

Die Verbrennung in der Dieselmashine*)

Von Prof. Dr.-Ing. KURT NEUMANN

Institut für Verbrennungs-Kraftmaschinen und Technische Wärmelehre
Technische Hochschule Hannover

Eingeop. 17. Juli 1936

Das Hauptkennzeichen der Verbrennung in der Dieselmashine besteht darin, daß flüssiger Brennstoff in hochverdichtete heiße Luft eingespritzt wird. Nach Eintritt der Selbstzündung des Brennstoffes verbrennt die Ladung unter Temperatur- und Drucksteigerung mit Arbeitsabgabe nach außen. Für die Maschinenleistung ist es von grundsätzlicher Bedeutung, auf welche Weise die Verbrennung abläuft, da hiervon der Druckverlauf im Arbeitszylinder

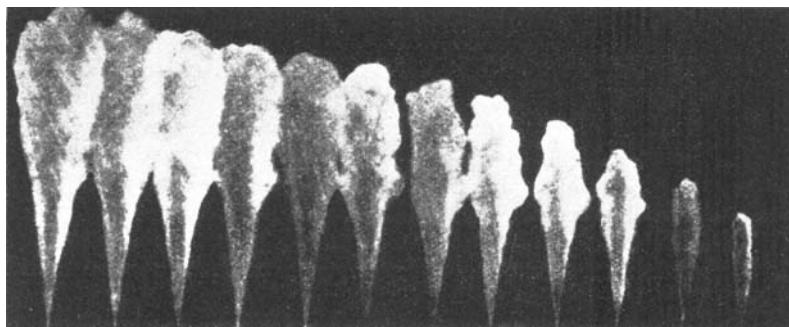


Abb. 1. Filmaufnahme eines Ölstrahles in verdichtetem Stickstoff nach Miller und Beardsley. Öldruck 560 atü; Gasdruck 21 atü.

abhängt, der den mittleren Kolbendruck p_i bestimmt. Dem Produkt aus mittlerem Kolbendruck und Drehzahl je Minute ist die entwickelte Leistung proportional.

Da die Drehzahl bei neuzeitlichen Motoren hoch liegt, so ist die Zeit eines Arbeitsspieles klein und beträgt oft nur wenige hundertstel Sekunden. Hieraus folgt, daß bei der motorischen Verbrennung nur kleine Verbrennungszeiten, d. h. hohe Verbrennungsgeschwindigkeiten brauchbar sind, zu denen aus konstruktiven Gründen noch die Forderung kleiner Verbrennungsräume kommt, die wegen der Kolbenbewegung zeitlich veränderlich sind.

Im Gegensatz zu den verwickelten Verhältnissen bei der motorischen Verbrennung spielen sich die Verbrennungsvorgänge in Feuerungen in wesentlich einfacherem Rahmen ab. Hier erfolgt der chemische Umsatz bei unveränderlichem Druck. Reaktionszeit und Raumfrage spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Der in den Brennraum der Maschine eingespritzte flüssige Brennstoff durchläuft bis zur Umwandlung in seine Verbrennungserzeugnisse CO_2 und H_2O eine Reihe von Zwischenstufen der Energie-Umsetzung, die zeitlich z. T. ineinander übergreifen.

Damit überhaupt Verbrennung eintreten kann, muß bei der Einspritzung des Brennstoffes in den Brennraum zunächst eine gute **Gemischbildung** zwischen Brennstoff und Luft stattfinden. Diese erfordert, daß der Brennstoff durch eine oder mehrere Düsenbohrungen strahlenförmig

*) Vorgetragen in der Fachgruppe für Brennstoff- und Mineralölchemie auf der 49. Hauptversammlung des VDCh. in München am 9. Juli 1936. Vgl. auch v. Philippovich, „Der Verbrennungsvorgang im Explosionsmotor“, diese Ztschr. 49, 625 [1936].

über den Verbrennungsraum verteilt und hierbei in feine Tröpfchen zerstäubt wird.

Die Strahlauflösung eines aus einer Düse ausgespritzten Gasölstrahles beginnt beim Austritt aus der Düse am Strahlrande und setzt sich längs der Strahlachse zur Mitte hin fort. Die Zerstäubung wird gemessen durch die Größe der Tropfendurchmesser, die von der Größenordnung $1/100$ mm sind. Die Tropfen sind keineswegs von gleicher Größe: Die Tropfendurchmesser wachsen vom Rande zur Mitte hin an. In der Strahlenmitte ist die Tropfenverteilung am dichtesten, am Rande am geringsten. Durch die Strahlauflösung wird die Oberfläche des eingespritzten Brennstoffes sehr stark vergrößert und bei richtiger Verteilung der Tropfen über den Brennraum die Gemischbildung außerordentlich gefördert. Die Tropfengröße wird um so kleiner, d. h. die Zerstäubung um so vollkommener, je höher die Luftpumpe im Zylinder und je größer die Einspritzgeschwindigkeit ist.

Um die Verbrennungsluft voll auszunutzen, müssen die einzelnen Brennstoftropfen auch in die von der Einspritzdüse am weitesten entfernten Teile des Brennraumes gelangen: die Durchschlagskraft des Brennstoffstrahles, bzw. seine Strahltiefe, muß derart gewählt werden, daß sie den Abmessungen des Brennraumes entspricht. Infolge ihrer größeren Masse fliegen die größten Tropfen am weitesten, während die kleineren Tropfen auf ihrer Bahn durch die verdichtete Luft stark abgebremst werden.

Eine gute Zerstäubung und eine genügend gleichmäßige Verteilung des Brennstoffnebels über den Brennraum der Maschine erreicht man bei der von Diesel geschaffenen

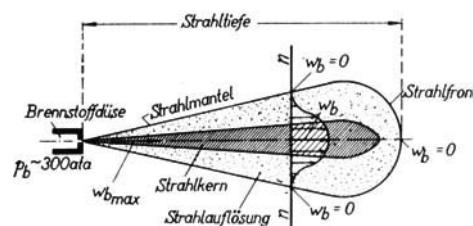


Abb. 2. Schematische Darstellung der Auflösung eines Brennstoffstrahles beim Einspritzen in verdichtete Luft.

klassischen Dieselmashine dadurch, daß der Brennstoff mit Hilfe von hochgespannter Druckluft, die in einem besonderen Luftverdichter auf etwa 60 atü komprimiert wird, in den Zylinder eingeblasen wird. Hierdurch wird gleichzeitig ein kräftiger Luftwirbel erzeugt, der die Verbrennung unterstützt.

Bei den kompressorlosen Maschinen fällt die Einblaseluft weg. Ihre Wirkung muß durch andere Maßnahmen ersetzt werden. Hier sind folgende Verfahren in Gebrauch.

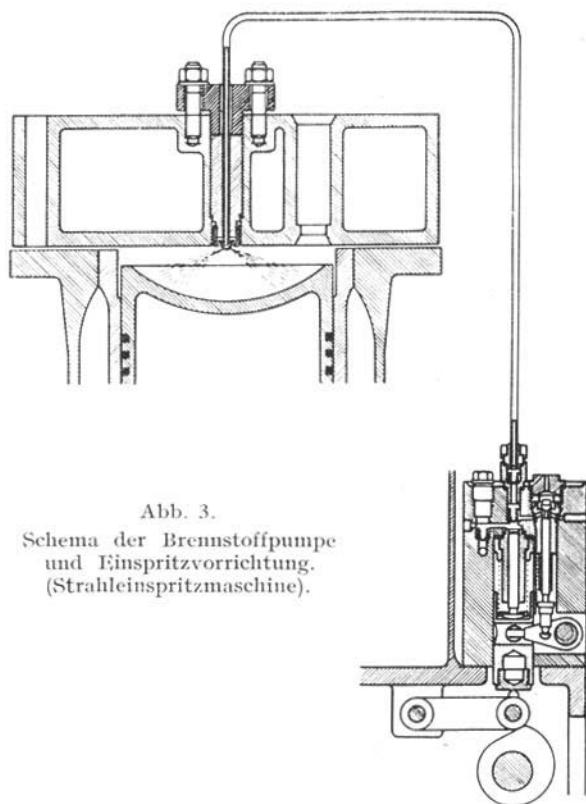


Abb. 3.
Schema der Brennstoffpumpe
und Einspritzvorrichtung.
(Strahleinspritzmaschine).

