

000918

92

**Das Aufspritzen des Kraftstoffes  
im Dieselmotor**

**Dr.-Ing. Kurt Blume VDI**  
Maschinenlaboratorium  
der Technischen Hochschule Dresden  
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlig VDI)

**Zündverzugsmessung mittels Photozellen  
in verschiedenen Wellengebieten**

**Dr.-Ing. Karl Stallechner VDI**  
Laboratorium für Wärmekraftmaschinen  
und Thermodynamik  
der Technischen Hochschule München  
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. W. Nußelt VDI)

1941

**Deutsche Kraftfahrtforschung**  
im Auftrag des Reichs-Verkehrsministeriums

**Heft 53**

**Das Aufspritzen des Kraftstoffes  
im Dieselmotor**

Dr.-Ing. Kurt Blume VDI  
Maschinenlaboratorium  
der Technischen Hochschule Dresden  
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Mehlig VDI)

**Zündverzugsmessung mittels Photozellen  
in verschiedenen Wellengebieten**

Dr.-Ing. Karl Stallechner VDI  
Laboratorium für Wärmekraftmaschinen  
und Thermodynamik  
der Technischen Hochschule München  
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. W. Nußelt VDI)

Bibliothek

der  
Polytechnische Alltagsgesellschaft  
Oberhausen-Holten

Eingetragen unter

Nr. 3888 202

1941

Die Arbeit „Das Aufspritzen des Kraftstoffes im Dieselmotor“ wurde von der Technischen Hochschule Dresden als Dissertation angenommen.

Ebenso ist die zweite Arbeit: „Zündverzugs-messung mittels Photozellen in verschiedenen Wellengebieten“ eine Dissertation, die von der Technischen Hochschule München genehmigt wurde.

Alle Rechte vorbehalten · Copyright 1940 by VDI-Verlag GmbH, Berlin NW 7

Printed in Germany · Druck: Triasdruck GmbH, Berlin SW 68

DW 862

# INHALTSVERZEICHNIS

## Das Aufspritzen des Kraftstoffes im Dieselmotor

Von Dr.-Ing. K. Blume VDI, Dresden

|     |                                                                 |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Einleitung                                                      | 1  |
| 2   | Versuchsanlage                                                  | 1  |
| 21  | Druckmessung                                                    | 1  |
| 22  | Temperaturmessung                                               | 2  |
| 23  | Zeitlupe                                                        | 4  |
| 24  | Einspritzsystem                                                 | 4  |
| 3   | Zündung und Verbrennung von Kraftstoffstrahlen in ruhender Luft | 4  |
| 31  | Aufbau des Kraftstoffstrahles                                   | 4  |
| 32  | Zündverzögerung                                                 | 5  |
| 33  | Verbrennungsgeschwindigkeit                                     | 8  |
| 34  | Durchbrennzeit                                                  | 12 |
| 35  | Zusammenfassende Betrachtung                                    | 14 |
| 4   | Aufspritzen des Kraftstoffes                                    | 14 |
| 41  | Durchführung der Versuche                                       | 14 |
| 42  | Einfluß der freien Strahllänge                                  | 14 |
| 421 | Große Strahllänge                                               | 14 |
| 422 | Kleine Strahllänge                                              | 16 |
| 43  | Zündung beim Aufspritzen                                        | 17 |
| 431 | Aufspritzen auf Wände von Kolbentemperaturen                    | 17 |
| 432 | Aufspritzen auf glühende Wände                                  | 18 |
| 44  | Verbrennung beim Aufspritzen                                    | 21 |
| 45  | Einfluß des Aufspritzwinkels                                    | 22 |
| 46  | Oberflächengestaltung und Strahlbildung                         | 24 |
| 47  | Wandberührung                                                   | 26 |
| 471 | Auftreffen flüssigen Kraftstoffes                               | 26 |
| 472 | Rückstandbildung                                                | 27 |
| 48  | Oberflächeneinfluß                                              | 28 |
| 5   | Zusammenfassung                                                 | 29 |
| 6   | Schriftumsverzeichnis                                           | 29 |

## Zündverzugs-messung mittels Photozellen in verschiedenen Wellengebieten

Von Dr.-Ing. K. Stallechner VDI, Ludwigshafen/Rhein

|     |                                                                       |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Einleitung                                                            | 31 |
| 2   | Einzelheiten der Versuchsdurchführung                                 | 32 |
| 21  | Versuchseinrichtung                                                   | 32 |
| 22  | Kathodenoszillograph mit Photozellenkreis                             | 33 |
| 23  | Photozellen und Farbfilter                                            | 34 |
| 24  | Ablauf eines Versuches                                                | 36 |
| 25  | Untersuchte Öle                                                       | 37 |
| 3   | Auswertung der Versuche                                               | 37 |
| 31  | Versuche mit deutschem Dieselmotorenöl                                | 38 |
| 311 | Versuchsergebnisse mit den Farbfiltern                                | 38 |
| 312 | Blendenversuche                                                       | 39 |
| 313 | Ergebnisse mit der rot empfindlichen Zelle und mit dem Quarzindikator | 40 |
| 32  | Versuchsergebnisse mit den fünf Gasölen                               | 42 |
| 4   | Zusammenfassung                                                       | 42 |
| 5   | Schriftumsverzeichnis                                                 | 43 |

# Übersicht über die verwendeten Formelgrößen

## in der Arbeit „Das Aufspritzen des Kraftstoffes im Dieselmotor“

|                                 |                                                                                                                       |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_L$ [atü]                     | Luftdruck in der Bombe bei Einspritzbeginn                                                                            |
| $\gamma_L$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Luftwichte bei Einspritzbeginn                                                                                        |
| $t_L$ [°C]                      | -Lufttemperatur in der Bombe bei Einspritzbeginn                                                                      |
| $t_W$ [°C]                      | Temperatur der Wand am Aufspritzpunkt                                                                                 |
| $z$ [10 <sup>-3</sup> s]        | Zündverzug, gerechnet vom Erscheinen des Kraftstoffes in der Bombe bis zum Auftreten der ersten Verbrennungsschlieren |
| $B$ [mg/Hub]                    | je Hub eingespritzte Kraftstoffmenge                                                                                  |
| $b$ [mg/°PW]                    | Einspritzgesetz (°PW = ° Pumpenwinkel, Stellung der Kraftstoffpumpenwelle)                                            |
| $A$ [—]                         | Aufteilungswert (Verhältnis des wirklichen zum idealen Mischungsverhältnis im Strahl)                                 |
| $Q_K$ [kcal]                    | mit dem Kraftstoff zugeführte Wärmemenge                                                                              |
| $G_L$ [kg]                      | Luftgewicht                                                                                                           |
| $V$ [m <sup>3</sup> ]           | Volumen der Bombe                                                                                                     |
| $c_v$ [kcal/kg°]                | spezifische Wärme der Luft                                                                                            |
| $R$ [m/°]                       | Gaskonstante                                                                                                          |

# Das Aufspritzen des Kraftstoffes im Dieselmotor

Von Dr.-Ing. K. BLUME VDI, Dresden<sup>1)</sup>

## 1 Einleitung

Der Verbrennungsvorgang im Dieselmotor wird von einer großen Zahl ineinandergreifender Einzelvorgänge gebildet, deren Aufklärung in der Gesamtheit unüberwindliche Schwierigkeiten bereitet. Die Forschung ist deshalb gezwungen, die Gesetzmäßigkeit eines jeden am Verbrennungsablauf beteiligten Einzelvorganges gesondert zu untersuchen, um mit den Ergebnissen dieser Teiluntersuchungen den Gesamtvorgang aufzuklären. So wurden die Untersuchungen der Dieseleinspritzung bisher fast ausschließlich auf die Erscheinungen an ungestörten Strahlen abgestellt. Die Anwendung der dabei gewonnenen Erkenntnisse auf den Motor konnte nur mit Einschränkungen erfolgen, da ungestörte Strahlen im Motor praktisch nicht vorkommen. Durch die kleinen Abmessungen des Verdichtungsraumes muß in jedem Falle damit gerechnet werden, daß der Kraftstoffstrahl, gegebenenfalls schon vor der Zündung, mit den Begrenzungsflächen des Brennraumes in Berührung kommt. Über den Einfluß, den dieser Vorgang auf Strahlbildung, Zündung, Gemischbildung und Verbrennung ausübt, waren bisher durch das Fehlen systematischer Untersuchungen nur sehr unsichere Annahmen möglich. Dieser Mangel ist besonders bei der Entwicklung raschlaufender Dieselmotoren für Fahrzeuge und Flugzeuge bemerkbar, da bei diesen Motoren durch die kleinen Abmessungen und die Unterteilung des Brennraumes die Vorgänge am Strahl in besondere Bahnen gelenkt werden.

Es wurden deshalb an der im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden befindlichen Verdichtungsbombe die im folgenden beschriebenen Untersuchungen über die Vorgänge beim Aufspritzen des Kraftstoffes bei der Dieseleinspritzung durchgeführt.

Der erste Hauptteil (Abschnitt 2) bringt die Beschreibung der Versuchsanlage und der Meßverfahren. Im zweiten Hauptteil (Abschnitt 3) sind die Ergebnisse der langjährigen Untersuchungen an Kraftstoffstrahlen in heißer Luft soweit dargestellt, wie sie zum Vergleich für die Vorgänge beim Aufspritzen erforderlich sind. Da diese Ergebnisse unter den gleichen Versuchsbedingungen gewonnen wurden wie die im dritten Hauptteil (Abschnitt 4) zusammengefaßten Untersuchungen über die Vorgänge beim Aufspritzen, bilden sie die eindeutige Vergleichsbasis für deren Beurteilung.

## 2 Versuchsanlage

Die Untersuchungen wurden an der in Bild 1 gezeigten zylindrischen Verdichtungsbombe [6]<sup>2)</sup> durchgeführt. Bei einem Innendurchmesser von 120 mm und einer nutzbaren Länge von 360 mm beträgt das Volumen 5,1 l. In die Bombe wird von dem mit 100 U/min laufenden Verdichter (38,6 l Hubvolumen) vorgewärmte Luft über ein Rückschlagventil in mehreren Hüben hineinverdichtet. Die einmalige Einspritzung erfolgt in die zwischen zwei Hüben weitgehend zur Ruhe gekommenen Luft. Die Kraftstoffmenge betrug meist 85 mg je Einspritzung. Auf die Luftladung der Bombe bezogen entspricht das einem siebenfachen Luftüberschuß. Da aber die Luft in der Bombe praktisch keine Bewegung hat, so wird nur der vom Strahl erfaßte Teil der Luftladung zur Verbrennung herangezogen.

Während des Leerlaufs und beim Warmfahren der Versuchsanlage strömt die Luft aus der Bombe über ein Drosselventil in einen Aufnehmer ab, aus dem sie über Heizelemente vom Verdichter erneut angesaugt wird. Mit dem Schließen des Drosselventils beginnt das Aufpumpen der Bombe.

## 21 Druckmessung

Der Druckverlauf bis zum Einspritzbeginn wird wegen der geringen Drehzahl des Verdichters mit einem normalen Kalfederindikator in Zuordnung zur Verdichterstellung aufgenommen. Bild 2 zeigt ein Indikatordiagramm des Druckverlaufes in der Bombe beim Aufpumpen.

1) Die Mittel für die Weiterentwicklung der Versuchsanlage und für die Durchführung der Versuche wurden dankenswerterweise von dem Herrn Reichsverkehrsminister zur Verfügung gestellt. Die ausführliche Handschrift der Arbeit befindet sich im Archiv des Maschinen-Laboratoriums.

2) Die Zahlen in eckiger Klammer beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis auf S. 20.

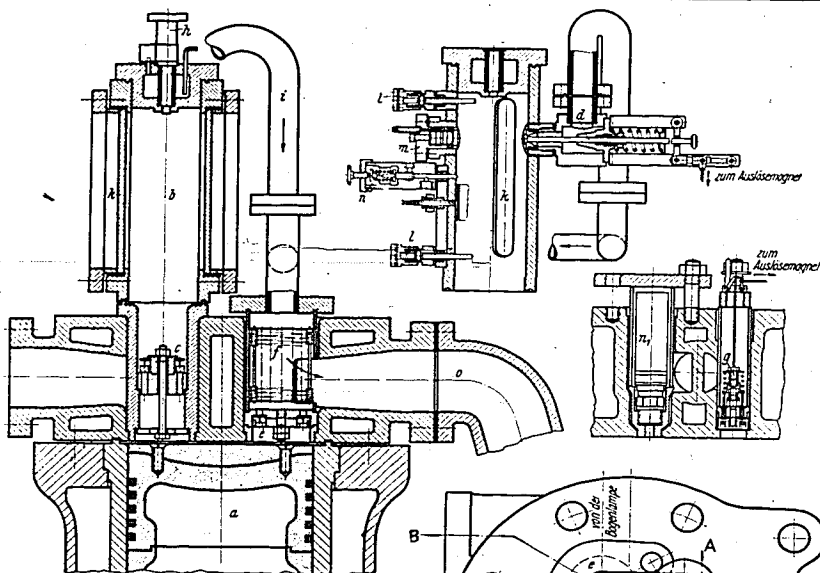


Bild 1. Verdichtungs-bombe, Querschnitt.

- a oberer Teil des Dieselmotors  
 b Verdichtungs-bombe  
 c Druckventil  
 d Überströmventil bei Bombenvorsprünge  
 e selbsttätiges Saugventil  
 f elektrische Luftvorwärmung  
 g Belüftungsventil zur Unterbrechung der Verdichtung  
 h Brennstoffeinspritzventil  
 i Luftfraktion zum Zylinder  
 k Beobachtungsfenster aus Sicherheitsglas  
 l Thermoelemente  
 m Quarz-Indikator  
 n, n<sub>1</sub> Sicherheitsventile  
 o Aufnehmer

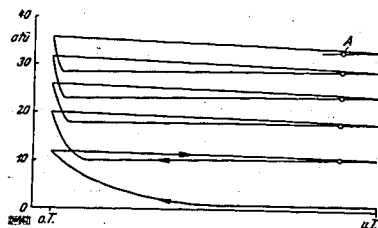
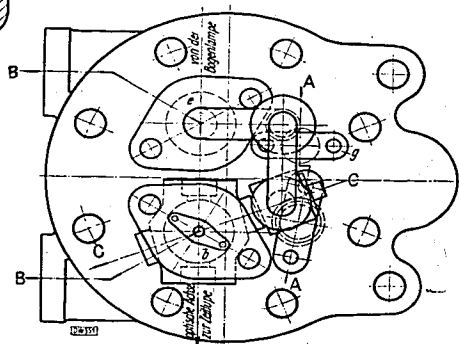


Bild 2. Druckverlauf in der Bombe beim Aufpumpen. Einspritzung erfolgt im Punkte A.

messung der Zonentemperatur ersetzt. Außerdem ermöglicht der sehr dünne Widerstandsdraht — es wird physikalisch reiner Platindraht von 0,03 mm Dmr. verwendet — eine bei Temperaturänderungen weniger trägheitsbehaftete Messung als ein Thermoelement gleicher Drahtstärke, da die Lötstelle in jedem Falle eine Verdickung hervorruft, die das Verhältnis Oberfläche zu Inhalt ungünstiger gestaltet. Der Fühler liegt in einer Brückenschaltung (Bild 4). Die von den

Die Drucksteigerung durch die Verbrennung, die nur bei besonderen Versuchen interessiert, wird mit Hilfe des Piezoquarz-Indikators gemessen.

## 22 Temperaturmessung

Zur Bestimmung der Lufttemperatur bei Einspritzbeginn wurde der in Bild 3 gezeigte Temperaturfühler entwickelt. Dieser Fühler ist als Widerstandsthermometer ausgebildet, mit dem die Lufttemperatur dicht am Kraftstoffstrahl in der Zone gemessen wird, in der erfahrungsgemäß die erste Zündung einsetzt. Damit wird die punktförmige Messung der Thermoelemente, die für die Temperaturmessung in der Bombe nicht befriedigt, durch eine Aus-

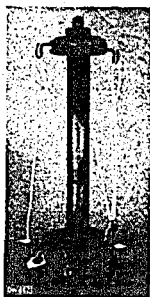


Bild 3.  
Temperaturfühler.

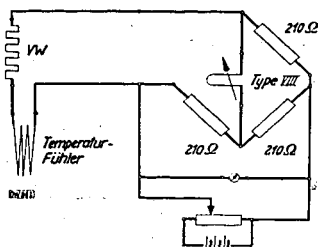


Bild 4. Schaltung zur Temperaturmessung.  
An Stelle des Fühlers treten bei der Eichung entsprechende Widerstände für 200, 400, 500° C, wobei die Schaltung für Nullstrom bei 300° C abgeglichen ist. *IV*: Vorsichtwiderstand.

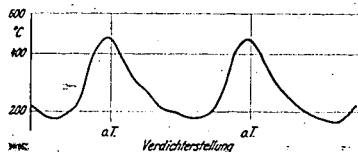


Bild 5. Temperaturverlauf in der Bombe beim Umwälzen.

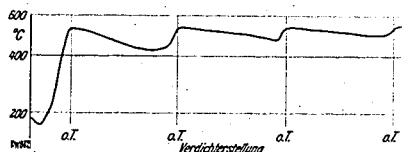


Bild 6. Temperaturverlauf in der Bombe beim Aufpumpen.

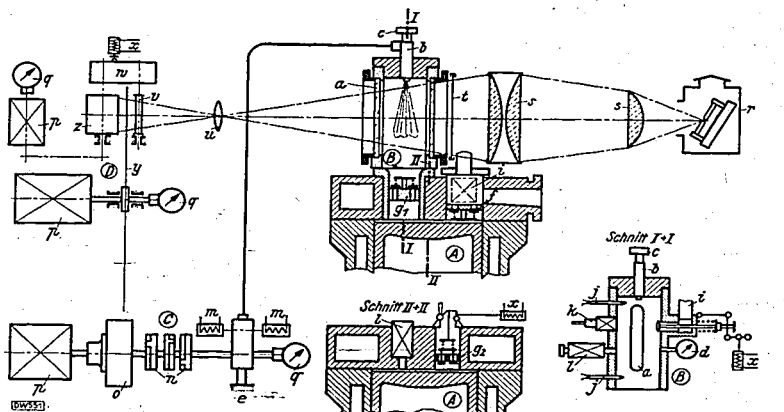


Bild 7. Anordnung der Zeithupe.  
Thürscheider Zeitdehner mit Schlitzscheibe.

- a Beobachtungsfenster
- b Einspritzventil
- c Düsenadelhubmeßvorrichtung
- d Druckmanometer
- e Brennstoffpumpe
- f Saugventil im Verdichter
- g Druckventil im Verdichter
- h Belüftungsventil
- i Überströmventil im Verdichter

- j Überströmleitung mit Heizung
- k Thermoelemente
- l Quarz-Indikator
- m Sicherheitsventile
- n Steuermagnete für Brennstoffpumpe
- o Hauptschaltventil
- p Schwungrad
- q Antriebsmotoren
- r Tachometer

- s Bogenlampe
- t Kondensatoren
- u Grünfilterzscheibe
- v Objektive
- w Drehblende
- x Momentenschlüssel
- y Auslösemagnete
- z Strobuskopfscheibe
- aa Filmtrommelkassette



Widerstandsänderungen hervorgerufenen Stromänderungen werden mit einer Siemens-Oszillographenschleife Type VIII der Registrierung zugeführt. Die Anzeigegeschwindigkeit des gesamten Systems ist mit Rücksicht auf die geringe Drehzahl des Verdichters (100 U/min) völlig ausreichend. Bild 5 zeigt den Temperaturverlauf in der Bombe beim Umwälzen, d. h. bei geöffnetem Drosselventil, während Bild 6 den Temperaturverlauf beim Aufpumpen zeigt. Dieses Diagramm läßt erkennen, daß die im ersten Verdichtungshube erreichte Höchsttemperatur durch die nachfolgenden Förderhübe nicht mehr erhöht werden kann. Die Erhöhung der Temperatur reicht gerade aus, um die Wärmeverluste zwischen den Förderhüben zu decken.

### 23 Die Zeitlupe

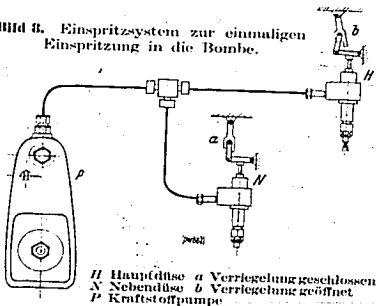
Durch zwei Fenster von 40 mm Breite und 300 mm Länge werden die Vorgänge in der Bombe mit Hilfe einer Zeitlupe aufgenommen. Bild 7 zeigt die Anordnung der Zeitlupe. Vor der rotierenden Filmtrommel, auf die ein unendliches Filmband für 25 Einzelbilder aufgespannt ist, dreht sich eine Schlitzscheibe, durch deren Schlitze das von einer Bogenlampe durch die Bombe geschickte Licht auf den Film gelangt. Ein elektromagnetisch gesteuerter Verschluss belichtet einen Umlauf der Filmtrommel in Zuordnung zum Einspritzvorgang. Das Licht der Bogenlampe läßt den Strahl als Schattenbild auf dem Zeitlupenfilm erscheinen. Nach der Zündung überstrahlt die Flamme das Licht der Bogenlampe. Die Verbrennungsprodukte sind als körnige Schlieren deutlich von den weichen Dampfschlieren zu unterscheiden.

Es wurden 750 Bilder je s aufgenommen, entsprechend einer Bildwechselzeit von  $1,33 \cdot 10^{-3}$  s. Dieser Wert wird für jeden Versuch aus der Drehzahl der Filmtrommel genau berechnet. Die Größe der Bildwechselzeit begrenzt die Genauigkeit der Auswertung. Der Zündverzögerung wird bestimmt zwischen dem Erscheinen des Kraftstoffes an der Düse und dem Auftreten der Verbrennungsschlieren. Mit Hilfe der Strahllänge auf dem ersten Bild und der Geschwindigkeitskurve der Strahlspitze für die betreffende Luftdichte kann der Spritzbeginn genau festgelegt werden. Dagegen ist für die Bestimmung der zeitlichen Lage der ersten Verbrennungsschlieren eine gewisse Übung erforderlich, da die Phase des Zeitlupenbildes meist nicht mit dem Beginn der Zündung zusammenfällt. Weiter unten wird gezeigt, daß die Zündung in einer Zone rund um den Strahl gleichzeitig einsetzt, so daß Fehlmessungen durch das Auftreten einzelner Zündherde auf der vom Beobachter abgewendeten Seite des Strahles nicht möglich sind.

### 24 Einspritzsystem

Die Bosch-Kraftstoffpumpe PE I B 100 A 100 arbeitet mit 400 U/min. Sie ist über ein Getriebe im Verhältnis 4:1 mit dem Verdichter gekuppelt. An die Kraftstoffdruckleitung sind zwei gleichartige Düsen angeschlossen, die wechselweise durch einen auf die Düsenadel wirkenden Kniehebelmechanismus verriegelt werden können (Bild 8). Bei dauernder Förderung der Kraftstoffpumpe, wobei über die Nebendüse ins Freie abgespritzt wird, kann durch diese Anordnung die einmalige Einspritzung in die Bombe bei voller Erhaltung der Einspritzgesetzmäßigkeit (Restdruck) stattfinden. Diese einmalige Einspritzung erfolgt in Zuordnung zur Verdichterstellung, kurz nachdem der Kolben die untere Totlage überschritten hat (s. Bild 3), d. h. rd. 0,3 s nach Beendigung des letzten Förderhubes. Nach diesem Zeitraum ist die Luft in der Bombe praktisch zur Ruhe gekommen, wie aus den Gasschlieren auf den Zeitlupenbildern zu erschen ist. Der Beginn der Düsenadelbewegung wird durch ein Freischwingersystem, dessen Zunge an der verlängerten Düsenadel befestigt ist, über eine Oszillographenschleife registriert. Einspritzgesetz und Düsenadelbewegung werden gesondert bestimmt.

Bild 8. Einspritzsystem zur einmaligen Einspritzung in die Bombe.



### 3 Zündung und Verbrennung von Kraftstoffstrahlen in ruhender Luft

#### 31 Aufbau des Kraftstoffstrahles

Der Kraftstoffstrahl besteht aus einer sehr großen Zahl von Tröpfchen verschiedener Größe und Geschwindigkeit. Größe, Geschwindigkeit und räumliche Verteilung dieser Tröpfchen nehmen im Querschnitt betrachtet von innen nach außen ab, wobei ein sehr dichter Strahlkern deutlich festzustellen ist. Dieser Aufbau wird dadurch hervorgerufen, daß der aus der Düse mit hoher Geschwindigkeit austretende Kraftstoff durch die vom vorher abgespritzten Kraftstoff angeworfene Luftbewegung im Strahlkern eine geringere Abbremsung erleidet. Am Strahlkopf, wo die durch den Strahlkern nach vorn

Bild 9 (rechts). Einspritzgesetz, Strahlentwicklung und Aufteilungswert bei der Zapfendüse DN 4 S 1.

$A$  Aufteilungswert,  $b$  Einspritzgesetz,  $p$  Druck in der Kraftstoffleitung,  $V$  Strahlvolumen,  $L$  Strahllänge, Leitungslänge 2 m,  $P = 200$  mm,  $n_{pump} = 350$  U/min,  $p_t = 15,5$  atü,  $t_a = 20^\circ \text{C}$ .

