigten Formen (Isomeren), doch sinkt ihre Klopfestigkeit wie bei den Paraffinen mit steigendem

^{b)} geschätzt.

Siedepunkt. Bei starkerer Warmebelastung im Motor sinkt ihre Klopfestigkeit weiter ab, d. h. sie sind wärmeempfindlich.

Unter den zyklischen Kohlenwasserstoffen halten die Naphtene in bezug auf das Klopfverhalten etwa die Mitte zwischen den n-Paraffinen und den Aromaten. Mit zunehmender Seitenkette und steigendem Siedepunkt sinkt ihre Klopfestigkeit, doch zeigen auch hier die verzweigten Formen besseres Klopfverhalten.

Die Aromaten (Benzole und ihre Homologen) liegen mit ihren Klopfwerten über den eben genannten Gruppen. Ihre Klopfestigkeit steht praktisch mit Molekulargewicht und Siedetemperatur kaum in Zusammenhang. Sie sind jedoch stark wärmeempfindlich, wie der Vergleich der Research-Oktanzahl mit der unter strengeren Bedingungen ermittelten Motor-Oktanzahl zeigt, vgl. Tafel 3 [1].

Tafel 3: Mischwerte von Aromaten

Kohlenwasserstoff	Research-Oktanzahl	Motor-Oktanzahl
Benzol	108	87
Toluol	120	90
Ethylbenzol	128	97
o-Xylol	121	97
m-Xylol	144	104
p-Xylol	154	104

Eine Übersicht über die den Kohlenwasserstoffen zugeordneten Oktanzahlen ergibt sich aus Abb. 4. Sie zeigt u. a. den gegenüber dem Siedepunkt praktisch gleich bleibenden Klopfwert von Iso-Paraffinen gegenüber n-Paraffinen, Olefinen und Naphtenen.

Die Klopfestigkeit von Gemischen aus reinen Kohlenwasserstoffen ist angenähert die Summe der Komponenten Klopfwerte (mit gewissen Einschränkungen für Aromaten). Dies zeigt z. B. auch die Analyse handelsüblicher Flugbenzine, vgl. Tafel 4.

Tafel 4: Zusammensetzung von Flugbenzinen

Herkunft der Benzine	Aromaten u. ungesättigte vH	Naphtene vH	Paraffine vH	MOZ
Borneo	30	37	83	74
Venezuela	1	72	27	72
Kohlehydrierung	5	41	54	72

Das Herstellungsverfahren nimmt maßgeblichen Einfluß auf die Klopfestigkeit des fertigen Benzins. Während straight-run-Benzine je nach dem Erdöl, aus dem sie gewonnen werden, unterschiedliche Klopfwerte

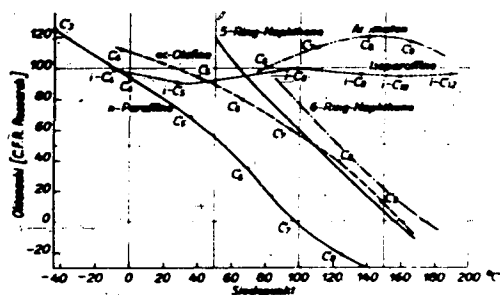


Abb. 4 Oktanzahlen und Siedepunkte von verschiedenen Kohlenwasserstoffen

zeigen, die meist für die Verwendung im Flugmotor nicht genügen, sind die nach neueren katalytischen Verfahren hergestellten Crack- und Reforming-Benzine infolge des Gehaltes an ungesättigten Kohlenwasserstoffen im allgemeinen klopffester. Für die Herstellung hochklopffester Kraftstoffe kommen die Verfahren der Hydrierung, Aromatisierung und Polymerisation (s. hierüber Beitrag IV C 11) in Frage. Über einzelne wichtige, hochklopffeste Kraftstoffanteile ist anschließend Näheres gesagt. Es sei allerdings darauf hingewiesen, daß sich das Gebiet der hochklopffesten Kraftstoffe in lebhafter Entwicklung befindet und Erfahrungswerte darüber noch nicht in ausreichendem Maße vorliegen.

Hochklopffeste Iso-Paraffine

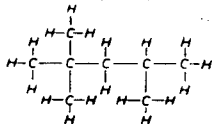
Die verzweigten Paraffine mit hoher Klopffestigkeit gewinnen als Flugkraftstoffe steigende Bedeutung, nachdem durch Entwicklung großtechnischer Herstellungs-Verfahren (Polymerisation und Alkylierung) die erforderlichen Mengen erzeugt werden können.

Iso-Oktan

Iso-Oktan C_8H_{18} (2,2,4-Trimethylpentan) ist einer der wichtigsten der hochklopffesten Kohlenwasserstoffe. Gemäß der Festlegung der Oktanzahlen als Maß der Klopffestigkeit ist ihm die Oktanzahl 100 zugeteilt.

Tafel 5: Kennwerte von reinem Iso-Oktan

Siedepunkt bei 760 mm QS	94°C
Wichte bei 20°C	0,691 g/cm ³
Schmelzpunkt	-108°C
Unterer Heizwert	10 680 kcal/kg
Literheizwert	7 400 kcal/ltr
Verdampfungswärme	72 kcal/kg
Dampfdruck bei 38°C	0,155 kg/cm ²



Es besitzt hohe Bleiempfindlichkeit (14,9 gemäß Definition S. 11) und geringe Verpichungsneigung. Gegenüber dem reinen Iso-Oktan erreicht technisches Oktan nicht ganz die OZ = 100. In Verbindung mit Bleitetraäthyl (s. Abb. 5) lassen sich mit technischem Iso-Oktan Klopffwerte über 100 für Flugkraftstoffe erreichen.

Als Ausgangsstoffe für seine Herstellung dienen die Gase der Stabilisier-Anlagen, die in Verbindung mit Crack- und Hydrier-Anlagen eingerichtet sind. Die Herstellung kann erfolgen durch Polymerisation über Butylen nach

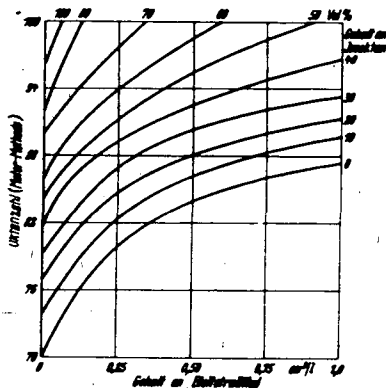
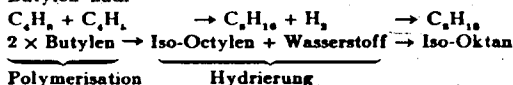


Abb. 5 Klopffestigkeit eines Destillationsbenzins (OZ=70) mit Bleitetraäthyl und Iso-Oktan (OZ=100)

oder durch Alkylierung über Butylen und Butan nach:



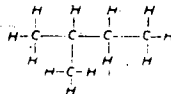
Alkylierung

Iso-Pentan

Mit einer Klopffestigkeit von MOZ = 90 gehört Iso-Pentan C_5H_{12} (2-Methylbutan) ebenfalls zu den hochklopffesten Kraftstoffanteilen. Seine Kennwerte sind folgende:

Tafel 6: Kennwerte von Iso-Pentan.

Siedepunkt bei 760 mm QS	31–28°C
Wichte bei 20°C	0,620
Schmelzpunkt	-158,5°C
Dampfdruck bei 38°C	1,43 kg/cm ²



Der niedere Siedepunkt und der hohe Dampfdruck machen die Verwendung des unvermischten Iso-Pentans als Flugkraftstoff unmöglich. In Mischung mit Iso-Oktan (Mischung 1:1 hat einen Dampfdruck von 0,366 kg/cm²) erweist es sich jedoch als sehr wertvoll zur Verbesserung des Startverhaltens. Es besitzt hohe Bleiempfindlichkeit. Iso-Pentan wird in den Vereinigten Staaten aus Erdgas gewonnen, es kann auch aus Alkylen und Propan durch Alkylierung z. B. nach



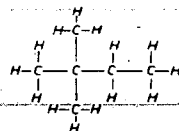
hergestellt werden.

Neo-Hexan

Neo-Hexan C_6H_{14} (2,2-Dimethylbutan) MOZ ~ 85 wird unter dieser Bezeichnung in den Vereinigten Staaten hergestellt. Seine technischen Daten sind folgende:

Tafel 7: Kennwerte von Neo-Hexan.

Wichte	50°C
Siedepunkt	0,654
Dampfdruck bei 38°C	0,87 kg/cm ²



Gegenüber Iso-Oktan besitzt Neo-Hexan einen höheren Dampfdruck, so daß es in Mischung mit Iso-Oktan Flugkraftstoffe mit üblicher Flüchtigkeit ergibt. Es

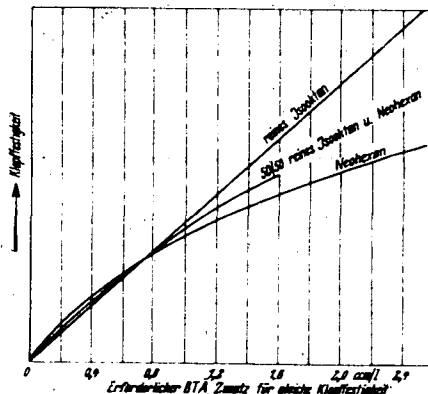


Abb. 6 Bleiempfindlichkeit von Neo-Hexan im Vergleich zu Iso-Oktan

ermöglicht mit Blei Oktanzahlen bis zu 115 zu erreichen. Über die gute Bleiempfindlichkeit des Neo-Hexans vgl. Abb. 6 [2].

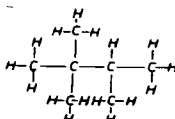
Die Herstellung erfolgt durch Alkylierung von Butan nach



Triptan

Dies ist die Bezeichnung für das klopffeste 2, 2, 3-Trimethylbutan, dem nach amerikanischen Veröffentlichungen Mischwerte zwischen MW=115 bis MW=128 zugeschrieben werden, während unmittelbare Bestimmungen der Klopfestigkeit eine MOZ=101 ergaben.

Wichte 0,690 kg/l
Siedepunkt 81° C
Dampfdruck bei 38° C 0,23 kg/cm²



Aromaten

Von den Aromaten kommen als Kraftstoffanteile Benzol, Toluol, Xylol und einige synthetisch hergestellte höhere aromatische Verbindungen in Frage. Alle Aromaten besitzen höhere Klopfwerte als die Iso-Paraffine mit gleicher Anzahl von C-Atomen. In Tafel 8 sind die Kennwerte für einige Aromaten zusammengestellt.

Tafel 8: Kennwerte einiger Aromaten.

	Benzol	Toluol	Athylbenzol	m-Xylol	p-Xylol
Summenformel	C ₆ H ₆	C ₇ H ₈	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀
Siedepunkt bei 760 mm Hg °C	80,4	110,5	185	188,9	188
Wichte bei 20°C	0,879	0,896	0,867	0,864	0,861
Schmelzpunkt °C	+4	-9,8	-84	-53	+13,2
Unt. Heizwert kcal/kg	9 600	9 680	9 645	9 740	9 740
Literheizwert kcal/ltr	8 450	8 680	8 860	8 400	8 380
Mischwert nach Research-Verfahren	106	120	128	144	154
Mischwert nach Motor-Verfahren	87	90	97	104	104
Dampfdruck nach Reid bei 88°C kg/cm ²	0,23	0,06	—	0,04	0,04

Für ihre flugtechnische Verwendung sind bei Benzol, Toluol und p-Xylol der ungünstig liegende Erstarungspunkt ein Hindernis, doch zeigen andere Aromaten, wie Athylbenzol oder m-Xylol, günstiges Kaltverhalten. Der Zusatz von Aromaten ergibt bei der Oktanzahlbestimmung ein nahezu der Zusatzmenge verhältnisses Ansteigen der Klopfestigkeit zum Unterschied von der charakteristischen, relativen Abnahme bei Zusatz von Bleitetraäthyl, vgl. Abb. 7.

Allen Aromaten ist eigen eine Abnahme der Klopfestigkeit bei höherer Lufttemperatur, wie dies der Vergleich der Mischwerte nach Research- und Motor-Verfahren beweist. Beim Motor-Verfahren zeigt sich ferner, daß der Zusatz von Aromaten die Bleiempfindlichkeit eines gegebenen Flugbenzins herabsetzt. So zeigt z. B. Abb. 8, daß die Steigerung der Klopfestigkeit eines verbleiten Benzins erst bei einem Zusatz von 50 vH Benzol einsetzt [3].

Die Aromaten sind Nebenerzeugnisse der Hochtemperaturverkokung von Steinkohle, doch sind auch Herstellungsverfahren der Hydrierung und Alkylierung in Anwendung.

Alkohole

Athyl- und Methylalkohol, die bisher praktisch erprobt wurden, besitzen verschiedene Eigenschaften, die sie für die motorische Verwendung sehr gut geeignet erscheinen lassen. An Hand der nachstehenden Tafel 9 läßt sich erkennen, daß ihnen hohe Verdampfungswärme und hohe Klopfestigkeit zukommen.

Tafel 9: Kennwerte von Alkoholen

	Athylalkohol	Methylalkohol
Summenformel	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ OH
Siedepunkt bei 760 mm Hg °C	78,8	64,5
Wichte bei 20°C	0,789	0,791
Verdampfungswärme	210	274
Unterer Heizwert	6 400	4 660
Literheizwert	5 060	3 670
Mischwert Res.-Verf.	180	180

In Gemischen mit Benzenen erhöht der Athylalkohol die Wasseraufnahmefähigkeit. Dies führte allerdings bei Überschreitung der Wasseraufnahmegrenze zu Entmischungen (s. hierüber S. 26). Methylalkohol mischt sich mit Benzin allein nur in geringer Mafte, besser in Verbindung mit Lösungsvermittlern, wie Isobutylalkohol

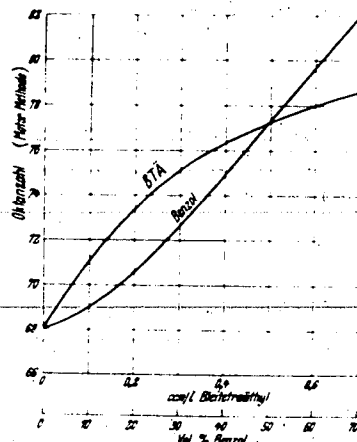


Abb. 7: Blei- und Benzolempfindlichkeit eines Flugbenzins

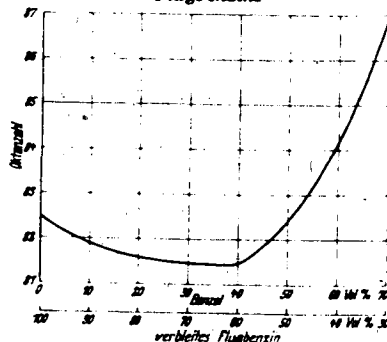


Abb. 8: Benzolempfindlichkeit eines bleihaltigen Flugbenzins mit OZ = 82,5 (nach Banks)

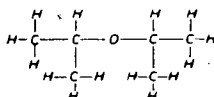
oder Benzol. Die hohe Klopfestigkeit in Verbindung mit der außerordentlich hohen Verdampfungswärme und dem dadurch bewirkten „Kompressor-effekt“ durch Abkühlung der Ladung macht sie für Rennkraftstoffe [4] sehr geeignet. Dagegen ist ihr niedriger Heizwert und die Neigung, in Mischungen mit Benzin übermäßig hohen Dampfdruck zu zeigen, einer allgemeinen Verwendung im Flugbetrieb im Wege.

Ather

Durch Abspalten von Wasser entstehen aus Alkoholen die zugehörigen Ather. Sie zeigen fast alle ungünstiges Klopfverhalten. Eine Ausnahme bildet der Isopropyläther [5], $C_4H_{10}O$, der seiner hohen Klopfestigkeit wegen als Flugkraftstoff empfohlen wird.

Tafel 10: Kennwerte von Isopropyläther

Siedepunkt bei 760 mm Hg °C	68
Wichte	0,725
Schmelzpunkt °C	-86
Verdampfungswärme kcal/kg	68,4
Unterer Heizwert kcal/kg	8660
Literheizwert kcal/ltr	6280



1. handelsüblichen Isopropyläther

Dampfdruck nach Reid kg/cm² 0,37
Oktanzahl nach Motor-Verfahren ~100

In Mischung mit Iso-Oktan und Blei lassen sich mit Isopropyläther-Motor-Oktanzahlen über 100 erreichen. Die Bleimündlichkeit des Isopropyläthers ist günstiger als die des Iso-Oktans, Abb. 9, desgleichen der Dampfdruck.

Andere Kraftstoffanteile

Außer den oben angeführten klopfesten Kraftstoffanteilen wurden eine größere Zahl von Stoffen mit guter Klopfestigkeit vorgeschlagen, über deren praktische Eignung noch nicht genügend Erfahrungen vorliegen, so daß aus diesem Grund nicht näher darauf eingegangen wird. Um eine Übersicht über die wichtigsten Stoffe zu geben, werden nachstehend in der Tafel 11 deren Kennwerte wiedergegeben [8].

β) Klopfhindernde Zusätze

Kennzeichnend für diese Stoffe ist, daß die erforderliche Zusatzmenge so gering ist, daß der Kraftstoff da-

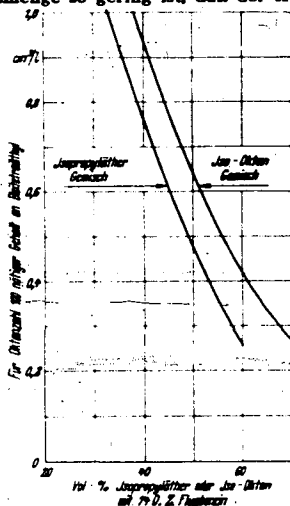


Abb. 9 Bleizusatz für OZ 100 von Flugkraftstoffen mit Isopropyläther und Iso-Oktan

durch in seinen physikalischen und chemischen Gütekennziffern praktisch nicht verändert wird, während bei den oben behandelten klopfesten Kraftstoffanteilen so große Mengen für eine deutliche Verbesserung des Klopfverhaltens erforderlich sind, daß durch das Beimischen ein neuer Kraftstoff entsteht. Die wirksamsten Stoffe dieser Art finden sich unter den metallorganischen Verbindungen, von denen das Bleitetraäthyl die weitaus größte Bedeutung hat, daneben auch einige aromatische Amine.

Bleitetraäthyl

Bleitetraäthyl $Pb(C_2H_5)_4$, ist eine ölige, farblose Flüssigkeit mit süßlichem Geruch. Es ist sehr giftig in seinen Dämpfen und Zersetzungsprodukten und wirkt sowohl als Atemgift als auch bei Berührung mit der Haut. Es kann Lähmungen und Krämpfe hervorrufen, ferner Schädigungen von Leber und Nieren, die tödlichen Ausgang nehmen können.

Bleitetraäthyl besteht zu 64 Gew.-% aus Blei, hat eine Wichte von 1,62 und einen Siedepunkt von 200° C. Es ist lichtempfindlich und zersetzt sich unter dem Einfluß des Lichtes unter Bildung von flockenartigen Niederschlägen. Diese Eigenschaft ist für die praktische Verwendung ohne Bedeutung, weil Kraftstoffe gewöhnlich in undurchsichtigen Behältern aufbewahrt werden, ist jedoch bei der Aufbewahrung von Proben zu beachten. Diese Ausflockung ist bei Zusatz zu Paraffinen größer als bei Aromaten. Sie kann durch Zusatz von Alkohol eingeschränkt oder durch eine 1%ige Lösung von Kaliumfluorid in Methanol (gemäß DRP. 675 410) zurückgedrängt werden.

Bei der Verbrennung wandeln sich die 4 Äthylgruppen zu Wasser und Kohlensäure um, während das Blei mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft sich zu Bleioxyd verbindet. Bleioxyd hat einen Schmelzpunkt von ungefähr 900° C und geht erst bei weitaus höheren Temperaturen in Dampf über. Um zu verhüten, daß sich Bleioxyd unterhalb der Verdampfungstemperatur im Motor ablagert, wird es in Mischung mit Äthylendibromid (oder Äthylendichlorid) verwendet, das jedoch keine klopfhindernde Wirkung besitzt. Das bei der Verbrennung frei werdende Brom aus dem Äthylendibromid bildet Bleibromid, das bereits bei 380° C schmilzt und bei etwa 820° C verdampft, so daß es im Zylinder in flüssiger Form vorhanden ist und mit den Auspuffgasen ausgeblasen wird.

Die Motoren, die mit bleihaltigen Kraftstoffen betrieben wurden, zeigen charakteristische Färbung an den gekühlten Stellen des Verbrennungsraumes und an den Einlaßventilen einen hellgrauen Ton, der sich über liches Gelb bis zu dunklem Rot und Braun an den heißen Stellen abwandelt. Im Betrieb mit bleihaltigen Kraftstoffen können Heiß- und Kaltkorrosion (s. S. 23) auftreten; letztere kann durch gewisse Korrosionsschutzöle hintangehalten werden.

Für die praktische Verwendung wird Bleitetraäthyl in fertiger Mischung mit Äthylendibromid unter der Bezeichnung „1-T-Fluid“ geliefert. Dieses ist intensiv blau gefärbt und setzt sich folgendermaßen zusammen:

Tafel 12:

Zusammensetzung und Kennwerte von 1-T-Fluid:

Bleitetraäthyl (BTA) rein	61,42 Gewichtsteile
Äthylendibromid	35,68 ..
Farbstoff, Petroleum und sonstige Beimengungen	2,90 ..
Wichte bei 20° C	1,755
Volumverhältnis Fluid: BTA	1,531
Gefrierpunkt °C	- 10,5
Flammpunkt °C	über 110

Tafel 11: Kennwerte klopfester Kraftstoffanteile

Art des Kraftstoffes	Siede- punkt bei 760 mm Hg °C	Dampf- druck n. Reid b. 38° C kg/cm²	Gefrier- punkt °C	Wichte bei 15° C	Ver- bren- nungs- wärme kcal/kg	Ver- damp- fungs- wärme kcal/kg	Oktanzahl*)		
							ASTM Motor- Verf.	CFR Res.- Verf.	U.S.- Army Ver- fahren
1. Paraffine									
2,2,4-Trimethylpentan (Isooktan)	100	0,155	— 108	0,696	11 400	78	100	100	100
handelsübl. gemischte Oktane	98 ... 117	0,09 ... 0,176	—	0,70 ... 0,72	11 400	78	95 ... 99	—	95 ... 99
Isopentan (2 — Methyl- butan)	28	1,7	— 160	0,625	11 600	89	90	—	—
2,2-Dimethylbutan	55	0,67	— 98	0,654	11 500	84	95	—	—
2,2,3-Trimethylbutan	82	0,23	— 25	0,694	11 450	78	100 + 0,26 cm³/l annäh.	—	100 + 0,26 cm³/l annäh. etwa 95
Isodekan (oxyd. Triiso- butylen) (Sicherheits- Kraftstoff)	180 ... 206	— 0,007	unter — 18	0,75 ... 0,76	11 350	—	—	—	—
2. Olefine									
Diisobutylene, gemischt	108	0,11	— 101	0,715	11 300	78	84	über 100	84
3. Naphtene									
Cyclohexan	82	—	+ 5	0,781	11 200	89	75	85	—
4. Aromaten									
Benzol	80	0,28	+ 4	0,884	10 000	95	100 + 1,6 cm³/l annäh.	über 100	88
Toluol	110	0,09	— 95	0,871	10 200	89	100 + 0,5 cm³/l annäh.	über 100	98
Xylol	138 ... 143	0,03	— 47 bis + 12	0,864 ... 0,865	10 300	84	100 + 0,5 cm³/l annäh.	—	99
5. Alkohole									
Methanol	65	0,37	— 98	0,797	5 280	263	98	—	87—90
Athanol	80	0,2	— 117	0,792	7 060	204	99	—	—
Isopropanol	83	—	— 89	0,791	8 000	160	—	—	etwa 100
6. Äther									
Diisopropyl	67	0,37	— 87	0,729	9 400	69	—	—	98 ... 99
tert. Butyläthyl	67	—	niedrig	0,74	9 400	—	—	—	100
7. Ketone									
Aceton	57	0,53	— 95	0,796	7 800	124	100	—	100
Methyläthyl	80	0,23	— 87	0,810	8 050	—	100	—	99
Methylisopropylketon	92	0,18	—	0,808	8 524	—	107	—	—
Pinakolin	106	0,10	—	0,815	8 900	—	112	—	—

*) Werte wie 100 + 1 cm³ bezeichnen cm³ BTA je l in Iso-Oktan.

Die Zusatzmengen zu Kraftstoffen beziehen sich immer auf reines Bleitetraäthyl und nicht auf Ethyl-Fluid. Sie sind wegen der Gefahr einer Zündkerzen-Korrosion mit 0,12 cm³ Bleitetraäthyl je Liter Flugkraftstoff begrenzt.

Bleiempfindlichkeit

Die Wirksamkeit einer bestimmten Menge Bleitetraäthyls läßt sich im Verhältnis zu anderen klopfhindernden Stoffen nicht durch eine Zahl ausdrücken. Ebenso wenig ist es möglich, die Erhöhung der Oktanzahl durch eine bestimmte Zusatzmenge vorausszusagen.

Die klopfhindernde Wirkung des Zusatzes an Bleitetraäthyl steigt nämlich nicht proportional der Zusatzmenge. Sie ist im allgemeinen bei kleinen Zusätzen relativ groß, verringert sich aber bei höheren Zusätzen. Diese Veränderung in der Wirksamkeit ist nicht bei

allen Benzin gleich, so daß es immer erforderlich wird, die „Bleiempfindlichkeit“ durch den praktischen Motorversuch zu bestimmen. Abb. 10 zeigt eine Bleiempfindlichkeits-Kurve für ein Flugbenzin.