Bei der Strahleinspritzmaschine wird der Brennstoff durch sehr hohen Pumpendruck mit rd. 300 ata eingespritzt.

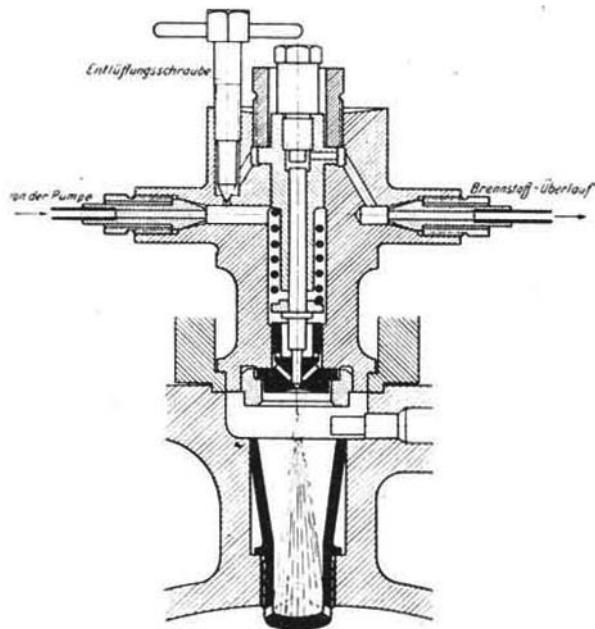


Abb. 4. Glühkapsel der Benzemaschine (Vorkammermaschine).

Bei der Vorkammermaschine spritzt man den Brennstoff durch eine heiße Kammer derart in den Zylinder, daß in der Vorkammer eine ihrem Sauerstoffgehalt entsprechende Teilverbrennung mit starker Drucksteigerung eintritt. Der Überdruck der Verbrennungsgase der Kammer gegenüber dem Zylinder stäubt den restlichen noch unverbrannten Brennstoff in den Zylinder ein. Die Einblaseluft der klassischen Maschine wird hier durch die hochgespannten Verbrennungsgase der Teilverbrennung ersetzt.

Bei den Wirbelkammermaschinen wird in dem vom Zylinder abgeschnürten Verbrennungsraum im Augenblick des Einspritzens eine geordnete Luftströmung erzwungen.

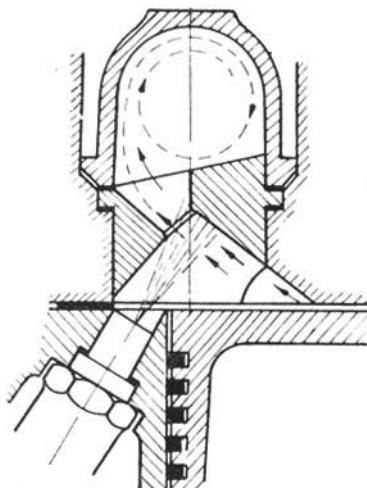


Abb. 5. Luftspeichermaschine.

Ein drittes Verfahren benutzen die Luftspeichermaschinen, bei denen der Brennstoff in den Hauptverbrennungsraum des Zylinders eingespritzt wird und nur ein Teil des Brennstoffes in den Speicher gelangt, in dem dieser Teil ebenfalls unter Drucksteigerung verbrennt und beim Abblasen des Speichers im Zylinder einen kräftigen Wirbel erzeugt.

Vorkammer-, Wirbelkammer- und Speichermotoren sind besonders für kleinere Maschinen im Fahrzeug- und Flugbetrieb in Gebrauch. Sie arbeiten mit geringeren Einspritzdrücken von etwa 100 ata, da die zusätzliche Zerstäubung durch den Abblasewirbel der Kammer oder des Speichers erfolgt.

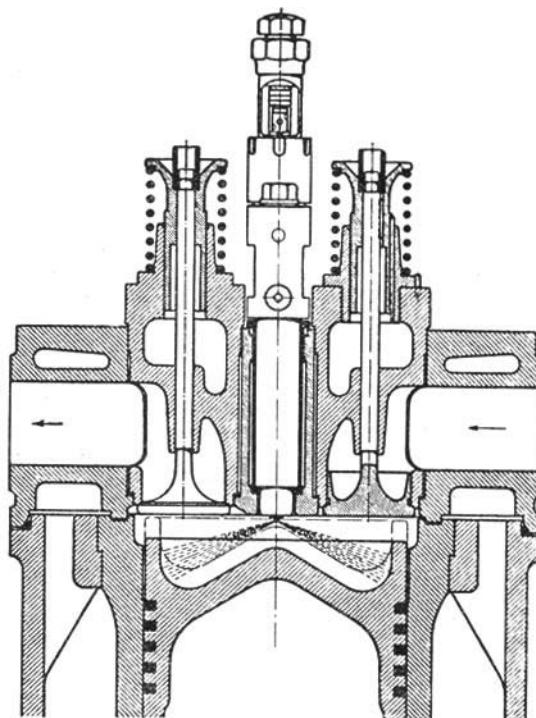


Abb. 6. Hesselman-Strahlmaschine.

Bei den Strahleinspritzmaschinen kann die gute Verteilung des Brennstoffes über den Brennraum dadurch unterstützt werden, daß man die Verbrennungsluft in eine kreisende Bewegung bringt. Bei Viertaktmaschinen geschieht das durch Abschirmen des Einlaßventils, bei

Zweitaktmaschinen durch tangential gestellte Schlitze in der Zylinderwand. In beiden Fällen zwingt man der Luft eine um die Zylinderachse drehende Bewegung auf.

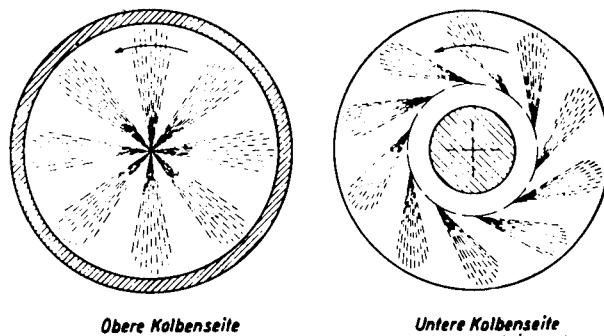


Abb. 7. Anordnung der Brennstoffstrahlen im oberen und unteren Brennraum (Hesselman-Maschine).

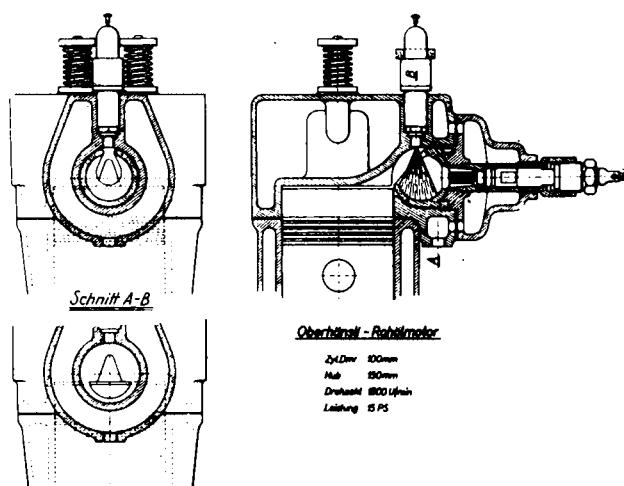


Abb. 8. Wirbelkammermaschine.

Die richtige Formgebung des Brennraumes der Maschine, weitgehende Zerstäubung und hinreichende Durchschlagskraft der Brennstoffstrahlen, zweckmäßige Durchwirbelung der Verbrennungsluft im Zylinder sind beim kompressorlosen Dieselmotor die zunächst zu erfüllenden Bedingungen, um eine gute Verbrennung zu erreichen.

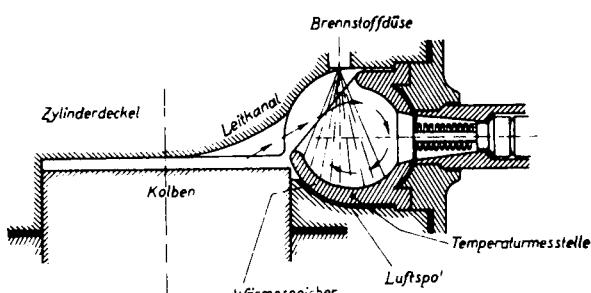


Abb. 9. Luftströmung in der Verbrennungskugel im Zeitpunkt des Einspritzbeginnes (Wirbelkammermaschine).

