

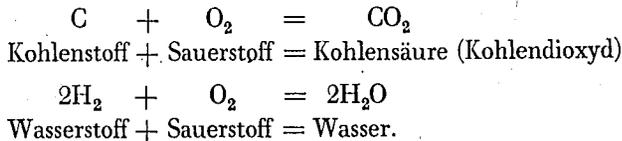
KRAFTSTOFF UND MOTOR

Die Verbrennung

Die Verbrennung der Kraftstoffe im Motor ist eine Oxydation, d. h. eine Vereinigung der Elemente, aus denen der Kraftstoff besteht (fast ausschließlich Kohlenstoff und Wasserstoff) mit dem Sauerstoff der Luft. Dabei wird die chemische Energie der Kraftstoffe in Form von Wärme frei und in den Motoren z. T. in Arbeitsleistung umgewandelt. Zum größeren Teil geht sie über die Auspuffgase und durch die notwendige Kühlung verloren (Bild 29, S. 95).

Vollständige Verbrennung

Die Verbrennung der Anteile an Kohlenstoff und Wasserstoff in den Kraftstoffen kann eine vollständige sein, d. h. der Kohlenstoff verbrennt vollständig mit Sauerstoff zu Kohlensäure, der Wasserstoff zu Wasser nach folgenden Grundgleichungen:



Die dabei frei werdenden Wärmemengen können mit grober Annäherung aus den Gewichtsteilen Kohlenstoff und Wasserstoff im Kraftstoff errechnet werden unter der Annahme, daß

jedes kg Kohlenstoff, das im Kraftstoff enthalten ist, rd. 8 000 WE

und jedes kg Wasserstoff, das im Kraftstoff enthalten ist, rd. 29 000 WE

liefert. Für genauere Berechnung ist einige Kenntnis des Molekülaufbaues nötig, da der Energiegehalt der Kohlenwasserstoffe von ihrem Aufbau stark abhängig ist.

Je nach der Zusammensetzung der Kraftstoffe sind die anfallenden Mengen an Kohlensäure und Verbrennungswasser verschieden. Sie lassen sich unter der Annahme vollständiger Verbrennung errechnen. Die dabei anfallenden Höchstmengen an Kohlensäure und Wasser sind für einige Kraftstoffe in der Tafel 7 enthalten, doch werden sie praktisch wegen unvollständiger Verbrennung infolge unzulänglicher Gemischbildung und -verteilung nur annähernd erreicht (vgl. auch Tafel 9).

Tafel 7. Höchstmengen an Kohlensäure und Verbrennungswasser bei der Verbrennung von Kraftstoffen

Kraftstoff	Kohlensäureanteil	Anfallendes Verbrennungswasser je kg verbrannten Kraftstoff
	der Abgase Raum %	kg
Kohlenstoff	21	-
Steinkohlenteeröl .	~ 18	~ 0,65
Braunkohlenteeröl.	~ 16,7	~ 0,9
Gasöl	~ 15,7	~ 1,15
Benzin	~ 14,8	~ 1,35
Motorenbenzol	~ 17,7	~ 0,7
Alkohole	~ 15	~ 1,2
Flüssiggas	~ 13,9	~ 1,6
Methan	11,8	2,25
Wasserstoff	-	9

Das Verbrennungswasser ist im Winter als Dampffahne an den Auspuffrohren der Fahrzeuge wahrnehmbar.

Tafel 8. Luftbedarf der Kraftstoffe für theoretisch vollkommene Verbrennung

Kraftstoff	Luftbedarf	
	kg Luft je kg Kraftstoff	l Luft je l Kraftstoff
Kohlenstoff	11,4	-
Steinkohlenteeröl .	~ 15	~ 10 500
Braunkohlenteeröl.	~ 14	~ 9 700
Gasöl	~ 14,5	~ 9 700
Benzin	~ 15	~ 8 600
Motorenbenzol	~ 13	~ 9 000
Äthanol	9	5 500
Methanol	6,4	4 000
Flüssiggas	~ 17	~ 27*)
Methan	17,2	9,5*)
Wasserstoff	34,3	2,4*)

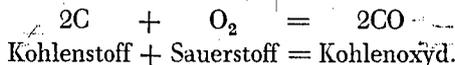
*) Diese Werte beziehen sich auf 1 l Gas

Aus den Verbrennungsgleichungen läßt sich auch diejenige Sauerstoffmenge errechnen, die in der Verbrennungsluft zur Verfügung stehen muß. Da Sauerstoff und Stickstoff in der Luft im Raumverhältnis 21:79 enthalten sind, ist der Luftbedarf das $79:21 = 3,76$ fache des erforderlichen Sauerstoffvolumens. Kraftstoffe, die Sauerstoff enthalten, wie Äthanol (C_2H_6OH) und Methanol (CH_3OH), benötigen weniger Luft, weil der mitgeführte Sauerstoff bereits Wasserstoff gebunden hat. Die vorstehende Tafel 8 gibt den Luftbedarf der wichtigsten Kraftstoffe an.

Die praktische Verbrennung läuft meist mit Luftüberschuß ab. Das Verhältnis der tatsächlich in die Verbrennung eingeführten Luft zu der theoretisch erforderlichen Luftmenge wird als Luftüberschußzahl bezeichnet. Arbeitet der Motor mit Luftüberschußzahlen unter 1, so ist er „fett“, mit Luftüberschußzahlen über 1 „mager“ eingestellt (vgl. auch S. 96).

Unvollständige Verbrennung

Die Verbrennung wird unvollständig, wenn Luftmangel herrscht. Dann verbrennt ein Teil des Kohlenstoffes nach folgender Gleichung:



Hierbei wird je kg Kohlenstoff nur eine nutzbare Wärme von rund 2100 statt 8000 WE bei vollständiger Verbrennung entwickelt. Es ist daraus zu ersehen, daß eine unvollständige Verbrennung des Kraftstoffes stets mit einer geringeren Ausbeute an nutzbarer Energie verbunden ist. Außerdem ist das in den Auspuffgasen enthaltene Kohlenoxyd sehr giftig (vgl. S. 162).

Unvollständige Verbrennung kann infolge schlechter Gemischverteilung und ungenügender Durchwirbelung an einzelnen Stellen im Otto-Motor auch dann auftreten, wenn mit theoretischem Kraftstoff-Luftverhältnis oder sogar mit Luftüberschuß gefahren wird.

Kohlenoxyd ist ein brennbares Gas, das zu Kohlensäure verbrennt und dabei z. B. als Anteil des Generatorgases (S. 36) rund 2400 WE je kg (= je 800 l) Kohlenoxyd nutzbare Wärme entwickelt. In den Auspuffgasen geht sie ungenützt verloren.

Der Diesel-Motor weist infolge des großen Luftüberschusses, mit dem er arbeitet, meist nur geringe Spuren oder gar kein Kohlenoxyd im Auspuff auf, wie aus der nachstehenden Tafel 9 über die Zusammensetzung der Abgase hervorgeht. Abgase von Otto-Motoren enthalten ferner meist auch geringe, solche von Diesel-Motoren große Mengen unverbrauchten Sauerstoff.

Tafel 9. Anteile der Auspuffgase an Kohlensäure und Kohlenoxyd

(Nach Bosch, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 7. Auflage)

Abgasanteil	Otto-Motor		Diesel-Motor	
	Leerlauf %	unter Be- lastung%	Leerlauf %	unter Be- lastung%
Kohlensäure, CO ₂	7-8	10-15	4	7
Kohlenoxyd, CO	9-10	1-5	0,2	0,1

Die Zusammensetzung der Abgase, insbesondere ihr Gehalt an Kohlenoxyd, Kohlensäure und Sauerstoff gibt einen Anhalt für die Beurteilung der Verbrennungsgüte. Durch Geräte, z. B. das Orsat-Gerät, die die einzelnen Anteile aus dem Abgas mittels Chemikalien auswaschen, kann die Abgasanalyse rasch und einfach durchgeführt werden.

Unvollständige Verbrennung kann sich durch Rußen im Auspuff kenntlich machen. Diese Erscheinung wurde u. a. dazu benutzt, die Güte der Verbrennung bei Diesel-Motoren an der Lichtdurchlässigkeit (Rauchfreiheit) der Abgase zu beurteilen.

Durch die Vereinigung des Kraftstoffes mit dem Sauerstoff der Luft bei der Verbrennung nehmen die Abgase einen gegenüber der angesaugten Luft größeren Raum ein und zwar beträgt diese Volumvergrößerung ungefähr: für Benzin 8, Benzol 4, Diesel-Kraftstoffe 7, Äthanol 14 und Methanol 21%.

Der Geruch der Abgase kann durch Schwefelverbindungen im Kraftstoff, aber auch durch teilweise unvollständige Verbrennung unangenehm sein. In vielen Fällen hängt der Geruch der Abgase auch von der Vergasereinstellung, der Betriebstemperatur und dem verwendeten Schmieröl ab. Durch magere Vergasereinstellung läßt sich ein schlechter Abgasgeruch teilweise beseitigen, weil dadurch unverbrannte, stark riechende Kraftstoffreste und Ölteilchen verbrannt werden. Der Qualm des Auspuffs ist kein Maß für die Stärke des Geruchs. Geruch im Wageninnern kann hervorgerufen werden durch Öl-, Fett- und Schmutzablagerung am Motor, undichte Kraftstoff- und Auspuffleitungen und Auspuffheizungen, fette Vergasereinstellung, abgenutzte Kolben und durch Ansaugen der Abgase in das Wageninnere infolge ungünstiger Karosserieform.

Unangenehm riechende Abgase können durch eine flammenlose Nachverbrennung im Auspuffrohr mittels eines Katalysators geruchlos gemacht und gleichzeitig entgiftet werden.

Die motorischen Verbrennungsverfahren

Die Kraftstoffe zeigen je nach ihrem chemischen Aufbau und den Verbrennungsbedingungen unterschiedliches Verhalten bei der Verbrennung. Ihre Energie wird dann am besten ausgenutzt, wenn der Verbrennungscharakter möglichst weitgehend dem Verfahren (Otto, Diesel) angepaßt ist, nach dem die Verbrennung im Motor erfolgt. Umgekehrt wird auch derselbe Erfolg durch eine Anpassung des Motors an einen gegebenen Kraftstoff zu erreichen sein. Beide Wege wurden beschritten, um in gegenseitiger Abstimmung die heutigen Gebrauchskraftstoffe und -motoren zu erreichen.

Die Kraftfahrzeugmotoren verarbeiten flüssige Kraftstoffe nach dem Otto- oder dem Diesel-Verfahren. Die kennzeichnenden Vorgänge dieser Verfahren sind unter Annahme des Viertaktes folgende:

Otto-Verfahren.

Diesel-Verfahren. (Schnellaufender Fahrzeugdiesel)

1. Takt: Ansaugen.

Ansaugen eines vorbereiteten Kraftstoff-Luft-Gemisches Regelung durch Drosselung. Im Leerlauf und bei niedrigen Drehzahlen reichlich Kraftstoff, zu wenig Luft (Luftmangel)	Vorgang Kraftstoffregelung	Ansaugen von Luft ohne Drosselung Luftmenge erlaubt stets Verbrennung der gesamten Kraftstoffmenge mit Luftüberschuß. Regelung durch Änderung der Kraftstoffmenge
---	-------------------------------	---

2. Takt: Verdichten.

Verdichten des Kraftstoff-Luft-Gemisches 4:1 bis etwa 7,5:1 6 bis 12 kg/cm ² 250 bis 400° C Durch Zündfunken	Vorgang Verdichtungsgrad Druck im Motor am Ende der Verdichtung zugehörige Temperatur Einleitung der Verbrennung	Verdichten der Luft, Einspritzen des Kraftstoffes am Ende der Verdichtung höher als 14:1 bis zu 22:1 25 bis 50 kg/cm ² 550 bis 700° C Durch Selbstentzündung des eingespritzten Kraftstoffes
---	--	---

5. Takt: Verbrennen und Ausdehnen.

<p>Ungesteuert, hauptsächlich vom chemischen Aufbau des Kraftstoffes abhängig, beeinflusst durch Ort der Zündung, Form des Verbrennungsraumes und Durchwirbelung des Gemisches</p>	<p>Steuerung der Verbrennung</p>	<p>Etwa 50 v. H. des Kraftstoffes sammeln sich während des „Zündverzuges“ (Zeit zwischen Einspritzbeginn und Entflammung) an und verbrennen ungesteuert, der Rest gesteuert durch weiteres Einspritzen des Kraftstoffes</p>
<p>Der Kraftstoff verbrennt so rasch, daß während der Verbrennung praktisch keine Vergrößerung des Verbrennungsraumes durch den ausweichenden Kolben eintritt, (Verpuffung oder Gleichraumverbrennung) vgl. Bild 15</p>	<p>Art der Verbrennung</p>	<p>Der während des Zündverzuges eingespritzte Kraftstoff verpufft (s. Otto-Verfahren). Der später eingespritzte Kraftstoff wird durch die Pumpe so zugeführt, daß annähernd gleicher Druck u. Temperatur bis gegen das Ende der Verbrennung im Verbrennungsraum herrschen (Gleichdruckverbrennung vgl. Bild 15)</p>
<p>Die Flamme breitet sich von der Zündkerze ausgehend in Form einer Front aus, Bild 16. Mit zunehmender Steigerung des Verbrennungsdruckes erreicht die Flamme schließlich eine Höchstgeschwindigkeit, die gegen Ende der Verbrennung wieder abnimmt. Mittlere Flammgeschwindigkeit 10 bis 25 m/sek. Das Auftreten von „Zündkernen“ im unverbrennten Gemisch ruft am Ende der Verbrennung „Klopfen“ hervor</p>	<p>Verbrennungsablauf</p>	<p>Die Entflammung tritt am Ende des Zündverzuges an mehreren Stellen des Kraftstoffstrahles („Zündkerne“) gleichzeitig auf (Bild 16) und verbreitet sich rasch über den ganzen Kraftstoffstrahl; dadurch steigt die Temperatur so hoch, daß später eingespritzter Kraftstoff praktisch ohne Zündverzug entflammt wird Wenn der Kraftstoff unzureichend zündwillig ist, so wird während des Zündverzuges eine unerwünscht große Kraftstoffmenge angesammelt, die am Anfang der Verbrennung verpufft. Der Motor „klopft“ oder „nagelt“</p>
<p>30 bis 40 at</p>	<p>Verbrennungsdruck</p>	<p>50 bis 80 at</p>
<p>1500 bis 2200° C (jedoch Unterschiede in den einzelnen Zylindern eines Motors bis zu 100° wegen ungleichmäßiger Gemischverteilung)</p>	<p>Verbrennungstemperatur</p>	<p>1500 bis 2200° C</p>
<p>Expansion (Arbeitsleistung) Bei Beginn der Expansion soll die Verbrennung abgeschlossen sein</p>	<p>Abschluß der Verbrennung</p>	<p>Expansion (Arbeitsleistung) Bei Beginn der Expansion soll die Verbrennung abgeschlossen sein</p>

4. Takt: Auspuffen.

~ 300° im Leerlauf,
800-900° bei Vollast

Etwa 36% der Kraftstoffenergie

Temperatur der Abgase

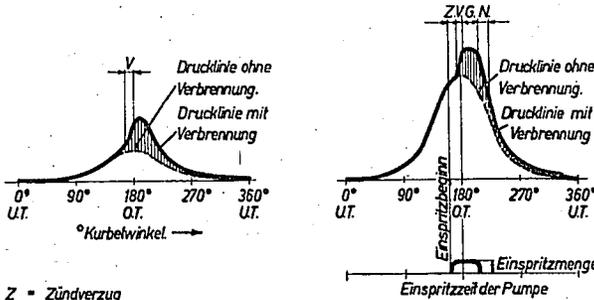
Energiegehalt der Abgase (Verlust, falls nicht für Heizung genutzt) Vergl. Bild 29 S. 95.

~ 250° im Leerlauf
500 bis 600° bei Vollast

Etwa 29% der Kraftstoffenergie

Otto-Motor

Diesel-Motor
Schnellläufer



- Z = Zündverzug
- V = Verpuffung
- G = Gleichdruckverbrennung
- N = Nachbrennen

Bild 15.

Drucklinien für Verdichtung und Verbrennung im Otto- und Diesel-Motor

Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal beider Motorarten ist die Art der Zündung: Fremdzündung durch Zündkerze oder Glühkopf für den Otto-Motor, Selbstzündung durch hohe Verdichtung für den Diesel-Motor. In der Gemischbildung zeigt der Otto-Motor verschiedene Abwand-

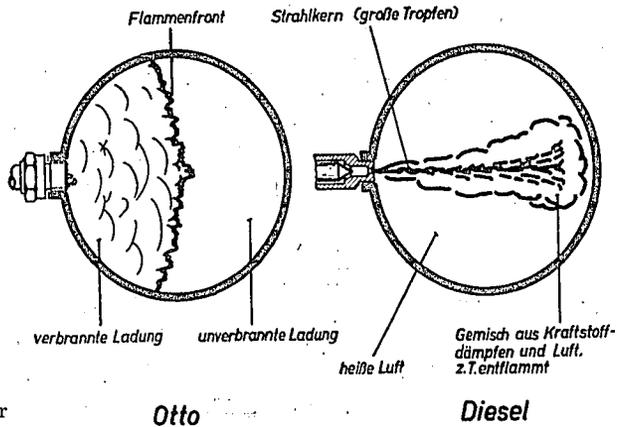


Bild 16.

Flammenbildung im Otto- und Diesel-Motor

lungen. Die Grundform des Fahrzeug-Otto-Motors weist Gemischbildung im Vergaser außerhalb des Zylinders auf. Die Otto-Motoren mit Einspritzung führen den Kraftstoff im Ansaughub ein, Hesselman- und Glühkopfmotor dagegen im Verdichtungshub.

Der Zeitpunkt für die Einbringung des Kraftstoffes im Otto-Motor wird hierbei von der Vergasungsbereitschaft des Kraftstoffes bestimmt. Die Leichtkraftstoffe, die das Gemisch nahezu selbsttätig bilden, bedürfen hierfür keiner Unterstützung mittels einer besonderen Erwärmung durch hohe Verdichtung und können daher schon im Verdichtungshub eingeführt werden, wie beim Otto-Vergaser- und Otto-Einspritz-Motor. Wenn jedoch in diese Motoren schwersiedende Kraftstoffe eingeführt werden, wird sich ein gewisser Anteil davon im Zylinder niederschlagen. Um dies zu verhüten, muß der Kraftstoff in dem Zeitpunkt in den Zylinder eingespritzt werden, in dem dort die höchste Temperatur herrscht. Daher spritzen Otto-Motoren, die schwerflüchtige Kraftstoffe verwenden, wie der Hesselman- und Glühkopf-Motor, im Verdichtungshub ein. Der Hesselman-Motor sucht dabei etwa noch mögliche Kraftstoffniederschläge im Zylinder durch gründliche Wirbelung und besondere Ausbildung des Kolbens möglichst zu verhüten. Der Glühkopfmotor unterstützt die Gemischbildung durch eine wärmeabgebende Glühfläche im Verbrennungsraum.

Diese Mitteldruckmotoren sind wenig kraftstoffempfindlich und daher gut geeignet, solche Kraftstoffe zu verbrauchen, die in der Kraftstoffwirtschaft anfallen, aber für den unmittelbaren Verbrauch in Otto- oder Diesel-Motoren weniger brauchbar sind. Andererseits ist es bei Kraftstoffnot auch möglich, in allen Motorarten mit Mischungen von Otto- und Diesel-Kraftstoffen einen leidlichen Betrieb durchzuführen.

Die Übersicht Bild 17 gibt die Kennzeichen der wichtigsten Motorbauarten und die für sie geeigneten Kraftstoffe an.

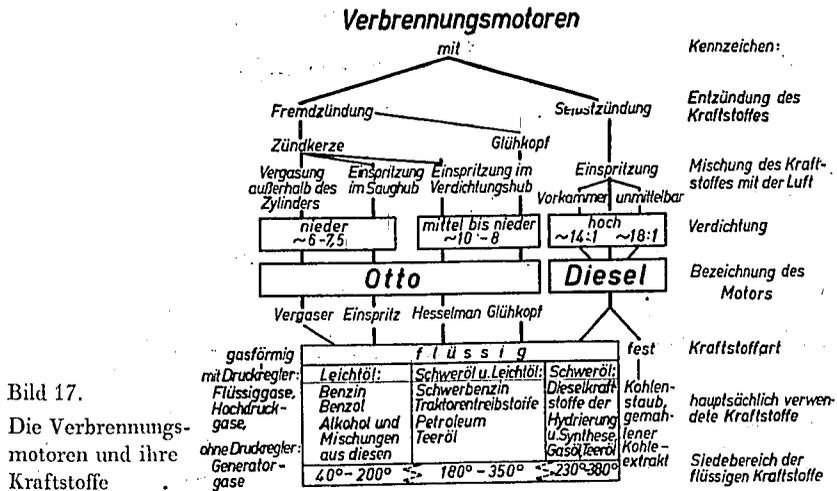


Bild 17.
Die Verbrennungsmotoren und ihre Kraftstoffe

Verbrennungsgeschwindigkeit

In einem Viertakt-Otto-Motor, der mit 3000 Umdrehungen je Minute läuft, stehen für Verbrennung und Expansion nur rund $\frac{1}{300}$ Sekunde zur Verfügung, bei schnelllaufenden Rennmotoren sogar weniger als die Hälfte dieser Zeit. Als Kraftstoffe sind daher nur Stoffe verwendbar, die eine hohe Verbrennungsgeschwindigkeit besitzen.

Die Geschwindigkeit, mit der die Verbrennung das Kraftstoff-Luft-Gemisch durchheilt, ist nicht gleichbleibend. Sie ist beim Otto-Motor zu Anfang der Verbrennung gering, erreicht ungefähr beim Verbrennungshöchstdruck einen Höchstwert und sinkt dann allmählich wieder ab, weil der Sauerstoff inzwischen verbraucht wurde. Bei Luftmangel und -überschuß (fette und magere Vergasereinstellung) wird sie herabgesetzt.

Im Diesel-Motor setzt die Verbrennung am Mantel des Kraftstoffstrahles mit einem oder mehreren Zündkernen ein und benötigt wegen der notwendigen Aufschließung des Kraftstoffes im Verbrennungsraum gegenüber dem Otto-Motor mehr Zeit.

In beiden Motoren sucht man die Verbrennungsgeschwindigkeit durch innige Durchmischung und Wirbelung von Kraftstoff und Luft zu erhöhen. Zündung bzw. Einspritzzeitpunkt werden so eingestellt, daß bei 10 bis 20° Kurbelwinkel nach Totpunkt der höchste Druck im Verbrennungsraum erreicht wird, d. h. Otto-Motoren arbeiten mit 30 bis 40° Kw Vorzündung, Diesel-Motoren mit 20 bis 30° Kw Voreinspritzung.

Das Verhalten des Kraftstoffes im Verbrennungsablauf

Das Klopfen im Otto-Motor

Das „Klopfen“ ist eine besondere Form der Verbrennung. Es tritt bei Otto-Motoren und Diesel-Motoren auf und äußert sich durch ein Geräusch, das je nach Motor, Betriebsbedingungen und Kraftstoff zwischen feinem Klingeln und hartem Stampfen liegen kann. Trotz annähernd gleicher äußerer Wahrnehmbarkeit liegen dieser Erscheinung beim Otto-Motor andere Ursachen zugrunde als beim Diesel-Motor und das Klopfverhalten und die Umstände, die es beeinflussen, weisen bei beiden Motorarten große Gegensätzlichkeit auf (vgl. hiezu Tafel 11, S. 86).