Für die Bleiempfindlichkeit gelten folgende Erfahrungsregeln:

Die Wirkung einer bestimmten Zusatzmenge Bleitetraäthyl ist größer

1. bei einem Ausgangsbenzin von niedriger Oktanzahl,
2. bei überwiegend paraffinischen und naphtenischen Benzin, und geringer

1. bei Benzin mit einem größeren Anteil von ungesättigten Kohlenwasserstoffen (Olefinen) und Aromaten,

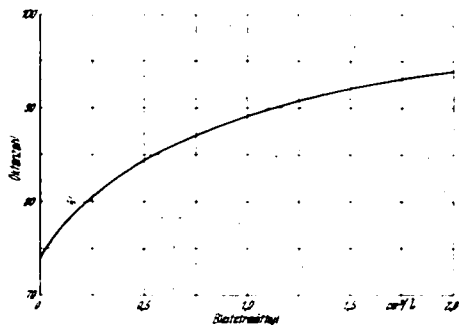


Abb. 10 Bleiempfindlichkeit eines Flugbenzins

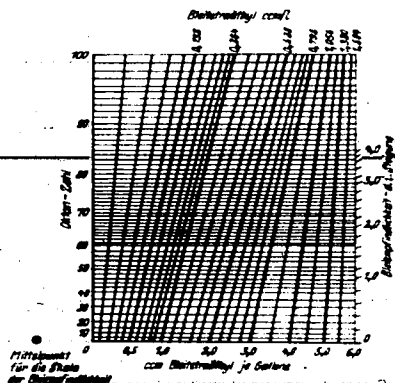


Abb. 11 Mischdiagramm für Bleibenzin (nach Motor-Methode) nach Hebl, Rendel und Garton

2. bei Benzin mit Schwefelgehalt,
3. bei Benzin mit Alkoholanteilen.

Es ist wünschenswert, die Bleiempfindlichkeit eines Benzins für Vergleichszwecke möglichst einfach zu ermitteln und an Hand einer Vergleichszahl zu beurteilen. Als Maßstab wurde die in logarithmischer Teilung aufgetragene Bleikurve vorgeschlagen. Hierfür wurde z. B. ein auf praktischen Messungen beruhendes Linienblatt [7], s. Abb. 11, aufgestellt, das die Ermittlung der Bleiempfindlichkeit aus zwei Meßpunkten ermöglicht. Man bestimmt die Oktanzahl nach der Motor-Methode für das unverbleite Benzin, ferner eine weitere Oktanzahl nach Zusatz von Bleitetraäthyl und verbindet diese beiden Punkte durch eine Gerade. Verschiebt man diese Gerade parallel, bis sie durch den links unten befindlichen Mittelpunkt der Bleiempfindlichkeits-Skala läuft, so läßt sich rechts die Bleiempfindlichkeit des betreffenden Benzins ablesen. Die Bleiempfindlichkeit 1 besitzt jenes Benzin, das im CFR-Motor unter den Bedingungen der Motor-Methode ein um 0,5 höheres Verdichtungsverhältnis zuläßt, wenn ihm je Gallone 2 cm³ BTA (= 0,53 cm³/l) zugesetzt werden.

Einfacher und genauer ist die Festlegung der Bleiempfindlichkeit durch eine Zahl gemäß dem Verfahren des Techn. Prüfstandes Oppau der I. G. Es gründet sich auf die in zahlreichen Versuchen bestätigte Feststellung, daß das Produkt aus der Grund-Oktanzahl (= Oktanzahl des bleifreien Benzins) und der Oktanzahlsteigerung bei ein und demselben Bleizusatz, z. B. 0,1%, un-

verändert bleibt. Es ist zweckmäßig, dieses Produkt durch 100 zu teilen, so daß sich dann eine einfache Zahl ergibt, die die Bleiempfindlichkeit verschiedener Benzine ohne weiteres zu vergleichen erlaubt. Wählt man entsprechend der charakteristischen Wirksamkeit des Bleizusatzes den Maßstab für die Bleimenge logarithmisch, so nähert sich die Bleikurve einer Geraden (Abb. 12).

Die Bleiempfindlichkeit läßt sich für jede Bleikonzentration aus Abb. 12, oberes Bild, ableiten. Es ist

$$\text{Bleiempfindlichkeit } E = \frac{OZ_{GB} \cdot (OZ_{BB} - OZ_{GB})}{K}$$

wobei OZ_{GB} = Oktanzahl des Grundbenzins,

OZ_{BB} = Oktanzahl des verbleiten Benzins, und

K = eine Konstante ist, die von der Größe der Bleigabe abhängt und aus Abb. 13 entnommen werden kann.

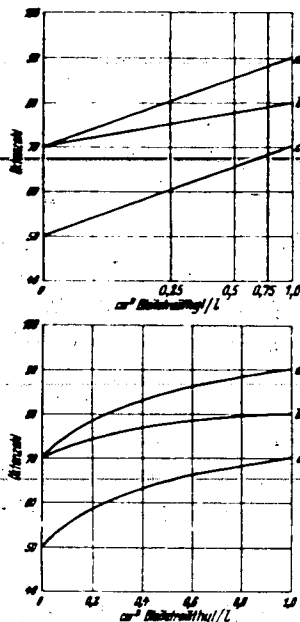


Abb. 12 Bleikurven in normaler und geradliniger Darstellung

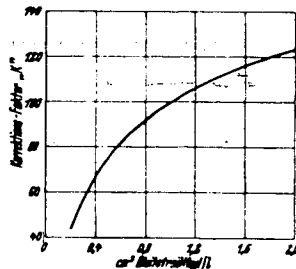


Abb. 13 Korrektionsfaktor K für verschiedene Bleigaben

Es ergibt sich danach für verschiedene Kraftstoffe bei Untersuchung nach der Motor-Methode und einem Bleizusatz von 1,0 cm³/ltr folgende Bleiempfindlichkeit:

Tafel 13: Bleiempfindlichkeit von Flugkraftstoffen.

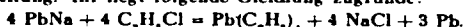
Kraftstoff	Bleiempfindlichkeit E bei 1 cm ³ /ltr Zusatz
Erdöl-Flugbenzine	11—12
Hydrier-Flugbenzine	12—14
Spaltbenzine	10—11
Iso-Oktan rein	15
Aromatenhaltige Benzine	11,5—12
Alkoholhaltige Benzine	10—11

Ist von einem Benzin außer der Oktanzahl die Bleiempfindlichkeit E bekannt, so kann die Oktanzahl für beliebigen Bleizusatz berechnet werden aus

$$OZ_{BB} = OZ_{GB} + \frac{K \cdot E}{OZ_{GB}}$$

Herstellung:

Ausgangsstoffe für die Herstellung von Bleitetraäthyl sind Äthylchlorid und eine Legierung aus Natrium und metallischem Blei. Abb. 14 gibt ein Schema für die Herstellung. Ihr liegt folgende Gleichung zugrunde:



Die Reaktionen vollziehen sich bei niedrigen Drücken und Temperaturen. Zur Verhütung von Seitenreaktionen und Zersetzung des thermisch instabilen Produktes ist eine strenge Überwachung der Betriebsbedingungen erforderlich.

Andere metallorganische Gegenklopfmittel

Eisenkarbonyl, Fe(CO)_5 , ist nach dem Bleitetraäthyl das wirksamste Antiklopfmittel. Es ist eine gelbe Flüssigkeit (Eisengehalt 28,6 vH, Wichte 1,45, Siedepunkt 103° C, Schmelzpunkt -20° C), die sich im Licht unter Abspaltung von Kohlenoxyd zu Eisennonakarbonyl $\text{Fe}_9(\text{CO})_{19}$ umbildet. Es mischt sich unter allen Verhältnissen mit Benzin. Im Gegensatz zu Bleitetraäthyl ist es nicht giftig.

Eisenkarbonyl verbrennt zu Eisenoxyd und Kohlen-säure. Das entstehende rote Eisenoxyd ist außerordentlich fein und wird zum größten Teil mit den Verbrennungsgasen abgeführt. Die mit eisenkarbonylhaltigen Kraftstoffen betriebenen Motoren zeigen schwache rote Befärbung des Verbrennungsraumes. Eisenkarbonyl wird im Flugbetrieb nicht verwendet.

Aus der Gruppe der Metallkarbonyle sind noch zu erwähnen:

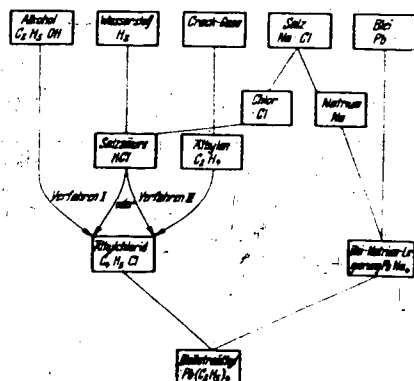


Abb. 14 Schema für die Herstellung von Bleitetraäthyl

Nickelkarbonyl, Ni(CO)_4 , (Wichte 1,3, Siedepunkt 43° C, Nickelgehalt 36 vH), ist etwa halb so wirksam bezüglich der Klopfverhinderung wie Bleitetraäthyl. Die praktische Verwendung ist dadurch stark behindert, daß Nickelkarbonyl in Lösung mit Benzin nicht beständig ist und schon nach kurzer Zeit Zersetzung eintritt. Nickelkarbonyl ist sehr giftig.

Kobaltkarbonyl, Co(CO)_5 , (Wichte 1,73, Siedepunkt 51° C, Kobaltgehalt 36 vH), ist etwa ¼ so wirksam wie Bleitetraäthyl.

Klopfhindernde Wirkung zeigen noch die Karbonyle des Molybdäns, Wolframs und des Chroms. Von anderen metallorganischen Verbindungen sind klopfhindernder Wirkung seien noch genannt: Blei-Diphenyl, Dimethyl, Blei-Diphenyl-Diäthyl, Blei-Diphenyl-Dijodid, Blei-Diphenyl-Dichlorid.

Aromatische Amine

Die klopfhindernden Verbindungen dieser Gruppe weisen eine bedeutend geringere Wirkung auf, als sie Bleitetraäthyl und Eisenkarbonyl besitzen, dagegen den Vorteil, daß sie bei der Verbrennung im Motor keinerlei Rückstände und Ablagerungen hinterlassen. Sie werden mit Ausnahme von Versuchen praktisch nicht verwendet.

Anilin, $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, (Wichte 1,015, Siedepunkt 184° C, Schmelzpunkt -6°), wird allein praktisch nicht angewandt. Dagegen wird es in Mischung mit verschiedenen Alkoholen als „Anilol“ dazu verwendet, vorübergehend die Klopfestigkeit des Flugbenzins zu erhöhen (Start, vorübergehende Mehrleistung des Motors). Zu diesem Zweck wird Anilol durch eine besondere Vorrichtung nach Bedarf in die Ansaugleitung eingespritzt.

Monomethylanilin, $\text{C}_7\text{H}_7\text{N}$ (Wichte 0,99, Siedepunkt 196° C, Schmelzpunkt -57°), ist wirksamer als Anilin.

Xylidin, $\text{C}_8\text{H}_9\text{N}$ (Wichte 0,99, Siedepunkt 226° C, Schmelzpunkt -49° C), ist als Antiklopfzusatz mehrfach untersucht.

Die Wirksamkeit der wichtigsten klopfhindernden Stoffe läßt sich mittels der nachstehenden Aufstellung vergleichen:

Angenäherte Zusatzmenge um 1 Liter Benzin von ROZ 67 auf ROZ 77 zu bringen

	cm Zusatzmenge	Verhältnis zu Bleitetraäthyl
Bleitetraäthyl	$\text{Pb(C}_2\text{H}_5)_4$	0,27 1
Eisenkarbonyl	Fe(CO)_5	0,90 3
Nickelkarbonyl	Ni(CO)_4	2,20 8
Kobaltkarbonyl	Co(CO)_5	3,60 13
Monomethylanilin	$\text{C}_7\text{H}_7\text{NHCH}_3$	15 55
Anilin	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	25 90
Xylidin	$\text{C}_8\text{H}_9\text{(CH}_3)_2\text{NH}_2$	40 150
Äthylalkohol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	125 460
Isobutylalkohol	$(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{CHCH}_2\text{OH}$	200 740
Xylol	$(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4$	250 925
Äthylbenzol	$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5$	270 1000
Toluol	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	270 1000
Aceton	$\text{C}_3\text{H}_7\text{O}$	270 1000
Isopropyläther	$(\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{O}$	380 1220
Iso-Oktan	C_8H_{18}	410 1520
Reinbenzol	C_6H_6	420 1560
Dimethylanilin	$\text{C}_6\text{H}_5\text{N(CH}_3)_2$	440 1650

Trotz der großen Zahl an klopfbesten Kraftstoffanteilen und Klopfbremsen darf doch nicht übersehen werden, daß die Übersicht über die Auswirkung der einzelnen Komponenten und damit die Sicherheit in der Handhabung der hochklopfbesten Kraftstoffe um so größer ist, je weniger Stoffe oder Stoffgruppen verschiedenen Charakters am Aufbau der Flugkraftstoffe beteiligt sind. Deshalb erscheint es auch richtig, die Entwicklung auf einige hochklopfbesten Kraftstoffe zu konzentrieren und diese zu möglichst umfassender Anwendung zu bringen.

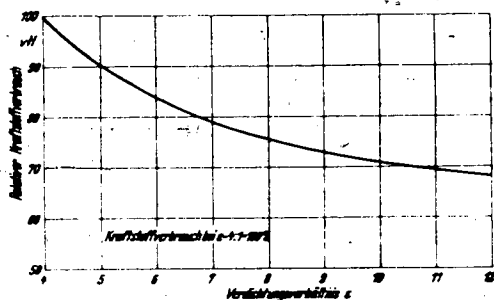


Abb. 15 Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis

c) Die motorischen Bedingungen für das Kraftstoffklopfen

Die Erkenntnis, daß die Leistung von Flugmotoren mit der Herkunft des Benzins und damit mit seiner Zusammensetzung schwankt, wurde bereits im Weltkrieg gewonnen. Die weitere Entwicklung der Flugmotoren hat dann immer mehr die engen Zusammenhänge zwischen der Kraftstoffbeschaffenheit und Leistung bzw. Verbrauch aufgedeckt und hier ganz besonders die Bedeutung der Klopfestigkeit für das Betriebsverhalten der Motoren hervorgekehrt. In der Tat sind Motor und Kraftstoff durch die Klopfestigkeit mehr als durch jede andere Eigenschaft in gegenseitiger Entwicklung verknüpft, so daß eine Darstellung über diese Kraftstoffeigenschaft auch eines kurzen Hinweises auf die motorischen Bedingungen für das Kraftstoffklopfen bedarf. Diese selbst sind bei jedem Motorenmuster verschieden und zum Teil in Wechselwirkung, so daß eine allgemeingültige Darstellung dieser Zusammenhänge nicht gegeben werden kann. Immerhin kann aber ein Anhalt für die Beurteilung des Einflusses der motorischen Bedingungen auf das Verhalten des Kraftstoffes an Hand einiger kennzeichnender Zusammenhänge gewonnen werden.

Die Erhöhung der Verdichtung zum Zweck der Leistungssteigerung und Verbrauchsminderung ist eine allgemein bekannte Maßnahme, deren Anwendung aber in der Klopfestigkeit des jeweils zur Verfügung stehenden Kraftstoffes ihre Grenze findet. Höhere Verdichtung erbringt neben höherer Leistung geringeren Kraftstoffverbrauch, Abb. 15, der aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und im Hinblick auf den Aktionsradius des Flugzeuges angestrebt wird. Hochklopfeste Kraftstoffe, die erlauben, die hohe Verdichtung auch bei Vermagerung klopfrei auszunutzen, ergeben beträchtliche Kraftstoffersparnisse. Sie ermöglichen volle Ausnutzung der Verdichtungssteigerung und verbessern den Gesamtwirkungsgrad des Motors (Abb. 16) und trotz höherer Kosten die Wirtschaftlichkeit des Flugzeuges. Die Klopfestigkeit des Kraftstoffes beeinflusst sehr wesentlich die Dauerleistung des Motors, wie aus Abb. 17 hervorgeht.

Aber auch aus Gründen der Betriebssicherheit ist die Unterdrückung des Klopfens notwendig. Die Umsetzung der Kraftstoffenergie in Motorleistung erfolgt bei klopfendem Betrieb in geringerem Maße als bei klopfreiem Betrieb, so daß ein Teil der Kraftstoffenergie die Zylinder übermäßig erhitzt (Abb. 18). Die Folge ist thermische Überbeanspruchung des Schmieröles, Ringstecken, vergrößerte Abnutzung und die Gefahr unmittelbarer Ausbrennungen infolge örtlicher Überhitzung. Andererseits gehen bei Verwendung von Kraftstoffen mit höheren Oktanzahlen geringere Wärmemengen an das Kühlmittel (Abb. 19)

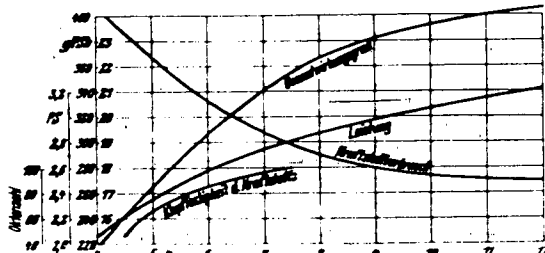


Abb. 16 Einfluß des Verdichtungsverhältnisses auf Leistung, Kraftstoffverbrauch und Gesamtwirkungsgrad, unter Verwendung von Kraftstoffen verschiedener Klopfestigkeit

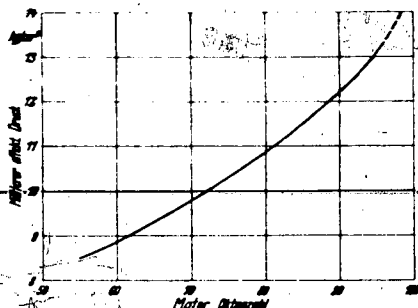


Abb. 17 Zulässiger mittlerer, effektiver Druck in Abhängigkeit von der Oktanzahl

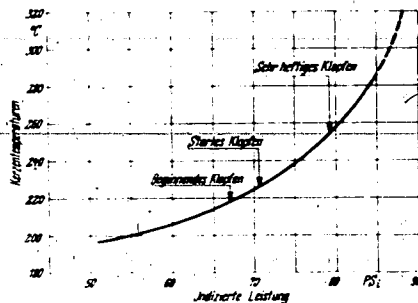


Abb. 18 Steigerung der Zylindertemperatur bei klopfendem Betrieb

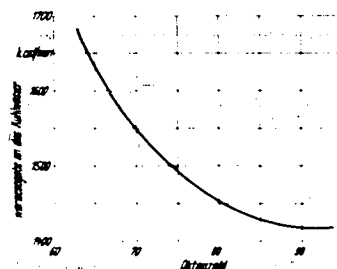


Abb. 19 Wärmeabgabe an das Kühlwasser bei Verwendung von Kraftstoffen verschiedener Klopfestigkeit

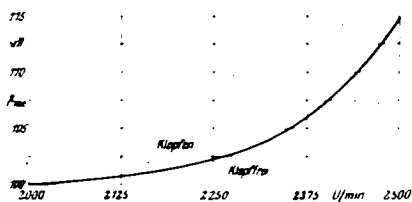


Abb. 20 Klopfgrenzkurve in Abhängigkeit von der Drehzahl

Einflüsse der Betriebsbedingungen

Das Klopfverhalten eines Kraftstoffes ist über den Betriebsbereich eines Motors nicht unveränderlich, sondern stark beeinflusst von den Betriebsbedingungen und ihrem Zusammenwirken. Über diese Einflüsse soll, weil es sich um ein Grenzgebiet zwischen Motorenbau und Kraftstoffkunde handelt, nur eine Übersicht gegeben werden.

Zündstellung

Vorverlegung des Zündzeitpunktes verstärkt das Klopfen bzw. ruft es hervor. Dies erklärt sich daraus, daß bei Frühzündung während des Verbrennungsaufbaues durch den aufwärtsgehenden Kolben eine zusätzliche Drucksteigerung eintritt, die zur Überschreitung der dem Kraftstoff eigenen kritischen Grenzen für Temperatur und Druck führen kann. Auf Kosten von Leistung und Verbrauch läßt sich daher auch durch Zurücknahme der Zündung das Klopfen unterdrücken.

Drehzahl

Bei sonst unveränderten Betriebsbedingungen bringt eine Erhöhung der Drehzahl eine Erhöhung des klopf-frei zu fahrenden Nutzdrukkes (Abb. 20), im vorliegenden Fall bei einer Drehzahlsteigerung von 1000 auf 2500 um 15 vH.

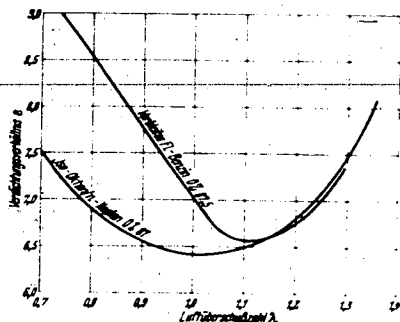


Abb. 21 Klopffestigkeit in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl

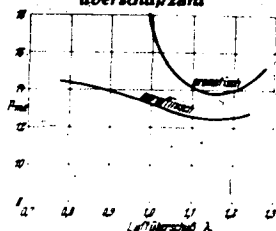


Abb. 22 Klopffestigkeit eines paraffinischen und eines aromatischen Flugbenzins in Abhängigkeit von der Luftüberschußzahl

Kraftstoff-Luftverhältnis

Die größte Klopfneigung besitzen die Kraftstoffe im allgemeinen in der Nähe des theoretischen Kraftstoff-Luft-Gemisches, d. h. für die Luftüberschußzahl 1,0 bis 1,1, Abb. 21. Es läßt sich also durch Überfetten oder Vermagern das Klopfen beeinflussen, allerdings auf Kosten von Leistung und Wirtschaftlichkeit. Kraftstoffe von niedriger Klopffestigkeit werden unabhängig von ihrem chemischen Aufbau ziemlich gleichmäßig durch das Kraftstoff-Luft-Verhältnis beeinflusst, dagegen zeigt sich bei Kraftstoffen mit hoher Klopffestigkeit eine besonders große Empfindlichkeit der verbleiten aromatenhaltigen Benzine (Abb. 22).

Gemischtemperatur

Der Einfluß der Gemischtemperatur hängt weitgehend vom chemischen Aufbau des Flugbenzins ab. Benzine mit Olefinen und Aromaten sind weitaus empfindlicher als solche naphthenischer oder paraffinischer Natur. In jedem Fall verschlechtert sich durch die Erhöhung der Gemischtemperatur das Klopfverhalten der Flugbenzine, Abb. 23.

Überladung

Überladung hat auf die Klopffestigkeit der Flugkraftstoffe dieselbe Auswirkung wie eine Verdichtungs-erhöhung. Mit steigendem Ladedruck tritt die Klopf-grenze früher in Erscheinung, Abb. 24. Das Verhalten verschiedener Kraftstoffe bei Betrieb mit Überladung läßt sich aus Abb. 25 ersuchen. Über die aus den Einflüssen verschiedener Betriebsbedingungen erwachsenden Schwierigkeiten in der Beurteilung der Klopffestigkeit von Flugkraftstoffen vergleiche auch den nächsten Abschnitt.

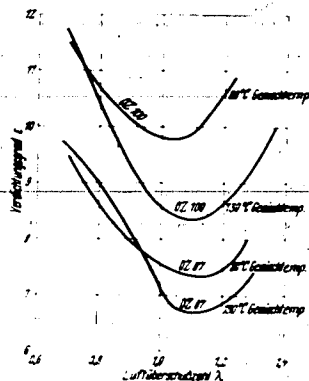


Abb. 23 Einfluß der Gemischtemperatur auf das Klopfverhalten bei verschiedenen Luftüberschußzahlen

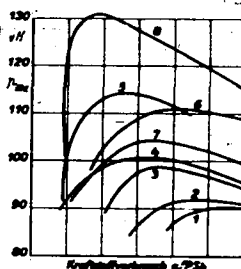


Abb. 24 Klopfgrenzkurven von 8 Kraftstoffen gleicher OZ 87

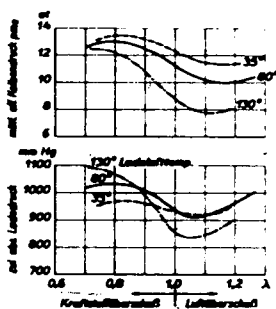


Abb. 25 Prüfung eines Kraftstoffes OZ 87 auf Überladbarkeit

d) Klopfmessung

Die Messung der Klopfestigkeit wird für Flugkraftstoffe ausschließlich in Prüfmotoren vorgenommen. Die hierfür in Frage kommenden Gesichtspunkte sind in dem Ringbuch-Beitrag IV C 4 zusammengefasst, so daß ihre Behandlung sich hier erübrigt.

Die Vorschriften für die motorische Prüfung der Klopfestigkeit sind in BVM 7070 bis 7084 enthalten.

Immer dringender wird darauf hingewiesen, daß die bisher geübte Festlegung der Oktanzahl nicht genügt, um ein Bild über das Klopfverhalten der einzelnen Kraftstoffe unter den verschiedenen Bedingungen des Flugbetriebes zu erhalten. Die Schwierigkeiten dieser Einpunkt-Methode werden z. B. auch dadurch veranschaulicht, daß bisher keine Einigung auf ein internationales anerkanntes Prüfverfahren erzielt werden konnte, sondern daß die amtlich anerkannten Prüfverfahren in den verschiedenen Staaten, wie Tafel 14 zeigt, voneinander abweichen.

Tafel 14: Prüfverfahren für Flugmotorenkraftstoffe.

