

g ohne Genehmigung
at gestattet
mplare nur durch
Übersetzer

Gustav Kraut
/armbronn
t) Im Gäble 16

Übersetzung aus der japanischen Zeitschrift

"Nainen Kikan"

Band 15, Nr.180, Juli 1976, Seite 9 - 15

STUTTGART

NOV. 1976

Schriftenstelle

Untersuchung der Spritznebelverbrennung mit Hilfe
einer Schnellkompressionsmaschine

Photographic Study on the Spray Combustion by
Means of a Rapid Compression Machine

von M.Ogasawara, K.Horio, H.Nakano (Fa.Yanmar Diesel),
Y.Tokunaga (Kawasaki Heavy Industries) u.M.Uryu.

1. Vorwort

Schon von altersher sind zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt worden, bei denen man mit Hilfe einer Schnellkamera den Vorgang der Spritznebelverbrennung im Dieselmotor fotografiert und untersucht hat; diese Aufnahmen hat man jedoch nahezu durchweg mit dem von der Flamme selbst kommenden Licht gemacht. Man hat deshalb aus diesen Aufnahmen keine Klarheit über den gegenseitigen Zusammenhang und die gegenseitige Lage des Spritznebels und der Flamme sowie auch über den inneren Aufbau der Flamme erhalten. Demgegenüber haben wir mit einer Forschungsarbeit begonnen, deren Ziel es ist, den Verbrennungsvorgang eines intermittierenden Spritznebels im einzelnen zu untersuchen. Wir haben uns zu diesem Zweck zunächst eine versuchsweise hergestellte Schnellkomprimierungsmaschine verschafft. Nun gibt es zwar auch bei diesen Schnellkomprimierungsmaschinen eine Reihe verschiedener in ihrer Art origineller Ausführungen, die schon früher in den einzelnen Ländern hergestellt worden sind¹⁾, der Zweck jedoch, dem unsere versuchsweise hergestellte Maschine dienen sollte, besteht darin, über die Hintergründe Klarheit zu schaffen und darüberhinaus den

5,

Spritznebel und das Bild der Flamme sichtbar zu machen, und all das, was von sich selbst aus kein Licht erzeugt, d.h. also die Spritznebelströmung sowie die in der Flamme vorhandenen Öltröpfchen und Rußteilchen usw. in die Bildfläche hereinzubekommen und damit die Voraussetzung zu schaffen, die man braucht, wenn man ein alle diese Einzelheiten enthaltendes Bild der Flamme bekommen will. Bei der vorliegenden Forschungsarbeit hat man also in einen heißen Hochdruckzylinder, den man in eine Schnellkomprimierungsmaschine eingebaut hatte, jeweils nur einmal den Kraftstoff eingespritzt und dabei mit Hilfe durch eine Schnellkamera aufgenommene vergrößerte fotografische Aufnahmen den Verlauf der Verbrennung beobachtet. Dabei kam es uns ganz besonders darauf an, die nachstehend aufgeführten Punkte zu klären:

1. Wo und wann erfolgt die Zündung in der Spritznebelströmung? Sind dieser Ort der Zündung und dieser Zeitpunkt der Zündung verschieden je nach der Art des Kraftstoffes, je nach der Einspritzmenge, je nach der Lufttemperatur beim Einspritzen und je nach der Stärke des Wirbels?
2. Wird der Hauptflammenkörper durch die Ansammlung einer Vielzahl winzig kleiner Kraftstofftröpfchen gebildet? Oder kommt diese Flamme dadurch zustande, aus einer Vielzahl einzelner Kraftstofftröpfchen verdampfenden Dampfwölkchen (wörtlich: Dampfklumpen) zu einer Gruppe zusammenfinden und eine Diffusionsverbrennung erfahren?
3. In welcher Weise wird diese Flammenbildung durch die verschiedenen oben erwähnten Größen beeinflusst?

2. Die Versuchseinrichtung und die Versuchsmethodik

Bei der versuchsweisen Herstellung der Schnellkomprimie-

rungsmaschine haben wir vorallem auf folgende Punkte geachtet: 1) Daß durch die Anordnung einer Lichtquelle an der Rückseite der Flamme nicht nur das von der Flamme kommende Licht sondern auch das durchdringende (das durchfallende?) Licht ausgenützt werden konnten; 2) daß eine vergrößerte fotografische Aufnahme möglich gemacht wurde, die es uns erlaubte, auch die winzig kleinen Teilchen mit einem Durchmesser in der Größenordnung von ungefähr 50μ zu unterscheiden; und zudem haben wir 3) größten Wert darauf gelegt, die Einrichtung so einfach wie möglich zu bauen.

Die Abbildung 1 zeigt eine Gesamtansicht, in welcher der auf einer Rahmenkonstruktion horizontal liegende strichpunktiert dargestellte Teil ein Zylindersystem darstellt; dieses Zylindersystem wird in der Abbildung 2 mit seinen Einzelheiten gezeigt, und wir sehen dort, daß der Zylinderinnendurchmesser 140 mm und der Kolbenhub 203 mm betragen. In den Zylinder und in den Kolbenkopf ist je ein Fenster aus Pyrexglas eingesetzt. Der Durchmesser des zuerst genannten Fensters beträgt 130 mm (wegen des Fensterrahmens beträgt der Durchmesser des Gesichtsfeldes 110 mm), die Dicke des Glases beträgt 32 mm und an der Oberfläche des Glases hat man Skalenstriche im Abstand von 1 mm voneinander angebracht. Das zuletzt genannte Fenster hat einen Durchmesser von 120 mm (Gesichtsfelddurchmesser 93 mm), die Dicke des Glases beträgt 26 mm und an der rückwärtigen Fläche hat man eine dünne Überzugsschicht (eine dünne Azetatüberzugsschicht) aufgeklebt, deren Aufgabe es ist, das Licht zu diffundieren, Der Kolben hat eine langgestreckte hohle Form, an seinem rechten Ende ist eine Kolbenstange befestigt. Im Innern des Kolbenhohlraumes sind unter 45°