Entspricht die räumliche und zeitliche Verteilung der Brennstofftropfen im Brennraum den gestellten Bedingungen, so wird die Verbrennung sich in der beabsichtigten Weise abspielen. Der Druckverlauf im Zylinder wird den gewünschten Verlauf nehmen und die Maschinenleistung wird die erreichbare Höhe erhalten.

Für die entwickelte Leistung ist der zeitliche Verlauf der **Verbrennungsgeschwindigkeit** des eingespritzten Brennstoffes von grundlegender Bedeutung.

Verbrennt im Zeitelement dx der elementare Bruchteil dx des eingespritzten Brennstoffes, so ist $\frac{dx}{dz}$ die absolute Verbrennungsgeschwindigkeit. Der Druckverlauf während der Verbrennung, der die Größe der Diagrammfläche und damit die Arbeitsleistung der Maschine bestimmt, hängt dagegen davon ab, wie rasch sich x mit dem Kurbel-

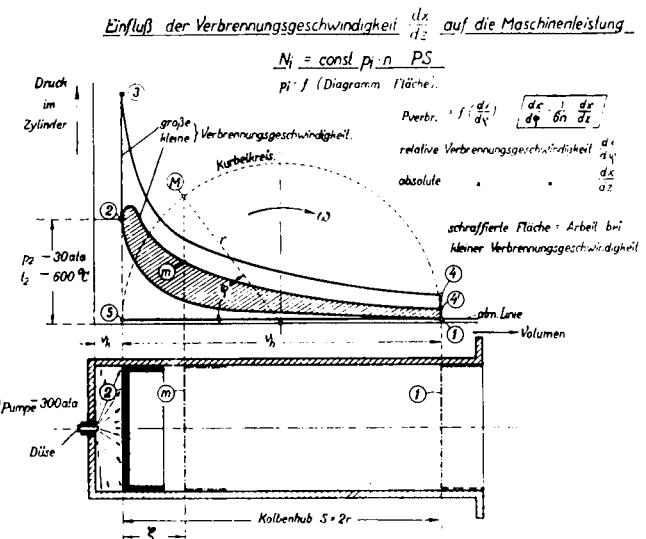


Abb. 10. Indicatordiagramm $N_i = f \left(\frac{dx}{dz} \right)$.

winkel φ ändert. Die hierdurch gekennzeichnete relative Verbrennungsgeschwindigkeit

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{1}{6n} \frac{dx}{dz}$$

wird deshalb sehr stark von der Maschinendrehzahl n beeinflußt. Bei Schnellläufern, die heute bei Fahrzeug- und Flugmaschinen ausschließlich in Gebrauch sind, müssen demnach sehr hohe Verbrennungsgeschwindigkeiten der Ladung $\frac{dx}{dz}$ verwendet werden, um eine genügend große Maschinenleistung zu erhalten. Steigert man z. B. die Drehzahl von 300 auf 3000 U/min, so muß $\frac{dx}{dz}$ auf den zehnfachen Betrag wachsen, damit $\frac{dx}{d\varphi}$ unverändert bleibt, d. h. damit dieselbe Druckverlauf und dieselbe Arbeitsleistung je Arbeitsspiel erzielt werden.

Je größer die Verbrennungsgeschwindigkeit bei gleicher Drehzahl n ist, um so stärker ist die Drucksteigerung im Zylinder. Die höchste Maschinenleistung ist deshalb immer

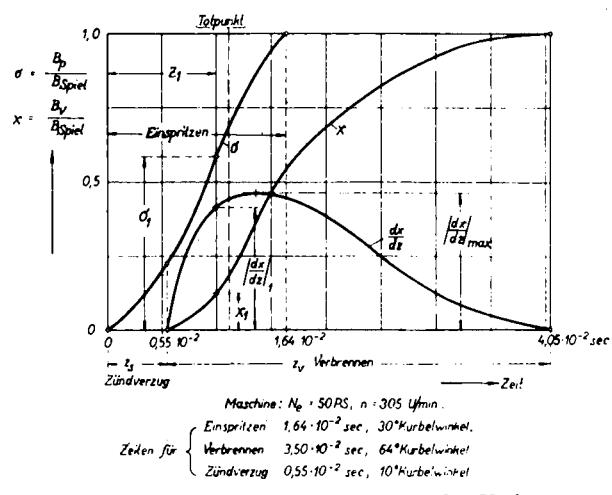


Abb. 11. Zeitlicher Verlauf des Einspritzens, der Verbrennung und der Verbrennungsgeschwindigkeit in der Dieselmashine.

mit hoher Beanspruchung der Maschine verknüpft. Durch Wahl des Einspritzverlaufes hat man es in der Hand, die Beanspruchung innerhalb zulässiger Grenzen zu halten.

Verfolgt man an einer ausgeführten Dieselmashine den Verlauf des Einspritzens und der Verbrennung durch Messung derart, daß man den Bruchteil des bis zum jeweiligen Kurbelwinkel φ eingespritzten bzw. verbrannten Brennstoffes σ bzw. x abhängig von der Zeit $z = \frac{\varphi}{6n}$ aufträgt, so erkennt man, daß die Verbrennung dem Einspritzen stets zeitlich nacheilt.

Verdichtungsenddruck	p_K	at abs.	Deutz	Körting	Junkers
Zünddruck	p_z	"	19,5	32,0	38,5
höchster Verbrennungsdruck	p_{max}	"	46,5	42,0	63,5
Drucksteigerung durch die Verbrennung	p_{max}/p_z	"	2,39	1,34	1,65
Lufttemp. bei der Zündung	t_0	°C	458	605	639
Zündtemp. des Brennstoffes	t_s	"	238	195	190
Unterschied	$t_0 - t_s$	"	220	410	449
Zündverzug	z_s	sec	0,0181	0,00935	0,00486
Luftdichte bei der Zündung	δ_z	kg/m³	8,5	12,6	14,4

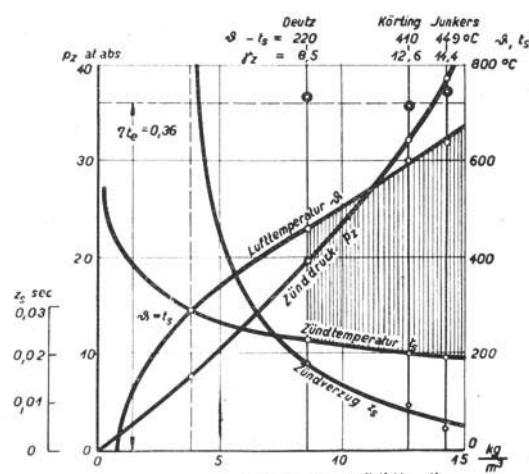


Abb. 12. Zündungswerte für kompressorlose Dieselmashinen (Vollast).

Es verstreicht eine gewisse Zeit, bis der eingespritzte Brennstoff zündet. Nach diesem Zündverzug setzt die Verbrennung mit zunächst rasch anwachsender Verbrennungsgeschwindigkeit $\frac{dx}{dz}$ ein, durchläuft einen Höchstwert und strebt hierauf mit bis auf Null abklingender Verbrennungsgeschwindigkeit ihrem Ende zu. Je frühzeitiger beim Arbeitshub des Kolbens dieser Höchstwert erreicht wird, um so besser wird die durch die Verbrennung ausgelöste Wärme im Arbeitsprozeß ausgenutzt, mit einem um so höheren Wirkungsgrad ist der Energie-Umsatz in der Maschine verknüpft.

Der angegebene Verbrennungsverlauf, die zeitliche Folge von Zündverzug, Haupt- und Nachverbrennung — wobei letztere von der Überschreitung des Geschwindigkeitsmaximums $\left[\frac{dx}{dz} \right]_{max}$ an gerechnet wird — ist typisch für die dieselmotorische Verbrennung. Sie wird bedingt durch die chemisch-physikalischen Vorgänge, die bei der Umwandlung der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie in Wärme eintreten. Der zeitliche Verbrennungsverlauf wird deshalb einmal davon abhängen, welcher Art die im Brennstoff vorhandenen flüssigen Kohlenwasserstoffe sind. Andererseits wird die Art der chemischen Reaktionen eine Rolle spielen, die während des gesamten Verbrennungsverlaufes zeitlich aufeinanderfolgen. Hieraus ergibt sich, daß die Brennstoffbeschaffenheit und die äußeren Bedingungen, unter denen der chemische Umsatz im Arbeitszylinder der Maschine abläuft, von besonderer Bedeutung

für das Arbeitsverfahren der Maschine und den Wirkungsgrad des Energie-Umsatzes sind.