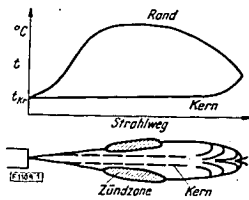
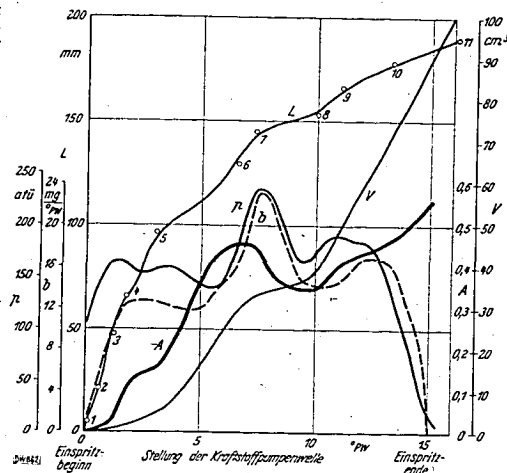


Bild 10. Temperaturverlauf am Strahl in ruhender Luft.



gelangenden Tröpfchen auf die ruhende Luft stoßen, erfolgt eine starke Verminderung der Tröpfchengeschwindigkeit, die zur Folge hat, daß der aus dem Kern nachkommende Kraftstoff den langsameren nach außen drängt. Dadurch kommt eine Verdichtung des Strahlkerns zustande, die daran zu erkennen ist, daß die Strahlspitze die vom Einspritzgesetz diktierten Druckschwankungen in Form von Geschwindigkeitsänderungen mitmacht. Bild 9 zeigt die Übereinstimmung der Druck- und Geschwindigkeitsänderungen [2]. Der Strahlmantel, das ist der um den Kern mit nach außen abnehmender Dichte liegende Kraftstoff, wird demnach gebildet a) von den Tröpfchen, die an der Strahlspitze durch die Luftkräfte und den nachschiebenden Kraftstoff nach außen gedrängt wurden und b) durch die Tröpfchen, die durch Querkräfte im Strahl aus dem Kern nach außen gelangten. Das Verhältnis von a) zu b) ist abhängig von der Bauart der Düse, wobei die anteilige Größe noch nicht erforscht ist. Ebenso fehlen Kenntnisse über die Größe der Luftbewegung im Strahl. Die Verdampfung, die eine raschere Geschwindigkeitsabnahme der Tröpfchen zur Folge hat, dürfte während der Spritzdauer auf die mechanischen Vorgänge der Gemischbildung von untergeordnetem Einfluß sein. Die Temperaturverteilung im Strahl ist abhängig von der Art der Strahlbildung. Im Strahlkern ist eine nennenswerte Aufheizung des Kraftstoffes nicht zu erwarten. Die Temperaturzunahme beginnt am Strahlkopf und erstreckt sich nach hinten über den Strahlmantel, wo ungefähr in der Strahlmitte der Temperaturhöchstwert erreicht wird. Nach der Düse zu fällt dann die Temperatur stark ab. Bild 10 zeigt diesen Temperaturverlauf, aus dem sich zwangsläufig die Zündzone ergibt. Die Zündzone setzt sich aus zahlreichen Zündherden zusammen, die im Bereiche der Strahlmitte den äußersten Teil des Strahlmantels auf 30 bis 50 % der Strahllänge umfassen. Einzelne Zündherde sind nur bei besonders günstiger Lage der Phase des Zeitlupenbildes festzustellen. Auf die absolute Größe des Zündverzuges haben solche Zündherde praktisch keinen Einfluß, da sie zeitlich innerhalb der Auswertungsgenauigkeit der Zeitlupe liegen.

### 32 Zündverzug

Die Abhängigkeit des Zündverzuges vom Zustand der Luft bei Einspritzbeginn wurde für ein Gasöl der Cetanzahl 65 genau untersucht. Bild 11 zeigt über dem Zündverzug in  $10^{-3}$  s die Luftwichte  $\gamma_L$  in  $\text{kg/m}^3$  aufgetragen. An Hand der Meßpunkte wurden Linien gleicher Temperatur und gleichen Druckes eingezeichnet. Das Diagramm zeigt die starke Temperatur- und die geringe Druckabhängigkeit des Zündverzuges. Im Vergleich zu den früher veröffentlichten Ergebnissen, die an der gleichen Anlage gewonnen wurden [6], fällt die größere Steilheit der Linien konstanter Temperatur auf. Außerdem liegen die Zündverzugszeiten nicht mehr im Bereiche von mehreren Hundertstel Sekunden, sondern bewegen sich in dem untersuchten Temperaturbereich zwischen  $2 \cdot 10^{-3}$  und  $15 \cdot 10^{-3}$  s.

Diese neue Fixierung der Linien konstanter Temperatur ist zurückzuführen auf die Verbesserung der Meßverfahren und der Versuchstechnik, insbesondere auf die Entwicklung des oben beschriebenen Temperaturmeßverfahrens. Bei den früher veröffentlichten Versuchen wurde die Temperatur in der Bombe mit Thermoelementen von 0,05 mm Draht-Dmr. gemessen, wobei an der Lötstelle

| Kurve Nr. | $P_L$<br>atm | $t_L$<br>°C | $\gamma_L$<br>kg/m <sup>3</sup> | $z$<br>$10^{-3}$ s |
|-----------|--------------|-------------|---------------------------------|--------------------|
| 1072      | 17,8         | 460         | 9,0                             | 0,5                |
| 1075      | 33,3         | 460         | 16,0                            | 4,4                |
| 1074      | 29,7         | 460         | 14,3                            | 4,1                |
| 1077      | 27,6         | 490         | 12,8                            | 3,3                |
| 1079      | 35,1         | 480         | 16,3                            | 2,6                |

Zahlentafel 1. Versuchsbedingungen der Messungen an ungestörten Strahlen (vgl. auch Zahlentafel 2, Bild 15, 18, 19).

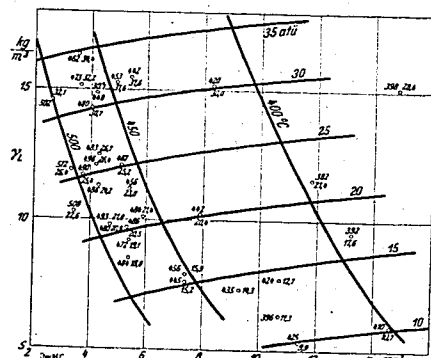
Zahlentafel 2. Verbrennungsgeschwindigkeiten [kcal/s] in Abhängigkeit von der Zeit nach Einspritzbeginn unter den in Zahlentafel 1 angegebenen Versuchsbedingungen (vgl. Bild 15, 18, 19).

| Zeit nach Einspritzbeginn<br>$\cdot 10^{-3}$ s | 0,5   | 1,0   | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 5,0  | 6,0  | 8,0  | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 16,0 | 18,0 | 20,0<br>$\cdot 10^{-3}$ s |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------|
| Versuchs-Nr.                                   |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                           |
| 1072                                           | 129,0 | 108,0 | 73,0 | 47,5 | 31,0 | 31,5 | 16,5 | 10,0 | 8,0  | 6,0  | 6,0  | 6,0  | 6,0  | 5,5                       |
| 1075                                           | 106,5 | 86,0  | 55,0 | 37,5 | 31,5 | 26,0 | 22,5 | 17,5 | 13,5 | 10,5 | 8,0  | 6,0  | 5,0  | 4,0                       |
| 1074                                           | 66,0  | 64,0  | 54,5 | 47,5 | 40,0 | 32,5 | 27,5 | 21,5 | 17,5 | 15,0 | 12,5 | 9,5  | 7,5  | 6,0                       |
| 1077                                           | 58,6  | 54,8  | 47,0 | 41,2 | 37,0 | 34,0 | 31,5 | 27,5 | 21,5 | 15,0 | 10,0 | 6,5  | 4,0  | 3,0                       |
| 1079                                           | 49,0  | 44,0  | 35,0 | 30,5 | 28,0 | 26,5 | 25,5 | 21,0 | 18,5 | 17,0 | 15,5 | 13,0 | 10,5 | 8,0                       |

mit der doppelten Stärke gerechnet werden muß. Das bedeutet, daß gegenüber dem jetzt verwendeten Widerstandsdraht von 0,03 mm Dmr. eine erheblich größere Trägheit schon des Fühlers vorhanden war. Dazu kommt, daß die EMK an einem normalen Millivoltmeter mit 3 s Einstelldauer für einen vollen Ausschlag abgelesen wurde, während heute eine Schleife mit einer Eigenfrequenz von 1200 Hz zur Registrierung dient. Die Einspritzung erfolgte damals nicht zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verdichterhüben, sondern die Bombe wurde erst auf ein höheres Niveau aufgepumpt, bei dessen Absinken dann die Einspritzung in dem Augenblick stattfand, wo der gewünschte Luftzustand durchlaufen wurde. Es konnte nun mit dem neuen Meßverfahren festgestellt werden, daß der Temperaturabfall der Luftladung rd. 100° je s beträgt. Diesem raschen Abfall konnte die alte Meßeinrichtung nicht folgen, so daß zu hohe Temperaturen gemessen wurden. Die Abweichung ist um so größer, je mehr sich die Lufttemperatur vom Anfangswert entfernt. Deshalb wurden insbesondere mit fallendem Druck für die gemessenen Temperaturen zu große Zündverzugs festgestellt, so daß damit die stärkere Krümmung der Linien konstanter Temperatur erklärt ist.

Die Streuungen der Zündverzugswerte sind bei hohen Temperaturen gering, da die erforderliche Zerstäubungseinheit und Kraftstoff-Luft-Konzentration in jedem Falle vorhanden sind. Bild 12 zeigt einen Vorgang mit kurzem Zündverzug von  $2,6 \cdot 10^{-3}$  s. Ausführliche Angaben zu den Zeitlupenbildern und Diagrammen befinden sich in den Zahlentafeln 1 bis 5. Die Zündung (Zündzone) ist auf dem zweiten Teilbild gut zu erkennen.

Bei niedrigen Lufttemperaturen (unter 400° C) treten so große Streuungen auf, daß die Abhängigkeit des Zündverzugs nicht mehr eindeutig erkennbar ist. Diese Erscheinung läßt sich mit den von Dreyhaupt [3] über die Zündung von Kraftstofftropfen in heißer Luft gegebenen Erklärungen deuten, wonach die Zündtemperatur von der Konzentration des Kraftstoffdampf-Luft-Gemisches abhängig ist. Bei starker Verdünnung des Gemisches kann die zu dieser schwachen Konzentration gehörige Zündtemperatur wegen des gegebenen Luftzustandes nicht mehr erreichbar sein. Mit der Kenntnis dieser Zusammenhänge lassen sich die Streuungen der Zündverzugswerte im Gebiete niedriger Temperaturen erklären. Bei den in Frage kommenden langen Zündverzügen, die meist schon größer sind als die Spritzdauer, sinkt infolge der Strahlenergie und des Auseinanderdiffundierens der Kraftstoffdämpfe die Konzentration im Strahl sehr rasch ab. Die für die Zündung erforderliche Konzentration findet sich



**Zahlentafel 3.** Versuchsbedingungen der Messungen mit Aufspritzen des Kraftstoffs. Aufspritzwinkel  $\alpha = 15^\circ$ ; freie Weglänge  $l = 50$  mm.

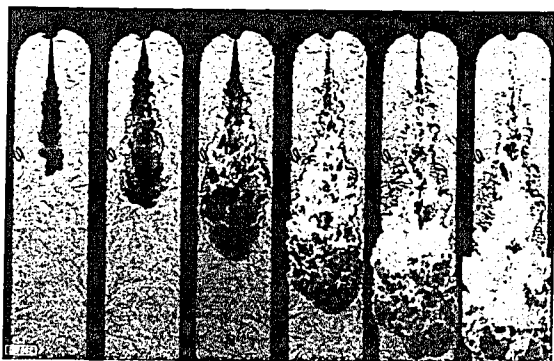
| Kurve Nr. | $p_L$ atü | $t_L$ °C | $t_W$ °C | $\gamma_L$ kg/m <sup>3</sup> | $z$ $10^{-3}$ s |
|-----------|-----------|----------|----------|------------------------------|-----------------|
| 1057      | 31,2      | 465      | 380      | 15,0                         | 4,9             |
| 1059      | 31,0      | 470      | 570      | 14,7                         | 2,0             |
| 1070      | 27,3      | 473      | 708      | 12,9                         | 2,5             |

**Zahlentafel 4.** Verbrennungsgeschwindigkeiten [keal/s] in Abhängigkeit von der Zeit nach Einspritzbeginn unter den in Zahlentafel 3 angegebenen Versuchsbedingungen (vgl. Bild 38).

| Zeit nach Einspritzbeginn<br>Versuchs-Nr. | 0,5 $\cdot 10^{-3}$ s | 1,0  | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 5,0  | 6,0  | 8,0  | 10,0 | 12,0 | 14,0 $\cdot 10^{-3}$ s |
|-------------------------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------|
| 1057                                      | 98,0                  | 80,5 | 49,0 | 30,0 | 24,0 | 21,0 | 19,0 | 16,0 | 17,5 | 10,0 | 8,5                    |
| 1059                                      | 45,5                  | 42,0 | 36,5 | 34,0 | 33,0 | 31,0 | 30,0 | 23,0 | 16,0 | 12,5 | 11,5                   |
| 1070                                      | 39,0                  | 38,5 | 35,5 | 31,5 | 29,0 | 28,0 | 26,5 | 23,0 | 20,0 | 18,0 | 17,0                   |

dann nur noch an einzelnen mehr oder weniger zufälligen Stellen. Dadurch ist auch der Zündverzug von diesen zufälligen Konzentrationszonen abhängig. Die Zeitlupenbilder zeigen bei großem Zündverzug einen oder mehrere Zündherde, von denen aus die Zündung weiterläuft. Die benachbarten Konzentrationen erhalten dabei durch die von der ersten Zündung ausgehende Temperaturerhöhung Anschluß an die Zündtemperatur. Einen solchen Vorgang zeigt Bild 13. Auf dem achten Teilbild ist unten der erste Zündherd festzustellen, zu dem auf dem zehnten Teilbild weiter oben ein zweiter Herd hinzukommt, der ermöglicht wurde durch die von dem Nachspritzer hervorgerufene Anreicherung des Gemisches an dieser Stelle.

Die Vorgänge während des Zündverzugs [12, 13] setzen sich zusammen aus chemischen und physikalischen Erscheinungen, wobei die letzteren nicht nur die Verdampfung und Zerstäubung, sondern auch den Gemischbildungsablauf im Strahl umfassen. Allge-



**Bild 12 (oben).**  
Kurzer Zündverzug von  $2,6 \cdot 10^{-3}$  s.  
Zündung im zweiten Teilbild.  
 $t_L = 502^\circ\text{C}$ ,  $p_L = 32$  atü,  
Gasöl 60 mg.



**Bild 13 (links).**  
Sehr großer Zündverzug von  $11,4 \cdot 10^{-3}$  s.  
 $t_L = 425^\circ\text{C}$ ,  $p_L = 9,9$  atü.

Zahlentafel 5. Versuchswerte der gezeigten Zeitlupenaufnahmen.

| Bild | $t_L$<br>°C | $P_L$<br>atü | $\gamma_L$<br>kg/m <sup>3</sup> | $z$<br>10 <sup>-3</sup> s | $B$<br>mg | $\omega$ | $l$<br>mm | $t_w$<br>°C |
|------|-------------|--------------|---------------------------------|---------------------------|-----------|----------|-----------|-------------|
| 12   | 502         | 32,1         | 14,6                            | 2,6                       | 60        | ---      | ---       | ---         |
| 13   | 425         | 9,9          | 5,3                             | 11,4                      | 60        | ---      | ---       | ---         |
| 20   | 492         | 31,6         | 14,5                            | 2,8                       | 25        | ---      | ---       | ---         |
| 22a  | 505         | 23,2         | 10,6                            | 3,7                       | 85        | ---      | ---       | ---         |
| 22b  | 495         | 25,3         | 11,4                            | 3,6                       | 85        | ---      | ---       | ---         |
| 24   | 485         | 33,2         | 15,4                            | 4,7                       | 57        | 15       | 100       | 391         |
| 25   | 496         | 16,8         | 7,9                             | 0,0                       | 57        | 15       | 100       | 388         |
| 26   | 470         | 31,2         | 14,9                            | 4,8                       | 85        | 15       | 50        | 376         |
| 28   | 506         | 22,4         | 10,3                            | 5,5                       | 57        | 15       | 50        | 390         |
| 31   | 475         | 27,3         | 12,9                            | 2,5                       | 85        | 15       | 50        | 708         |
| 33   | 442         | 31,1         | 15,3                            | 3,9                       | 57        | 15       | 50        | 489         |
| 34   | 370         | 16,0         | 9,0                             | 6,7                       | 57        | 15       | 50        | 643         |
| 35   | 494         | 14,1         | 6,7                             | 5,5                       | 57        | 15       | 50        | 544         |
| 40   | 415         | 27,9         | 14,3                            | 5,2                       | 85        | 45       | 100       | 425         |
| 41   | 410         | 27,5         | 14,2                            | 5,3                       | 85        | 45       | 100       | 410         |
| 43   | 478         | 23,2         | 11,0                            | 4,2                       | 145       | 40       | 95        | 408         |
| 44   | 468         | 29,0         | 13,8                            | 4,0                       | 55        | 43       | 95        | 417         |
| 45   | 465         | 26,0         | 12,6                            | 9,5                       | 60        | 90       | 40        | 376         |
| 46   | 390         | 35,0         | 18,5                            | 11,8                      | 40        | 90       | 35        | 373         |
| 47   | 378         | 34,7         | 18,7                            | ---                       | 85        | 20       | 30        | 320         |
| 48   | 485         | 32,8         | 14,8                            | 3,5                       | 85        | 20       | 30        | 400         |
| 49   | 160         | 0,0          | ---                             | ---                       | 85        | 20       | 30        | ---         |
| 50   | ---         | 5,8          | ---                             | ---                       | 145       | 40       | 95        | 425         |
| 51   | ---         | 20,4         | ---                             | 13,5                      | 145       | 15       | 40        | ---         |

mein steht fest, daß der Zündverzögerung von dem langsameren der beiden Anteile bestimmt wird. Bei niedriger Temperatur ist das der chemische Anteil, während bei hoher Temperatur die physikalischen Vorgänge für die Zeit bis zur Zündung maßgebend sind. Die Abnahme des Zündverzögerung erfolgt mit steigender Temperatur immer langsamer (Bild 11), so daß schließlich ein Wert erreicht werden muß, bei dessen Überschreiten der Zündverzögerung nicht mehr herabgesetzt werden kann. Diese Temperatur wird von anderen Beobachtern [12] mit 700°C angegeben. Der untere Grenzwert des Zündverzögerung wird von dem mechanischen Vorgang der Strahlbildung, und damit auch von der Bauart der Düse bestimmt.

Der kleinste in der Verdichtungsblende gemessene Zündverzögerung liegt bei  $2 \cdot 10^{-3}$  s. Im Motor treten bei einigen Verbrennungsverfahren, die für Fahrzeugmotoren Anwendung finden, noch kürzere Zündverzögerungen auf. Dieser Unterschied in der Größe des Zündverzögerung ist darin begründet, daß allgemein im Dieselmotor höhere Verdichtungs Temperaturen auftreten. Außerdem sind die Wärmeübergangsverhältnisse von der Luftladung an den Kraftstoff bei bewegter Luft bedeutend günstiger als in der ruhenden Luft der Bombe, da die Temperaturabsenkung am Kraftstoffstrahl durch die ständige Zufuhr heißer Luft gemildert wird. Genauere Kenntnisse über den Einfluß der Luftbewegung auf den Zündverzögerung fehlen allerdings bis heute völlig.

Die eingespritzte Kraftstoffmenge hat im untersuchten Bereich zwischen 25 und 150 mg/Hub keinen Einfluß auf den Zündverzögerung. Ein solcher Einfluß war auf Grund des Strahlaufbaues und der davon abhängigen Temperaturverteilung auch nicht zu erwarten.

### 33 Verbrennungsgeschwindigkeit

Die Untersuchung der Größe und des Verlaufes der Verbrennungsgeschwindigkeit bei der Dieseleinspritzung stößt im Motor wegen der Überlagerung durch die Kolbenbewegung, drehzahlabhängige Luftbewegungen, lastabhängige Brennraumtemperaturen und Restgasbeimischungen auf erhebliche Schwierigkeiten. Dagegen ist die Verdichtungsblende wegen der eindeutigen und übersichtlichen Bedingungen für solche Untersuchungen besonders geeignet.

Bei einer Reihe von Zeitlupenaufnahmen wurde außer der Bestimmung der Druckhöhe gleichzeitig für eine Kraftstoffmenge von 85 mg/Hub der Druckverlauf während der Verbrennung gemessen. Die Messung erfolgte mit dem im Maschinenlaboratorium entwickelten Piezoquarz-Indikator der Hülsebauart [11]. Die Verbrennungsgeschwindigkeit wurde aus dem Druckverlauf unter Berücksichtigung der Wärmeverluste der Bombe errechnet.

Aus der mit dem Kraftstoff zugeführten Wärmemenge

$$Q_K = G_L c_p (T_2 - T_1) \quad [\text{kcal}]$$

und der Gasgleichung für den Zustand der Luft in der Bombe vor und nach der Verbrennung errechnet sich die Verbrennungsgeschwindigkeit zu

$$\frac{dQ_K}{dz} = c_r \frac{V}{R} \frac{dP}{dz} \quad [\text{kcal/s}].$$

Das Luftvolumen  $V$  [m<sup>3</sup>] und das Gewicht  $G_L$  [kg] der Luftladung bleiben konstant. Ebenso bleibt die Gaskonstante  $R$  [m<sup>2</sup>] unverändert, da die Verbrennung bei siebzigfachem Luftüberschuß stattfindet. Die spezifische Wärme  $c_r$  [kcal/kg<sup>°</sup>] der Luft, deren Abhängigkeit von der Temperatur in Bild 14 nach den Angaben von Justi [8] aufgetragen wurde, kann ebenfalls als konstant angesehen werden, da die Temperatursteigerung der Luft bei Annahme gleichmäßiger Temperaturverteilung nach der Verbrennung etwa 50<sup>°</sup> betragen würde.

Die Kurven des Bildes 15 zeigen den Verlauf der Verbrennungsgeschwindigkeit von fünf Einspritzvorgängen (mit den Nrn. 1079, 77, 74, 75, 72 bezeichnet) über der Zeit aufgetragen. Der Zeitmaßstab beginnt mit der Einspritzung, deren Dauer 5,5 s beträgt. Die fünf Vorgänge, denen der gleiche Einspritzvorgang zugrunde liegt — Bild 16 —, unterscheiden sich durch die Größe des vorangegangenen Zündverzuges. Der Beginn der einzelnen Verbrennungskurven in Bild 15 gibt dabei das Ende des Zündverzuges und damit dessen Größe an. Jeder einzelne Vorgang ist gekennzeichnet durch den harten Einsatz der Verbrennung und durch ein Geschwindigkeitsmaximum, das kurz nach dem Verbrennungsbeginn auftritt. Dieser Höchstwert wird als Zündspitze bezeichnet.

Die Zündspitze wird bei allen beobachteten Vorgängen noch vor Ablauf der ersten tausendstel Sekunde nach Zündbeginn überschritten (im Bild 15 durch  $\leftrightarrow$  angezeigt). Die höchste Verbrennungsgeschwindigkeit in der Zündspitze wurde zu 130 kcal/s festgestellt, während die niedrigste bei 48 kcal/s lag. Das bedeutet, daß die während der ersten tausendstel Sekunde umgesetzten Wärmemengen in dem untersuchten Bereich um mehr als den zweieinhalbfachen Betrag voneinander abweichen.

Der Verlauf der Kurven nach der Zündspitze hängt ab von der zuerst umgesetzten Wärmemenge. Das Ende der Verbrennung ist nicht genau feststellbar, da im Diagramm die abfallende Verbrennungsdruckkurve ganz allmählich in die Kurve des absinkenden Bombendruckes übergeht. Nach Ablauf von 30 · 10<sup>-3</sup> s ist das Ende der Verbrennung noch nicht erreicht. Daraus wird die aus den Zeitlupenbildern schon lange bekannte Tatsache bestätigt, daß die Dieseleinspritzung in ruhender Luft im Hinblick auf das Verbrennungsende sehr wenig befriedigt.

Die Kurven lassen erkennen, daß bei gleichem Einspritzvorgang zu jedem Zündverzug ein charakteristischer Verbrennungsablauf gehört. Mit fallendem Zündverzug nimmt die Zündspitze ab. Bei dem kleinsten gemessenen Zündverzug von 2,6 · 10<sup>-3</sup> s steigt die Zündspitze immer noch bis 48 kcal/s an. Die Abhängigkeit der Verbrennungsgeschwindigkeit vom Zündverzug erklärt sich bei der Betrachtung der Einzelvorgänge, aus denen sich der Zündverzug zusammensetzt. Das sind die chemischen und thermischen Vorgänge und die Gemischbildung im Strahl. Die Gemischbildung wird unterteilt in die räumliche Kraftstoffverteilung im Strahl und in den Aufteilungswert, der das Verhältnis des

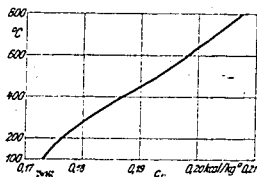


Bild 14. Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme  $c_r$  der Luft nach Justi.

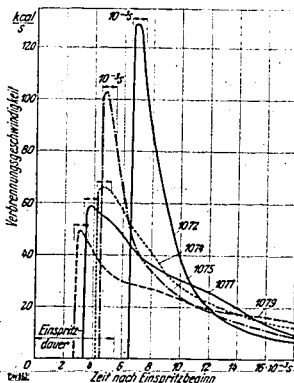


Bild 15 (rechts). Verbrennungsgeschwindigkeiten abhängig vom Zündverzug. Die Nummern an den Kurven verweisen auf die Zusammenstellung der zugehörigen Werte in den Zahlentafeln.

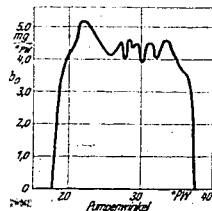


Bild 16. — Einspritzgesetz der gezeigten Einspritzungen.

$Z = 85$  mg.  
Düse DLOs 0,35 mm Dmr;  
pumpe = 400 U/min.

wirklichen Kraftstoff-Luft-Gemisches im Strahl zum augenblicklich möglichen stöchiometrischen Gemisch angibt. Außerdem muß bei der Betrachtung des Zusammenhanges zwischen Zündverzugs und Verbrennungsablauf das Verhältnis des Zündverzugs zur Spritzdauer berücksichtigt werden.

Zunächst soll der Vorgang betrachtet werden, wenn der Zündverzug kürzer ist als die Einspritzzeit (Kurven 1079, 77, 74, 75 in Bild 15). Bei sehr kleinem Zündverzug befinden sich Strahlentwicklung und Gemischbildung im Strahl in einem entsprechend frühen Stadium. Das bedeutet, daß ein sehr kraftstoffreiches, kaltes Strahlinnere von einem nur dünnen Mantel zündfähigen Gemisches umgeben ist. Die an den Zeitlupebildern gewonnene Erkenntnis, daß die Zündung in einer ausgedehnten Zone und nicht mit einigen verstreuten Zündherden beginnt, wird durch den in jedem Falle steilen Einsatz der Verbrennungskurven bekräftigt. Von der Zündzone ausgehend läuft die Zündung am Strahlmantel langsam nach der Düse und schnell zur Strahlspitze hin<sup>3)</sup>, bis schließlich der Strahlmantel, mit Ausnahme des dicht an der Düse liegenden Teiles, geschlossen brennt. Diesen brennenden Mantel durchbrechen anfänglich außen noch dunkle Stellen, die auf ungezündete Teile hinweisen. Schließlich wird nur noch die Strahlspitze von Gemisch durchbrochen, so daß deutlich zu erkennen ist, daß die Strahlenentwicklung im wesentlichen durch den Kern erfolgt.