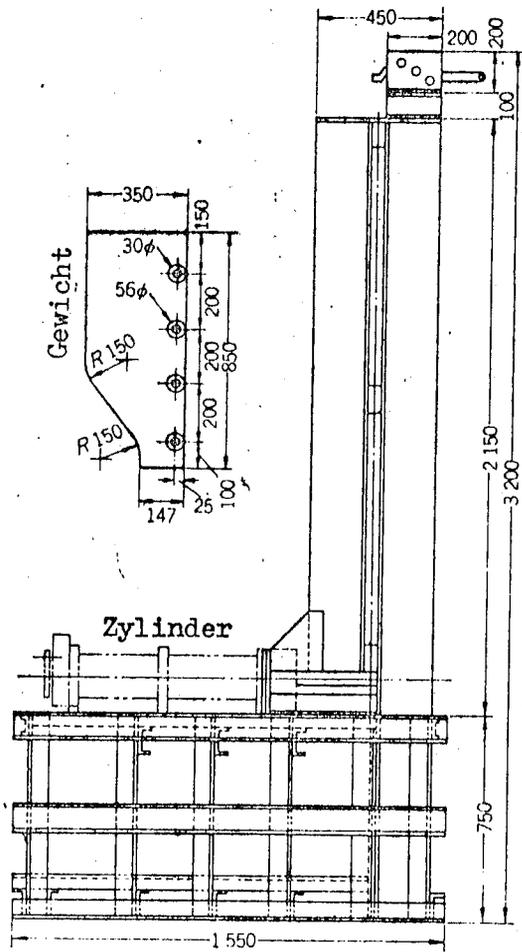


Abb. 1 Gesamtansicht des Gestelles der Schnellkomprimierungsmaschine

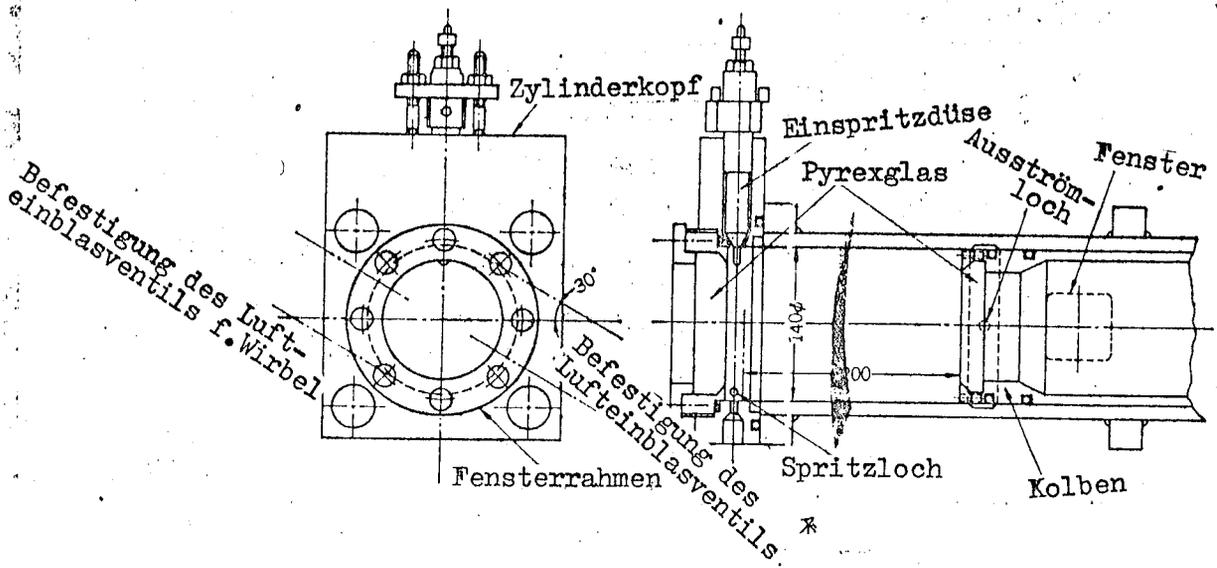


Abb. 2 Das Zylindersystem

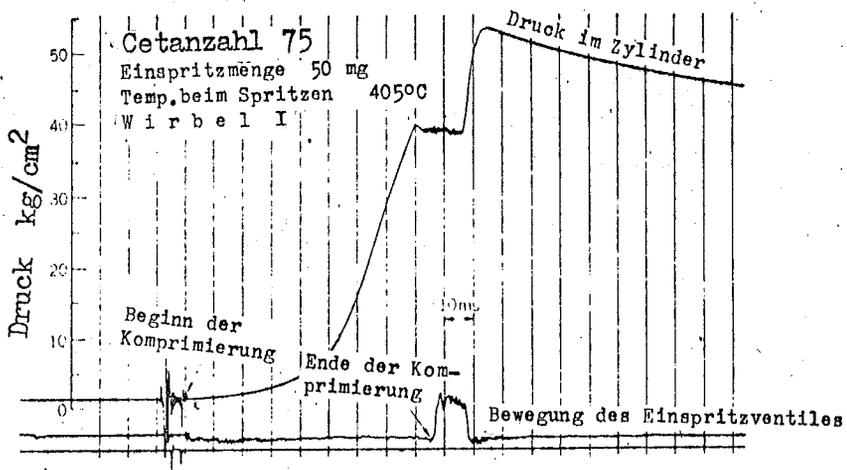


Abb.3 Ein Beispiel des Druckdiagrammes

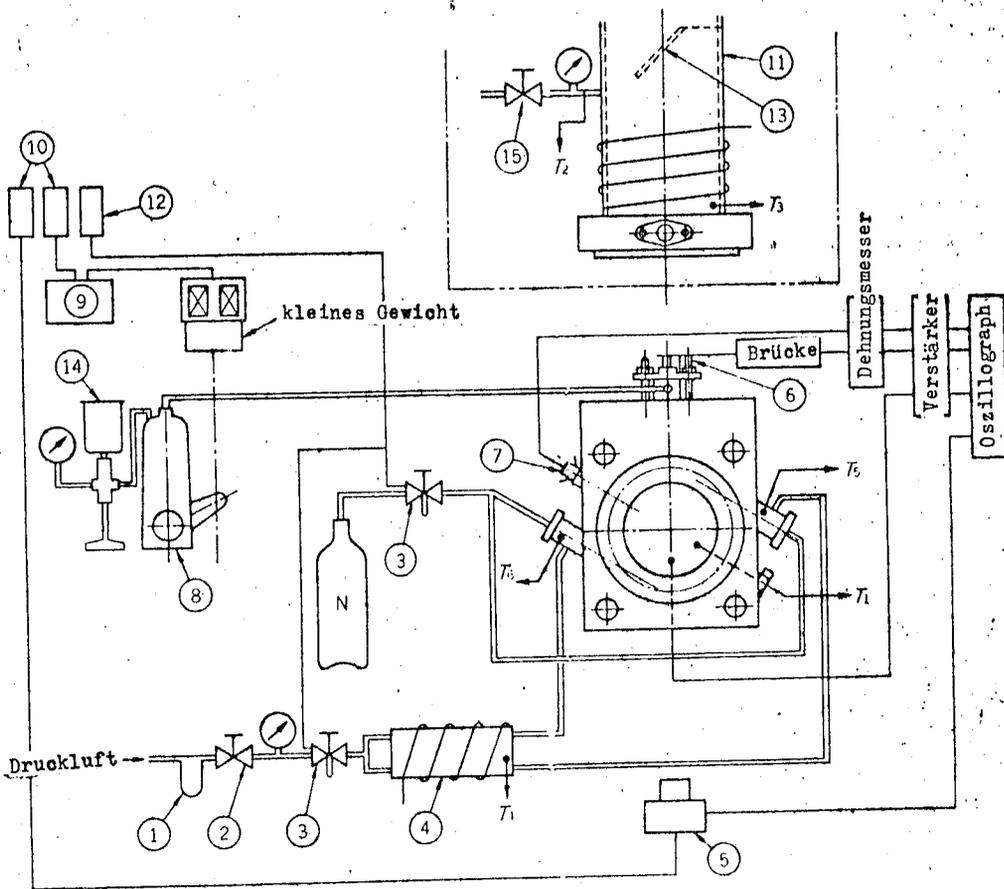


Abb.4 Schematische Darstellung

zur Zylinderachse geneigt Planspiegel auf Unterlagen befestigt, und gegenüber diesen Spiegeln kann der Kolben um seinen Hub frei bewegt werden. An der Vorderseite der Bildfläche ist eine starke Lichtquelle (eine Xenonlampe von 5 kW) angebracht und an der vorderen Seitenwand des Zylinders befindet sich ein in der Abbildung 4 mit (11) bezeichnetes lichtdurchlassendes Fenster. Das Licht gelangt von der Lichtquelle in das lichtdurchlassende Fenster, wird von dem Spiegel reflektiert und trifft so auf die Lichtdiffusionsüberzugsschicht auf. Wenn wir also von der Seite des sich außerhalb des Zylinderkopfes befindenden Kamera her hineinschauen, dann kommt eine helle ebene Fläche zustande und diese Fläche bildet den Hintergrund für die spätere Flamme. Die Schnellkomprimierung kommt in der nachstehend beschriebenen Weise zustande. In der Mitte des in der Abbildung 1 dargestellten Montagerahmens befindet sich ein Hohlraum, welcher als Führung dient, wenn man das auf der linken Seite dieser Abbildung dargestellte Gewicht (Dicke 100 mm, Gewicht ca. 200 kg) herabfallen läßt. Da am rechten Ende der Kolbenstange eine Rolle befestigt ist (Rollen befestigt sind?), wirkt die linke untere Seitenfläche des Gewichtes beim Herabfallen als Nocken, so daß die Luft in der Verbrennungskammer sehr schnell komprimiert wird. Die Abbildung 3 zeigt ein Beispiel der Änderung des Druckes, dabei beträgt die Komprimierungszeit ungefähr 80 ms. Nach der Komprimierung treten Kolbenschwingungen (oder Gasdruckschwingungen) auf, nach dem Komprimieren ist jedoch die linke obere Seite des Gewichtes eine senkrechte Fläche und aus dem Zusammenhang zwischen der Einwirkung des Gasdruckes auf diese Fläche und der Reibungskraft der Kolbendichtung konnten die Schwingungen auf das Ausmaß zurückgedrängt werden, welches wir in

der Druckverlauflinie des genannten Diagrammes sehen. Da man als Kolbendichtung O-Ringe verwendet hat, war ein Durchlecken der Luft auf ein nicht mehr feststellbares Ausmaß zurückgedrängt. Der Abfall auf der rechten unteren Seite des Druckdiagrammes nach der Beendigung der Komprimierung läßt sich also durch den Wärmeverlust erklären. Unmittelbar nach der Einspritzung kommt auch ein erneuter von der latenten Verdampfungswärme herrührender Druckabfall hinzu. Die Lage, in der man den Zylinder auf dem Rahmengestell befestigt hat, kann geändert werden, und dadurch kann man auch das Komprimierungsverhältnis ändern. Bei den nachstehend beschriebenen Versuchen hat man ein Komprimierungsverhältnis von 14.9 genommen, dabei betrug die Dicke der Verbrennungskammer 15 mm. Die wichtigsten Daten haben wir in der Tafel 1 zusammengestellt.