Das erste Streben nach rationeller Verbrennung erfordert kleinen Zündverzug. Die zur Zündung erforderliche Zeit ist unter gleichen Verhältnissen um so kleiner, je niedriger die Selbstzündungstemperatur des Brennstoffes liegt. Diese ist keineswegs eine dem betreffenden Treiböl eigentümliche Konstante, sondern hängt wesentlich von der chemischen Konstitution des Brennstoffes, von der Dichte und der Sauerstoffkonzentration ab, welche der Brennstoff bei seinem Eintritt in den Brennraum der Maschine vorfindet. Für aliphatische Treiböle liegt die Selbstzündungstemperatur bei den in der Dieselmashine bei Zündbeginn herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen bei $t_s \sim 200^\circ$.

Die **Selbstzündung** des Brennstoffes beruht auf chemischen Vorgängen, die weit unterhalb dieser Selbstzündungstemperatur beginnen. Der in den Verbrennungsraum der Maschine eingespritzte Brennstoff nimmt zunächst aus der hochverdichteten heißen Luft Wärme auf. Mit dieser Wärmeaufnahme setzt gleichzeitig eine Oxydation an der Oberfläche der Brennstofftropfen durch den Luftsauerstoff ein, die exotherm verläuft. Die zu Beginn kleine Oxydationsgeschwindigkeit steigt. Es bilden sich Produkte, die mit steigender Temperatur immer wärmeunbeständiger werden und schließlich zerfallen. Die hierbei frei werdende Wärme leitet die Zündung an einer oder an mehreren Stellen des Verbrennungsraumes ein. Da gleichzeitig atomarer Sauerstoff frei wird, der den restlichen Brennstoff bei steigender Temperatur oxydiert, so wird die Zahl der Zündherde rasch zunehmen.

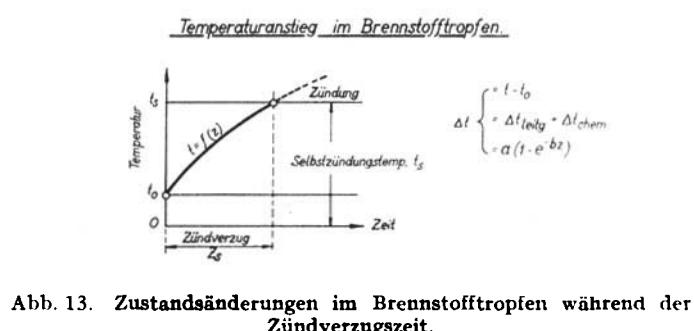
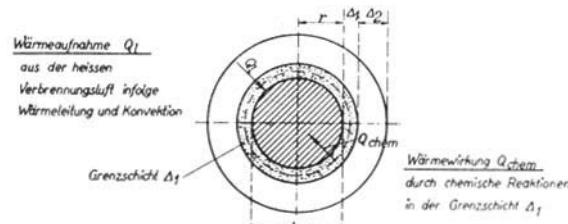


Abb. 13. Zustandsänderungen im Brennstofftropfen während der Zündverzugszeit.

Da der Brennstoff beim Einspritzen zunächst flüssig in den Brennraum der Maschine tritt, so sind im ersten Zeitabschnitt wie bei jedem Nebel eine flüssige und eine Gasphase vorhanden. Die chemischen Reaktionen können sich folglich nur an der Grenzfläche beider Phasen abspielen. In der Grenzfläche muß ein Konzentrationsgefälle herrschen, denn nur dann tritt Sauerstoff aus der Gasphase an die Oberfläche der flüssigen Phase und bildet durch Anlagern das Peroxyd, bzw. es treten weitere chemische Reaktionen ein.

Neben diesen chemischen Vorgängen wird gleichzeitig teilweise Verdampfung der Flüssigkeit erfolgen. Außer der Grenzschicht, deren Dicke Δ_1 molekulare Abmessungen hat und die immer vorhanden ist, bildet sich um den Brennstofftropfen eine zweite durch Verdampf- und Entgasungsvorgänge bedingte Trennungsschicht aus, deren Dicke Δ_2

durch Wirbelung im Verbrennungsraum vermindert werden kann.

Der Zündverzug z_s wird um so kleiner, je besser der Wärmeübergang von der heißen Verbrennungsluft an den Brennstofftropfen ist und je größer die frei werdende Reaktionswärme und die Oxydationsgeschwindigkeit sind.

Abb. 14 zeigt die Vorgänge im Zylinder während des Verdichtungshubes. Mit einwärts gehendem Kolben steigt der Druck p , die Lufttemperatur ϑ und die Luftpumpe γ . Die Zündtemperatur t_s des Brennstoffes nimmt mit zunehmender Dichte ab. Bei Einspritzbeginn, 11 Grad Kurbel-

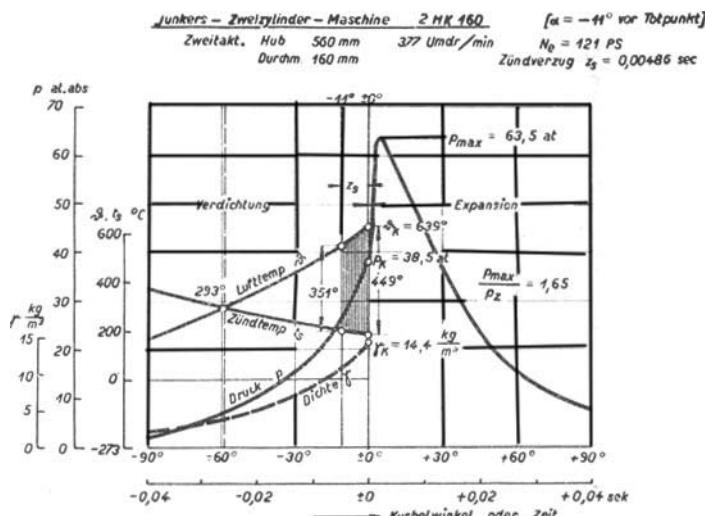


Abb. 14. Zündungs- und Verbrennungsvorgang in der Junkers-Maschine.

winkel vor Totpunkt, liegt die Lufttemperatur 351° , bei Eintritt der Zündung 449° über der Zündtemperatur. Infolge des hohen Temperaturüberschusses werden sich die Tropfen mit kleinem Durchmesser besonders rasch erwärmen und zuerst zünden. Der Zündverzug beträgt $z_s \sim 0,005$ s, der Drehwinkel der Kurbel während dieser Zeit $\Delta\varphi = 11$ Grad. Nach erfolgter Zündung setzt die Verbrennung ein, wobei der Druck von 38,5 bis auf 63,5 ata steigt.

Da die Zündung eine Folge chemischer Reaktionen in der Phasengrenzfläche des Tropfens ist, die Grenzschicht aber in radialer Richtung allmählich aus Flüssigkeit in Dampf übergeht, kann man schließen, daß die erste Zündung in der Gasphase und nicht in der Flüssigkeit eintritt. Durch Spektralaufnahmen, die die Vorgänge während der Zeit des Zündverzuges erfassen, konnten die gebildeten Zünddämpfe in der Tat nachgewiesen werden.

Während der Zeit des Zündverzuges erwärmen sich die Reaktionsteilnehmer nur bis auf die Selbstzündungstemperatur des Brennstoffes. Infolge der kleinen räumlichen Ausdehnung der Zündherde ist die relative Wärmeentwicklung gegenüber der später einsetzenden Verbrennung der gesamten eingespritzten Brennstoffmenge klein. Aus diesem Grunde steigt der Gasdruck im Zylinder während dieser Einleitungsperiode nur infolge der Raumverminderung durch den Kolben am Ende der Verdichtung und nicht infolge der entwickelten Reaktionswärme an. Erst nach Eintritt der Zündung geht die langsame Oxydation organischer Verbindungen während der Zündverzugszeit in den raschen Umsatz während der Verbrennung mit starker Drucksteigerung über.