Der Strahlkern und der nach der Zündung abgespritzte Kraftstoff können während der Einspritzdauer an der Verbrennung nicht teilnehmen, weil der Kern sowohl den kältesten Teil des Strahles, als auch ein ausgesprochenes Luftmangelgebiet darstellt. Die Zündung kann vom Strahlmantel nur soweit nach innen laufen, wie der vorhandene Sauerstoff das zuläßt. Der übrige Kraftstoff, für den, sofern er infolge der Nachbarschaft der brennenden Zone auf Zündtemperatur oder darüber kommt, kein Sauerstoff vorhanden ist, findet diesen entweder erst an der Strahlspitze oder nach Durchbrechen des brennenden Mantels. Dabei geraten die Kraftstoffmoleküle unter Sauerstoffmangel in einen intensiven Anregungszustand, bei dem die Gefahr des Molekülzerfalls besteht. Durch diese Art der Gemischbildung wird das Verbrennungsende an die Strahlspitze gebracht. Bild 17 zeigt noch einmal schematisch den Beginn und das Ende der Verbrennung bei der Dieseleinspritzung in ruhende Luft.

Der Verlauf der Verbrennungskurve wird von diesen Vorgängen bestimmt. Je kürzer der Zündverzug ist, um so kleiner ist die im Bereiche der Zündspitze umgesetzte Menge. Die Größe dieser ersten Umsetzung wird durch den rein mechanischen Gemischbildungsvorgang beeinflusst. Es wurde schon oben darauf hingewiesen, daß die Zündverzugszone schließlich durch die Gemischbildungskraft der Düse beschränkt wird. Der weitere Ablauf der Verbrennung hängt dann von der Geschwindigkeit ab, mit der es dem durch die brennende Zone hindurchschießenden Kraftstoff möglich ist, den erforderlichen Sauerstoff zu finden. Der Zündverzug dieses Kraftstoffes spielt für die Verbrennungsgeschwindigkeit keine Rolle, da die von der Verbrennung ausgelöste Temperatursteigerung eine Aufheizung bis über die Zündreife hinaus zur Folge hat. Für den zuletzt abgespritzten Kraftstoff (von dem nur ein kleiner Restteil in Düsennähe verbrennt, während alles übrige durch die brennende Zone hindurch muß), ist der Weg zum Sauerstoff am längsten. Mit zunehmender Strahllänge nimmt zwar die Geschwindigkeit der Spitze rasch ab, gleichzeitig wird aber durch die Verdampfung die Durchschlagkraft herabgesetzt. Das bedeutet, daß der letzte Kraftstoff unter den oben beschriebenen ungünstigen Bedingungen zur Reaktion kommt. Dadurch wird das Ende der Verbrennung nur sehr langsam erreicht.

Mit zunehmendem Zündverzug, jetzt immer noch innerhalb der Spritzdauer, wird durch die fortschreitende Strahlentwicklung der Anteil des zündfähigen Gemisches vergrößert. Die Kurven zeigen den wachsenden Umsatz im Gebiet der Zündspitze. Trotzdem erfährt die Verbrennung auch jetzt nur den Strahlmantel, während im Kern durch den Nachschub des kalten Kraftstoffes die Temperatur für die Zündung zu niedrig ist. Das beweist der immer steiler werdende Abfall der Kurven nach der Zündspitze. Der größte Teil des ungezündeten Kraftstoffes muß auch hier erst durch den brennenden Mantel hindurchwandern.

Wird der Zündverzug schließlich größer als die Einspritzdauer, so löst sich der Strahl unter dem Einfluß der Zerstäubungsenergie und durch das Auseinanderdiffundieren der Kraftstoffdämpfe schnell auf. Dadurch wird die Kraftstoff- und Temperaturverteilung gleichmäßiger. Beim Erreichen der unter den gegebenen Bedingungen erforderlichen Zündtemperatur setzt dann die Reaktion in einem

<sup>3)</sup> Die Ausbreitung der Verbrennung von der Zündzone aus erfolgt nicht im Sinne einer Flammenfront, sondern durch die von der Temperaturverteilung abhängige Selbstzündung weiterer Strahlteile, wobei diese Selbstzündung durch die Wärmeabgabe der bereits brennenden Strahlteile beschleunigt wird.

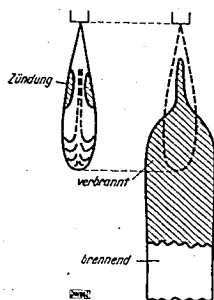


Bild 17. Lage des Verbrennungsendes am Strahl in ruhender Luft.

größeren Bereiche schlagartig ein. Die Kurve 1072 in Bild 15 zeigt die in diesem Falle sehr große Zündspitze und den darauf folgenden raschen Abfall der Verbrennungsgeschwindigkeit.

Einen noch besseren Einblick in die Zusammenhänge zwischen Verbrennungsgeschwindigkeit, Gemischbildung und chemisch-thermischen Ablauf ermöglichen die beiden folgenden Bilder 18 und 19. Hier ist über dem Zeitlupenbild die zugehörige Verbrennungsgeschwindigkeit aufgetragen. Die Bilder lassen erkennen, daß Verbrennungsgeschwindigkeit und Leuchterscheinung nicht parallel verlaufen. Während das Maximum der Verbrennungsgeschwindigkeit sofort nach der Zündung auftritt, zeigt die Flamme erst viel später die größte Helligkeit.

Diese Erscheinung wird durch den Zusammenhang zwischen Verbrennungsablauf und Emissionsspektrum verständlich. Die Verbrennung der Kohlenwasserstoffe beginnt mit der Wasserstoffumsetzung, die durch hohe Reaktionsgeschwindigkeit ausgezeichnet ist. Das Emissionsspektrum zeigt dabei kurzwellige Ultraviolettstrahlung [1, 4]. Mit zunehmendem Wasserstoffabbau findet der Übergang in das langwellige Gebiet statt, wobei dieses Fortschreiten der Umsetzung durch die Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist. Schließlich geht die Verbrennung mehr und mehr in die reine Kohlenstoffverbrennung über, wobei die langwellige Rotstrahlung vorwiegt. Die Verbrennung endet mit der Oxydation des Kohlenstoffes, wobei unter ungünstigen Bedingungen (Sauerstoffmangel, Temperatur) eine Rekombination der Kohlenstoffatome zu stabilen Molekülen vom Typ  $C=C$  stattfindet. Im Vergleich zum Kohlenstoffatom ist das  $C_2$ -Radikal außerordentlich reaktionsträge, so daß zu seiner Oxydation sehr hohe Temperaturen erforderlich sind.

Die von der Verbrennung in der Bombe ausgehende Strahlung wird von dem Zeitlupenfilm registriert. Dieser Film (Agfa ISS) zeigt neben einer weitgehenden Rotempfindlichkeit eine nur schwache Ultraviolett-empfindlichkeit. Deshalb tritt bei

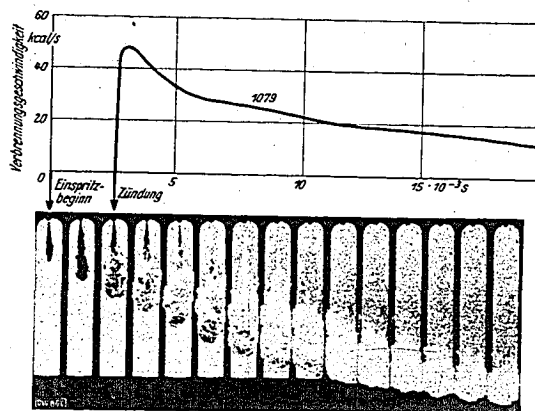


Bild 18. Verbrennungsgeschwindigkeit und Flammenerscheinung bei kurzem Zündverzög.

$p_{L,0} = 3.5$  atü,  $B = 85$  mg/Hub,  $t_L = 480^\circ\text{C}$ ,  $z = 2.6 \cdot 10^{-3}$  s

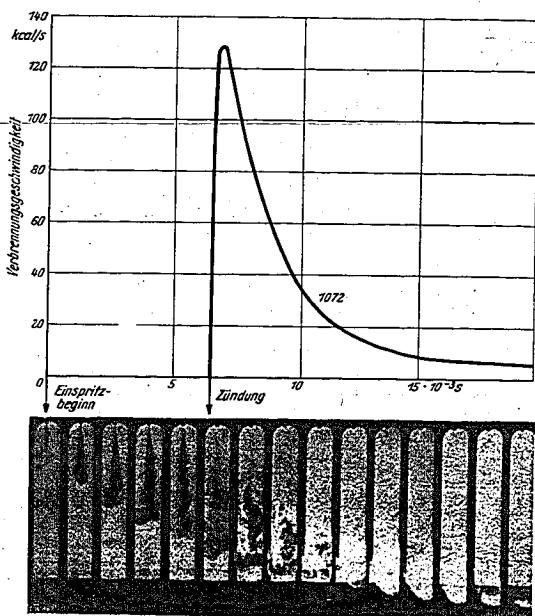


Bild 19. Verbrennungsgeschwindigkeit und Flammenerscheinung bei langem Zündverzög.

$p_{L,0} = 17.8$  atü,  $B = 85$  mg/Hub,  $t_L = 460^\circ\text{C}$ ,  $z = 6.5 \cdot 10^{-3}$  s



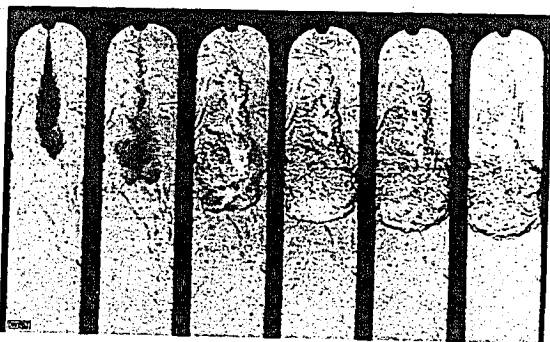


Bild 20. Einspritzung einer sehr kleinen Kraftstoffmenge.

Kurze Durchbrennzeit, da trotz kurzen Zündverzuges Einspritzdauer kürzer als Zündverzug.

vom Gemischbildungsvorgang, sondern auch vom Reaktionsmechanismus der Kohlenwasserstoffe abhängig. Die fortschreitende Umsetzung von der Wasserstoff- zur Kohlenstoffverbrennung zeigt sich an der zunehmenden Aufhellung der Flammenerscheinung. Dabei muß berücksichtigt werden, daß am Strahlmanteil im wesentlichen die Umsetzung des zuerst gezündeten Kraftstoffes abläuft, während der später abgespritzte Kraftstoff an der Strahlspitze erscheint — das ist auch bei diesen Aufnahmen deutlich festzustellen — und erst dort vollständig zur Reaktion kommt. Das Ende der Verbrennung ist gekennzeichnet durch die von der langsamen Kohlenstoffverbrennung ausgesandte Rotstrahlung, auf die der Film sehr stark abspricht. Deshalb wird die stärkste Leuchterscheinung am Verbrennungsende registriert.

Die gleichen Erscheinungen sind in Bild 19 zu bemerken, auf dem ein Vorgang mit sehr großem Zündverzug dargestellt ist. Hier tritt die geringe Helligkeit im Gebiete der höchsten Verbrennungsgeschwindigkeit besonders deutlich in Erscheinung. Die Umsetzung erfolgt infolge der weitgehenden Strahlauflösung und Verdampfung unter günstigeren Bedingungen. Die helle Flamme tritt erst sehr spät auf, und dann nur im Vergleich zur Aufnahme 18 in geringer räumlicher Ausdehnung und für kurze Zeit.

Als Ergänzung zu den Betrachtungen über den Zusammenhang zwischen Strahlungserscheinung und Verbrennungsablauf wird Bild 20 gezeigt. Hier konnte durch die Einspritzung einer sehr kleinen Menge (25 mg,  $1,5 \cdot 10^{-3}$  s Spritzdauer) bei kurzem Zündverzug ( $2,8 \cdot 10^{-3}$  s) die Strahlauflösung bis zum Einsatz der Verbrennung sehr weit getrieben werden. Hier fehlt die helle Flammenerscheinung. Nur im oberen Strahlkern und am Strahlkopf ist ein schwaches Leuchten auf der Aufnahme festzustellen. Wenn auch berücksichtigt werden muß, daß nur eine sehr kleine Menge eingespritzt wurde, so ist doch an Hand dieser Aufnahme der Schluß zulässig, daß die helle Flammenerscheinung zum Teil auf die Strahlung von Produkten zurückzuführen ist, die durch den von der ungünstigen Gemischbildungsabläufe (Zerfallprodukte, Restmoleküle, Rekombinationsmoleküle) sind im Vergleich zum Ausgangskohlenwasserstoff sehr reaktionsträge, d. h. sie brauchen für die weitere Verbrennung sehr hohe Temperaturen. Wenn diese Temperaturen nicht mehr erreicht werden können (ungünstiger Gemischbildungsablauf), dann besteht trotz des großen Luftüberschusses in der Bombe die Gefahr der unvollständigen Verbrennung. Deshalb sollte das Ende der Verbrennung im Dieselmotor möglichst an die heißeste Stelle des Brennraumes gelegt werden. Der niedrige Kraftstoffverbrauch der Motoren, bei denen der Brennraum in den hohlen Kolben gelegt wurde, dürfte zum Teil auf diese Erscheinung zurückzuführen sein.

### 34 Durchbrennzeit

Die Durchbrennzeit gibt die Zeit von der Zündung bis zum Ende der Verbrennung an. Sie kann in drei Teile zerlegt werden: 1. Beginn der Zündung bis zum Ende der Einspritzung, 2. Zündverzug des zuletzt eingespritzten Kraftstoffes, 3. Verbrennungsdauer dieses Kraftstoffes. Wenn der Zündverzug kürzer als die Einspritzzeit ist, bleiben Zündverzug und Verbrennungsdauer des zuletzt eingespritzten Kraftstoffes bei Annahme gleichartigen Gemischbildungsvorganges konstant. Die Durchbrennzeit würde deshalb im idealen Falle im gleichen Maße zunehmen wie der Zündverzug

innerhalb der Spritzdauer abnimmt. Das bedeutet, daß die Durchbrennzeit mit steigender Lufttemperatur zunehmen muß. Dieser Vorgang wird überlagert vom Ablauf der Gemischbildung im Strahl. Im vorhergehenden Kapitel wurde klargelegt, daß der Gemischbildungsvorgang mit abnehmendem Zündverzug ungünstiger wird. Die Durchbrennzeit muß deshalb stärker als die zeitliche Differenz zwischen Einspritzdauer und Zündverzug zunehmen. Diese Verhältnisse sind in Bild 21 für die Ein-

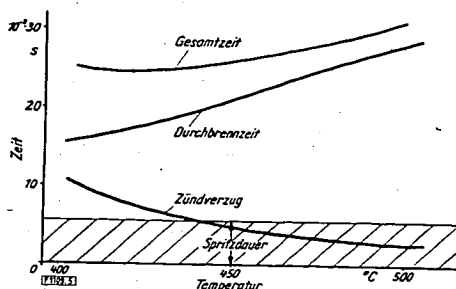


Bild 21. Abhängigkeit der Durchbrennzeit von der Lufttemperatur und damit vom Zündverzug bei Einspritzung in ruhende Luft.

$p_t = 31 \text{ atü Gasöl, } 85 \text{ mg/Hub.}$

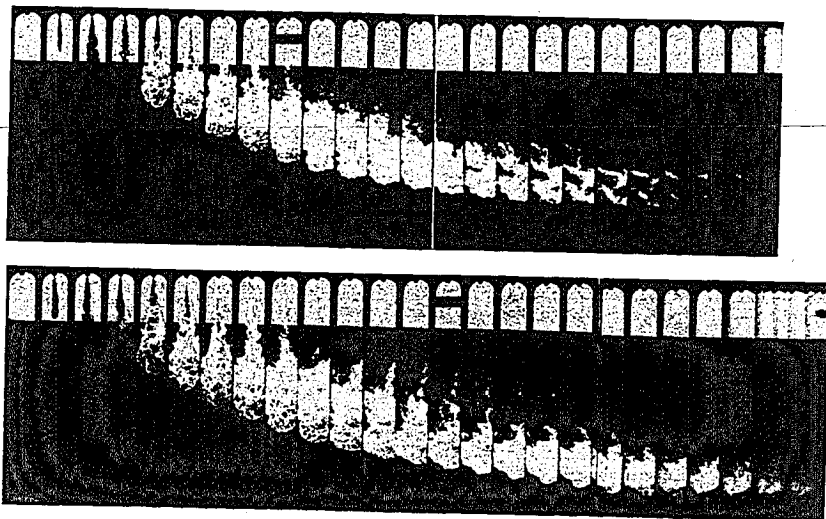


Bild 22. Unterschiede in der Brenndauer und im Flammenbild bei sonst gleichen Bedingungen.

spritzung von 85 mg Gasöl in Luft von 31 atü abhängig von der Lufttemperatur dargestellt. Die Einspritzungen erfolgten mit einer Einlochdüse (keglicher Sitz) von 0,35 mm Dmr. Die starke Zunahme der Durchbrennzeit mit abnehmendem Zündverzug ist deutlich zu erkennen. Da der untere Grenzwert des Zündverzuges hier nicht erreicht wurde, so muß die Durchbrennzeit über den schon erreichten Wert bis zu einem Grenzwert ansteigen. Der Übergang zu diesem Grenzwert kann noch nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Das ist z. T. darin begründet, daß die Durchbrennzeiten sehr stark

streuen. So zeigen z. B. die beiden in Bild 22 zusammengefaßten Aufnahmen, die zwei gleiche Einspritzvorgänge bei gleichem Luftzustand darstellen, auffallende Unterschiede in der Verbrennungsdauer und im Verbrennungsbild.

Für die Verbrennung im Motor sind die Durchbrennzeiten, die beim Einspritzen in ruhende Luft auftreten, viel zu groß. Die Gemischbildung muß deshalb durch Luftbewegung unterstützt werden.

### 35 Zusammenfassende Betrachtung

Die Untersuchung der Dieserverbrennung ungestörter Kraftstoffstrahlen in ruhender Luft zeigt neben der Abhängigkeit des Zündverzuges vom Luftzustand die Abhängigkeit des Verbrennungsbeginns vom Zündverzug. Für den Ablauf der Verbrennung und für deren Dauer ist der Gemischbildungsvorgang der Düse von entscheidender Bedeutung. Es zeigt sich, daß die gemischbildende Kraft der Einlochdüsen (das gleiche gilt für Zapfendüsen) für eine befriedigende Verbrennung nicht ausreicht. Die Steuerung der Verbrennung nach der Zündung kann mit solchen Düsen bei den erforderlichen kurzen Zeiten keinesfalls erreicht werden. Für diese Steuerung, die sich auf der Steuerung des Gemischbildungsvorganges aufbaut, muß deshalb die Luft herangezogen werden. Zusätzliche Luftbewegung verbraucht Energie. Sie erhöht damit den Kraftstoffverbrauch oder setzt die Leistungsausbeute herab. Deshalb muß die systematische Untersuchung des Einflusses der Luftbewegung auf die Dieseleinspritzung als vordringliche Forschungsaufgabe bezeichnet werden.

## 4 Aufspritzen des Kraftstoffes

### 41 Durchführung der Versuche

Bei den Hauptversuchen wurde auf eine Stahlplatte von  $80 \times 175 \text{ mm}^2$  aufgespritzt. Die Platte war in der Bombe so angeordnet, daß der Vorgang in Seitenansicht betrachtet werden konnte. Wegen der Sichtverhältnisse mußte die Platte möglichst parallel zu einer Fensterkante angebracht werden. Diese Anordnung verlangte wegen der Lage der Düse in der Mitte des Sichtfeldes für jeden Aufspritzwinkel eine Sonderdüse, bei der die Düsenbohrung unter dem jeweils erforderlichen Winkel zur Düsenachse geneigt war. Es wurden Bosch-Düsen der Mehrlochdüsenform, Größe S, verwendet. Der Bohrungsdurchmesser betrug immer  $0,35 \text{ mm}$ . Die Temperatur der Platte wurde mit Hilfe eines Edelmetall-Thermoelementes am Aufspritzpunkt gemessen. Die Temperatur der Platte stellte sich im Beharrungszustand der Anlage im Mittel auf  $400^\circ\text{C}$  ein. Da die Kolbenbodentemperatur beim Dieselmotor ebenfalls bei  $400^\circ\text{C}$  liegt [9], konnten die Versuche größtenteils ohne zusätzliche Heizung durchgeführt werden.

### 42 Einfluß der freien Strahlänge

Die Untersuchungen der ungestörten Strahlen führten zu der Erkenntnis, daß der Ablauf der Gemischbildung den Verbrennungsvorgang entscheidend beeinflusst. Für den Aufspritzvorgang bedeutet das, daß der Augenblick der Störung der Strahlentwicklung für den weiteren Vorgang maßgebend ist. Deshalb werden zunächst die Versuche beschrieben, bei denen bei konstantem Aufspritzwinkel — das ist der Winkel zwischen der Strahlachse und der Oberfläche am geometrischen Auftreffpunkt — die freie Strahlänge von der Düse bis zum Auftreffpunkt geändert wurde. Bei diesen Versuchen betrug der Aufspritzwinkel  $15^\circ$ .

Für den Aufspritzvorgang spielt die Entwicklung der Strahlgeschwindigkeit und der Strahlänge über der Zeit eine große Rolle. Deshalb wurden in Bild 23 für den verwendeten Einspritzvorgang diese Größen dargestellt.

### 421 Große Strahlänge

Bild 24 zeigt das Anspritzen der ebenen Platte bei einer freien Weglänge von  $l = 100 \text{ mm}$ . Der Luftdruck bei Einspritzbeginn entsprach mit 33 atü den Verhältnissen im Dieselmotor, während die Lufttemperatur  $485^\circ\text{C}$  betrug. Das entspricht einer Luftwichte von  $15,4 \text{ kg/m}^3$ . Aus Bild 23 geht hervor, daß unter diesen Verhältnissen die Strahlspitze den geometrischen Auftreffpunkt erst nach  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$  mit einer Geschwindigkeit von  $16 \text{ m/s}$  erreicht. Innerhalb dieses Zeitraumes kann sich der Strahl — wie auch das Zeitlupenbild zeigt — frei entfalten. Gleichzeitig ist zu erkennen, daß im Augenblick der Wandberührung der Kraftstoff schon weitgehend mit Luft durchmischt ist. Diese Luft wird von dem Kraftstoff mitgerissen. Der Strahl besteht also aus Kraftstofftröpfchen und Luft, die sich beide mit hoher Geschwindigkeit vorwärtsbewegen. Durch die fortschreitende Verdampfung wird der gasförmige Anteil des Strahles dauernd erhöht. Dadurch erreicht der Strahl bei der vorliegenden großen Entfernung die Wand mehr im Zustand einer rasch vorwärtsschießenden Wolke als in dem eines Flüssigkeitsstrahles. In diesem Strahl schwimmen die verdampfenden Tröpfchen gewissermaßen in einem Strom von Luft und Kraftstoffdampf. Wenn sich

diesem Strahl jetzt die Platte in den Weg stellt, so wird zuerst der gas- und dampfförmige Anteil umgelenkt. Dadurch werden auch die flüssigen Teile aus der alten Strahlrichtung herausgedrängt, so daß damit der Strahl in seiner Gesamtheit an der Wand umgelenkt wird. Diese Erscheinung entspricht weit mehr einem Strömungsvorgang als einem Aufspritzvorgang. Bei gegebenem Auftreffwinkel ist die Umlenkung dann abhängig von der Größe und der Geschwindigkeit der Tröpfchen und von dem Verhältnis des flüssigen zum dampfförmigen Anteil im Strahl. Die Dampfhülle, mit der die einzelnen Tröpfchen umgeben sind, verringert die Gefahr der unmittelbaren Wandberührung. Das vierte Teilbild in Bild 24 zeigt die Ablenkung des Strahles in der eben geschilderten Weise.

Infolge der großen Entfernung wird die Zündzone und damit auch der Zündverzug von der Wand nicht berührt. Die Zündung setzt außerhalb des Wandbereiches ein. Auch die Verbrennung verläuft in der gleichen Art wie beim ungestörten Strahl, da die Strahlentwicklung offensichtlich nicht beeinflusst wurde. Die Platte zeigte sich nach den Versuchen gleichmäßig schwach berußt, so daß flüssiger Kraftstoff die Platte nicht getroffen haben konnte.

Bei geringerer Luftwichte ist die Durchschlagskraft größer und die Aufteilung des Kraftstoffes geringer. Einen entsprechenden Vorgang zeigt Bild 25. Hier wurde in der gleichen Anordnung mit 100 mm Entfernung bei einer Luftdichte von  $8,0 \text{ kg/m}^3$  eingespritzt. Trotz der größeren Geschwindigkeit und Durchschlagskraft wird der Strahl noch weitgehend umgelenkt, wenn auch jetzt der dichte

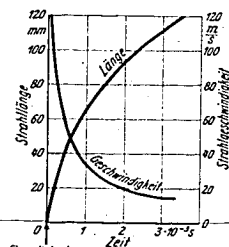


Bild 23. Geschwindigkeit und Weg der Strahlschuppe in Luft von motorischer Wichte ( $14,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Einlochdüse 0,35 mm Dmr.,  
Abspritzdruck 125 atü.

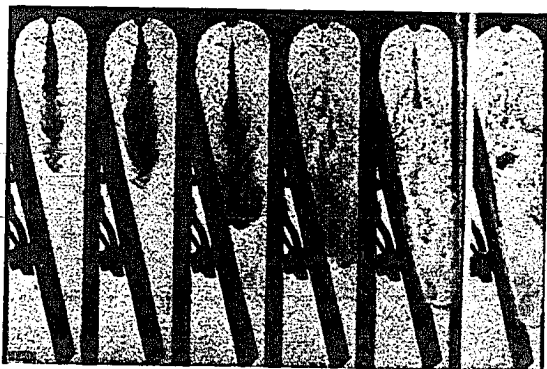


Bild 24 (oben). Aufspritzen bei großer Strahllänge (100 mm) und motorischer Luftwichte ( $15,4 \text{ kg/m}^3$ ).  
Aufspritzwinkel  $15^\circ$ ,  $t_W = 390^\circ \text{C}$ .