Auf der Verbrennungskammerseite des Zylinders hat man auf dem äußeren Umfang einen elektrischen Heizdraht aufgewickelt, so daß man die sich im Innern befindende Luft vorwärmen konnte. An 2 Stellen des Zylinderkopfes hat man der Wirbelbildung dienende Lufteinblaslöcher (8 mm Durchmesser) in tangentialer Richtung vorgesehen, und am hinteren Ende des Zylinders hat man Luftausströmlöcher (16 mm Durchmesser) vorgesehen.

Im folgenden wollen wir nun anhand der Abbildung 4 im einzelnen darlegen, wie wir bei unseren Versuchen vorgegangen sind. Zuerst erzeugt man in der sich im Zylinder befindenden Luft einen Wirbel. Die von einem Kompressor kommende Luft geht durch ein Filter (1) und ein Druckregelventil (2) hindurch und gelangt über einen Beheizungsapparat (4) durch die beiden oben erwähnten Lufteinblaslöcher in den Zylinder, aus dem sie dann durch die Luftausströmlöcher wieder aus-

Tafel 1

Die wichtigsten Daten

Zylinderinnendurchmesser	140 mm
Hub	203 mm
Verbrennungskammervolumen	225 cm ³
Kompressionsverhältnis	14.9
Druck beim Beginn der Komprimierung	ungefähr 1.5 ata
Druck beim Ende der Komprimierung	ungefähr 40 ata
Düsenlochdurchmesser (Einlochdüse)	0.25 mm
Düsenventilöffnungsdruck	120 ata

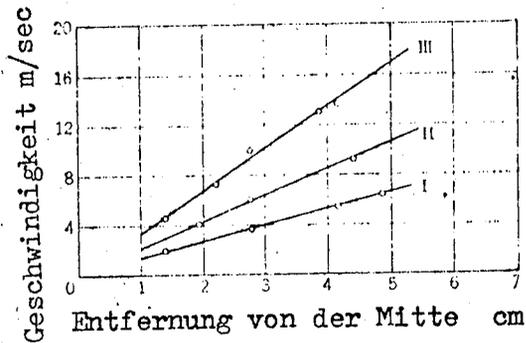


Abb.5 Die Geschwindigkeitsverteilung der Umlaufluftströmung

strömt. Im Zusammenhang mit der Erzeugung eines Wirbels durch das Ausblasen von Luft, ist es besonders günstig, wenn wir dabei den Druck im Zylinder etwas höher machen als den atmosphärischen Druck. Für die nachstehend beschriebenen Versuche haben wir, wie dies auch aus der Tafel 1 hervorgeht, durchweg einen Druck von ungefähr 1.5 ata genommen. Die Stärke des Wirbels wird mit Hilfe von ② geregelt. Dabei wird die Lufttemperatur mit Hilfe der Thermoelemente T_1 und T_2 gemessen, die Anzeige dieser beiden Thermoelemente war stabil und außerdem hat man abgewartet, bis diese beiden Lufttemperaturwerte nahezu gleich wurden. Sodann sorgt man dafür, daß sich in der Kraftstoffeinspritzleitung der Druck auf 50 atm im voraus eingestellt hat, und dann läßt man das Gewicht herunterfallen. Wenn das Gewicht herunterfällt, wird der Mikroschalter ⑩ (der Endschalter?) eingeschaltet, die Kraftstoffpumpe ⑧ und die Schnellkamera ⑤ (HICAM, bei unseren Versuchen war die Schnellkamera auf ungefähr 5000 Aufnahmen/Sekunde eingestellt) laufen an. Was jedoch die zuerst genannte Pumpe anbelangt, so wird ihr eine Zeitdifferenz mit Hilfe eines Verzögerungsschaltkreises ⑨ mitgeteilt, das in der Abbildung dargestellte kleine Gewicht läßt man mit Hilfe einer diamagnetischen Kraft herunterfallen, es schlägt auf den Arm der Pumpe auf und unmittelbar nach der Luftkomprimierung wird der Kraftstoff jeweils nur einmal eingespritzt. Bei der Betätigung des Mikroschalters (Endschalters) ⑩ wird das elektromagnetische Ventil ③ in Tätigkeit gesetzt und die Wirbellufteinblasöffnung wird geschlossen. Die Luftausströmöffnung ist bereits durch die Kolbenverschiebung an ihren Rändern abgesperrt worden. (Die Luftausströmöffnung ist bereits durch die Kanten des sich verschiebenden Kolbens abgesperrt worden?). Andererseits