Die klopfende Verbrennung im Otto-Motor wird ebenso wie die klopffreie vom Zündfunken eingeleitet. Die Flammenfront durchheilt den Verbrennungs-

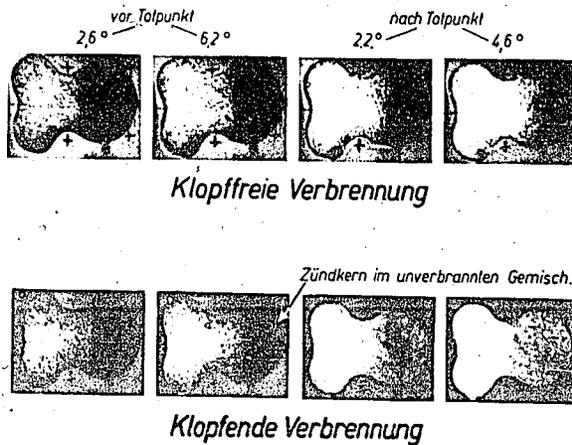


Bild 18.
Flammenaufnahmen
aus klopfreier und
klopfender Verbrennung

Nach T.A. Boyd, S.A.E. Journal 1939.

raum, das verbrennende Kraftstoff-Luft-Gemisch dehnt sich aus und verdichtet das vor der Flammenfront liegende unverbrannte Kraftstoff-Luft-Gemisch zusätzlich. Dadurch und durch Aufheizung von der Flamme aus erhöhen sich Temperatur und Druck des Gemischrestes rasch. Werden dabei gewisse Grenzwerte überschritten, so verbrennt dieser nahezu augenblicklich.

Die Forschungen über das Kraftstoffklopfen sind naturgemäß sehr schwierig, weil die maßgeblichen Vorgänge in kürzester Zeit ablaufen und die Einflüsse von Kraftstoff und Motor eng ineinandergreifen.

Die Erklärung für den Vorgang des Klopfens dürfte heute jedoch dank umfangreicher Forschungsarbeit befriedigend gelungen sein. Lange Zeit wurde angenommen, daß der unverbrannte Teil der Ladung bei Erreichen der kritischen Grenzwerte detoniert und dann eine Detonationswelle entwickelt, die mit der Geschwindigkeit von rund 2000 m/sek sich im Verbrennungsraum fortpflanzt. Das Auftreffen der Detonationswelle auf die Zylinderwandungen wurde als Ursache für das Klopfgeräusch angesehen.

Neuere Untersuchungen wiesen mittels Lichtbildern der Flammenfront im Motor nach, daß sich im Gemischrest, also vor der Flammenfront, selbsttätig neue Zündkerne bilden, von denen aus eine zusätzliche Entflammung ausgeht, die den Gemischrest nahezu augenblicklich verbrennt und beim Auftreffen auf die Zylinderwand das Klopfgeräusch hervorruft. Bild 18 zeigt Flammenbilder, die unmittelbar im Motor während des Betriebes aufgenommen wurden. Die obere Bildreihe wurde bei klopfreiem, die untere bei klopfendem Betrieb gewonnen. Es läßt sich am zweiten Bild der unteren Reihe die Bildung eines Zündkernes erkennen, der sich rasch im unverbrannten Rest der Ladung ausdehnt, wie die beiden anschließenden Bilder erkennen lassen. Dagegen zeigen die in gleichen Zeitabständen aufgenommenen Bilder der klopfreien Verbrennung nur das Vorschreiten der Flammenfront, ohne Flammenbildung im unverbrannten Gemischrest. Diese Versuche lassen überdies erkennen, daß im klopfenden

Motor keine Detonationswelle und daher auch keine ständig anwachsende Flammengeschwindigkeit auftritt, wofür auch andere Erfahrungen sprechen.

Das Klopfen, d. h. das praktisch zeitlose Abbrennen kann nicht auftreten, wenn das Restgemisch bereits von der Flammenfront erfaßt ist, bevor die kritischen Werte an Temperatur und Druck für die Bildung von Zündkernen erreicht werden. Es wird dann also das gesamte Restgemisch klopfrei durchbrennen. Wenn dagegen die kritischen Werte an irgend einer Stelle, z. B. an toten Ecken, schon vorher erreicht werden, dann wird die Verbrennung klopfend.

Schließlich hat der Klopfvorgang auch eine Deutung erhalten, die auf den chemischen Vorgängen bei der Verbrennung beruht. Danach verläuft die Verbrennung nicht derart, daß die Moleküle des Kraftstoffes nacheinander abbrennen, während die übrigen Moleküle zunächst unangegriffen bleiben, sondern es brennen mehrere Moleküle gleichzeitig in Teilreaktionen ab. Dabei entstehen Zwischenprodukte, die die unverbrannten Anteile aufspalten und dadurch die Verbrennung erleichtern und beschleunigen. Hierbei wird in der folgenden Teilreaktion die gleiche Zahl oder ein Mehrfaches dieser beschleunigenden Zwischenprodukte wieder zurückgebildet. Es liegt also eine sich stets erneuernde Reaktionskette vor. Sie kann sich sogar verzweigen, wenn die beschleunigenden Kettenträger mehrfach zurückgebildet werden, so daß damit die Verbrennungsgeschwindigkeit noch weiter anwächst. Hierzu kommt noch der Einfluß der mit dem Fortschreiten der Reaktionen steigenden Temperatur, so daß schließlich bald die für das Auftreten des Klopfens kennzeichnende hohe Verbrennungsgeschwindigkeit erreicht wird.

Wenn dafür gesorgt wird, daß die Reaktionsketten sich nicht ungehemmt fortsetzen können, z. B. durch Auftreffen der Zwischenprodukte auf die kühlen Wände des Verbrennungsraumes oder auf fein verteilte metallische Antiklopfmittel (S. 71) im Kraftstoff-Luft-Gemisch, dann tritt ein Abbruch der Ketten ein und das Klopfen wird verhindert.

Die klopfende Verbrennung äußert sich deutlich im Druckdiagramm (Bild 19), das die während des Verbrennungsablaufes im Motor auftretenden Drücke zeigt. Vom Beginn des Verdichtungshubes an steigt der Druck allmählich an bis zur Zündung. Von hier ab verbrennt ein Teil des Kraftstoff-Luft-Gemisches ganz gleichmäßig unter rasch zunehmender Drucksteigerung, bis der Druck plötzlich schlagartig ansteigt, weil der bisher unverbrannte Rest des

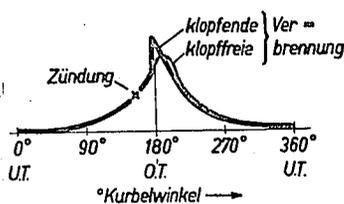


Bild 19. Klopfende und klopffreie Verbrennung im Druckdiagramm des Otto-Motors

Kraftstoff-Luft-Gemisches augenblicklich verbrennt. Im Arbeitshub sinkt die Drucklinie dann infolge der Entspannung allmählich ab. Die gestrichelt gezeichnete Drucklinie des klopfreien Betriebes ist bis zur Zündung dieselbe, steigt aber dann weniger steil an und geht in sanftem Bogen allmählich in die Linie des Arbeitshubes über. Die Verbrennung des klopfesten Kraftstoff-Luft-Gemisches verläuft langsamer und ruhiger.

Die schlagartige Drucksteigerung der klopfenden Verbrennung bewirkt eine Überbeanspruchung der Triebwerksteile, die stärkere Abnutzung zur Folge haben kann. Zugleich verringert sich die Leistung des Motors, weil die so plötzlich entwickelte Energie vom Kolben nicht rasch genug in Arbeit umgesetzt werden kann. Die unverwertete Energiemenge erhitzt Zylinder und Kolben übermäßig, so daß Schäden am Werkstoff und hoher Ölverbrauch auftreten können. Es kann ferner Stecken der Kolbenringe eintreten, weil das Schmieröl in den Kolbenringnuten unter dem Einfluß der übermäßigen Erwärmung verkocht. Flugmotoren zeigen überdies manchmal Ausbrennungen am Zylinderkopf und am Kolben an den Stellen, an denen der Gemischrest zu Ende brennt, d. i. gegenüber den Zündkerzen.

Als das Klopfen zum ersten Male störend in Erscheinung trat – für Kraftfahrzeugmotoren etwa um 1920, für die höher verdichtenden Flugmotoren schon während des Weltkrieges – behalf man sich zunächst mit Maßnahmen am Motor (Zurückverlegung des Zündzeitpunktes, Verringerung der Verdichtung). Bald aber widmeten sowohl die Kraftstoffchemiker als auch die Motorenkonstrukteure der Bekämpfung dieser Erscheinung erhebliche Forschungsarbeit.

Der Kraftstoffforschung gelang die Auffindung besonders klopfester Kraftstoffe, Kraftstoffanteile und -zusätze, zum Teil durch eingehende Aufklärung des chemischen Aufbaues der Kraftstoffe. Die Motorenbauer konnten durch günstige Gestaltung der Verbrennungsräume, durch Beeinflussung der Verbrennung, durch Wahl bestimmter Werkstoffe u. a. die Motoren klopfester und auch unempfindlicher gegen die Eigenart der Kraftstoffe bauen. So kann nunmehr das Klopfen vom Kraftstoff und vom Motor aus bekämpft werden.

Kraftstoff und Klopfen

Verschiedene Kraftstoffe, wie manche Benzine, Petroleum, Traktorentreibstoff oder Gasöl klopfen im Otto-Motor, andere wieder wie Benzol oder Alkohol verbrennen klopfrei. Daraus ist zu ersehen, daß Art und chemischer Aufbau des Kraftstoffes für das Auftreten des Klopfens ausschlaggebend sind. Zahlreiche Untersuchungen zeigten, daß die gesättigten kettenförmigen (Paraffin-) Kohlenwasserstoffe des Benzins am heftigsten zum Klopfen neigen und zwar um so stärker, je länger die Kette des Moleküls ist. Weniger klopfreudig sind ungesättigte kettenförmige Verbindungen (Olefine) und die ringförmigen Naphthene, und die beste Klopfestigkeit zeigen die ringförmigen wasserstoffarmen Aromaten (vgl. hierzu Seite 29). Eine Ausnahme bilden die verzweigten Formen der Paraffinkohlenwasserstoffe (Isoparaffine). Sie sind

gegenüber den unverzweigten Formen bei gleicher Zusammensetzung wesentlich klopfester. Diese Erkenntnisse werden für die Herstellung klopfester Kraftstoffe und die Bekämpfung des Klopfens herangezogen.

Über die Prüfung der Kraftstoffe auf ihre Klopfestigkeit siehe S. 125.

„Legierte“ Kraftstoffe

Die Anforderungen an die Klopfestigkeit der Kraftstoffe erhöhen sich stetig, besonders auf dem Gebiet der Flugkraftstoffe, so daß Benzin allein vielfach nicht mehr zu genügen vermag. Es werden daher in steigendem Maße „legierte“ Kraftstoffe verwendet, d. h. Benzine, denen klopfeste Kraftstoffe zugemischt sind.

Die bekanntesten Kraftstoffanteile dieser Art sind **Motorenbenzol** und **Alkohol**. Sie werden seit Jahren in Mischung mit Benzin in der deutschen Kraftfahrt verwendet und sind geradezu kennzeichnend für die deutsche Kraftstoffversorgung. Motorenbenzol verbindet mit hoher Klopfestigkeit gute Flüchtigkeit und hohen Energiegehalt im Liter, während die Alkohole zwar die Klopfestigkeit des Benzols etwa um das Doppelte übertreffen und sehr sauber verbrennen, aber geringeren Energiegehalt aufweisen.

Alkoholkraftstoffe scheiden im allgemeinen wegen des geringen Energiegehaltes als Flugkraftstoffe aus. Dagegen wurden durch die neuere Entwicklung die benzolartigen aromatischen Kohlenwasserstoffe für die Verwendung im Flugmotor herangezogen. Ihre an sich größere Empfindlichkeit gegen hohe Wärmebeanspruchung wird durch ihre außerordentlich hohe Klopfestigkeit wettgemacht. Mit Aromaten werden Klopfestigkeitswerte erreicht, die weit über den derzeitigen Bedürfnissen liegen. Die Kraftstoffchemie hat die Möglichkeit geschaffen, Aromaten in großen Mengen durch Hydrierung der Steinkohle, ferner durch Alkylierung aus den Restgasen der Crack-, Hydrier- und Syntheseanlagen aufzubauen.

Von großer Bedeutung als Mischungsanteil für Flugkraftstoffe sind ferner hochklopfeste verzweigte Paraffin-Kohlenwasserstoffe mit geballten Molekülen (Iso-Paraffine), die ebenfalls durch Hydrierung oder Alkylierung gewonnen werden können.

Der bekannteste Kraftstoffanteil dieser Art ist das **Iso-Oktan** (C_8H_{18} , 2,2,4-Trimethylpentan, S. 27), das in Amerika in großen Mengen durch Verarbeitung von Erdgasen gewonnen wird und auch als Meßstoff für die Klopfmessung dient (S. 126), ferner das leichtflüchtige **Iso-Pentan** (C_5H_{12} , 2-Methylbutan), und die beiden besonders klopfesten Kohlenwasser-

stoffe Neo-Hexan (C_6H_{14} , 2,2-Dimethylbutan) und Triptan (C_7H_{16} , 2,2,3-Trimethylbutan). Auch einige Äther, so z. B. der Isopropyläther, finden als klopffeste Anteile von Flugkraftstoffen Verwendung.

Um eine größere Steigerung der Klopffestigkeit durch solche Kraftstoffanteile zu erzielen, werden allerdings größere Zusatzmengen benötigt, so daß dadurch der klopffest gemachte Kraftstoff in seinen chemischen und physikalischen Gütekennzeichen sich vom Ausgangsbenzin unterscheiden kann. Ohne Einfluß auf die Beschaffenheit des Benzins ist der Zusatz von Gegenklopfstoffen oder „Klopfbremsen“. Es sind dies Stoffe, die schon in winzigen Zusatzmengen, z. T. in Spuren, eine große klopfhindernde Wirkung ausüben. Die meisten dieser Stoffe sind Metallverbindungen. Unter ihnen sind am wirksamsten Bleitetraäthyl und Eisenkarbonyl.

Bemerkenswert ist, daß es andererseits Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen gibt, die in geringen Zusatzmengen heftiges Klopfen hervorrufen. Zu diesen Proklopffmitteln oder „Klopfspeitschen“ zählen z. B. Amylnitrit $C_5H_{11}ONO$ und Äthylnitrat $C_2H_5ONO_2$.

Bleitetraäthyl

Bleitetraäthyl $Pb(C_2H_5)_4$ ist eine ölige farblose Flüssigkeit, die bei etwa $200^{\circ}C$ siedet (aber schon unterhalb des Siedepunktes teilweise zerfällt) und bis zu $-156^{\circ}C$ kältebeständig ist. Sie besteht zu etwa 64 % aus Blei und ist wie die meisten Bleiverbindungen sehr giftig. Sie wirkt sowohl bei Aufnahme durch die Haut als auch durch Einatmen der Dämpfe schwer schädigend und in manchen Fällen tödlich.

Im Motor verbrennen die vier Äthylgruppen (C_2H_5) des Bleitetraäthyls zu Wasser und Kohlensäure, das Blei zu Bleioxyd. Bleioxyd hat einen Schmelzpunkt von ungefähr $900^{\circ}C$ und geht erst bei sehr hohen Temperaturen in Dampf über. Im Bereich der Verbrennungstemperaturen, die der Motor aufweist, könnte es sich daher nicht verflüchtigen, sondern würde sich im Motor ablagern. Deshalb wird Bleitetraäthyl nur in Mischung mit Brom- oder Chlorverbindungen (Äthylendibromid oder Äthylendichlorid) verwendet. Diese besitzen keine klopfhindernde Wirkung, sondern dienen dazu, das Blei als Bleibromid bzw. Bleichlorid zu binden, die bereits bei etwa $800^{\circ}C$ verdampfen, so daß sie sich im Zylinder nicht niederschlagen können, sondern zusammen mit den Auspuffgasen den Motor verlassen.

Eisenkarbonyl

Ungefähr gleiche klopfhindernde Wirkung wie Bleitetraäthyl besitzt das ungiftige Eisenkarbonyl $Fe(CO)_5$, eine gelbe Flüssigkeit, die bei 103° siedet, mit einer Wichte von 1,45. Es verbrennt im Motor zu Eisenoxyd und Kohlensäure. Das Eisenoxyd bildet sich dabei in außerordentlich feiner Beschaffenheit und wird zum größten Teil mit den Auspuffgasen ausgeblasen. Kenn-

zeichnend für den Betrieb mit eisenkarbonylhaltigen Kraftstoffen ist eine schwache rote Bepuderung des Verbrennungsraumes mit Eisenoxyd.

Bleitetraäthyl und Eisenkarbonyl zersetzen sich unter der Einwirkung von Licht, dieses stärker als Bleitetraäthyl. Dies spielt für die damit versetzten Kraftstoffe keine Rolle, weil sie im Dunkeln aufbewahrt werden, nötigt aber dazu, Proben von Kraftstoffen, die diese Klopfbremsen enthalten, in braunen Flaschen oder besser noch in Blechgefäßen aufzubewahren.

Es gibt noch eine Reihe von Stoffen mit klopfhindernder Wirkung, so z. B. Metallverbindungen wie das giftige Nickelkarbonyl $\text{Ni}(\text{CO})_4$, Kobaltkarbonyl $\text{Co}(\text{CO})_4$ und mit wesentlich geringerer Wirkung einige stickstoffhaltige Kohlenwasserstoffe wie z. B. Anilin, Monomethylanilin, Xylidin u. a. Doch fanden alle diese Stoffe bisher keine Verwendung in der Kraft- und Luftfahrt. Die große Wirkung einzelner Klopfbremsen hatte in früheren Jahren dazu verleitet, auch praktisch unwirksame Zusätze wie z. B. Naphthalin als „K r a f t s t o f f v e r s t ä r k e r“ als Tabletten oder in flüssiger Form mit entsprechend hohem Gewinn zu vertreiben. Seit 1936 ist diesem Unfug ein Ende gesetzt, nachdem seither der Vertrieb von Zusatzmitteln für Kraft- und Schmierstoffe, die deren Leistungsfähigkeit erhöhen sollen, an eine vorausgehende analytische und motorische Prüfung durch amtliche Prüfstellen gebunden ist.

Bleibenzine

Benzine, die zur Erhöhung der Klopfestigkeit mit Bleitetraäthyl versetzt sind, werden als „Bleibenzine“ oder „verbleite“ Benzine bezeichnet. Zur Herstellung verbleiteter Benzine werden fertige Mischungen von Bleitetraäthyl mit Äthylendibromid bzw. Äthylenchlorid verwendet. Sie tragen die Handelsbezeichnung **E t h y l - F l u i d** und enthalten die Zusätze in richtig abgestimmten Verhältnissen. Ethyl-Fluid wird in Deutschland in zwei Arten abgegeben:

„1-T-Fluid“ für Flugkraftstoffe und

„Q-Fluid“ für Autokraftstoffe.

Die nachstehende Tafel 10 gibt Zusammensetzung und Eigenschaften der beiden Arten des Ethyl-Fluids an.

1-T-Fluid ist blau, Q-Fluid kann rot oder andersfarbig gefärbt sein. Die damit versetzten Kraftstoffe zeigen die Färbung auch bei ganz geringen Beimischungen noch sehr deutlich.

Der einzige klopfhindernde Anteil im Ethyl-Fluid ist das Bleitetraäthyl (engl.: **Tetra Ethyl Lead**, abgekürzt **TEL**). Deshalb wird die Zusatzmenge bei Mischungen nicht nach Ethyl-Fluid, sondern nur nach ihrem Gehalt an TEL bemessen und angegeben.

Sie richtet sich im allgemeinen nach der gewünschten Klopfestigkeit. Doch dürfen in Deutschland die verbleiteten Autokraftstoffe höchstens 0,4 ccm TEL

je Liter enthalten. Für Flugkraftstoffe liegt diese Grenze meist bei 0,9 ccm TEL je Liter, doch werden für besondere Zwecke auch höhere Zusätze angewandt. Es kommen also in Autobenzinen mindestens 2500, in Flugbenzinen etwa 1100 Teile auf 1 Teil TEL. Dieses Verhältnis zeigt die starke Verdünnung des Bleitetraäthyls in den Kraftstoffen und bewirkt, daß der Umgang mit Bleibenzenen bei angemessener Sorgfalt (S. 162) keine Gefahren mit sich bringt. Es gibt aber auch einen Anhalt für die große klopfhindernde Wirksamkeit des Bleitetraäthyls.

Tafel 10. Zusammensetzung und Eigenschaften von 1-T-Fluid und Q-Fluid

	1-T-Fluid	Q-Fluid
Bleitetraäthyl (TEL) rein	61,42 Gew.-Teile	65,30 Gew.-Teile
Äthylendibromid	35,68 „	25,75 „
Äthylendichlorid	— „	8,72 „
Farbstoff, Petroleum und sonstige Beimengungen	2,90 „	2,25 „
Wichte bei 20°C	1,755	1,671
Gefrierpunkt	- 10,5 °C	- 25
Flammpunkt	über 110 °C	über 110

Diese steigt allerdings nicht gleichmäßig mit der Zusatzmenge an. Sie ist im allgemeinen bei niedrigen Zusätzen sehr groß, verringert sich aber mit größeren Zusätzen. Das Ausmaß der Wirkung ist ferner weitgehend abhängig von Art und Menge der Kohlenwasserstoffe des Benzins. Jedem Kraftstoff ist eine besondere „Bleiempfindlichkeit“ eigen, die durch Versuche im Prüfmotor bestimmt werden muß (S. 130). Deshalb wird bei der Herstellung von Bleibenzenen die erforderliche Zusatzmenge schon aus wirtschaftlichen Gründen für jedes zu verbleiende Benzin vorher durch den Versuch ermittelt.

Wegen der Bleiempfindlichkeit ist es auch nicht möglich, die Erhöhung der Klopfestigkeit aus der Zusatzmenge an Bleitetraäthyl vorauszuberechnen. Aus dem gleichen Grunde kann auch die Wirksamkeit einer bestimmten Menge Bleitetraäthyl im Verhältnis zu anderen klopfhindernden Stoffen nicht durch ein einfaches Zahlenverhältnis festgelegt werden.

Bleibenzenen werden in den Vereinigten Staaten seit 1925 in steigendem Maße verwendet und fanden seither Eingang in viele Länder der Erde, so daß etwa

drei Viertel des Benzinbedarfs der Welt durch verbleite Benzine gedeckt wird. In Deutschland wurden verbleite Flugbenzine um 1950 eingeführt. Sie werden seither fast ausschließlich verwendet, während verbleites Autobenzin als „Südbenzin“ erst seit Mai 1959 gefahren wird.