Land	Meßverfahren	Verwendeter Motor	Drehzahl Umdr/min	Gemischvorwärmung °C
Deutschland	Motor	I.G.-Prüfmotor CFR-Motor	900	150
	DVL-Überladeverfahren	BMW 152-N-Einzyylinder	—	—
Italien	Research	I.G.-Prüfmotor CFR-Motor	600	keine
England und Frankreich	Motor (gemäßigt)	CFR-Motor	900	127
U.S.A.	U.S. Army-Air-Corps Motor	abgeänderter CFR-Motor	1200	keine
		CFR-Motor	900	150

Unsicherheiten in der Klopfwertbestimmung treten besonders bei den hochklopfesten Kraftstoffen etwa von OZ 87 an auf. Die Abweichungen im Verhalten der Flugmotoren sind in der Hauptsache bestimmt durch die Überladung, ferner durch die jetzt übliche Vermagerung des Gemisches, d. h. den Betrieb des Motors mit großem Luftüberschuß, und schließlich durch die vom Prüfmotor abweichende Zylindergröße. In diesen Richtungen sind hier ganz andere Verhältnisse vorhanden als bei der normalen Prüfung im Prüfmotor.

Abb. 24 zeigt, welche Unterschiede in der Bewertung von Kraftstoffen auftreten [8]. Es sind hier die Kurven der Klopfgrenze von 8 Kraftstoffen wiedergegeben, die die gleiche OZ 87, nach der Motor-Methode gemessen, haben. Als Maß der Klopfgrenze ist der mittlere Nutzdruk in Abhängigkeit vom spezifischen Kraftstoffverbrauch angegeben. Vielfach wird auch hierfür die Luftüberschusszahl λ herangezogen. Die Unterschiede in den

Leistungen der einzelnen Kraftstoffe betragen bis zu 40 vH. Die Versuche sind unter sonst ganz gleichen Bedingungen durchgeführt. Die unteren Kurven stellen paraffinreiche Kraftstoffe dar, die oberen Kurven dagegen mehr aromatische.

Während hier die Zusammensetzung der Kraftstoffe zum Ausdruck kommt, soll Abb. 25 zeigen, wie äußere Einflüsse, z. B. die Temperatur der Ladeluft, das Verhalten des Kraftstoffes verändern [9]: oben ist der mittlere effektive Kolbendruck an der Klopfgrenze gezeigt, unten der zulässige Ladedruck, beide in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl. Diese Versuche wurden in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt ausgeführt.

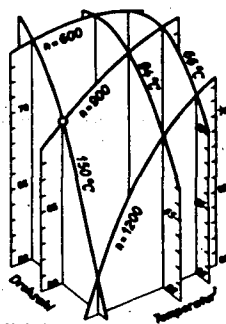
Folgende 4 Punkte wurden bei der jetzigen Oktanzahlbestimmung als Mängel bezeichnet:

1. Die Bestimmung der Klopfestigkeit erfolgt nur bei einer einzigen Ansang- bzw. Gemischtemperatur.
2. Die Gemischstärke wird nur auf stärkstes Klopfen eingestellt.
3. Die Durchführung der Vergleichsprüfungen geschieht bei sehr starkem Klopfen.
4. Die Temperaturabhängigkeit der heute verwendeten Bezugs- und Flugmotorenkraftstoffe ist verschieden.

Dieser Kritik kann man unter den heutigen Verhältnissen zustimmen. Es ist jedoch denkbar, daß man die Prüfbedingungen am Prüf-Motor so wählt, daß sie die in der Praxis vorkommenden ungünstigen Betriebsverhältnisse von einigen Flugmotoren nachahmen. Da aber nicht alle Flugmotoren gleiche Ansprüche an die Klopfestigkeit der Kraftstoffe stellen, so wäre zweckmäßigerweise noch deren Empfindlichkeit gegen Wärmeverhalten, Vermagerung, Überladung usw. anzugeben.

Aus allem diesem dürfte wohl zu erkennen sein, daß es nicht möglich sein wird, die Flugkraftstoffe mit einer einzigen Zahl zu kennzeichnen. Vielmehr müssen wir, wenn wir überhaupt Kennzahlen aufstellen wollen, Temperatur und Luftüberschuß zur Bewertung heranziehen. So zeigt z. B. Abb. 28 in einem dreidimensionalen System den Zusammenhang zwischen OZ, Temperatur und Drehzahl. Wir haben also schon für diese einfachen Fälle eine ziemlich verwickelte Darstellung. Das ganze Klopfverhalten erscheint als Funktion einer Anzahl von Veränderlichen. Ähnliche Vorgänge beobachten wir ja auf vielen Gebieten der Forschung.

Von den Betriebsverhältnissen im Flugmotor sind es, wie schon erwähnt, sein Wärmeverhalten und das Kraftstoff-Luft-Verhältnis, die sich auf die einzelnen Kraftstoffarten verschieden auswirken können. Aus diesem Grunde wurde vorgeschlagen [10], die Kraftstoffempfindlichkeit gegen diese beiden Veränderlichen als Ergänzung zu der jetzt gebräuchlichen Oktanzahlangabe nach der Motor-Methode mit heranzuziehen.



○ Bedingungen der Motor-Methode

Abb. 26 Abhängigkeit der OZ von Temperatur und Drehzahl

Das Klopfverhalten der Flugkraftstoffe unter den Bedingungen der Überladung wird gemäß BVM 7230 bis 7239 bestimmt. Gemessen wird hierbei die zulässige Überladung bei Klopfbeginn unter verschiedenen Luftverhältnissen. Als Prüfmotor dient der BVM-132 N-Einzylinder-Motor.

Für die Untersuchung im Einzylinder des Vollmotors sind allerdings erhebliche Kraftstoffmengen erforderlich, die insbesondere bei Laboratoriumsproben nicht immer zur Verfügung stehen. Es wurde daher versucht, den kleinen Prüfmotor so abzustimmen, daß er die gleiche Bewertung der Kraftstoffe erbringt, wie der Einzylinder des Vollmotors. Aussichtreich erscheint hier besonders die Abstimmung des I. G. - Prüfmotors, die nach den Versuchen des Technischen Prüfstandes Oppau der I. G. Farben festgelegt wurde und als „Oppauer Verfahren“ bezeichnet wird.

Klopfverhalten des Motors

Die Verbesserung der Oktanzahlbestimmung erfordert auch eine bessere Charakterisierung der Motoren im Hinblick auf die Anforderungen, die sie an das Klopfverhalten der Kraftstoffe stellen. Die Erkenntnis, die besondere Eigenart des Motors mit der des Kraftstoffes in Übereinstimmung zu bringen, hat dazu geführt, daß verschiedene Verfahren der Klopfmessung im Flugmotor von den Motorherstellern und Prüfstellen entwickelt wurden (vgl. Tafel 15), die allerdings einen Vergleich zwischen den einzelnen Motortypen schwierig machen.

Tafel 15:

Verfahren der Klopfmessung im Flugmotor [1].	
Wright	Kraftstoffverbrauch/h gegen spez. Kraftstoffverbrauch, Zyl.-Kopf-Temp. u. Leistung (zusätzlich Maximaldruck der Verbrennung).
Bristol	spez. Kraftstoffverbrauch/h gegen p_{max} , kritische Klopftemperatur der Ansaugluft.
NACA	Ladedruck gegen Verdichtung und Ansauglufttemperatur.
DVL	p_{max} gegen Luftüberschuß (bei verschiedener Ansauglufttemperatur).
N.R.C. Canada	Verbrauch/h gegen spez. Kraftstoffverbrauch, Leistung, Zyl.-Kopf-Temperatur.

Klopfmessung ohne Motor.

Es hat nicht an Vorschlägen gefehlt, die motorische Prüfung durch eine einfachere Prüfung an einem handlichen Laboratoriumsgerät zu ersetzen. Bisher hat kein Prüfverfahren auch nur annähernd die Zuverlässigkeit und Sicherheit der motorischen Prüfung erreicht, und erst recht nicht war es möglich, die Einflüsse der Betriebsbedingungen in solchen Prüfverfahren wiederzugeben. Von den Vorschlägen zur motorischen Klopfestigkeitsprüfung seien hier zunächst diejenigen erwähnt, die sich auf die chemische Analyse des Kraftstoffes stützen. Selbst wenn man den Anteil der einzelnen Gruppen der Kohlenwasserstoffe (Paraffine, Olefine, Naphtene, Aromaten) gut ermitteln könnte und die Klopfestigkeit der einzelnen Kohlenwasserstoffe bekannt wäre, wäre die Bestimmung der Klopfestigkeit von einzelnen Kohlenwasserstoffgemischen nicht möglich, weil die Klopfestigkeiten der Komponenten sich nicht addieren. Es kann daher die Feststellung des Anteiles an Paraffinen, Olefinen, Naphtenen und Aromaten lediglich ganz grob ein Anhalt für die Klopfestigkeit eines Kohlenwasserstoffgemisches sein. Für verbleibende Kraftstoffe ist eine solche Voraussage schon der unbekannten „Bleiempfindlichkeit“ wegen überhaupt praktisch unmöglich.

Ebensowenig lassen sich aus physikalischen Kennwerten der Kraftstoffe Voraussagen über die Klopfestigkeit machen. Auf Grund von statistischen Ermitt-

lungen über die Zusammenhänge zwischen der Dichte, Oberflächenspannung und der nach dem Motor-Verfahren bestimmten Oktanzahl wurde von Marder [12] vorgeschlagen, den sogen. spezifischen Parachor

$$p = \frac{\sigma^{1/4}}{d} \quad \begin{array}{l} \sigma = \text{Oberflächenspannung} \\ d = \text{Dichte} \end{array}$$

als Kennwert für die Klopfestigkeit zu verwenden und damit den Klopfwert aus der physikalischen Beschaffenheit bzw. chemischen Zusammensetzung zu errechnen. Aus einem Diagramm, das die Oktanzahlen für ein Benzin mit einer Siedekennziffer = 110 in Abhängigkeit vom Parachor zeigt, kann der Klopfwert entnommen werden. Die tatsächliche OZ ergibt sich an Hand der Siedekennziffer des Kraftstoffes durch eine einfache Umrechnung.

Die Klopfwertermittlung aus dem Parachor ergibt nur für chemisch eng verwandte Benzine einigermaßen befriedigende Werte. Sie stimmt nicht für Benzine mit Bleizusatz, auch nicht für solche mit Alkoholbeimischung. Derartige Zusätze müssen bei der Errechnung des Parachors durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Ganz krasse Unstimmigkeiten ergeben sich bei der Anwendung der Methode auf reine Kohlenwasserstoffe. Beispiel: n-Heptan und Iso-Oktan mit praktisch gleichem Parachor besitzen um 100 OZ verschiedene Klopfwert.

Wie an diesem Beispiel zu erkennen ist, sind es vielfach die Verzweigungen der Iso-Paraffinkohlenwasserstoffe, die stark aus der Reihe fallendes Klopfverhalten aufweisen. Es wurde deshalb vorgeschlagen [13], den Anteil an verzweigten Paraffinen zu bestimmen. Ein hierfür ausgearbeitetes Verfahren liefert die Verzweigungszahl Z, die angibt, wieviel Verzweigungen im Durchschnitt in einem beliebigen Gemisch auf ein Molekül entfallen (Z ist für Heptan 0, für Iso-Oktan 3).

Es wurde ferner versucht, für die Klopfmessung den Selbstzündpunkt eines Kraftstoffes, d. i. jene niedrigste Temperatur, bei der in reichlichem Sauerstoffstrom ohne Fremdzündung Selbstentzündung des Stoffes eintritt, heranzuziehen. Für die Bestimmung des Selbstzündpunktes wurden verschiedene Geräte in Vorschlag gebracht, die dementsprechend von Gerät und Prüfbedingungen abhängige Zündwerte liefern. Von diesen wird der Zündwertprüfer von Jentsch im besonderen für Treibstoffe empfohlen. Mit ihm wird der Zünd-

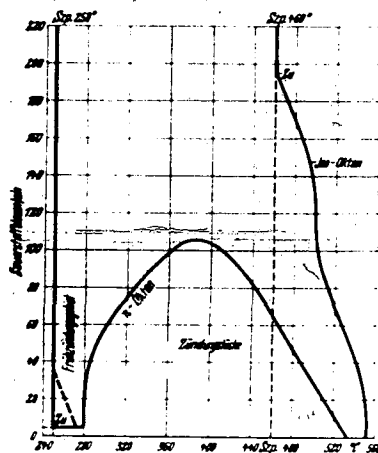


Abb. 27 Selbstzündungskurven von n-Oktan und Iso-Oktan

punkt bei gewöhnlichem Druck unter verschiedener Sauerstoffmenge und Temperatur bestimmt. Es ergeben sich damit außer oberem und unterem Zündpunkt auch Zündwertkurven in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zahl der dem Gerät in der Minute zugeführten Sauerstoffblasen.

Bei der Ermittlung der Selbstzündungskurven im Jentschschen Zündwertprüfer zeigt sich, daß verschiedene Kraftstoffe, vorzugsweise solche überwiegend kettenförmigen Charakters, eine sogen. Zündungslücke ergeben [14], Abb. 27.

Kennzündwerte, die aus den im Zündwertprüfer gewonnenen Werten ermittelt werden, wurden über eine Eichkurve in Beziehung zu den nach dem Motorverfahren bestimmten Oktanzahlen gebracht. Eine im Auftrag des Reichsverkehrsministeriums durchgeführte Gemeinschaftsarbeit deutscher Forschungsstellen ergab jedoch, daß der Zündwertprüfer von Jentsch so weit auseinanderliegende Werte erbrachte, daß ein Vergleich mit den Werten der motorischen Prüfung schon nicht mehr zulässig erscheint.

Für die zuverlässige Messung der Klopfestigkeit kommt also nur die Prüfung im Motor in Frage. Sie wird, trotz bestehender Unzulänglichkeiten, an deren Behebung eifrig gearbeitet wird, von einer Prüfung anderer Art kaum zu verdrängen sein.

2. Flüchtigkeit

- a) Siedeverhalten
 - α) Siedegerät
 - β) Beurteilung der Siedekurve
 - γ) Kennziffer und Fraktionsziffer
 - δ) Schmierölverdünnung
- b) Dampfdruck
 - α) Dampfdruckmeßgerät
 - β) Dampfdruck und Vergasungsgeschwindigkeit
 - γ) Dampfblasenstörung (vaporlock)
- c) Verdampfungswärme
- d) Oberflächenspannung

Die Aufbereitung des Kraftstoff-Luft-Gemisches für den Otto-Motor erfordert ausreichende Flüchtigkeit des Kraftstoffes. Diese bestimmt die Startwilligkeit des Motors, sichert die rasche Einleitung und den vollständigen Ablauf der Verbrennung und verhindert Kraftstoffverluste durch Kondensatbildung und Motorschäden durch Schmierölverdünnung.

Ein motortechnisches Verfahren zur Ermittlung der Kraftstoff-Flüchtigkeit im Betrieb ist noch nicht vorhanden. Es ist daher notwendig, die Flüchtigkeit der Otto-Kraftstoffe an Hand von Siedeverhalten, Dampfdruck und Verdampfungswärme, gegebenenfalls auch Oberflächenspannung, zu beurteilen. Mit Hilfe der hierfür eingeführten Prüfverfahren können keineswegs die Verhältnisse bei der Gemischbildung im Motor wiedergegeben werden. Diese herkömmlichen, aus der Praxis entstandenen Verfahren erlauben lediglich Schlüsse auf das Verhalten des Kraftstoffes im Motor und auf seine Zusammensetzung.

a) Siedeverhalten

Mit Ausnahme der motorisch verwendeten Alkohole sind die Flugkraftstoffe nicht einheitliche Stoffe, sondern Gemische aus Kohlenwasserstoffen. Daher besitzen sie beim Verdampfen unter einem bestimmten Druck nicht einen Siedepunkt, sondern sie weisen einen der Zusammensetzung aus verschiedenen Stoffen entsprechenden Siedebereich auf. Die Siedeanalyse dient dazu, diesen Temperaturbereich festzustellen und zu ermitteln, wie unter den gegebenen Bedingungen die Verdampfung verläuft.

a) Siedegerät

Für die Bestimmung des Siedeverhaltens werden genannte Geräte verwendet, für Flugkraftstoffe gemäß den Bauvorschriften für Flugmotoren 7100 bis 7108 das von der American Society for Testing Materials (abgekürzt ASTM) festgelegte Gerät (Abb. 28). In dem Gerät werden jeweils 100 cm³ Kraftstoff destilliert. Durch die Abkühlung der Kraftstoffdämpfe mit Eiswasser werden die Verluste an leichtflüchtigen Anteilen gering gehalten.

Das Gerät ergibt 2 Meßwerte:

1. die Temperatur im Kolben,
2. die übergegangene Menge im Meßglas (Vorlage).

Es werden der Siedebeginn und ferner die Übergangsmengen bestimmt, die den von 10 zu 10° ansteigenden Temperaturstufen entsprechen, schließlich die Temperatur für 90 und 95 cm Übergang. Der Abschluß des Destillationsvorganges, die Temperatur des Siedeschlusses, ist unsicher zu bestimmen. Der im Kolben verbleibende Rückstand und der Destillationsverlust werden bestimmt und angegeben.

Temperaturen und zugehörige übergegangene Mengen geben die Koordinaten für die Siedekurve (Abb. 29). Für größere Abweichungen vom normalen Luftdruck von 760 mm müssen die Temperaturen nach BVM 7113 korrigiert werden.

Das Gerät läßt sich auch in Verbindung mit einer Vakuumpumpe verwenden, so daß das Siedeverhalten bei vermindertem Luftdruck großen Flughöhen entsprechend bestimmt werden kann.

Gefordert wird von guten Flugbenzinen und Flugbenzolen, daß sie eine Siedekurve von stetigem Verlauf ergeben.

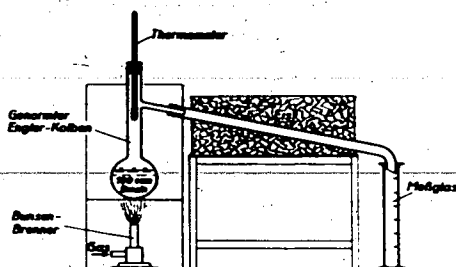


Abb. 28 ASTM - Siedegerät

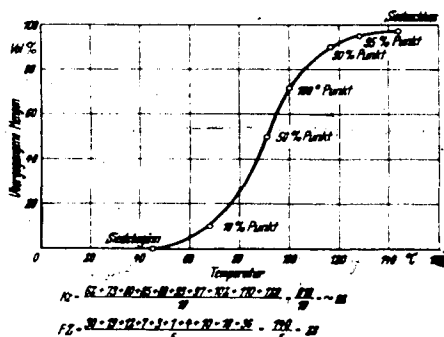


Abb. 29 Siedekurve eines Flugbenzins mit Kennzeichnung der charakteristischen Punkte

β) Beurteilung der Siedekurve

Es ergibt sich folgende Beurteilung der charakteristischen Punkte einer Siedekurve:

Siedebeginn: Temperatur beim ersten Kraftstofftropfen am Ende des Rückkühlers (nur ungenau feststellbar).

10%-Punkt: Dient als Anhalt für die Startwilligkeit des Kraftstoffes und Neigung zur Dampfblasenbildung bei alkoholfreien Kraftstoffen.

Er liegt für Flugbenzin bei 65–80° C, für Flugbenzol bei ~85° C.

50%-Punkt: möglichst unter 100° C liegend, gibt einen Anhalt für das Startvermögen des Kraftstoffes bzw. dafür, wie der Motor in der Anwärperiode Gas „annimmt“. Bei Anlaßkraftstoffen gehen jedoch bis 100° C mindestens 85 vH über.

90%-Punkt: Anhalt dafür, ob eine vollständige Verdampfung vor dem Eintritt des Kraftstoff-Luft-Gemisches in die Zylinder des Motors gewährleistet ist. Ferner Anhalt für die etwaige Gefahr der Schmierölverdünnung.

95%-Punkt: Er ist ein besseres Maß für den Endpunkt der Destillation, als der

Siedeschluß, der nur auf etwa $\pm 3^\circ \text{C}$ genau zu ermitteln ist.

Siederückstand ist stets vorhanden. Er stellt den durch die Einwirkung der Flamme veränderten (gekrackten) Kraftstoffrest dar. Aus einer geringeren Flüchtigkeit kann nicht auf einen Gehalt an schwerflüchtigen Anteilen geschlossen werden.

Siedeverlust tritt durch gelöste Gase und sehr niedrig siedende Anteile, die nicht kondensieren, auf. Der Siedeverlust weist auf diese Anteile und zugleich auf die mit ihnen verknüpfte Gefahr der Dampfblasenbildung hin. Gegenüber dem Siedeverhalten der Autobenzine weisen die Flugbenzine späteren Siedebeginn, größeren Übergang bei 100° C und früheren Siedeschluß auf.

Die Technischen Lieferbedingungen bezüglich des Siedeverhaltens sind in Tafel 16 enthalten.

Tafel 16: Siedeziffern für Flugbenzine.

Übergang	Flugbenzin
10 %	bis 70° C
50 %	.. 100° C
95 %	.. 150° C
Siedeschluß	< 165° C
Destillationsverlust	< 2 %

Es wurde vorgeschlagen, für Einspritzmotorenbetrieb den Siedeschluß auf 180° festzusetzen.

Da die Siedekurve gewissermaßen eine Anzeigerreihe der Siedepunkte der einzelnen Kraftstofffraktionen darstellt, zeigt sie je nach der Zusammensetzung des Kraftstoffes verschiedenen Verlauf. Siedekurven von Flugbenzin und Flugbenzol zeigt Abb. 30.

Gemischkraftstoffe geben Siedekurven, die die Gemischbestandteile erkennen lassen (Abb. 31). Alkoholhaltige Kraftstoffe zeigen erhebliche Siedepunkt-Depressionen, d. h. sie bilden Gemische, die bei tieferer Temperatur siedend als der tiefsiedende Bestandteil. Dadurch ergibt sich eine Vermehrung des tiefsiedenden An-

teils und ein steiler Anstieg der Siedelinie auf die Siedetemperatur des restlichen Benzins, sobald der Alkohol übergegangen ist.

γ) Kennziffer und Fraktionsziffer

Für überschlägige Beurteilung der Siedelage eines Kraftstoffes dienen Kennziffer und Fraktionsziffer. Kennziffer (in Amerika ähnlich der „average boiling point“, in England der „equilibrium boiling point“) ist die mittlere Siedetemperatur. Man berechnet sie praktisch hinreichend genau, indem die für 5, 15, 25 und 95 vH übergegangene Menge zugehörigen Siedetemperaturen addiert und durch 10 geteilt werden.

Die Fraktionsziffer mißt die mittlere Steigung der Siedekurve. Sie ergibt sich, wenn die zu 5, 15, 25 und 95 vH Übergang zugehörigen Temperaturen ermittelt werden, deren absolute Unterschiede gegen die Kennziffer ohne Rücksicht auf das Vorzeichen addiert und die Summe durch 5 geteilt werden. Sie bezeichnet einen idealen Siedebereich von $\pm n^\circ \text{C}$ über und unter der Kennziffer. Für die Siedekurve des Flugbenzins in Abb. 30 ergibt sich eine Kennziffer $KZ = \sim 92$ und eine Fraktionsziffer $FZ = \pm 28$. Zur scharfen Trennung von Vielstoffgemischen [15], wie es die Flugkraftstoffe sind, in die einzelnen Verbindungen bzw. Fraktionen wurden besondere Destillieraufsätze (Kolonnenrohr mit Drahtspirale) [16] entwickelt, um die Fraktionswirkung zu verstärken.

δ) Schmierölverdünnung

Schwersiedende Kraftstoffanteile sind eine Gefahr für den Motor, weil sie im Motor schlecht verdampfen, z. T. unverbrannt bleiben und in das Schmieröl übertreten. Derart mit Kraftstoffanteilen vermisches, sogen. „verdünntes“ Schmieröl büßt seine Schmierfähigkeit ein, um so mehr, je größer der Gehalt an Kraftstoffanteilen ist. Um die Neigung eines Kraftstoffes zur Schmierölverdünnung zu beurteilen, wird das Ende der Siedekurve herangezogen, hauptsächlich der 90%-Punkt und der Siedeschluß. Als Maß für die Schmierölverdünnung gelten die aus dem Öl durch Wasserdampf von 150° C austreibbaren Anteile. Sie werden in vH der gesamten Ölmenge angegeben.

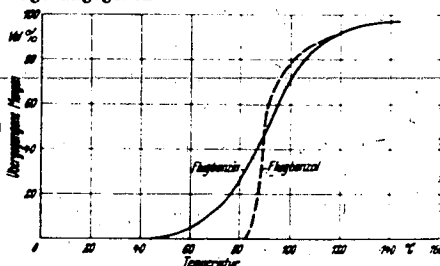


Abb. 30 Siedekurven von Flugbenzin und Flugbenzol

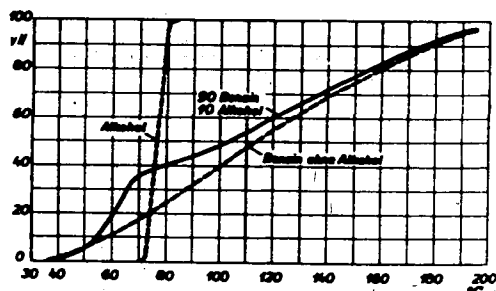


Abb. 31 Siedekurven eines Benzin-Alkohol-Gemisches

In Amerika verwendet man als Anhalt für die Neigung zur Schmierölverdünnung den Taupunkt, d. i. die Verdampfungstemperatur eines Flugkraftstoffes in dem der praktischen Vergasereinstellung entsprechenden Luftüberschuß.