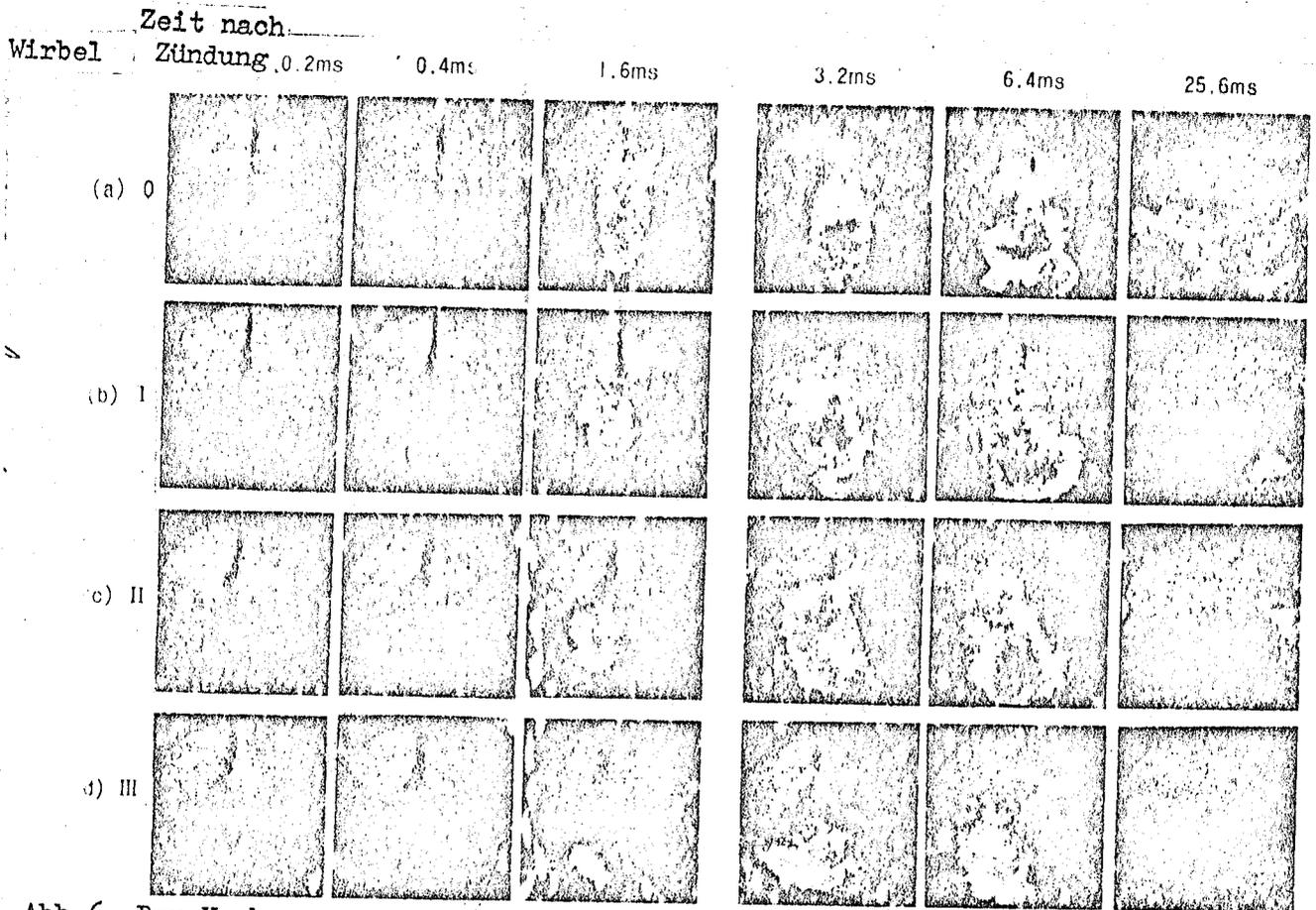


Abb.6 Der Verbrennungsvorgang Cetanzahl 50, Einspr.Mg.50 mg Lufttemp.b.Einspr. 500°C

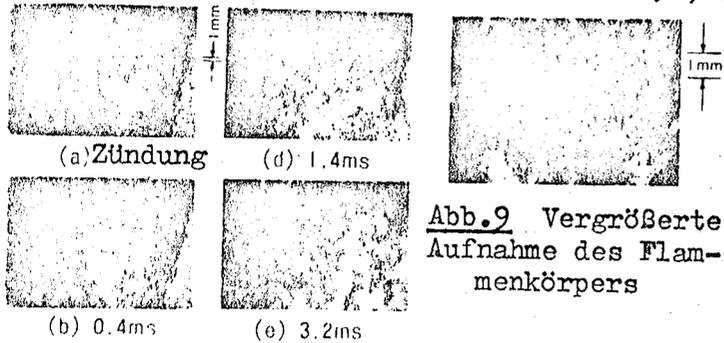
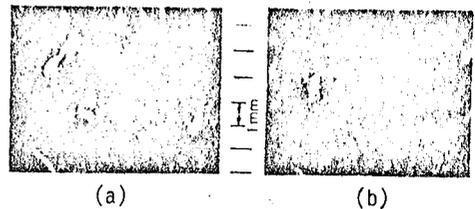


Abb.9 Vergrößerte Aufnahme des Flammkörpers



0,9 ms nach (a)

Abb.10 Öltröpfchenverbrennung

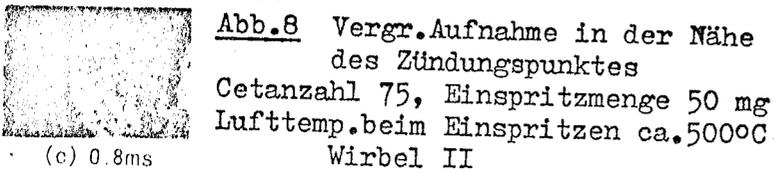
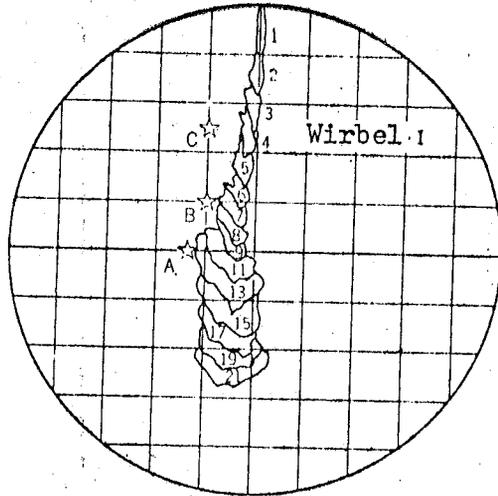
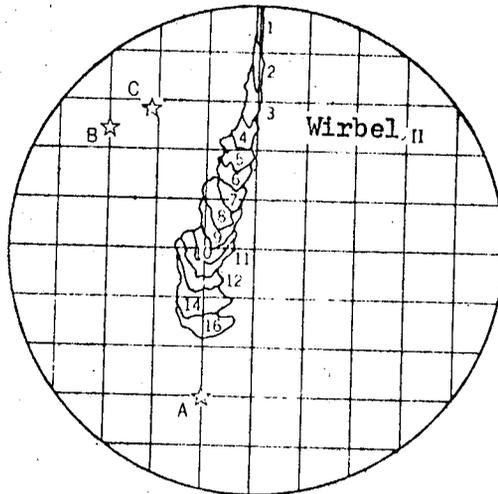