Grundsätzlich sind Bleibenzine genau so zu verwenden wie unvermischte Benzine. Motoren, die Bleibenzin verbrennen, zeigen zum Unterschied von der üblichen schwärzlichen Färbung im Verbrennungsraum verschiedene Farbtöne. An den gekühlten Stellen des Verbrennungsraumes und an den Einlaßventilen zeigt sich ein hellgrauer Ton, der sich über ein liches Gelb bis zu dunklem Rot und Braun an den heißen Stellen abwandelt. Diese Unterschiede rühren von Ungleichmäßigkeiten in der Zusammensetzung des Kraftstoff-Luft-Gemisches sowie von örtlichen Temperaturunterschieden her. Die dunklere Färbung an den Auspuffventilen verleitet leicht zu der Annahme, daß Ventilverbrennungen vorliegen, während es sich jedoch lediglich um eine kennzeichnende Färbung des Bleibenzinbetriebes handelt.

Einflüsse der Motorbauart auf das Kraftstoffklopfen

Wenn auch in erster Linie Art und chemischer Aufbau des Kraftstoffes für das Auftreten des Kraftstoffklopfens maßgebend sind, so sind die Bedingungen hierfür durch die Bauart des Motors ebenfalls stark zu beeinflussen. Mit anderen Worten, ein und derselbe Kraftstoff kann in einem bestimmten Motormuster klopfen, in einem anderen nicht, weil eben gewisse Unterschiede im Bau der Motoren vorliegen. Es ist daher nicht ohne weiteres eine Voraussage darüber möglich, ob ein bestimmter Kraftstoff in einem gegebenen Motor klopfen wird. Wohl aber lassen sich die Einflüsse der Motorbauart auf das Kraftstoffklopfen im allgemeinen übersehen und daher ist es möglich, schon beim Bau der Motoren dafür zu sorgen, daß bei Verwendung handelsüblicher Kraftstoffe die kritischen Bedingungen für das Kraftstoffklopfen nicht erreicht oder überschritten werden. Nur dadurch ist es z. B. möglich, der Vorschrift zu genügen, nach der deutsche Kraftfahrzeuge mit Benzin von bestimmter Klopfbarkeit klopfrei zu betreiben sein müssen (S. 132).

Verdichtungsverhältnis

Die bei der Verbrennung auftretenden Drücke und Temperaturen werden in erster Linie vom Verdichtungsverhältnis bestimmt. Ganz allgemein gilt, daß ein Motor um so stärker klopf, je höher sein Verdichtungsverhältnis ist.

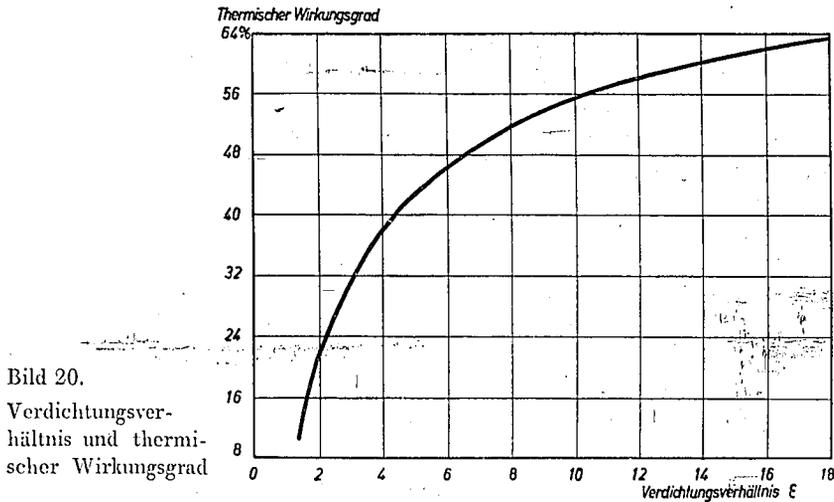
Das Verdichtungsverhältnis ist die Zahl, die angibt, wie oft das Volumen des Verdichtungsraumes in dem Volumen enthalten ist, das im Motor bei der tiefsten Kolbenstellung frei wird, also:

$$\text{Verdichtungsverhältnis} = \frac{\text{Verdichtungsraum} + \text{Hubraum}}{\text{Verdichtungsraum}}$$

Die Verdichtungsgrade der Otto-Motoren wurden stetig erhöht, z. B. bei Personenkraftwagen von im Mittel 5,1 im Jahre 1928 bis auf 6,2 im Jahre 1938.

Die Vorteile der höheren Verdichtung können in höherer Leistung des Motors oder besserer Ausnutzung der Kraftstoffenergie, d. h. geringerem Verbrauch, in Erscheinung treten.

Die Leistungssteigerung erklärt sich daraus, daß ein stärker zusammengepreßtes Gemisch bei der Verbrennung höhere Spannung und höhere Temperatur erhält und daher bei seiner Entspannung im Arbeitshub einen größeren Druckabfall erfährt, und, da dieser gleichbedeutend mit freiwerdender Energie ist, dem Motor mehr Leistung verleiht. Diese Wirkung wird dadurch unterstützt, daß infolge der höheren Verdichtung bessere Verdampfung und raschere Verbrennung eintritt und daß in dem bei höherer Verdichtung notwendigen kleineren Verbrennungsraum weniger Abgase zurückbleiben, die die frische Ladung verdünnen und damit verschlechtern. Eine unbeabsichtigte Steigerung der Verdichtung kann durch Ablagerung von Ölkohle auf dem Kolben auftreten, wodurch sich Klopfen allmählich einstellen kann, ohne daß irgend eine Veränderung am Motor vorgenommen wurde.



Das Verhältnis der in den Otto-Motor gegebenen Kraftstoffenergie zu der nach der Verbrennung verwertbaren Energiemenge, der „thermische Wirkungsgrad“, ist zwar um so besser, je höher die angewandte Verdichtung ist, doch ergeben Verdichtungen über 8:1 nur mehr eine verhältnismäßig geringe Verbesserung der Kraftstoffausnutzung, wie dies Bild 20 zeigt, und werden daher nicht allgemein angewendet.

Das Verdichtungsverhältnis gibt nur einen Anhalt für die Anforderungen, die der Motor an die Klopfestigkeit des Kraftstoffes stellt. Bei gleichem Verdichtungsverhältnis können Motoren mit verschiedener Ausbildung des Verbrennungsraumes und Unterschieden im Kolben, an den Kerzen, der Kühlwasser-Zuführung u. a. m. verschiedene Klopfestigkeit des Kraftstoffes erfordern. Deshalb läßt sich die oft gestellte Frage: „Welche Verdichtung hält der Kraftstoff aus?“ nicht allgemein beantworten.

Das Auftreten bzw. die Stärke des Klopfens wird begünstigt durch Vorverdichtung (Überladung), weil jede zusätzliche Drucksteigerung im Verbrennungsraum klopfördernd wirkt. Bei Flugmotoren ist das Verhalten der Kraftstoffe bei Überladung merkbar unterschiedlich und daher für die Verwendung ausschlaggebend. Man hat deshalb vorgeschlagen, das Klopfverhalten der Flugkraftstoffe unter den Bedingungen der Überladung zu prüfen (S. 129).

Ausbildung des Verbrennungsraumes

Das Verdichtungsverhältnis kann ohne Gefahr des Kraftstoffklopfens bedeutend erhöht werden, wenn gleichzeitig bei der Ausbildung des Verbrennungs-

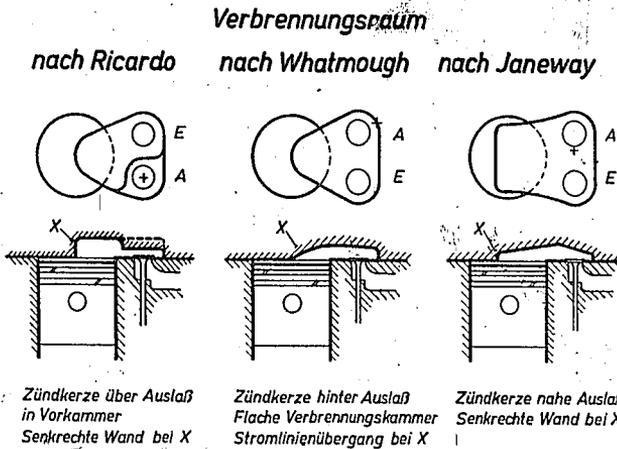


Bild 21.

Ausbildung des Verbrennungsraumes

raumes gewisse Ergebnisse verwertet werden, die bei der E.forschung der Klopferscheinungen gewonnen wurden. Auf ihnen beruhen insbesondere die Vorschläge von Ricardo, Whatmough und Janeway, deren kennzeichnenden Merkmale Bild 21 zeigt. Die Verbrennungsräume neuzeitlicher Otto-Motoren werden daher nach folgenden Gesichtspunkten entworfen:

1. Anordnung der Zündkerze an heißer Stelle, also in der Nähe des Auspuffventiles.

Die früher übliche Anordnung der Zündkerze in der Nähe des Einlaßventiles ist ungünstig, weil dann die Verbrennung von der kühlen nach der heißen Zone fortschreitet. Dadurch wird der unverbrannte Gemischrest zusätzlich aufgeheizt und eher zum Klopfen gebracht.

2. Kurze Brennwege.

Sie bewirken, daß die Ladung bereits durchgebrannt ist, bevor die für das Klopfen kritischen Werte von Temperatur und Druck erreicht werden. Durch Unterteilung („Zerklüftung“) des Verbrennungsraumes kann diese Maßnahme unterstützt werden, doch sind hierbei tote Ecken wegen der Bildung von „Zündern“ zu vermeiden.

3. Kühlung des zuletzt verbrennenden Gemischrestes.

Zu diesem Zweck wird ein Teil der Zylinderkopfwandung so weit herabgezogen, daß zwischen Kolben und dieser Wandung der Gemischrest wenig Raum einnimmt, und kräftig abgekühlt wird. Gute Kühlung der Zylinderwandung mittels nasser „Laufbüchse“, Ventile, deren Wärmeabführung durch eine Natriumfüllung besonders verstärkt ist, und kühle Kerzen von hohem Wärmewert wirken in gleichem Sinne. Glühstellen im Verbrennungsraum (vorstehende Dichtungen, glühende Ölkohle, überhitzte Kolben- und Ventilkanten) bilden dagegen „Zünderkerne“ und begünstigen das Klopfen.

4. Durchwirbelung des Gemisches.

Sie erhöht die Flammgeschwindigkeit und wirkt daher im gleichen Sinne wie die unter 2. angeführten kurzen Brennwege.

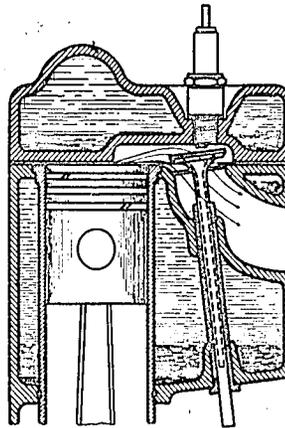
Bild 22 zeigt am Beispiel eines unten gesteuerten Otto-Motors üblicher Bauart die Anwendung dieser Erfahrungen. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, Otto-

Bild 22.
Der klopfeste
Otto-Motor

Kolben u. Zyl. Kopf
Gute Wärmeleiter

Verbrennungsraum
Mit Kühlkante abgesetzt,
geringes Spiel zw
Kolben und Kopf,
allseitig bearbeitet,
keine toten Ecken

Nasse Laufbüchse,
kleine Bohrung



Zündkerze
Lage an der heißesten Stelle,
Sitz gut gekühlt,
hoher Glühwert,
möglichst 2 Kerzen,

Ventile
A.V. gekühlt,
Teller glatt,
Schafführung lang
und gut gekühlt,
Gaseintritt mit
Wirbelbildung,
Gasaustritt mit glattem Fluß und A.V.
möglich nicht umspült.

Motoren mit Verdichtungsverhältnissen zu bauen, die früher nur in Verbindung mit besonders kloppfreien Kraftstoffen angewandt werden konnten. Andererseits erscheint die Möglichkeit nahegerückt, im Kraftverkehr auf die besonders kloppfesten Kraftstoffe ganz zu verzichten und trotzdem Motoren von guter Leistung für Betrieb mit handelsüblichem Benzin zu bauen.

Einflüsse der Betriebsbedingungen auf das Kraftstoffklopfen

Das Auftreten bzw. die Stärke des Kraftstoffklopfens hängen zum Teil von den Betriebsbedingungen ab, die nachstehend angeführt sind.

Zündzeitpunkt

Die richtige Zündstellung ist dem Ablauf der Verbrennung so angepaßt, daß die beste Leistung erzielt wird, Klopfen aber nicht auftreten kann (Bild 25,

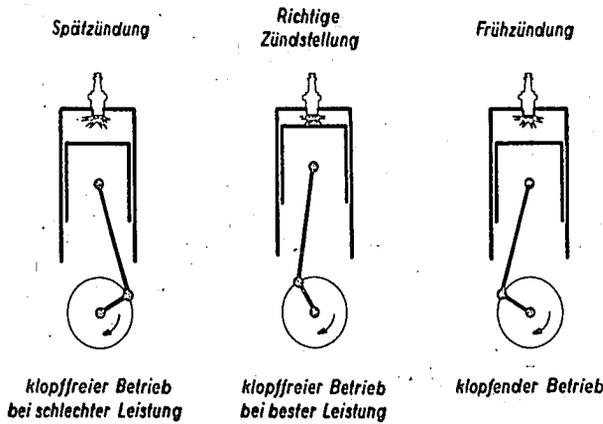


Bild 25.

Zündzeitpunkt und Klopfen.

Mitte). Frühzündung verstärkt das Klopfen oder ruft es hervor, weil durch den aufwärtsgehenden Kolben während des Verbrennungsablaufes eine zusätzliche Verdichtung bewirkt wird (Bild 25, rechts). Umgekehrt ist durch Spätzündung das Klopfen zu unterdrücken, weil der Kolben der Flamme ausweicht (Bild 25, links). Allerdings wird dabei aus dem gleichen Grunde der Kraftstoff schlechter ausgenützt. Das Klopfen würde also mit dieser Maßnahme auf Kosten der Wirtschaftlichkeit bekämpft.

Drehzahl

Der Kraftstoff verbrennt bei kloppfreiem Betrieb im allgemeinen um so rascher, je höher die Drehzahl liegt. Außerdem ist jedoch auch die Stellung des

Kolbens zum Ablauf der Verbrennung je nach der Drehzahl verschieden. Bei niedriger Drehzahl ist der Kolben noch verhältnismäßig nahe dem oberen Totpunkt, wenn die Verbrennung einsetzt. Sie verläuft daher unter höherer Verdichtung als bei hoher Drehzahl, bei der der Kolben im gleichen Zeitraum sich bereits entsprechend weiter vom oberen Totpunkt entfernt hat und einen größeren Verbrennungsraum freigibt. Daher wirkt niedrige Drehzahl klopfördernd, hohe dagegen klopfmindernd. Diese Wirkung wird unterstützt durch die schlechter werdende Füllung des Zylinders mit steigender Drehzahl.

Wird entgegen der Regel Klopfen bei steigender Drehzahl beobachtet, so kann dies an der selbsttätigen Zündverstellung liegen, die zu stark auf Frühzündung verstellt, so daß der klopfhindernde Einfluß der zunehmenden Drehzahl von der klopfördernden Wirkung der zu frühen Verstellung übertroffen wird.

Kraftstoff-Luft-Verhältnis (Vergasereinstellung)

Bei einer Verbrennung, die den Kraftstoff mit dem theoretischen Luftbedarf (S. 59) verarbeitet, besteht für einen gegebenen Kraftstoff ungefähr die größte Klopfneigung. Sie kann daher durch fette oder magere Vergasereinstellung (Luftmangel und Luftüberschuß) verringert werden. Ursache dafür ist die geringere Verbrennungsgeschwindigkeit des fetten und mageren Kraftstoff-Luft-Gemisches, so daß die für das Auftreten des Klopfens kritischen Bedingungen an Druck und Temperatur nicht zustande kommen. Da jede falsche Vergasereinstellung zu höherem Verbrauch führt, ist diese Art der Klopfverhütung unwirtschaftlich.

Bild 24.
Luftüberschußzahl
und Klopfverhalten
(gemessen unter den
Prüfbedingungen des
ASTM-Motor-Ver-
fahrens)

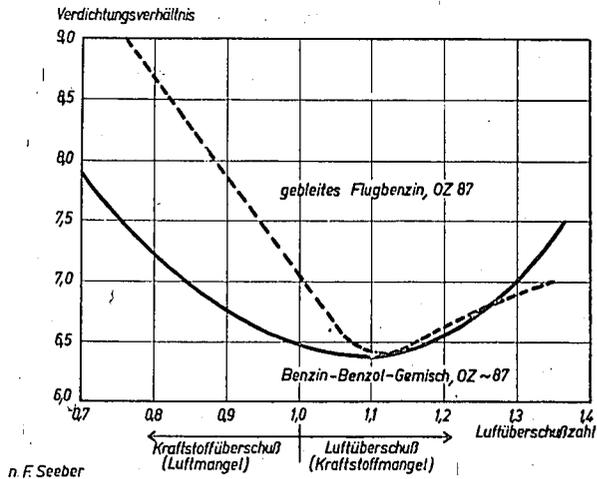


Bild 24 zeigt z. B. die Verhältnisse für den Betrieb eines CFR-Motors (S. 124) unter den Bedingungen des ASTM-Motor-Verfahrens (S. 128). Hierbei wird zur Erreichung eines bestimmten Klopfzustandes das 'Verdichtungsverhältnis am Motor eingestellt. Die Linien des Bildes 24 zeigen, daß das niedrigste Verdichtungsverhältnis bei einer Luftüberschußzahl von etwa 1,1, d. h. bei geringem Luftüberschuß erreicht wird. Es steigt aber an, sobald nach dem Gebiet des Luftmangels oder noch weiter nach größerem Luftüberschuß verändert wird, d. h. die Klopfneigung der Kraftstoffe ist, wie erwähnt, am größten in der Nähe des theoretisch richtigen Kraftstoff-Luft-Verhältnisses (Luftüberschußzahl 1). Zugleich ist aus Bild 24 zu ersehen, daß in diesem Verhalten z. B. zwischen einem bleihaltigen, aber überwiegend paraffinischen Benzin und einem aromatenhaltigen Benzin-Benzol-Gemisch deutliche Unterschiede feststellbar sind, obwohl beide Kraftstoffe praktisch gleiche Klopfestigkeit (OZ 87, vgl. hierüber Seite 127) besitzen.

Belastung

Der Otto-Motor neigt um so mehr zum Klopfen, je höher er belastet wird, weil er bei stärkerer Belastung heißer ist, mehr Ladung erhält und mit höheren Drücken arbeitet. Damit steht im Einklang, daß Klopfen stets nur bei belastetem Motor, niemals aber im Leerlauf wahrzunehmen ist.

Wärmezustand des Motors

Durch schlechte Kühlung oder warme Ansaugluft wird eine Steigerung der Verbrennungstemperaturen hervorgerufen, die klopfördernd wirkt. Deshalb kann Klopfen im Sommer oder bei Mängeln im Kühlsystem unerwartet auftreten.

Feuchtigkeit der Ansaugluft

Wasserdampf im Kraftstoff-Luft-Gemisch wirkt in geringem Maße klopfhindernd. Es bringt jedoch keine Vorteile, der Ansaugluft Wasser oder Wasserdampf außerhalb des Zylinders beizumischen, weil die Wassergabe den ihrem Raum entsprechenden Teil der Ladung verdrängt und dadurch Leistungsverlust bewirkt. So zeigen z. B. Versuche, daß die Nutzleistung eines Kraftfahrzeugmotors bei trockener Ansaugluft am größten ist. Aus diesem Grunde konnte auch den Wasser- und Dampfbzusatzgeräten, die unter Ankündigung erheblicher Kraftstoffersparnis in den Handel gebracht wurden, kein Erfolg beschieden sein.

Das Klopfen im Diesel-Motor

Der Zündverzug

Die Verbrennung im schnellaufenden Diesel-Motor wird durch den „Zündverzug“ beeinflußt. Dies ist die Zeit zwischen dem Einspritzen des Kraftstoffes und seiner Entflammung (vgl. auch S. 63 und Bild 15). Während des

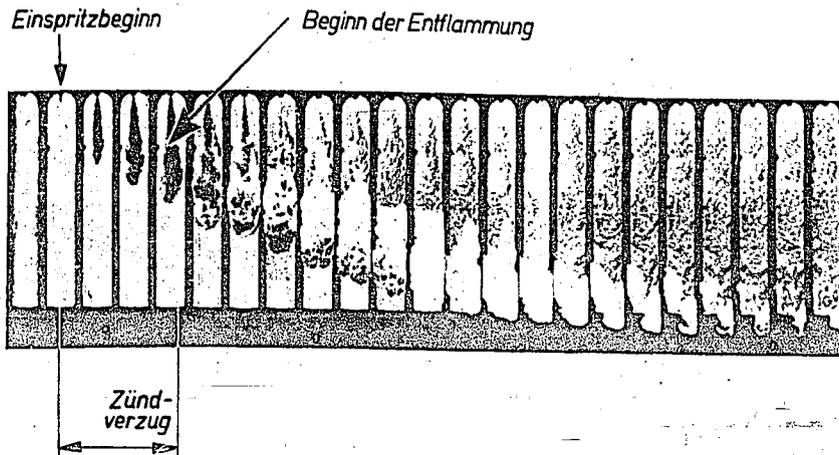


Bild 25. Zeitlupenaufnahmen der Verbrennung eines Diesel-Kraftstoffes in der Bombe
(nach Dr. Ing. K. Zinner)

Zündverzuges enthält der Verbrennungsraum eine unentflammte Kraftstoffmenge, deren Tröpfchen unter der Einwirkung der heißen Luft verdampfen. Am Ende des Zündverzuges setzt dann eine plötzliche Entflammung des bis dahin eingespritzten Kraftstoffes ein, die von „Zündern“ ausgeht und eine rasche Drucksteigerung im Verbrennungsraum hervorruft. Dieser Verbrennungsablauf läßt sich auch aus Flammenbildern entnehmen (Bild 25), die durch Einspritzen von Diesel-Kraftstoff in eine Bombe gewonnen wurden. Sie lassen den Zündverzug und den Beginn der Entflammung erkennen, die meist in der Nähe der Düse am Strahlmantel einsetzt.

Es läßt sich nachweisen, daß auch schon während des Zündverzuges eine Teilverbrennung von geringem Ausmaß vorliegt, die aber keine Drucksteigerung hervorruft, weil die dabei entwickelte Wärme zum Aufheizen benachbarter Kraftstofftröpfchen verbraucht wird.

Wenn wegen ungenügender Zündwilligkeit des Kraftstoffes der Zündverzug zu groß wird (größer als etwa 0,002 sek.), dann sammelt sich eine so große Kraftstoffmenge im Verbrennungsraum an, daß ihre anschließende Entflammung eine sehr heftige schlagartige Drucksteigerung auslöst. Diese ruft das „Klopfen“ oder „Nageln“ des Diesel-Motors hervor und wirkt durch ihre Heftigkeit, aber auch durch die Höhe des Druckes auf die Triebwerksteile ungünstig ein.

Ein Vergleich der Druckdiagramme des Diesel-Motors bei kloppfreiem und klopfendem Betrieb erläutert den Unterschied im Verbrennungsablauf.

Bild 26 enthält das Druckdiagramm des klopfreien Betriebes, wie es schon aus Bild 10 bekannt ist, in unterbrochener Linie. Darüber liegt voll ausgezogen die Drucklinie des klopfenden Betriebes. Sie zeigt den größeren Zündverzug, den steileren Druckanstieg und die Druckspitze, die drei Kennzeichen ungünstiger Diesel-Verbrennung. Unter ihnen ist nicht nur der Höchstdruck, sondern auch die Steilheit des Druckanstieges das Maß für die Beanspruchung der Triebwerksteile.