Infolge des früheren Siedeschlusses der Flugbenzine (etwa bei 160° C) ist die Gefahr der Schmierölverdünnung im Flugbetrieb gering. Wiederholt wurde sogar der Zusatz von Flugbenzin zum Schmieröl zur Erleichterung des Starts ausgeführt. (Vgl. Ringbuchbeitrag IVC 5, S. 13.)

b) Dampfdruck

Der Dampfdruck läßt sich für einheitliche Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur eindeutig ermitteln. Für Stoffgemische, wie es die Flugkraftstoffe sind, wirkt sich der Partialdruck jeder Mischkomponente in der Flüssigkeit und im Dampf gesondert aus. Der Dampfdruck solcher Stoffgemische läßt sich daher nicht eindeutig bestimmen, weil er von dem Verhältnis der Flüssigkeitsmenge zu dem über ihr vorhandenen Dampfolumen abhängt. Bei gegebener Temperatur und gegebenem Druck ist im Gleichgewichtszustand eine bestimmte Zusammensetzung des Gemisches und eine ihr entsprechende Zusammensetzung des Dampfes vorhanden und umgekehrt.

a) Dampfdruckmeßgerät

Weil aus diesem Grunde der absolute Dampfdruck für Kraftstoffe nicht angegeben werden kann, bestimmt man diesen nach einem verabredeten Verfahren. Gemäß den Bauvorschriften für Flugmotoren 7130–7138 wird hierfür das Gerät von Reid benutzt (Abb. 32). In diesem wird eine Probe des Kraftstoffes bei 38° C wiederholt mit etwa der 4fachen Luftmenge geschüttelt. Dabei entwickeln sich im Dampfraum Kraftstoffdämpfe, deren Dampfdruck durch ein Manometer gemessen wird (vgl. Abb. 33).

Die Technischen Lieferbedingungen schreiben für Flugbenzine einen Dampfdruck nach Reid bei 38° C von < 0,5 atü vor, für Anlaßkraftstoffe (95 bis 98 vH leicht-siedendes Benzin und 4 bis 5 vH Flugmotorenöl) jedoch zwischen 0,9 und 1,5 atü.

Für den Dampfdruck von Kohlenwasserstoffen besteht die allgemeine Beziehung

$$\log p = A - \frac{B}{T},$$

wobei A und B empirisch bestimmte Konstanten für die einzelnen Kohlenwasserstoffe sind. Für einige Kraft-

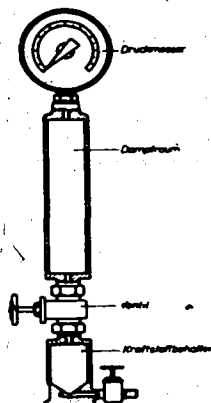


Abb. 32 Dampfdruckmeßgerät nach Reid

stoffe wird diese Beziehung im Schaubild Abb. 33 dargestellt, wo als Ordinaten $\log p$ und $1/T$ aufgetragen sind. Die Kurven erscheinen hier als Gerade.

Alkoholhaltige Kraftstoffe zeigen ein Ansteigen des Dampfdruckes gegenüber dem der Mischkomponenten bis zu einem Höchstwert, der bei etwa 25 vH Alkoholanteil liegt (Abb. 34).

Verschiedene hochklopfste Kraftstoffe weisen gegenüber Flugbenzinen niedrigere Dampfdrücke — vgl. Tafel 17 — auf, wodurch ihre Verwendbarkeit in größeren Höhen und ihre Lagerfähigkeit wegen geringer Verdunstungsverluste begünstigt wird.

Tafel 17: Dampfdrücke von Flugkraftstoffen.

Kraftstoff	Dampfdruck nach Reid / 88° C kg/cm²
Flugbenzin	0,4–0,5
Reinbenzol	0,23
Toluol	0,08
Xylol	0,04
Iso-Oktan	0,15
Äthylalkohol	0,18
Isopropyläther	0,87

Höher Dampfdruck führt zu erheblichen Kraftstoffverlusten bei der Lagerung (bis zu 5 vH/Jahr).

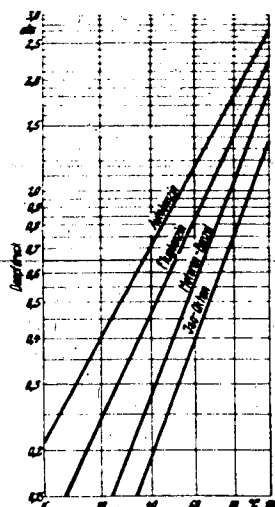


Abb. 33 Dampfdrücke von Kraftstoffen

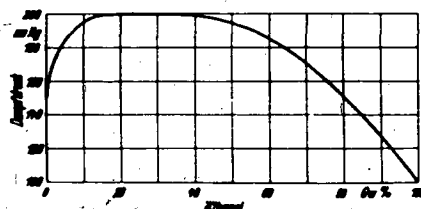


Abb. 34 Dampfdruck von Äthanol-Benzin-Gemisch

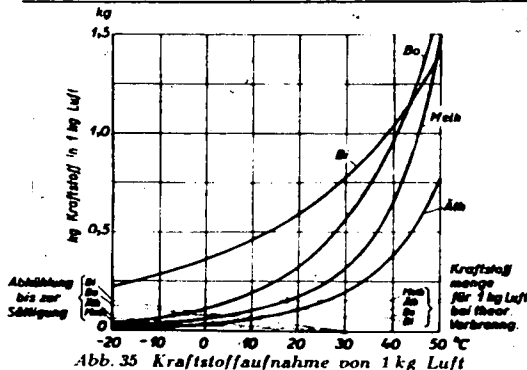


Abb. 35 Kraftstoffaufnahme von 1 kg Luft

β) Dampfdruck und Vergasungsgeschwindigkeit

Aus dem Dampfdruck läßt sich ermitteln, wieviel Kraftstoff die Verbrennungsluft bis zur Sättigung aufnehmen kann. Diese Aufnahme ist abhängig von der Temperatur. Je höher die Temperatur der Luft ist, desto mehr Kraftstoff kann sie aufnehmen. Das Schaubild Abb. 35 zeigt die Kraftstoffaufnahme von 1 kg Luft mit Benzin, Benzol, Athanol und Methanol. Man sieht, daß z. B. bei 20° C die Menge von 0,59 kg Benzin, von 0,33 kg Benzol, von 0,18 kg Methanol und von 0,11 kg Athanol aufgenommen wird. Aus diesen Mengen kann man keine, die Vergasungsbereitschaft betreffenden Schlüsse ziehen.

Man muß vielmehr diese bei Sättigung aufnehmbaren Mengen mit denen vergleichen, die von derselben Luftmenge zur vollständigen Verbrennung beim theoretisch richtigen Kraftstoff-Luft-Verhältnis benötigt werden. Diese sind von der Temperatur unabhängig. Sie betragen für 1 kg Luft 0,0688 kg bei Benzin, 0,075 kg für Benzol, 0,155 kg für Methanol und 0,111 kg für Athanol. Sie sind im Diagramm durch gestrichelte Linien wiedergegeben. Die Schnittpunkte dieser Linien mit den Kurven geben für jeden Kraftstoff die Temperatur an, unterhalb der ein theoretisch richtiges Kraftstoff-Luft-Verhältnis nicht mehr möglich ist, da hier die Sättigung liegt. Bei 20° C nimmt die Luft bei Benzin rund das 8- bis 9fache, bei Benzol rund das 4- bis 5fache der stöchiometrischen Kraftstoffmenge auf, bei Methanol und Athanol hingegen gerade nur die stöchiometrische Menge. Die Darstellung zeigt also klar, daß Benzin und Benzol eine viel größere Verdampfungsgeschwindigkeit haben und somit viel schneller ein brennbares Gemisch bilden als Methanol und Athanol. Hinzu kommt noch, daß die Verdampfungswärme, auf 10 000 kcal bezogen, bei den Alkoholen das 5- bis 8fache beträgt. Infolge der starken Abkühlung, die dadurch bewirkt wird, sinken Dampfdruck und Verdampfungsgeschwindigkeit.

Der Dampfdruck und damit die Startwilligkeit und Vergasungsbereitschaft wird durch eine gewisse Menge an niedrigsiedenden Anteilen mit hohem Dampfdruck (Butan und Pentan) erhöht. Besondere Anlaßkraftstoffe sind gemäß den Lieferbedingungen mit hohem Dampfdruck (0,9 bis 1,5 atü) auszustatten. Wenn der Dampfdruck bei manchen hochklopfesten Flugkraftstoffen den zulässigen Erfahrungswert unterschreitet, kann er durch Zusatz von Isopentan erhöht werden. Dies darf allerdings nur innerhalb jener Grenzen geschehen, die durch die Gefahr der Dampfblasenstörung gegeben sind.

γ) Dampfblasenstörung (vaporlock)

Zu hoher Dampfdruck gibt Anlaß zur „Dampfblasenbildung“ (vaporlock-Störung) [17], [18]. Dampfblasenbildung verursacht eine Unterbrechung der regelmäßigen Zumeßarbeit des Vergasers und der Benzinpumpe, weil

der Kraftstoff durch Kraftstoffdampf unterbrochen wird. Die Dampfblasenbildung ist temperatur- und druckabhängig. Für die Temperatur, bei der Dampfblasenbildung auftritt, gilt nach Allfrey [19] folgende Gleichung:

$$t^{\circ}\text{C} = 85,4 + 78 \log p/p_r$$

mit p = Außendruck

p_r = Dampfspannung des Kraftstoffes nach Reid.

Diese Blockierungstemperatur ändert sich mit der Höhe. Für ein Flugbenzin mit Dampfspannung 0,49 kg/cm² gibt das nachstehende Schaubild (Abb. 36) die Verhältnisse wieder. Es ist daraus zu ersehen, daß die Blockierungstemperaturen höher liegen, als sie üblicherweise in den Rohrleitungen auftreten. Damit ist im Regelfall Dampfblasenbildung bei diesem Flugbenzin in den Leitungen nicht zu erwarten. Es bestimmt der Dampfdruck des verwendeten Flugbenzins auch die Flughöhe des Flugzeuges (Abb. 37) bei Freiheit von Dampfblasenstörung. (Vgl. auch Ringbuchbeitrag IVC 5.)

Wohl aber kann trotzdem Dampfblasenbildung an der Düse oder Kraftstoffpumpe auftreten, wenn der Kraftstoff im Vergaser oder in der Pumpe durch den Motor stark erwärmt wird. Daher ist der Wärmeübergang vom Motor her, die Wärmestrahlung und in heißen Gegenden auch die Sonnenbestrahlung der kraftstoffführenden Teile zu verhindern. Den Zusammenhang zwischen Temperatur und Dampfdruck für ein bestimmtes Flugbenzin zeigt Abb. 38.

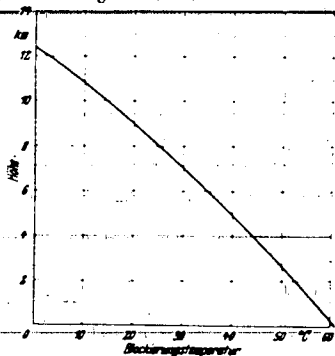
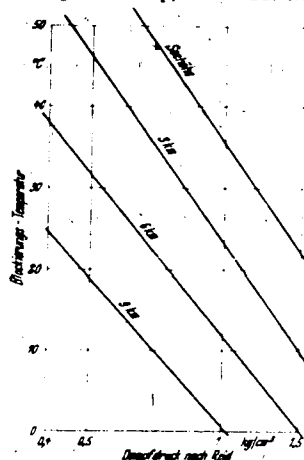
Abb. 36 Blockierungstemperaturen für ein Benzin mit 0,49 kg/cm² Dampfdruck nach Reid

Abb. 37 Flughöhe, Dampfdruck und Blockierungstemperatur

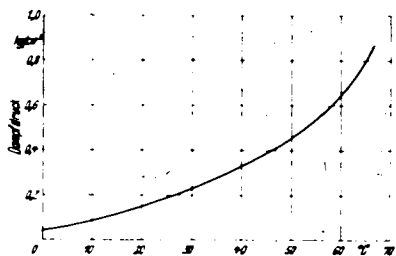


Abb 38 Dampfdruck eines Flugbenzins in Abhängigkeit von der Temperatur

Eine der Dampfblasen-Störung gleichkommende Blockierung kann entstehen, wenn die Kraftstoffpumpe ein geringes über dem Kraftstoffspiegel des Behälters liegt. Die Pumpe saugt dann ein Gemisch aus Kraftstoff und Dampf an. Sobald der Dampfanteil zu groß wird, wird der Motor unter Kraftstoffmangel leiden.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß eine der Dampfblasenbildung ähnliche Störung auch dadurch zustandekommen kann, daß die im Kraftstoff gelöste Luft (etwa 0,19 Volum-vH) unter dem geringeren Druck in größeren Höhen frei wird. Allfrey [20] hat diese Erscheinung untersucht und festgestellt, daß sich die Störung durch Verlegung der Rohrleitungen und Verwendung geeigneter Rohrweiten vermeiden läßt. Es hat sich daher als zweckmäßig erwiesen, in die Kraftstoffleitung Gasabscheider einzubauen, um Motoraussetzer in größeren Höhen zu vermeiden, oder die Tanks unter Druck zu setzen.

Zum raschen Starten von Flugmotoren werden besondere Anlaßkraftstoffe verwendet. Sie bestehen aus rund 95 vH leichtflüchtigem straight-run-Erdölbenzin oder aus Hydrierbenzin, dem ein Zusatz (von 4 bis 5 vH Flugmotorenöl vom Typ des Aero Shell mittel oder Intava 100 beigemischt sind. Der Dampfdruck soll zwischen 0,9 und 1,5 atü nach Reid liegen. Die hohe Flüchtigkeit ist gekennzeichnet durch den 10%-Punkt von höchstens 34° C und den Übergang von mindestens 85 vH bei 100° C. Ihr entspricht die niedrige Wichte, die zwischen 0,640 und 0,690 liegt. Die Klopfestigkeit soll mindestens der Motor-Oktanzahl 70 entsprechen.

c) Verdampfungswärme

Die Güte der Aufbereitung des Kraftstoff-Luft-Gemisches und seine Wichte werden von der Verdampfungswärme des verwendeten Kraftstoffes mitbestimmt. Weil die Wichte bzw. das Gewicht der Ladung den volumetrischen Wirkungsgrad des Motors beeinflussen, hat die Verdampfungswärme auch Einfluß auf die Leistung des Motors. Die nachstehende Tafel 18 gibt für einige Kraftstoffe die Verdampfungswärmen und den Temperaturabfall, der sich aus der Verdampfung des flüssigen Kraftstoffes bei theoretischem Kraftstoff-Luft-Verhältnis errechnet. Die Tafel läßt erkennen, daß die Alkohole

Tafel 18: Verdampfungswärmen und Temperaturabfall

Kraftstoff	Verdampfungswärme kcal/kg	Verdampfungswärme kcal/1000 kcal	Luft- bedarf kg/kg	Temperatur- abfall des Gemisches
n-Hexan	86,6	75,0	15,2	21,0
n-Heptan	78,8	65,0	15,1	18,0
n-Oktan	71,1	62,8	15,06	16,2
n-Decan	60,0	52,8	15,0	11,2
Benzol	95,5	99,5	13,2	26,0
Cyclohexan	86,6	77,5	14,7	21,5
Athanol	220,5	344,0	8,95	82,7
Methanol	284,0	605,0	6,44	140,0

gegenüber den Benzin-Kohlenwasserstoffen erheblich höhere Verdampfungswärmen aufweisen, Methanol z. B. etwa das Zehnfache der Benzinkohlenwasserstoffe, auf gleiche Kalorien bezogen. Dementsprechend ist auch die Gemischabkühlung bei der Verdampfung der Alkohole erheblich stärker und in Verbindung mit ihr ein erheblich höheres Gewicht der Ladung erzielbar (Kompressor-effekt der Alkohol-Kraftstoffe).

Die durch Abkühlung der Ladung erreichbare Leistungssteigerung kann, wie die nachstehende Tafel 20 zeigt, ganz erheblich sein und sie ist der Grund dafür, daß fast alle Rennkraftstoffe Alkohol enthalten [21].

Tafel 20: Leistungssteigerung durch Alkoholgemische (nach Howes)

Kraftstoff	Leistung PS	Relative Leistung
50 + 50 Benzin-Benzol	38,7	100
50 + 50 Athanol-Benzin	44,0	113,6
50 + 50 Methanol-Benzin	44,7	115,5
Methanol	49,3	127,4

Die kühlende Wirkung der hohen Verdampfungswärme alkoholhaltiger Kraftstoffe erlaubt auch stärkere Aufladung oder höhere Verdichtung, erschwert aber auch die Gemischbildung dadurch, daß die Verdampfungsgeschwindigkeit herabsetzt, so daß die Startbereitschaft des Motors dadurch beeinträchtigt werden kann.

Die starke Abkühlung beim Vergasen alkoholhaltiger Kraftstoff-Luft-Gemische macht diese im allgemeinen für den Flugbetrieb weniger geeignet, nicht allein der Startschwierigkeiten wegen, sondern auch wegen der Vereisungsgefahr für den Vergaser, die sich im Dauerbetrieb bei hohem Feuchtigkeitsgehalt der-Ansaugluft einstellen kann. Vereisung des Vergasers und der Saugrohre tritt auch bei alkoholfreien Kraftstoffen ein, wenn Wasser als Luftfeuchtigkeit und in Form der stets vorhandenen Spuren im Kraftstoff gelösten Wassers zugegen ist. Außerdem nehmen Einfluß darauf:

1. Flüchtigkeit und Verdampfungswärme des Kraftstoffes,
2. Vergasereinstellung,
3. Druck- und Temperatur der-Ansaugluft und
4. Wärmeübertragung zwischen dem Vergaser und seiner Umgebung.

Nach englischen [22] und amerikanischen [23] Arbeiten nimmt die Gefahr der Eisbildung im Vergaser mit reichem Kraftstoff-Luft-Gemisch und besserer Flüchtigkeit des Kraftstoffes zu. Die früher angewandte Regel, nach der die Summe aus 10-, 50- und 90%-Punkt 260° C nicht übersteigen soll, hat ihre Gültigkeit nicht voll erwiesen. Der nach ASTM korrigierte 50%-Punkt ist als Anhalt für die Eisbildung besser geeignet.

Gegen die Vereisung des Vergasers hat sich neben der Anwärmung des Vergasers oder der Ansaugluft [24] das Aufspritzen von Alkohol oder, noch besser, von Anilol, einer aus verschiedenen Alkoholen und Anilin bestehenden Flüssigkeit, als zweckmäßig erwiesen. Die Wirkung des Anilols entspricht in allem dem üblichen Aufschmelzen des Eises durch Streuen von Salz u. dgl.

d) Oberflächenspannung

Für die Bestimmung der Oberflächenspannung, veranschaulicht durch die Kapillarkonstante (mg/mm), gibt es verschiedene Methoden. Verhältnismäßig rasch und einfach ist die Bestimmung im Stalagmometer nach Traube aus dem Tropengewicht durchzuführen. Die Oberflächenspannung von Benzenen beträgt 20 bis 25 mg/mm (dyn/cm), wobei die höheren Werte Braunkohlenbenzenen zukommen. Sie spielt bei der Zerstäubung des Kraftstoffes insofern eine Rolle, als die Stabilität des Kraftstoff-Luft-Gemisches davon mitbestimmt

wird. Kraftstoffe mit hoher Oberflächenspannung lassen sich schlechter zerstäuben. Die Zusammenhänge zwischen Oberflächenspannung, Zerstäubungswilligkeit und chemischem Aufbau werden als Forschungsauftrag des Reiches studiert.

3. Reinheit

- a) Verstopfende Verunreinigungen
- b) Anfressende Verunreinigungen
 - a) Korrosion durch den Kraftstoff
 - Schwefel und Schwefelverbindungen
 - Säuren und Laugen
 - Wasser
 - Schutz der kraftstoffführenden Teile vor Korrosion
 - b) Korrosion durch Verbrennungsprodukte
- c) Harzbildende Verunreinigungen
 - a) Vorgebildetes Harz
 - b) Neugebildetes Harz
 - γ) Jodzahl
 - δ) Erwärmungswert

Die Kraftstoffe der Flugmotoren sollen klar und frei von Verunreinigungen durch feste Körper und solche chemischer Art sein. Erstere wirken verstopfend, letztere angreifend oder verpichend.

a) Verstopfende Verunreinigungen

Schmutz und Fremdkörper im Kraftstoff bewirken Verstopfungen an den Kraftstoffhähnen, den Leitungen — hier besonders an den Krümmungen —, an den Kraftstofffiltern und in den Vergaserdüsen. Sie treten weitaus häufiger auf bei Kraftstoffen, die in Kannen und Fässern befördert werden, als bei Lieferungen aus dem Tankwagen. Alkoholhaltige Kraftstoffe lösen Schmutz von den Wandungen der Tanks ab; können also trotz Reinheit beim Einfüllen Störungen durch Verstopfungen herbeiführen, wenn unsaubere Tanks vorliegen. Schutz vor derartigen Verschmutzungen gibt sorgfältiges Filtern.

Es kommen hauptsächlich folgende Verunreinigungen vor:

Von der Lagerung herrührend:

1. Rote oder braune, meist staub- oder pulverförmige Rückstände von Eisenoxyd- oder Eisenhydroxyd (Rost), aus eisernen Tanks und Kesselwagen stammend.
2. Weiße, feinkörnige oder schlammige Rückstände, meist Zink- und Bleikarbonate, herrührend aus neuen oder frisch verzinkten oder verbleiten Fässern oder Tanks. Da sich die Oberfläche der Behälter nach der Bildung der Carbonate mit einer Schutzschicht überzieht, so ist diese Störung jeweils nur eine einmalige Erscheinung.
3. Fasern, von unbrauchbar gewordenen Fäldichtungen herrührend.
4. Gummiteile, die von schadhaft gewordenen Schläuchen stammen.
5. Sonstige Reste, wie Firnis, Öl, Harz, meist aus vorhergegangener Aufbewahrung solcher Stoffe in den betreffenden Fässern oder Tanks. Sie treten besonders bei Füllung mit Alkoholkraftstoffen in Erscheinung.

Aus dem Kraftstoff selbst:

1. Schwarze, schuppige Rückstände von Schwefelkupfer, entstanden durch Einwirkung „aktiven“ Schwefels auf Kupferleitungen, oder Motorteile aus kupferhaltigen Legierungen.
2. Graphit von Obenschmieröl-Zusätzen zum Kraftstoff.
3. Suspensionen von Korrosionsprodukten, die von Angriffen des Kraftstoffes oder seiner Verunreinigungen auf die Behälterwände herrühren und durch die Erschütterungen beim Transport losgelöst werden.

Bei Kälte können auch Ausscheidungen von Einkristallen aus dem im Kraftstoff gelösten Wasser stattfinden. Auch Benzol- und Naphthalin-Kristalle aus ungenügend kältefestem Motorenbenzol wurden beobachtet. Der Beginn der Kristallausscheidung wird nach BVM 7150 ermittelt.

b) Anfressende Verunreinigungen

a) Korrosion durch den Kraftstoff

Schwefel und Schwefelverbindungen

Der Schwefelgehalt an sich ist nicht maßgebend für die Korrosion durch den Kraftstoff. Sein Gehalt braucht in dieser Hinsicht nicht beschränkt zu werden. Störend sind nur gewisse „aktive“ Schwefelverbindungen, diese aber dann schon in Bruchteilen eines mg Schwefel im Liter. Zu diesen aktiven Formen des Schwefels gehört der elementare Schwefel selbst, der Schwefelkohlenstoff, viele Mercaptane usw. Ihre Gegenwart ist ein Zeichen ungenügender Refinement.

Besonders gefährdet sind die aus Kupfer und kupferhaltigen Legierungen hergestellten Teile (Leitungen, Tanks, Vergaser). Das Verhalten von Kupferblechen in Benzin, dem verschiedene Schwefelverbindungen zugesetzt waren, zeigt Abb. 39. Das gebildete schwarze Schwefelkupfer ist spröde, blättert leicht ab und oxydiert bei Luftzutritt, so daß stets dieselben Flächen dem Angriff bis zur Zerstörung neu ausgesetzt sind. Der Nachweis des aktiven Schwefels erfolgt durch die Kupferstreifen-Probe gemäß BVM 7200. Der Schwefelgehalt eines Flugkraftstoffes wird nach BVM 7190/91 ermittelt. Wenn auch die Kupferstreifen-Probe als maßgebende Probe für Schwefelverbindungen anerkannt ist, so gibt sie doch nur einen Anhalt für die Einwirkung des Kraftstoffes auf Kupfer. Es wurden auch für andere im Motorenbau verwendete Metalle Korrosionswerte ermittelt (25). Es lassen sich jedoch keine Gesetzmäßigkeiten für den Angriff der Kraftstoffe auf die Metalle feststellen, so daß es nötig ist, jeweils Korrosionsuntersuchungen an allen Metallen auszuführen, mit denen der Kraftstoff in Berührung kommt, wobei möglichst die Bedingungen einzuhalten sind, die der Kraftstoff im Betrieb vorfindet. Die Korrosion wird durch den Gewichtsverlust gekennzeichnet, den Probestreifen im Kraftstoff innerhalb 24 Stunden bei 50° C erleiden. Höhere Temperaturen ergeben im allgemeinen höhere Korrosionswerte, doch tritt diese Steigerung besonders bei raffinierten Kraftstoffen wenig oder gar nicht auf.