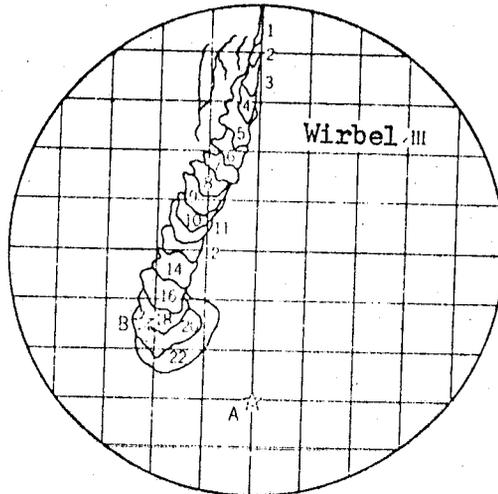
Abb.8 Vergr.Aufnahme in der Nähe des Zündungspunktes
Cetanzahl 75, Einspritzmenge 50 mg
Lufttemp.beim Einspritzen ca.500°C
Wirbel II



(a) A=397°C, B=463°C, C=498°C



(b) A=393°C, B=438°C, C=488°C



(c) A=461°C, B=483°C

Abb. 7 Das Wachsen des Spritznebels und die Zündstellen (die schwarzen Punkte sind die Zündstellen, durch A, B und C sind die Stellen gekennzeichnet, an denen jeweils die Temperatur der Luft beim Einspritzen gemessen wurde).

wird durch ein Signal des Mikroschalters (10) der elektromagnetische Oszillograph in Tätigkeit gesetzt und der Druck in der Verbrennungskammer wird durch den Indikator (7) aufgezeichnet. Die Einspritzzeit (der Einspritzzeitpunkt?) (die Einspritzperiode?) wird als Bewegung des Nadelventiles durch einen Dehnungsmesser abgegriffen.

3. Die Versuchsbedingungen

Bei den Versuchen hat man die einzelnen Größen, nämlich die Cetanzahl des Kraftstoffes, die Einspritzmenge, die Lufttemperatur bei der Einspritzung und die Stärke des Wirbels geändert. Diese Änderung soll im folgenden für die einzelnen Größen erklärt werden.

(1) Die Cetanzahl des Kraftstoffes

Als Kraftstoff hat man eine Mischung von Cetan und α -Methylnaphthalin verwendet und man hat die Versuche für die 3 Cetanzahlen 75, 50 und 25 durchgeführt.

(2) Die Kraftstoffeinspritzmenge

Die Versuche wurden mit 2 verschiedenen Kraftstoffeinspritzmengen, nämlich mit 50 mg und mit 25 mg ausgeführt. Die Messung dieser Menge wurde im voraus an der Außenatmosphäre durch Absorption in Baumwolle (mit Baumwolle?) ausgeführt und auch während der Versuche hat man hypothetisch angenommen, daß eine Reproduzierbarkeit vorhanden ist.

(3) Die Lufttemperatur bei der Einspritzung

Wie bereits oben dargelegt wurde, ist eine elektrische Beheizung der äußeren Umfangswand des Zylinders möglich, und im Falle der Mitteilung eines Wirbels kann die Temperatur der zugeführten Luft geändert werden; indem man gleichzeitig beides anwendet, kann man die Temperatur der Luft am Ende der Komprimierung ändern. Diese Temperaturen wurden

durch die nachstehend beschriebenen Vorversuche bestimmt. Ungefähr in die Mitte der Verbrennungskammer führte man ein 13% Platin-Platinrhodium-Thermoelement von $20\mu\text{mm } \phi$ ein und maß den Temperaturverlauf ohne daß eine Kraftstoffeinspritzung erfolgte. In der Nähe des Maximalwertes der Temperatur nahm man die Lufttemperatur bei der Einspritzung und machte die hypothetische Annahme, daß auch bei unseren Versuchen eine Reproduzierbarkeit vorhanden ist.

(4) Die Stärke des Wirbels

Zunächst spannte man im Innern der Verbrennungskammer in der Richtung des Durchmessers einen Chromnickeldraht, auf welchen man zuvor ein Gemisch aus Paraffin und Leichtöl dünn aufgetragen hatte. Sodann blies man die für die Wirbel bestimmte Luft, welche die Temperatur der Verbrennungskammer besaß, ein und ließ sie durch die Luftausströmöffnung ausströmen, und man stellte auf diese Weise in dem Zylinder eine im wesentlichen stationäre Umluftströmung her. In diesem Zeitpunkt führte man, ohne daß man Kraftstoff einspritzte, die schnelle Komprimierung aus. Unmittelbar nach der Beendigung der Komprimierung ließ man in dem Chromnickeldraht einen starken elektrischen Strom fließen. Infolge der plötzlichen Erwärmung gingen von dem Draht winzig kleine Öltröpfchen und Rauch aus. Diesen Rauch nahm man mit der Schnellkamera auf und maß dabei die Geschwindigkeitsverteilung in der radialen Richtung. Dabei ergab sich, daß die Strömung durch die nahezu erzwungenen Wirbel die Form eines starren Körpers hatte. In der Nähe der Wandfläche war wegen des Fensterrahmens eine Beobachtung nicht möglich. Die so gemessenen Ergebnisse sind in der Abbildung 5 dargestellt.

In dieser Abbildung ist die Lage des vorderen Düsenendes (5 cm) durch eine strichpunktierte Linie dargestellt. Unsere nachfolgenden Versuche haben wir für den Fall ohne Wirbelmitteilung (Wirbel 0) und für die in der Abbildung mit I, II und III angedeuteten Fälle durchgeführt. Der Wirbel wurde zwar mit der Zeit gedämpft, die Abbildung 5 zeigt jedoch die Verteilung in dem Zeitpunkt, welcher dem Zeitpunkt der Einspritzung entspricht. Wenn man die Lufttemperatur höher macht, dann ist zu erwarten, daß auch der Einfluß einer Erhöhung der Viskosität hinzukommt. Um die Zuverlässigkeit der gemessenen Werte einschließlich dieser Einflüsse nachzuprüfen, haben wir hinterher die Geschwindigkeit des Zündungspunktes aus der Entfernung der eingeblasenen Luftströmung ermittelt, wie dies in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt ist, dabei stellten wir jedoch eine gute Übereinstimmung fest und wir haben uns davon überzeugt, daß zumindest bis zum Zündzeitpunkt die in der Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse verwendet werden können.