Die Vorgänge während des Zündverzuges sind physikalischer und chemischer Art, die einander zeitlich überdecken. Der physikalische Teil des Zündverzuges

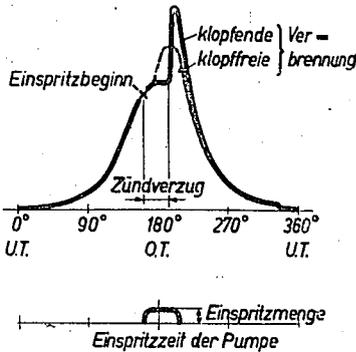


Bild 26. Drucklinien des schnelllaufenden Diesel-Motors bei klopfreiem und klopfendem Betrieb

umfaßt das Aufheizen der Kraftstofftröpfchen und ihre teilweise Verdampfung sowie das Erhitzen der Kraftstoffdämpfe, die sich durch unmittelbare Berührung mit der heißen Luft erwärmen. Dieser Teil des Zündverzuges verbraucht also Wärme.

Der physikalische Zündverzug kann durch Art und Güte der Zerstäubung beeinflusst werden. Diese wieder hängt von der Düse und von physikalischen Eigenschaften des Kraftstoffes, z. B. seiner Zähigkeit (S. 148) ab. Es ist wichtig, daß sowohl eine gute Zerstäubung in möglichst kleine Tröpfchen (gutes Mikrogemisch) erreicht wird, als auch die Verteilung des Kraftstoffes im Verbrennungsraum gleichmäßig erfolgt (gutes Makrogemisch). Diese wird bei einzelnen

Motorbauarten, den Vorkammer- und den Wirbelkammermotoren, durch eine besonders vorgeschaltete Durchwirbelung des Kraftstoffes mit der Verbrennungsluft gefördert. Bei Motoren mit unmittelbarer Einspritzung in den Verbrennungsraum kann gute Gemischbildung durch hohen Einspritzdruck und Mehrlochdüsen erreicht werden.

Für Einleitung und Ablauf der Verbrennung ausschlaggebend ist der auf chemischen Vorgängen beruhende Anteil des Zündverzuges. Diese bestehen in Reaktionen der Kraftstoffdämpfe, die unter Entwicklung von Wärme ablaufen, wobei schließlich die Entflammungstemperatur erreicht wird.

Der chemische Zündverzug wird vor allem vom Aufbau des Kraftstoffmoleküls bestimmt. Er umfaßt die Aufschließung des Kraftstoffes, die im wesentlichen aus einer Molekülspaltung besteht, ähnlich dem Kracken (S. 38). Wie bei der Wärmespaltung kann daher auch im Motor die Aufbereitung des Kraftstoffes durch Wärme und Druck gefördert werden, d. h. sie geht bei höherer Verdichtung und wärmerem Motor rascher vor sich, und der Zündverzug wird verkleinert.

Das Klopfen des Diesel-Motors wird grundsätzlich durch Verringerung des Zündverzuges bekämpft. Da dieser durch physikalische und chemische Vorgänge bestimmt wird, kann das Klopfen des Diesel-Motors durch einen zündwilligen Kraftstoff und durch die Betriebsbedingungen verringert oder beseitigt werden.

Zündwilligkeit

Die Zündwilligkeit des Diesel-Kraftstoffes hängt vorwiegend von der Größe und Bindung der Kraftstoffmoleküle ab. Sie bestimmen die Geschwindigkeit, mit der das Kraftstoffmolekül während des Zündverzuges zerfällt und sich in kleinere, leichter entflammbare, aber schwerer selbstzündende Moleküle umsetzt. Die Zündwilligkeit der Kohlenwasserstoffe, aus denen sich die Diesel-Kraftstoffe aufbauen, wird um so größer sein, je weniger Energieaufwand zu ihrer Aufspaltung erforderlich ist und je schneller diese abläuft.

Die Diesel-Kraftstoffe enthalten ähnlich wie die Benzine unterschiedliche Anteile an Paraffinen, Olefinen, Naphthenen und Aromaten (S. 27). Die wasserstoffreichen Paraffine spalten und reagieren leichter als die wasserstoffarmen Ringe der Aromaten.

Daher ergeben Paraffine den kleinsten, Aromaten den größten Zündverzug; Olefine und Naphthene liegen in der Nähe dieser Gruppen. Daraus folgt weiter: je klopfester ein Kohlenwasserstoff im Otto-Motor ist, desto weniger zündwillig ist er im Diesel-Motor. Deshalb sind auch die sehr klopfesten verzweigten Paraffine im Diesel-Motor nicht zu verwenden, umgekehrt ergeben die hart klopfenden schweren Paraffinkohlenwasserstoffe mit großen Molekülen im Diesel-Motor den erwünschten kleinen Zündverzug.

Aus diesem Grunde eignen sich für den schnellaufenden Diesel-Motor Kraftstoffe mit hohem Gehalt an Paraffinkohlenwasserstoffen. Hierher gehören die ungecrackten Gasöle, die aus Erdöl gewonnen werden, und die aus Kohle durch Hydrierung und Synthese hergestellten Diesel-Kraftstoffe. Auch Braunkohlenteeröle mit hohem Paraffingehalt sind im Schnellläufer verwendbar. Dagegen sind aromatenhaltige Diesel-Kraftstoffe wie Steinkohlenteeröle wegen des großen Zündverzuges nur in Langsamläufern zu verwenden.

Über die Prüfung der Diesel-Kraftstoffe auf ihre Zündwilligkeit vgl. S. 132. Ungenügende Zündwilligkeit kann durch Zusatz von Z ü n d b e s c h l e u n i g e r n verbessert werden. Solche Stoffe wirken bei Zusätzen von wenigen % verhältnismäßig stark, mit zunehmenden Mengen jedoch geringer. Verschiedene sauerstoffhaltige Klopfpeitschen (S. 71), wie z. B. Äthylnitrat oder Amylnitrit sind wirksame Zündbeschleuniger. Auch andere sauerstoffhaltige Körper, wie z. B. Azetonperoxyd, eignen sich für diesen Zweck.

Allgemein gilt für solche Zusätze die Regel, daß die Klopfbremsen für Otto-Kraftstoffe, sowohl Bleitetraäthyl wie auch die klopfesten Aromaten und Alkohole, im Diesel-Motor klopfördernd wirken, während umgekehrt die Klopfpeitschen für Otto-Kraftstoffe als Zündbeschleuniger die Klopfneigung von Diesel-Kraftstoffen herabsetzen.

Einflüsse der Motorbauart auf den Zündverzug

Die Endtemperatur der Verdichtung steht auf Grund wärmetechnischer Gesetze in bestimmter Beziehung zum Verdichtungsverhältnis. Diese ist durch das Bild 27 veranschaulicht.

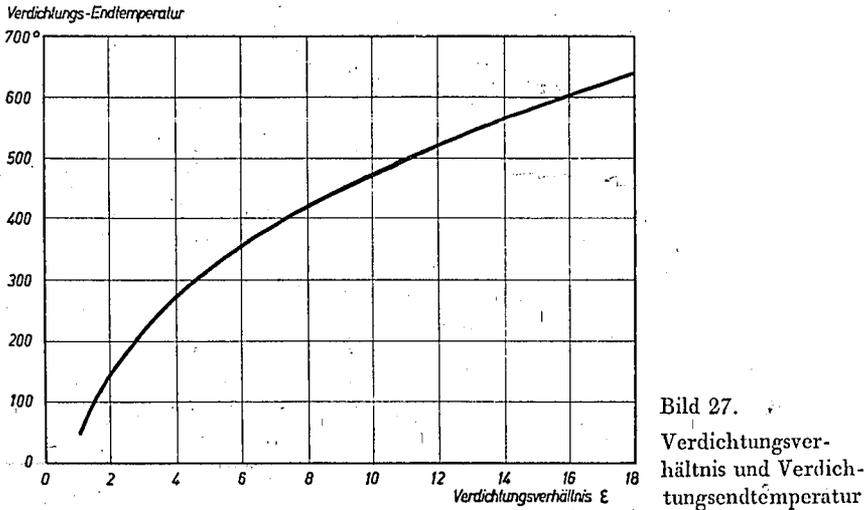


Bild 27.
Verdichtungsverhältnis und Verdichtungs-Endtemperatur

Hohe Temperaturen und Drücke steigern die Geschwindigkeit, mit der die Aufbereitung der Dieselkraftstoffe im Motor abläuft. Daher ist eine ausreichend hohe Verdichtung der Luft im Diesel-Motor eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Verringerung des Zündverzuges. Sinkt das Verdichtungsverhältnis durch Schäden am Motor (steckende Kolbenringe, undichte Ventile), so kann der Zündverzug u. U. so groß werden, daß überhaupt keine Zündung zustande kommt. Umgekehrt können unbefriedigend zündwillige Kraftstoffe bei Anwendung höherer Verdichtung anstandslos verbrannt werden. Der Motor bestimmt daher schon durch seinen Bau den Bereich der Diesel-Kraftstoffe, die für ihn zweckdienlich sind.

Weiterhin können besondere Einrichtungen am Motor, durch die der Kraftstoff bei der Aufbereitung unterstützt wird, dazu beitragen, den Zündverzug zu verringern. Hierher gehört die Unterteilung des Verbrennungsraumes,

wie sie beim Vorkammer- und Wirbelkammer-Motor angewandt wird. Sie bewirkt eine teilweise Vorverbrennung bei höheren Temperaturen, als sie im Verbrennungsraum möglich sind, worauf die Hauptverbrennung dann im eigentlichen Verbrennungsraum abgeschlossen wird. Solche Motoren können daher mit niedrigerer Verdichtung arbeiten als die Motoren mit unmittelbarer Einspritzung, die überdies eine besonders gute Zerstäubung und Verteilung des Kraftstoffes benötigen. Diese sind daher auch empfindlicher in bezug auf die Kraftstoffwahl als Motoren mit unterteiltem Verbrennungsraum.

Einflüsse der Betriebsbedingungen auf den Zündverzug

Alle Betriebsbedingungen, die sich in gleichem Sinne wie die Verdichtungs-erhöhung auswirken, also Druck und Temperatur im Verbrennungsraum während der Kraftstoffeinspritzung erhöhen, begünstigen die Aufbereitung des Kraftstoffes, verkürzen den Zündverzug und schwächen oder unterbinden daher das Klopfen des Diesel-Motors.

So weist der Diesel-Motor bei größerer Belastung geringeren Zündverzug auf, weil der stärker belastete Motor in der Regel heißer ist und die Ansaugluft stärker erwärmt. Dagegen zeigt er im Leerlauf starkes Klopfen.

Beim Start des kalten Motors werden infolge des Wärmeverbrauches für das Aufheizen der kalten Wandungen des Verbrennungsraumes niedrigere Verdichtungsdrücke und -temperaturen (etwa 250° C niedriger am Beginn des Starts) erzielt und damit das Klopfen begünstigt. Dazu trägt auch die niedrige Temperatur der Ansaugluft bei. Unter diesen Bedingungen kann u. U. die Zündung ganz ausbleiben. Um sie zu sichern, wird entweder die Verdichtung vorübergehend erhöht (z. B. Lanova-Luftspeicher-Motor) oder eine Glühkerze in einer Vorkammer angebracht, die als „Zündkern“ wirkt und die Verbrennung an ihrer rotglühenden Oberfläche einleitet. Ähnlich wirkt der rotglühende Teil des Verbrennungsraumes im Glühkopfmotor. Zu starke Kühlung der Wandungen des Verbrennungsraumes (Überkühlung) kann aus den gleichen Gründen den Zündverzug vergrößern, umgekehrt erleichtert die Vorwärmung der Luft den Start.

Bei geringerem Druck der Ansaugluft wird am Ende der Verdichtung ein entsprechend geringerer Enddruck erreicht. Dadurch wird der Zündverzug größer und „Klopfen“ kann eintreten. Dies kann beim Betrieb von Flug-Diesel-Motoren in größeren Höhen zusammen mit der Verringerung des Ladegewichtes der verdünnten Luft die Leistung mindern.

Der Zeitpunkt der Kraftstoffeinspritzung ist zweckmäßig so zu wählen, daß der Druckhöchstwert in der Nähe des Totpunktes liegt.

Wenn der Motor die Drehzahl steigert, wird der Zündverzug, in Kurbelwinkel gemessen, größer, d. h. er nimmt einen größeren Anteil innerhalb der Verbrennung in Anspruch. Es bestimmt also der jeweils erreichbare günstigste Zündverzug die Höchstdrehzahl des Motors. Dagegen wird er d e r Z e i t n a c h geringer, weil bei höherer Drehzahl weniger Wärme- und Verdichtungsverluste entstehen, somit Druck und Temperatur höher liegen und den Zündverzug verkürzen.

Klopfen im Otto- und Diesel-Motor

Vergleicht man die Bedingungen, die im Otto- und Diesel-Motor das Klopfen fördern, so ergibt sich eine Gegensätzlichkeit, die in der Tafel 11 veranschaulicht ist. Sie liegt auch bei den Kennwerten für die Klopfestigkeit und Zündwilligkeit (Oktanzahl und Cetanzahl, S. 137) vor.

Tafel 11. Bedingungen des Klopfens im Otto- und Diesel-Motor (nach W. Wilke)

Das Klopfen nimmt zu	
im Diesel-Motor	im Otto-Motor
bei niedriger Verdichtung	bei hoher Verdichtung
bei Drosselung der Ansaugluft	bei Überladung
bei geringer Belastung	bei hoher Belastung
bei hoher Drehzahl	bei niedriger Drehzahl
bei niedriger Ansaugluft-, Kühlwasser- und Zylinderkopftemperatur	bei hoher Ansaugluft-, Kühlwasser- und Zylinderkopftemperatur
bei Kohlenwasserstoffen mit ringförmigem Aufbau (Aromaten, Naphthene usw.)	bei Kohlenwasserstoffen mit kettenförmigem Aufbau (Paraffine, Olefine usw.)
bei Kraftstoff-Zusätzen wie: Bleitetraäthyl, Eisenkarbonyl usw.	bei Kraftstoff-Zusätzen wie: Amylnitrat, Azetaldehyd, Äthylnitrit usw.
im Otto-Motor	im Diesel-Motor
Das Klopfen nimmt ab	

Startverhalten

Zündgrenzen

Damit eine Verbrennung erfolgen kann, ist eine Entflammung des Kraftstoff-Luft-Gemisches erforderlich. Nicht jedes beliebige Gemisch aus Kraftstoff und Luft ist entflammbar. Die Entflammbarkeit hängt vielmehr von dem Gehalt an Kraftstoffdampf ab und ist nur in bestimmten Grenzen möglich. Wenn z. B. in einem Rohr (Bild 28) die durchstreichende Luft durch winzige Düsen immer mehr mit Kraftstoffdampf angereichert würde, dann könnte man das Gemisch nur innerhalb der durch „untere“ bzw. „obere Zündgrenze“ gekennzeichneten Zusammensetzung entflammen (Zündbereich). Unterhalb der „unteren Zündgrenze“ enthält das Gemisch zu wenig, oberhalb der „oberen Zündgrenze“ zuviel Kraftstoff, um entflammbar zu sein.

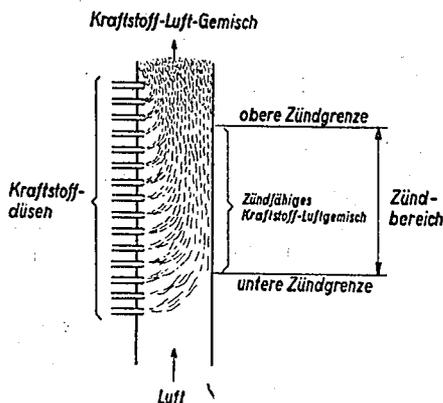


Bild 28.
Zündgrenzen eines Kraftstoff-Luft-
Gemisches

Diese Zündgrenzen sind je nach dem Kraftstoff verschieden und schwanken, infolge unterschiedlicher Beschaffenheit der einzelnen Kraftstoffarten, vgl. Tafel 12.

Wenn auch die Werte der Tafel 12 durch Versuche in Bomben gewonnen wurden und in dieser Hinsicht nicht dem Motorbetrieb entsprechen, so ist daraus doch zu erschen, daß flüssige Kraftstoffe und Flüssiggase (Propan und Butan) gegenüber den anderen Gasen einen weitaus kleineren Zündbereich aufweisen und daher einer sorgfältigen Einstellung des Kraftstoff-Luft-Gemisches bedürfen. Aus ihr geht ferner hervor, daß gerade geringe Kraftstoffmengen in Behältern gefährlich sind, weil sie Kraftstoff-Luft-Gemische, die innerhalb der Zündgrenze liegen, bilden können (S. 165).

Tafel 12. Zündgrenzen von Kraftstoffen

Kraftstoff	Gehalt des Kraftstoff-Luft-Gemisches an Kraftstoffdampf oder Gas in Raum %		Mittlerer Zündbereich Raum %
	Zündgrenze		
	untere	obere	
Flüssige Kraftstoffe:			
Benzin	0,7 bis 2,4	4,5 bis 6	5,6
Motorenbenzol	2	8	6
Motorenpetroleum und Schlepper- kraftstoff	1,5 bis 2,4	5 bis 8,2	4,6
Kraftgase:			
Wasserstoff	3,5 bis 9,5	54 bis 74	46
Kohlenoxyd	12 bis 17	70 bis 75	58
Propan	2,1 bis 2,4	6,7 bis 9,5	5,9
Butan	1,4 bis 2	8,5	6,8

Im praktischen Betrieb sind Abweichungen in der Zusammensetzung des Kraftstoff-Luft-Gemisches gegenüber dem theoretisch richtigen Gemisch nach oben oder unten nur um etwa 35 v. H. des Kraftstoffanteiles möglich, weil darüber hinaus der Motor sowohl bei magerer als auch bei fetter Vergasereinstellung unregelmäßigen Lauf und Aussetzer zeigt. In Luftüberschuszahlen (S. 60) ausgedrückt, ist der Betrieb nur innerhalb der unteren Zündgrenze von $\sim 0,7$ und der oberen von $\sim 1,4$ Luftüberschuszahl möglich. Im Motorbetrieb wird die obere Zündgrenze z. B. auch überschritten, wenn der Vergaser durch Tupfen „überschwenmt“ wird, der Motor „ersäuft“. Die untere Zündgrenze kann z. B. bei Verstopfung an der Düse unterschritten werden.

Im Diesel-Motor spielen Zündgrenzen trotz des hohen Luftüberschusses praktisch keine Rolle, weil durch die Temperatur der Verbrennungsluft, in die der Diesel-Kraftstoff eingespritzt wird, eine sichere Zündung bewirkt wird.

Flüchtigkeit der Otto-Kraftstoffe

Die Bildung eines brauchbaren Kraftstoff-Luft-Gemisches für den Otto-Motor ist nur möglich, wenn der Kraftstoff verdampfungswillig ist. Zwar wird durch die Düsen eine möglichst gute Zerstäubung des Kraftstoffes in der Luft angestrebt, um jedes Kraftstofftröpfchen mit der nötigen Lufthülle zu versehen, aber damit kann bestenfalls ein Kraftstoffnebel erzielt werden, dessen Tröpfchen dann mehr oder weniger verdampfen, bevor sie verbrennen.

Hierbei muß ein möglichst günstiger Ausgleich zwischen Verdampfung und Zerstäubung gefunden werden. Die Verdampfung darf nicht zu weit getrieben werden, weil sonst zu wenig Kraftstoff in den Zylinder gebracht wird (der „volumetrische Wirkungsgrad“ sinkt). Die Zerstäubung muß dagegen so begrenzt werden, daß Kraftstoffniederschläge an den Zylinderwandungen vermieden werden, weil diese den Ölfilm wegwaschen und schlecht verbrennen (Unterstützung durch Gemischvorwärmung).

Einen Anhalt für die Verdampfungswilligkeit des Kraftstoffes gibt sein Siedeverhalten, das in genormten Geräten bestimmt wird (S. 139). Dieses wieder ist vom chemischen Aufbau des Kraftstoffes abhängig. Für den Start ist ein gewisser Anteil leichtflüchtiger Anteile unumgänglich erforderlich.

Dampfdruck der Otto-Kraftstoffe

Die gebräuchlichen Otto-Kraftstoffe entwickeln schon bei gewöhnlicher Temperatur an ihrer Oberfläche Dampf, der den Druck der auf der Flüssigkeit ruhenden Luft überwinden muß. Der hierfür erforderliche Überdruck wird als Dampfdruck bezeichnet. Er ist um so größer, je flüchtiger der Kraftstoff und je höher die Temperatur ist.

Kraftstoffe mit geringer Flüchtigkeit und niedrigem Dampfdruck wie Petroleum und Gasöl (S. 143) eignen sich schlecht für die Bildung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches im Otto-Motor. Man hat zwar versucht, Schweröle durch Vorwärmen und kräftiges Zerstäuben in Schwerölgasern im Otto-Motor zu verwenden, doch läßt sich dabei nicht vermeiden, daß Kraftstofftröpfchen im Zylinder ausfallen, sich niederschlagen und in das Schmieröl übertreten. Da außerdem bei der niedrigen Verdichtung der Otto-Motoren eine vollständige Verbrennung von Schwerölen nicht möglich ist, sind die Schwerölgasern nahezu restlos verschwunden. Im Dieselmotor und in den Mitteldruckmotoren (Glühkopf, Hesselman) sind diese Kraftstoffe weitaus wirtschaftlicher verwendbar.

Bei Kraftstoffen mit hohem Dampfdruck entstehen in der warmen Jahreszeit Verluste in den Lagertanks durch Vergasen, die ganz beträchtlich sein können, die Startwilligkeit des gelagerten Kraftstoffes herabsetzen und überdies eine Feuergefahr für die Tankanlage bedeuten. In entsprechend kleinerem Ausmaße treten diese Erscheinungen auch an den Kraftfahrzeugtanks auf. Es wurden neuerdings Einrichtungen entwickelt, um die gasförmigen Anteile beim Umfüllen von Kraftstoffen zu sammeln und dem Lagertank zuzuführen. Durch die neuzeitlichen Verfahren der Kraftstoffherstellung ist es möglich, den Dampfdruck von Benzin in gewissen Grenzen einzustellen und für die warme Jahreszeit „Sommerbenzin“ mit niedrigerem Dampfdruck, für den Winter „Winterbenzin“ mit hohem Dampfdruck zu erzeugen.

Vgl. hiezu auch unter „Dampfblasenbildung“ der Autokraftstoffe Seite 107. Im Flugbetrieb kann ein zu leichtflüchtiger Kraftstoff in größeren Höhen dadurch Schwierigkeiten bereiten, daß er unter dem Einfluß des verminderten Luftdruckes stärker als in Bodennähe verdampft (vergast).