Im allgemeinen ist es günstig, die Einspritzgeschwindigkeit des Brennstoffes in den Zylinder so zu bemessen, daß die Zündung eintritt, nachdem ein nur kleiner Bruchteil Öl

der Einspritzmenge je Arbeitsspiel in den Brennraum gelangt ist. Denn dann ergibt sich eine gleichmäßige Drucksteigerung, die erst rascher zunimmt, wenn die in die bereits entwickelte Flamme nachgespritzte und sofort gezündete restliche Brennstoffmenge verbrennt. Ist der Zündverzug dagegen größer als die gesamte Einspritzzeit, so befindet sich bei Zündbeginn bereits der ganze Brennstoff im Zylinder: es setzt eine plötzliche starke Druckzunahme ein, die Maschine erhält harten, stoßenden Gang.

Durch funkenphotographische Aufnahmen des Einspritzvorganges konnten amerikanische Forscher Strahlbilder des Einspritzvorganges erhalten, die die zeitliche Entwicklung der Brennstoffstrahlen im Brennraum der Maschine zeigen. Die Strahlauslösung erscheint als

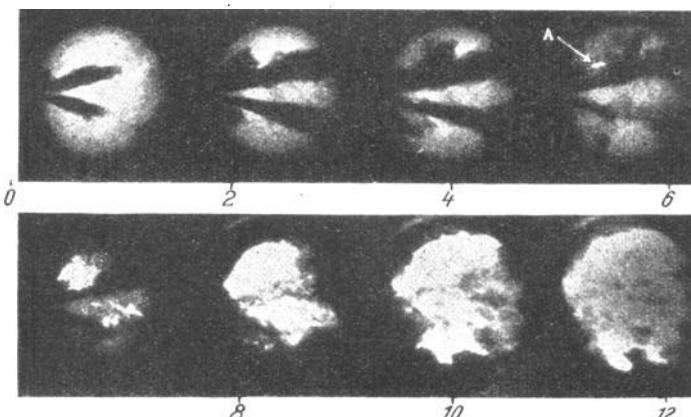


Abb. 15. Funkenphotographische Bilder für Einspritzung und Verbrennung.

Schattenbild. Im Punkt A — 6 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Totpunkt — beginnt die Verbrennung mit Flamme.

Von den aktiven Zündstellen ausgehend, breitet sich die Verbrennung der Ladung über den gesamten Brennraum aus. Bei vollkommen Verbrennung setzt sich der Brennstoff mit dem Luftsauerstoff zu CO_2 und H_2O um. Hierbei kann der Weg, den die Reaktion einschlägt, verschiedene Bahnen durchlaufen. Diese hängen offenbar von der Art, der Lebensdauer und der Größe der Konzentrationen der Zwischenstoffe ab. Die Reaktion wählt denjenigen Weg, der den kleinsten Widerstand bietet.

Zur Erforschung des zeitlichen Verbrennungsablaufes, von dem, wie bereits nachgewiesen wurde, die Leistung der Dieselmashine stark abhängt, bieten sich mehrere Mittel dar. Als solche kommen in Betracht:

1. der zeitliche Druck- und Temperaturverlauf im Zylinder,
2. die Leuchterscheinung bei der Verbrennung,
3. gasanalytische Untersuchungen des Verbrennungsvorganges.

Die trägeheitsfreie Druckaufzeichnung geschieht am besten mit Hilfe des piezoelektrischen Verfahrens auf photographischem Weg, indem die Bewegung eines durch eine Braunsche Röhre erzeugten Lichtpunktes auf einem rotierenden Film abgebildet wird. Unmittelbare Temperaturmessungen kann man durch Strahlungsmessungen vornehmen. Einblicke in den chemischen Umsatz erhält man durch spektrale Zerlegung des während der Verbrennung ausgesandten Lichtes und durch Gasprobeentnahme aus dem Brennraum mittels eines gesteuerten Gasentnahmestiftes.

Grundlegende Einblicke über den zeitlichen Verbrauchsablauf erhielt Beck¹⁾ durch Untersuchung einer in atmosphärischer Luft stationär brennenden Gasölfiamme.

Hier zeigt sich, daß der chemische Umsatz bald nach Austritt des Brennstoffes aus der Düse über die allein durch Spektraluntersuchungen erfassbare Bildung der CH-, C₂- und

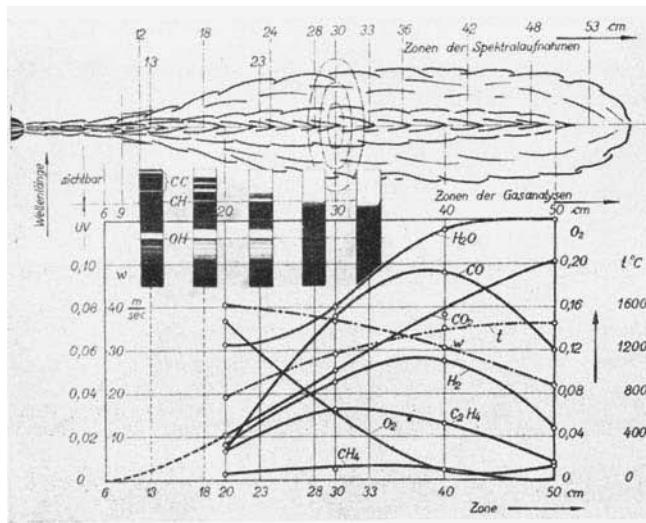


Abb. 16. Chemischer Umsatz einer in Luft stationär brennenden Gasölfiamme.

OH-Radikale erfolgt. Zeitlich später geht das durch die Radikalbildung hervorgerufene Bandenspektrum in ein ausgesprochenes Kontinuum über, das durch die Strahlung des dichten Bandenfeldes des Kohlenoxyds und des in der Flamme molekular-dispers verteilten festen Kohlenstoffs

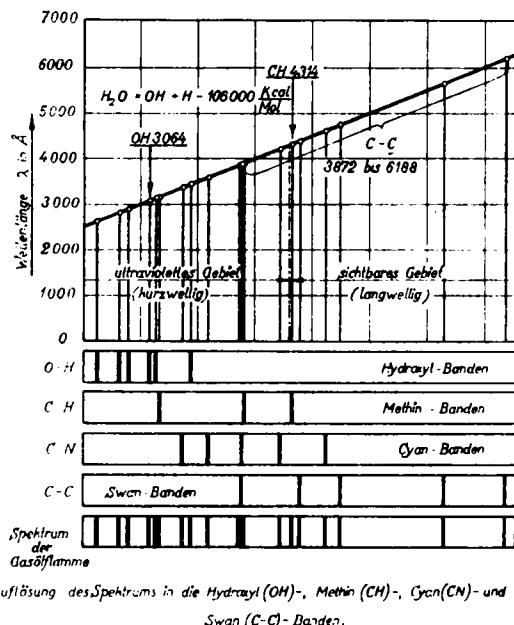


Abb. 17. Schematische Darstellung des Spektrums einer Gasölfiamme, abhängig von der Wellenlänge.

verursacht wird. Von der Flammenzone an, in der das Kontinuum erscheint, wird der weitere chemische Umsatz durch die Gasanalyse ermittelt. Es zeigt sich der beherrschende Einfluß der Wassergasreaktion $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$, die den weiteren Umsatz regelt und die letzte Vorstufe der stabilen Verbrennungsprodukte CO_2 und H_2O ist.

¹⁾ Diss. Hannover 1935, VDI-Forschungsheft 377.

Abb. 17 zeigt schematisch das Spektrum einer Gasölfiamme, bei dem im sichtbaren Gebiet die Swanbanden (C=C), im UV-Gebiet die Methin- (CH-), Hydroxyl- (OH-) und Cyan- (CN-) Banden erscheinen.

Durch Ausmessen des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes der Flamme konnte die räumliche Verteilung

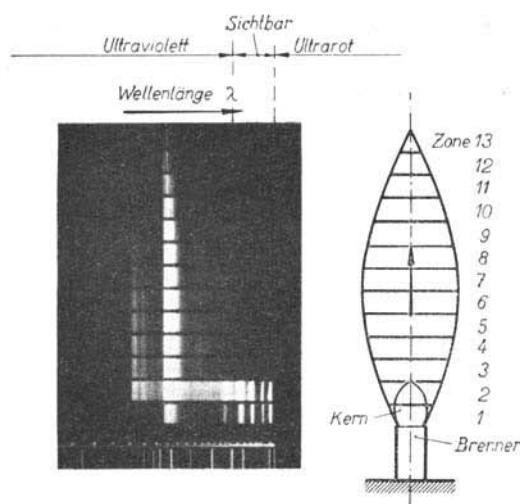


Abb. 18. Spektralaufnahme einer Propanfiamme C_3H_8 in O_2 -Atmosphäre brennend.

von Luft und Brennstoff und deren Verbrennungsergebnissen bestimmt und damit ein vollkommen Einblick in die hydrodynamischen und chemischen Vorgänge während der Verbrennung gewonnen werden.