Säuren und Laugen

Flugkraftstoffe können geringe Anteile an Säuren enthalten, die entweder infolge unzureichender Reinigung von der Raffinerie her im Kraftstoff blieben oder

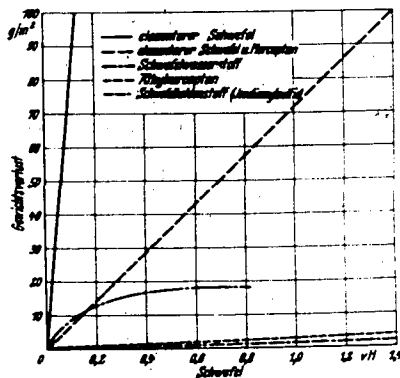


Abb. 39 Korrosion an Kupferblechen in Benzin mit verschiedenen Schwefelzusätzen

von ungesättigten Verbindungen im Kraftstoff herühren, die manchmal nach längerem Lagern saure Eigenschaften erlangen, weil sie sich über Peroxyde zu sauren Produkten umbilden. Schon geringe Anteile an Säuren im Kraftstoff können Metallteile angreifen. Deshalb schreiben die Technischen Lieferbedingungen für Flugbenzine vor, daß der Kraftstoff „frei von Säure“ sein soll. Nachweis erfolgt durch die Bestimmung der Säurezahl (Neutralisationszahl) gemäß BVM 7180. Sie gibt an, wieviel mg Kaliumhydroxyd erforderlich sind, um bei Zimmertemperatur die freien Säuren in 1 g Kraftstoff zu neutralisieren. Die oben erwähnte Kupferstreifen-Probe läßt an dem Aussehen des Streifens auch die Gegenwart freier Säuren erkennen.

Laugen können von Waschprozessen bei der Herstellung der Flugkraftstoffe herrühren und sind durch Schütteln mit Alkalibläu (Lunge-Berl, II/1, S. 122) feststellbar.

Wasser

Alkoholhaltige Kraftstoffe können je nach der Zusammensetzung Wasser lösen. (Vgl. über Wasserlösungsvermögen der Kraftstoffe, S. 26.) Wasser kann in die Kraftstoffe entweder durch ungeschickte Handhabung, Unachtsamkeit oder aber durch Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft (Abb. 40) gelangen. Das aufgenommene Wasser wird bei Abkühlung abgeschieden und kann u. U. heftige Korrosion hervorrufen. Es ergibt sich dabei auf Stahl, Rost, auf Kupfer, eine schwarze, abplatzende Haut und mit Aluminium und einzelnen Spritzgußlegierungen Gallerten. Die Angriffe sind, der Elementenbildung wegen, stärker bei Berührung verschiedener Metalle, wie z. B. Kupfernieten in Aluminium oder Duralumin.

Bleihaltige Kraftstoffe verursachen bei Anwesenheit von freiem Wasser im Kraftstoff besonders starke Angriffe in Kraftstoffbehältern aus Leichtmetall mit einem hohen Gehalt an Magnesium, wie z. B. Elektron. Gegenmaßnahmen sind das Eintauchen der Behälter in ein Bad aus Chromsalpetersäure und Einführen einer Pa-

trone mit Natriumfluorid in den Tank (Verfahren der I. G. Farbenindustrie A.G.). Die Ethyl Gasoline Corporation stellt für den gleichen Zweck eine Patrone aus Calciumchromat und Borax her.

Schutz der kraftstoffführenden Teile vor Korrosion

Der beste Schutz der kraftstoffführenden Teile wäre die Entfernung der korrodierenden Anteile aus den Kraftstoffen. Die damit verbundenen Kosten und Raffinationsverluste sind jedoch wirtschaftlich nicht tragbar. Es wird daher erforderlich, die kraftstoffführenden Teile, vor allem Tanks und Lagerbehälter, vor dem Angriff der Kraftstoffe zu schützen. Für Kraftstoffbehälter hat sich verzinktes und verzinnertes Blech bewährt, während verbleite Bleche zu Beanstandungen führten [26]. Es wurden ferner mit gutem Erfolg Lacküberzüge angewandt. Hierfür sind die üblichen Lacke allerdings nicht geeignet, denn alle Kraftstoffe lösen Lacke mehr oder weniger stark auf, am wenigsten destillierte und Hydrierbenzine, es folgen Spaltbenzine, Benzole und mit stärkster Wirkung Alkoholgemische. Dagegen haben sich Lacke aus deutschen Kunstharzen, die bei 100 bis 180° C eingebrannt werden, auch bei Alkoholgemischen gut bewährt, sofern der Überzug dicht genug aufgetragen ist. Allerdings wirken auch bei ihnen freier Schwefel und Säure im Kraftstoff korrodierend. Eine zu starke Lackschicht wirkt ungünstig, denn sie besitzt zu geringe Elastizität; sie springt bei starken Stoßbeanspruchungen der Behälter teilweise ab und legt dadurch den Werkstoff frei.

β) Korrosion durch Verbrennungsprodukte

Die Auspuffgase wirken hauptsächlich korrodierend durch ihren Gehalt an schwefliger Säure und Schwefelsäure, die aus dem stets vorhandenen Gehalt des Kraftstoffes an schwefelhaltigen Bestandteilen bei der Verbrennung entstehen. Der Schaden, den sie am Material des Motors und durch Beeinflussung des Schmieröls ausüben, läßt sich aber durch Begrenzung des Schwefelgehaltes der Kraftstoffe so weit einschränken, daß Betriebsstörungen nicht zu führen sind. Diese obere Grenze wird im allgemeinen für Flugkraftstoffe zu 0,1 vH Gesamtschwefel festgesetzt, liegt aber praktisch nur bei 0,04 bis 0,05 vH.

Die Hersteller von Flugkraftstoffen streben eine Erhöhung des zulässigen Schwefelgehaltes an (bei den Autokraftstoffen sind 0,3 vH Schwefel, bei zweiten Sorten bis 0,5 vH zulässig). Man will damit die Raffinationsverluste und -kosten verringern. Dem steht bei bleihaltigen Flugkraftstoffen jedoch weiterhin entgegen, daß viele schwefelhaltigen Verbindungen die klopfhindernde Wirkung des Bleitetraäthyls verringern (vgl. hierzu S. 11).

Besonders starke Korrosionen können unter den Bedingungen des Kaltstarts auftreten. Das Verbrennungswasser wird im kalten Motor kondensiert und sättigt sich mit den Verbrennungsgasen. Diese Lösung wirkt ihres sauren Verhaltens wegen korrodierend und mindert auch die Schmierfähigkeit des Öles. Durch Anlaßkraftstoffe mit Olzusatz kann diese Form der Korrosion in tragbaren Grenzen gehalten werden.

Kraftstoffe mit Zusätzen von Bleitetraäthyl können besondere Korrosionsformen [27] zeigen. Durch die Einwirkung der Verbrennungs- und Reaktionsprodukte des Ethylfluids können Anfrassungen an den Ventilsitzen hervorgerufen werden (sogen. „warme Korrosion“). Durch Verwendung gekühlter Ventile und Ventilsitzen aus Stellite kann diese Erscheinung wirksam bekämpft werden. Sie ist es auch, die dazu zwingt, den Bleigehalt unter gewissen Höchstgrenzen (etwa 0,12 vH) zu halten, um diese Korrosionsform in erträgliche Grenzen zu bannen.

Nach dem Stillsetzen und während der Lagerung der Motoren, die mit verbleiten Kraftstoffen gefahren wur-

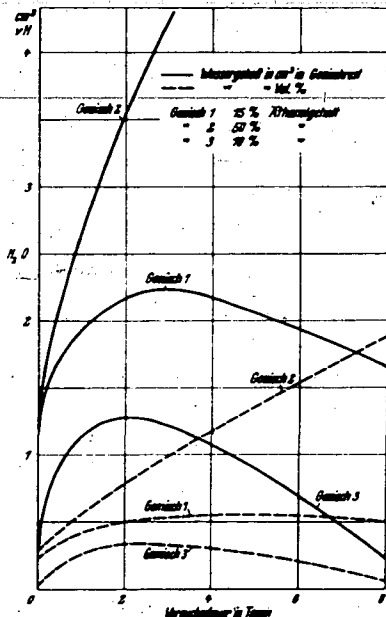


Abb. 40 Wasseraufnahme aus der Luft

den, kann sogen. „kalte Korrosion“ auftreten. Sie wird verursacht durch den bei der Verbrennung gebildeten Bromwasserstoff aus dem Äthylendibromid, das dem Ethyl-Fluid beigemischt ist. Bromwasserstoff ist eine starke Säure, die wie Salzsäure im kalten Motor Anfrassungen und Rost hervorruft. Die kalte Korrosion tritt unregelmäßig auf, bei manchen Motoren überhaupt nicht, bei anderen sehr häufig, und schon kurze Zeit nach Stillsetzen des Motors. Abhilfe bietet das Einspritzen von wasserbindenden Antikorrosionsstoffen, z. B. EG 174 der Ethyl Gasoline Corporation. Dieses Erzeugnis besteht aus 5,6 vH Triäthanolamin, 10 bis 12 vH Butylalkohol, 10 vH Aluminiumstearat und Öl. Der Stoff schützt gleichzeitig das Schmieröl und vermeidet Verharzungen. Er ist nur in Rizinusöl löslich.

c) Harzbildende Verunreinigungen

Flugkraftstoffe können schwer- oder nichtflüchtige reaktionsfähige Stoffe enthalten, die sich an den Einlaßventilen ablagern, dort genügend lange haften bleiben und bei der herrschenden Temperatur sich mit Sauerstoff (oder Schwefel, Säureresten und dgl.) in hochmolekulare harz- oder koksartige Stoffe umwandeln. Die Ablagerungen verstopfen die Ventile und verursachen in schweren Fällen Steckenbleiben und unvollständiges Schließen der Ventile, Verringerung des Ansaugquerschnittes und zusätzlichen Strömungswiderstand am Ventil (vgl. Ringbuchbeitrag IV C 5). Man bezeichnet sie zusammenfassend als „Harz“, in Amerika und England als „gum“, obwohl nicht immer harz- oder gummiartige Verbindungen zustandekommen. Die Gefahr von Motorstörungen durch Ventilverstopfungen zwingt dazu, Proben auf verpichende Anteile vorzunehmen und sie mengenmäßig in engen Grenzen zu halten. Der Harzgehalt wird damit zu einer Kennzahl für die Güte der Raffination.

a) Vorgebildetes Harz (Harztest)

Für die Bestimmung der im Flugkraftstoff enthaltenen Anteile mit Verpichungsneigung dient die Abdampfschalenprobe gemäß BVM 7160. Hierbei werden 100 cm³ des Kraftstoffes in einer Glasschale verdampft und die Rückstandsmenge gewogen. Der Rückstand darf höchstens 5 mg/100 cm³ betragen (in England 10, in Frankreich 6). Mit der Abdampfschalenprobe können auch gewisse Verunreinigungen nachgewiesen werden. So ergibt z. B. Benzin, das längere Zeit mit Gummi in Berührung war, oder Alkoholgemisch, das Lack gelöst enthält, Verunreinigungen als Rückstand und dementsprechend höhere Harzwerte. Vielfach ist nicht die Menge des Rückstandes, sondern seine Beschaffenheit die Grundlage für die Voraussage über die Verpichungsneigung eines Kraftstoffes.

b) Neugebildetes Harz (Harzbildnertest)

Bei längerem Lagern treten bei manchen Kraftstoffen durch die Einwirkung des Luftsauerstoffes Veränderungen ein, die u. a. in einer Verschlechterung des Harztestes zum Ausdruck kommen. Es bildet sich also zusätzliches Harz während der Lagerung. Die Lagerfähigkeit eines Kraftstoffes wird von diesem neugebildeten Harz beeinflusst. Gewisse Voraussagen über die Neubildung von Harz lassen sich aus dem Harzbildnertest gewinnen. Hierbei wird der Kraftstoff vorher mit Sauerstoff behandelt und dann abgedampft.

Der Harzbildnertest ist in den Vereinigten Staaten und England vorgeschrieben, gibt aber nur einen Hinweis für die Lagerbeständigkeit. Die Erfahrung lehrt, daß manche Kraftstoffe mit ungünstigen Harztesten doch keine Ventilverpichung ergeben. Ein endgültiges Urteil über die Verpichungsneigung eines Kraftstoffes kann manchmal nur der praktische Motorversuch erbringen.

Tafel 21: Harz und Harzbildnertest für Flugbenzine

	Harztest max. mg/100 cm ³	Harzbildnertest max. mg/100 cm ³
Deutschland	5, nach 6 Monaten 15	
U.S.A.	—	10
England	10	10 mehr als Harztest
Frankreich	6	

Wegen der für Flugkraftstoffe vorgeschriebenen Bestimmung des neugebildeten Harzes im Bombenversuch als Anhalt für die Lagerbeständigkeit s. S. 26.

γ) Jodzahl

Ungesättigte Kohlenwasserstoffe besitzen die Fähigkeit, Brom und Jod im Ausmaß ihrer Doppelverbindungen zu addieren. Deshalb wurde zur annähernden Festlegung des Gehaltes an ungesättigten Verbindungen die Aufnahmefähigkeit an Jod oder Brom als Maßstab für die Neigung zur Harzbildung eingeführt.

Die Jodzahl (oder Bromzahl) gibt an, wieviel g Jod bzw. Brom 100 g Stoff aufnehmen. Die Jodzahl ist um so höher, je mehr ungesättigte Verbindungen vorhanden sind. Da es verschiedene Verfahren für die Bestimmung der Jodzahl [28], [29] gibt, die verschiedene Werte ergeben, ist für Vergleiche die Nennung der Bestimmungsmethode erforderlich. Für Flugkraftstoffe ist das Verfahren von Hanus gemäß BVM 7220 vorgeschrieben. Die Technischen Lieferbedingungen für Flugkraftstoffe schreiben eine Jodzahl von < 3 nach Hanus vor, beschränken also den Gehalt an Olefinen, um mit Sicherheit jede Möglichkeit einer Harzbildung auszuschließen.

δ) Erwärmswert

Einen weiteren Anhalt für den Gehalt an ungesättigten Verbindungen gibt die Erwärmung des Kraftstoffes beim Schütteln mit Schwefelsäure (150 cm³ Kraftstoff mit 30 cm³ konzentrierter Schwefelsäure). Je mehr ungesättigte Verbindungen vorliegen, desto größer ist die Temperatursteigerung. Jedoch reagieren auch viele andere Stoffe, wie Alkohole, Äther, Toluol u. a. unter Erwärmung, so daß der Test nicht eindeutig ist. Der Test ist für Flugkraftstoffe in Deutschland nicht vorgeschrieben. In Amerika ist der Erwärmungswert für Flugbenzine auf < ~ 11° begrenzt.

4. Energiegehalt

a) Heizwert

b) Gemischheizwert und Luftbedarf

a) Heizwert

Der Heizwert läßt sich aus der Elementaranalyse der Kraftstoffe nur ungenau ermitteln, weil die verbrennlichen Anteile nicht in elementarer Form, sondern als Verbindungen vorliegen, und die Bindungswärmen nach der Art der Bindung zu verschieden sind, um mit einem Durchschnittswert rechnen zu können. Besonders groß ist diese Bindungswärme bei den Mehrfachverbindungen ungesättigter Stoffe. Außerdem spielt der Grad der Sättigung, mit anderen Worten die Zahl der Mehrfachbindungen je Molekül eine Rolle. Abb. 41 zeigt die Heizwerte der wichtigsten Kohlenwasserstoffe [30] und läßt das abweichende Verhalten der Olefine und Azetylene sowie die besondere Stellung der Alkohole erkennen. Die Heizwerte der üblichen Paraffine und Aromaten sind in einem Streuband zusammengefaßt. Die sogenannten Verbandsformel, die die Kohlenwasserstoffe als physikalische Gemische von Kohlenstoff ($H_u = 8100 \text{ kcal/kg}$) und Wasserstoff ($H_w = 29000 \text{ kcal/kg}$) auffaßt, befriedigt nicht und gibt für die üblichen Kraftstoffe, wie aus Abb. 42 hervorgeht, zu hohe Werte. Gegenüber der ungenauen Ermittlung der Heizwerte aus H/C -Verhältnissen

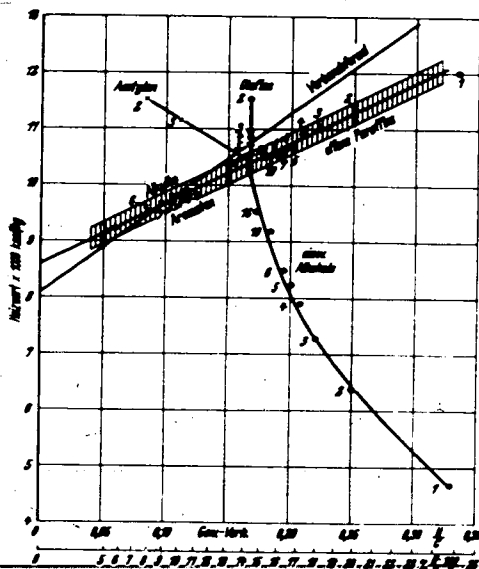


Abb. 41 Heizwerte von Kohlenwasserstoffen

nis, oder auch aus der Wichte, empfiehlt es sich daher, mit folgenden Durchschnittsziffern zu rechnen:

Benzine	10 400 kcal/kg
Stark aromatische Benzine	10 000
Aromaten	9 800 bis 9 700 kcal/kg.

Für die Alkohole können Durchschnittswerte nicht angegeben werden, weil, wie Abb. 41 zeigt, der Einfluß der heizwertmindernden Hydroxylgruppe besonders stark in Erscheinung tritt. Der Heizwert von Athanol ist 6400 und von Methanol 4650 kcal/kg.

Experimentell wird der Heizwert von Flugkraftstoffen gemäß BVM 7225 und BVM 7226 bzw. DIN 5716 (3. Ergänzungsentwurf) im Kalorimeter nach Berthelot-Mahler-Kröcker bestimmt.

b) Gemischheizwert und Luftbedarf

Ein Bild von der Leistung des Kraftstoffes im Motor gibt der Gemischheizwert, d. i. der Heizwert, der in 1 m³ des für vollständige Verbrennung richtig zusammengesetzten Kraftstoff-Luft-Gemisches enthalten ist. Man ermittelt ihn mit Hilfe des Luftbedarfes als den Heizwert, der in 1 m³ angesaugten Kraftstoff-Luft-Gemisches von theoretisch richtiger Zusammensetzung bei 15° C und 735 mm Q. S. enthalten ist. Dieser Gemischheizwert ist für die üblichen Flugkraftstoffe annähernd gleich groß, rd. 800 kcal.

Vielfach wird als Gemischheizwert jedoch lediglich

$$\frac{\text{Unterer Heizwert}}{\text{Luftbedarf}} \text{ in kcal/m}^3$$

ermittelt. Hieraus errechnet sich der Gemischheizwert der Flugkraftstoffe mit ~ 800 kcal/m³. In jedem Falle ergibt sich, daß der Heizwert eines Kraftstoffes für die Motorleistung praktisch ohne Bedeutung ist, und daß diese weitaus vom Verbrennungscharakter des Kraftstoffes bestimmt wird.

Für die Ermittlung des Gemischheizwertes wird der theoretische Luftbedarf aus der chemischen Analyse berechnet nach

$$l. \text{ min/kg} = 4,31 (2,67 C + 8 H - O) \text{ kg}$$

$$L. \text{ min/m}^3 = 3,33 (2,67 C + 8 H - O) \text{ m}^3$$

C = Gew. % Kohlenstoff

H = Gew. % Wasserstoff

O = Gew. % Sauerstoff

Es ergibt sich danach der Luftbedarf für

1 kg Benzin rd.	15,0 kg Luft
1 kg Benzol rd.	13,0 kg Luft
1 kg Athanol rd.	9,0 kg Luft
1 l Benzin rd.	8,6 m ³ Luft
1 l Benzol rd.	9,0 m ³ Luft
1 l Athanol rd.	6,0 m ³ Luft

Für die häufig vorkommenden Kraftstoffe bzw. Kraftstoffanteile ist überdies in Abb. 42 ein Schaubild über den Luftbedarf gegeben.

Aus dem Heizwert ergeben sich in Verbindung mit der Wichte Kennzahlen für Volumen und Gewicht, die an eine bestimmte Energiemenge (1000 kcal) geknüpft sind, und zwar:

$$\text{Energiegewicht} = \frac{1000000}{\text{Heizwert}} \text{ g/1000 kcal}$$

$$\text{Energievolumen} = \frac{1000000}{\text{Heizwert} \cdot \text{Wichte}} \text{ cm}^3/1000 \text{ kcal}$$

Tafel 22: Energiegewicht und -volumen.

	Energiegewicht	Energievolumen
Flugbenzin	95	187
Benzol	104	119
Athanol	167	197

5. Beständigkeit

- Lagerbeständigkeit
- Wasseraufnahmevermögen
- Kältebeständigkeit
- Lichtbeständigkeit

a) Lagerbeständigkeit

Manche Kraftstoffe, besonders Crackbenzine, verändern bei längerem Lagern Farbe, Geruch, Klopffwert und Harzgehalt ins Ungünstige. Bei Zutritt von Licht und Anwesenheit von Metallen geht die Veränderung im allgemeinen schneller vor sich.

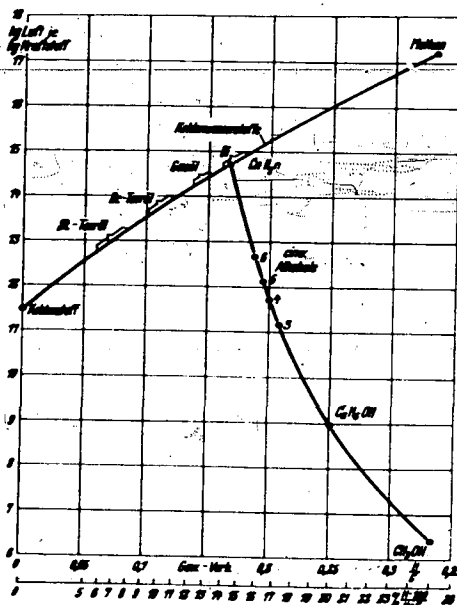


Abb. 42 Luftbedarf von Kohlenwasserstoffen

Die primäre Ursache ist die Oxydation ungesättigter Verbindungen zu Peroxyden, die ihrerseits als Katalysatoren die Polymerisation beschleunigen oder unter weiterer Oxydation Aldehyde, Ketone, Säuren und schließlich Harz bilden. Das frisch hergestellte Benzin enthält kein oder nur wenig ursprünglich vorhandenes Harz. Während der Lagerung erfolgt zunächst nur eine sehr geringe, kaum merkbare Sauerstoffaufnahme. Erst nach einer gewissen Lagerzeit (Induktionszeit), die bei den einzelnen Treibstoffen sehr verschieden ist, nimmt die Harzbildung als Folge der während der Induktionsperiode gebildeten autokatalytischen Peroxyde nunmehr in verhältnismäßig kurzen Zeiten sehr erheblich zu (neugebildetes Harz).

Da eine Nachprüfung der Lagerbeständigkeit unter den üblichen Lagerungsbedingungen erst nach langer Zeit möglich ist, hat man Schnellprüfungen vorgeschlagen. Unter diesen hat die Prüfung des Kraftstoffes in einer Bombe unter Sauerstoffdruck die bisher beste Übereinstimmung mit den tatsächlich beobachteten Veränderungen ergeben. Kraftstoffe mit schlechter Lagerbeständigkeit nehmen bei dieser Prüfung Sauerstoff auf, wodurch der Druck in der Bombe abfällt (break-down-test). Die Induktionszeit vom Beginn des Versuches bis zum Beginn des Druckabfalls ist ein Maß für die Lagerbeständigkeit. Für Flugbenzine wird eine Induktionszeit von 4 Stunden als ausreichend angesehen. Die Prüfung erfolgt gemäß BVM-7165- und -7166.

Ein Anhalt für die Lagerbeständigkeit ist auch der Harzbildner-test (s. S. 24).

Inhibitoren

Die Lagerbeständigkeit von Kraftstoffen steigert man dadurch, daß dem Benzin Stoffe von einer genau abgestimmten Oxydierbarkeit zugesetzt werden, die einerseits ausreichend ist, um die schädliche Oxydation der ungesättigten Kohlenwasserstoffe und damit die Harzneubildung zu verhindern, die aber andererseits nicht zu groß sein darf, damit die Zusätze nicht ihrerseits die Sauerstoffaufnahme sogar fördern.

Grundsätzlich sind eine ganze Reihe chemischer Verbindungen zu dieser Inhibitorwirkung befähigt, z. B. einwertige — und noch stärker — mehrwertige Phenole [31]. Doch muß der Inhibitor — abgesehen von einer hochwirksamen Oxydationsverhinderung — noch eine Reihe weiterer Vorbedingungen erfüllen, wie z. B. größere Löslichkeit im Kraftstoff als in Wasser, damit er nicht durch Schweißwasser ausgewaschen wird, genügende Löslichkeit im Kraftstoff, damit er bei Abkühlung sich nicht ausscheidet, keine Verfärbung des Kraftstoffes, Wirksamkeit in so geringen Mengen, daß der Zusatz den Abdampfdruck nicht vermehrt und die Farbe nicht verschlechtert, keine Korrosionswirkung und letzten Endes Wirtschaftlichkeit seiner Verwendung. Durch diese Forderungen wird die Zahl der brauchbaren Inhibitoren sehr stark eingeschränkt.

Beispiele praktisch verwendeter Inhibitoren

Die Inhibitoren werden in der Regel, um ihre Dosierung (0,01 bis 0,05 vH) zu erleichtern, in Form verdünnter Lösungen abgegeben. So enthält z. B. der Dubbs-Inhibitor als Verdünnungsmittel ein Phenol- (Kresol-) Gemisch, das selbst schwach inhibierend wirkt, während der eigentlich wirksame Bestandteil Pyrogallol und andere Stoffe sind. In Deutschland wird das von Amerika übernommene und dort bewährte Monobenzyl-paramidophenol unter dem Namen Stabisol als 20%ige Lösung benutzt. Auch bei nach dem Aktivkohle-Verfahren hergestellten Motorbenzolen sind Zusätze von Phenolen als Inhibitoren üblich.

b) Wasseraufnahmevermögen

Die Kraftstoffe für Otto-Motoren vermögen Wasser zu lösen, und zwar Äthyl-Alkohol in jedem Verhältnis. Benzin und Benzol nehmen dagegen nur Spuren auf. Benzol etwa 10mal soviel wie Benzin (Abb. 43).