4. Die Versuchsergebnisse

4.1 Die Ergebnisse der fotografischen Aufnahme

Die Farbaufnahmen auf der Umschlagseite dieser Zeitschrift zeigen die Abbildungen 6(a), (b), (c) und (d); diese Bilder haben wir für die Fälle der Mitteilung von 4 verschiedenen Wirbeln, nämlich 0, I, II und III aufgenommen bei einer Cetanzahl des Kraftstoffes von 50, einer Einspritzmenge von 50 mg und einer Temperatur der Luft bei der Einspritzung von 500°C. Die Verzögerungszeit von der Einspritzung bis zur Zündung haben wir getrennt davon in der Abbildung 10 dargestellt, dort sehen wir den Verlauf der Verbrennung in dem jeweils vom Zündzeitpunkt an gemessenen Zeitabschnitt. Der helle Hintergrund ganz am Anfang der fotogra-

fischen Aufnahme ist der Glasfensterrahmen des Kolbenkopfes und die außenseitige Kontur, die wir in der letzten Hälfte sehen, ist die Kontur des Glasfensterrahmens des Zylinderkopfes.

Die Abbildung 7 zeigt eine Skizze des Wachstumes des Spritznebels. In dieser Abbildung haben wir den Vorgang des Wachstumes des Spritznebels, nachdem er aus der Düse herausgekommen ist, innerhalb von jeweils 0.2 ms aufgezeichnet, je weiter wir in der Abbildung nach unten gehen, umso mehr sind natürlich die Konturen des Spritznebels verwischt. Die in der Abbildung durch Sternchen angedeuteten Punkte sind die Punkte der 1. Zündung (sie sind nicht beschränkt auf den Kern der Hauptverbrennung), mit A, B und C haben wir die jeweilige Lage der Zündung für den Fall der Änderung der Lufttemperatur ausgedrückt, die Lufttemperatur bei der Einspritzung geht aus der nachstehend beschriebenen Abbildung hervor.

Bei dem in der Abbildung 8 farbig dargestellten Fall des Wirbels 2 würde nach dem Moment der Zündung eine vergrößerte Aufnahme gemacht.

Den oben besprochenen Abbildungen können wir folgendes entnehmen: Wenn gar kein Wirbel da ist, wie dies in der Abbildung 6(a) dargestellt ist, dann haben wir am vorderen Ende des Spritznebels keine Zündung und die Zündung tritt erst im Verlauf der Weiterbewegung des Spritznebels an dessen Umfangsrand auf. Wie man sieht, wird die Zündung nach beiden Seiten des Spritznebels und in der Hauptsache nach seinem vorderen Ende hin sehr schnell fortgepflanzt und es bildet sich so ein Flammenkörper. Im allgemeinen ist der Umfangsrand des Spritznebels derjenige Ort, an

welchem die meisten winzig kleinen Öltröpfchen vorhanden sind, und wenn wir uns vorstellen, daß es sich hier um die Öltröpfchen handelt, welche aus der Hauptströmung zurückgeblieben sind und nun schnell verdampfen und daß es andererseits hier sehr häufig zum Zusammentreffen dieser Öltröpfchen mit dem Sauerstoff kommt, dann können wir uns von dem oben Dargelegten unschwer ein Bild machen.

Wenn wir jedoch einen Wirbel mitteilen, dann erfährt dieser Zustand eine gewisse Änderung. Im Falle des in den Abbildungen 6(b) und 7(a) dargestellten Wirbels I hat man durch den Wirbel die oben erwähnten winzig kleinen Öltröpfchen in Strömung versetzt und den Punkt der Zündung von dem Spritznebelströmungskörper getrennt. Je höher jedoch die Lufttemperatur war, umso näher rückte der Zündungspunkt (der Entflammungspunkt?) an die Düse heran. Dies bedeutet, daß dieser Zündpunkt durchaus nicht immer darauf beschränkt ist, daß er zum Kern des Flammenkörpers wird (daß er im Kern des Flammenkörpers liegt?). Da dieser Teil, je stärker der Wirbel ist, umso weiter von der Spritznebelströmung entfernt ist, wird er nur selbst brennen und der Flammenkörper wird erst hinterher gebildet, indem ein 2. Zündungspunkt in der Nähe der abgesonderten (?) Spritznebelströmung zum Kern der Zündung wird.

Die Abbildung 8 zeigt den Fall des Wirbels II (Cetanzahl 75); aus dieser Abbildung erkennen wir, daß der allererste Zündungspunkt ein Sammelkörper von schmalen Flammenzungen ist. Wir sehen also, daß die von dem Spritznebelströmungskörper her in Strömung versetzten in die heiße Luft hinein diffundierten, winzig kleinen Öltröpfchen, nachdem sie augenblicklich verdampft sind, in großer Zahl gezündet

werden und so zu dünnen Flammzungen werden. Viele von den Öltröpfchen tragen einen sie umhüllenden Flammenmantel, so daß man die Öltröpfchenverbrennung garnicht sehen kann. Wenn der Wirbel dann noch stärker wird, wie wir dies in der Abbildung 6(d) sehen, dann werden viele Ansammlungen von Dampfwölkchen der Erstzündungspunkte sehr schnell verdünnt und gelangen nicht zur Zündung, während wieder andere dieser Dampfwölkchenansammlungen zu Erstzündpunkten werden und eine Flamme erzeugen. Dadurch wird bewirkt, daß die Entzündungsverzögerungszeit noch ein wenig weiter ausgedehnt wird. Die oben dargelegte Beobachtung zeigt deutlich, daß der Fall, wo die Spritznebelströmung weitgehend einteilig ist, von dem Fall, wo man benachbarte Spritznebelströmungen, wie etwa bei einer Mehrlochdüse, hat, wegen des Hinzukommens der gegenseitigen Einwirkung natürlich gewisse Verschiedenheiten aufweisen dürfte.

Die Abbildung 9 ist ein Farbphoto auf der Umschlagseite dieses Heftes, welches für den Fall des Wirbels 0 den stabförmigen Flammenkörper verhältnismäßig nahe bei der Düse in einer noch stärkeren Vergrößerung zeigt. Da das Licht der Flamme ungewöhnlich viel stärker ist als das durchfallende Licht, so ist der Aufbau des Flammenkörperteiles nicht gut zu erkennen, wenn wir jedoch auch die anderen vergrößerten Aufnahmen zum Vergleich heranziehen, sehen wir deutlich, daß der größte Teil des Flammenkörpers nicht etwa durch eine Ansammlung einer Vielzahl verbrennender Öltröpfchen gebildet wird, sondern daß der durch Verdampfung entstandene Dampf sich angesammelt hat und daß wir eine diffuse Verbrennung einer turbulenten Strömung haben. Nachdem der größte Teil zu Ende gebrannt hat, haben wir, wie dies in der Farbaufnahme der Abbildung 10 zu sehen ist,

eine Restverbrennung, bei welcher die größeren Öltröpfchen von einer Flamme umhüllt sind. Die in der Abbildung 10 gezeigte Farbaufnahme wurde an der gleichen Stelle aufgenommen wie die Farbaufnahme der Abbildung 9. Wenn auf diese Weise die verhältnismäßig großen Öltröpfchen von einer ausreichend großen Menge von Sauerstoff umhüllt werden und brennen, dann haben wir eine Öltröpfchenverbrennung (Burgoyne u.a. nehmen für den Fall von Tetralin an, daß man die Verbrennung von Öltröpfchengruppen in der Größe von weniger als $10\ \mu\text{m}$ ohne weiteres als eine Gasverbrennung ansehen kann).