Die Gefahren leichtentzündlicher Kraftstoffe bei Zusammenstoßen bzw. Abstürzen sucht man durch Entwicklung von „Sicherheitskraftstoffen“ zu überwinden. Es sind dies Kraftstoffe, deren Dampfdruck so niedrig ist, daß bei den üblichen Außentemperaturen ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch sich nicht bilden kann. Die Verarbeitung solcher Kraftstoffe im Otto-Motor erfordert zusätzliche Einrichtungen, die dazu dienen, den Kraftstoff erst unmittelbar vor der Einführung in den Zylinder zu verdampfen. Für den Diesel-Motor sind in den handelsüblichen Diesel-Kraftstoffen bereits Sicherheitskraftstoffe vorhanden, die den praktischen Anforderungen an Entflammungssicherheit genügen.

Verdampfungswärme

Die schwierigsten Bedingungen für die Bildung des Kraftstoff-Luft-Gemisches liegen bei kaltem Motor und kalter Luft vor, also bei Kaltstart im Winter. Für jede Verdampfung des Kraftstoffes im Gemisch ist Wärme nötig, die der Ansaugluft, dem Vergaser und der Saugleitung entzogen werden. Diese werden dadurch abgekühlt und können dann nicht mehr die nötigen Wärmemengen liefern. Deshalb sind für den Winterbetrieb Heizeinrichtungen vorgesehen, die die erforderlichen Wärmemengen abgeben.

Maßgebend für die Verdampfungsgeschwindigkeit des Kraftstoffes bei der Gemischbildung ist neben der Siedetemperatur (S. 138) die Verdampfungswärme des Kraftstoffes, d. i. die Wärmemenge (in WE/kg), die zur Umwandlung von 1 kg flüssigen Kraftstoffes in Dampf von gleicher Temperatur erforderlich ist. Die Tafel 15 enthält für einige Kraftstoffe die Verdampfungswärme in WE je kg Kraftstoff. Zugleich gibt sie an, welchen Temperaturabfall ein theoretisch richtig zusammengesetztes Kraftstoff-Luft-Gemisch aufweist, wenn sein Kraftstoffanteil vollständig verdampft und dabei keine Wärmezufuhr erfolgt.

Sie zeigt, daß die Alkohole gegenüber den Benzin-Kohlenwasserstoffen und Motorenbenzol erheblich höhere Verdampfungswärmen besitzen. Dementsprechend kühlen sich Gemische mit Alkoholen besonders stark ab. Dies ist ein Vorteil und zugleich auch ein Nachteil der Alkohole. Der Vorteil liegt darin, daß die Verbrennungsluft durch die starke Abkühlung sich verdichtet, so daß durch den gleichen Ventilquerschnitt mehr Luft, d. h. Sauerstoff für die Verbrennung in den Motor gelangt. Der Kraftstoff wirkt also wie ein Kompressor. Der Nachteil liegt darin, daß es schwer fällt, die großen Verdampfungswärmen mit den üblichen Vergasern auf den Kraftstoff zu über-

Tafel 15. Verdampfungswärmen und Temperaturabfall

Kraftstoff	Verdampfungswärme WE/kg	Temperaturabfall des Gemisches ° C
Benzinkohlenwasserstoffe:		
n-Hexan	87	21
n-Heptan	74	18
n-Oktan	71	16,2
n-Decan	60	11,2
Motorenbenzol	95	26
Äthanol	220	82,7
Methanol	284	140

tragen, so daß besondere Starteinrichtungen notwendig werden, wenn ein Motor in der kalten Jahreszeit nur mit Alkohol betrieben werden soll.

Kaltstart des Otto-Motors

Jede Gemischbildung im Vergaser ist, wie gezeigt, von einem Temperaturabfall begleitet. Wenn er, wie beim kalten Motor, durch Aufheizung (siehe Tafel 13) nicht ausgeglichen werden kann, kann der Start Schwierigkeiten bereiten. Ein Teil des Kraftstoffanteiles schlägt sich dann an den Wandungen des Saugrohres und des Zylinders nieder. Dadurch ändert sich die Zusammensetzung des Gemisches, es wird kraftstoffärmer und vermag u. U. nicht mehr zu zünden, weil die untere Zündgrenze unterschritten wurde. Der Kraftstoffanteil, der sich unverbrannt im Zylinder ablagert, kann den Schmierfilm wegwaschen, ein Übelstand, dem man durch Beigabe von geringen Mengen Obenschmieröl zum Kraftstoff zu begegnen versucht. Es können überdies diese unverbrannt gebliebenen Kraftstoffanteile in das Schmieröl übertreten und es in seiner Schmierfähigkeit schädigen („Schmierölverdünnung“, vgl. S. 111).

Um diese Schädigungen möglichst gering zu halten und Batterie und Anlasser beim Start zu schonen, kann man besonders leichtflüchtige Kraftstoffanteile einspritzen, die sicheren Start schon nach wenigen Umdrehungen des Motors ermöglichen. Früher benützte man dafür den feuergefährlichen Äther, jetzt ist der Start durch die Supralintube wesentlich erleichtert und unbedenklich.

Supralin besteht aus außerordentlich leichtflüchtigen Benzinkohlenwasserstoffen, die auch bei tiefer Winterkälte rasch vergasen. Es ist in Tuben enthalten, aus denen es auf leichten Druck herausspritzt. Durch wenige Tropfen, die in die Ansaugluft des Vergasers gebracht werden, bildet sich selbsttätig ein zündfähiges Supralin-Luft-Gemisch, das für die ersten Zündungen ausreicht. Der Weiterlauf des Motors muß dann allerdings durch vorsichtige Betätigung der Startvorrichtung gesichert werden.

Im Flugbetrieb werden besondere leichtflüchtige Anlaßkraftstoffe verwendet, die einen geringen Anteil Obenschmieröles enthalten.

Es ist durch Versuche nachgewiesen, daß während des Kaltstartes gewisse Abgasanteile sich in dem bei der Verbrennung entstehenden Wasser lösen, dann angreifend wirken und die Abnutzung des Motors erheblich vergrößern. Nach neueren Feststellungen kann jeder Start eine Abnutzung verursachen, die einer Laufzeit von etwa 16 Stunden entspricht. Die alte Regel, daß die ersten fünf Minuten nach dem Start für den Motor am nachteiligsten sind, findet dadurch in anderer Form ihre Bestätigung.

Es ist daher schon aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zweckmäßig, Startschwierigkeiten aufzuklären und zu beseitigen. Sie sind kaum im Kraftstoff zu suchen, denn die Markenkraftstoffe für Otto-Motoren sind in ihrer Flüchtigkeit so günstig abgestimmt, daß auch bei niedrigen Temperaturen rascher Start möglich ist. Voraussetzung für raschen Start ist stets einwandfreier Zustand des Motors, besonders der elektrischen Anlage und der Startvorrichtung. Undichte Stellen am Vergaser oder am Saugrohr behindern den Start, weil durch sie Fremdluft Zutritt und das Kraftstoff-Luft-Gemisch verdünnt. Auch Mängel an der Betätigung der Startvorrichtung, undichte Kolben und Ventile, zu große Elektrodenabstände der Zündkerze, erschöpfte Batterie und zu zähflüssiges Öl (Sommeröl im Winterbetrieb) können den Start erschweren.

Der Start wird erleichtert, wenn nach dem Stillsetzen des Motors Abkühlung möglichst verhindert wird. Hierzu dienen Wärmeöfchen mit flammenloser Verbrennung, Glühsteine, Decken und Kälteschutz der Ölwanne.

Die Beanspruchung von Batterie und Anlasser wird verringert, wenn der Motor vor dem Anlassen mit der Kurbel mehrfach durchgedreht wird, ferner, wenn unnötige Stromverbraucher (starke Lampen, Zigarrenanzünder, Scheibenwischer, Klarsichtscheibe u. a. m.), ausgeschaltet werden.

Als Anhalt für die Startwilligkeit von Otto-Kraftstoffen hat sich der 10%-Punkt der Siedekurve (S. 139) brauchbar erwiesen. Der einwandfreie Vergleich der Startwilligkeit von Kraftstoffen ist bisher durch den Motorversuch nicht gelungen, weil die erste Zündung auch bei untadeligem Zustand des Motors von zahlreichen Bedingungen abhängt, deren Einfluß nicht genau erfaßt werden kann.

Kaltstart des Diesel-Motors

Für den Diesel-Motor sind Flüchtigkeit und Dampfdruck des Kraftstoffes von untergeordneter Bedeutung, da beim Diesel-Verfahren die Verdampfung der Kraftstofftröpfchen bei wesentlich höheren Temperaturen vor sich geht als im Otto-Motor. Die hohe Flüchtigkeit der Otto-Kraftstoffe wäre hier sogar unerwünscht, weil dadurch eine Verdampfung des Kraftstoffes unmittelbar an der Düse eingeleitet würde, wodurch die richtige Verteilung des Kraftstoffes im Verbrennungsraum behindert wird.

Der Start des Diesel-Motors ist, soweit der Kraftstoff damit in Zusammenhang steht, hauptsächlich von dessen Zündwilligkeit (S. 85) abhängig. Doch können auch Mängel am Motor, wie falscher Einspritzzeitpunkt, Hängenbleiben der Düsennadel oder der Ventile, Kleben der Kolbenringe, undichte Kolben, Störungen an der Kraftstoffpumpe u. ä. den Start erschweren.

Wirtschaftlichkeit

Heizwert

In der Kraftstofftechnik rechnet man meist mit dem Energiegehalt, der in 1 kg des Kraftstoffes enthalten ist. Die Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung von 1 kg Kraftstoff frei wird, wird als **Verbrennungswärme**, auch als **oberer Heizwert H_o** bezeichnet und in Kilogrammkalorien ($\text{kcal/kg} = \text{WE}$) gemessen. Hierbei ist angenommen, daß die Verbrennungsprodukte nach der Verbrennung wieder abgekühlt werden und daher das bei der Verbrennung entstehende Wasser flüssig ist. Diese Voraussetzungen treffen jedoch für die Verbrennung im Motor nicht zu, weil die heißen Abgase das Wasser in Dampfform enthalten. Daher kann die sonst durch die Abkühlung des Verbrennungswassers freiwerdende Wärme ($\sim 600 \text{ WE/kg}$) nicht genutzt werden. Für verbrennungstechnische Rechnungen wird deshalb der um die Verdampfungswärme des gebildeten Wassers verringerte obere Heizwert benutzt. Dieser wird als **unterer Heizwert H_u** bezeichnet.

Für flüssige Kraftstoffe, die nach Liter verkauft werden, ist vielfach der Energiegehalt von 1 Liter Kraftstoff wichtig. Dieser **Literheizwert** errechnet sich aus dem unteren Heizwert durch Multiplikation mit der Wichte des Kraftstoffes.

Die **Wichte** (oder das spezifische Gewicht) ist das Gewicht eines Liters Kraftstoff bei 20°C (S. 144)

Für gasförmige Kraftstoffe wird der untere Heizwert entweder je kg oder je m^3 Gas angegeben. Der Kubikmeterheizwert ist der mit der Wichte multiplizierte Kilogrammheizwert des Gases, (S. 159).

Die nachstehende Tafel 14 enthält für die wichtigsten Kraftstoffe die Verbrennungswärmen und Heizwerte.

Tafel 14. Energiewerte und Wichten von flüssigen Kraftstoffen

Kraftstoff	Wichte kg/l	Verbrennungswärme WE/kg	Unterer Heizwert WE/kg	Literheizwert WE/l	Energievolumen	Energiegewicht
					cm ³ 1000 WE	g 1000 WE
Benzin	0,740	11 000	10 400	7700	150	96
Motorenbenzol ...	0,880	10 000	9 600	8500	118	104
Äthanol	0,790	7 100	6 400	5100	196	156
Methanol	0,800	5 350	4 660	3700	270	214
Gasöl	0,840 bis 0,880	10 200 bis 11 000	9700 bis 10 500	8200 bis 9300	122-107	105-95
Braunkohlenteeröl .	0,85-1,05	10 000 bis 10 400	9600 bis 10 000	8200 bis 10 500	122-96	104-100
Steinkohlenteeröl .	1,00-1,10	8500 bis 9500	8200 bis 9200	8200 bis 10 100	122-99	122-109
Petroleum	0,85	10 500	10 000	8500	120	100
Heizöl.....	0,9-1,1	10 000 bis 10 300	9600 bis 9900	8600 bis 10 000	116-100	104-101

Es ist auch möglich, den Heizwert in grober Annäherung aus der chemischen Analyse des Kraftstoffes zu errechnen. Der Heizwert von Kraftstoffgemischen ist praktisch gleich der Summe der Heizwerte der einzelnen Anteile.

An jedes Kraftstoffvolumen und -gewicht ist eine bestimmte Energiemenge gebunden, die sich aus Heizwert und Wichte ermitteln läßt. Umgekehrt ist eine bestimmte Energiemenge, z. B. 1000 WE an ein bestimmtes Kraftstoffvolumen und -gewicht gebunden, die je nach dem Kraftstoff verschieden groß sind. Es errechnet sich:

$$\text{Energievolumen} = \frac{1\,000\,000}{\text{Literheizwert}} \text{ in cm}^3 \text{ je } 1000 \text{ WE}$$

$$\text{Energiegewicht} = \frac{1\,000\,000}{\text{unterer Heizwert}} \text{ in g je } 1000 \text{ WE.}$$

Kraftstoffe mit niedrigem Energievolumen erfordern kleine Tankräume, mit anderen Worten, sie ermöglichen bei gegebenem Tankinhalt große Fahr-

bezw. Flugstrecken. Kraftstoffe mit niedrigem Energiegewicht vergrößern die Tragfähigkeit des Fahr- bzw. Flugzeuges. Die Energievolumen und -gewichte für die wichtigsten Kraftstoffe gibt Tafel 14.

Das niedrigste Energievolumen besitzen die Diesel-Kraftstoffe und Motorenbenzol, das niedrigste Energiegewicht Benzin und schweres Gasöl, die ungünstigsten Werte die Alkohole.

Der Energiegehalt des Kraftstoffes kann im Motor nur zum geringen Teil (im Otto-Motor im Mittel 24%, im Diesel-Motor etwa 52%) in Arbeit umgesetzt werden. Der größere Teil der entwickelten Wärme geht, wie Bild 29 zeigt, über die Auspuffgase, das Kühlwasser und Strahlung verloren. Daher ist darauf zu sehen, daß durch vollständige Verbrennung der Energiegehalt des Kraftstoffes möglichst weitgehend frei wird. Damit der Kraftstoff vollständig verbrennen kann, muß die dafür notwendige Luftmenge (S. 59) zur Verfügung stehen.

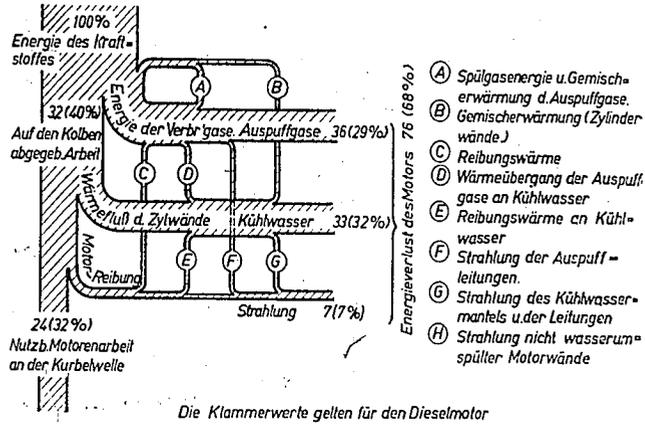


Bild 29.
Energiehaushalt
des Otto-(und Die-
sel-)Motors

nach Bosch Kraftfahrtechnisches Handbuch 7. Auflage 1930

Mit Hilfe des Luftbedarfes läßt sich die Energiemenge errechnen, die dem Otto-Motor je m^3 angesaugten Kraftstoff-Luft-Gemisches zugeführt und von ihm verarbeitet wird. Man bezeichnet sie als Gemischheizwert. Er beträgt bei Raumtemperatur und normalem Luftdruck für

Benzin	~ 800 WE/ m^3
Motorenbenzol ...	~ 840 "
Äthanol	~ 790 "
Methanol	~ 750 "
Flüssiggas	~ 810 "

Vielfach wird jedoch einfacher gerechnet, wieviel WE in derjenigen Kraftstoffmenge enthalten sind, die mit 1 m³ Luft (von 0° und 760 mm, dem Normal-m³) verbrannt werden kann. Dieser ungenau als Gemischheizwert bezeichnete Wert ergibt sich aus

$$\frac{\text{Unterer Heizwert (je kg Kraftstoff)}}{\text{Luftbedarf in m}^3 \text{ (je kg Kraftstoff)}} \text{ WE/m}^3$$

und beträgt für Benzin ~ 900 , Benzol ~ 950 , Äthanol ~ 920 , Methanol ~ 940 und Flüssiggas ~ 840 WE/m³.

Daraus ist zu ersehen, daß der Otto-Motor bei diesen Kraftstoffen je Hub nahezu die gleichen Energiemengen ansaugt und seine Leistung daher vom Heizwert des Kraftstoffes nicht abhängt, d. h. also, daß ein Kraftstoff mit geringem Heizwert nicht etwa im Motor eine Minderleistung erbringt.

Durch Überladung kann die dem Motor je Hub zugeführte Energiemenge erhöht werden. Bei Alkoholkraftstoffen tritt in Auswirkung der hohen Verdampfungswärme der Alkohole (S. 90) durch starke Abkühlung eine Verdichtung der Ladung ein, wodurch sie sich für den Betrieb von Hochleistungsmotoren besonders eignen (S. 54).

Das Kraftstoff-Luft-Verhältnis

Das Kraftstoff-Luft-Gemisch des Otto-Motors ist nur innerhalb enger Bereiche zündfähig (S. 87). Daher arbeitet der Otto-Motor mit Gemischen, die in der Nähe der theoretischen Zusammensetzung liegen. Man erzielt im allgemeinen mit etwa 10% Luftüberschuß (magere Vergasereinstellung) die größte Wirtschaftlichkeit, dagegen mit etwa 10% Luftmangel (fette Vergasereinstellung) die größte Leistung. Werden diese Grenzen überschritten, so sinkt die Leistung des Motors stark ab. Bei Fahrten im Gebirge, besonders aber beim Flug in großen Höhen, tritt durch die geringere Wichte der Luft eine selbsttätige Überfettung des Gemisches ein, die ebenfalls Leistungsverlust bewirkt. Sie kann entweder durch Zurückregelung der Kraftstoffmenge (Vermagerung) oder durch Zusatzluft ausgeglichen werden.

Die Flammentemperaturen im Motor sind am höchsten bei richtiger Vergasereinstellung. Sie sinken bei fetter Einstellung, weil der überflüssige Kraftstoff den Motor von innen kühlt, wovon z. B. bei stark wärmebelasteten Rennwagenmotoren Gebrauch gemacht wird. Auch bei magerer Vergasereinstellung sinken die Flammentemperaturen. Wenn trotzdem gerade bei dieser Einstellung häufig Ventilverbrennungen auftreten, so hat dies seinen Grund darin, daß der Sauerstoff der überschüssigen Luft den Ventilstahl oxydiert, den Kohlenstoff des Ventilstahles herausbrennt und damit dessen Festigkeit herabsetzt.

Durch die Vergasereinstellung soll je nach dem Zweck des Fahrzeuges geringster Kraftstoffverbrauch oder höchstmögliche Leistung erreicht werden. Im allgemeinen wird man die Einstellung so wählen, daß bei sparsamem Kraftstoffverbrauch die Spitzenleistung des Motors zwar nicht erreicht wird, jedoch

noch gute Motorleistung vorhanden ist. Einstellung auf geringsten Verbrauch ist meist mit ungenügender Beschleunigung verbunden und birgt wegen des großen Luftüberschusses die Gefahr einer Verbrennung der Auspuffventile in sich. Einstellungen auf hohe Leistung mit niedrigem Verbrauch sind nicht möglich, jedoch magere Einstellung für Teillast bei fatter Einstellung für Vollast. Voraussetzung für jede Vergasereinstellung ist der ordentliche Zustand des Motors. Die Prüfung hat sich daher zu erstrecken auf:

1. Ausreichende Verdichtung in allen Zylindern.

Sämtliche Kolben und Ventile müssen gut abdichten und die Ventile richtiges Spiel haben. Der Kolbenboden muß frei von Ölkohle sein. Etwa vorhandene Ölkohle muß abgekratzt werden.

2. Ordnungsmäßigen Zustand der Zündanlage.

Sie muß einen kräftigen Funken liefern. Auch bei richtig eingestelltem Zündzeitpunkt sind Verteiler und Kabel nachzuprüfen, ebenso die automatische Zündverstellung. Die Kontakte des Unterbrechers müssen sauber gehalten werden und einen Abstand von rd. 0,4 mm in geöffnetem Zustand aufweisen. Die Zündkerzen müssen richtigen Glühwert besitzen, sauber sein und richtigen Elektrodenabstand haben. Besondere Sorgfalt ist auf die Reinigung derjenigen Teile der Isolation zu verwenden, die der Verbrennungsflamme ausgesetzt sind. Der Elektrodenabstand soll je nach Motorbauart 0,3 bis 0,7 mm betragen. Zu großer Elektrodenabstand erschwert bei Magnetzündern das Anspringen.

Wenig bekannt ist, welchen Einfluß eine schlecht arbeitende Zündanlage auf den Verbrauch ausübt. So wurde z. B. an einem Vierzylindermotor durch Versuche ermittelt, daß ein verbrannter Unterbrecherkontakt den Kraftstoffverbrauch um 15, der Ausfall eines Zylinders sogar um 30 v. H. zu erhöhen vermag.

3. Einwandfreie Abdichtung des Vergasers.

Falls er dauernd tropft, kann die Ursache in undichtem oder zu schwerem Schwimmer liegen. Auch ist es möglich, daß die Schwimmeraufhängung ausgeschlagen, die Nadel verbogen oder abgenützt ist.

4. Einwandfreie Abdichtung am Saugrohr.

Die Saugleitung muß vollkommen dicht sein. Etwas Schmieröl, das an die Flanschen des Saugrohres gegeben wird, darf nicht weggesaugt werden. Unter Umständen wird es notwendig sein, die Dichtungen zu erneuern. Mitunter hat die Welle der Drosselklappe zuviel Spiel, so daß an deren Lagerung falsche Luft angesaugt wird. Dadurch springt der Motor schlecht an und erhält unruhigen Leerlauf. Auch die Leitungen zu Geräten, die durch den Unterdruck im Saugrohr betätigt werden, müssen dicht sein.

Die Dichtungen am Saugrohr müssen gut passen. Teile, die in den Querschnitt des Saugrohres ragen, sind zu beseitigen.

5. Einwandfreie Betätigung der Starterklappe.

Sie darf nicht hängen bleiben oder zu viel Spiel aufweisen.

6. Saubere Kraftstoffleitungen, Siebe und Luftfilter.

7. Richtig eingestellte Luftvorwärmung.

Eine etwa vorhandene regelbare Luftvorwärmung des Motors ist für den Betrieb in der kälteren Jahreszeit bestimmt. Im Sommer muß sie ausgeschaltet werden, um Überhitzung des Motors, Leistungsabfall und übermäßigen Kraftstoffverbrauch zu vermeiden.

Einwandfreien Zustand des Motors vorausgesetzt, gelten nachstehende Kennzeichen für falsche Einstellung des Vergasers:

Kennzeichen für fette Vergasereinstellung.

1. Der Auspuff zeigt, besonders beim Anfahren, schwarzen Rauch.
2. Die Zündkerzen zeigen, richtigen Glühwert vorausgesetzt, bei Betrieb mit bleifreiem Kraftstoff schwarzen, öligen (Bild 30), oder rußartigen Belag (Bild 31).