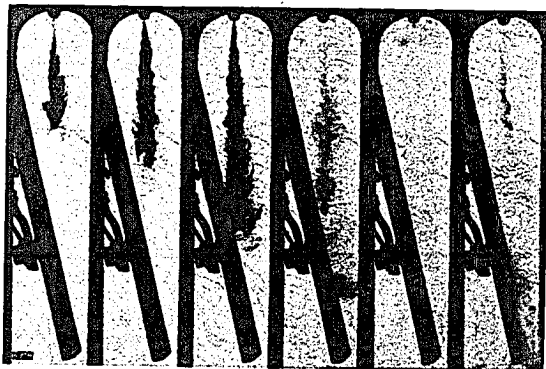


Bild 25. Aufspritzen bei großer Entfernung (100 mm) und geringer Wichte ( $7,9 \text{ kg/m}^3$ ).

Strahlkern näher an die Wand heranrückt. Die Strahlentwicklung nach dem Auftreffpunkt erfolgt an der Platte entlang. Die rasche Verdampfung ist auf den Einfluß der Wandtemperatur ( $390^{\circ}\text{C}$ ) zurückzuführen.

Die beiden Aufnahmen (Bild 24 und 25) zeigen, daß bei Strahlängen von 100 mm und darüber, die praktisch nur in Großmotoren vorkommen, die Strahlbildung, Zündung und Verbrennung den gleichen Verlauf nehmen wie beim ungestörten Strahl.

#### 422 Kleine Strahlänge

Bei 50 mm Entfernung zwischen Düse und geometrischem Auftreffpunkt erreicht die Strahlspitze bei motorischer Luftwichte die Auftreffstelle schon nach  $0,7 \cdot 10^{-3}$  s mit 50 m/s Geschwindigkeit. Der Störungseinfluß nimmt demnach nicht entsprechend der Abnahme der freien Strahlänge zu, sondern stärker, nach Maßgabe der Geschwindigkeitskurve der Strahlspitze (Bild 23). Trotz dieser hohen Geschwindigkeit wird der Strahl auch hier noch weitgehend umgelenkt, wie Bild 26 erkennen läßt. Hier wurde in Luft von motorischer Wichte ( $31 \text{ atü } 480^{\circ}\text{C}$ ) eingespritzt. Die Umlenkung kann nicht mehr so vollkommen sein, wie bei der großen Aufspritzentfernung, da die Tropfenenergie im Verhältnis zu der im Strahl eingeschlossenen Luft und dem gebildeten Kraftstoffdampf größer ist. Das zeigt sich an der Abplattung des Strahles an der Auftreffstelle. Hinter der Auftreffstelle nimmt der Querschnitt wieder deutlich zu, wie das im vierten und fünften Teilbild des Bildes 26 zu erkennen

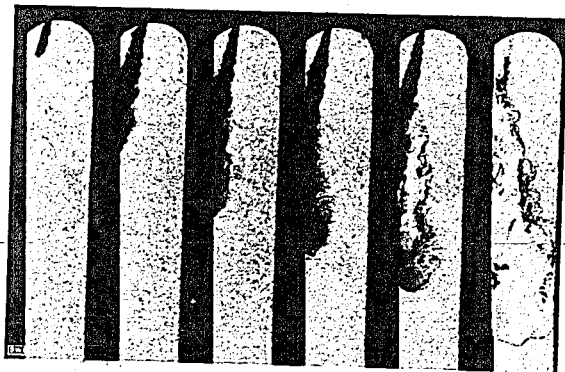


Bild 26. Aufspritzen bei kleiner Entfernung (50 mm) und dieselmotorischer Luftwichte ( $14,9 \text{ kg/m}^3$ ).  
Aufspritzwinkel  $15^{\circ}$ ,  $t_w = 376^{\circ}\text{C}$ .

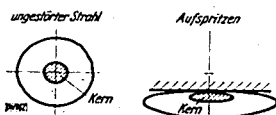


Bild 27. Strahlquerschnitt bei dem ungestörten Strahl und beim Aufspritzen.

Bild 28. Aufspritzen bei kurzer Entfernung (50 mm) und geringer Luftwichte ( $10,3 \text{ kg/m}^3$ ).

ist. Diese Zunahme des Querschnittes zeigt, daß die Strahlentwicklung hinter der Umlenkstelle in der gleichen Weise weitergeht wie im freien Strahl, d. h. durch den Kern hindurch. Nur ist jetzt die Symmetrie des Strahlquerschnittes verlorengegangen, da die energiereicheren Tröpfchen, und das sind eben die im Strahlkern, näher an die Wand heranrücken. Der Kern schießt nach der Umlenkstelle dicht an der Platte entlang, ohne diese zu berühren, während der übrige Querschnitt sich in der in Bild 27 gezeigten Art verteilt. Die Aufrechterhaltung der Strahlbildung nach der Auftreffstelle kann nur dadurch ermöglicht werden, daß der Kraftstoff mit Luft durchmischt ist, die sich in Strahlrichtung mit großer Geschwindigkeit vorwärtsbewegt. Daraus muß geschlossen werden, daß der Strahl auf dem Wege zur Auftreffstelle injektorartige Luft in sich aufnimmt.

Durch die hohe Geschwindigkeit prallt jetzt ein Teil des Kraftstoffes flüssig auf die Wand auf. Dieser Anteil ist nicht bedeutend, denn die Auftreffstelle ist nicht größer als der aus den Zeitlupenbildern zu entnehmende Kernquerschnitt. Diese Auftreffstelle ist auf der berußten Platte deutlich zu erkennen, da hier der Rußbelag bis auf den Rückstand von der letzten Einspritzung weggespült wurde. Der auftreffende Kraftstoff verbleibt an dieser Stelle, denn der Auftreffpunkt erstreckt sich nur wenig in der Strahlrichtung. Dahinter kann der Kraftstoff, der im Kern dicht an der Wand entlangschießt, nicht mehr flüssig berühren, denn die Nähe der heißen Wand beschleunigt die Verdampfung, so daß eine Dampfschicht zwischen Strahl und Wand gebildet wird.

Mit abnehmender Luftwichte steigt die Bewegungsenergie der Tröpfchen, so daß die Umlenkung schwieriger wird. Der Kraftstoff wird stärker an die Wand herangedrängt und ein größerer Teil trifft flüssig auf. Bild 28 zeigt einen solchen Vorgang, bei dem die Luftwichte nur  $10,2 \text{ kg/m}^3$  betrug. Im vierten Teilbild ist der dicht an der Wand entlangschießende Kern zu erkennen. Hinter der Auftreffstelle zeigt sich die vom Strahlkopf ausgehende weitere Durchmischung des Kraftstoffes mit Luft. Durch die große Auftreffenergie wird der Kraftstoff auch senkrecht zur Strahlrichtung stärker zerteilt, so daß die Flamme, wie das fünfte Teilbild zeigt, sogar über den Rand der Platte hinausgreift.

Die Lage der Zündzone bleibt auch bei der kurzen Aufspritzentfernung die gleiche wie beim ungestörten Strahl. Die Veränderung des Strahlbaues (Bild 27) bedingt eine andere Temperaturverteilung im Strahlquerschnitt. Der kalte Strahlkern verhindert die Zündung an der Wandseite, so daß die Zündung nur auf der Luftseite einsetzen kann (fünftes Teilbild, Bild 26).

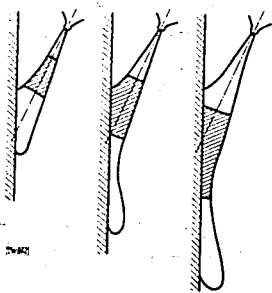


Bild 29. Wanderung der Zündzone mit zunehmendem Zündverzög. Zündverzög von links nach rechts zunehmend.

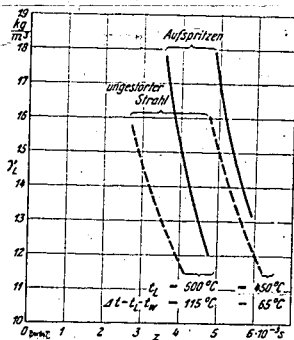


Bild 30. Einfluß der Wandtemperatur auf den Zündverzög bei verschiedenen Lufttemperaturen.

$t_w$  — 385°C, Aufspritzen bei 15° und 50 mm Entfernung.

### 43 Zündung beim Aufspritzen

#### 431 Aufspritzen auf Wände von Kolbentemperaturen

Der Zündverzög ist abhängig von den Vorgängen in der Zündzone, die sich etwa in der Mitte der Strahlänge befindet. Bei gegebener Aufspritzentfernung wandert deshalb die Zündzone mit zunehmendem Zündverzög an die Auftreffstelle heran und schließlich über diese hinaus. Bild 29



Bild 31. Aufspritzen auf eine glühende Platte.

$t_w = 708^\circ\text{C}$ .

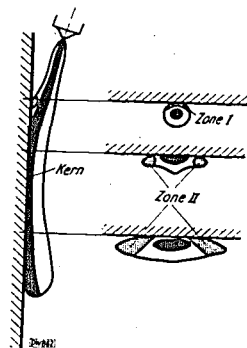


Bild 32. Zündzonen beim Aufspritzen der heißen Platte.

Bild 33. Zündung in Zone I (s. Bild 32).  
 $t_L = 142^\circ\text{C}$ ,  $t_w = 490^\circ\text{C}$ .

zeigt diese Verlagerung der Zündzone. Da die Vorgänge in der Zündzone temperaturabhängig sind, so bedeutet das, daß mit der Annäherung an die Auftreffstelle der Einfluß der Wandtemperatur in Erscheinung tritt. Für die Größe des Zündverzuges ist es deshalb ausschlaggebend, wie die Wandtemperatur zur Lufttemperatur liegt. Bei den bisher gezeigten Untersuchungen lag die Temperatur der Platte, die sich um  $400^\circ\text{C}$  herum bewegte, immer unter der Lufttemperatur. Dadurch wird die Aufheizungsgeschwindigkeit kleiner, der Zündverzug beim Aufspritzen also größer als beim ungestörten Strahl. In Bild 30 ist für zwei Lufttemperaturen die Abhängigkeit des Zündverzuges von der Luftwichte für den ungestörten Strahl und für den Aufspritzvorgang gezeigt. Der Zündverzug nimmt bei der größeren Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wand (linkes Kurvenpaar) erheblich stärker zu. Dieser Unterschied wird mit abnehmender Temperaturdifferenz (rechtes Kurvenpaar) geringer. Bei Gleichheit zwischen Luft- und Wandtemperatur muß gegenüber dem ungestörten Strahl der Zündverzug beim Aufspritzen etwas kürzer sein, da die Wärmekapazität der Wand die von der Wärmeaufnahme des Kraftstoffes herrührende Temperaturabsenkung am Strahl mildert, so daß der Kraftstoff schneller aufgeheizt werden kann.

#### 432 Aufspritzen auf glühende Wände

Mit Hilfe eines elektrischen Hezelementes konnte die Platte bis auf  $700^\circ\text{C}$  (entsprechend Hellrotglut) aufgeheizt werden. Die Versuche wurden wieder mit dem Aufspritzwinkel  $15^\circ$  bei der kleinen Entfernung von 50 mm durchgeführt. Dabei wurden jeweils 85 mg Gasöl eingespritzt.

Bild 31 zeigt bei 27,3 atü und 475° C Lufttemperatur das Anspritzen der 708° C heißen Platte. Aus den beiden ersten Teilbildern geht hervor, daß eine schnellere Verdampfung unter dem Einfluß der glühenden Platte nicht stattfindet. Gemischbildung und Strahlentwicklung verlaufen deshalb ebenso wie bei niedriger Wandtemperatur. Erst wenn die Tröpfchen dicht an die Wand herankommen, macht sich die hohe Temperatur im Sinne einer Beschleunigung der Verdampfung bemerkbar. Das Leidenfrostsche Phänomen tritt in Erscheinung. Dadurch werden die Tröpfchen von der Wandberührung ferngehalten. Schon beim Anspritzen der glühenden Platte in Luft vor atmosphärischem Druck konnten mit bloßem Auge einzelne Kraftstofftröpfchen beobachtet werden, die über die glühende Platte entlangrollten und schließlich zur Entzündung kamen. Das Auflösungsvermögen der Zeitlupenoptik gestattet leider nicht die Aufnahme dieser Erscheinung.

Das Leidenfrostsche Phänomen wirkt so stark, daß flüssiger Kraftstoff die Wand auch am Auftreffpunkt nicht mehr treffen kann. Die sonst deutlich erkennbare Auftreffstelle verschwindet.

Während bei Wandtemperaturen bis zu 400° C die erste Zündung nur auf der von der Wand abgewendeten Seite einsetzen konnte, wandert mit steigender Temperatur die Zündzone nach der Wandseite zu, bis schließlich die erste Zündung nur dort einsetzt. Dabei spielt das Verhältnis von Luft- zu Wandtemperatur die entscheidende Rolle, da hiervon die Temperaturverteilung im Strahlquerschnitt beeinflußt wird.

Weiter oben wurde bereits dargelegt, daß im Bereiche des Strahlkernes infolge Luftmangels die Zündung auch bei Verdampfung nicht einsetzen kann. Die Zündung zwischen Strahlkern und Wand, die zur Verbesserung der Gemischbildung durch die Volumenzunahme des Zündbereiches beitragen könnte, würde erst dann stattfinden, wenn es z. B. durch gesteuerte Luftbewegung gelänge, zwischen Wand und Strahl ein zündfähiges Gemisch zu erzeugen.

Beim Anspritzen der glühenden Platte treten zwei Zündzonen auf, die von der Kraftstoff- und Temperaturverteilung abhängig sind. Diese Zonen sind in Bild 32 schematisch dargestellt. Zone I stellt den Strahlbereich dar, der zuerst mit der Wand in Berührung kommt. Hier erreicht der Kraftstoff bei heißer Wand sehr schnell die Zündreife. Ein Beispiel für die Zündung in Zone I zeigt das

Bild 34. Zündstellen bei  
niedriger Luftwichte  
(9,0 kg/m³).

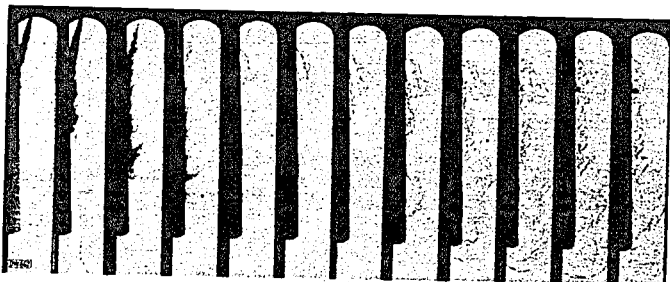
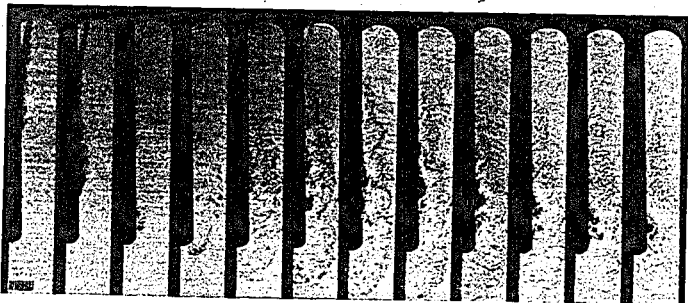


Bild 35. Anspritzen der  
heißen Wand bei go-  
ringer Wichte  
(6,7 kg/m³).





dritte Teilbild des Bildes 33. Die Wandtemperatur betrug  $490^{\circ}\text{C}$ , die Lufttemperatur  $442^{\circ}\text{C}$ . Es genügt also bereits eine Übertemperatur der Wand von  $50^{\circ}\text{C}$ , um die Zündung von der Luftseite in die Zone I zu verlegen. Die Zone II (Bild 32) stellt den Teil des Strahlmantels dar, der der Wand am nächsten liegt. Diese Zone vergrößert sich mit steigender Wandtemperatur. Bei höchsten Wandtemperaturen, wie in Bild 31, umfaßt die Zündzone den Strahl vollständig, wobei auf der Wandseite die Umfassung in der Zone I erfolgt.

Bei kleiner Luftwichte treten beim Anspritzen der heißen Wand bisher noch nicht beobachtete Zündstellen auf. Bild 34 zeigt einen Vorgang, bei dem die Lufttemperatur  $370^{\circ}\text{C}$  und die Wandtemperatur  $500^{\circ}\text{C}$  betrug. Der Luftwichte von  $9,0\text{ kg/m}^3$  entspricht ein Druck von 16 atü. Der Kraftstoff schießt unter schneller Verdampfung dicht an der Platte entlang. Im vierten Teilbild setzt in der ersten Zone die Zündung ein. Am Auftreffpunkt hat flüssiger Kraftstoff die Wand berührt, dessen durch Verdampfung ermöglichte Verbrennung die auf den folgenden Bildern erkennbare Ausbeulung hervorruft. Während die Verbrennung von der ersten Zündstelle aus langsam weiterläuft, zeigt sich plötzlich im achten Teilbild unten ein zweiter Zündherd, der, zwar beschleunigt durch die heiße Wand, die Zündzone des ungestörten Strahles unter gleichem Luftzustand darstellt. Bild 35 zeigt wieder einen Einspritzvorgang bei kleiner Luftwichte. Die Wandtemperatur liegt jetzt mit  $550^{\circ}\text{C}$  um  $50^{\circ}$ , die Lufttemperatur mit  $495^{\circ}\text{C}$  um  $125^{\circ}$  höher. Dadurch wird die Verdampfung so stark beschleunigt, daß flüssiger Kraftstoff die Wand nicht mehr treffen kann. Am Auftreffpunkt sind keine Verbrennungsprodukte festzustellen<sup>4</sup>). Die hohe Geschwindigkeit und die schlechte Zerstäubung in der verhältnismäßig dünnen Luft haben zur Folge, daß der Kraftstoff erst in größerer Entfernung von der Düse zur Verbrennung gelangt.

Bild 36. Einfluß der Wandtemperatur  $t_w$  auf den Zündverzögerung  $t_L$  bei Lufttemperatur  $t_L = 450^{\circ}\text{C}$  abhängig von der Luftwichte  $\gamma_L$ .  
Aufspritzwinkel  $15^{\circ}$ , Strahl-  
länge 50 mm.

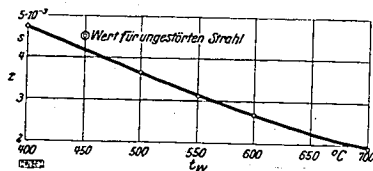
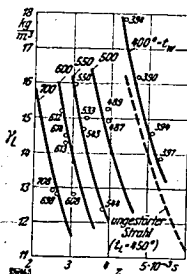


Bild 37. Abhängigkeit des Zündverzuges von der Wandtemperatur bei 32 atü und  $450^{\circ}\text{C}$  entsprechend einer Wichte von  $15,6\text{ kg/m}^3$ .

Der Zündverzögerung wird beim Anspritzen der heißen Wand durch die Verlagerung der Zündzone stark verkürzt. Dieser Einfluß der Wandtemperatur wurde im Bereich von 400 bis  $700^{\circ}\text{C}$  bei einer Lufttemperatur von  $450^{\circ}\text{C}$  genau untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 36 gezeigt. In der üblichen Darstellung, Luftwichte über Zündverzögerung, wurden neben der konstanten Lufttemperatur als zweite Parameter mehrere Wandtemperaturen gewählt. Zum Vergleich wurde der Verlauf des Zündverzuges beim ungestörten Strahl (Bild 11) für die gleiche Lufttemperatur eingezeichnet. Durch die Steigerung der Wandtemperatur von 400 auf  $700^{\circ}\text{C}$  wird der Zündverzögerung im Gebiete motorischer Wichte ( $15\text{ kg/m}^3$ ) um mehr als die Hälfte verkürzt.

Bei niedrigeren Lufttemperaturen tritt die Verkürzung des Zündverzuges noch stärker hervor. So würde für den in Bild 34 gezeigten Vorgang ( $t_L = 370^{\circ}\text{C}$ ,  $t_w = 500^{\circ}\text{C}$ ) unter gleichen Bedingungen beim ungestörten Strahl der Zündverzögerung die dreifache Zeit erfordern. Diese Verkürzung spielt wegen ihrer absoluten Größe für niedrig verdichtende Motoren, wie z. B. Glühkopfmotoren, eine entscheidende Rolle.

In Bild 37 ist die Beeinflussung des Zündverzuges durch die Temperatur der angespritzten Wand für die Luftwichte  $15,6\text{ kg/m}^3$  entsprechend 32 atü und  $450^{\circ}\text{C}$  dargestellt. Die Kurve zeigt, daß der Zündverzögerung mit steigender Wandtemperatur einem unteren Grenzwert zustrebt. Dieser Grenzwert ist von der Lufttemperatur und dem Strahlweg von der Düse bis zur Wand abhängig. Mit steigender Lufttemperatur und mit abnehmender Strahlänge ist eine weitere Verkleinerung des

<sup>4</sup>) Im Einspritzzündermotor, bei dem infolge der geringen Luftwichte die Gemischbildung besondere Schwierigkeiten bereitet, könnte das Ausfallen flüssigen Kraftstoffes dadurch vermieden werden, daß der Kraftstoffstrahl gegen heiße Stellen des Brennraumes gerichtet wird. Neben der Förderung der Gemischbildung durch die Verdampfung und dem damit sinkenden Bedarf an Luftbewegung könnte dadurch gleichzeitig eine Kühlung der betreffenden Stelle erreicht werden.

Grenzwertes zu erwarten. Der eingetragene Vergleichswert für den ungestörten Strahl zeigt den weiter oben klargelegten Zusammenhang, wonach bei Gleichheit zwischen Wand- und Lufttemperatur der Zündverzögerung beim Aufspritzen kleiner wird als beim freien Spritzen.

Über den Verlauf des Zündverzuges bei Wandtemperaturen unter  $400^{\circ}\text{C}$  liegen bisher keine Versuche vor. Es ist anzunehmen, daß auch hier ein Grenzwert erreicht wird, der von dem Temperaturgefälle von der Luft an die Wand abhängig ist.

#### 44 Verbrennung beim Aufspritzen

Der Verlauf der Verbrennungsgeschwindigkeit wird von der Größe des Zündverzuges beeinflusst. Dieser ist vom Zustand der Luft, insbesondere von deren Temperatur, abhängig. Beim Aufspritzen unterliegt der Zündverzug nicht nur dem Einfluß der Lufttemperatur, sondern auch dem der Wandtemperatur. Deshalb wird beim Aufspritzen die Verbrennungsgeschwindigkeit auch von der Wandtemperatur beeinflusst. In Bild 38 sind drei Verbrennungsvorgänge beim Aufspritzen dargestellt. Jedesmal wurden 85 mg Gasöl eingespritzt. Der Aufspritzwinkel betrug  $\alpha = 15^{\circ}$ , die freie Strahlänge  $l = 50$  mm. Die Lufttemperatur  $t_L$  wurde bei den drei Vorgängen konstant gehalten, während die Wandtemperatur  $t_W$  verändert wurde. Die zugehörigen Werte sind im Diagramm eingetragen. Die Kurven lassen grundsätzlich die gleiche Abhängigkeit des Verbrennungsablaufes vom Zündverzug erkennen, die auch die Untersuchung der ungestörten Strahlen gezeigt hatte (Bild 15). Die Herabsetzung der Zündspitze wird hier durch die Erhöhung der Wandtemperatur hervorgerufen, während dort

für den gleichen Zweck die Lufttemperatur heraufgesetzt werden mußte. Das folgende Bild 39 zeigt, daß bei gleichen Zündverzügen der Verlauf der Verbrennungsgeschwindigkeiten beim Aufspritzen und beim freien Spritzen praktisch der gleiche ist. Dadurch wird bestätigt, daß beim Aufspritzen die Strahlbildung grundsätzlich in derselben Weise verläuft, wie im ungestörten Strahl, also Entwicklung durch den Strahlkern. Diese Erkenntnis wurde bereits aus den Zeitlupenbildern gewonnen.

Die geringen Unterschiede, die das Bild 39 zwischen den zusammengehörigen Kurven erkennen läßt, werden dadurch hervorgerufen, daß durch die Veränderung des Strahlquerschnittes die Gemischbildung verzögert wird. Durch das Heranrücken des Strahlkernes an die Wand fällt ein großer Teil des Strahlmantels weg. Da die Zerstäubung trotzdem weitergeht, findet in den rechts und links vom Kern befindlichen Teilen des Strahlmantels eine Verstärkung der Kraftstoffkonzentration statt. Die dadurch verursachte Temperaturänderung verringert die Stärke der Zündzone. Dieser Vorgang zeigt sich in der niedrigeren Zündspitze der Kurven. Diese Herabsetzung der Zündspitze durch das Anspritzen glühender Brennraumteile muß besonders für schwer zündliche Kraftstoffe beachtet werden.

Für die Durchbrennzeit, die beim Einspritzen in ruhende Luft nur von dem rein mechanischen Gemischbildungsvorgang abhängig ist, bedeutet die Verzögerung der Strahlentwicklung durch die Vorgänge an der Wand eine weitere Verschlechterung. Die starke Verkürzung des Zündverzuges an der glühenden Wand beschleunigt die Umhüllung des Strahles mit dem brennenden Mantel (Bild 31). Außerdem wird an der glühenden Wand auch der Strahlkern schneller hochgeheizt.

Das bedeutet gegenüber dem ungestörten Strahl eine Erhöhung der Aufheizgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verzögerung der Sauerstoffzufuhr. Dadurch vergrößert sich beim Aufspritzen die Durchbrennzeit abhängig von der Wandtemperatur um 30 bis 50 %, d. h. mit steigender Wandtemperatur nimmt die Durchbrennzeit zu.

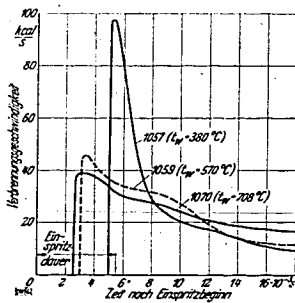


Bild 38. Abhängigkeit des Verbrennungsablaufes von der Wandtemperatur.  
Werte siehe Zahlentafel 4.

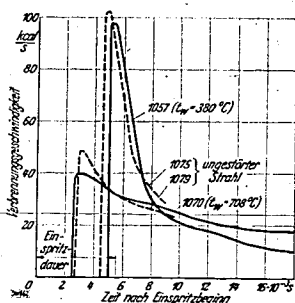


Bild 39. Grundsätzlich gleicher Verbrennungsablauf beim freien Spritzen und beim Aufspritzen (bei gleichen Zündverzügen).

Deshalb muß beim Aufspritzen des Kraftstoffes die Gemischbildung in verstärktem Maße durch Luftbewegung unterstützt werden, wobei auch die Art der Luftbewegung besonderer Beachtung bedarf.