Bei Abkühlung von Benzin und Benzol verringert sich das Wasseraufnahmevermögen. Wasser fällt aus und kann sich in den Tanks oder im Schwimmergehäuse des Vergasers absetzen oder vorübergehend Vergaserstörungen hervorrufen.

Das Wasseraufnahmevermögen wird gemäß DIN 3676 bestimmt. Hierbei wird diejenige Wassermenge, die 100 cm³ Kraftstoff bei 20° C aufnimmt, ohne sich sichtbar zu verändern (Trübung, Schichtenbildung) als Wasserwert bezeichnet. Der Wasserwert ist temperaturabhängig. (Vgl. hierzu auch den Ringbuchbeitrag IV C 1.)

c) Kältebeständigkeit

Bei der Abkühlung von Kraftstoffen können zwei Erscheinungen auftreten:

1. eine Entmischung, durch die sich der Kraftstoff in Schichten verschiedener Beschaffenheit lagert, und
2. der Beginn der Ausscheidung von Kraftstoff-Kristallen (Kristallisationsbeginn) und das Verschwinden der Fließfähigkeit des Kraftstoffes. Vgl. hierüber auch Ringbuchbeitrag IV C 1.

Die Kältebeständigkeit eines Kraftstoffes wird gemäß DIN 3673 durch Abkühlen einer Probe bestimmt und in °C angegeben. Die derart ermittelte Temperatur gibt an, wie weit der Kraftstoff ohne sichtbare Veränderung abgekühlt werden kann. Der Kristallisationsbeginn wird ähnlich wie in BVM 7150 bestimmt.

Die Temperatur, bei der der Kraftstoff zu fließen aufhört, wird als Stockpunkt bezeichnet. Der Stockpunkt liegt bei Benzin und Alkohol unterhalb der Temperaturen, die im praktischen Flugbetrieb erreicht werden. Motorenbenzol dagegen scheidet bei — 15° die ersten Benzolkristalle aus und reines Benzol gefriert sogar bei + 4° C.

Ausreichende Kältefestigkeit der Kraftstoffe muß gefordert werden, damit Verstopfungen der Kraftstoffleitungen und Düsen durch vereisten Kraftstoff oder Störungen durch Entmischung vermieden werden. Für Flugbenzine wird durch die Technischen Lieferbedingungen ein Stockpunkt unter — 60° gefordert.

d) Lichtbeständigkeit

Benzine und Benzole verfärben sich, wenn sie dem Licht ausgesetzt sind, und zwar Crackbenzine mehr als direkt destillierte und Hydrierbenzine. Crack- und Schwefelbenzine scheiden auch mitunter harzartige Stoffe aus. Verbleite Benzine zeigen bei längerem Verweilen im Licht Ausflockungen, die von zersetztem Bleitetraäthyl herrühren. Darauf ist bei der Behandlung von Proben zu achten, während diese Erscheinung bei der üblichen Lagerung keine Rolle spielt, weil dabei Licht ausgeschlossen ist.

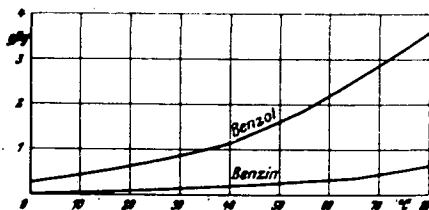


Abb. 43 Wasseraufnahme von Benzin und Benzol

6. Sonstige Eigenschaften

- Wichte
- Brechungsindex
- Feuer- und Explosionsgefährlichkeit
- Farbe und Aussehen
- Geruch

a) Wichte

Die Wichte wird im praktischen Betrieb hinreichend genau mit der Spindel gemessen, für genaue Messungen mit dem Pyknometer. Als Bezugstemperatur gilt 20° C. Wird die Bestimmung bei einer anderen Temperatur vorgenommen, so ist eine Umrechnung notwendig. Zu diesem Zweck ist z. B. bei Benzin zwischen 10 und 30° für jeden ° C unter 20° C rd. 0,001 in Abzug zu bringen, für jeden ° C über 20° C dieselbe Zahl zuzuzählen. Für Flugkraftstoffe erfolgt die Bestimmung der Wichte gemäß DIN 38553.

Die Wichte hat heute wohl nur als Umrechnungszahl zwischen kg und l Bedeutung. Sie steht bei Benzin ähnlicher chemischer Zusammensetzung in Beziehung zur Flüchtigkeit derart, daß leichtere Benzine auch bessere Flüchtigkeit aufweisen.

Die Technischen Lieferbedingungen für Flugbenzine schreiben eine Wichte von 0,715 bis 0,760 bei 15° C vor. In Amerika wird die Wichte in den vom American Petroleum Institute empfohlenen API-Graden angegeben.

Tafel 23: Umrechnung von API-Graden in Wichte (g/l)

API-Grade	Wichte	API-Grade	Wichte
50	778,0	61	783,6
51	778,7	62	729,8
52	769,5	63	726,0
53	765,3	64	722,8
54	761,2	65	718,6
55	757,2	66	715,0
56	753,2	67	711,3
57	749,2	68	707,8
58	745,3	69	704,3
59	741,3	70	700,8
60	737,4		

b) Brechungsindex

Der Brechungsindex oder -index ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im luftleeren Raum zu der im Kraftstoff. Er wird häufig neben der Wichte als Unterscheidungsmerkmal festgestellt und gemäß BVM 7060 im Zeiß-Refraktometer bestimmt und auf 20° C bezogen. Brechungsindex von Benzin liegen zwischen 1,37 und 1,45. Sie steigen mit den Siedegrenzen der einzelnen Benzinfraktionen. Einige andere Brechungsindex zum Vergleich:

Wasser	1,333°
Pentan	1,358
Hexan	1,375
Oktan	1,397
Motorenbenzol	1,494
Reinbenzol	1,501
Toluol	1,496
Äthylalkohol	1,362

c) Feuer- und Explosionsgefährlichkeit

Flammpunkt

Als Anhalt für die Feuergefährlichkeit kann der Flammpunkt dienen, das ist die tiefste Temperatur, bei der der über dem Kraftstoff lagernde Kraftstoffdampf durch Annäherung einer Zündflamme sich entzündet, ohne daß die Flamme weiterbrennt. Davon zu unterscheiden ist der Brennpunkt, d. i. diejenige tiefste Temperatur, bei der der Kraftstoff nach der Entflammung weiterbrennt. Beide Werte sind von dem Gerät

abhängig, in dem sie bestimmt werden, daher ist die Angabe von Flammpunkt und Brennpunkt nur bei Nennung des Gerätes von Wert. Zur Bestimmung werden Geräte mit offenem und geschlossenem Tiegel verwendet. Zu den ersten gehört der Flammpunktprüfer von Marcusson und der als ASTM-Methode vorgeschriebene Apparat von Cleveland. Geschlossene Prüfer sind die von Abel-Pensky, Pensky-Martens und der in USA. verwendete Flammpunktprüfer von Tagliabue. Die Geräte mit geschlossenem Tiegel ergeben tiefere Werte.

Der Flammpunkt dient auch als Grundlage für die behördlichen Lagervorschriften der Kraftstoffe. Nach der Verordnung für den Verkehr mit Mineralölen werden 3 Gefahrenklassen unterschieden:

Gefahrenklasse 1. Mineralöle mit einem

Flammpunkt unter 21° C (Abel-Pensky)

Gefahrenklasse 2. Mineralöle mit einem

Flammpunkt unter 21–55° C (Abel-Pensky)

Gefahrenklasse 3. Mineralöle mit einem

Flammpunkt unter 55–100° C (Abel-Pensky)

In die Klasse 1 fallen alle Flugkraftstoffe für Otto-Motoren.

Explosionsgrenzen

Die Vergaserkraftstoffe geben innerhalb eines bestimmten Mischungsgebietes mit Luft ein explosives Kraftstoff-Luft-Gemisch. Die Bestimmung des Explosions- und Zündbereiches wird auf verschiedene Art durchgeführt.

Tafel 24: Mittlere Werte für Zündgrenzen.

Kraftstoff	Untere Zündgrenze vH Kraftstoff in Luft	Obere Zündgrenze
Ather	8	7
Benzin	2	7
Benzol	2	8
Alkohol	8	18

Die Einstellung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Otto-Motor liegt der Kraftstoffersparnis wegen nahe der unteren Zündgrenze.

Elektrische Erregbarkeit

Beim Fließen von Kraftstoffen bei Geschwindigkeiten von mehr als 4 m/s durch Leitungen, Trichter oder metallische Behälter können durch Reibung der nichtleitenden Kraftstoffe an den Wänden Aufladungen bis zu mehreren tausend Volt auftreten. Es ist daher zweckmäßig, Behälter und Leitungen beim Füllen oder Entleeren zu erden. Die Aufladungen können ferner herabgesetzt oder unterbunden werden durch Vermeidung hoher Strömungsgeschwindigkeiten (nach Messungen der Chemisch-Technischen Reichsanstalt wurde bei Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 4 m/s keine Aufladung beobachtet) und durch Vermeidung von Zerstäubung beim Ausfließen.

Die mit der elektrischen Aufladung von strömenden Flüssigkeiten zusammenhängenden Beobachtungen sind zum Teil widersprechend, so daß noch nicht volle Klarheit über diese Erscheinung besteht [32], [33].

d) Farbe und Aussehen

Zusatzfreie Kraftstoffe für Otto-Motoren sind durchweg wasserklar bis gelblich. Manche Benzine und Benzole nehmen bei längerem Stehen im Licht gelbliche Färbung an (siehe unter Lichtbeständigkeit). Mehr oder minder deutliche Färbung ist ohne Einfluß auf die Güte der Ware. Farblosigkeit ist kein Zeichen für einwandfreie Beschaffenheit. Absichtliche Färbung in blauer Farbe liegt bei verbleiten Flugkraftstoffen vor.

Die Farbe des ungefärbten Kraftstoffes wird mit Hilfe von Colorimetern gemessen. Man verwendet meist die für die Prüfung von Petroleum üblichen Geräte, z. B. das von Stammer, Saybolt, neuerdings auch das Pulfrich-Stufenphotometer.

e) Geruch

Es ist zu unterscheiden zwischen Kraftstoff- und Abgasgeruch. Der Kraftstoffgeruch wird durch Verreiben einiger Tropfen auf der Hand oder durch Aufgießen auf Filterpapier geprüft. Riechen an Flaschen oder Fässern gibt ein falsches Bild, weil nur der Geruch der über dem Kraftstoffspiegel stehenden leichten Anteile erfaßt wird.

Die besonders unangenehm riechenden Schwefelverbindungen (Schwefelwasserstoff, Mercaptane) werden durch den Doktorstest (Schütteln der Benzinprobe mit Plumbitlösung und Schwefelblumen) nachgewiesen. Bei Auftreten eines tiefroten Ringes an der Trennfläche zwischen Plumbitlösung und Benzin wird der Doktorstest positiv und damit das Benzin als „sauer“ bezeichnet. Tritt an der Trennfläche nur ein schwach gelblich gefärbter Ring auf, in der Hauptsache aus Schwefelblumen bestehend, so ist der Doktorstest negativ und damit das Benzin als „süß“ zu bezeichnen.

Schlechter Abgasgeruch rührt her von unvollständiger Verbrennung, vom Schmieröl, manchmal auch als Auswirkung fetter Vergasereinstellung. Der Geruch läßt sich durch katalytische Verbrennung des Geruchsträgers im Auspuff vernichten. Damit läßt sich auch eine Entgiftung (Kohlenoxyd) verbinden. Nach Versuchen der I. G. Farbenindustrie A.G. erfolgt die praktische Durchführung derart, daß ein in einer Hülse enthaltener Katalysator in die Auspuffleitung eingebaut wird. Der Kontakt wird nach einer gewissen Zeit unwirksam und muß durch einen neuen ersetzt werden.

II. Kraftstoffe für Dieselflugmotoren

1. Zündwilligkeit

- Verbrennungsablauf im Dieselmotor
- Zündwilligkeit und chemischer Aufbau
- Zündbeschleuniger
- Einfluß der Betriebsbedingungen auf den Zündverzug
- Zündwilligkeitsmessung
 - Motorische Verfahren
 - Prüfmotoren
 - Prüfverfahren
- Zündwilligkeitsmessung nach chemisch-physikalischen Kennziffern

a) Der Verbrennungsablauf im Dieselmotor

Für das Diesel-Verfahren als Gleichdruckverfahren ist Voraussetzung, daß die Zündung des Kraftstoffes möglichst sofort nach der Einspritzung erfolgt. Ist dies nicht der Fall, tritt also ein „Zündverzug“ ein, dann wird bei der verspätet einsetzenden Entflammung schlagartig eine verhältnismäßig große Kraftstoffmenge zur Umsetzung gebracht. Dies hat zur Folge, daß der Druckanstieg zu rasch erfolgt und der Lauf des Motors härter wird, bzw. sich „Klopfen“ einstellt und dadurch hohe Triebwerksbeanspruchungen sich ergeben.

Der „Zündverzug“, d. i. die Zeit zwischen dem Einspritzen des Kraftstoffes und dem Beginn der Entzündung, macht sich um so stärker bemerkbar, je höher die Drehzahl des Motors ist. Deshalb ist die Zündwilligkeit der Dieselmotorkraftstoffe für die schnelllaufenden Flug-Dieselmotoren von erheblicher Bedeutung.

Beobachtet man mit Hilfe trägheitsfreier Aufzeichnung der Temperaturstrahlung [84] den Ablauf der Verbrennung im Dieselmotor, Abb. 44, so ergibt sich, daß zunächst eine gewisse Zeit verstreicht (Punkt 1—2), bis eine Verbrennung ohne Druckanstieg einsetzt (2—3), die das Gemisch erfaßt, das sich aus den ersten Tröpfchen und der verdichteten Luft gebildet hat. Die dabei entwickelte Wärme überträgt sich auf die inzwischen

angesammelten und mit Luft umgebenen Kraftstofftröpfchen. Dadurch wird der ersten Verbrennung viel Wärme entzogen, so daß sich dieser Teil der Verbrennung im Druckverlauf nicht kennzeichnet.

Die Wärmeabgabe an die unverbrannten Kraftstofftröpfchen löst nun eine rasche Entflammung aus (Punkt 4). Diese schlagartige unregelmäßige Verbrennung zeigt sich im Indikatordiagramm durch starken Druckanstieg an. Im Schrifttum und bei Messungen wird meist nur der Zündverzug vom Einspritzbeginn bis zum merklichen Druckanstieg (Punkt 1—4) verwendet. Die Verbrennung setzt nun mit starker Wärmeentwicklung ein und ergibt einen schlagartigen Druckanstieg (Punkt 4 bis 5), an den sich die durch die Einspritzmenge der Pumpe regelbare Verbrennung (Punkt 5—7) anschließt. Der Druck erreicht bei Punkt 6 seinen Höchstwert. Schließlich endet der Verbrennungsvorgang mit dem Nachbrennen (Punkt 7—8), das sich aber im Druckdiagramm nicht mehr auszuwirken vermag.

Der Zündverzug teilt sich in einen physikalischen und einen chemischen Zündverzug, die sich teilweise überdecken. Der erstere ist endotherm und umfaßt den Zeitraum für das Aufheizen der Tröpfchen und das teilweise Verdampfen sowie das rasche Erhitzen der Dämpfe auf die Lufttemperatur (800—800° C) durch unmittelbare Berührung. Der chemische Zündverzug, meist ausschlaggebend, ist exotherm und besteht in der Entwicklung von Wärme durch die Reaktion der Kraftstoffdämpfe bis zum Erreichen der Entflammungstemperatur, worauf sich dann die Flamme rasch ausbreitet. Die Flamme selbst entwickelt sich aus einem oder mehreren Kernen und zündet von diesen ausgehend schlagartig das ganze vorbereitete Gemisch durch. Diese Erscheinung ist z. B. der Grund dafür, daß mit Hilfe einer Voreinspritzung eines besonders zündwilligen Dieselmotorkraftstoffes die Verbrennung eines in der Zündwilligkeit ungünstigen Kraftstoffes eingeleitet werden kann.

Da die durch die Reaktionen entwickelte Wärme der Zündwilligkeit des Kraftstoffes proportional ist, lassen sich die Cetanzahlen von Mischungen aus den Cetanzahlen der Mischungskomponenten ermitteln. Der Zündverzug von Mischungen ist aber infolge der unterschiedlichen Ausbildung von Zündungskernen nicht etwa gleich dem Zündverzug der zündwilligsten Komponente, sondern wird einen Zwischenwert aufweisen [35], Abb. 45.

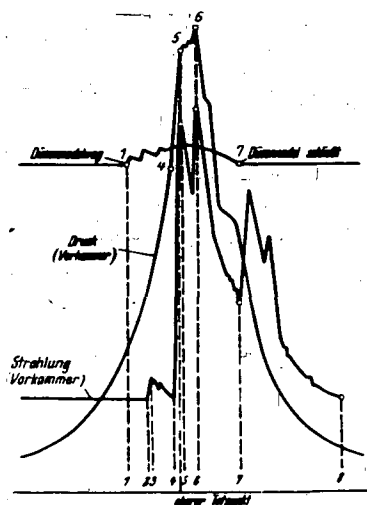


Abb. 44 Verbrennungsablauf im Dieselmotor.

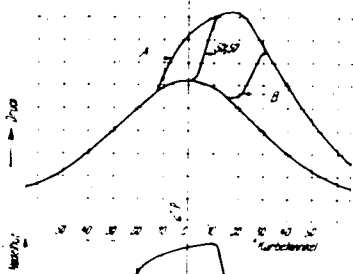


Abb. 45 Zündverzug für eine Kraftstoffmischung 50/50 und deren Komponenten

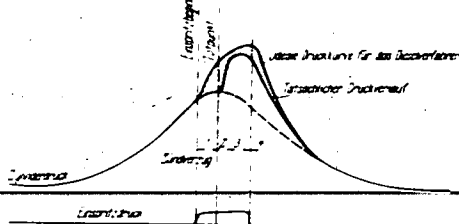


Abb. 46 Idealer und mahrer Druckverlauf im Diesel

Das Indikatordiagramm zeigt infolge des Zündverzuges nicht den der Gleichdruckverbrennung entsprechenden Verlauf (Abb. 46), sondern eine durch den Zündverzug bewirkte Verschiebung. Die Verbrennung weist 4 Abschnitte auf, und zwar ist 1 der Zündverzug, hauptsächlich bewirkt durch ungenügende Reaktionsgeschwindigkeit des Kraftstoffes, 2 die schlagartige Entflammung mit starker Drucksteigerung, 3 unmittelbare Verbrennung des später eingespritzten Kraftstoffes, weil die Reaktionsgeschwindigkeit durch die inzwischen angestiegene Temperatur größer geworden ist und 4 Nachbrennperiode, die andauert, so lange die Kraftstofftröpfchen Sauerstoff vorfinden. Für die Güte der Dieselverbrennung ist also nicht die Höhe des Druckes, sondern die Steilheit des Druckanstieges $dp/dφ$ (in at° /Kurbelwinkel) maßgebend.

Der Druckanstieg wird vielfach auch als dp/dt , also nach der Zeit, in at/s angegeben. Dieser Wert ist insofern nicht ohne weiteres anwendbar, als darin die Drehzahl nicht erscheint [36]. An Abb. 47 ist in Abhängigkeit von der Motordrehzahl der Druckanstieg $dp/dφ$ für verschiedene Werte von dp/dt dargestellt. Man erkennt, wie sich bei unveränderlichem Druckanstieg dp/dt der Wert $dp/dφ$ mit dem Kurbelwinkel, also mit der Motordrehzahl ändert. Bei niedrigen Drehzahlen ist ein stärkerer Anstieg vorhanden als bei hohen. Zweckmäßiger ist es daher, den Wert $dp/dφ$ als Maß für den Druckanstieg zu nehmen.

b) Zündwilligkeit und chemischer Aufbau

Genau so, wie die Klopfestigkeit der Otto-Kraftstoffe durch Art und Menge der in ihnen enthaltenen Kohlenwasserstoffe bestimmt wird, wird auch die Zündwilligkeit der Dieseldieselkraftstoffe davon beeinflusst. Die Dieseldieselkraftstoffe enthalten ebenfalls Paraffine, Olefine, Naphthene und Aromaten (vgl. hierüber S.). Die Zündneigung dieser Kohlenwasserstoffe ist um so größer, je weniger Energie zu ihrer Aufspaltung erforderlich ist. Damit gelten für die Zündwilligkeit genau die umgekehrten Voraussetzungen wie für die Klopfestigkeit und dementsprechend sind die Paraffine die zündwilligsten Koh-

lenwasserstoffe, während die Aromaten der thermischen Aufspaltung, wie sie im Dieselmotor vor sich geht, am meisten Widerstand entgegensetzen, d. h. den größten Zündverzug bewirken. Olefine und Naphthene liegen in dieser Hinsicht zwischen Paraffinen und Aromaten.

Es gilt ferner die Regel, daß die Zündwilligkeit innerhalb der Kohlenwasserstoffe bei sonst gleicher Bindung mit der Größe des Moleküls zunimmt. Dagegen nimmt die Zerfallsneigung um so mehr ab, je geballter das Molekül aufgebaut ist.

Aus diesem Grunde kommen für den schnelllaufenden Diesel-Flugmotor nur paraffinische Erdöldestillate und ebensolche synthetische Dieseldieselkraftstoffe, gegebenenfalls auch noch Braunkohlenteeröle mit hohem Anteil an Paraffinen in Frage.

c) Zündbeschleuniger

Die Zündwilligkeit von Dieseldieselkraftstoffen kann durch Zusatz von Zündbeschleunigern erhöht werden, ähnlich wie durch Zusatz von Klopfbremsen die Klopfestigkeit von Otto-Kraftstoffen verbessert wird. Auch hier haben die Zusatzstoffe bei Dieseldieselkraftstoffen entgegengesetzte Wirkung wie bei Otto-Kraftstoffen. Alle klopfhindernden Stoffe, Aromaten, Alkohole und auch die Klopfbremsen wie Bleitetraäthyl oder aromatische Amine wirken auf die Zündwilligkeit ungünstig ein. Umgekehrt sind Proklopfmittel, wie Äthylnitrat gute Zündbeschleuniger.

Es liegen verschiedene Untersuchungen über Nitrate, Nitrite und Peroxyde als Zündbeschleuniger vor, die als

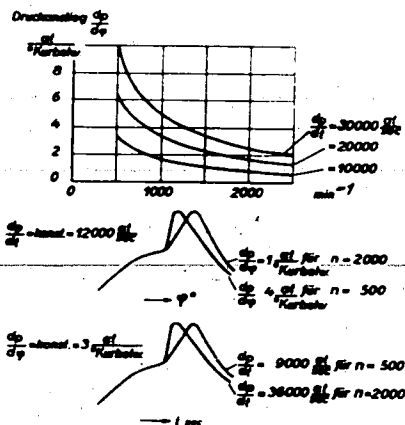
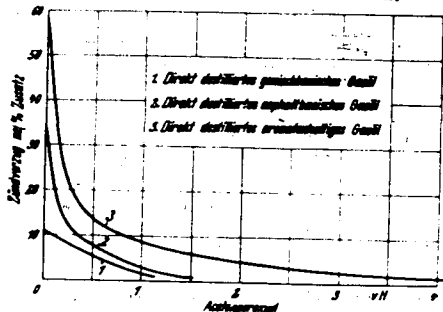
Abb. 47 Druckanstieg (Beziehung zwischen $\frac{dp}{dt}$ und $\frac{dp}{dφ}$)

Abb. 48 Wirkung von Azelonperoxyd

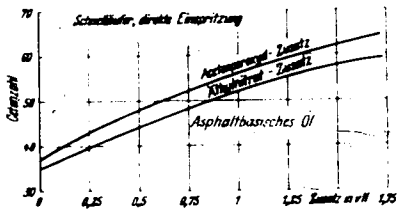


Abb. 49 Wirkung von Äthylnitrat und Azetonperoxyd

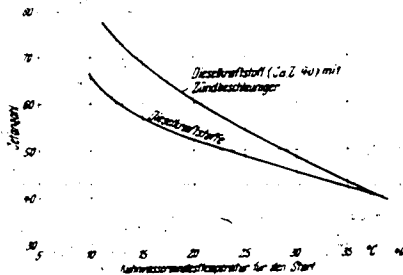


Abb. 50 Abhängigkeit von Startmülligkeit und Cetanzahl

wirksamste Stoffe u. a. Äthylnitrat, Amylnitrit und Azetonperoxyd erkennen lassen. Die erzielbare Cetanzahlsteigerung ist von dem verwendeten Dieselkraftstoff abhängig. Außerdem wirken geringe Zusätze verhältnismäßig stärker als höhere Zusätze, so daß eine „Zündbeschleunigerempfindlichkeit“ der Dieselkraftstoffe erkennbar ist [37] (Abb. 48). Die Wirkung von Äthylnitrat und Azetonperoxyd auf ein asphaltbasiertes, direkt destilliertes Gasöl zeigt Abb. 49.