Bild 30. Verölte Zündkerze

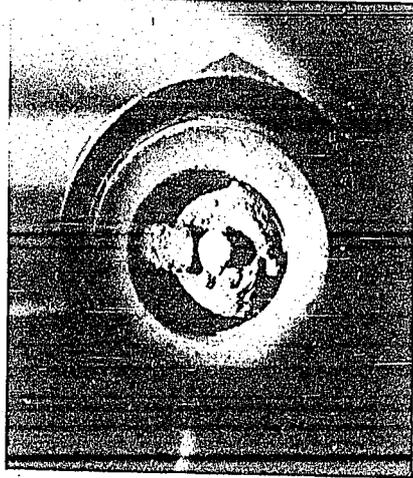


Bild 31. Verrußte Zündkerze

Bei Betrieb mit Bleibenzinen ist der Niederschlag auf der kühlen Kerze (hoher Wärmewert) grau bis schwarz und pulverförmig, während die heiße Kerze (niedriger Wärmewert) eine schwarzbraune bis blauschwarze, rauhe, festgebackene Kruste von perliger oder glasiger Beschaffenheit aufweist.

3. Der kalte Motor kommt nach dem Anspringen ohne Vergaserrückschläge in Gang und zeigt Auspuffknaller, die auch bei der betriebswarmen Maschine nicht verschwinden. Da Knaller auch beim Versagen von Zündkerzen auftreten, ist auf die Zündung zu achten.

Abhilfe: Verringerung der Kraftstoffzufuhr zum Motor durch Einbau kleinerer Düsen.

Kennzeichen zu magerer Vergasereinstellung.

1. Der Motor kommt nur allmählich unter Nießen und Knallen im Vergaser in Gang.

2. Der betriebswarme Motor knallt nach dem Vergaser hin.

Da Knallen bei betriebswarmer Maschine auch von glühenden Kerzen herrühren kann, sind in solchen Fällen gegebenenfalls Kerzen mit höherer Glühfestigkeit einzubauen.

3. Durch Betätigen der Startvorrichtung oder durch Tupfen auf den Schwimmer während der Fahrt steigt die Motorleistung.

4. Die Zündkerzen sind ohne Niederschläge, bei Betrieb mit Bleibenzin zeigt sich schwacher Bleioxydniederschlag von gelblicher Färbung.

Abhilfe: Ersatz der Kraftstoffdüse durch die nächst größere Nummer usw., bis der Motor einwandfrei läuft und auch gute Beschleunigung aufweist.

Jede neue Vergasereinstellung ist auf Anspringen und bei betriebswarmer Maschine auf Leerlauf, Übergang und Vollgas zu erproben.

Das Auswechseln des Lufttrichters wird selten nötig sein und ist auch bei einigen neueren Vergaserbauarten nicht auszuführen. Es soll nur dann vorgenommen werden, wenn eine Einstellung mit Hilfe der oben gegebenen Regeln nicht zum Ziele führt. Eine Änderung des Lufttrichters verursacht Änderung der Fahreigenschaften. Ein engerer Lufttrichter verbessert die Beschleunigung des Motors, setzt aber die Höchstgeschwindigkeit herab. Umgekehrt kann ein weiterer Lufttrichter die Höchstgeschwindigkeit des Wagens erhöhen. Jede Änderung des Lufttrichters erfordert zwangsläufig Nachregulierung der Kraftstoffdüsen.

Die Vorgänge bei der Zerstäubung und Verteilung des Kraftstoff-Luft-Gemisches sind so verwickelt, daß es nicht möglich ist, die Einstellung eines Vergasers vorauszuberechnen. Es läßt sich wohl aus den Motorabmessungen das Vergasermuster festlegen, aber die Abstimmung des Vergasers auf günstige Leistung und Verbrauch ist allein dem praktischen Motorversuch vorbehalten.

Der Diesel-Motor arbeitet von Leerlauf bis Vollast mit Luftüberschuß, bei Leerlauf mit der 6- bis 10fachen theoretischen Luftmenge, bei Vollast mit 30 bis 50% Luftüberschuß. Er erzielt daher eine praktisch vollkommene Verbrennung des Kraftstoffes.

Hoher Kraftstoffverbrauch

Großer Verbrauch tritt auf bei allen Störungen am Vergaserschwimmer oder dessen Aufhängung. Wenn der Schwimmer stecken bleibt, die Aufhängung ausgeschlagen, die Schwimbernadel verbogen ist und nicht abdichtet, der Schwimmer undicht ist und dadurch tiefer in den Kraftstoff einsinkt, stets

wird damit ein zu hoher Kraftstoffstand im Vergaser, Überfließen am Schwimmergehäuse oder an der Düse und daher Verlust des Kraftstoffes verbunden sein. Dieselbe Erscheinung kann auch durch eine ausgeschlagene, zu tief sitzende Schwimbernadel hervorgerufen werden.

Das Steckenbleiben des Schwimmers kann meist durch leichtes Abschmirgeln der Führungen im Schwimmergehäuse behoben werden. Ein undichter oder an der Aufhängung ausgeschlagener Schwimmer ist am besten durch einen neuen, gleichschweren Schwimmer zu ersetzen.

Es kann auch das Hängenbleiben der Starteinrichtungen Ursache für hohen Verbrauch sein. Wenn z. B. die Starterklappe bei laufendem Motor nicht den vollen Querschnitt des Ansaugestutzens freigibt, sondern ihn mehr oder weniger abschließt, arbeitet der Motor mit zu fettem Gemisch und verbraucht zu viel Kraftstoff.

Unbeachtete Kraftstoffverluste, die sich im Laufe der Zeit jedoch fühlbar machen, entstehen oft an undichten Verschraubungen, feinen Rissen oder Knickstellen in der Leitung u. a.

Der Otto-Motor hat gegenüber dem Diesel-Motor bei Teillastbetrieb ungünstige Verbrauchsziffern aufzuweisen. Dies hängt mit dem verhältnismäßig größeren Arbeitsaufwand für das Ansaugen, der sinkenden Füllung bei gleichbleibender Restgasmenge und z. T. mit der unvollkommenen Kraftstofflieferung durch den Vergaser zusammen, die sich trotz Anordnung von Ausgleich- und Zusatzdüsen dem Kraftstoffbedarf des Motors über den ganzen Drehzahlbereich nicht genau genug anpassen läßt.

Beim Diesel-Motor zeigt sich zu hoher Verbrauch durch Rußen im Auspuff an. Er kann auch verursacht werden durch falschen Einspritzzeitpunkt, ungenügende Zerstäubung, undichte Ventile und verstopften Luftfilter, ferner durch alle Leckverluste an Pumpe, Düse und Kraftstoffleitungen.

Die Erfahrungen, die durch den Kundendienst der großen Kraftstoffgesellschaften gewonnen wurden, zeigen, daß der Kraftstoffverbrauch durch sorgfältige Einregelungen, besonders an älteren Motoren, im Durchschnitt um etwa 5% gesenkt werden konnte.

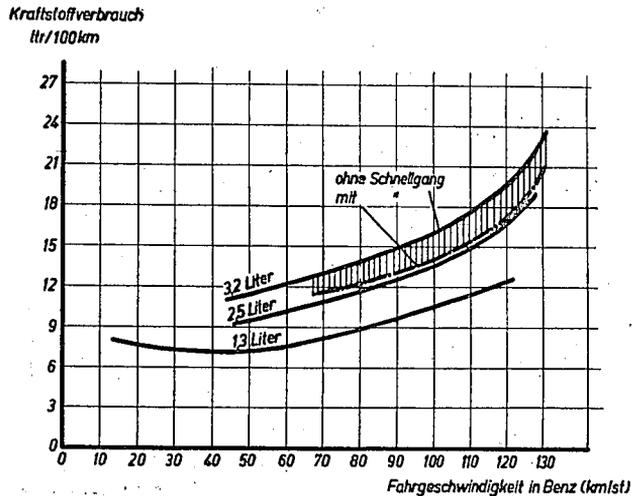
Äußere Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch wird nicht nur vom eingestellten Kraftstoff-Luftverhältnis, sondern auch weitgehend von Umständen beeinflußt, unter denen das Kraftfahrzeug verwendet wird. Er wird vor allem bestimmt durch den Energieaufwand für jede Beschleunigung des Fahrzeuges. Dieser wird bei unwirtschaftlicher Fahrweise unnötig oft durch Abbremsen vernichtet. Daher ist der Kraftstoffverbrauch weitgehend von der Fahrweise abhängig. Er ist

wegen der unvermeidlichen großen und häufigen Geschwindigkeitsschwankungen, auch wegen des Leerlaufbetriebes, im Stadtverkehr größer als bei Überlandfahrten. Bei diesen ist er aus dem gleichen Grunde für die Fahrt auf der Landstraße weitaus größer als für die Autobahnfahrt. So ergab sich z. B. bei Vergleichsfahrten für gleiche Strecke und gleiche Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Autobahn eine Kraftstoffersparnis von rund 48% gegenüber der Landstraße, oder es konnte bei gleicher Geschwindigkeit mit der gleichen Kraftstoffmenge eine um 75% längere Autobahnstrecke durchfahren werden. Derartige Unterschiede sind bei der Beurteilung des Kraftstoffverbrauches zu berücksichtigen.

Für ein gegebenes Fahrzeug und die gleiche Strecke wird der Verbrauch von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Bild 32 zeigt den Kraftstoffverbrauch

Bild 32.
Kraftstoffverbrauch und Fahrgeschwindigkeit



verschiedener Personenkraftwagen im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 130 Benz (km/st). Es ist zu ersehen, daß der geringste Verbrauch etwa bei 40 bis 60 Benz erzielt wird. Am 3,2 Liter-Wagen ist überdies die Kraftstoffersparnis bei Verwendung des Schnellganges angegeben.

Der Anstieg des Verbrauches bei höheren Geschwindigkeiten wird durch den größeren Fahrwiderstand verursacht, von dem bei üblichen Wagenformen bei 80 Benz allein 55%, bei 130 Benz sogar 65% auf den Luftwiderstand entfallen. Aus diesem Grunde kann durch windschlüpfige Wagenformen erheblich Kraftstoff gespart werden.

Fahrten im Gebirge oder auf schlechten Straßen geben für die gleiche Strecke höheren Kraftstoffverbrauch als Fahrten in der Ebene oder auf guten Straßen. Auch die Witterungsverhältnisse, wie Hitze, Kälte, Schnee, Regen, Gegenwind u. a. beeinflussen den Kraftstoffverbrauch. Selbst der Reifendruck kann einen meßbaren Einfluß auf den Verbrauch nehmen. Alle diese Umstände sind zu berücksichtigen, wenn man den Verbrauch eines Kraftfahrzeuges beurteilt. Schließlich kann scheinbar hoher Verbrauch durch unrichtige Aufzeichnungen über die gefahrene Strecke oder die getankten Kraftstoffmengen zustande kommen.

Der Verbrauch eines Kraftfahrzeuges kann sich auch durch oftmaliges Starten infolge Ungeschicklichkeit oder Mängel an der Starteinrichtung erhöhen, ferner durch unnötig langes Fahren mit gezogener Startvorrichtung, die fettes Kraftstoff-Luft-Gemisch liefert.

Auch das Fahren mit zu kühlem Motor erhöht den Verbrauch. Da die Möglichkeit hierfür im Winter größer ist als im Sommer, zeigen die Kraftwagen im allgemeinen im Winter höheren Verbrauch je km. So wurde z. B. bei einem Verkehrsunternehmen im Winter ein um 14 % höher liegender Verbrauch gegenüber dem Jahresmittel festgestellt. Es konnte ferner nachgewiesen werden, daß ein Wagen, der nachts bei -70°C im Freien stand, während der ersten 5 km nach dem Kaltstart etwa das Dreifache des normalen Verbrauches aufwies. Ähnliche Verbrauchsziffern weisen die Wagen auf, die im Winter nachts auf die „Latarnengarage“ angewiesen sind.

Der übermäßig gekühlte Motor weist außerdem erhöhte Abnutzung auf. Sie zeigt sich z. B. besonders stark bei Fahrzeugen, bei denen kurze Fahrstrecken mit längeren Stillstandspausen abwechseln, wie bei den Wagen von Ärzten und Vertretern oder im Zustelldienst.

Verbrauchskennziffern

Um Meinungsverschiedenheiten über den Kraftstoffverbrauch zwischen Käufer und Verkäufer von Kraftfahrzeugen auszuschalten, die durch die erwähnten Einflüsse nur allzuleicht zustandekamen, wurde der „Normverbrauch“ festgelegt. Dieser wird durch Fahrversuche auf einer ebenen Reichsautobahnstrecke von 50 bis 60 km Länge bei Windstille ermittelt, wobei die gesamte Fahrstrecke möglichst gleichmäßig mit einer Geschwindigkeit durchfahren wird, die etwa zwei Drittel der gestoppten Höchstgeschwindigkeit beträgt. Der Normverbrauch errechnet sich dann aus:

$$\text{Normverbrauch in l/100 km} = 1,1 \frac{\text{verbrauchte Kraftstoffmenge in l}}{\text{durchfahrene Strecke in km}} \cdot 100$$

Hierin ist ein Zuschlag von 10 % des gemessenen Verbrauches zur Angleichung an den Verbrauch im üblichen Betrieb enthalten.

Der Normalverbrauch soll künftig für jedes Fahrzeug angegeben werden und ermöglicht einwandfreie Vergleiche hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches verschiedener Wagenmuster.

In der Verwendung wird ein Kraftfahrzeug nicht den Normverbrauch aufweisen, der ja lediglich zu Vergleichszwecken ermittelt wird, sondern den von Spitzengeschwindigkeit, Straßenverhältnissen, Verkehrshindernissen u. ä. m. beeinflussten Reiseverbrauch. Dieser hängt insbesondere von der überwiegenden Verwendung des Fahrzeuges – Stadt- oder Überlandverkehr – ab und liegt stets mehr oder weniger über dem Normverbrauch.

Der Verbrauch von Motoren wird am Motorenprüfstand bestimmt und in g Kraftstoff je Pferdestärke und Stunde ausgedrückt (S. 144). Er ist je nach der Belastung des Motors verschieden und für Teillast höher als für Vollast. Für Vergleiche werden meist die bei Vollast erzielten Verbrauchszahlen zugrunde gelegt. Richtwerte hierüber gibt für die gebräuchlichsten Motorenarten Tafel 15.

Tafel 15. Kraftstoffverbräuche und Arbeitspreis von Verbrennungsmotoren (Stand 1938)
z. T. nach Bosch, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 7. Auflage

Motorart	Kraftstoffverbrauch g/PS _h	Arbeitspreis Pf/PS _h
Otto-Motoren für:		
Krafträder		
2-Takt bis 250 cm ³	450-500	24-16
2-Takt 250-350 cm ³	450-350	24-19
4-Takt obengesteuert	250-200	15-11
4-Takt untengesteuert	350-220	19-12
Personenkraftwagen		
2-Takt	570-350	20-19
4-Takt bis 1,3 l	300-220	16-12
4-Takt über 1,3 l	320-250	17-13
Sportmotoren	250-230	13-12
Lastkraftwagen		
2-Takt	390-350	21-19
4-Takt	350-235	19-12
Flugzeuge		
luftgekühlt { bis 200 PS	240-220	13-12
{ 200-500 PS	245-215	13-11
{ über 500 PS	240-200	13-11
wassergekühlt	225-200	12-11
Hesselman-Motor	250-220	9-8
Glühkopfmotor	250-230	9-8
Diesel-Motoren für		
Flugzeuge	165-155	4
Luftschiffe	175	4,4
Personenkraftwagen	280-225	7-5,6
Lastkraftwagen, Triebwagen	275-190	6,8-4,8

Dem Arbeitspreis liegen zugrunde ein Kraftstoffpreis von 0,50 RM/kg für Benzin, 0,57 RM/kg für Flugbenzin und 0,25 RM/kg für Dieselmotoren. Der Heizwert ist für alle drei Kraftstoffe mit 10 000 WE/kg angenommen.

Energiepreise

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Kraftstoffes spielt der Preis eine ausschlaggebende Rolle. Er bestimmt sich nicht nach dem Energiegehalt, also nach dem Heizwert, sondern ist von der Marktlage, ferner von Besteuerung und Zoll abhängig. Die Marktlage wieder richtet sich im Grunde nach der mehr oder minder großen Schwierigkeit, mit der ein gegebener Kraftstoff nach dem Stande der Motortechnik verarbeitet werden kann. So ist Gasöl wegen des noch geringen Bestandes an Dieselmotoren im Verkehr trotz annähernd gleichen Heizwertes auf dem Weltmarkt wesentlich billiger als Benzin. Andererseits ist z. B. der aus Gründen einer nationalen Kraftstoffwirtschaft verwendete Äthylalkohol bei geringem Heizwert wesentlich teurer als Benzin.

Der Kraftstoffpreis für den Verbraucher enthält nicht nur die Herstellungskosten einschließlich Gewinn, sondern alle Unkosten, die für die Beförderung von der Erzeugungsstätte bis zum Kraftwagentank und für die Bereithaltung an bestimmten Stellen einschließlich des zugehörigen Kundendienstes aufzuwenden sind. Dies erklärt u. a. auch den Preisunterschied zwischen Groß- und Kleinbezug.

Für den Verbraucher gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Wirtschaftlichkeit von Kraftstoffen miteinander zu vergleichen. Dem Vergleich kann z. B. der Preis, der für eine bestimmte Energiemenge, z. B. 1000 WE, aufzuwenden ist, zugrunde liegen. Dieser „Energiepreis“ errechnet sich aus:

$$\text{Energiepreis} = \frac{1000 \times \text{Kilopreis in Pfennigen}}{\text{unterer Heizwert}} \text{ in Pf/1000 WE}$$

oder

$$\text{Energiepreis} = \frac{1000 \times \text{Literpreis in Pfennigen}}{\text{Literheizwert}} \text{ in Pf/1000 WE}$$

Die Aufstellung der Energiepreise, wie sie in Tafel 16 gegeben ist, läßt erkennen, daß es Kraftstoffe gibt, die durch ihren ungemein niedrigen Energiepreis vielleicht Anreiz dafür bieten werden, sie der motorischen Verbrennung mehr zu erschließen wie bisher (vgl. z. B. Heizöl, Naphthalin, Holz, Kohle und Koks). Andererseits zeigt der Energiepreis ebenso deutlich, daß manche immer wieder vorgeschlagene Ausweichkraftstoffe, wie z. B. Wasserstoff oder Azetylen, erheblich höhere Energiepreise gegenüber den üblichen Kraftstoffen aufweisen.

Da jedoch vom Motor nicht der gesamte Energiegehalt des Kraftstoffes, sondern nur ein Teil genützt werden kann, ist der Preis für die vom Motor geleistete Arbeit für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit besser heranzuziehen. Dieser **Arbeitspreis** stellt den Betrag dar, der je nach dem

Tafel 16. Energiepreise, Stand Frühjahr 1940
(nach Wa. Ostwald)

Energieart	Heizwert	Preis	Bemerkungen	Energiepreis Pf/1000 WE
Benzin	10 400 WE/kg	40 Pf/l	Tankstelle	5,1
Benzol	9 600 WE/kg	50,00 RM/100kg	Großhandel	5,2
Petroleum				
Diesel-Kraftstoff	10 200 WE/kg	31,90 RM/100kg	verzollt	5,1
Diesel-Kraftstoff	10 200 WE/kg	21,60 RM/100kg	zollbegünstigt	2,1
Heizöl	9 800 WE/kg	13,50 RM/100kg	ab Werk	1,4
		einschl. Faß		
Äthanol	6 400 WE/kg	50 Pf/l	im Kraftstoff	9,8
Stadtgas	4 000 WE/m ³	22 Pf/m ³	Wohnung	5,5
Methan	9 000 WE/kg	31,00 RM/100kg	verdichtet	5,4
Flüssiggas	11 000 WE/kg	45,80 RM/100kg	Einzelbezug	4,2
Wasserstoff ...	2 570 WE/m ³	2,00 RM/m ³	verdichtet	78,0
Azetylen-				
(Dissousgas) ..	11 620 WE/kg	2,00 RM/kg	verdichtet	17,5
Naphthalin ...	9 300 WE/kg	6,40 RM/100kg	Großhandel	0,7
Brennholz	5 500 WE/kg	3 Pf./kg	für Sauggas	0,86
Braunkohlen-				
briketts	4 000 WE/kg	2,92 RM/100kg	Kleinhandel	0,75
Steinkohle ...	7 900 WE/kg	3,68 RM/100kg	Kleinhandel	0,47
Koks	6 800 WE/kg	3,80 RM/100kg	Kleinhandel	0,56

Kraftstoffverbrauch des Motors je Pferdekraft und Stunde aufzuwenden ist. Die Tafel 15 enthält die Arbeitspreise für die wichtigsten Verbrennungsmotoren.

Für die Verkehrsbetriebe kommt jedoch bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen nur der tatsächliche Kraftstoffpreis je gefahrenen oder geflogenen Kilometer bei bestimmter Belastung in Frage. Er wird entweder durch Fahrversuche auf der Landstraße (S. 145) bzw. Flugversuche ermittelt oder als Durchschnittswert aus Verbrauchs- und Streckenaufzeichnungen über einen längeren Zeitraum errechnet. Der Kraftstoffpreis je km ist von denselben Umständen abhängig wie der Verbrauch des Fahrzeuges (S. 100). Für überschlägige Rechnungen kann angenommen werden, daß ein Kraftfahrzeug je 100 kg Nutzlast oder je beförderte Person 100 bis 200 WE auf einen km verbraucht.

Störungsfreiheit

Für jede Art des Motorbetriebes wird Zuverlässigkeit gefordert. Sie kann beeinträchtigt werden, wenn der Kraftstoff durch sein Verhalten im Motor oder Behältern und Leitungen Störungen hervorruft, die sich auf die Kraftstoff-

förderung auswirken, Ablagerungen im Motor verursachen oder Angriffe auf die Werkstoffe ausüben.

Die Ursachen für solche Störungen können in Verunreinigungen des Kraftstoffes liegen, die meist unsichtbar sind und erst dann als solche erkannt werden, wenn eine Störung bereits aufgetreten ist. Sie können aber auch durch falsche Handhabung des Kraftstoffes verursacht werden. Die hochentwickelten Herstellungs- und Reinigungsverfahren der Kraftstoffindustrie und die scharfen zugehörigen Prüfungen sichern heute den Kraftstoffverbraucher vor vielen Störungen, die vor etwa zwei Jahrzehnten noch zu den unvermeidlichen Selbstverständlichkeiten zählten.

Über die Störungsfreiheit eines Kraftstoffes kann sein Aussehen nur wenig Aufschluß geben. Kraftstoffe sollen klar sein. Trübungen deuten auf Entmischungen, manchmal auch auf Ausfällungen hin und sind daher störungsverdächtig.

Die Farbe des Kraftstoffes vermag über seine Reinheit gar nichts auszusagen. Vielfach ist sie gar nicht genau feststellbar, weil Markenkraftstoffe für Otto-Motoren zur Kennzeichnung absichtlich gefärbt werden. Bleibenzine sind stets gefärbt, bleihaltige Flugbenzine meist blau, Fahrbenzine rot.

Auch der Geruch der Kraftstoffe vermag keinen Anhalt für die Beurteilung der Störungsfreiheit zu geben, es sei denn, der Kraftstoff ist so mangelhaft gereinigt, daß er den unangenehmen Geruch gewisser angreifender Schwefelverbindungen erkennen läßt.