#### 45 Einfluß des Aufspritzwinkels

Bild 40 und 41 zeigen das Aufspritzen unter einem größeren Winkel ( $\alpha = 45^\circ$ ). Wegen der Beschränkung der Sichtverhältnisse durch die Breite des Bombenfensters wurde bei völlig gleicher Anordnung der Aufspritzpunkt bei Bild 40 an den linken Bildrand, bei Bild 41 an den rechten Bild-

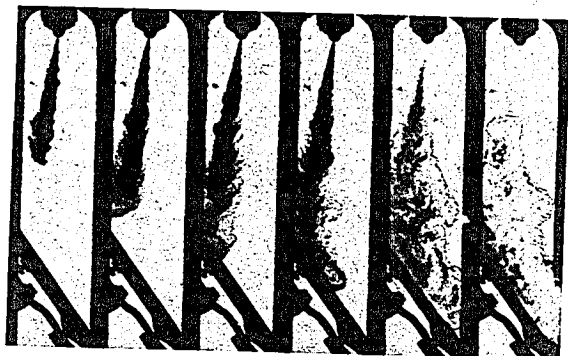
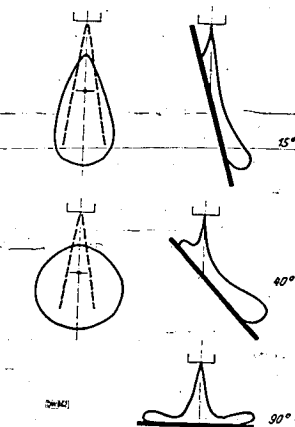


Bild 40 und 41. Aufspritzen unter  $45^\circ$  bei völlig gleichen Bedingungen.

Wegen der Sichtverhältnisse Aufspritzpunkt einmal am linken (40) und einmal am rechten Bildrand (41).

Bild 42 (unten). Strahlform beim Aufspritzen ohne Zündung.



rand gelegt. Bild 40 zeigt, daß auch bei diesem steileren Aufspritzen — unter Berücksichtigung der großen Strahlänge von 100 mm — die Umlenkung des Strahles, getragen vom Luft- und Dampfgehalt, in der Art eines Strömungsvorganges erfolgt. Noch besser zeigt Bild 41, daß der gasförmige Teil des Strahles Träger der Weiterentwicklung hinter der Aufspritzstelle ist. Hier wird der Strahl sogar nach oben, das heißt nach einer Umlenkung von über  $90^\circ$ , weiterentwickelt. Die Ausbreitung des Strahles erfolgt demnach nicht nur in der Strahlrichtung über die Wand, sondern vom Auftreffpunkt ausgehend nach Maßgabe des Aufspritzwinkels radial nach außen. In Bild 42 ist dieser Vorgang abhängig vom Aufspritzwinkel nach Aufnahmen, die beim Aufspritzen in kalter Luft gemacht wurden, schematisch dargestellt. Um diese Vorgänge auch bei der Einspritzung in heiße Luft sichtbar zu machen, wurde auf eine Glasplatte aufgespritzt. Diese Drahtglasplatte war im folgenden Bild 43 so angeordnet, daß der Aufspritzvorgang in der Draufsicht beobachtet werden kann. Hier trifft der Strahl die Glasplatte nach 95 mm Strahlweg unter einem Winkel von  $40^\circ$ . Im fünften Teilbild erreicht

der Strahl die Platte und beginnt sich bereits auszubreiten (Temperatur der Platte  $408^{\circ}\text{C}$ ). Die im sechsten Bild einsetzende Zündung verdeckt schließlich die weitere Entwicklung. Deshalb wurde der Vorgang unter den gleichen Bedingungen von unten aufgenommen, Bild 44. Der Strahl trifft jetzt die Platte auf der vom Beschauer abgewendeten Seite. Diese Aufnahme gestattet einen bisher unbekannten Einblick in den Gemischbildungsvorgang. Im vierten Teilbild erreicht der Strahl die Platte, während im Luftraum bereits die Zündung einsetzt. Im fünften Teilbild brennt schon der ganze Strahlmantel. Das zeigen die Verbrennungsschlieren am Strahlkopf. Im Inneren des Strahles zeigen die dunklen Stellen den im Strahlkern nach vorn kommenden ungezündeten Kraftstoff. Die langsame Aufhellung dieser dunklen Stellen läßt den Gemischbildungsablauf nach der Zündung gut erkennen. Aufspritzspuren konnten auf der Glasplatte, abgesehen von dem normalen Rußbelag, nicht festgestellt werden. Das ist auf die große Strahllänge zurückzuführen.

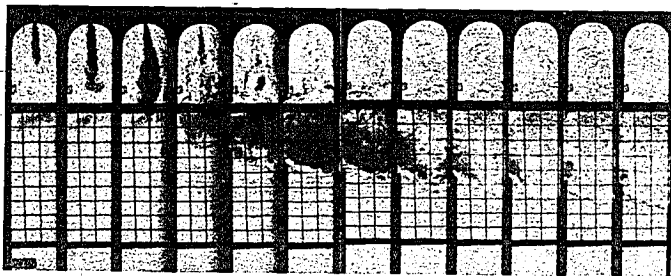


Bild 43 und 44. Aufspritzen auf eine Drahtglasplatte.  
Aufspritzwinkel  $40^{\circ}$ , Strahllänge 95 mm.

Bild 43 (oben). Draufsicht. Bild 44 (unten). Ansicht von unten.

Diese Aufnahme widerlegt die oft geäußerte Ansicht [5, 7, 14], daß an der Auftreffstelle des Kraftstoffstrahles eine Temperaturspitze und damit gegebenenfalls eine Überhitzung auftreten müsse. Bei dem Kraftstoffstrahl, den die handelsüblichen Loch- und Zapfendüsen erzeugen, kann an der Auftreffstelle eine Temperaturspitze nicht auftreten. Die Strahlbildung erfolgt durch den Kern, so daß dauernd kalter Kraftstoff an der Strahlspitze erscheint. Deshalb ist an der Auftreffstelle eine Kühlung durch flüssig auftreffenden Kraftstoff zu erwarten.

Dagegen tritt bei Vorkammermaschinen an der Auftreffstelle des Vorkammerstrahles stets eine Temperaturspitze auf, da jetzt der Strahl weitgehend mit Luft durchmischt brennend die Wand erreicht. Das gleiche gilt für Lufteinblasemaschinen.

In Bild 45 ist das senkrechte Aufspritzen gezeigt. Die Entfernung beträgt 40 mm. In diesem Falle wurde an Stelle der ebenen Platte eine Halbschale verwendet, da sonst der Kraftstoff nach



Bild 45 und 46.  
Senkrechtes Aufspritzen  
auf eine konkave Platte.



Bild 45.  
 $t_w = 375^\circ\text{C}$ ,  $t_L = 165^\circ\text{C}$ .

Bild 46.  
 $t_w = 375^\circ\text{C}$ ,  $t_L = 390^\circ\text{C}$ .



dem Auftreffen rasch aus dem Bildfeld verschwinden würde. Hier sind die Bedingungen für die Weiterentwicklung des Strahles nach dem Auftreffen am ungünstigsten. Während die Außenzonen des Strahles infolge ihrer geringen Geschwindigkeit und weitgehenden Durchmischung mit Luft noch gut umgelenkt werden (drittes und viertes Teilbild), trifft der aus dem Strahlkern kommende Kraftstoff flüssig auf. Darunter fällt der größte Teil des Kraftstoffes, der nach der Wandberührung abgespritzt wird, denn die Weiterbildung des Strahles erfolgt vorwiegend durch den Kern. Deshalb sollte beim senkrechten Aufspritzen die Einspritzung spätestens dann beendet werden, wenn die Strahlspitze die Wand erreicht. Die Anlagerung des Kraftstoffes in der Schale ist gut zu erkennen. Dieser Kraftstoff kann nur durch Verdampfung mit der Luft zur Mischung kommen. Die Zündung setzt im siebenten Teilbild (erstes Bild der unteren Reihe) im Luftraum ein, da die Lufttemperatur um  $100^\circ$  höher liegt als die der Wand. Auf den letzten Bildern ist das langsame Ausbrennen des an der Wand ausgefallenen Kraftstoffes zu sehen.

Das folgende Bild 46 zeigt ebenfalls senkrechtes Aufspritzen. Hier wurde in eine mit Fenstern versehene zylindrische Kammer eingespritzt. Dadurch erscheint das Bildfeld etwas getrübt. Bei dieser Aufnahme lag die Wandtemperatur in der Nähe der Lufttemperatur, so daß wegen des besseren Wärmeüberganges die Zündung in Wandnähe einsetzt (drittes Bild der unteren Reihe). Die Zündung läuft jetzt wie eine Flammenfront im Ottomotor nach oben, da das Gemisch im Luftraum die Zündtemperatur noch nicht erreicht hat.

#### 46 Oberflächengestaltung und Strahlbildung

Die bisher gezeigten Aufnahmen ließen erkennen, daß der Kraftstoffstrahl nach dem Auftreffen sich an der Wand entlang weiterentwickelt. Ein Wegspritzen des Kraftstoffes von der Wand im Sinne einer Reflexion konnte nicht festgestellt werden. Damit war aber noch nicht bewiesen, ob der Kraftstoff nicht in Richtung der Tangente am Auftreffpunkt an der Platte entlangspritzt. Deshalb

wurde (Bild 47) auf ein konvex gewölbtes Blech aufgespritzt (34,7 atü, 378° C). Es ist deutlich zu erkennen, daß ein solches Zurückspritzen nicht stattfindet, obwohl bei der kurzen Strahllänge ein Teil des Kraftstoffes flüssig auf die Platte auftrifft. Der flüssig auftreffende Kraftstoff haftet an der Auftreffstelle und kann nur durch Verdampfung wieder freikommen. Es fällt auf, daß der Strahl sogar der Wölbung nachläuft. Das wird dadurch hervorgerufen, daß der Strahl infolge seiner hohen Geschwindigkeit injektorartig Luft ansaugt. Da von der Wandseite keine Luft zuströmen kann, so entsteht dort ein Unterdruck, der den Kraftstoffstrahl am Abheben hindert. Darin zeigt sich besonders anschaulich, daß der Strahl nicht den Charakter eines Flüssigkeitsstrahles hat, sondern daß er eher einer Naßdampf- wolke gleicht. In Bild 48 wird der gleiche Aufspritzvorgang mit Zündung gezeigt (32,8 atü, 485° C). Hier ist ebenfalls gut zu erkennen, wie der Strahl der Wölbung nachläuft. Die Platte wurde etwas zum Beschauer gedreht, so daß der Vorgang mehr von oben eingesehen werden kann.

Ganz anders verläuft der Aufspritzvorgang in Luft von atmosphärischem Druck, wie Bild 49

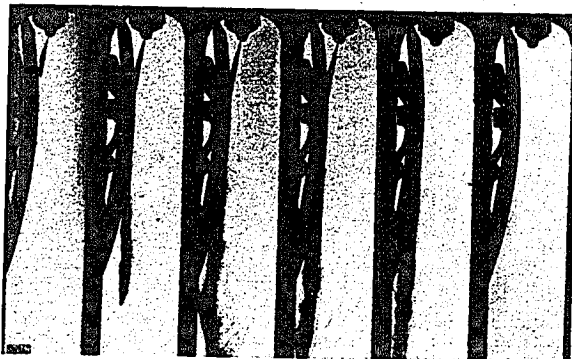
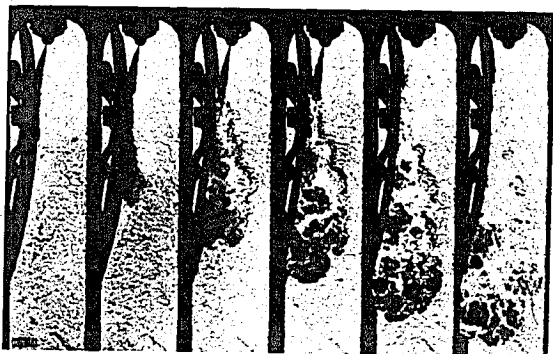


Bild 47 und 48 (oben). Aufspritzen auf ein gewölbtes Blech bei motorischer Wichte.

Bild 47. Ohne Zündung.  
Bild 48. Mit Zündung.

Bild 49. Aufspritzen ohne Zündung auf ein gewölbtes Blech bei atmosphärischer Wichte.

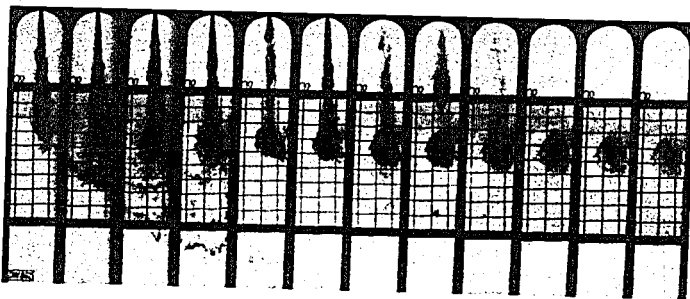


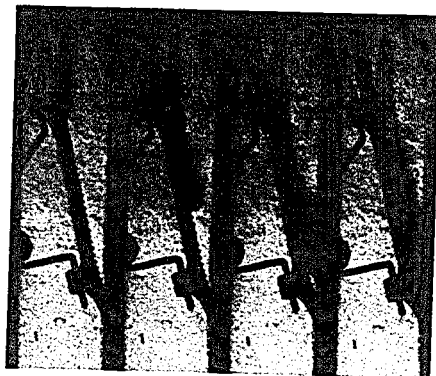
Bild 50. Aufspritzen auf eine Drahtglasplatte bei geringer Wichte.

zeigt. Infolge der geringen Luftwichte wird der Strahl kaum aufgelöst, so daß jetzt der Charakter des kompakten Flüssigkeitsstrahles vorhanden ist. Der Strahl läuft in Richtung der Tangente am Auftreffpunkt von der Platte wieder weg. Die Ergänzung zu dieser Aufnahme gibt Bild 50, bei dem bei einem Luftdruck von 5,8 atü wieder auf die Drahtglasplatte aufgespritzt wurde ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $l = 95$  mm). Hier schießt der Kraftstoff, nachdem er am Auftreffpunkt die Wand berührt hat, dicht über die Platte entlang weiter. Der Vergleich mit dem Wasserstrahl aus dem Gartenschlauch ist selbst hier, bei 5,8 atü Luftdruck, naheliegend.

Der in den beiden letzten Bildern gezeigte Vorgang hat für den Dieselmotor keine Bedeutung. Dagegen spielt er beim Einspritzzündermotor eine sehr wichtige Rolle, weil dort die Einspritzung in den Saughub bei Unterdruck oder bei Laderdruck oder in den Beginn des Verdichtungshubes erfolgt. Die im Vergleich zur Dieseleinspritzung mehr als doppelt so große Durchschlagskraft und die geringe Zerstäubung lassen, auch unter Berücksichtigung der Düsenbauart, erkennen, daß die Gemischbildung vergleichsweise einen wesentlich größeren Aufwand an Luftbewegung erfordert.

Bild 51 bringt das Anspritzen einer Platte, die mit Querrillen versehen war. — Damit wurde eine sehr raue Oberfläche geschaffen. Die Teilbilder 3 bis 6 zeigen, wie der Strahl über diese Rillen, also ohne Wandberührung, entlangschießt. Dieser Vorgang, der als Strömungsvorgang erkannt wurde, kann an der glatten Wand besser ablaufen als an der rauen Oberfläche. In den Rillen wird zusätzlich Kraftstoff angelagert, der für die schnelle Verbrennung verloren ist. Diese Tatsache zeigte sich in dem sehr starken Rußbelag auf der Rillenplatte, während eine gleiche Platte mit glatter Oberfläche unter den gleichen Bedingungen fast blank geblieben war. Deshalb muß beim Aufspritzen von Kraftstoffstrahlen im Dieselmotor auf glatte Oberflächen geachtet werden.

Bild 51. Aufspritzen auf eine Rillenplatte.



#### 47 Wandberührung

##### 471 Auftreffen flüssigen Kraftstoffes

Das Auftreffen flüssigen Kraftstoffes muß in jedem Falle als unerwünscht bezeichnet werden, da der aus dem Strahl ausgefallene Kraftstoff nur durch Verdampfung zur Mischung mit Luft kommen kann. Dafür ist mehr Zeit erforderlich, als für den Gemischbildungsvorgang im Dieselmotor zur

Verfügung steht (im Einspritzzündermotor ist der Zeitraum bedeutend größer). Der ausgefallene Kraftstoff ist deshalb für den zugehörigen Arbeitshub wenigstens zum Teil verloren.

Damit dieser Zustand vermieden werden kann, müssen die Bedingungen bekannt sein, unter denen der Kraftstoff flüssig auf die Wand auftreffen kann. Entscheidend dafür ist der Zustand des Strahles beim Auftreffen. Er hängt ab von der Geschwindigkeit und dem Wärmestand der Tröpfchen und von der Durchmischung des Kraftstoffes mit Luft. Er ist deshalb abhängig von der Strahllänge bis zum Auftreffpunkt und vom Zustand der Luft. Wenn auf Grund dieser Bedingungen das Auftreffen mit Sicherheit nicht verhindert werden kann, so muß durch Erhöhung der Wandtemperatur am Aufspritzpunkt die Verdampfungsgeschwindigkeit soweit gesteigert werden, daß durch das Leidenfrostsche Phänomen die Berührung verhindert wird. Diese Betrachtungen gelten zunächst für den Einspritzvorgang in ruhender Luft. Luftbewegung erleichtert die Bedingungen, ändert aber nichts an der grundsätzlichen Abhängigkeit.

Die Stelle, an der flüssiger Kraftstoff die Wand trifft, ist deutlich zu erkennen, da hier der Rußbelag von den nachfolgenden Einspritzungen immer wieder gewegewaschen wird.

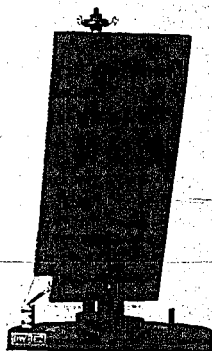


Bild 52. Spritzen aus großer Entfernung (100 mm). Aufspritzwinkel 15°, kein Auftreffpunkt.



Bild 53. Auftreffpunkt bei kleiner Entfernung (50 mm). Aufspritzwinkel 15°.  $t_w = 400^\circ \text{C}$ .

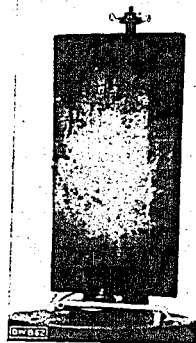


Bild 54. An der glühenden Wand ( $t_w = 700^\circ \text{C}$ ) verhindert das Leidenfrostsche Phänomen das Auftreffen.

Bild 52 zeigt die Platte ( $t_w = 400^\circ \text{C}$ ), nachdem aus 100 mm Entfernung unter 15° längere Zeit aufgespritzt worden war. Die Platte ist gleichmäßig berußt, eine Auftreffstelle ist nicht festzustellen. Dagegen zeigt sich bei der kleineren Strahllänge von 50 mm — Bild 53 — deutlich eine Auftreffstelle. Ihre Größe entspricht dem Kernquerschnitt des Strahles beim Auftreffen. Mit steigender Wandtemperatur — Bild 54 — verschwindet der Auftreffpunkt vollständig, da das Leidenfrostsche Phänomen trotz der hohen Strahlgeschwindigkeit die Berührung verhindert. Die Aufnahme zeigt die Platte nach den Versuchen mit  $700^\circ \text{C}$  Wandtemperatur.

#### 472 Rückstandsbildung

Rückstandsbildung an der Wand beim Aufspritzen entsteht in der Bombe 1. durch unvollständige Verbrennung des Gemisches, 2. durch Rückstände, die von Kraftstoffablagerungen herrühren<sup>5)</sup>.

1. Unvollständige Verbrennung in dem großen Luftüberschuß der Bombe kann dadurch entstehen, daß bei befriedigendem Verbrennungsablauf an der kalten Wand ein Abbruch von Reaktionsketten stattfindet, oder daß unter Sauerstoffmangel niedermolekulare Verbindungen entstehen, die dann bei Sauerstoffzufuhr die zur Reaktion erforderlichen hohen Temperaturen nicht mehr vorfinden.

<sup>5)</sup> In der Maschine kommen dazu die Rückstände von der Schmierölverbrennung.



2. Beim Ausdampfen des an der Wand haftenden Kraftstoffes können neben den reinen Destillationsrückständen unter dem Einfluß der Verbrennungsflamme Krackprodukte und Koks entstehen.

Bei niedrigen Wandtemperaturen (bis zu 400° C) konnte auf den angespritzten Körpern immer ein weicher fettiger Ruß festgestellt werden, der vorwiegend aus niedermolekularen Kohlenwasserstoffen besteht. Seine Herkunft ist in der mangelhaften Gemischbildung in ruhender Luft zu suchen. Rückstände vom Aufspritzen konnten nicht festgestellt werden, da für das Ausdampfen in der Bombe genügend Zeit zur Verfügung steht.

Auf der Glühplatte wurde nach den Versuchen ein trockener, glänzender Rückstand festgestellt, der sich wie feinstes Graphitpulver auf dem Finger verreiben ließ. Dieser Belag setzt sich vorwiegend aus hochmolekularem Kohlenstoff zusammen. Er dürfte dadurch entstehen, daß der beim Abbau des Kohlenwasserstoffes schließlich freiwerdende Kohlenstoff an der glühenden Wand unter Luftmangel z. T. zu stabilen Kohlenstoffmolekülen rekombiniert wird. Kraftstoffablagerungen und damit Krackprodukte und Koks können an der glühenden Wand nicht entstehen, solange das Leidenfrostsche Phänomen die Berührung der Wand verhindert.

#### 48 Oberflächeneinfluß

Das vorliegende umfangreiche Versuchsmaterial gibt Gelegenheit, die im Schrifttum immer wieder auftauchende Vermutung nachzuprüfen, nach der von den Wänden des Brennraumes die Zündung im Sinne eines Oberflächeneinflusses beschleunigt werden könnte [10,15].

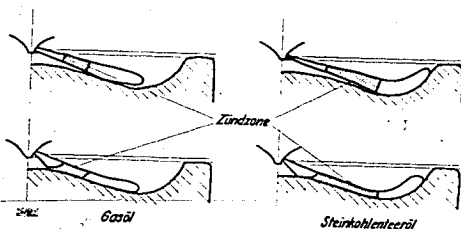


Bild 55. Zündzonen im Motor.

Die Nachprüfung ergibt das folgende Ergebnis:

1. Bei Wandtemperaturen zwischen 320 und 450° C konnte auch bei sehr großen Zündverzügen nicht in einem einzigen Falle eine Zündung an der Wand festgestellt werden. Bei Gleichheit von Luft- und Wandtemperatur setzt die Zündung zwar in Wandnähe ein; diese Verschiebung kann aber einwandfrei als Wärmeübergangsfrage erkannt werden. Da bei diesen Wandtemperaturen der Kraftstoff sowohl in der flüssigen als auch in der dampfförmigen Phase mit der Wand in Berührung kommt, so scheidet auch der Einfluß der Ant-Oxydation, die an der Flüssigkeitsoberfläche zwischen 300 und 500° C erwartet wird, aus.

2. Beim Aufspritzen auf glühende Platten konnte ebenfalls eine Wandzündung nicht festgestellt werden. Die Tatsache, daß bei hellrot glühender Wand die Zündung gleichzeitig an der Luft- und an der Wandseite einsetzt, läßt außer dem thermischen Einfluß der Wand einen Oberflächeneinfluß nicht erkennen. Die Diagramme zeigen den Einfluß der Wandtemperatur auf den Zündverzug (Bild 37), daß der Zündverzug praktisch geradlinig mit der Zunahme der Wandtemperatur und damit mit der Zunahme des Wärmeüberganges abnimmt.

3. Da die angespritzten Körper sowohl im blanken als auch im stark berußten Zustand verwendet wurden, ist auch der Einfluß der Verbrennungsrückstände mit berücksichtigt.

Trotz dieser Feststellungen soll das Vorhandensein eines Oberflächeneinflusses (der z. B. im Sinne eines Katalysators wirken könnte) hier nicht verneint werden. Es muß aber festgehalten werden, daß ein irgendwie gearteter Oberflächeneinfluß praktisch nicht in Erscheinung getreten ist.

In diesem Zusammenhang muß näher auf einen Fall eingegangen werden [10], bei dem die stärkere Verkürzung des Zündverzuges eines aromatischen Kraftstoffes beim Übergang vom freien Spritzen zum Aufspritzen einem noch ungeklärten Oberflächeneinfluß zugeschrieben wurde. In einer Hessel-

man-Maschine mit zentraler Mehrlochdüse — Bild 55 — wurde zunächst zwischen Kolben und Deckel radial nach außen gespritzt. Gegenüber dem Gasöl zeigte Steinkohlenteeröl den bekannten sehr großen Zündverzögerung. Wurden die Strahlen jetzt nach unten geneigt (untere Bilder), so daß sie den Kolbenboden unter einem Winkel von etwa  $20^\circ$  trafen, so wurde der Zündverzögerung des Steinkohlenteeröls sehr stark herabgesetzt, während die Verkürzung beim Gasöl praktisch unbedeutend war.

Die starke Verkürzung des Zündverzögerung beim Steinkohlenteeröl erklärt sich aus der verschiedenen Lage der Zündzonen. Beim Gasöl (linke Seite des Bildes 55) wandert infolge des kurzen Zündverzögerung die Zündzone beim Aufspritzen nur wenig an den Kolben heran; ebenso wird der Abstand vom kalten Zylinderdeckel nur wenig vergrößert. Dadurch erklärt sich die geringe Abnahme des Zündverzögerung. Beim Steinkohlenteeröl liegt die Zündzone infolge des längeren Zündverzögerung weiter entfernt von der Düse (rechte Seite des Bildes 55). Die Zündzone kommt deshalb beim Aufspritzen viel intensiver mit der heißen Kolbenoberfläche in Berührung, während sich gleichzeitig der Abstand vom kalten Zylinderdeckel stärker vergrößert. Damit wird die gegenüber dem Gasöl stärkere Verkürzung des Zündverzögerung beim Steinkohlenteeröl als Folge der Verbesserung der Wärmeübergangsverhältnisse erkannt.