Besonders deutlich zeigt sich der chemische Umsatz in seiner zeitlichen Folge bei den Spektralaufnahmen verschiedener Zonen einer in einer Sauerstoffatmosphäre frei brennenden Propanfiamme. Hier erscheint durchgehend vom Flammenkern bis zur Flammenspitze bevorzugt die OH-

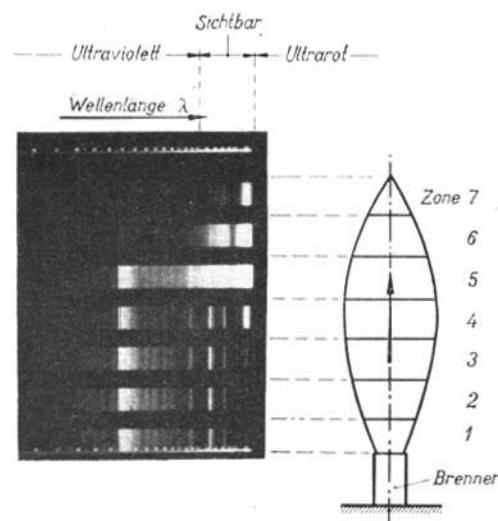


Abb. 19. Spektralaufnahme einer Gasölfiamme mit Luftbeimischung in Luft brennend.

Banden bei $\lambda = 3064 \text{ Å}$ im UV-Gebiet, die mit hoher Intensität ausgestrahlt wird. Mit Hilfe des einkopierten Hg-Spektrums sind auch die übrigen Banden den entsprechenden Radikalen leicht zuzuordnen.

Spektralaufnahmen der Verbrennung an der laufenden Maschine von Erichsen²⁾ zeigen im Gegensatz zu

²⁾ Diss. Hannover 1935, VDI-Forschungsheft 377.

den frei brennenden Flammen ein wesentlich anderes Aussehen. Hier setzt die Verbrennung mit einem Kontinuum zunächst im langwirigen Gebiet ein, greift sehr bald mit einer kurzwirigen Strahlung in das UV-Gebiet über, um schließlich mit einer langsam abklingenden langwirigen Strahlung abzuschließen. Im Maschinenspektrrogramm er-

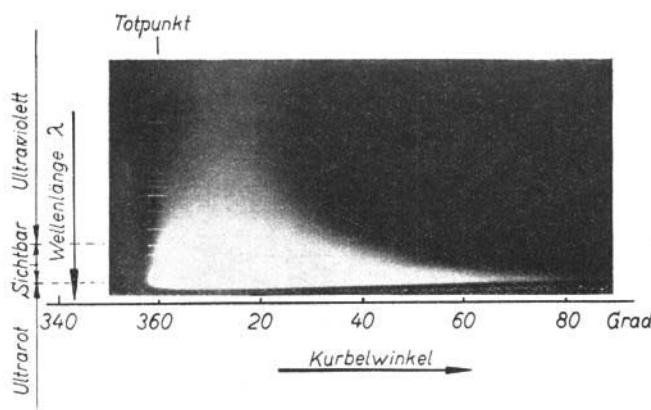


Abb. 20. Spektralaufnahme der Verbrennung in der kompressorlosen Dieselmashine.

scheinen zunächst nur die C—C-Banden als Zeichen gesprengter Kohlenstoffbindungen und die OH-Bande bei $\lambda = 3064 \text{ \AA}$, die eine besondere Form der Wasserdampfspaltung bei Temperaturen oberhalb 1200° ist.

Nach Untersuchungen von Kärde³⁾ steht jedoch fest, daß auch bei den im Dieselmotor herrschenden Bedingungen der chemische Umsatz des Brennstoffes über die Radikalbildung wie bei frei brennenden Flammen erfolgt. Daß das ausgeprägte Bandenfeld hier nicht erscheint, ist dadurch begründet, daß die wirkende Lichtmenge (Intensität \times Zeit) der von den Radikalen ausgesandten Energie zu klein ist und unterhalb des Schwellenwertes bleibt, der zur okularen Sichtbarmachung oder photographischen Registrierung erforderlich ist. Durch Änderung der äußeren Bedingungen, insbes. durch Herabsetzung der Temperatur,

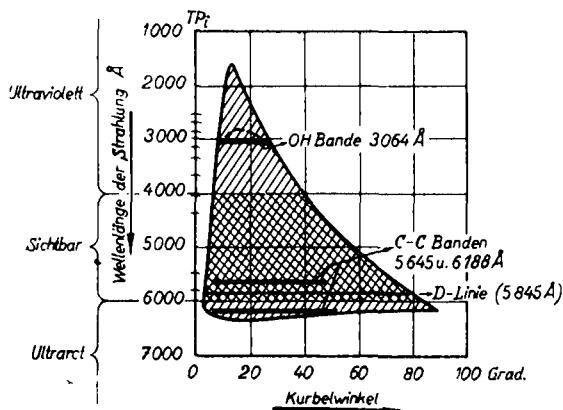


Abb. 21. Schematisierte Spektralaufnahme der Verbrennung von Gasöl in der kompressorlosen Dieselmaschine.

gelingt es, die zeitliche Ausstrahlung infolge der verminderten Reaktionsgeschwindigkeit zu vergrößern und damit den Nachweis des Umsatzes über die Radikalbildung zu erbringen.

Infolge zu hoher Reaktionsgeschwindigkeit, d. h. zu kurzer Lebensdauer, entziehen sich in der Maschine die am

³⁾ Diss. Hannover 1936. Dieselheft. Automobiltechn. Z. 39, Nr. 20 [1936].

Umsatz beteiligten Reaktionsteilnehmer teilweise der spektralen Beobachtung. Die hohe Reaktionsgeschwindigkeit zu Beginn des chemischen Umsatzes bewirkt, daß dieser zu Beginn der dieselmotorischen Verbrennung im Vergleich zur Vergasermashine und zu anderen technischen Kohlenwasserstoff-Flammen besonders groß ist. Dieser Schlüß wird durch die starke Drucksteigerung in der Zeiteinheit $\frac{dp}{dz} = f(z)$ bei Verbrennungsbeginn besonders deutlich vor Augen geführt.

Hiermit kann aber aus den an der Maschine beobachteten Leuchterscheinungen geschlossen werden, daß das Auftreten einer starken kontinuierlichen Strahlung bei teilweiser oder vollständiger Abschwächung der Banden das Merkmal einer größeren mittleren Reaktionsgeschwindigkeit der Bruttoreaktion ist, da das ausgeprägte Bandenspektrum nur bei verhältnismäßig geringer mittlerer Reaktionsgeschwindigkeit der Bruttoreaktion erscheint.

An diesen raschen Umsatz zu Beginn der sichtbaren Verbrennung, deren erste Phase als Hauptverbrennung bezeichnet ist, schließt sich das Nachbrennen als zweite Phase an. Hier beherrscht bei den hohen Temperaturen die Wasser-gasreaktion den chemischen Umsatz. Die Verbrennung ist

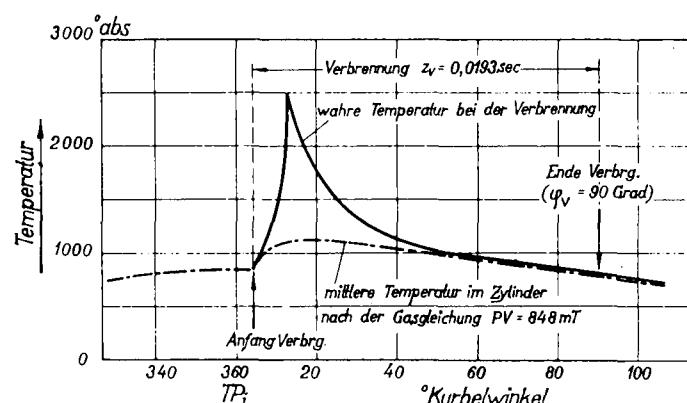


Abb. 22. Temperaturverlauf in der kompressorlosen Dieselmaschine während Verbrennung und Expansion.

zeitlich beendet, wenn der Brennstoff mit dem Luftsauerstoff praktisch vollkommen zu CO_2 und H_2O umgesetzt ist. In der Phase des Nachbrennens sinkt die Reaktionsgeschwindigkeit rasch, um mit beendetem Umsatz den Wert Null zu erreichen.