Solche Zusätze ermöglichen also, Dieselkraftstoffe, deren Zündwilligkeit für einen bestimmten Motor nicht ausreicht, zu verbessern und sie dadurch für die Verwendung geeignet zu machen. Die dadurch erzielbare Leistungssteigerung ist von der Bauart der Maschine und den Betriebsbedingungen abhängig. Eine Verbesserung der Starteigenschaften läßt sich durch Zusatz von Zündbeschleunigern in geringem Maße erreichen, wie Abb. 50 zeigt. Der mit dem Zündbeschleuniger versetzte Dieselkraftstoff (CaZ=40) weist schlechteres Startverhalten auf, als Dieselkraftstoffe gleicher Zündwilligkeit.

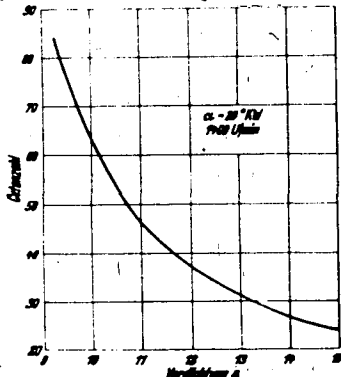


Abb. 51 Kritisches Verdichtungsverhältnis und Cetanzahl

d) Einfluß der Betriebsbedingungen auf den Zündverzug

Der Zündverzug, als Ausdruck für die Reaktionsbereitschaft des Dieselkraftstoffes, ändert sich je nach der Bauart des Motors und den Betriebsbedingungen, unter denen die Aufbereitung des Kraftstoffes im Motor vor sich geht. Es gilt dabei ebenfalls die Regel, daß alle Maßnahmen, die im Otto-Motor das Klopfen hervorrufen oder verstärken, im Dieselmotor auf den Zündverzug günstig einwirken und umgekehrt.

So ist das Verdichtungsverhältnis des Motors einer der wichtigsten Faktoren für die Zündbereitschaft eines gegebenen Dieselkraftstoffes. Je höher es liegt, desto leichter zündet der Kraftstoff. Es gibt somit für jeden Kraftstoff je nach seiner Zündwilligkeit ein kritisches Verdichtungsverhältnis [38], bei dessen Unterschreitung er in einem gegebenen Motor nicht mehr zündet (Abb. 51). Andererseits sind die Anforderungen an die Zündwilligkeit des Kraftstoffes um so geringer je höher der Motor verdichtet (Abb. 52).

Übereinstimmend mit den Motorversuchen zeigen Bombenversuche ebenfalls eine Verringerung des Zündverzuges mit steigendem Druck und steigender Temperatur. Abb. 53 gibt hierfür einen Anhalt, wobei den Bombenversuchen die Lufttemperatur zugrunde gelegt ist, während die Motorversuche nach der Höchsttemperatur am Ende der Verdichtung ausgerichtet sind [39].

Es läßt sich daher weiterhin ein Einfluß auf die Zündwilligkeit durch Veränderung des Ansaugdruckes gewinnen, weil er den Luftzustand am Ende der Kompression bestimmt. Durch Drosseln der Ansaugluft wird das Zündverhalten ungünstiger, eine Erscheinung, die sich im Diagramm sehr deutlich ausdrückt, Abb. 54. Sie wurde bereits von Boerlage und Broeze [40] für die

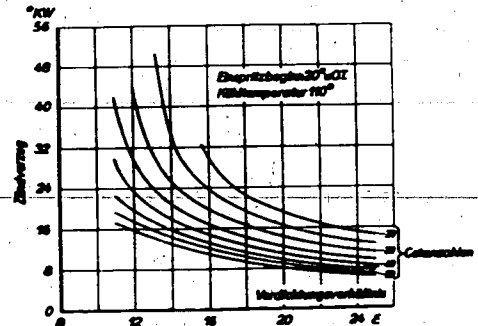


Abb. 52 Zündverzug in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis

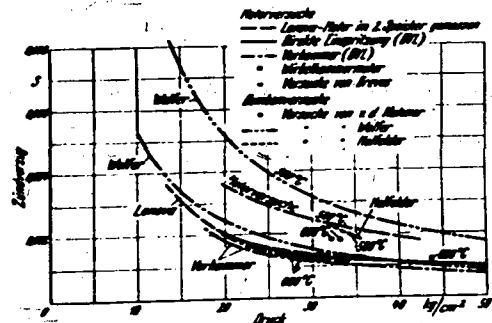


Abb. 53 Abhängigkeit des Zündverzuges vom Druck

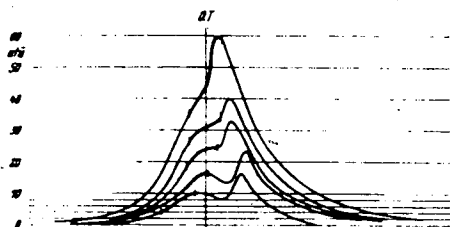


Abb. 54 Zündverzug bei Drosselung der Ansaugluft

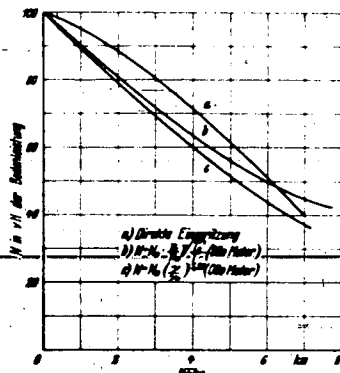


Abb. 55 Leistungsabfall von Dieselmotoren abhängig von der Höhe

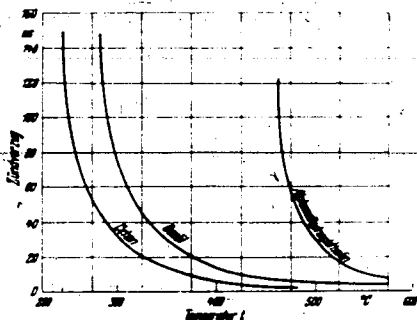


Abb. 56 Zündverzugs-Temperatur-Kurven

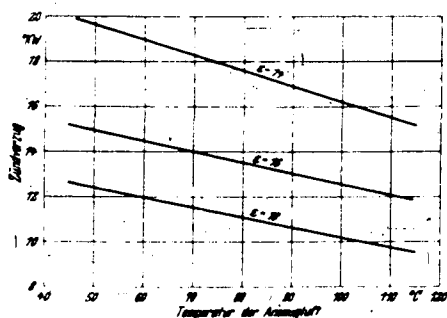


Abb. 57 Zündverzug und Temperatur der Ansaugluft

Messung der Zündwilligkeit herangezogen. Die Abb. 54 zeigt, wie bei Betrieb des Motors unter Höhenbedingungen der Zündverzug sich vergrößert, so daß schlechtere Leistung und erhöhter Kraftstoffverbrauch die Folge sein müssen. Infolge des durch geringere Luftdichte und -temperatur bewirkten Zündverzuges kann mehr Kraftstoff verdampfen und dadurch so starke Abkühlung bewirken, daß in großen Höhen die Zündung überhaupt ausbleiben kann.

Aus dem Zündverhalten der Dieselmotore unter Höhenbedingungen ergibt sich, daß z. B. der Dieselmotor mit unmittelbarer Einspritzung hierbei bis zu etwa 6 km Höhe in der Leistung günstiger liegt als der Otto-Motor, in großen Höhen jedoch einen stärkeren Leistungsabfall zeigt als der Otto-Motor [39]. Abb. 55, der durch bauliche Maßnahmen (höhere Verdichtung, Anpassung der Reichweite des Kraftstoffstrahles und frühere Einspritzung mit zunehmender Höhe) auszugleichen ist.

Der mit der Verdichtung parallel laufende Einfluß der Lufttemperatur auf den Zündverzug ist nach Versuchen in der Bombe in Abb. 56 veranschaulicht. Übereinstimmend damit wird der Zündverzug geringer, wenn die Ansaugluft höhere Temperatur aufweist, weil dadurch die Verdichtungs- und Zündtemperatur entsprechend ansteigt, Abb. 57.

Von Einfluß auf den Zündverzug sind natürlich auch Belastung bzw. die je Zylinder zugeführte Wärmemenge und -drehzahl des Motors. Abb. 58 zeigt die Abhängigkeit des Zündverzuges von der je Zylinder stündlich zugeführten Wärmemenge [41]. Sie läßt erkennen, daß paraffinartige Treibstoffe wenig Unterschiede über

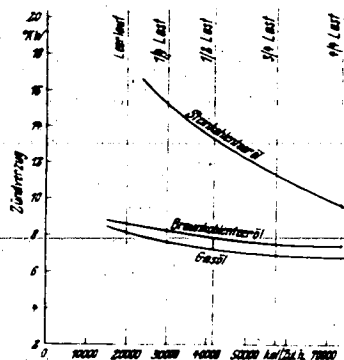


Abb. 58 Zündverzugs- und Belastungsdiagramm

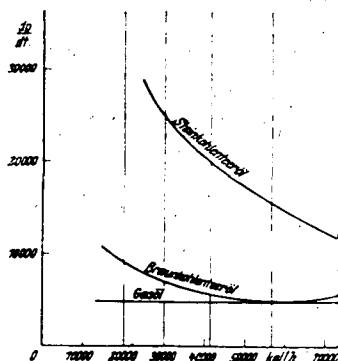


Abb. 59 Zünddrucksteigerungsgeschwindigkeit und Belastungsdiagramm

den gesamten Belastungsbereich ergeben, während aromatenhaltige Kraftstoffe, wie Steinkohlenteeröl, eine deutliche Verringerung des Zündverzuges mit steigender Belastung zeigen. Die zugehörigen Werte für dp/dt stimmen mit dem gemessenen Zündverzug nicht genau überein (Abb. 59), woraus sich auf einen Einfluß des chemischen Aufbaues schließen läßt. Für den Betrieb von Dieselflugmotoren sind diese Zusammenhänge wegen der gleichmäßigen Belastung von geringerer Bedeutung.

Das gleiche gilt von dem Einfluß der Drehzahl, die mit ihrem Ansteigen eine Verkürzung des Zündverzuges (auf die Zeit bezogen) ergibt, die wieder vom Einspritzbeginn, Abb. 60, und in geringem Maße von der Charakteristik der Einspritzpumpe und der Einspritzduse beeinflusst wird.

e) Zündwilligkeitsmessung

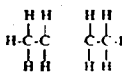
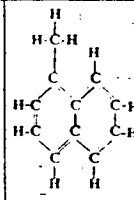
a) Motorische Verfahren

Die Zündwilligkeitsmessung von Dieselfkraftstoffen konnte bei ihrer Entwicklung zum großen Teil Erfahrungen der Klopfestigkeitsprüfungen verwerten. Aus diesem Grunde ist auch hier die motorische Prüfung in den Vordergrund getreten, allerdings noch nicht so weit festgelegt, wie dies bei den Klopfmeßverfahren der Fall ist. Es sind sowohl in Deutschland als auch im Ausland Vorschläge für Prüfmotoren gemacht worden, ohne daß es bisher zu einer Einigung auf einen bestimmten Prüfmotor gekommen wäre.

Einheitlichkeit besteht jedoch hinsichtlich der Bezugskraftstoffe. Analog der Oktanzahl für Otto-Kraftstoffe wird für die Messung der Zündwilligkeit eine Mischung aus einer sehr zündwilligen Komponente (Cetan $C_{18}H_{38}$) und einer zündträgen (α -Methylnaphthalin $C_{10}H_8$) benutzt und als Kennzahl für die Zündwilligkeit der Dieselfkraftstoffe die davon abgeleitete Cetanzahl verwendet. Sie ergibt sich aus dem Gehalt an Cetan in Volum-% der Mischung, die dem zu prüfenden Kraftstoff in der Zündwilligkeit gleichkommt. Die nachstehende Tafel 25 gibt die wichtigsten Kennwerte für die beiden Meßstoffe an.

Tafel 25:

Kennwerte für Cetan und α -Methylnaphthalin.

	Cetan	α -Methylnaphthalin
Strukturformel		
Summenformel	$C_{18}H_{38}$	$C_{11}H_{10}$
Siedepunkt bei 760 mm Hg °C	298	247
Wichte bei 20°	0,775	1,02
Unterer Heizwert kcal/kg	10 450	9 100
Viskosität °E	1,854	1,228
Anilinpunkt °C	+ 92,3	— 48

Das früher verwendete ungesättigte Cetan ist seiner Unbeständigkeit wegen durch das gesättigte Cetan, das überdies noch zündwilliger ist, verdrängt worden.

An Stelle der chemisch reinen Bezugstoffe können Unterbezugstoffe (ein leicht- und ein schwerzündliches Öl) benutzt werden, die im Prüfmotor geeicht werden.

Jede Cetanzahl läßt sich auch als Oktanzahl ausdrücken, weil zwischen beiden Werten eine Abhängig-

keit besteht, die auf Grund zahlreicher und ausgedehnter Versuche [43] in Abb. 61 festgelegt ist. Für praktische Verhältnisse ausreichend läßt sich mit Hilfe einer durch diese Kurve gelegten Geraden, die die Abszissenachse bei CaZ 60 schneidet und bei einer OZ 100⁰ die CaZ 10 anzeigt, die Abhängigkeit durch folgende Gleichungen ausdrücken:

$$\text{bei bekannter Cetanzahl OZ} = 120 - 2 \text{ CaZ} \\ \text{bzw. bei bekannter Oktanzahl CaZ} = 60 - 0,5 \text{ OZ}$$

Es entspricht hiernach also die Steigerung der Klopfestigkeit von Otto-Kraftstoffen um 2 OZ einer Abnahme der Zündwilligkeit der Dieselfkraftstoffe um 1 CaZ.

Eine Umrechnung von Oktan- in Cetanzahlen ist in Abb. 62 durchgeführt [42]. Hieraus sind auch die durchschnittlichen Cetanzahlen der hauptsächlichsten Dieselfkraftstoffe zu ersehen. Flugdieselfkraftstoffe weisen meist eine Cetanzahl von mehr als 45 auf.

ß) Prüfmotoren

Für die Prüfung von Dieselfkraftstoffen werden in Deutschland hauptsächlich die in der nachstehenden Tafel 26 angeführten Prüfmotoren verwendet. Die Tafel enthält ferner noch die Angaben über den im Ausland verwendeten CFR-Diesel-Prüfmotor mit Wirbelkammer.

Tafel 26: Prüf-Dieselmotoren.

Bauform	IG	HWA	CFR
Konstruktion	I.G. Farbenindustrie A.G. Technischer Prüfstand	Heereswaffenamt	Corporate Fuel Research Committee of the American Society of Automotive Engineers
Hersteller	Motorenwerke Mannheim A. G.	Humboldt-Deutz Motoren A.G. Köln-Deutz	Waukesha Motor Comp. Waukesha Wisconsin
Bohrung/Hlub mm	95/150	120/170	82,6/114,3
Hubraum, cm ³	1068	1920	613
Verdichtung	verstellbar 7—30	fest 14,5	verstellbar 6—21
Arbeitsweise	unmittelbare Einspritzung	unmittelbare Einspritzung	Wirbelkammer
Drehzahl U/min	900	940	900
Ansauglufttemperatur	20°	80°	20°
Kühlmitteltemperatur	100°	70°	100°
Einspritzbeginn KW° vor OT	20	80	—

Als Beispiel eines Prüfmotors mit veränderlicher Verdichtung ist in Abb. 63 der I. G. - Prüfdiesel wiedergegeben [44]. Der I. G. - Prüfdiesel ist seiner kräftigen Bauart wegen für die Prüfung zündträger Kraftstoffe besonders geeignet. Er besitzt eine Einrichtung zur Veränderung der Verdichtung, mit der Zylinderkopf und Zylinderbüchse mit Kühlwassermantel während des Betriebes durch Schneckenantrieb gegenüber dem Triebwerk und dem Kurbelgehäuse verschoben werden können. Auf diese Weise läßt sich die Verdichtung bis zu 30:1 erhöhen.

Als Meßeinrichtung dient ein Quarzindikator mit Braunscher Röhre. Das Indikatorgramm wird mittels

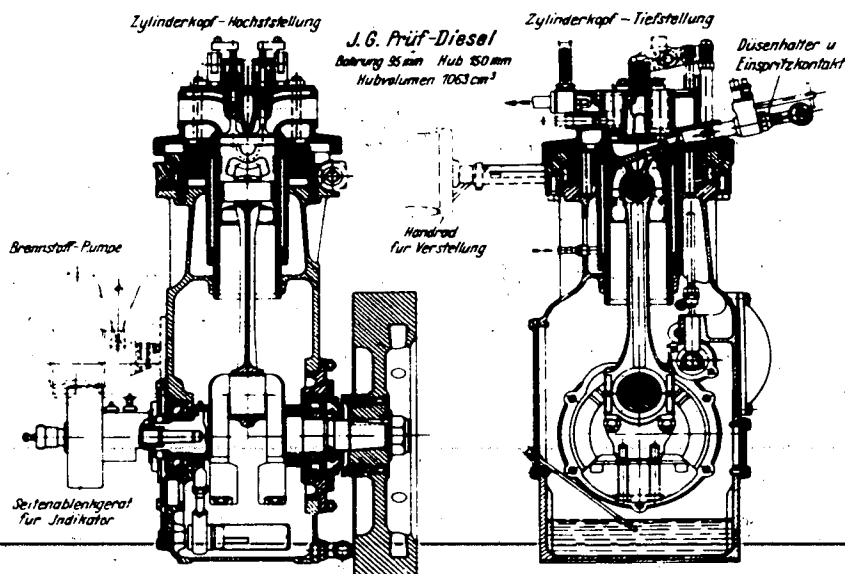


Abb. 63 I. G. - Prüf-diesel

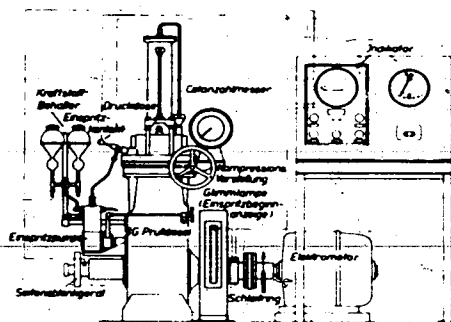


Abb. 64 Geräteanordnung am I. G. - Prüf-diesel

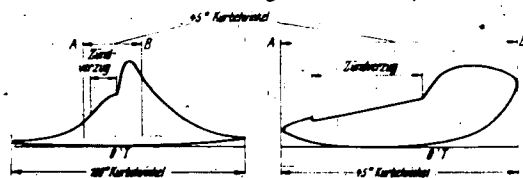


Abb. 66 Dieseldiagramme für Zündverzugsmessungen

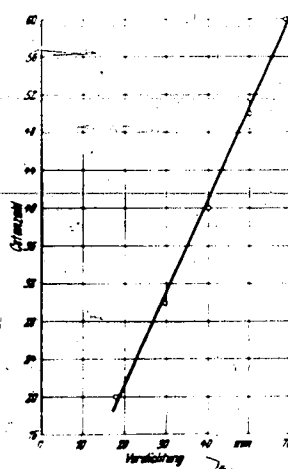


Abb. 65 Eichkurve eines I. G. Prüf-dieselmotors

gruppe [46] festgestellt, daß das Zündverzugsverfahren vom Gesichtspunkt der Wiederholbarkeit und Gültigkeit der Versuchswerte vorzuziehen sei. Aus diesem Grunde hat man in Amerika dieses Verfahren zur Normung vorgeschlagen. Auch in Deutschland zeigten Ringversuche, die vom Reichsverkehrsministerium durchgeführt wurden [47], bessere Übereinstimmung der Messungen nach dem Zündverzugsverfahren. Demgegenüber wurden z. B. bei Messungen nach dem Anlaßverfahren Streuungen bis zu 27 vH beobachtet.

Bei einer kritischen Beurteilung der beiden Verfahren zeigte sich das Zündverzugsverfahren als das besser ge-

eignete. Gewiß ist für die Beurteilung eines Kraftstoffes sowohl das Anlaßverhalten als auch der Verbrennungsablauf wichtig. Die Bedingungen der Anlaßmethode sind jedoch schon gegenüber dem praktischen Betrieb beim Anlassen so weit verschieden, daß sie nicht mehr den tatsächlichen Betriebsverhältnissen entsprechen. Erst recht nicht erscheinen sie als geeignet, die Verbrennungsvorgänge im Motor selbst erkennen zu lassen. Hierüber können sie nichts aussagen, worauf schon wiederholt hingewiesen wurde [48].

Das Zündverzugsverfahren mit konstantem Zündverzugs bei veränderlicher Verdichtung hat sich als über-

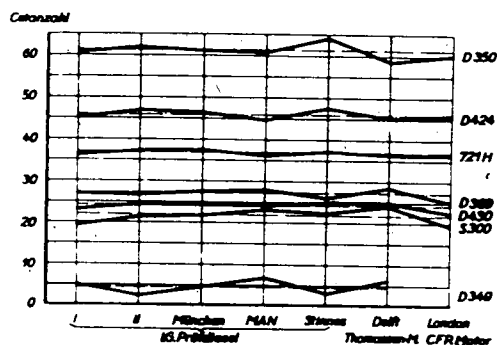


Abb. 67 Vergleich der Meßwerte zwischen I.G. Prüf-diesel, Thomassen- und CFR-Motor

legen erwiesen, weil es genauer mißt und den praktischen Verhältnissen näherkommt als das ebenfalls vorgeschlagene Meßverfahren für den Zündverzöger bei fester Verdichtung.

Wie bei dem Prüfverfahren für Otto-Kraftstoffe wird auch für die Prüfverfahren der Dieseldieselkraftstoffe geltend gemacht, daß die heute gebräuchlichen Meßverfahren die Einflüsse der verschiedenartigen Betriebsbedingungen nicht zu erfassen vermögen. Diese Einflüsse sind jedoch nicht so bedeutend wie beim Otto-Motor, denn es hat sich wiederholt gezeigt, daß an ganz verschiedenen Motoren gleiche Werte erzielt werden können, vgl. Abb. 67. Es ist jedoch möglich, durch die Messung des Druckanstiegs und des Verbrennungshöchstdruckes, wie bereits erwähnt, das Zündverhalten der Dieseldieselkraftstoffe noch genauer zu erfassen, so daß vorerst keine Notwendigkeit bestehen dürfte, von den bekannten Verfahren abzugehen, trotzdem diese Einpunktverfahren sind.

b) Zündwilligkeitsmessung nach chemisch-physikalischen Kennziffern

Zur Vereinfachung der Zündwilligkeitsprüfung von Dieseldieselkraftstoffen wurden Verfahren entwickelt, die die Untersuchung im Motor vermeiden und dafür den empirisch festgestellten Zusammenhang zwischen chemisch-physikalischen Kennziffern und Zündwilligkeit verwenden, um einfacher, schneller und billiger zu prüfen.

So wurde z.B. schon vor Jahren das Verhältnis Wasserstoff : Kohlenstoff, das H/C-Verhältnis, hierfür vorgeschlagen. Dieses Verhältnis weist für die einzelnen Kohlenwasserstoffe verschiedene Werte auf. Es steigt der Wasserstoffgehalt von den Aromaten über die Naphtene und Olefine zu den Paraffinen. Die Nachprüfung ergibt jedoch Abweichungen für einzelne Dieseldieselkraftstoffe [49]. Außerdem ist der Unterschied im Wasserstoffgehalt gering, so daß er als Maß für die Zündwilligkeit wenig geeignet erscheint.

Da ein Anteil von zyklischen Verbindungen, insbesondere von Aromaten, die Zündwilligkeit herabsetzt, ist er für die Beurteilung von Dieseldieselkraftstoffen von Wert. Man ermittelt ihn am einfachsten über den Anilinpunkt, d. i. diejenige Temperatur, bei der sich eine Mischung aus gleichen Raumteilen Kraftstoff und Anilin beim Abkühlen entmischt. Je höher der Anilinpunkt, desto geringer der Gehalt an Aromaten und Naphtenen. Gute Flugdieseldieselkraftstoffe weisen einen Anilinpunkt zwischen 55 und 70 auf. Der Anilinpunkt versagt bei einem Anteil von mehr als 50 vH Aromaten, außerdem ist er bei dunklen Ölen nicht bestimmbar. Ebenso ist er für

Dieseldieselkraftstoffe pflanzlicher oder tierischer Herkunft und für solche, die Zündbeschleuniger enthalten, unbrauchbar.

Die Verbindung des Anilinpunktes mit der Wichte von Dieseldieselkraftstoffen, die von den Aromaten zu den Paraffinen abnimmt, stellt der in England und in den Vereinigten Staaten verwendete

$$\text{Dieselindex} = \frac{\text{Anilinpunkt in } ^\circ\text{F} \times \text{Wichte in API-Graden}}{100}$$

dar. Für gute Flugdieseldieselöle ergibt sich ein Dieselindex von 40–50. Die für den Anilinpunkt geltenden Einschränkungen treffen natürlich auch auf den darauf aufgebauten Dieselindex zu.

Andere Vorschläge zielen auf eine Verknüpfung der Kraftstoffzähigkeit und der Dichte ab, wie z. B. die von Hill und Crats erstmals angegebene und von Moore und Kaye abgeänderte Zähigkeitsdichtezahl [50], [51].

Ein weiterer Vorschlag ist die für handelsübliche Dieseldieselöle von Heine und Marder entwickelte Dichtemethode [52]. Bei ihr wird die Wichte des Dieseldieselkraftstoffes mit Hilfe von Aräometern, die gemäß Abb. 68 geeicht sind, für die Bezugssiedekennziffer 300 ermittelt und auf die tatsächliche Siedekennziffer umgerechnet.

Schließlich wurde auch noch der Selbstzündungspunkt als Kennwert für die Zündwilligkeit vorgeschlagen, weil niedrige Selbstzündungstemperaturen im allgemeinen mit guter Zündwilligkeit in Zusammenhang stehen. Um eine annähernd richtige Bewertung der Dieseldieselkraftstoffe zu erhalten, die mit ihrem Verhalten im Motor übereinstimmt, sind die Untersuchungsbedingungen entsprechend festzustellen. So wird z. B. im Jentzschschen Zündwertprüfer die zur Zündung im Apparat erforderliche Sauerstoffblaszahl mit der Selbstzündungstemperatur in Beziehung gebracht.