## 5 Zusammenfassung

Die bisher weniger beachtete Tatsache, daß die im Strahlkegel eingeschlossene Luft und der bereits gebildete Kraftstoffdampf sich ebenfalls mit hoher Geschwindigkeit vorwärtsbewegen, gibt dem Aufspritzvorgang im Dieselmotor den Charakter eines Strömungsvorganges. Luft und Kraftstoffdampf sind die Träger der Umlenkung des Strahles. Dadurch bleibt der Strahl aufbau auch nach dem Auftreffpunkt grundsätzlich erhalten. Die Strahlentwicklung erfolgt wie bei dem ungestörten Strahl durch den dichten Strahlkern, um den mit nach außen abnehmender Wichte und Geschwindigkeit der Strahlmantel gebildet wird. Hinter der Auftreffstelle wandert der Kern dicht an die Wand heran, ohne diese zu berühren. Der Strahl entwickelt sich in Wandnähe, ohne von der Wand freikommen zu können. Im flüssigen Zustand kann der Kraftstoff die Wand nur unter besonderen Bedingungen treffen. Senkrecht Aufspritzen ist besonders ungünstig. Zurückspritzen von Kraftstoff im Sinne einer Reflexion findet nicht statt. Wandtemperaturen über  $550^\circ\text{C}$  verhindern das Auftreffen flüssigen Kraftstoffes durch die Herbeiführung des Leidenfrostschen Phänomens. Hohe Wandtemperaturen ergeben eine zusätzliche Aufheizung des Strahles, die eine bedeutende Abnahme des Zündverzögerung mit steigender Wandtemperatur zur Folge hat. Die Abnahme des Zündverzögerung mit steigender Wandtemperatur beeinflusst den ersten Teil des Verbrennungsablaufes im Sinne einer Herabsetzung der Zündspitze. Andererseits wird dadurch die Verwendung weniger zündwilliger Kraftstoffe ermöglicht. Infolge der Verzögerung der Gemischbildung steigt die Durchbrennzeit beim Aufspritzen mit zunehmender Wandtemperatur. Deshalb muß beim Aufspritzen die Gemischbildung in stärkerem Maße durch Luftbewegung gefördert werden.

## 6 Schriftumsverzeichnis

- [1] G. Beck, Zur Umsetzung in technischen Flammen (VDI-Forsch.-Heft 377, S. 1). — Berlin: VDI-Verlag 1936.
- [2] K. Blume, Einfluß der physikalischen Kraftstoffeigenschaften auf den Einspritzvorgang. — Diplom-Arbeit Maschinenlaboratorium T. H. Dresden 1936.
- [3] F. Dreyhaupt, Eine neue Theorie der motorischen Zündvorgänge. (Erscheint demnächst.)
- [4] Ch. Erichsen, Verbrennung im Dieselmotor (VDI-Forsch.-Heft 377, S. 21). — Berlin: VDI-Verlag 1936.
- [5] H. Hintz, Dieselmotoren mit Strahlzerstäubung. — Z. VDI Bd. 69 (1925) S. 673.
- [6] O. Holfelder, Zündung und Flammenbildung bei der Diesel-Brennstoff-Einspritzung (VDI-Forsch.-Heft 374). — Berlin: VDI-Verlag 1935.
- [7] E. Hubendick, Versuchsergebnisse einer Hesselman-Verbrennungsmaschine. — Z. VDI. Bd. 69 (1925) S. 737.
- [8] E. Justi, Spezifische Wärme, Enthalpie, Entropie und Dissoziation technischer Gase. — Berlin: J. Springer 1938.
- [9] E. Koch, Technisches über EC-Kolben. — Bad Cannstatt: Mahle Komm.-Ges. 1938.
- [10] W. Lindner, Grundlagen der Prüfung und Bewertung der flüssigen Kraftstoffe. — Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 25.

- 
- [11] *S. Meurer*, Beitrag zum Bau piezoelektrischer Indikatoren. — *Forsch.-Ing.-Wes.* Bd. 8 (1937) S. 249.
- [12] *F. A. F. Schmidt*, Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündverzug und Klopfvorgang (VDI-Forsch.-Heft 392, S. 1). — Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [13] *H. H. Wolfer*, Der Zündverzug im Dieselmotor (VDI-Forsch.-Heft 392, S. 15). — Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [14] Heavy Oil Engines for British Submarine Boats. — *Engineering* Bd. 108 (1919) S. 8.
- [15] Hütte, des Ingenieurs Taschenbuch, 26. Aufl., Bd. I, S. 561/62. — Berlin: W. Ernst & Sohn 1931.

# Zündverzugsmessung mittels Photozellen in verschiedenen Wellengebieten

Von Dr.-Ing. K. STALLECHNER VDI, Ludwigshafen/Rhein<sup>1)</sup>

## 1 Einleitung

Für die Weiterentwicklung des Dieselmotors ist die Beherrschung des Verbrennungsvorganges von größter Wichtigkeit. Es ist dabei eine notwendige Voraussetzung, alle Umstände, die die Verbrennung im Motor beeinflussen, zu kennen. Von größter Bedeutung ist hier die Erforschung der Vorgänge bei der Einleitung der Verbrennung, d. h. während der Zündverzugsperiode. Werden geeignete Meßeinrichtungen benutzt, so kann man den Zündverzug unmittelbar messen. Wegen seines großen Einflusses auf den Motorbetrieb und seiner Eignung als Kennzeichen eines Kraftstoffes als Dieselskraftstoff ist er der Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten geworden. Zur Klärung des Wesens des Zündverzuges wurden mit verschiedenen Dieselskraftstoffen Zündverzugsuntersuchungen sowohl am Motor, als auch an Versuchsbomben ausgeführt. Ebenfalls wurden experimentelle und theoretische Untersuchungen der Verbrennungsvorgänge während der Zündverzugsperiode oft behandelt.

Der Zündverzug wurde experimentell bestimmt

1. aus dem Indikatorogramm. Dieses wurde entweder mit Bleistiftindikatoren [1, 3, 5, 9]<sup>2)</sup>, oder heute fast ausschließlich mit dem piezoelektrischen Indikator [6, 14, 19] gewonnen.
2. aus photographischen Aufnahmen [6] der Einspritzung und des Verbrennungsbeginnes des Kraftstoffes,
3. nach der Ionisationsmethode [7, 17, 19],
4. durch Messung der bei der Verbrennung ausgesandten Strahlung mittels Photozellen [4, 10, 13, 14, 19],
5. durch spektroskopische Untersuchungen des Verbrennungsvorganges [11, 12].

Für das Verhalten der Kraftstoffe im Motor bilden die Bombenversuche eine gute Grundlage, wenn es auch nicht möglich ist, den Motorprozeß an Bomben vollkommen nachzuahmen. Am Motor läßt sich die Größe, von der der Zündverzug hauptsächlich abhängt, nämlich die Verbrennungslufttemperatur, nicht in dem Maße ändern, wie an Bomben. Man kann aus den an Bomben gewonnenen Ergebnissen Rückschlüsse ziehen, zu welchem Zeitpunkt der Kraftstoff in den Verbrennungsraum des Motors eingespritzt werden muß, damit man einen möglichst raschen Einsatz der Verbrennung erhält.

Für die vorliegende Arbeit war die Aufgabe gestellt, durch Versuche die Verwendungsmöglichkeit der Photozellen zu Zündverzugsmessungen zu klären. Es wurden an der *Wentzelschen Bombe* [5] ermittelt

1. in welchem Teil des sichtbaren Wellengebietes die erste Strahlung am verbrennenden Kraftstoff auftritt. Hierzu wurden neben zwei Photozellen verschiedener Farbempfindlichkeit (blau- und rotempfindlich) mehrere FarbfILTER benutzt, um im sichtbaren Wellengebiet eine monochromatische Strahlung zu erhalten,
2. der Ort des ersten Zündungsbeginnes am eingespritzten Kraftstoffstrahl durch dessen Abtastung mit Lochblenden,
3. der Zündverzug bei verschiedenen Kraftstoffen. Hier wurden auch an einem Kraftstoff vergleichsweise Messungen mit dem piezoelektrischen Indikator ausgeführt.

Die Versuche für Teil 2 und 3 wurden nur mit der rotempfindlichen Zelle ausgeführt, da sich in deren Empfindlichkeitsgebiet der erste Strahlungsbeginn ergab.

<sup>1)</sup> Die Versuche zu dieser Arbeit sind im Laboratorium für Wärmekraftmaschinen der Technischen Hochschule München ausgeführt worden. Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. W. Nußelt VDI, der mir die Arbeit übertrug, möchte ich für seine wohlwollende Anteilnahme und wertvollen Ratschläge meinen ergebensten Dank aussprechen.

Die Mittel für die Durchführung dieser Untersuchungen wurden vom Reichsverkehrsministerium zur Verfügung gestellt, wofür auch an dieser Stelle bestens gedankt sei.

Der Beitrag wurde gleichzeitig von der Technischen Hochschule München (D 91) als Dissertation angenommen.

<sup>2)</sup> Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Schrifttumsverzeichnis auf S. 43.

## 2 Einzelheiten der Versuchsdurchführung

### 21 Versuchseinrichtung

Zu den Versuchen konnte die Einrichtung benutzt werden, die *Wentzel* [5] gebaut hat. Nur kam an Stelle des von ihm und *Müller* [9] benutzten Bleistiftindikators ein piezoelektrischer Indikator zur Anwendung. Außerdem wurde zur Messung des Zündverzuges eine Photozelle in die Bombenwand eingesetzt. Hierfür mußte die Bombe wie folgt umgebaut werden (Bild 1). An Stelle einer der 16 Ober- und Unterteil der Bombe zusammenhaltenden Schrauben wurde im Flansch des Bombenoberteiles eine Bohrung angebracht, in die das Quarzglasfenster, in einer Stärke von 12 mm, in einem Glashalter (Bild 1 a) zwischen Klingeritdichtungen gelagert, eingeführt wurde. Der Quarzglashalter mußte gegen Überdruck im Bombeninnern durch einen Gewindestopfen festgehalten werden. Der Gewindestopfen hatte eine Bohrung von 34 mm Dmr., in die die Photozelle mit Zellenhalter gebracht werden konnte. Die Photozelle ließ sich bis an das Quarzglasfenster schieben. Der Quarzglashalter war so ausgeführt worden, daß auf der dem Verbrennungsraum der Bombe abgekehrten Seite Farbfilter bzw. Lochblenden auf das Quarzglas gelegt werden konnten. Bei ganzer Ausnutzung der freien Fensterfläche (28 mm im Dmr.) umfaßte die Photozelle einen Strahlungswinkel (Raumwinkel) von

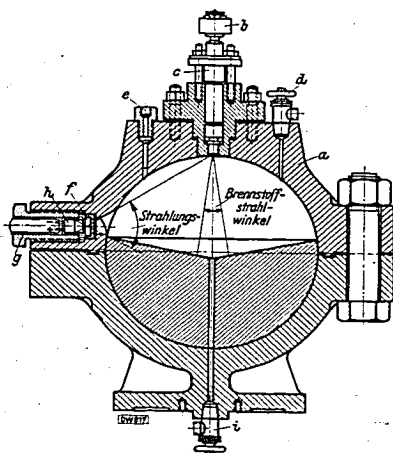


Bild 1 (links). Versuchseinrichtung.

- a Versuchsbombe
- b Magnet zur Registrierung des Düsenanstellhubs
- c Kraftstoffventil
- d drei Ventile (um 90° gegeneinander versetzt) zum Anschluß des Feinmeßmanometers, des Kontak-
- manometers und der Auffüllflaschen
- e Bohrung für die Zündkerze
- f Quarzglasfenster
- g Zellenhalter
- h Photozelle
- i Ventilmutter zum Evakuieren der Bombe

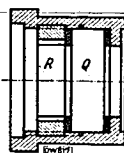


Bild 1a. Quarzglashalter.

- Q Quarzglasfenster 12 mm stark, 40 mm Dmr.
- R Raum für Photozelle, Farbfilter und Blenden.

etwa  $62^\circ$ . Durch diese Anordnung konnte mit der Photozelle der ganze Kraftstoffstrahl erfaßt werden. Bild 1 zeigt einen Schnitt durch die Versuchsbombe mit eingebauter Photozelle und eingebautem Düsenhalter. Der Verbrennungsraum der Bombe wurde durch einen Einsatz aus Stahlguß auf 16,7 Liter verkleinert. Die Wichte der Ladung betrug bei sämtlichen Versuchen  $\gamma_L = 10 \text{ kg/m}^3$ .

Nach Angaben der Heraeus-Quarzglasgesellschaft, Hanau, läßt das verwendete Quarzglas Strahlung im Wellenlängenbereich von  $300 \text{ m}\mu$  bis  $4000 \text{ m}\mu$  restlos durchgehen. Quarzglas wurde deshalb verwendet, damit die Strahlung, entsprechend den Empfindlichkeitsgebieten der Photozellen (Bild-3), ungeschwächt auf die lichtempfindliche Schicht der Photozellen fallen konnte.

Zur Einspritzung des Kraftstoffes wurde die von *Wentzel* [5] konstruierte Vorrichtung benutzt. Als Einspritzdüse kam bei allen Versuchen eine Bosch-Zapfendüse (DN 15 T 4) mit einem Zapfendurchmesser von 3 mm und einem Kraftstoffstrahlwinkel von  $15^\circ$  zur Anwendung. Der Einspritzdruck des Kraftstoffes betrug etwa 280 at.

Um die Einspritzung aufzeichnen zu können, wurde die Düsennadel nach oben verlängert und ein Hufeisenmagnet mit vier Spulen von insgesamt  $8000 \Omega$  Widerstand aufgesetzt. Beide Pole des Hufeisenmagneten wurden durch ein 3 mm starkes Weichenplättchen, das an der Düsennadelverlängerung befestigt war, überbrückt. Bei Anhub der Düsennadel änderte sich der Luftspalt zwischen dem Magneten und dem Plättchen. Durch das Vergrößern des Luftspaltes änderte sich die Kraftlinienzahl im Magneten, wodurch in den Spulen des Magneten eine induzierte Wechselspannung auf-

trat. Diese Wechsellspannung wurde an das eine Ablenkplattenpaar einer Zweistrahlröhre angelegt. Durch ein Gewinde im Gehäuse des Hufeisenmagneten konnte der Abstand zwischen Plättchen und Magneten verstellt werden. Er betrug bei sämtlichen Versuchen 0,3 mm.

## 22 Kathodenoszillograph mit Photozellenkreis

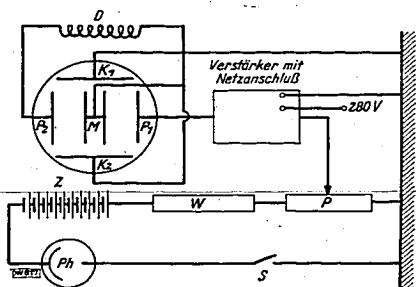
Zur Aufzeichnung der einzelnen Meßvorgänge, Düsenadelanhub, Zeitzeichen, Strahlungs- und Druckverlauf wurden eine Zweistrahlröhre und eine Einstrahlröhre verwendet. Die Strahlablenkungen wurden mit einer Trommelumlaufkamera mit einer Optik 1:2 aufgezeichnet. Bei Versuchen, bei denen der Druckverlauf nicht registriert wurde, diente lediglich die Zweistrahlröhre zur Wiedergabe der Meßvorgänge.

Da die bei Verbrennungsbeginn auftretende Strahlung sehr geringe Intensität hat, mußte der von der Photozelle gelieferte Strom verstärkt werden. Vorversuche, die mit selbstgebaute Gleichstromverstärkern gemacht wurden, ergaben, daß der Verstärkungsfaktor bei den Versuchen ohne Farbfilter auf den Einsatz der Verbrennung ohne Einfluß ist.

Für die Hauptversuche wurde dann der in den Nierschen Apparat<sup>3)</sup> eingebaute Verstärker benutzt. Der Niersche Apparat besteht aus einem Zweistrahlkathodenoszillographen, einem Netzanschlußgerät und einem Verstärker. Zwischen Verstärkereingang dieses Apparates und Photozelle wurde für

Bild 2. Anschluß der Photozelle an den Nierschen Apparat.

$K_1, K_2, M, P_1, P_2$  Ablenkplatten der Zweistrahlröhre ( $K_1, K_2$  und in 250 V angeschlossen)  
 $M$  Zellenwiderstand  
 $P$  Potentiometer  
 $Ph$  Photozelle  
 $S$  Schalter  
 $Z$  Zellenbetriebsspannung aus Anodenbatterie  
 $D$  Magnet zur Düsenadelhubregistrierung



die Zelle ein Sicherheitswiderstand von 0,4 M $\Omega$  und ein Potentiometer von 0,1 M $\Omega$  Widerstand eingeschaltet (Bild 2). Über diese beiden Widerstände gelangte der in der Photozelle — durch Beleuchtung der lichtempfindlichen Schicht (Kathode) derselben — erzeugte Strom auf das Gitter des Eingangsrohrs des Verstärkers. Das vorgeschaltete Potentiometer diente dazu, um für die später beschriebenen Farbfilterversuche ein Regelelement zu haben, wodurch die Verschiedenheit der Durchlässigkeit der Farbfilter und der Empfindlichkeit der beiden Photozellen ausgleichend werden konnte. (Hierauf wird ausführlich in Abschnitt 23 eingegangen.) Der Verstärker hatte 350fache Spannungsverstärkung. Sollte neben dem Strahlungsverlauf auch noch der Druckverlauf aufgenommen werden, dann wurde die durch die Düsenadelbewegung erzeugte Wechsellspannung auf das Ablenkplattenpaar der vorher erwähnten Einstrahlröhre gegeben. Diese war zur gleichzeitigen photographischen Aufnahme auf ein lichtempfindliches Papierband senkrecht zur Zweistrahlröhre angebracht. Die Strahlbewegung auf dem Einstrahlrohr wurde über einen oberflächenversilberten Spiegel umgelenkt.

Wurde bei den Versuchen nur der Strahlungsverlauf und die Düsenadelbewegung aufgenommen, so kam als Zeitmarke die bereits in den Nierschen Apparat eingebaute zur Anwendung. Bei der Aufnahme von Strahlungs-, Druckverlauf und Düsenadelbewegung wurde die Zeitmarke dadurch erhalten, daß sich ein Kondensator über eine Glühlampe und einen Widerstand entlud. Dieses Zeitzeichen war an das Ablenkplattenpaar der Einstrahlröhre angeschlossen, während das Zeitzeichen für die beiden anderen Strahlen ausgeschaltet war. Kondensator und Widerstand wurden so gewählt, daß sich als Zeitkonstante  $\frac{1}{50}$  Sekunde ergab. Die Strahlzugehörigkeit wurde aus den Zeitzeichen der beiden Elektronenstrahlen (Zweistrahlrohr allein im Betrieb) bzw. durch Aufnahme der Nulllage der drei Elektronenstrahlen (Zweistrahlrohr und Einstrahlrohr im Betrieb) erhalten. Die Meßvorgänge wurden auf hochempfindliches Registrierpapier aufgenommen, das eine Geschwindigkeit von 2 bis 3 m/s hatte.

<sup>3)</sup> Dieser Apparat wird von der Firma Dr.-Ing. M. Nier, Dresden, gebaut.

### 23 Photozellen und Farbfilter

Die für die Versuche verwendeten beiden Photozellen hatten verschiedene lichtempfindliche Schichten. Die Lichtempfindlichkeit ist, abhängig von der Wellenlänge, so gegeben, daß die Maximalempfindlichkeit jeder Schicht gleich 100 % gesetzt ist [8], Bild 3. Beide Zellen wurden von der Infrarot G. m. b. H., Leipzig, bezogen; die eine war blau-, die andere rotempfindlich. Die Daten der beiden Zellen sind in Zahlentafel 1 aufgeführt. Beide Zellen waren gasgefüllt.

Für die Versuche wurden deshalb zwei Zellen verschiedener spektraler Empfindlichkeit gewählt, weil untersucht werden sollte, in welchem Teil des sichtbaren Wellengebietes die Strahlung zuerst auftritt. Es zeigt sich aber, daß sich die Empfindlichkeit der beiden Zellen über ein sehr großes Wellengebiet erstreckt (Bild 3). Aus diesem Grunde wurden Versuche mit acht vor die beiden Photozellen geschalteten Farbfiltern der Agfa gemacht. Diese Farbfilter teilen das sichtbare Wellengebiet in annähernd acht gleiche Teile auf und ergeben bei verschiedener Zusammenstellung mit den beiden Zellen ein engbegrenztes monochromatisches Wellengebiet. Die verschiedenen Empfindlichkeitskurven sind, abhängig von der Wellenlänge, für die einzelnen Zusammenstellungen in Bild 4 dargestellt. Filter A, B, C und D wurden vor die blauempfindliche Zelle, Filter E, F, G und H vor die rotempfindliche Zelle geschaltet. Da nun die einzelnen Zusammenstellungen so verschiedene prozentuale Empfindlichkeitskurven aufweisen, mußte die ganze Meßeinrichtung — Photozelle, Farbfilter und Verstärker — auf stets konstante Verstärkung des ganzen Systems geeicht werden, d. h. es mußte das Produkt aus der prozentualen Farbfilterdurchlässigkeit, der prozentualen Photozellenempfindlichkeit und dem Verstärkungsfaktor des Verstärkers für jede Wellenlänge denselben konstanten Wert ergeben. Der Verstärker hatte 350fache Spannungsverstärkung. Die Empfindlichkeitskurven der einzelnen Zusammenstellungen zeigen nun, daß die vorher angegebene Bedingung nicht erfüllt ist. Die Eichung wurde nun durch Vergleich mit einer Lichtquelle bekannter spektraler Energieverteilung vorgenommen. Mittels dieser Lichtquelle und dem in Bild 2 angegebenen Potentiometer P konnte zu jeder Zusammenstellung und für jede Wellenlänge der entsprechende Energiewert der Lichtquelle eingestellt werden. Die Empfindlichkeitskurven der verschiedenen Zusammenstellungen (Bild 4) weisen nun noch von ihrem Maximum aus einen langsam abfallenden Verlauf nach dem lang- und kurzwelligen Gebiet hin auf. Es wurde nun bei der Durchführung der Eichung dem Maximum der Empfindlichkeitskurve jeder Zusammenstellung der entsprechende Energiewert der Lichtquelle (Eichquelle) zugeordnet. Als Eichquelle wurde eine Osram-Episkop-Lampe (110 V, 500 W) gewählt, deren ausgestrahlte Energie von der Osram G. m. b. H., Berlin, auf eine Farbtemperatur von 3000° K eingestellt war [2]. Aus der Energieverteilungskurve des schwarzen Körpers für 3000° K konnte zu jedem Maximum der Empfindlichkeitskurven der Zusammenstellungen bei der Eichung der erforderliche Energiewert mittels des erwähnten Potentiometers am Leuchtschirm der Zweistrahlröhre eingestellt werden, so daß die Ausschläge des Elektronenstrahles aus dessen Nullage den Energiewerten der Eichquelle bei der entsprechenden Wellenlänge entsprachen. Bei Filter Nr. 57 und 58, deren Durchlässigkeiten über 700 m $\mu$  nicht bekannt waren, wurde das Potentiometer so eingestellt, daß der Ausschlag des Elektronenstrahles dem Energiewert der Eichquelle bei 700 m $\mu$  entsprach. Die erhaltenen Eichwerte sind in Zahlentafel 2 zusammengestellt. Dabei ist der Energiewert in Skalenteilen (SKT) angegeben.

Der Abstand zwischen der lichtempfindlichen Schicht der Photozelle und der Eichquelle betrug etwa 20 cm. Es wurde zunächst versucht, den Abstand der Eichlampe von der lichtempfindlichen Schicht der Zelle gleich dem Abstände lichtempfindliche Schicht—Kraftstoffaustritt aus der Düse zu machen, nämlich 35 cm, aber es erwies sich hierbei die Lichtstärke der Episkoplampe für das Filter D zu gering. Bei Verwendung der rotempfindlichen Zelle für die Filter E mit H wurde die Zellenbetriebs-

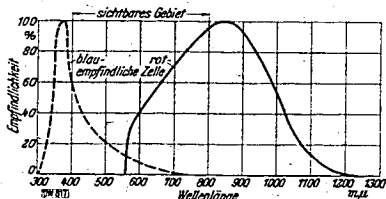


Bild 3.

Spektrale Empfindlichkeit der beiden Photozellen

Zahlentafel 1.

Empfindlichkeit und Zündspannung zweier Zellen.

| Art der Zelle                    | Empfindlichkeit der Zelle bei 100 V Zellenbetriebsspannung | Zündspannung |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------|
| Blauempfindliche Zelle . . . . . | $30 \cdot 10^{-10} \text{ A/mhm}^*$                        | 150 V        |
| Rotempfindliche Zelle . . . . .  | $6000 \cdot 10^{-10} \text{ A/mhm}$                        | 140 V        |

\*) Ampero je Millimeter.

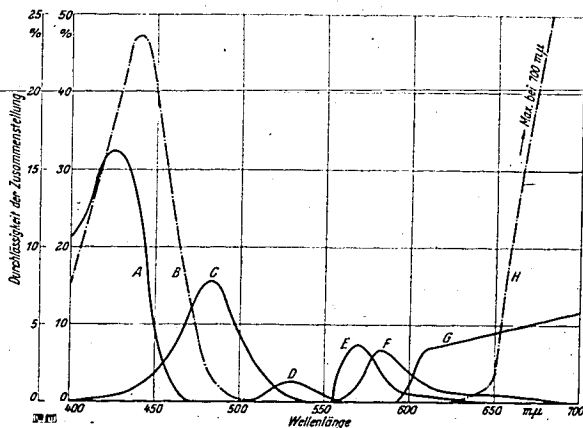
spannung so klein gehalten, weil bei höherer Zellenbetriebsspannung eine befriedigende Einstellung des in Frage kommenden Energiewertes mit dem Potentiometer nicht mehr möglich war. Das Gleichbleiben der Potentiometereinstellung bei dieser Zellenart erklärt sich teils daraus, daß das Empfindlichkeitsmaximum der einzelnen Zusammenstellungen prozentual fast denselben Wert hat, teils aus der Zunahme des Energiewertes des schwarzen Strahlers mit steigender Wellenlänge. Bemerkenswert sei noch, daß das Potentiometer eine Skala mit 100-Grad-Einteilung hat und daß der Ausschlag des Elektronenstrahles am Zweistrahlrohr von 100° nach 0° hin zunimmt.