Störungen der Kraftstoffförderung

Kraftstoffe, die durch Schmutz und Fremdkörper verunreinigt sind, verursachen Verstopfungen in Leitungen, hier insbesondere an den Krümmungen, an Filtern und in den Düsen. Die sorgfältige und oftmalige Filterung des Kraftstoffes auf seinem Weg vom Hersteller zum Verbraucher schließt solche Störungen immer mehr aus. Meist ist Unachtsamkeit oder Ungeschicklichkeit bei der Handhabung der Kraftstoffe (Offenlassen der Tank- oder Faßverschraubung, Staub beim Tanken) die Ursache für das Auftreten von Schmutz. Alkoholkraftstoffe besitzen überdies die Eigenart, von früher her vorhandenen Schmutz von den Behälterwandungen abzulösen und dadurch Eigenverschmutzung vorzutauschen. In Dieselmotoren hält sich Schmutz länger schwebend als in Otto-Motoren, so daß eine längere Absetzzeit für jene zweckmäßig ist.

Schmutzfreie Kraftstoffe können beim Lagern in frischverzinkten oder verbleiten Behältern feinkörnige oder gallertartige Rückstände bilden, die sich durch Reaktion des Kraftstoffes mit dem Überzug des Behälters bilden. Bei solchen Behältern tritt diese Erscheinung nur einmal auf, weil sich gleichzeitig selbsttätig eine Schutzschicht bildet, die weitere Reaktionen hintanhält.

Verstopfungen können auch durch Einwirkung von Kälte auf den Kraftstoff hervorgerufen werden. So ist es möglich, daß ungenügend kältefestes Benzol in Form von Benzoleiskristallen gefriert (Reinbenzol bereits bei $+ 4^{\circ}$, Motorenbenzol unter -15°) oder daß sich aus ungenügend gereinigtem Diesel-Kraftstoff Paraffin ausscheidet und die Leitungen zusetzt.

Diesel-Kraftstoffe können in der Kälte sehr zähflüssig werden und sind dann nur mit hohem Pumpendruck zu fördern und durch die feinen Bohrungen der Düsen zu drücken. Gleichzeitig wird der Durchgang durch die feinen Poren der Filter erschwert, die zum Schutz der Pumpe vorgeschaltet sind. Es ist daher von guten Diesel-Kraftstoffen geringes Absinken der Zähflüssigkeit und ausreichende Filtrierfähigkeit bei Kälte zu fordern. Umgekehrt können besonders leichtflüssige Kraftstoffe die Förderung der Pumpe verschlechtern und zu Leckverlusten an Pumpe und Düse führen. (Prüfung auf Filtrierbarkeit S. 148).

Schließlich können beim Lagern von Diesel-Kraftstoffen Ausfällungen zustandekommen, die die Kraftstoffförderung behindern. Sie treten allerdings meist dann auf, wenn Diesel-Kraftstoffe mit verschiedenem chemischen Aufbau gemischt werden, z. B. (paraffinisches) Gasöl aus Erdöl mit (asphaltisch-aromatischem) Steinkohlenteeröl. Ermittlung des „Fällungswertes“ S. 149.

Eine eigenartige Störung der Kraftstoffförderung kommt durch die „Dampfblasenbildung“ mancher Otto-Kraftstoffe zustande. Sie tritt bei sehr leichtflüchtigen Otto-Kraftstoffen, die hohen Dampfdruck (vgl. S. 89) besitzen, auf, wenn diese erwärmt werden. Solche Kraftstoffe bilden dann Dampfblasen in der Leitung, die das Fließen des Kraftstoffes hemmen. Oder der Kraftstoff verdampft bereits im Schwimmergehäuse des Vergasers, so daß die Düse nicht Kraftstoff, sondern Kraftstoffdampf liefert. Durch diese Dampfblasenstörung wird die Kraftstoffzufuhr zum Motor gemindert oder unterbrochen, so daß der Motor wegen Kraftstoffmangels stehen bleibt. Nach einiger Zeit des Stillstandes, wenn Motor und Kraftstoff sich abgekühlt haben, verschwindet die Störung von selbst. Sie kann auch unmittelbar nach dem Stillsetzen des Motors auftreten, weil der Kraftstofffluß aufhört und der stehende Kraftstoff von der strahlenden Wärme des Motors aufgeheizt wird. In diesem Falle wird der Start des warmen Motors erschwert oder unmöglich sein.

Da höhere Temperaturen die Verdampfung des Kraftstoffes beschleunigen, tritt die Dampfblasenstörung vorwiegend im Sommer auf, hier besonders an heißen Tagen bei anhaltender Fahrt mit vollbelastetem Motor (Steigung) und im Hochgebirge, weil in größeren Höhen alle Stoffe bei niedrigeren Temperaturen sieden. In vielen Fällen wird sie durch ungünstige Führung der Kraftstoffleitungen, die der strahlenden Wärme des

Motors ausgesetzt sind, hervorgerufen. Jedes Wagenmuster hat dementsprechend seine „Blockierungstemperatur“, bei der Dampfblasenbildung auftritt. Sie liegt bei alkoholhaltigem Benzin niedriger, bei Benzol-Gemischen höher als beim unvermischtem Benzin (vgl. hierzu auch die „Abreißtemperatur“, S. 143). Man kann durch folgende Maßnahmen die Dampfblasenbildung verringern und hintanhalten:

1. Jede Vorwärmung und Heizung abschalten.
2. Isolierenden Flansch zwischen Saugrohr und Vergaser einbauen.
3. Kraftstoffführende Teile vom Motor und Auspuff fernhalten.
4. Kraftstoffleitungen möglichst stetig steigend oder fallend verlegen.
5. Ungünstig angeordnete Kraftstoffpumpen und Leitungen gegen die strahlende Wärme des Motors, insbesondere des Auspuffrohres, abschirmen (elektrisch angetriebene Kraftstoffpumpen können außerhalb der Wärmestrahlung angeordnet werden).
6. Auspuffrohr mit Asbestschnur oder Aluminiumfolie isolieren und, wenn möglich, in großer Entfernung von Kraftstoffleitung und -tank verlegen.

Im Flugbetrieb tritt die Dampfblasenstörung in großen Höhen auf, da dort die Verdampfung des Kraftstoffes durch den geringeren Luftdruck begünstigt wird. Daher bestimmt der Dampfdruck des Flugkraftstoffes die Höhe, die das Flugzeug ohne Gefahr der Dampfblasenbildung erreichen kann. Flugkraftstoffe weisen aus diesem Grunde geringeren Dampfdruck auf als Autokraftstoffe (vgl. Tafel 24, S. 143). Die Dampfblasenbildung wird auch hier durch hohe Temperaturen, also z. B. bei Flügen in den Tropen, begünstigt.

Ablagerungen im Motor

Otto-Kraftstoffe können Anteile enthalten, die sich während des Ansaugens am Einlaßventil festsetzen und dort bei den vorhandenen Temperaturen mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft harz-, lack- oder pechartige Ablagerungen bilden. Diese Erscheinung wird als Ventilverpichtung oder Harzbildung bezeichnet. Sie kann bei Kraftstoffen mit größeren Anteilen an solchen Verbindungen zu Ablagerungen von solchem Ausmaß führen, daß das Ventil nicht mehr richtig zu schließen vermag (Bild 53) oder der Ansaugquerschnitt eingeschnürt wird (Bild 54). Im ersteren Falle kann es zum Zurückschlagen der Flamme in das Saugrohr und den Vergaser und zu Vergaserbränden kommen. Kraftstoffe mit ungesättigten Verbindungen (Olefinen, Diolefinen), so manche Krackbenzine und Braunkohlenschwelbenzine, neigen besonders zu Verpichtungen. Prüfung auf Verpichtungsneigung S. 150.

Durch sorgfältige Reinigung sind Markenkraftstoffe praktisch verpichtungsfrei, doch kann sich nach längerer Lagerung des Kraftstoffes Verpichtungsneigung einstellen (S. 112). Verpichtungsähnliche Ablagerungen können bei einwandfreien Kraftstoffen durch übermäßigen Zusatz von Obenschmieröl hervorgerufen werden.

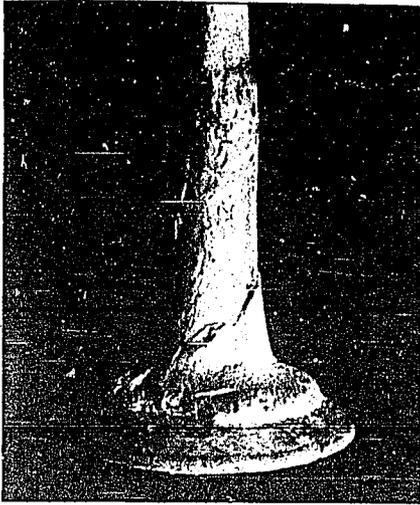


Bild 33. Ventilverpichtung

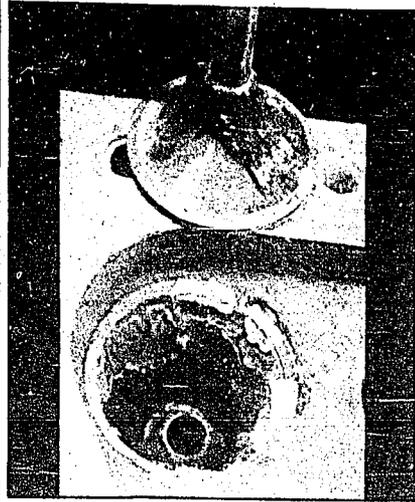


Bild 54. Verpichtung an Ventil und Ansaugkanal

Diesel-Kraftstoffe können bei örtlichem Luftmangel im Verbrennungsraum koksartige Ablagerungen an der Einspritzdüse hervorrufen (Bild 35). Die Neigung hierzu ist bei Kraftstoffen, die schwersiedende Anteile oder Asphalt aufweisen, besonders stark und kann zu Störungen der Kraftstoffeinspritzung und -zerstäubung führen. Prüfung auf Verkokungsneigung S. 151).

Düsenverkokung braucht nicht vom Kraftstoff herzurühren. Sie kann auch in ungenügender Kühlung der Einspritzdüse, Undichtheiten an der Düsenadel (Tropfen der Düse) oder ungenügender Zerstäubung des Kraftstoffes ihre Ursache haben.

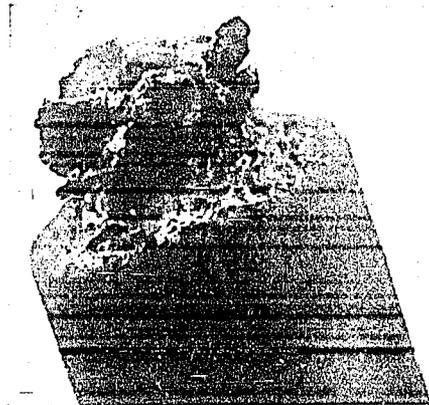


Bild 35.
Verkokte Einspritzdüse eines
Dieselmotors

Angriffe auf die Motorwerkstoffe

Kraftstoffe können äußerlich nicht erkennbare Verunreinigungen enthalten, die die kraftstoffführenden oder, nach der Verbrennung, die abgasführenden Teile des Motors angreifen. Auch können bei einzelnen Kraftstoffen bei der Verbrennung Rückstände entstehen, die den Motor stärker abnutzen. Es ist für den Verbraucher wichtig, daß die von ihm verwendeten Kraftstoffe derartig schädlich wirkende Anteile gar nicht oder nur in harmlosen Spuren enthalten. Diese Forderung zwingt den Kraftstoffhersteller, je nach Ausgangsstoff und Verfahren, Arbeit und Kosten an eine gründliche Raffination (S. 42) der Kraftstoffe zu wenden, die überdies Kraftstoffverluste mit sich bringt. Er fordert daher seinerseits eine vernünftige Begrenzung der Anforderungen, die der Verbraucher an die Reinheit des Kraftstoffes stellt.

Angriffe des Kraftstoffes

Angreifend wirken Kraftstoffe, die elementaren Schwefel und einzelne seiner Verbindungen, Säuren, Laugen und — unter gewissen Bedingungen — Wasser enthalten.

Der Schwefelgehalt des Kraftstoffes gibt keinen Aufschluß über die Gefährdung. Schwefelverbindungen sind im allgemeinen ungefährlich. Störungen werden hauptsächlich durch „aktiven“, d. h. reaktionsfähigen Schwefel, verursacht. Dieser kann schon in Spuren stark angreifend wirken, insbesondere Kupfer gegenüber. Er bildet dann mit diesem leicht abblätteres Schwefelkupfer, das immer wieder neue Angriffstellen freilegt und sich als schwarze schlammige Ablagerung im Schwimmergehäuse des Vergasers und an den Kraftstofffiltern vorfindet. Mancher unerwartet eingetretene Bruch in der Kraftstoffleitung hatte früher darin seine Ursache. Heute wird Kupfer als Werkstoff kaum mehr angewandt, so daß der aktive Schwefel nicht mehr die gleiche Gefahr bedeutet wie früher. Wie weit er den verschiedenen Leichtmetallen und anderen Baustoffen gefährlich werden kann, ist nicht restlos geklärt, weil sich dafür bisher kaum Gesetzmäßigkeiten erkennen lassen. Die sorgfältige Reinigung, der insbesondere Otto-Kraftstoffe unterworfen sind, schließt jedoch praktisch eine Gefährdung aus. Bemerkenswert ist noch, daß Kraftstoffe mit hohem Schwefelgehalt die Elektroden der Zündkerzen angreifen, so daß sie blumenkohlartige aufgedunsene Form annehmen und sogar aufgesprengt werden können, wodurch die Kerze unbrauchbar wird. Prüfung auf Korrosion durch Schwefel S. 152.

Kraftstoffe sollen frei von Säuren oder Laugen sein. Säuren verursachen bereits in Spuren Angriffe auf Metall. Sie können entweder von ungenügender Reinigung her im Kraftstoff verblieben sein oder in Kraftstoffen, deren Lagerbeständigkeit (S. 112) gering ist, sich während der Lagerung bilden. Prüfung auf Säuregehalt S. 152. Laugenreste können von Waschvorgängen bei der Reinigung des Kraftstoffes herrühren.

Wenn Wasserspuren, die im Kraftstoff gelöst waren, bei Abkühlung ausgeschieden werden, können sie mit Eisen Rost und mit einigen Leichtmetallen Gallerten bilden. Besonders starke Angriffe ergeben bei Anwesenheit von Wasser bleihaltige Kraftstoffe an magnesiumhaltigen Legierungen, z. B. Elektronmetall. Im Flugbetrieb werden Tanks aus solchen Werkstoffen durch korrosionshindernde wasserbindende Patronen geschützt. Diesel-Kraftstoffe verursachen ebenfalls stärkere Angriffe, wenn Wasser zugegen ist.

Gegen die Kraftstoffangriffe schützt man die Baustoffe durch Überzüge. Behälter für Otto-Kraftstoffe werden meist aus verzinktem oder verbleitem Eisenblech hergestellt. Neuerdings werden auch Überzüge mit Kunstharzlacken angewandt. Diese werden bei 100 bis 200° C eingebrannt und schützen selbst vor Alkoholkraftstoffen, die gewöhnliche Lacke auflösen. Wichtig ist bei den Lacküberzügen die richtige Dicke der Lackschicht, damit vor allem das Abspringen zu dick aufgetragenen Lackes vermieden wird.

Diesel-Öle werden meist in Behältern aus ungeschütztem Stahlblech aufbewahrt. Es wurden aber auch bereits lufttrocknende Lacke entwickelt, die sich selbst gegenüber stark angreifenden Diesel-Ölen bewähren. Dagegen sind sie gegenüber den Beanspruchungen bei der üblichen Art der Fabreinigung mit Ketten nicht widerstandsfähig genug.

Erhöhte Abnutzung des Motors kann eintreten, wenn der Otto-Kraftstoff schwersiedende Anteile aufweist, die unverbrannt bleiben. So sind z. B. im Otto-Motor die schwerflüchtigen Anteile des Benzins (im Siedebereich etwa von 200° C aufwärts) und erst recht Schwerbenzin, Petroleum und Gasöl nicht restlos zu verbrennen. Es bleiben, besonders bei niedrig verdichtenden Otto-Motoren, Teile des Kraftstoffes unverbrannt, treten in das Schmieröl über und setzen dessen Schmierfähigkeit herab.

Die Neigung eines Kraftstoffes zur Schmierölverdünnung kann an Hand der Siedekurve (S. 139) beurteilt werden.

Die Schmierölverdünnung beträgt bei richtig behandeltem Motor nach einer Laufzeit von 2000 km und mehr 3 bis 5%, höchstens etwa 10% Kraftstoffanteile im Schmieröl. 3 bis 5% sind unbedenklich. Ausschlaggebend für die Schmierölverdünnung ist bei neuzeitlichen Motoren nicht so sehr der Kraftstoff, denn Vorwärmung, Temperaturregler, Kühlerjalousie usw. halten den Motor so warm, daß übertretende Kraftstoffanteile meist zum Verdampfen kommen. Weitaus mehr wird die Ölverdünnung durch falsche Betätigung der Startervorrichtung, falsche Vergasereinstellung und undichte Kolben hervorgerufen, ferner durch Fahren mit zu kühlem Motor. Die Kühlwassertemperatur soll 80 bis 95° C betragen. Sie sollte viel mehr auf ihren Tiefstand, statt, wie üblich, auf ihren Höchststand hin überprüft werden.

Beim Diesel-Motor ist wegen der höheren Temperaturen im Motor Schmierölverdünnung nicht zu erwarten. Im Gegenteil tritt bei manchen Motor-

mustern eine Schmierölverdickung ein, die darauf zurückzuführen ist, daß niedriger siedende Anteile des Schmieröls bei den hohen Temperaturen der Diesel-Verbrennung herausgebrannt werden und das Öl Ruß aufnimmt.

Angriffe der Auspuffgase

Motoren, die mit Bleibenzinen von höherem TEL-Gehalt betrieben werden, zeigen u. a. eigenartige Angrifferscheinungen. So können sich nach längerem Betrieb Angriffe an den Auslaßventilen, deren Sitzen und im Auspuffsammler bemerkbar machen. Diese „Heißkorrosion“ kann durch bestimmte Ventilstähle, bei luftgekühlten Hochleistungsmotoren auch durch Einbau von Ventilsitzen mit Stellitauflage, bekämpft werden.

Ebenso können mitunter nach längerer Betriebsruhe Anfressungen an den Zündkerzen, Auspuffventilen und an der Zylinderwand auftreten. Diese „Kaltkorrosion“ rührt her von der Verbrennung des Äthylendibromids bzw. -chlorids zu Bromwasserstoff bzw. Salzsäure, wenn diese starken Säuren, die sonst als Bromid bzw. Chlorid gebunden sind, im Überschuß als solche zurückbleiben. Bemerkenswert ist jedoch, daß die Kaltkorrosion nicht regelmäßig auftritt und an manchen Motoren überhaupt nicht zu beobachten ist. Sie kann durch Einspritzen von Korrosionsschutzölen hintangehalten werden. Bei verbleiten Autobenzinen tritt wegen des niedrigen TEL-Gehaltes weder Heiß- noch Kaltkorrosion in Erscheinung.

Die Auspuffgase schwefelhaltiger Kraftstoffe können Anfressungen hervorrufen, wenn z. B. Wasser, das sich aus den Auspuffgasen durch Abkühlung ausgeschieden hat, zugegen ist. Diese Störung hat praktisch nur bei Diesel-Motoren Bedeutung, bei denen diese Voraussetzung gegeben ist. Ähnliche Bedingungen liegen vorübergehend beim Kaltstart von Otto-Motoren vor (S. 92).

Beständigkeit

Lagerbeständigkeit

Manche Otto-Kraftstoffe können bei längerer Lagerung Veränderungen erleiden, die einzelne Kraftstoffeigenschaften ins Ungünstige wandeln. Es kann insbesondere Verringerung der Klopfestigkeit und größere Verpichungsneigung beobachtet werden. Letztere ist verhältnismäßig leicht festzustellen (S. 150) und gibt gleichzeitig einen Anhalt für die Lagerbeständigkeit des Kraftstoffes.

Die Veränderungen treten besonders stark auf bei Kraftstoffen, die ungesättigte Verbindungen (Olefine) enthalten, z. B. Krackbenzine, und werden durch Licht und die Anwesenheit von Metallen begünstigt. Ursache sind Reaktionen ungesättigter Verbindungen im Kraftstoff, wobei die Anregung

durch den Sauerstoff der Luft eine wichtige Rolle spielt. Diese Vorgänge treten jedoch nicht sofort nach Einlagerung des harzfreien Kraftstoffes auf, sondern erst nach einer, jedem Kraftstoff eigenen „Induktionszeit“.

Bei Diesel-Kraftstoffen sind solche Veränderungen praktisch ohne Bedeutung. Auf die bei der Lagerung von Mischungen auftretenden Ausfällungen wurde bereits S. 107 hingewiesen.

Man hat Stoffe ermittelt, die die Lagerbeständigkeit steigern, indem sie die durch den Sauerstoff der Luft angeregten Reaktionsketten abfangen, so daß die zur Verharzung führende Reaktion unterbunden wird. Solche Stoffe, die die Induktionszeit verlängern, bezeichnet man als Hemmstoffe (Inhibitoren oder Stabilisatoren). Ein bekannter Hemmstoff ist z. B. Stabisol (20%ige Lösung von Monobenzyl-para-amidophenol).

Kältebeständigkeit

Gegen Abkühlung durch niedrige Außentemperaturen sind unvermisches Benzin, Äthanol und wasserfreie Mischungen aus diesen praktisch unempfindlich. Motorenbenzol dagegen beginnt bei -15°C Benzolkristalle auszuscheiden, die erst bei $+4^{\circ}\text{C}$ wieder schmelzen. Da Motorenbenzol jedoch nur in Mischung mit Benzin verwendet wird, ist diese Erscheinung im allgemeinen ohne praktische Bedeutung.

Wenn der Kraftstoff Wasser gelöst hat, kann jedoch eine Verringerung der Kältebeständigkeit eintreten. Unvermisches Benzin und Benzol vermögen Wasser nur in Spuren zu lösen, Benzol etwa zehnmal so viel wie Benzin. Bei Abkühlung scheidet sich das Wasser ab, so daß dadurch Störungen in Leitungen und Düsen auftreten können. Diese Schwierigkeit tritt bei alkoholhaltigen Kraftstoffen nicht auf. Sie vermögen größere Mengen Wasser zu lösen. Bei einem bestimmten Wassergehalt jedoch beginnt der alkoholhaltige Kraftstoff sich dauernd zu trüben (Trübungspunkt) und damit setzt die Entmischung ein. Es genügt dann ein geringer weiterer Wasserzusatz, um eine Trennung in Schichten, unten wässriger Alkohol, oben Benzin, zu bewirken. Wenn diese Entmischung unerkannt im Tank stattgefunden hat, sind Start und Betrieb des Fahrzeuges auf eine für den Fahrer unerklärliche Weise behindert. Prüfung auf Entmischungsneigung S. 153.