Im allgemeinen sind diese chemisch-physikalischen Prüfverfahren den motorischen Verfahren naturgemäß unterlegen, weil bei jenen die verschiedenen Einflüsse der Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur) und erst recht nicht die Eigenarten des jeweils angewandten Verfahrens (unmittelbare Einspritzung, Vorkammer u. dgl.) durch noch so gute Abstimmung der Prüfbedingungen erfaßt werden können. Wenn auch die chemisch-physikalischen Prüfverfahren für handelsübliche Dieseldieselkraftstoffe im allgemeinen Werte liefern, die annähernd dem tatsächlichen Verhalten im Motor entsprechen, so können sie doch Fehlwerte bei Kraftstoffen geben, die von der Norm abweichen. Die Entwicklung der Zündwilligkeitsprüfung dürfte daher mehr über den Motor als über analytische Verfahren ihren Weg nehmen.

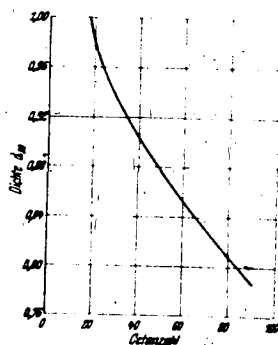


Abb. 68 Cetanzahl und Wichte bei der Bezugssiedekennziffer 300

2. Reinheit

- Verstopfende Verunreinigungen
- Verkokungsneigung
- Angreifende Verunreinigungen
- Korrosionsschutz für die Kraftstoffführenden Teile
- Aschegehalt

Dieselskraftstoffe sollen klar, wasserfrei und ohne Verunreinigungen sein, die, ähnlich wie bei Otto-Kraftstoffen, verstopfend oder anfressend wirken. Sie dürfen überdies keine Anteile enthalten, die Verkokungen an der Düse hervorrufen oder Anlaß zu verstärkter Abnutzung der Zylinder geben. Deshalb unterscheiden sich Art und Durchführung der Kraftstoffprüfung bei Dieselskraftstoffen in Einzelheiten von der für Otto-Kraftstoffe.

a) Verstopfende Verunreinigungen

Wegen der feinen Düsenbohrungen ist bei Dieselskraftstoffen noch schärfer als bei Otto-Kraftstoffen auf Freiheit von verstopfenden Verunreinigungen zu sehen. Feste Verunreinigungen rühren meist von Unachtsamkeiten bei der Abfüllung und Beförderung der Dieselskraftstoffe her. Sie bleiben wegen der höheren Viskosität länger im Kraftstoff schweben als in Otto-Kraftstoffen, so daß vor der unmittelbaren Verwendung im Motor zweckmäßig eine entsprechende Absetzzeit vorzusehen ist. Feste Verunreinigungen bilden bei Anwesenheit von Wasser vielfach Schlamm, der gleichfalls verstopfend wirkt. Bei Kälte können Dieselskraftstoffe feste Paraffine u. ä. ausscheiden, die ebenfalls verstopfend wirken. Vgl. hierüber Ringbuchbeitrag IV C 1.

Bei der Mischung von Dieselskraftstoffen können Fällungen auftreten, die verstopfend wirken. Diese Störung ist beim Mischen von Kraftstoffen verwandten chemischen Aufbaus nicht zu befürchten, wohl aber z. B. bei Anteilen paraffinischer mit solchen asphaltisch-aromatischer Natur (Gasöl und Steinkohlenteeröl). Im Hinblick darauf, daß die verschiedensten Herstellungsverfahren für die Gewinnung von Dieselskraftstoffen eingesetzt sind, ist die Frage der Mischbarkeit von großer Bedeutung.

b) Verkokungsneigung

Dieselskraftstoffe können im Betrieb pech- und koksartige Ablagerungen in und an der Düse bilden, die eine Störung der Strahlbildung verursachen oder verstopfend wirken und Leistungsverlust des Motors verursachen. Es gibt Verkokungen spröder Beschaffenheit, die leicht abblättern und solche zäher und pastenartiger Natur. Die Ablagerungen rühren von unvollständiger Verbrennung her und treten im allgemeinen stärker auf, wenn der Motor im Leerlauf oder mit Teillast arbeitet. Sie sind weitgehend von der Düsentemperatur, ihrer Bauart und der Form des Verbrennungsraumes abhängig.

Einen Anhalt für die Verkokungsneigung und zugleich auch für die Verschmutzung des Verbrennungsraumes geben der Asphaltgehalt und bestimmte, aus der Schmierölprüfung übernommene Verkokungsteste.

a) Asphaltgehalt

Asphalthaltige Dieselskraftstoffe zeigen verstärkte Verkokungsneigung, deshalb wird vielfach der Asphaltgehalt als ein Maß für diese lästige Eigenschaft angesehen. Man bestimmt ihn z. B. gemäß DIN 3860 durch Ausfällen mit Normalbenzin, zweckmäßiger mit chemisch reinem Diäthyläther, und gibt ihn in Gewichtsprozenten an. Im allgemeinen wird für Flugdieselskraftstoffe der Asphaltgehalt auf 0,5 Gew.-% zu begrenzen sein, doch ist in ihnen Asphalt meist gar nicht nachweisbar.

b) Verkokungsteste

Zur Ermittlung der Verkokungsneigung wird der beim Abdampfen des Dieselskraftstoffes übrigbleibende Rückstand herangezogen. Es gibt verschiedene Ver-

kokungsteste (Conradson, Mack, Ramsbottom u. a.), von denen der Conradsonstest (Ausführung nach DIN 3796) bisher am meisten befriedigt, weil er die beste Übereinstimmung mit der im Motor festgestellten Verkokungsneigung gibt, wenn man z. B. bei der motorischen Prüfung den Leistungsabfall infolge Verkokung der Düse als Kennwert nimmt [53].

Gegen die genannten Verkokungsteste wird eingewandt, daß sie den Kraftstoff nicht unter Bedingungen prüfen, die den im Motor herrschenden nahekommen. Aus diesem Grunde wurde von Hagemann und Hammerich [54] eine Abwandlung vorgeschlagen, die dem eigentlichen Abdampftest eine zweistündige Behandlung der Probe in einer Bombe unter 20 atü Druck und bei 150° C vorausgehen läßt. Das Verfahren wird zur Zeit neu überarbeitet. Nach den bisherigen Versuchen läßt sich sagen, daß der Conradsonstest die Verkokungsneigung im allgemeinen richtig bewertet, ausgenommen die von den im Spaltverfahren hergestellten Kraftstoffen, die er zu günstig bewertet. Für diese gibt das Verfahren mit der Bombe zutreffendere Werte.

Die Verkokungsneigung eines Dieselskraftstoffes wird verstärkt durch große Zähigkeit, hohen Flammpunkt, größeren Anteil an hochsiedenden asphaltartigen Kohlenwasserstoffen und hohen Schmutzgehalt.

c) Angreifende Verunreinigungen

Dieselskraftstoffe können auf die Metalle und Schutzüberzüge der kraftstoffführenden Teile (Leitungen, Ventile, Pumpen usw.) und der Behälter angreifend wirken, wenn sie freien Schwefel, Schwefelverbindungen, wie Merkaptane u. ä. Säuren oder Kresote enthalten. Die Wirkung der einzelnen Verunreinigungen ist je nach dem Werkstoff, auf den sie angreifend wirken, verschieden groß. Sie wird durch etwaigen Wassergehalt des Kraftstoffes verstärkt. Allgemein gültige Voraussetzungen können nicht abgegeben werden, doch kann durch die heute eingeführten Korrosionsteste ein Bild über die Korrosionsneigung gewonnen werden.

Freier Schwefel und korrodierende Schwefelverbindungen können durch die Kupferstreifenprobe nachgewiesen werden. Korrosionsneigung durch freie Säuren wird durch die Zinkstreifenprobe nach DIN 3763 ermittelt. In beiden Fällen ist die unter bestimmten Bedingungen erreichte Gewichtsabnahme des Streifens ein Maß für die Korrosionsneigung des Kraftstoffes. Zusätzlich für Flugdieselskraftstoffe wird eine Gewichtsabnahme bis zu 1 mg angesehen. Untersuchungen über die Korrosion gegenüber anderen im Motorenbau verwendeten Werkstoffen [55] zeigen, daß bisher keine Gesetzmäßigkeiten über die Korrosionswirkung von Dieselskraftstoffen ermittelt werden konnten. Für die Feststellung des Säuregehaltes kann auch die nach BVM 7180 ermittelte Neutralisationszahl herangezogen werden.

Korrosionen an Zink [56], das als Rostschutz noch vielfach verwendet wird, sind besonders unangenehm, weil sich lösliche Metallverbindungen (Seifen) bilden, die gallertartig sind und stark verstopfend wirken. Leichtmetalle erweisen sich Dieselsölen gegenüber als gut widerstandsfähig. Die Güte der Refinement ist stets ausschlaggebend für die allgemeine Korrosionsneigung.

Der Gesamtschwefelgehalt des Dieselskraftstoffes bestimmt die Menge des bei der Verbrennung entstehenden Schwefeldioxydes. Ob dieses im Auspuff korrodierend wirkt, ist sehr zweifelhaft, weil hierfür die Gegenwart flüssigen Wassers erforderlich wäre, während im Auspuff von Flugdieselmotoren kaum eine Kondensation des Verbrennungswassers eintritt. Daher wird auch der Gesamtschwefelgehalt meist nicht festgelegt. Für Flugdieselskraftstoffe erscheint ein Gehalt von 1 vH unbedenklich.

d) Korrosionsschutz für die kraftstoffführenden Teile

Die Entfernung der angreifenden Anteile durch geeignete Refinement ist bei Dieselskraftstoffen wegen

der Kosten und der Raffinationsverluste ebenso wenig zugänglich wie bei Otto-Kraftstoffen. Für Lagerbehälter und Fässer hat sich ungeschütztes Stahlblech bewährt, doch wird auch vielfach Oberflächenschutz durch Verzinkung angewandt. Verzinkung und Verbleiung werden teils angewandt, teils verworfen, die Bewehrung dürfte mit dem Raffinationsgrad des Einfüllgutes in Verbindung stehen.

Neuerdings wurden auch lufttrocknende Lacke entwickelt, die auch gegenüber stark korrodierenden Dieselenzen beständig sind. Doch ist ihre mechanische Festigkeit noch nicht ganz befriedigend, zumal der Lackzug, z. B. bei Fässern, durch die übliche Art der Fäßeinreinigung stark beansprucht wird.

e) Aschegehalt

Der Aschegehalt eines Dieselmotorkraftstoffes wird als Anhalt für seine Neigung, auf die Zylinderwandungen abschleifend zu wirken, angesehen. Man bestimmt ihn gemäß DIN 3657 durch Veraschen einer Probe. Er soll 0,02 vH bei Flugdieselmotorkraftstoffen nicht überschreiten.

3. Energiegehalt

Hinsichtlich des Heizwertes der Flugdieselmotorkraftstoffe sei auf die Ausführungen über Heizwerte in Abschnitt 14 dieses Beitrages hingewiesen. Der fast ausschließlich verwendete Flugdieselmotorkraftstoff, das Gasöl, hat einen unteren Heizwert von rund 10 000 kcal/kg. Dieselmotorkraftstoffe der Fischer-Synthese bis zu 10 500 kcal/kg. Die Heizwertbestimmung erfolgt gemäß DIN 3716. Für die Gasöle ist die Bestimmung mittels besonders geeichter Spindel für die Praxis ausreichend [57]. Die Heizwerte von Gasölen aus Erdöl nehmen mit steigender Wichte annähernd ab. Marder hat diese Beziehung für verschiedene Gasöle ermittelt und danach Heizwertspindeln entwickelt. Solche Spindeln wurden auch für Braunkohlen- und Steinkohlenteeröle besonders geeicht. Diese Dieselmotorkraftstoffe stimmen in der Beziehung zwischen Heizwert und Wichte nicht mit den Gasölen aus Erdöl überein.

Der Luftbedarf, ebenfalls in Abschnitt 14 behandelt, ist für Dieselmotorkraftstoffe praktisch ohne Bedeutung, da Dieselmotoren von Leerlauf bis Vollast mit Luftüberschuß arbeiten. Die Abgabe sind daher praktisch frei von unverbranntem Kraftstoff.

4. Beständigkeit

- a) Kältebeständigkeit
- b) Lagerbeständigkeit

a) Kältebeständigkeit

Bei Abkühlung verlieren die Dieselmotorkraftstoffe ihre Fließ- und Filtrierfähigkeit und geben dadurch zu Störungen Anlaß. Für die Prüfung des Kälteverhaltens sind verschiedene Verfahren in Anwendung, über die der Ringbuchbeitrag IV C 1 berichtet.

b) Lagerbeständigkeit

Veränderungen der Dieselmotorkraftstoffe während längerer Lagerung sind im Gegensatz zu manchen Otto-Kraftstoffen nicht zu befürchten. Daher spielen Lagerbeständigkeits-Prüfungen hier keine Rolle.

Dagegen ist die Lagerbeständigkeit stark eingeschränkt für Mischungen aus Dieselmotorkraftstoffen verschiedenen chemischen Aufbaues. Wenn z. B. Dieselmotorkraftstoffe asphaltisch-aromatischer Natur mit solchen paraffinischen Aufbaues vermischt werden, können Ausfällungen auftreten, die zur Verstopfung von Filtern, Düsen usw. Anlaß geben. Die Gesetzmäßigkeiten, nach denen diese Ausfällungen erfolgen, sind noch nicht ganz geklärt. Aus diesem Grunde ist ein genormtes Verfahren für die Prüfung auf Ausfällung noch nicht eingeführt worden. Vorschläge für die Prüfung sehen vor, eine Mischung aus der Kraftstoffprobe und RCH-Bezugsdiesöl 24 Stunden bei 40° und 1 Stunde bei 200° zu prüfen.

Innerhalb der Standzeit darf keine Entmischung oder Ausfällung eintreten.

5. Zähigkeit

Die Zähigkeit der Dieselmotorkraftstoffe bestimmt die Pumpfähigkeit und die Güte der Zerstäubung. Sie nimmt im allgemeinen mit der Erhöhung der Siedegrenzen zu. Eine gewisse Zähigkeit ist erforderlich, um den volumetrischen Wirkungsgrad der Kraftstoffpumpe ausreichend hochzuhalten und zu vermeiden, daß der Druck auf der Saugseite der Pumpe unter den Atmosphärendruck sinkt, denn dadurch würde die im Dieselmotorkraftstoff gelöste Luft frei werden und während des Durchtritts durch die Pumpe deren Abnutzung vergrößern.

Zu geringe Viskosität erhöht die Leckverluste der Pumpe, wodurch hoher Kraftstoffverbrauch vorgebracht werden kann, und vergrößert die Abnutzung der Pumpenteile, weil die Schmierung nicht ausreicht. Zu hohe Viskosität macht hohe Pumpendrucke erforderlich, hauptsächlich wegen des Durchströmwiderstandes an der Düsenbohrung. Sie verschlechtert außerdem die Aufbereitung der Kraftstoffe im Motor durch Bildung zu großer Kraftstofftröpfchen. Dieser Einfluß wird gering, wenn der Einspritzdruck so hoch gewählt wird, daß Turbulenz und äußere Reibungskräfte den Zerstäubungsvorgang beherrschen.

Die absolute Zähigkeit von Gasölen beträgt ~ 6 cSt (~ 1,5° E). Sie wird zweckmäßig in absoluter Zähigkeit (Centistoke) oder in kinematische Zähigkeit Centipoise [= Centistoke / Dichte] an Stelle der technischen Viskositätsmaße (Engler-, Saybolt- und Redwood-Gräde) angegeben, weil die geringen Unterschiede in der Viskosität der Dieselenzen durch das absolute Maßsystem deutlicher zum Ausdruck kommen. Das Normblatt DIN 3755 (Entwurf 1) sieht als Meßgerät das Vogel-Ossag-Viskosimeter als Prüfgerät vor.

6. Sonstige Eigenschaften

- a) Wichte
- b) Siedeverhalten
- c) Oberflächenspannung
- d) Flammpunkt

a) Wichte

Sie spielt keine Rolle für die Beurteilung des Dieselmotorkraftstoffes, sondern dient lediglich als Anhalt für die Beurteilung der Herkunft des Kraftstoffes. Beim Übergang zwischen Kraftstoffen mit unterschiedlicher Wichte kann diese sich insofern auf die Höchstleistung des Motors bemerkbar machen, als die Einspritzpumpen meist auf größte Einspritzvolumen und nicht auf Einspritzgewichte eingestellt werden, so daß sich wegen des praktisch gleichbleibenden Heizwertes für schwere und leichte Dieselenzen Unterschiede in den dem Motor zugeführten Energiemengen ergeben können. Die im Flugbetrieb verwendeten Gasöle besitzen eine Wichte von 0,840 bis 0,880. Die Bestimmung der Wichte erfolgt gemäß DIN 3653.

b) Siedeverhalten

Das Siedeverhalten eines Dieselmotorkraftstoffes wird im gleichen Gerät bestimmt wie für Otto-Kraftstoffe (s. S. 17). Es gelten also hierfür die Vorschriften in BVM 7100—7113 mit geringfügigen dort angegebenen Änderungen des Gerätes. Doch begegnen der vollständigen Destillation dann Schwierigkeiten, wenn sie über 350° C hinausgeführt werden soll, weil sich bei diesen Temperaturen im Destillierkolben bereits Spalterscheinungen innerhalb der Kraftstoffprobe zeigen, die das Ergebnis beeinflussen. Für Flugdieselmotorkraftstoffe werden Vorschriften über die Siedegrenzen oder bestimmte Siedekennziffern nicht gefordert, doch kann man im allgemeinen den Siedebereich für Flugdieselmotorkraftstoffe zwischen 200 und 350° C ansetzen, wobei bis 300° C min-

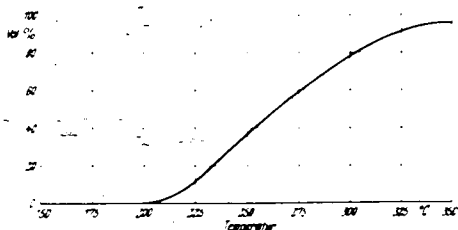


Abb. 69 Siedekurve eines Flugdieselskraftstoffes

destens 50 vH. übergangen sein sollen. Die kennzeichnende Siedekurve eines Flugdieselskraftstoffes zeigt Abb. 69.

Dieselskraftstoffe mit verhältnismäßig viel leichtflüchtigen Anteilen verbrennen ungünstig, weil sich unmittelbar nach dem Einspritzen eine durch rasche Verdampfung der leichtflüchtigen Anteile entstehende Wolke bildet, wodurch der Kraftstoff im Verbrennungsraum ungleichmäßig verteilt wird.

Im allgemeinen spielt die Siedekurve bei Dieselskraftstoffen eine untergeordnete Rolle, weil Dieselskraftstoffe mit ungeeignetem Siedeverhalten durch ungünstige Werte für Viskosität, Stockpunkt, Filtrierfähigkeit und Verkokung ausreichend gekennzeichnet werden.

c) Oberflächenspannung

Für Dieselskraftstoffe ist die Oberflächenspannung von einiger Bedeutung; weil sie die Zerstäubung im Verbrennungsraum beeinflusst. Dieselskraftstoffe besitzen eine Oberflächenspannung von 29 bis 31 mg/mm.

d) Flammpunkt

Der Flammpunkt von Dieselskraftstoffen liegt über 55° C, so daß sie hinsichtlich der Lagerung in die Gefahrenklasse 2 (vgl. Abschn. Otto-Kraftstoffe 16, S. 27) fallen. Der Zusatz von Zündbeschleunigern setzt den Flammpunkt herab, wobei der Flammpunkt u. U. unter die für Gefahrenklasse 2 geltende Temperatur herabgedrückt wird [37]. Vgl. Tafel 27.

Tafel 27:

Zündbeschleuniger und Flammpunkt von Gasölen.

Kraftstoff	Zusatz	Flammpunkt °C
Asphaltisches Gasöl	2 vH Azetonperoxyd	70
	7 vH "	61
	"	51
Gemischbasisches Gasöl	"	80
	2 vH Äthylnitrat	59

Schrifttum

- [1] H. Bütetisch, Schriften der Akademie der Luftfahrtforsch., Heft 9.
- [2] Oil and Gas Journal, Oktober 1939, S. 40.
- [3] F. R. Banks, Science of Petroleum, Bd. 4, S. 2481.
- [4] v. Philippovich, Brennstoff-Chemie, Nr. 2 (1940), S. 15.
- [5] Buc und Aldrin, SAE-Journal 1939, S. 333.
- [6] Heron und Beatty, Intava World, Bd. I (1939), Nr. 2.
- [7] Hebl, Rendel und Garton, Industrial and Engineering Chemistry 1939, S. 862.
- [8] Hoffmann, Bericht Nr. 109 der Lilienthal-Gesellschaft, S. 63.
- [9] Seeber, Luftfahrt-Forsch., Bd. 16 (1939), S. 18.
- [10] Wilke, Beiheft Nr. 33 zu der Zeitschrift des Vereins Deutscher Chemiker.

- [11] v. Philippovich, Öl und Kohle, Nr. 28 (1939), S. 551.
- [12] Marder, Öl und Kohle, Nr. 47 (1935), S. 923.
- [13] v. Weber, Angewandte Chemie, Nr. 39 (1939), S. 607.
- [14] Zerbe und Eckert, Angewandte Chemie, Nr. 38 (1932), S. 593; Öl und Kohle, 1934, S. 112.
- [15] Peters und Lohmar, Beiheft Nr. 25 zur Zeitschrift des Vereins deutscher Chemiker.
- [16] Öl und Kohle, Nr. 10 (1939), S. 181.
- [17] Bridgeman and White, SAE-Journal 1930 und 1931.
- [18] Bass, „Fuels for Aircraft Engines“, London, Royal Aeronautical Society.
- [19] Störungen an Brennstoffsystemen durch Luft- und Dampfblasenbildung, ARC-Rep. and Mem. 1693, übersetzt in ZWB, Nr. 565.
- [20] Sender, Luftfahrt-Schrifttum des Auslandes in Übersetzungen, Bd. 5, Nr. 3, S. 73.
- [21] v. Philippovich, Brennstoff-Chemie, Nr. 2 (1940), S. 15.
- [22] Clothier, Fuel Volatility and Carburettor Freezing, Rep. and Mem., Nr. 1549.
- [23] Allen, Rogers and Grookes, Ice Formation in Aircraft Engine Carburetors, SAE-Journal, November 1934.
- [24] SAE-Journal, Februar 1938.
- [25] Beck und Künzelmann, Korrosion durch Kraftstoffe, Deutsche Kraftfahrtforsch., Heft 21. Marder und Farnow, Korrosionsangriff durch Kraftstoffe, Deutsche Kraftfahrtforsch., Heft 27.
- [26] Eisenstecken und Rother, Öl und Kohle, 1939, Heft 7, S. 129.
- [27] Banks, Some Problems of Modern high-duty Aero Engines in their fuels, Journal of the Inst. of Petr. Techn., Bd. 23 (1937), Nr. 180.
- [28] Grote-Oetringhaus, Brennstoff-Chemie, 1938, S. 417.
- [29] Richter, Öl und Kohle, 1939, Heft 4, S. 69.
- [30] F. Penzig, Kraftstoff, 1940, Heft 4, S. 107.
- [31] Öl und Kohle, 1937, Heft 39, S. 935.
- [32] H. Freytag, Chemische Industrie, 1937, Heft 11, S. 254.
- [33] H. Freytag, Raumexplosionen durch statische Elektrizität, Berlin 1938.
- [34] L. Bisang, Z. VDI, 1937, S. 805.
- [35] G. D. Boerlage u. J. J. Broeze, Forschungsheft 368, VDI-Verlag, Berlin.
- [36] W. Wilke, Z. VDI, 1938, S. 1135.
- [37] J. J. Broeze und J. O. Hinze, SAE-Vortrag, Mai 1939.
- [38] H. Ernst, Automobiltechnische Zeitschrift, 1939, S. 213.
- [39] F. A. F. Schmidt, Motor und Kraftstoff, 1939, S. 69.
- [40] G. D. Boerlage u. J. J. Broeze, SAE-Journal, 1932, S. 283.
- [41] W. Lindner, Brennstoff- und Wärmewirtschaft, 1937, S. 123.
- [42] Bosch, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 7. Auflage, S. 131.
- [43] W. Wilke, Automobiltechnische Zeitschrift, 1940, S. 148.
- [44] W. Wilke, Motortechnische Zeitschrift, 1939, S. 43.
- [45] H. Meurer, Z. VDI, 1938, S. 1447.
- [46] Bachy u. Rendel, SAE-Journal, 1938, S. 27.
- [47] Kestler, Öl und Kohle, 1938, S. 941.
- [48] Hetzel, The Development of Diesel Fuel Testing, Report of Pennsylvania College, Nr. 45.
- [49] Vorberg, Öl und Kohle, 1939, S. 497.
- [50] J. B. Hill u. H. B. Coats, Industrial Engineering Chemistry, 1928, S. 641.
- [51] C. C. Moore u. G. R. Kaye, Oil and Gas Journal, 1934, S. 108.
- [52] M. Marder, Öl und Kohle, 1938, S. 1091.
- [53] A. W. Schmidt u. F. Kneule, Öl und Kohle, 1938, S. 1034.
- [54] Hagemann u. Hammerich, Öl und Kohle, 1938, S. 371.
- [55] Marder u. Farnow, Deutsche Kraftfahrtforsch., Heft 27.
- [56] Beck u. Künzelmann, Deutsche Kraftfahrtforsch., Heft 21.
- [57] M. Marder, Öl und Kohle, 1937, S. 644.