Im zweiten Teil der Versuche wurde der Ort des Einsatzes der Verbrennung am Kraftstoffstrahl mit der Photozelle ermittelt. Ein punktförmiges Abtasten des Kraftstoffstrahles war nicht möglich, da mit der Photozelle immer ein Raumwinkel erfaßt wurde. Es wurden drei Versuchsreihen mit Lochblenden durchgeführt. Diese Lochblenden hatten einen Lochdurchmesser von 2 mm und waren aus Hartgummi hergestellt. Sämtliche drei Lochblenden hatten exzentrische Bohrungen, und zwar war die Lochachse der einen Lochblende parallel zur Blendenachse, während die beiden anderen Lochachsen mit den Blendenachsen einen Winkel von 25 bzw. 155° bildeten. Die Blenden hatten eine Länge von 14 mm. Auf diese Weise wurden drei Bereiche des Kraftstoffstrahles erfaßt, und zwar einer in der Nähe der Düse, dann die Kraftstoffstrahlmitte und schließlich noch das Kraftstoffstrahlende (Bild 5). Eine punktförmige Abtastung des Kraftstoffstrahles ließe sich nur bei sehr langer Blende bzw. bei sehr kleinem Durchmesser der Blenden erreichen. Dies aber hat den Nachteil, daß die auf die lichtempfindliche Schicht der Photozelle fallende Lichtmenge sehr gering wird. Bei der hier beschriebenen Versuchseinrichtung kommt wegen der Kugelform der Bombe außerdem noch hinzu, daß bei Verwendung von Blenden mit kleinem Lochdurchmesser nur ein enger Bereich des mittleren Teiles des Kraftstoffstrahles hätte erfaßt werden können.

Im dritten Versuchsabschnitt wurde der Zündverzug von fünf Gasölen ermittelt. Die Versuche wurden — wie die Blendenversuche — nur mit der rotempfindlichen Zelle ausgeführt, da die Versuche mit den Farbfiltern und den beiden Photozellen ergaben, daß die Strahlung im langwelligen Teil des sichtbaren Wellengebietes einsetzt.

Bild 4. Spektrale Durchlässigkeit der Zusammenstellung Filter und Photozelle.

Blauempfindliche Zelle mit Filter A, B, C, D; rotempfindliche Zelle mit Filter E, F, G, H.  
Der kleinere Maßstab (0 bis 50%) gilt für die Kurven B und H.



Zahlentafel 2.

Einheitswerte der Farbfilter-Zellen-Zusammenstellungen.

| Filter Nr. *) | Energiewert des schwarzen Körpers für $T_f = 3000^\circ \text{K}$ SKT | Empfindlichkeitsmaximum bei Wellenlänge $m\mu$ | Am Zweistrahlrohr eingestellter Ausschlag SKT | Potentiometereinstellung SKT | Zellenbetriebsspannung V |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 59 (A)        | 56,0                                                                  | 425                                            | 14,6                                          | 72,0                         | 80                       |
| 552 (B)       | 69,5                                                                  | 442                                            | 18,5                                          | 77,0                         | 80                       |
| 53 (C)        | 114,0                                                                 | 483                                            | 29,8                                          | 36,0                         | 100                      |
| 54 (D)        | 172,5                                                                 | 530                                            | 45,0                                          | 20,5                         | 140                      |
| 55 (E)        | 225,5                                                                 | 568                                            | 58,0                                          | 83,5                         | 60                       |
| 56 (F)        | 243                                                                   | 583                                            | 64,4                                          | 83,0                         | 60                       |
| 57 (G)        | 283                                                                   | 700                                            | 100,0                                         | 81,0                         | 60                       |
| 58 (H)        | 283                                                                   | 700                                            | 100,0                                         | 80,5                         | 60                       |

\*) Die eingeklammerten Buchstaben beziehen sich auf die Bezeichnungen in den Diagrammen.



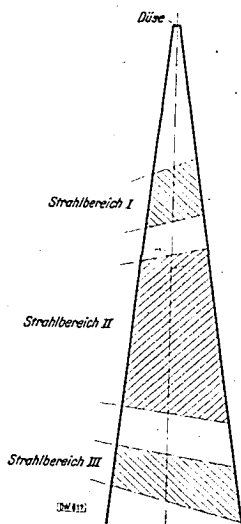


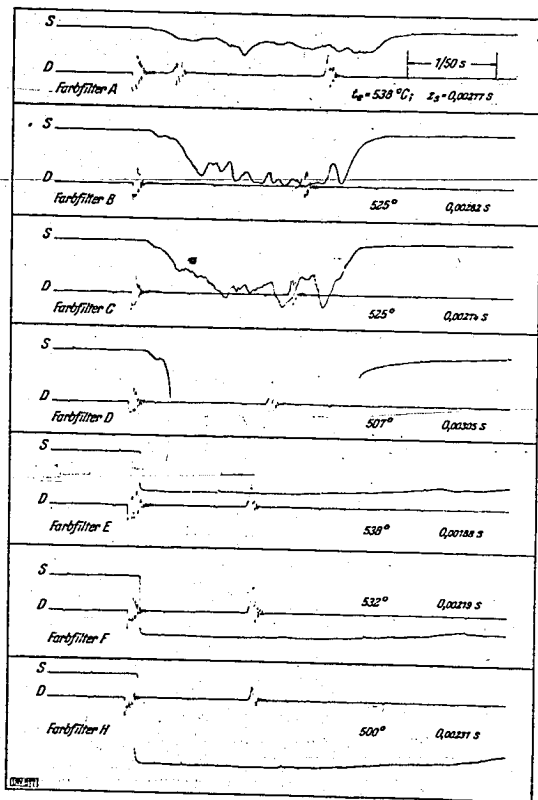
Bild 5 (oben). Abtastung des Kraftstoffstrahles durch die drei Blenden.

## 24 Ablauf eines Versuches

Die Versuchsbombe wurde vor Beginn jedes Versuches mit einer Wasserstrahlpumpe bis auf ein Vakuum von 12 bis 20 mm QS evakuiert. Es erfolgte hierauf die Aufladung mit Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff in der angegebenen Reihenfolge, entsprechend den Partialdrücken der einzelnen Gase so, daß nach der Verbrennung dieses Gasgemisches ein  $\gamma_L = 10 \text{ kg/m}^3$  und ein Sauerstoffgehalt von 21 % in der Versuchsbombe vorhanden war. Zunächst wurde bei 5,4 at  $\text{N}_2$ , dann bei um 2,4 at bzw. um abermals 1,3 at höherem Druck  $\text{O}_2$  bzw.  $\text{H}_2$  aus Stahlflaschen in die Bombe eingefüllt. Der Gesamtdruck der Gasladung betrug 9,1 ata. Inzwischen wurden bereits die Zweistrahlröhre und die Trommelumlaufkamera in Betrieb gesetzt. Dann erfolgte die Spannung der

Bild 6 (unten). Strahlungsdiagramme von Versuchen mit verschiedenen Farbfiltern.

S Strahlung; D Düsenadellhub;  $t_e$  Einspritztemperatur;  $z_e$  Zündverzögerung.



Einspritzvorrichtung, wobei zuvor die zum Einspritzventil gehende Druckkölleitung entlüftet wurde. Anschließend wurde das Relais [5], das eine Kontaktwalze bediente, eingestellt, wobei hier der von Wentzel zur Erregung eines Zeitschreibers benutzte Kontaktstreifen zur Auslösung des Komparverschlusses der Trommelumlaufkamera diente. Nachdem die Gase etwa 10 min diffundiert hatten, wird, falls der Druck in der Bombe noch größer als 9,1 ata ist, solange Gas durch ein Ventil abgelassen, bis der erwähnte Ladedruck erreicht ist. Nach Einschaltung sämtlicher für die Inbetriebsetzung der Kontaktwalze nötigen Spannungen wird die Zündung des  $\text{N}_2\text{-O}_2\text{-H}_2$ -Gemisches durch eine Zündkerze, die im Sekundärkreis eines mit 4 V betriebenen Induktors liegt, eingeleitet. Am Kontaktmanometer steigt der Druck durch die bei der Verbrennung frei werdende Energie, bis der Maximaldruck erreicht ist. Beim Rückgang

des Druckes wird bei dem am Kontaktmanometer vorher eingestellten Druck der Schwachstromkreis über das Relais geschlossen; dieses schaltet auf den Starkstromkreis um. Es erfolgen nun rasch aufeinander das Auslösen des Komprüverschlusses zur Aufnahme der zwei bzw. drei Meßvorgänge, das Auslösen der Einspritzpumpe durch einen Magneten, der ein Gewicht zum Herunterfallen bringt. Durch das Auslösen des Pumpenkolbens wird das Öl mit einem Druck von etwa 280 at in das vorher verbrannte Gasmisch eingespitzt. Die Regelstange der Boshpumpe war für sämtliche Versuche auf die gleiche Fördermenge eingestellt. Das Ablesen des bei der Einspritzung des Öles in der Bombe herrschenden Druckes erfolgte beim Fallen des Gewichtes. Bei den Versuchen, bei denen auch der Druckverlauf mit aufgenommen wurde, war eine amplitudenmäßige Auswertung der Druckdiagramme nicht möglich, da der Quarzindikator bereits längere Zeit unter dem Ladedruck der Bombe stand und eine Eichung des Indikators unter diesen Bedingungen nicht möglich war. Durch das Ablesen des Druckes kann sich ein Fehler von  $\pm 0,2$  at in der Genauigkeit des Einspritzdruckes ergeben. Diese nicht ganz exakte Bestimmung des Einspritzdruckes bedingt einen Fehler der Einspritztemperatur von  $\pm 6^\circ$ , was bei niedrigen Einspritztemperaturen einen prozentualen Fehler von  $\pm 2\%$  ( $t_s = 300^\circ\text{C}$ ), bei hohen Einspritztemperaturen einen solchen von  $\pm 0,75\%$  ( $t_s = 800^\circ\text{C}$ ) ausmacht. Da die Abkühlung des bei der Vorverbrennung erhaltenen Gases bei konstantem Volumen erfolgt, ist die Ermittlung der bei der Einspritzung des Dieseldieselförstoffes in der Bombe herrschenden Temperatur leicht möglich, wobei Höchsttemperatur und Höchstdruck bei der Vorverbrennung aus der Zusammensetzung des in der Bombe eingefüllten Gasmisches und den Anfangszuständen berechnet werden können. Der Zeitraum von der Einleitung der Vorverbrennung bis zur Einleitung der Verbrennung des Dieseldieselförstoffes beträgt bis zu 10 s. Nach erfolgtem Versuch wird die Bombe entleert und für den nächsten Versuch vorbereitet. Es sei noch bemerkt, daß das Quarzfenster immer nach 20 Versuchen ausgebaut und gereinigt wurde, wobei sich an ihm lediglich Wasser niedergeschlagen hatte.

Für die Versuche, die ohne Filter und ohne Blenden gemacht wurden, ergibt sich ein Strahlungsverlauf, ähnlich den in Bild 6 unter *D* bis *H* dargestellten Kurven. Die erste Aufzeichnung der Düsenadelbewegung gibt das Öffnen des Einspritzventiles, die zweite Aufzeichnung gibt das Schließen des Ventiles wieder. Die lange Nachstrahlung, die sich bei diesen Diagrammen zeigt, kann als Temperaturstrahlung gedeutet werden. Bei einem Versuch wurde die Dauer dieser Strahlung mit einem Werte größer als 1 s gemessen. Der Beginn der Strahlung kann aber nicht mit Temperaturstrahlung erfolgen, da nach der Vorverbrennung die Temperatur in der Bombe dauernd im Sinken ist. Wäre hier Temperaturstrahlung vorhanden, so würde sich kaum ein fast senkrecht Abreißen der Strahlung aufzeichnen. Eine Art Vorverbrennung ist in den wiedergegebenen Diagrammen darin zu erkennen, daß der Strahlungsverlauf weniger steil beginnt und die Strahlung erst nach einiger Zeit sehr stark an Intensität zunimmt. Die Vorverbrennung ist in Diagramm *D*, Bild 6, gut zu erkennen. Der fast gleichbleibende Verlauf der Strahlung nach Erreichung des Maximums liegt darin, daß der Verstärker des Nierschen Apparates bei 1 V Verstärkereingangsspannung bereits ausgesteuert war. Versuche, bei denen Druck- und Strahlungsverlauf zusammen aufgenommen wurden, ergaben immer, daß der Druckanstieg erst dann erfolgte, wenn die Strahlung bereits ihr Maximum erreicht hatte. Auf die Diagrammform der in Bild 6 noch gezeigten Diagramme wird in Abschnitt 3 eingegangen werden.

## 25 Untersuchte Öle

Es wurden zwei Gasöle amerikanischer und drei deutscher Herkunft untersucht, und zwar:

1. Diesel-Shell, amerikanisches Gasöl der Rhenania-Ossag,
2. Amerikanisches Gasöl (Standard Oil),
3. Dollbergener Gasöl (Deutsche Gasolin AG., Dollbergen),
4. Misburger Gasöl (Deurg, Gewerkschaft Deutsche Erdölraffinerie, Misburg bei Hannover),
5. Deutsches Dieselmotorenöl (Deutsche Petroleum AG., Erdölwerke Wilhelmsburg, Harburg-Wilhelmsburg).

Zahlentafel 3 enthält die Analysen dieser fünf Öle. Die Werte für Öl 1 sind der Dissertation *Hercle* [19], die für Öl 2 bis 5 einem Bericht von *R. Müller* [9] entnommen.

## 3 Auswertung der Versuche

Die Ergebnisse für das Deutsche Dieselmotorenöl, für das der Zündverzug, abhängig von der Wellenlänge, und das erste Aufleuchten am eingespritzten Kraftstoffstrahl ermittelt wurden, ergaben sich aus etwa 700 Versuchen. Für die anderen, im Abschnitt 32 behandelten vier Öle wurden die Zündverzugswerte aus etwa 300 Versuchen erhalten. Einige Vorversuche, bei denen die Verbrennung des Öles durch das Fenster in der Bombe mit dem Auge beobachtet wurde, ergaben eine sehr stark gelbrot leuchtende Flamme. Bei der Eichung der Farbfilter-Zellen-Zusammenstellungen mit der 500-W-Episkoplampe ergaben sich die in Zahlentafel 2 unter Spalte IV angegebenen Werte für den Ausschlag des

Zahlentafel 3. Ölanalysen.

|                                                  | Ölorte  |        |         |            |        |
|--------------------------------------------------|---------|--------|---------|------------|--------|
|                                                  | 1       | 2      | 3       | 4          | 5      |
| Wichte bei 15° C . . . . . [kg/dm <sup>3</sup> ] | 0,860*) | 0,856  | 0,842   | 0,8875     | 0,856  |
| Zähigkeit bei 20° C . . . . . [° E]              | 1,33    | 1,35   | 1,45    | 1,18       | 1,39   |
| Flammpunkt . . . . . [° C]                       | 76      | 89     | 75      | 85         | 87     |
| Stockpunkt . . . . . [° C]                       |         | — 19   | — 14    | unter — 20 | — 20,5 |
| Anilinzahl . . . . .                             | 21      | 17,5   | 11,2    | 61,5       | 13,2   |
| Siedeanalyse [° C]                               |         |        |         |            |        |
| Siedebeginn . . . . .                            | 200     | 208    | 166     | 202        | 210    |
| Es haben gesiedet                                |         |        |         |            |        |
| 5 % bei . . . . .                                | 223     | 227    | 227     | 216        | 230    |
| 15 % bei . . . . .                               | 234,5   | 241    | 247     | 222        | 243    |
| 25 % bei . . . . .                               | 239,5   | 251    | 260     | 225        | 253    |
| 35 % bei . . . . .                               | 248,5   | 259    | 273     | 229        | 263    |
| 45 % bei . . . . .                               | 252,5   | 270    | 284     | 232        | 273    |
| 55 % bei . . . . .                               | 260,5   | 280    | 297     | 236        | 282    |
| 65 % bei . . . . .                               | 269,5   | 290    | 308     | 242        | 293    |
| 75 % bei . . . . .                               | 279,5   | 303    | 321     | 249        | 308    |
| 85 % bei . . . . .                               | 297     | 321    | 341     | 262        | 327    |
| 95 % bei . . . . .                               | 326,5   | 346**) | 360***) | 300        | 365    |

\*) Bei 20° C.

\*\*) 94 % haben gesiedet.

\*\*\*) 92 % haben gesiedet.

Elektronenstrahles aus dessen Nullage. Bei den Versuchen zeigte sich nun, daß der bei der Verbrennung des Öles erreichte Maximalausschlag immer größer war als der bei der Eichung erhaltene, was beweist, daß die bei der Verbrennung des Öles ausgestrahlte Maximalenergie größer ist als die Energie der Eichquelle bei der entsprechenden Wellenlänge.

### 31 Versuche mit deutschem Dieselmotorenöl

#### 311 Versuchsergebnisse mit den Farbfiltern

Es ist zu prüfen, in welchem Teil des sichtbaren Wellengebietes die erste Strahlung am brennenden Kraftstoffstrahl auftritt, d. h. der kürzeste Zündverzöger. Unter Zündverzöger ist dabei jene Zeit zu verstehen, die — bei Verwendung der Farbfilter und Photozellen in den früher angegebenen Zusammenstellungen — vergeht, bis das erste Aufleuchten nach Einspritzbeginn auftritt, entsprechend dem Durchlässigkeitsbereich der Zusammenstellung. Der kürzeste Zündverzöger ist dann durch ein ganz bestimmtes Wellengebiet gegeben.

Bild 6 zeigt einige Formen des Strahlungsbeginnes und des Verbrennungsverlaufes, wie sie mit den verschiedenen Farbfilter-Zellen-Zusammenstellungen erhalten wurden. Die Ergebnisse mit der Zusammenstellung G wurden weggelassen, da der Strahlungsverlauf annähernd der gleiche wie bei Filter H ist. Als Zündverzögerwerte ergaben sich für die Zusammenstellung G die gleichen wie für H.

Bild 7 zeigt die Zündverzöger, abhängig von der Einspritztemperatur; der Parameter ist hier das jeweilige Maximum der Zusammenstellung.

In Bild 8 sind die Zündverzögerabsolutwerte, abhängig vom Durchlässigkeitsmaximum der einzelnen Zusammenstellungen, für einige Verbrennungslufttemperaturen dargestellt. Diese Darstellung wurde aus Bild 7 erhalten.

Aus diesen beiden letzten Bildern ergibt sich sehr deutlich, daß der erste Strahlungsbeginn mit steigender Wellenlänge kürzere Werte annimmt. Bild 8 zeigt weiter, daß der Strahlungsbeginn mit zunehmender Wellenlänge sehr ungleichmäßig erfolgt. Der dem Absolutwert nach kürzeste Zündverzöger ergab sich bei fast allen Versuchen für die Zusammenstellung E (gelbgrün, Strahlungsmaximum bei 568 mμ). Ferner zeigt dieses Bild sehr deutlich, daß die Unterschiede im kürzesten Zündverzöger für die einzelnen Zusammenstellungen bei verschiedenen Temperaturen sehr ungleich sind. Mit größer werdenden Temperaturen — größer als 750° C — wandert der kürzeste Zündverzöger nach dem langwelligeren Gebiet hin. Die gleiche Tendenz zeigt sich im Temperaturbereich zwischen 400° und 450° C.

Bei den in Bild 6 wiedergegebenen Diagrammen ist die Einspritztemperatur für die dargestellten Versuche annähernd die gleiche gewesen. Es ergibt sich hieraus, daß die Strahlung im kurzwelligen Gebiet bei weitem nicht so intensiv und anhaltend ist. Erst von Filter E ab macht sich die lange Nachstrahlung bemerkbar. Es kann diese z. T. von C-C-Banden bei 564,5 und 618,8 mμ herrühren, z. T. aber auch noch von der Temperaturstrahlung. Der absolut kürzeste Zündverzöger wird durch die Strahlung von Kohlenstoff in dem oben angegebenen Wellengebiet im sichtbaren Teil auftreten. Erichsen [12] machte bei einer spektroskopischen Untersuchung des Verbrennungsvorganges an Dieselmotoren ähnliche Beobachtungen. Bei Filter E und F ist der Verbrennungsverlauf fast immer derselbe,

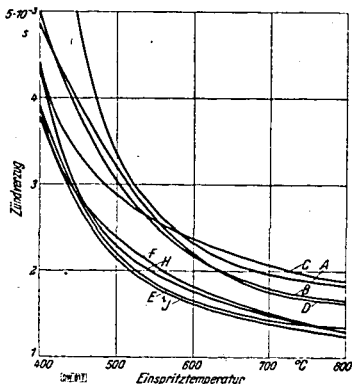


Bild 7. Zündverzug von deutschem Dieselmotoröl in Abhängigkeit von der Verbrennungslufttemperatur (Einspritztemperatur).

Die Kurven beziehen sich jeweils auf die Wellenlängen, bei denen die Zusammenstellungen A bis H ihr Empfindlichkeitsmaximum haben (Maxima aus Bild 4 zu entnehmen). Kurve J gibt die Zündverzugs-werte wieder, die mit der rotempfindlichen Zelle ohne Farbfilter erhalten wurden.

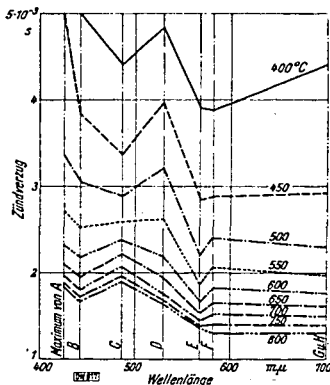


Bild 8. Zündverzug von deutschem Dieselmotoröl in Abhängigkeit vom Strahlungsmaximum der verwendeten Farbfilter-Photozellen-Zusammenstellung für verschiedene Verbrennungslufttemperatur

nur erscheint die Strahlung bei Filter E bis zu den beiden vorher angegebenen Temperaturgebieten früher als bei Filter F, in den vorher angegebenen Temperaturgebieten ist es umgekehrt. Die Vorverbrennung tritt bei den Versuchen mit der rotempfindlichen Zelle trotz der niedrigen Zellenbetriebs-spannung gegenüber der blauempfindlichen Zelle nicht so in Erscheinung. Der Grund dürfte vielleicht in der wesentlich größeren Empfindlichkeit der erstgenannten Zelle zu finden sein (Zahlentafel 1). In allen Diagrammen der Filter E, F, G und H zeigt sich nach Erreichen von  $\frac{2}{3}$  des ganzen Ausschlages ein ganz kleiner Rückgang der Strahlung, wo die Vorverbrennung als beendet angesehen werden kann. Daß bei diesen vier Filtern kein ähnliches Gebirge wie bei Filter A, B und C erscheint, wird einmal darin zu suchen sein, daß im langwelligen Teil des sichtbaren Wellengebietes — wie Erichsen [12] in seiner Arbeit angibt — der Kohlenstoff einige der zweiatomigen Kohlenstoffbindung (C—C, siehe oben) zuzuordnende Banden besitzt, zum anderen darin, daß der Verstärker bei etwa 1 V Verstärker-eingangsspannung bereits angesteuert war. Kurve J, Bild 7, ist bei offenem Quarzfenster (früher angegebener Raumwinkel ganz ausgenutzt) aufgenommen und zeigt, daß die Absolutwerte des Zünd-verzuges sämtlich kleiner sind als die mit den Filtern erhaltenen. Da nun alle Filter nur für das sicht-bare Wellengebiet durchlässig sind und die Zündverzüge nach dem kurzwelligen Teil des sichtbaren Wellengebietes hin länger werden, so muß die Strahlung am brennenden Kraftstoff im langwelligen Gebiete beginnen.

Die Beobachtungen der Vorverbrennung wurden sehr deutlich bei den Versuchen gemacht, bei denen ein Verstärker mit etwa 70facher Spannungsverstärkung verwendet wurde. Aber auch hier zeigte sich bereits, daß der Ausschlag nach Erreichung seines Maximums längere Zeit gleich blieb, um erst dann wieder langsam in seine Nullage zurückzugehen. Die mit der Trommelumlaufkamera auf-genommenen und in Bild 6 dargestellten Diagramme sind in etwa  $\frac{1}{10}$  der natürlichen Größe wieder-gegeben.

Für die an und für sich einfache Art der Untersuchung der Verbrennungsvorgänge mit Farb-filtern und Photozellen wäre es erwünscht, Photozellen mit annähernd gleicher Empfindlichkeit über ein größeres Wellengebiet zu haben, und Farbfilter, die nur in einem eng begrenzten Wellengebiet Strahlung durchlassen, verwenden zu können, wobei der Abfall nach dem kurz- und langwelligen Gebiet hin möglichst steil sein sollte.

### 312 Blendenversuche

Die Ergebnisse, die mit den drei in Abschnitt 23 angegebenen Lochblenden bei Erfassung der in Bild 5 gezeigten drei Kraftstoffstrahlbereiche erhalten wurden, sind in Bild 9 abhängig von der Einspritztemperatur graphisch aufgetragen. Hierbei sei noch kurz angefügt, weshalb sämtliche Ver-

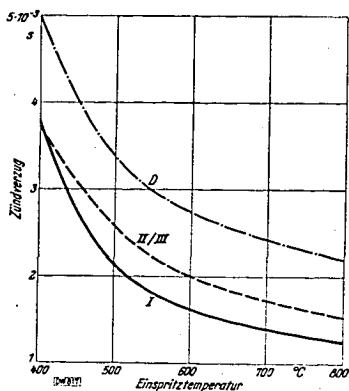


Bild 9. Zündverzug in verschiedenen Strahlbereichen (s. Bild 5) des Kraftstoffstrahles und aus dem Druckverlauf. Kurve I: Strahlbereich I und ganzer Raumwinkel; Kurve II/III: Strahlbereich II und III; Kurve 2: Zündverzug aus dem Druckverlauf.

Teil des Kraftstoffstrahles verschoben. Hofelder [6] machte bei seinen Untersuchungen ebenfalls die Feststellung der ersten Zündung nahe der Düse.