Ganz allgemein kann man sagen, daß das, was die intermittierende Spritznebelverbrennungsflamme aufbaut, sowohl eine Öltröpfchenverbrennung wie auch eine Gasverbrennung genannt werden kann, man kann jedoch nicht die Mitte der Spritznebelflamme, in der nur ganz wenig Sauerstoff vorhanden ist und in der die räumliche Dichte der Öltröpfchen sehr hoch ist, einerseits und die äußeren Randteile der Spritznebelflamme, wo sehr viel Sauerstoff vorhanden ist und wo die Dichte der Öltröpfchen sehr niedrig ist, andererseits als eines und dasselbe betrachten, und es ist auch zu erwarten, daß die anfänglich zerstreuten Öltröpfchengruppen um die nachher herauskommenden Öltröpfchengruppen voneinander verschieden sind, da also sowohl räumlich wie auch zeitlich die Zustände verschieden sind, kann man nicht ganz allgemein und überschlägig ein entscheidendes Urteil fällen. Heute stellt man sich sehr häufig auf den Standpunkt, daß die Flamme eine Ansammlung von Tröpfchenverbrennungen darstellt, insbesondere bei einem Flammenkörper sieht die Sache so aus, daß der Charakter des turbulenten diffusen Verbrennens des Kraftstoffdampfes im

Laufe der Zeit allmählich stärker in den Vordergrund tritt als die zuerst genannte Tröpfchenverbrennung.

Im folgenden wollen wir nun die Ergebnisse beschreiben, welche wir bei der Beobachtung des Rußes gewonnen haben.

In den Farbaufnahmen am jeweils rechten Ende der Abbildung 6 sehen wir bei (a), daß in der Glasscheibe sich sehr viel Ruß festgesetzt hat, daß jedoch, obwohl die Dicke der Verbrennungskammer ganz gering ist und nur 15 mm beträgt, bei (d) sich nahezu überhaupt kein Ruß abgesetzt hat. Hieraus sehen wir also deutlich, daß, wenn wir einen Wirbel mitteilen, dadurch die Rußentstehung ganz erheblich reduziert wird. Bei den fotografischen Aufnahmen der Flamme können wir zwar nicht mit Sicherheit behaupten, daß es sich bei den schwarzen Teilen in der Mitte um Ruß handelt, bei der Flamme von (d) jedoch können wir auch aufgrund der Beobachtung von außen her sagen, daß es dort doch wohl so gut wie keinen Ruß gibt. Die Tendenz, die wir erkennen, wenn wir auch die anderen fotografischen Aufnahmen zum Vergleich heranziehen, geht dahin, daß mit zunehmender Einspritzmenge und mit höher werdender Lufttemperatur sowie mit niedriger werdender Cetanzahl die Rußbildung zunimmt.

Im folgenden wollen wir nun die aus der Anschauung der fotografischen Aufnahmen gewonnenen quantitativen Ergebnisse besprechen.

4.2 Die Zündverzögerung

In den fotografischen Aufnahmen haben wir die Verzögerungszeit bis nach der Einspritzung der Zündungspunkt entsteht, gemessen und die Meßergebnisse in der Abbildung 11 dargestellt. Diese Abbildung zeigt für die verschiedenen Cetanzahlen bei Änderung des Wirbels und der Einspritzmenge im

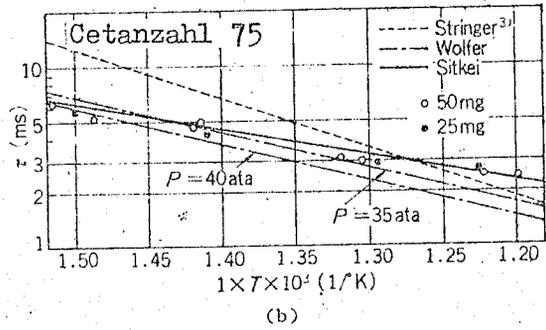
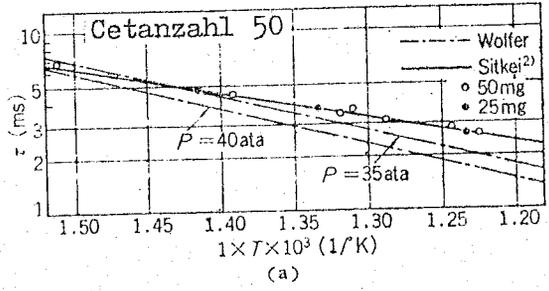
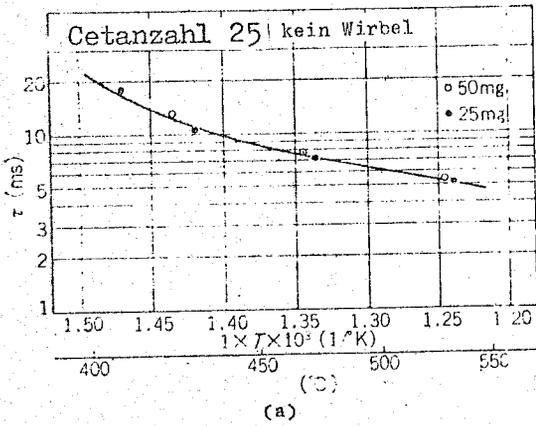


Abb. 12 Die Zündverzögerung

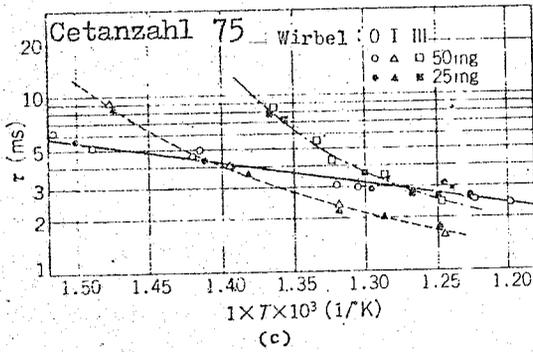
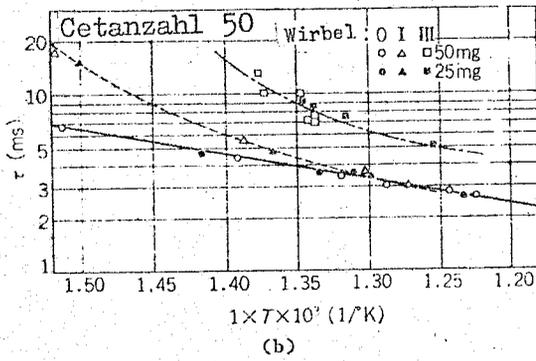