Alkoholkraftstoffe folgen bezüglich des Wasserlösungsvermögens folgenden besonderen Regeln:

1. Das Vermögen, Wasser zu lösen, wächst mit dem Alkoholgehalt. Daher verringert Benzinzusatz zu Alkoholgemischen das Wasserlösungsvermögen des Gemisches. Bild 56 zeigt für verschiedene Alkoholgemische und für die Temperatur von 15°C , wieviel Wasser sie ohne Trübung zu lösen vermögen. So ist z. B. für ein Gemisch aus

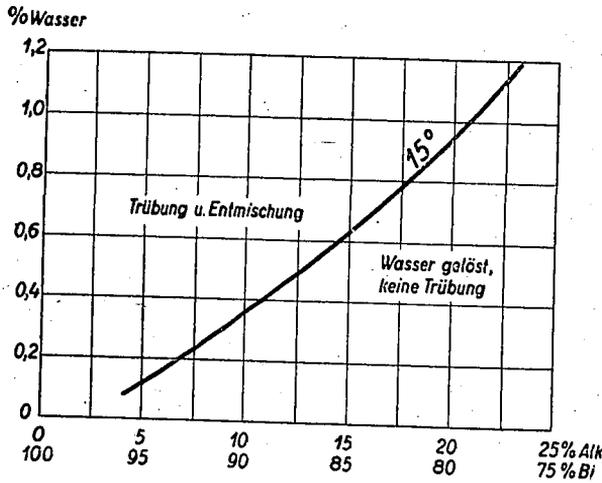


Bild 36.

Wasserlösungsvermögen von Benzin-Alkohol-Gemischen bei 15° C

- 90 Raumteilen Benzin und 10 Raumteilen Alkohol bei einem Zusatz von etwa 0,55 % Wasser, d. h. von 3,5 cm³ je l die Trübungsgrenze erreicht. Alle höheren Wasserzusätze liegen für diese Mischung im Gebiet „Trübung und Entmischung“.
- Bei gleichem Alkoholgehalt lösen Benzin-Benzol-Alkohol-Gemische mehr Wasser als Benzin-Alkohol-Gemische, d. h., Benzol wirkt als Lösungsvermittler.
- Je höher die Temperatur des Alkoholkraftstoffes ist, um so mehr Wasser kann er aufnehmen.
- Ölzusatz zu Alkoholgemisch verringert das Wasserlösevermögen.

Störungen, die durch Kälteeinwirkung auf Dieselkraftstoffe entstehen, sind S. 107 behandelt.

Lichtbeständigkeit

Licht vermag bei längerer Einwirkung Kraftstoffe äußerlich zu verändern. Benzine, vor allem Krackbenzine, und Benzole, nehmen gelbliche Färbung an und geben mitunter harzartige Abscheidungen. Kraftstoffe, die Bleitetraäthyl oder Eisenkarbonyl enthalten, zeigen Ausflockungen, die sich ablagern und von der Zersetzung dieser Klopfbremsen durch das Licht herrühren. Proben solcher Kraftstoffe müssen deswegen in dunklen Flaschen oder Blechkannen aufbewahrt werden.

Diese Erscheinung ist für die Verwendung der Kraftstoffe belanglos, weil Kraftstoffe stets in dunklen Behältern aufbewahrt werden. Es ist auch nicht möglich, aus einer eingetretenen Verfärbung Schlußfolgerungen auf die Güte des Kraftstoffes zu ziehen.

Kraftfahrzeugbetrieb mit Gas

Speichergase (Flüssig- und Hochdruckgase)

Zu den Speichergasen zählen die Flüssiggase (vgl. S. 56), Motoremethan, Klärgas und Stadtgas. Der Betrieb eines Kraftfahrzeuges mit Speichergasen erfordert folgende Einrichtungen:

1. Gasflaschen oder -behälter.
 2. Druckregler.
 3. Dosierungs- und Mischgerät.
- Die Anordnung der Einrichtungen für den Betrieb mit Flüssiggas (Bild 57) und für Hochdruckgase (Bild 38)

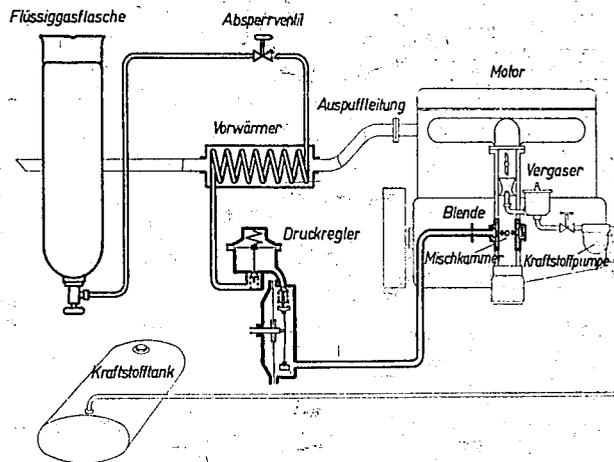


Bild 57.
Betrieb mit Flüssiggas

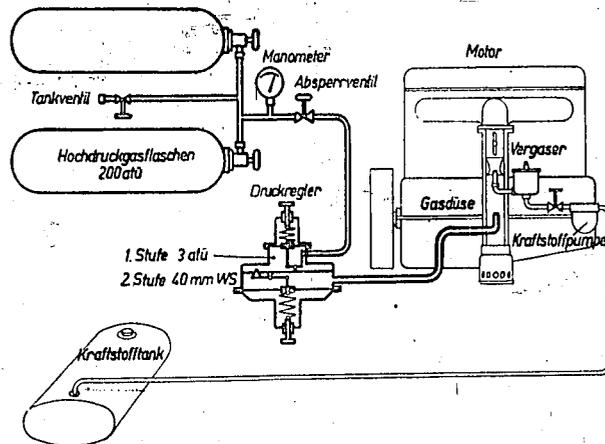


Bild 38.
Betrieb mit Hochdruckgas

ist die gleiche. Das Gas wird aus der Flasche über ein Absperrventil einem ein- oder zweistufigen Druckregler der Entspannung zugeführt und strömt dann über eine Dosierungsblende zur Mischvorrichtung, wo es mit der Verbrennungsluft gemischt und dem Ansaugrohr des Motors zugeleitet wird. Die Anordnung ist so getroffen, daß die Einrichtungen für den Betrieb des Motors mit flüssigem Kraftstoff erhalten bleiben und somit die vorgeschriebene Umschaltung auf diesen jederzeit möglich ist.

Für die Mitnahme der Speichergase werden Leichtstahl-Flaschen in verschiedenen Abmessungen verwendet. Eine Zusammenstellung über die am häufigsten verwendeten Flüssiggas-Flaschen gibt Tafel 17. Die 33 kg-Flasche überwiegt der Zahl nach weitaus (am 1. 2. 1940 umfaßte sie 85 v. H. aller Flaschen) und wird nunmehr ausschließlich hergestellt.

Tafel 17. Flaschen für Flüssiggase

	22 kg-Flasche (z.B. Deurag)	33 kg-Flasche (z. B. Leuna)	46 kg-Flasche (z.B. BV)
Flaschenrauminhalt	1	~ 60	79
Eigengewicht	kg	50	59
Füllgewicht	kg	22	55
Wärmeinhalt	WE	241 000	362 000
Wärmeinhalt entspricht			505 000
Benzin (7800 WE/l)	l	31	46,5
Wärmeinhalt je kg Flaschen-			64,8
gewicht	WE/kg	8000	9 500
Transportgewicht	kg	52	72
Transportgewicht für			99
1000 WE	kg/1000 WE	0,216	0,198
			0,195

Am Fahrzeug werden die Flaschen sowohl liegend als auch hängend (mit dem Ventil nach unten) eingebaut.

Flüssiggase werden den Flaschen nur in flüssigem Zustand entnommen. Dadurch wird vermieden, daß sich die Flasche durch die Verdampfungskälte allmählich abkühlt und die Gasabgabe schließlich aufhört. Ferner wird dadurch eine Verdampfung hintangehalten, die zuerst propanreiches, am Ende der Entleerung butanreiches Gas liefern würde, was wegen des Unterschiedes im Luftbedarf Unzuträglichkeiten verursachen würde. Um eine vollständige Entleerung der Flasche in waagerechter oder senkrechter Stellung zu erreichen, ist ein Tauchrohr mit Kugelventil in die Flasche eingebaut. Sie besitzt außerdem eine eingelötete Überdrucksicherung, die z. B. bei Bränden anspricht und die Flasche vor dem Zerplatzen schützt.

Das Gas strömt über ein Absperrventil, das sich im Griffbereich des Fahrers befindet, zum Druckregler. Diesem ist beim Flüssiggasbetrieb ein Vorwärmer vorgeschaltet, der meist durch Auspuffgase beheizt wird. Die an das flüssige Gas abgegebenen Wärmemengen müssen ausreichen, um die Abkühlung durch die im Regler einsetzende Verdampfung auszugleichen.

Das Gas wird in der Regel vom Flaschendruck auf geringen Unterdruck entspannt, so daß der Motor den jeweiligen Gasbedarf ansaugen muß. Die Entspannung geschieht in ein- oder zweistufigen Druckreglern. Das Schema eines einstufigen Reglers für Flüssiggas zeigt Bild 59, links. Der Unterdruck betätigt eine Membrane, durch die über ein Zwischengestänge der Gaszutritt freigegeben wird.

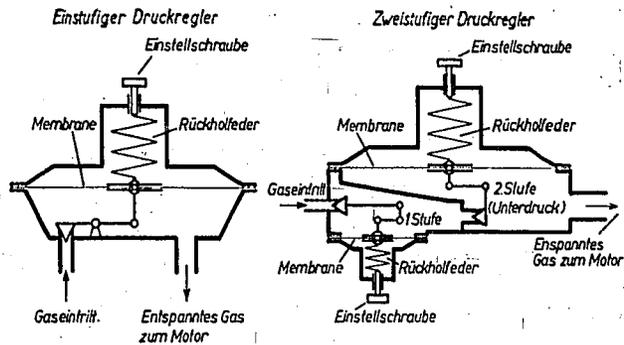


Bild 59.
Druckregler

Die zweistufige Ausführung eines Druckreglers, wie er für Hochdruckgas verwendet wird, zeigt Bild 59, rechts. Hierbei wird z. B. das Gas über eine membran gesteuerte Hochdruckeinlaßdüse in der ersten Stufe von 200 auf 5 at entspannt. Die zweite Stufe entspannt dann von 5 at auf einen geringen Unterdruck (etwa 40 mm Wassersäule).

Für Flüssiggasbetrieb ist jetzt der in den Leuna-Werken entwickelte LS-Regler ausschließlich vorgesehen. Es ist dadurch möglich, die Flüssiggas-Anlagen zu vereinheitlichen und als sogenannte „Baukasten“ zu erzeugen, wodurch Preis und Einbauzeit wesentlich herabgesetzt wurden.

Das Gas-Luft-Gemisch wird entweder in einer Mischvorrichtung gebildet, die vor den Vergaser geschaltet ist oder es wird unmittelbar im Zerstäubungsraum des Vergasers gemischt. Das Gas wird dabei über eine Gasblende angesaugt.

Speichergase besitzen gegenüber flüssigen Kraftstoffen folgende Vorteile:

1. Vollkommene Gemischbildung.
2. Leichtes Anspringen des Motors auch bei tiefen Außentemperaturen, weil ein zuverlässig zündfähiges Gas-Luft-Gemisch von Anfang an zur Verfügung steht; dadurch auch Schonung der Batterie.
5. Saubere Verbrennung.
4. Wegfall von Kraftstoffniederschlägen in Saugrohr und Zylinder, daher keine Kraftstoffverluste und Vermeidung der Schmierölverdünnung; dadurch Verringerung des Schmierölverbrauches und der Instandhaltungskosten.
5. Hohe Klopfestigkeit (S. 159), daher weicher Lauf der Motoren. Sie würde eine Leistungsverbesserung durch höhere Verdichtung der Motoren unschwer ermöglichen, doch steht dem zur Zeit die Vorschrift entgegen, wonach speichergasgetriebene Motoren jederzeit zum Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen bereit sein müssen.
6. Günstiger Verbrauch. Er stellt sich, auf den Heizwert bezogen, günstiger als der Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen, vor allem deswegen, weil ärmere Gemische anwendbar sind und eine bessere Mischung zwischen Kraftstoff und Luft besteht. Hierfür geben nachstehende Zahlen einen Anhalt:
1 kg Treibgas ersetzt dem Heizwert nach $\sim 1,4$ l Benzin, praktisch 1,6 l Benzin.
1 cbm gereinigtes Klärgas ersetzt dem Heizwert nach ~ 1 l Benzin, praktisch 1,25 l Benzin.
1 cbm Leuchtgas ersetzt dem Heizwert nach $\sim 0,5$ l Benzin, praktisch 0,55 bis 0,46 l Benzin.

Speichergasbetriebene Fahrzeuge genießen überdies eine Ermäßigung der Kraftfahrzeugsteuer, die je nach dem Baujahr des Fahrzeuges 50 bis 74 % betragen kann. Diesen Vorzügen des Speichergasbetriebes steht gegenüber eine gewisse Minderung der Ladefähigkeit um das Gewicht der mitgeführten Gasflaschen. Sie ist unterschiedlich je nach dem gewählten Speichergas. Für die gleiche Menge an WE ist bei Flüssiggas etwa das Doppelte, bei Hochdruckgas etwa das 16- bis 19fache Transportgewicht gegenüber Benzin zu befördern.

Das Tanken der Flüssiggase geschieht im allgemeinen durch Auswechseln der Flaschen, doch wurden auch Flüssiggas-Tankanlagen entwickelt. Für den Betrieb mit Hochdruckgasen wäre bei dem verhältnismäßig geringen Energieinhalt der einzelnen Flaschen ein häufiges Wechseln und ein entsprechend großer Flaschenbestand erforderlich. Um dies zu vermeiden, werden die Flaschen für Hochdruckgas meist am Wagen fest eingebaut und durch eine Fülleitung miteinander verbunden (Bild 38). Die Befüllung geschieht von einer Verdichteranlage aus.

Die Messung der verbrauchten Gasmengen ist bei Flüssiggasen und Hochdruckgasen verschieden. Für die Flüssiggase ist nicht der Druck in der Flasche ein Maß für ihren Inhalt, sondern ihr Gewicht, das in üblicher Weise aus dem Gesamtgewicht der Flasche durch Abzug des Eigengewichtes ermittelt werden kann. Bei Hochdruckgasen bestimmt sich der Inhalt der Flasche aus dem Druck.

Speichergas im Diesel-Motor

Speichergase sind im Diesel-Motor nicht unmittelbar verwendbar, weil die Kraftstoff-Pumpe die Gase nicht zu fördern vermag. Außerdem bildet die hohe Klopfestigkeit der Speichergase ein Hindernis für die Verwendung im Diesel-Motor, weil sich mit ihr schlechte Zündwilligkeit verknüpft.

Ein Weg, einen Diesel-Motor auf den Betrieb mit Speichergas umzustellen, besteht darin, den Diesel-Motor durch Herabsetzung der Verdichtung und Anbau einer Zündeinrichtung in einen Otto-Motor zu verwandeln.

Einfacher und billiger ist es, den Diesel-Motor durch Anbauten so einzurichten, daß er Treibgas-Luft-Gemisch ansaugt. Dieses wird dann durch eingespritztes Gasöl gezündet. Da hierfür im allgemeinen nur die Gasölmenge erforderlich ist, die der Motor im Leerlauf verbraucht, wird eine beträchtliche Ersparnis an Diesel-Kraftstoff erreicht. Außerdem kann der Motor jederzeit auf üblichen Diesel-Kraftstoff umgestellt werden.

Eine Anordnung für die Umstellung eines Fahrzeug-Diesel-Motors auf Flüssiggas, die vom Technischen Prüfstand der I.G. Farbenindustrie, Ludwigshafen am Rhein, entwickelt wurde, zeigt Bild 40.

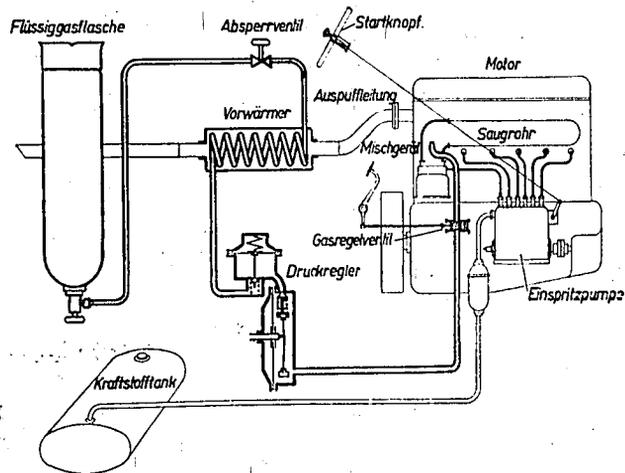


Bild 40.

Treibgaseinrichtung für einen Fahrzeugdiesel.

Das Treibgas wird in bekannter Weise und mit den vorhin beschriebenen Einrichtungen auf Unterdruck entspannt und über eine Gasdüse in das Ansaugrohr des Motors eingeführt. Die Gasmenge kann mittels des Beschleunigungspedals, das von der Kraftstoffpumpe abgeschaltet ist und auf ein Regelventil wirkt, verändert werden. Die Kraftstoffpumpe ist etwa auf Leerlaufmenge eingestellt, doch kann die Zündölmenge durch einen Starterknopf mit Seilzug vom Fahrer jederzeit erhöht werden. Im Leerlauf arbeitet der Motor nur mit Diesel-Kraftstoff.

Mit einem besonders zündwilligen Diesel-Kraftstoff konnte bei ungefähr gleichem Wärmeverbrauch auf der Autobahn ein Verbrauch von nur rund 15 bis 20% der sonst für reinen Diesel-Betrieb nötigen Menge an Diesel-Kraftstoff erzielt werden, d. h. rund 85 bis 80% des Diesel-Kraftstoffes konnten durch Flüssiggas ersetzt werden. Für Zweitakt-Diesel-Motoren wurde mit Erfolg versucht, unmittelbar in den Verbrennungsraum flüssiges Flüssiggas einzuspritzen, dem etwa 12% Schmieröl zugesetzt waren.

Generatorgas (Sauggas)

Die Anlagen für die Herstellung von Generatorgas aus Holz, Holzkohle, Steinkohlenschwelkoks oder Anthrazit (vgl. S. 37), werden auf dem Fahrzeug mitgeführt. Sie bestehen aus dem Gaserzeuger (Generator), dem Gasreiniger und der Mischvorrichtung für die Herstellung des Gas-Luftgemisches für den Motor (Bild 41). In dem Generator wird der feste Kraftstoff aufgeschüttet und

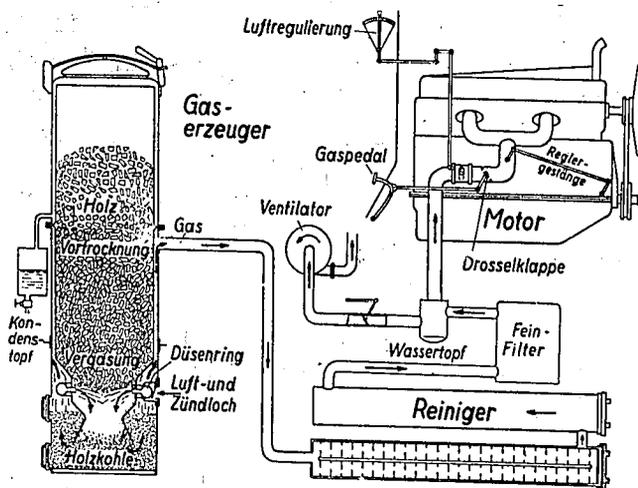


Bild 41.
Sauggas-Anlage
für Holz (absteigende Vergasung)

durch das Zündloch in Brand gesetzt. Bei der Verbrennung der Füllung besteht Luftmangel (Verschwelung). Das entstehende Gas enthält Kohlenoxyd und Wasserstoff, ferner geringe Mengen Methan (S. 36).

Die Art der Vergasung wird bestimmt durch die Teerbildung des Ausgangsstoffes. Teerbildende Heizstoffe wie Holz werden in „absteigender Vergasung“ verarbeitet (Bild 41). Die Umwandlung beginnt oben mit der Verkrackung und setzt sich nach unten fort, wobei mit der fortschreitenden Annäherung an die Feuerzone alle teerigen Anteile durch Verbrennen oder Kracken unschädlich gemacht werden. Für teerfreie Heizstoffe wie Schwelkoks und Holzkohle,

wird aufsteigende Vergasung angewandt. Bei dieser treten die Gase von der Feuerzone aus durch die darüber liegenden Schichten des Ausgangsstoffes und werden oben abgezogen. Die Feuerzone bildet sich stets bei der Lufteinführung aus. Beim Ingangsetzen der Anlage saugt ein Ventilator die Verbrennungsluft durch den Generator, im Betrieb saugt der Motor das Gas aus dem Generator ab. Das Gas wird in den umfangreichen Reinigern vom Staub und Asche befreit und zum Schluß stark gekühlt, damit die Füllung des Motors nicht verschlechtert wird. Ein Luftschieber an Stelle des Vergasers gibt Gas- und Luftquerschnitte, vom Gaspedal betätigt, in richtigem Verhältnis frei. Gründliche Reinigung der Gase (Entfernung von Teer und Flugasche), um Verpichtung und erhöhte Abnutzung zu vermeiden, ist Voraussetzung für störungsfreien Betrieb.

Die Vorteile des Generatorgasbetriebes liegen in der Möglichkeit, Abfallholz und andere billige Brennstoffe zu verwerten und dadurch mit einem äußerst geringen Energiepreis (S. 104) zu arbeiten.

Der Generatorgasbetrieb hat seine Brauchbarkeit in der Praxis erwiesen. Gegenüber dem Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen treten folgende Besonderheiten in Erscheinung:

1. Zusätzliches Gewicht und zusätzlicher Raumbedarf des Gaserzeugers, wodurch die Ladefähigkeit des Fahrzeuges herabgesetzt wird.
2. Geringere Motorleistung, die durch Verdichtungserhöhung wohl etwas ausgeglichen werden kann, weil das Gas sehr kloppfest ist. Mit einem Leistungsabfall von 20 bis 30% ist zu rechnen. Bei höherer Verdichtung sind stärkerer Anlasser und stärkere Batterie und Zündspule nötig.
3. Verringerte Startbereitschaft wegen des Anheizens.
4. Geringe Anpassungsfähigkeit der Gaserzeugung an die im Verkehr rasch wechselnden Anforderungen des Betriebes. Bei Betrieb von Schiffen und Schleppern fällt dies weniger ins Gewicht.
5. Vermehrte Wartungsarbeit wegen oftmaliger Reinigung der Anlage, insbesondere der Teerabscheider. Daher ist auf die Dauer zufriedenstellender Betrieb nur mit geschulten und zuverlässigen Leuten möglich.

Neue Generatorgasanlagen für Kraftfahrzeuge, die die oben angeführten Besonderheiten gegenüber dem Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen in möglichst geringem Maße zeigen, sind in Entwicklung und werden vor allem der Landwirtschaft künftig wertvolle Dienste leisten. Es ist ferner vorgesehen, Diesel-Lastkraftwagen und -Schlepper damit auszurüsten. Die Umstellung wird durch staatliche Beihilfen erleichtert, der Betrieb durch Steuerermäßigung begünstigt. Das Generatorgas tritt vollwertig neben die flüssigen Kraftstoffe und wird einen ansehnlichen Teil der künftigen Kraftstoffversorgung übernehmen.