### 313 Ergebnisse mit der rotempfindlichen Zelle und mit dem Quarzindikator

In Bild 9 stellt die oberste Kurve die Zündverzugswerte dar, die aus dem Druckverlauf während der Verbrennung des Öles mit dem trägheitslos arbeitenden piezoelektrischen Indikator erhalten wurden. Die ausgezogene Kurve im

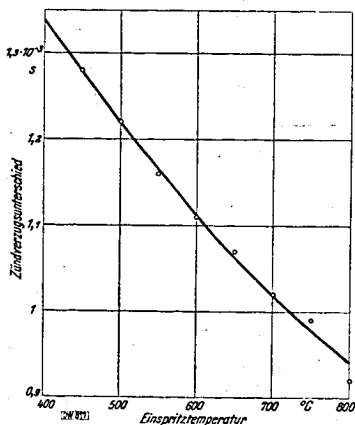


Bild 10. Unterschied im Zündverzug aus dem Druck- und Strahlungsverlauf (vgl. Kurve D und I des Bildes 9) in Abhängigkeit von der Verbrennungslufttemperatur bei deutschem Dieselmotoröl.

suche mit einer Zapfendüse ausgeführt wurden. Wäre eine Mehrlochdüse genommen worden, so hätte nie mit Bestimmtheit gesagt werden können, ob die erste Strahlung an dem untersuchten Kraftstoffstrahl oder an einem anderen aufgetreten wäre. Eine Abstufung wäre aus dem gleichen Grunde nicht möglich gewesen. Die Abstufung eines Kraftstoffstrahles mit der Photozelle ist nur sehr schwer möglich, da man theoretisch nur dann eine punktförmige Abstufung ausführen kann, wenn einerseits die Bohrung der Blende sehr klein und andererseits der Abstand der Photozelle von der Blende sehr groß ist. Bei der nun trotzdem hier durchgeführten Abstufung wurden drei Bereiche des Kraftstoffstrahles untersucht, und zwar einer im oberen Kraftstoffstrahltrahldrittel, dessen Ergebnisse sich mit denen des offenen Fensters (Kurve J in Bild 7) decken, dann einer in der Mitte und schließlich der untere Strahlbereich. Die Ergebnisse der beiden letzten Bereiche decken sich untereinander ebenfalls, sind aber dem Werte nach etwas größer als die des oberen Strahlbereiches. Es ergibt sich aus diesen Versuchen, daß die Zündung im oberen Kraftstoffstrahltrahldrittel einsetzt, aber dann nicht in Form einer Flammenfront fortschreitet, sondern am ganzen übrigen Kraftstoffstrahl gleichmäßig einsetzt. Die Überschneidung der gestrichelten und der ausgezogenen Kurve (Bild 9) bei tiefen Einspritztemperaturen kann damit erklärt werden, daß sich das heiße Luftgemisch von der Bombenwand aus abkühlt, während das Gas im Bombeninnern noch wärmer ist. Deshalb wird hier die erste Zündung mehr in den unteren

den mit der rotempfindlichen Zelle gemessenen kleinsten Zündverzug wieder. Der große Unterschied, der sich nun hier bei der Ermittlung des Zündverzuges aus dem Druckverlauf gegenüber den Werten aus dem Strahlungsverlauf ergibt, erklärt sich aus der Größe des Verbrennungsraumes. Für die Quarzkammer war zur Druckmessung in der Mitte der Wölbung des Bombenoberteiles eine Bohrung mit normalem Zündkerzenzengewinde angebracht. Die mittlere Entfernung der Quarzkammer vom Kraftstoffstrahl beträgt etwa 15 cm. Rechnet man sich nun für einen bestimmten Zustand der Ladung vor der Einspritzung des Öles die Schallgeschwindigkeit aus, so müßte man aus dem Verhältnis der Entfernung der Quarzkammer vom Kraftstoffstrahl und der Schallgeschwindigkeit den Unterschied des Zündverzuges aus Druck- und Strahlungsverlauf erhalten. Für eine Einspritztemperatur  $t_i = 500^\circ\text{C}$ , ein  $\kappa = 1,4$  für Luft und eine Gaskonstante  $R_{\text{Luft}} = 29,27$  ergibt sich eine Schallgeschwindigkeit von 560 m/s. Es ergäbe sich dann die Zeit, um die der Druckanstieg dem Strahlungsbeginn nachholt, zu  $2,68 \cdot 10^{-4}$  s. Die Versuche, wie auch in Bild 10 dargestellt, ergeben im Unterschied wesentlich längere Zeiten; für den Fall, der oben berechnet ist, ergibt sich eine Differenz von  $1,22 \cdot 10^{-3}$  s. Dieser große Unterschied läßt sich damit erklären, daß zunächst nur wenige verdampfte Kraftstofftröpfchen zu verbrennen beginnen, die wohl bereits eine Strahlung hervorrufen, aber noch keinen Druckanstieg bewirken. Erst nachdem mehr Kraftstofftröpfchen, die durch die zuerst verbrannten Tröpfchen aufgeheizt und verdampft

sind, zu verbrennen beginnen, wird sich eine merkliche Drucksteigerung einstellen. Sämtliche Diagramme, bei denen Strahlungs- und Druckverlauf zugleich aufgenommen wurden, haben gezeigt, daß der Druckanstieg erst einsetzte, wenn die Strahlungsamplitude fast ihr Maximum erreicht hatte. Der Strahlungsbeginn war bei fast allen Diagrammen sehr gut. Man könnte nun die Ansicht haben, daß der starke Unterschied im Zündverzug aus Strahlungs- und Druckverlauf daher rührt, daß die Strahlung lediglich Temperaturstrahlung ist. Der Einsatz der Strahlung ist bei allen Versuchen ohne Farbfilter und Blenden ähnlich der in Bild 6 unter Farbfilter *D, E, F* und *H* gezeigten Form. Während vor dem Beginn der durch die Verbrennung des Dieselmotorkraftstoffes hervorgerufenen Strahlung der Elektronenstrahl stets in seiner Nullage war, machte sich bei Verbrennungsbeginn ein fast senkrechtes Abreißen bemerkbar. Die Strahlung des Kraftstoffes war so intensiv, daß der Verstärker nach ganz kurzer Zeit bereits ausgesteuert war. Es wird der Einsatz der Verbrennung durch ein Aufleuchten weniger verdampfter Kraftstofftröpfchen hervorgerufen.

Der Unterschied im Zündverzug aus Druck- und Strahlungsverlauf ist auch in amerikanischen Arbeiten sehr deutlich zu erkennen [10, 13]. An der University of Wisconsin wurden Versuche an einem Viertakt-Dieselmotor mit verschiedenen Kraftstoffen ausgeführt. Es wurde der Zündverzug, abhängig vom Voreinspritzwinkel, einmal aus dem Strahlungs- und einmal aus dem Druckverlauf ermittelt. Beide Meßvorgänge wurden mit Photozellen aufgenommen, wobei für den Druckverlauf die Photozelle vom verwendeten Indikator aus gesteuert wurde. Auch sie messen z. T. einen starken Unterschied im Zündverzug aus Strahlungs- und Druckverlauf. Bei einem Voreinspritzwinkel zwischen 30 und 40° KW vor o. T. ist der Unterschied im Zündverzug aus Strahlung und aus Druck  $0,5 \cdot 10^{-3}$  bis  $1,0 \cdot 10^{-3}$  s. Er nimmt mit kleineren und größeren Werten des Voreinspritzwinkels ab.

Aus Bild 9 ist ersichtlich, daß der Unterschied im Zündverzug bei  $t_c = 400^\circ \text{C}$  kleiner wird als er bei etwas höheren Einspritztemperaturen ist. Der Grund hierfür ist bereits früher angegeben. Man kann sich nun aber vorstellen, daß es bei der Einspritzung des Kraftstoffes in die Bombe eine Temperaturgrenze gibt, bei der wohl noch Strahlung vorhanden ist, aber keine Drucksteigerung mehr stattfindet, oder diese erst nach sehr langer Zeit erfolgt. Bei sehr hohen Temperaturen wird der Unterschied im Zündverzug aus Strahlungs- und Druckverlauf immer kleinere Werte annehmen, wie auch Bild 10 zeigt.

Die Versuchsergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen [7, 19], die am hiesigen Laboratorium an einem Krupp-Modaag-Zweitakt-Dieselmotor ausgeführt wurden und teils durch Messung des Ionisationsstromverlaufes, teils durch Messung des Druckverlaufes mit dem Quarzindikator und teils auch bereits durch Messung des Strahlungsverlaufes mit der Photozelle gewonnen wurden. Der Kurvenverlauf ist bei allen Meßverfahren fast derselbe, nur liegen die Absolutwerte verschieden. Vergleicht man die Versuche des Verfassers mit den Ergebnissen, die mit der Photozelle am oben genannten Motor erhalten wurden, so zeigt sich, daß an der Bombe die Absolutwerte etwas größer sind als am Motor. Dies dürfte seine Begründung darin finden, daß die einen Versuche an der Bombe, die anderen am Motor ausgeführt sind.

Trägt man die Ergebnisse des Verfassers in das von *F. A. F. Schmidt* in mehreren Veröffentlichungen [16] wiedergegebene Diagramm ein, so liegen die Werte des Zündverzuges aus dem Strahlungsverlauf bei Lufttemperaturen in der Bombe von über  $500^\circ \text{C}$  zwischen den Werten der DVL für Ladungswichten  $\gamma = 11$  bis  $14 \text{ kg/m}^3$  und  $\gamma = 16$  bis  $18 \text{ kg/m}^3$ . Für die aus dem Druckverlauf ermittelten Zündverzüge liegen die Werte etwas unter denen der DVL für  $\gamma = 7$  bis  $9 \text{ kg/m}^3$ .

*G. C. Wilson* und *R. A. Rose* [13] fanden bei ihrer Untersuchung verschiedener Dieselmotorkraftstoffe als kürzesten Zündverzug für alle Öle etwa  $1,0 \cdot 10^{-3}$  s. Ihre Versuche wurden an einem 4-PS-Dieselmotor mittels Photozellen als Registriereinrichtung ausgeführt. Nach ihren Angaben erreichen Kraftstoffe mit höheren Cetanzahlen die kürzesten Zündverzug bei früheren Einspritzwinkeln, also bei entsprechend niedrigen Lufttemperaturen, solche mit niedrigeren Cetanzahlen bei späteren Einspritzwinkeln. Dies läßt nun wieder darauf schließen, daß Kraftstoff mit höherer Cetanzahl leichter zündet.

*H. H. Wolfer* gibt in einem Bericht [18] eine Bestätigung der Kettenreaktionstheorie an. Wird der in dieser Arbeit angedeutete Rechnungsgang auf die Versuche des Verfassers übertragen, so kann diese hier nicht bestätigt werden. Es zeigt sich hier bei den Strahlungsversuchen ohne Blenden und Filter und bei den Druckversuchen, daß bis zu dem in der erwähnten Arbeit angegebenen Temperaturgebiet wohl ein geradliniger Verlauf des  $\ln z$  (Zündverzuges), abhängig von  $10^4/T$ , vorhanden ist, daß aber dann die von *Wolfer* auf höhere Verbrennungslufttemperaturen extrapolierten Werte viel zu kleine Zündverzugswerte ergeben. Die von *Wolfer* in Bild 6 seines Berichtes angegebene Gerade ändert ihre Richtung bei Werten von  $10^4/T$  kleiner als 12,5 entsprechend Verbrennungslufttemperaturen von über  $500^\circ \text{C}$ , sehr stark. Aus den hier beschriebenen Versuchen würden sich, so-

wohl bei der Auswertung des Zündverzuges aus dem Strahlungsverlauf als auch aus dem Druckverlauf, für niedrige Einspritztemperaturen viel zu große, für hohe Einspritztemperaturen viel zu kleine Zündverzugswerte ergeben.

*Bisang* [14] gibt bei seinen Ergebnissen eine zahlenmäßige Versuchsauswertung nicht an. Bei einigen seiner Diagramme macht sich der Druckanstieg vor dem Strahlungsbeginn bemerkbar. Dies kann dadurch bedingt sein, daß Quarzfenster und Photozelle weit von der Lichtquelle entfernt waren, wodurch nicht das erste Aufleuchten des brennbaren Gemisches erfaßt worden sein kann. Die in der gleichen Arbeit angegebene Vorverbrennung konnte auch bei einem Teil der Versuche des Verfassers beobachtet werden, nie aber ging nach beendeter Vorverbrennung der Strahlungswert (wie *Bisang* in seiner Arbeit, S. 33, Bild 7 a, angibt) bis auf den Nullwert zurück. Die Vorverbrennung ist bei den Versuchen des Verfassers in einem weniger steilen Beginn des Strahlungsverlaufes, ähnlich Bild 6, Farbfilter *D*, zu erkennen. Man könnte nun diesen langsamen Strahlungsbeginn der schon erwähnten Temperaturstrahlung zuschreiben. Dies kann aber deshalb nicht der Fall sein, weil bis zum Strahlungsbeginn die Temperatur in der Versuchsbombe dauernd im Sinken war, und weil diese Temperaturabnahme nicht auf die Photozelle einwirkte. Käme Temperaturstrahlung in Frage, so dürfte der Strahlungsverlauf vor Verbrennungsbeginn des Dieselmotorkraftstoffes keinen waagrechten Verlauf auf dem Papierband wiedergeben. Die Erscheinung der Vorverbrennung trat bei etwa 10% aller Versuche auf.

*Bisang* [14] und *Lichtenberger* [15] geben einen Temperaturindikator an, der mit Photozellen arbeitet und Aufschlüsse über den strittigen Temperaturverlauf bei der Verbrennung im Motor geben soll. Genaue Ergebnisse über das Verhalten der Photozelle als Temperaturindikator liegen noch nicht vor.

### 32 Versuchsergebnisse mit den fünf Gasölen

Im letzten Versuchsabschnitt wurden noch fünf Dieselmotorkraftstoffe (Gasöle) mit der rotempfindlichen Zelle untersucht. Bei deutschem Dieselmotorenöl wurde auch noch der Druckverlauf mit dem piezoelektrischen Indikator aufgenommen. Die wichtigsten Kenngrößen der untersuchten Öle sind aus Zahlentafel 3 ersichtlich.

Die hier erhaltenen Ergebnisse sind in Bild 11, abhängig von der Einspritztemperatur, graphisch aufgetragen. Vergleicht man die Ergebnisse mit denen, die *Müller* [9] an der gleichen Versuchsbombe durch Aufnahme des Druckverlaufes mit dem Bleistiftindikator erhielt, so ergibt sich, daß die mit der Photozelle gemessenen Zündverzugswerte durchschnittlich  $1,5 \cdot 10^{-3}$  s kleiner sind, als die mit dem Bleistiftindikator gemessenen. Der Grund für den großen Unterschied dürfte in den beiden Meßverfahren zu finden sein. Die mit der gemessenen Zündverzugswerte ergeben nur etwas kleinere Werte gegenüber denen mit dem Bleistiftindikator. Ferner ergibt sich noch aus Bild 11, daß in dem für den Motorbetrieb hauptsächlich in Frage kommenden Temperaturgebiet von  $550^\circ\text{C}$  die mit der Photozelle gemessenen Zündverzugswerte für alle 5 Gasöle fast gleich sind, während sie sowohl nach tieferen wie höheren Verbrennungslufttemperaturen hin divergieren. Die längsten Zündverzugswerte bei hohen Verbrennungslufttemperaturen und den geringsten Abfall in der Kurvenform mit steigender Einspritztemperatur weist Öl 3 (Dollbergener Gasöl) auf, dessen Grund vielleicht in dem großen Zähigkeitswert dieses Öles zu finden sein dürfte. Außer Öl 4 (Misburger Gasöl) — hohe Anilinzahl und geringe Zähigkeit — weisen die übrigen Öle z. T. einen steileren Verlauf und tieferliegende Absolutwerte des Zündverzuges auf.

### 4 Zusammenfassung

An der *Wentzelchen* Versuchsbombe [5] wurde der Zündverzug an Dieselmotorkraftstoffen mittels Photozellen untersucht. Der Zündverzug ist die Zeit, die vom Einspritzbeginn des Kraftstoffes bis zur ersten auftretenden Strahlung vergeht. Die Versuchsvoraussetzungen — Aufladung der Bombe, Temperatur und Druck der Umgebung, Wichte der Ladung — wurden stets gleich gehalten. Geändert wurde lediglich die Verbrennungslufttemperatur zu Beginn der Einspritzung des Kraftstoffes.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein Verfahren angegeben, das die Möglichkeit gibt, den Strahlungsbeginn — abhängig von der Wellenlänge mittels Photozelle und Farbfilter, die für das sichtbare

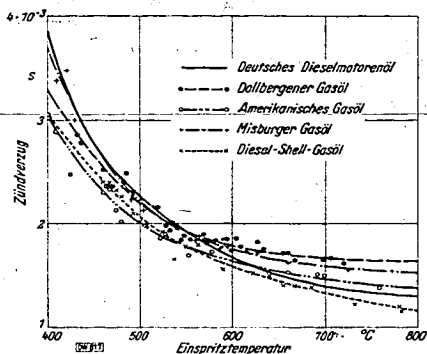


Bild 11. Zündverzug bei Gasölen aus dem Strahlungsverlauf in Abhängigkeit von der Verbrennungslufttemperatur.

Wellengebiet verschiedene Durchlässigkeit aufweisen — trägheitslos aufzunehmen. Bei Ausdehnung des langwelligen Gebietes, d. h. bei Untersuchung der Strahlung im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Wellengebietes, wurden längere Zündverzugswerte gemessen als bei Ausdehnung des kurzwelligen Teiles. Die kürzesten „Zündverzüge“ im sichtbaren Wellengebiet ergaben sich für etwa 570 m $\mu$ . Unter „Zündverzug“ ist dabei jene Zeit zu verstehen, die — bei Verwendung der Farbfilter und Photozellen in verschiedenen Zusammenstellungen — vergeht, bis das erste Aufleuchten nach Einspritzbeginn auftritt, entsprechend dem Durchlässigkeitsbereich der Zusammenstellung. Es ergaben aber nun alle Versuche, die mit der rotempfindlichen Photozelle ohne Farbfilter und ohne Blendenausgeführt wurden, für das ganze untersuchte Temperaturgebiet von 400° bis 800°C kleinere Zündverzugswerte, als sie mit den Farbfiltern gemessen wurden. Da die „Zündverzüge“ nach dem kurzwelligen Teil des sichtbaren Wellengebietes zu länger werden, so muß die Verbrennung eines Kraftstoffes mit einer Gasstrahlung im langwelligen Gebiet beginnen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird eine Abtastung des eingespritzten Kraftstoffstrahles bei Verwendung von Lochblenden beschrieben. Der Kraftstoffstrahlmantel wurde mit Blenden in drei Teile aufgeteilt. Ein Gebiet erfaßte den oberen Teil des Kraftstoffstrahles nahe der Düse, ein zweites die Strahlmitte und ein drittes den Rest des Kraftstoffstrahles. Das Ergebnis ist, daß sich nahe der Düse die gleichen Zündverzugswerte ergeben wie bei den Versuchen, die mit voller Ausnutzung des Raumwinkels der Photozelle erhalten wurden. Die beiden anderen Strahlbereiche ergaben untereinander die gleichen Zündverzugswerte, nur waren sie gegenüber den oben erhaltenen etwas größer. Daraus ergibt sich, daß nahe der Düse die Verbrennung zuerst auftritt. Zeitlich verschoben und gleichmäßig tritt sie am übrigen Kraftstoffstrahl ohne meßbare Unterschiede auf. Eine örtliche Abtastung des Kraftstoffstrahles mit der Photozelle, wie sie nach der Ionisationsmethode erfolgen kann, ist nicht möglich. Der Grund liegt darin, daß nur der Strahlmantel, nie aber die Strahlachse erfaßt werden kann.

Für die im letzten Teil der Arbeit mit der rotempfindlichen Zelle untersuchten fünf Kraftstoffe (drei deutsche und zwei amerikanische Gasöle) ergibt sich für das im Motor in Frage kommende Temperaturgebiet für sämtliche Gasöle fast der gleiche Zündverzugsabsolutwert von  $1,7 \cdot 10^{-3}$  bis  $1,8 \cdot 10^{-3}$  s. Der Raumwinkel der Photozelle wurde hier ganz ausgenutzt, d. h. es wurde der ganze Kraftstoffstrahl erfaßt. Die an deutschem Dieselmotorenöl gleichzeitig ausgeführten Untersuchungen mit dem piezoelektrischen Indikator ergaben wesentlich größere Zündverzugsabsolutwerte. Es wird dies damit erklärt, daß der Verbrennungsbeginn durch wenige verdampfte Kraftstofftröpfchen hervorgerufen wird, die dann ihrerseits den Hauptteil des eingespritzten Kraftstoffes zur Entflammung bringen. Letzteres erst ruft eine Drucksteigerung hervor.

Es zeigt sich, daß der Zündverzug mit der Photozelle auf verhältnismäßig einfache Weise zu bestimmen ist und daß Strahlungsunterschiede bei der Verbrennung durch sie sehr gut wiedergegeben werden. In Verbindung mit geeigneten Farbfiltern, d. h. mit solchen, deren Durchlässigkeitskurven von einem eng begrenzten Maximum aus nach langem und kurzem Wellengebiet hin einen steilen Abfall aufweisen, könnten am laufenden Motor Untersuchungen ausgeführt werden, die vielleicht einen guten Einblick in die sehr verwickelten Abbauprozesse des Kraftstoffes während des Zündverzugs gewähren würden.

## 5 Schrifttumsverzeichnis

- [1] K. Neumann, Untersuchung über die Selbstentzündung flüssiger Brennstoffe. — Z. VDI Bd. 70 (1926) S. 1071.
- [2] E. Laz und M. Pirani, Lichtstrahlung der zur Erzeugung künstlichen Lichtes benutzten festen Körper (H. Geiger und K. Scheel, Handbuch der Physik. Bd. XIX, Kap. 2 S. 27). — Berlin: J. Springer 1928.
- [3] K. Neumann, Untersuchungen an der Dieselmachine. — Z. VDI Bd. 76 (1932) S. 765.
- [4] W. Lach, Untersuchungen über Verbrennungserscheinungen bei der Dieselmachine. — Diss. T. H. Stuttgart 1932.
- [5] W. Wentzel, Der Zünd- und Verbrennungsvorgang im kompressorlosen Dieselmotor (VDI-Forsch.-Heft 306, S. 14). — Berlin: VDI-Verlag 1934.
- [6] O. Hofelder, Zündung und Flammenbildung bei der Diesel-Brennstoff-Einspritzung (VDI-Forsch.-Heft 374). — Berlin: VDI-Verlag 1935.
- [7] L. Breves, Der Zündvorgang und die Dauer der Verbrennung im Dieselmotor. — Diss. T. H. München 1935.
- [8] L. Breves, Die Fortpflanzung der Verbrennung im Dieselmotor (VDI-Sonderheft Dieselmotoren VI, S. 37). — Berlin: VDI-Verlag 1936. — Auch: Forsch.-Ing.-Wesen. Bd. 6 (1935) S. 183.
- [9] H. Geffcken und H. Richter, Die Photozelle in der Technik. 2. Aufl. — Berlin: Deutsches Literarisches Institut Schneider 1936.
- [10] R. Müller, Untersuchung des Verbrennungsvorganges deutscher Schweröle in einer Versuchsbombe (Kraftf.-techn. Forsch.-Arb. H. 3, S. 1). — Berlin: VDI-Verlag 1936.
- [11] R. A. Rose, G. C. Wilson und R. R. Benedict, Photo-Electric Combustion Analysis. — S. A. E. J. (Trans.) Bd. 30 (1936) S. 459.



- [11] *G. Beck*, Zur Umsetzung in technischen Flammen (VDI-Forsch.-Heft 377, S. 1). — Berlin: VDI-Verlag 1936.
- [12] *Ch. Erichsen*, Verbrennung im Dieselmotor (VDI-Forsch.-Heft 377, S. 21). — Berlin: VDI-Verlag 1936.
- [13] *G. C. Wilson und R. A. Rose*, Behavior of High- and Low-Cetane Diesel Fuels. — S. A. E. J. (Trans.) Bd. 41 (1937) S. 343.
- [14] *L. Bisang*, Ausstrahlung des Verbrennungsraumes schnelllaufender Diesel- und Ottomotoren. — Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 805.  
*L. Bisang*, Untersuchung der Ausstrahlung des Verbrennungsraumes schnelllaufender Diesel- und Ottomotoren mit der ultrarotempfindlichen Photozelle (Photozellen-Indikator) (Dtsch. Kraftf.-Forsch. H. 4, S. 27.) — Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [15] *F. Lichtenberger*, Temperatur-Indikator, Messung der Gasstrahlung mit Photozellen. — DVL-Jahrbuch 1937, S. 422.
- [16] *F. A. F. Schmidt*, Vergleichende Untersuchung der Verbrennungs- und Arbeitsvorgänge in Dieselmotoren verschiedener Verfahren und in Zündermotoren. — Luftf.-Forsch. Bd. 13 (1936) S. 163.  
*F. A. F. Schmidt*, Beitrag zur theoretischen und experimentellen Untersuchung von Verbrennungsvorgängen im Zünder- und Dieselmotor. — Luftf.-Forsch. Bd. 14 (1937) S. 640.  
*F. A. F. Schmidt*, Untersuchung über die Verbrennungsvorgänge bei verschiedenen motorischen Arbeitsverfahren, insbesondere im Hinblick auf den Höhenflug. — DVL-Jahrbuch 1937, S. 443.  
*F. A. F. Schmidt*, Vergleichende Untersuchungen der Verbrennungs- und Arbeitsvorgänge an Motoren verschiedener Arbeitsverfahren (VDI-Sonderheft Dieselmotoren VII, S. 65). — Berlin: VDI-Verlag 1938. — Auch: Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 769.  
*F. A. F. Schmidt*, Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündverzögerung und Klopfvorgang (VDI-Forsch.-Heft 392, S. 1). — Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [17] *F. Kneule*, Beitrag zur Erforschung des Verbrennungsvorganges im schnelllaufenden Dieselmotor (Dtsch. Kraftf.-Forsch. H. 5). — Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [18] *H. H. Wolfer*, Der Zündverzögerung im Dieselmotor (VDI-Forsch.-Heft 392, S. 15). — Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [19] *L. Herele*, Zündverzögerung und Ausbreitung der Verbrennung im Dieselmotor mit Strahleinspritzung. — Forsch. Ing.-Wes. Bd. 10 (1939) S. 15.

# Weitere einschlägige Arbeiten

aus der Schriftenreihe „Deutsche Kraftfahrtforschung“

## Frischölschmierung beim Pleuel-Gleitlager

Von L. Huber VDI und J. Eiberger

## Untersuchungen an Fahrzeugdieselmotoren

Von P. Rieckert und H. Ernst

## Untersuchung der Ausstrahlung des Verbrennungsraumes schnelllaufender Diesel- und Ottomotoren mit der ultrarot-empfindlichen Photozelle (Photozellen-Indikator)

Von L. Bisang VDI/ATG

Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 4

DIN A 4, 47 Seiten mit 110 Bildern. 1938. Broschiert 5,- RM

## Beitrag zur Erforschung des Verbrennungsvorganges im schnelllaufenden Dieselmotor

Von F. Kneule VDI

Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 5

DIN A 4, 20 Seiten mit 23 Bildern. 1938. Broschiert 2,- RM

## Spülvorgang bei Zweitaktmaschinen

Von O. Lutz VDI und W. Noeggerath

Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 23

DIN A 4, 34 Seiten mit 47 Bildern. 1939. Broschiert 3,20 RM

## Messung der Klopfestigkeit an Ottomotoren

Von R. Schütz VDI

Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 31

DIN A 4, 24 Seiten mit 48 Bildern. 1939. Broschiert 2,25 RM

## Untersuchungen der Klopfgeräusche von Ottomotoren mit elektroakustischen Meßgeräten

Von A. W. Schmidt und K. Generlich VDI

Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 33

DIN A 4, 18 Seiten mit 18 Bildern. 1939. Broschiert 1,70 RM

Bezug durch jede Buchhandlung