Abb. 11 Die Zündverzögerung

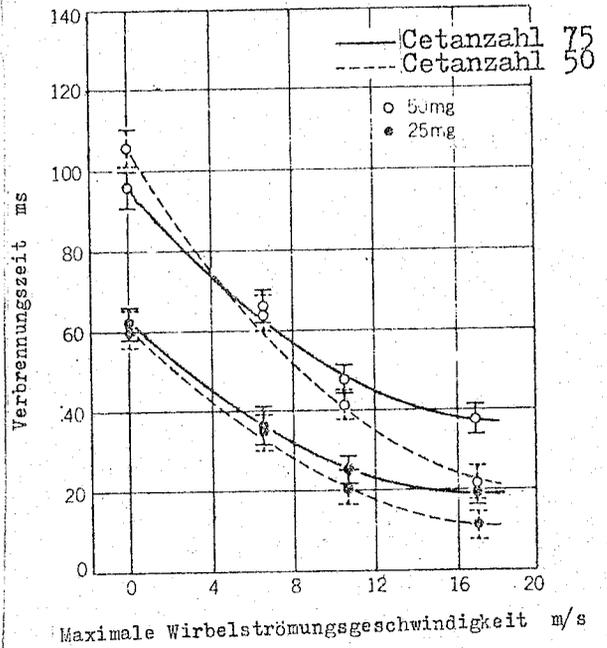


Abb. 13 Die Verbrennungszeit

logarithmischen Maßstab die Zündverzögerung τ aufgetragen über der Lufttemperatur bei der Einspritzung. Aus dieser Abbildung gewinnen wir die nachstehenden Erkenntnisse. (1) Es ist zwar allgemein bekannt, daß mit steigender Temperatur τ logarithmisch abnimmt, wenn wir jedoch die in der Abbildung dargestellten Ergebnisse näher betrachten, stellen wir fest, daß insbesondere bei Vorhandensein eines Wirbels sich eine gewisse Abweichung von der logarithmischen Funktion zeigt. (2) Auch dann, wenn wir die Einspritzmenge ändern, ändert sich τ nahezu überhaupt nicht. (3) Wenn man einen Wirbel mitteilt, ist bei (b) zwar die Tendenz einer Zunahme von τ vorhanden, bei den höheren Cetanzahlen jedoch wird τ mit steigender Lufttemperatur kürzer. Diese Umkehrtemperatur zeigt die Tendenz, daß sie umso höher wird, je stärker der Wirbel ist und je niedriger die Cetanzahl ist.

Die Abbildung 12 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse, die man bei dem Wirbel 0 erhalten hat, mit den Ergebnissen der Versuche und der Versuchsgleichungen anderer Forscher. Aus dieser Abbildung ersehen wir, daß unsere Ergebnisse sehr gut mit den Ergebnissen von Sitkei übereinstimmen.

4.3 Die Verbrennungszeit

Die Abbildung 13 zeigt die Zeit, welche von der Zündung bis zum Erlöschen der Flamme verstreicht. Die in dieser Abbildung durch Striche über den Meßwerten und Striche unter den Meßwerten angegebene Ausschlagstrecke zeigt die Streuung der Meßwerte. Tatsächlich ist doch wohl zu erwarten, daß diese Werte, wenn die Daten des Spritznebels, wie etwa der mittlere Tröpfchendurchmesser, die Tröpfchendurchmesser-Verteilung usw. nicht festgelegt und vorgeschrieben sind, nicht als quantitative Werte bezeichnet werden können, in

qualitativer Hinsicht jedoch sehen wir in dieser Abbildung deutlich die Tendenz, daß bei stärker werdendem Wirbel die Verbrennungszeit erheblich verkürzt wird, und daß bei höher werdender Cetanzahl die Zündverzögerung zwar kürzer wird, die Verbrennungszeit jedoch umgekehrt länger wird.

Es ist zwar zu vermuten, daß die Verbrennungszeit wahrscheinlich auch sehr stark von dem mittleren Tröpfchendurchmesser abhängt, über diesen Punkt wollen wir jedoch in der Zukunft eine weitere Forschungsarbeit durchführen.

5. Schlußwort

Mit Hilfe einer versuchsweise hergestellten Schnellkomprimiermaschine hat man die Möglichkeit geschaffen, den Vorgang der Verbrennung vom Augenblick der Zündung des Kraftstoffspritznebels bis zum Erlöschen der Flamme vor einem hellen Hintergrund mit einer Schnellkamera vergrößert aufzunehmen und die dabei beobachteten Erscheinungen im einzelnen zu untersuchen. Hierbei handelte es sich um Verbrennungsversuche in einem Behälter mit konstantem Volumen, bei denen man ein Einlocheinspritzventil benützte; die dabei erhaltenen Ergebnisse kann man zwar nicht ohne weiteres auf den Fall eines Dieselmotors ausdehnen, es ist jedoch zu erwarten, daß es eine ganze Reihe ähnlicher Punkte bei den hier beschriebenen Versuchen und beim wirklichen Dieselmotor gibt.

Die erhaltenen Ergebnisse sind in dem vorliegenden Text zwar im einzelnen dargelegt worden, es sollen jedoch die nachstehenden Punkte noch einmal besonders hervorgehoben werden. (1) Die Zündung erfolgt auf dem Wege der Spritznebelströmung, und sie pflanzt sich sehr schnell vom Oberlauf zum Unterlauf der Spritznebelströmung fort. Wenn ein

Wirbel vorhanden ist, dann erfolgt die Zündung an einer Stelle des Unterlaufes der Spritznebelströmung. (2) Der nach der Zündung vorhandene Flammenkörper kann weniger als eine Ansammlung von vielen Verbrennenden Öltröpfchen bezeichnet werden, man kommt der Sache offenbar näher, wenn man diesen Flammenkörper als die diffuse Flamme einer turbulenten Strömung ansieht, in welcher sich der aus vielen Öltröpfchen verdampfte Dampf zu einer einzigen Dampf- wolke zusammengefunden hat. In den Fällen jedoch, wo wir eine äußerst kleine Einspritzmenge haben und wo wir an den äußeren Randgebieten ausreichend viel Luft haben, so daß dort sehr große Öltröpfchen in allen Richtungen verteilt herumfliegen, besitzen diese Öltröpfchen je einzeln für sich ihre Umhüllungsflammen und verbrennen so.

Zum Schluß unserer Arbeit wollen wir nicht versäumen, allen Herren, die durch wertvolle Hinweise oder durch tatkräftige Unterstützung bei unseren Versuchen mitgeholfen haben, unseren herzlichsten Dank auszusprechen.

Literaturhinweise

- 1) Aus der Literatur über die verschiedenen Schnellkomprimierungsmaschinen soll als Beispiel genannt werden:
W.S.Affleck, A.Thomas: P.IME, Vol.183, Pt.1,Nr.19, 365 (1968-69). Bei der hier beschriebenen Maschine verfolgte man den Zweck für den Fall der adiabatischen Komprimierung eines Vorgemisches die Reaktion vor der Zündung zu untersuchen. Im Gegensatz hierzu wurde die Verbrennung im Dieselmotor untersucht von A.Pischinger, F.Pischinger: MTZ, 20-1, 1959-60.
- 2) G.Sitkei u.a.: Die Kraftstoffeinspritzung und die Verbrennung im Dieselmotor, Asakura-Verlag (1966).
- 3) F.W.Stringer, A.F.Clark, J.S.Clark: Diesel Engine Combustion-Symp., IME-London (1970).