Eine kinetische Untersuchung des Verbrennungsverlaufes in der Maschine⁴⁾ geht von der gastheoretisch begründeten Voraussetzung aus, daß ein chemischer Umsatz nur stattfinden kann, wenn ein Zusammenstoß eines Brennstoff- und Sauerstoffmoleküls stattfindet und wenn die betreffenden Moleküle genügend hohe Energie haben. Als Reaktionsgleichung erhält man die für die Zweierreaktion typische Gleichung einer bimolekularen Reaktion

$$-\left[\frac{\partial c_B}{\partial z} \right]_V = K c_B c_{\text{O}_2}$$

d. h. die Abnahme der Brennstoffkonzentration in der Zeiteinheit ist der augenblicklichen Brennstoff- und Sauerstoffkonzentration proportional. Durch Messungen kann man c_B und c_{O_2} abhängig von der Zeit bestimmen und damit die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante K berechnen. Es zeigt sich, daß K stark mit dem Kurbelwinkel bzw. mit der Temperatur wächst. Die Verbrennung setzt ein, nachdem ein Schwellenwert K_0 überschritten ist.

Unterhalb von K_0 spielen sich die Reaktionen ab, die die Zeit des Zündverzuges umfassen, bei der nur eine

⁴⁾ Forschg. Ingenieurwes. 7, 57 [1936].

langsame Oxydation des Brennstoffes ohne wesentliche Druckänderungen eintritt.

Die Zerlegung von K nach der Gleichung von Arrhenius (vgl. Abb. 23) ergibt den zeitlichen Verlauf der Aktions-

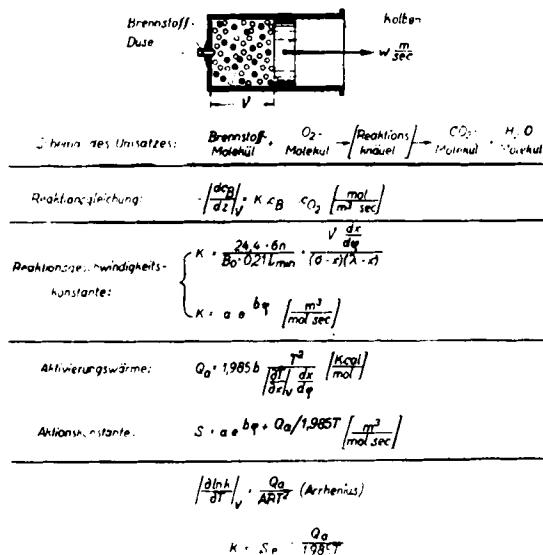


Abb. 23. Chemischer Umsatz bei Zusammenstoß eines Brennstoff- und O₂-Moleküles (Kinet. Analyse).

konstante S und der Aktivierungsgröße Q_a. In der Zunahme von S von 10⁴ bis 10¹¹ erkennt man deutlich die Veränderung im Bau der reagierenden Moleküle, die mit fortschreitendem Unisatz in eine innere stabile Form übergehen. Mit dem Grenzwert 10¹¹ ist der für Reaktionen zwischen einfachen Gasen gültige S-Wert erreicht. Da während des Verbrennungsverlaufes S < 10¹¹ ist und da gleichzeitig die Aktivierungsgröße Q_a > 0 ist, so ist K kleiner als bei homogenen Gasreaktionen. Es treten Reaktionshemmungen während der Verbrennung ein, die vorzugsweise durch Diffusionsvorgänge in der Grenzfläche der

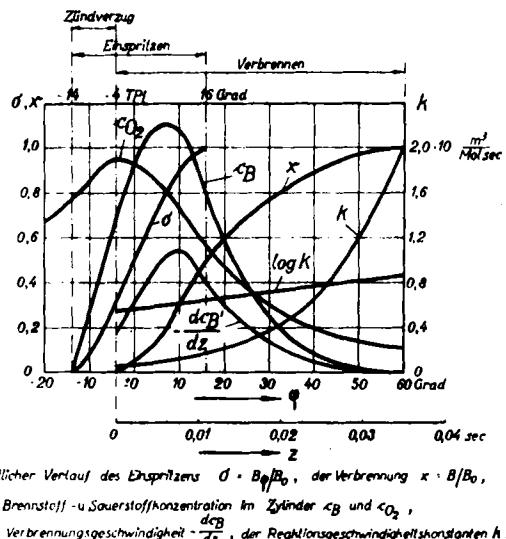
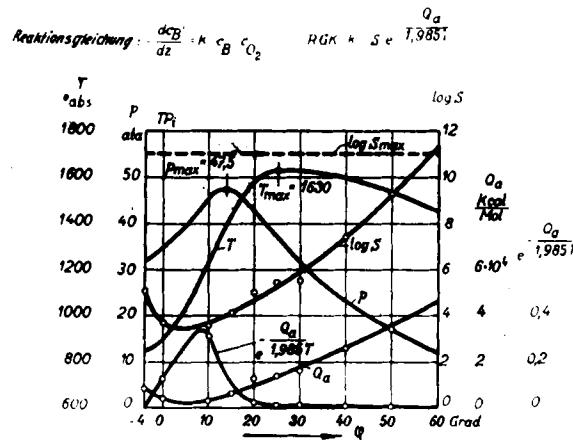


Abb. 24. Reaktionskinetische Analyse der Verbrennung in der kompressorlosen Dieselmashine (Beobachtungsergebnisse).

flüssigen und gasförmigen Phase begründet sind. Die Ausscheidung von molekulär dispers verteilten Kohlenstoffteilchen in der Flamme, von der das intensive Leuchten der Flamme herrührt, löst im Zusammenhang mit dem bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampf eine katalytische Beschleunigung des Verbrennungsablaufes aus, die die gesamte Verbrennungszeit auf wenige tausendstel Sekunden herabsetzt und dadurch in der Tat die motorische

Verbrennung in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeitspanne durchzuführen gestattet.

Den Einfluß der Drehzahl bei konstanter Verbrennungs geschwindigkeit auf die Maschinenleistung zeigt Abb. 26.



Zeitlicher Verlauf des Drucks p und der Temperatur T, der Aktivierungsenergie Q_a, der Aktionskonstante S, des Ausbeutefaktors e, $\frac{Q_a}{1,985 T}$ während der Verbrennung im Zylinder — Kinetische Stoffkonstante für Gase $S_{\text{max}} \cdot 10^7$

Abb. 25. Reaktionskinetische Analyse der Verbrennung in der kompressorlosen Dieselmashine (Rechnungsergebnisse).

Bei Verbrennung im unveränderlichen Raum ergibt sich eine Drucksteigerung von 35 auf 114 ata, d. h. um $\Delta p = 79$ at. Läuft die Maschine dagegen mit 1000 bzw. 2000 U/min, so ermäßigt sich die Drucksteigerung bei derselben Verbrennungsgeschwindigkeit auf $\Delta p = 30,8$ bzw. 8,0 at. Man erkennt hieraus, wie wichtig es ist, die Verbrennungs-

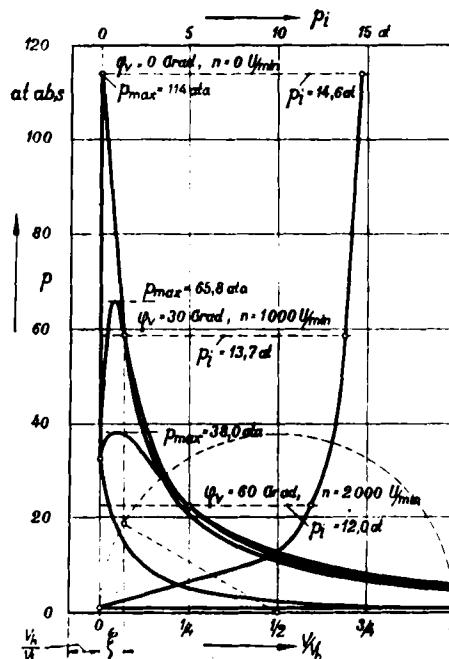


Abb. 26. Einfluß der Drehzahl auf das Indicatordiagramm und den mittleren indizierten Kolbendruck bei konstanter Verbrennungsgeschwindigkeit.

geschwindigkeit in der Maschine hoch zu halten, denn die entwickelte Leistung ist um so größer, je größer die Diagrammfläche ist, die stark von der bei der Verbrennung im Motor eintretenden Drucksteigerung abhängt.

Die Frage des raschen chemischen Umsatzes muß man im Auge behalten, wenn man weniger zündwillige und schwerer verbrennbare Brennstoffe — etwa Steinkohlen-

teeröl — in der Dieselmashine verbrennen will. Hier kann man durch entsprechende Steuerung des Einspritzvorganges im Zusammenhang mit hoher Vorwärmung des Teiles der Verbrennungsluft, deren Sauerstoff zur Zündung benötigt wird, zufriedenstellende Ergebnisse erhalten. Die Verhältnisse werden besonders schwierig, wenn man von den Ölen zu den festen Brennstoffen, z. B. Kohlenstaub, übergeht.

Bei diesem tritt als lästige Begleiterscheinung Aschenbildung auf, die den für die ungestörte Kolbenbewegung

nötigen Schmierfilm an der Zylinderwand verschlechtert. Man kann jedoch hoffen, daß es durch schrittweise Verbesserung der Motorkonstruktion schließlich gelingen wird, auch unsere für die Dieselmashine weniger gut geeigneten heimischen Brennstoffe zufriedenstellend und mit gutem Wirkungsgrad zu verbrennen. Je aufschlußreicher die Ergebnisse der wissenschaftlichen Forschung bezüglich der mechanischen, thermischen und chemischen Probleme sind, um so leichter werden auftretende Schwierigkeiten überwunden werden. [A. 9.]

Zur Raffination der Mineralöle mit Lösungsmitteln¹⁾

Von a. o. Prof. Dr.-Ing. habil. H. STEINBRECHER und Dipl.-Ing. H. KÜHNE, Freiberg i. Sa.

Eingeg. 15. Februar 1937.

Der seit Jahren ständig steigende Bedarf an Mineralölen aller Art fordert Verarbeitungs- und Veredelungsverfahren, die neben der größten Einschränkung der Verluste an Öl und Raffinationsmitteln auch eine weitestgehende Erhaltung der Originalnatur gewisser Stoffgruppen des Rohmaterials gewährleisten. Diese Forderungen, die von der bisher betriebenen Destillation und chemischen Reinigung nur sehr unvollkommen erfüllt werden, führten zur Erprobung der Aufarbeitung oder der Raffination der Öle mit geeigneten Lösungsmitteln nach dem Prinzip der auswählenden Löslichkeit oder der kalten Fraktionierung, zumal die Spritwäsche und der *Edeleanu*-Prozeß die technisch und wirtschaftlich mögliche Gangbarkeit dieses Weges gezeigt hatten. Innerhalb kurzer Zeit nahmen die Vorschläge verschiedenartigster Lösungsmittel zur Durchführung der kalten Fraktionierung in der in- und ausländischen Literatur einen breiten Raum ein, nur eine kleine Zahl fand aber praktisches Interesse²⁾.

Der Grund hierfür liegt, abgesehen von dem teilweise recht hohen Preis der Mittel und der Schwierigkeit ihrer Rückgewinnung, wohl vornehmlich darin, daß sowohl den durch die außerordentlich komplizierte Zusammensetzung der Mineralöle bedingten starken Löslichkeitsbeeinflussungen als auch den Verschiebungen der Löslichkeit der die Öle vor allem aufbauenden Kohlenwasserstoffe mit der Molekülgroße, mit dem Anwachsen der ungesättigten Natur, mit der Zunahme der paraffinischen Seitenketten oder der Wasserstoffabsättigung in aromatischen Verbindungen, sowie mit dem Mischungsverhältnis von Öl zu Lösungsmittel und dessen Temperatur viel zu wenig Rechnung getragen wird. Dies hat zur Folge, daß mit der gewünschten Abtrennung bestimmter unliebsamer Ölanteile auch andere wertvolle Stoffe erfaßt werden, deren Verlust den praktischen Wert des Mittels in Frage stellt.

Zur Klärung der Sachlage erschien uns zunächst die Untersuchung des Verhaltens einer größeren Zahl als brauchbar erkannter Lösungsmittel gegenüber rohen Teer- und Erdölen unter gleichzeitiger Verfolgung ihrer selektiven Wirkung mit Hilfe chemischer Reaktionen als besonders vordringlich.

Umfangreiche Lösungsversuche ließen für die Zersetzung bzw. Raffination der Rohöle vor allem Lösungsmittel von der Natur der aliphatischen Säuren, aromatischen Alkoholen, Glykolen und deren Ester, Hydrinen und Cyanide als besonders geeignet erkennen, wobei jedes für sich bzw. gewisse Kombinationen dieser Mittel, u. U.

¹⁾ Nach einem Vortrag in der Fachgruppe für Brennstoff- und Mineralölchemie auf der 49. Hauptversammlung des V. D. Ch. in München am 9. Juli 1936.

²⁾ Vgl. hierzu *Widdecke*, „Die Herstellung von Schmieröl, Paraffin und Asphalt aus deutschen Erdöldestillationsrückständen“, diese Ztschr. 48, 110 [1935].

auch in Vereinigung mit schwefliger Säure, zur Abtrennung ganz bestimmter Stoffgemische führen. So werden z. B. Braunkohlenteer-Rohöle von gewissen organischen Säuren genau so wie von Natronlauge entkreosotiert und gleichzeitig auch von den leicht verharzenden ungesättigten Stoffen sowie von den Basen befreit. In ähnlicher Weise wirken Glykole oder Polyglykole, die sowohl die Kreosote entfernen als auch alle Olefine mit ausgeprägtem ungesättigten Charakter, unter denen bei frischen Ölen wiederholt solche mit konjugierter Doppelbindung nachzuweisen waren. Aus den in dieser Form raffinierten Ölen werden von bestimmten Cyaniden, Glykolestern und vor allem Hydrinen bevorzugt Aromaten und Cycloolefine gelöst, während aromatische Alkohole außer diesen auch noch Naphthene aufnehmen und nur die paraffinischen Verbindungen zurücklassen. Das Ergebnis solcher Zerlegungen nach dem Prinzip der auswählenden Löslichkeit ist in folgender Tabelle für ein Braunkohlenteer-Rohöl als Beispiel wiedergegeben, wobei ohne Beachtung der in untergeordneten Mengen vorhandenen neutralen Sauerstoff- und Schwefelverbindungen nur die die Mineralöle hauptsächlich aufbauenden Stoffgruppen berücksichtigt sind, auf deren Verhalten gegenüber Lösungsmitteln es in erster Linie ankommt.

Braunkohlenteer-Rohöl.

	Schwefel-säure-verfahren	Kalte Fraktionierung		Chemische Um-setzung
		I	II	
Kreosote	22 %	22 %	22 %	22 %
Olefine	47 %	7 13 20 %	20 %	20 %
Aromaten	8 %	13 %	9 %	8 %
Cycloolefine	—		13 %	
Naphthene	23 %	45 %	14 %	
Paraffine			22 %	50 %

Zur erfolgreichen Durchführung der in der Tabelle verzeichneten kalten Fraktionierungen, die die selektive Wirkung der von uns gewählten Lösungsmittel veranschaulichen sollen, ist die Anwendung der betreffenden Mittel nach einer ganz bestimmten Reihenfolge und Arbeitsweise unerlässlich. Die Abtrennung der einzelnen Stoffgruppen-gemische hat in der eben angeführten Reihenfolge stattzufinden, wobei der möglichst erschöpfenden Absonderung der Olefine und Aromaten, die anfänglich erhebliche Schwierigkeiten bereitete, besondere Aufmerksamkeit zugewendet werden muß. Bei Nichtbeachtung dieser Bedingung wird durch diese beiden Kohlenwasserstoffgruppen wegen ihrer leichten Löslichkeit in der größten Zahl der bisher geprüften Mittel und der damit verbundenen starken