

Flammen- und Schlierenaufnahmen der Verbrennung in Rohren

Von Ernst Schmidt, H. Steinicke und U. Neubert

(Vorgetragen von Ernst Schmidt)

I. Einleitung

Der einfachste Fall der Verbrennung eines Gas-Luft-Gemisches ist die Zündung eines allseitig ausgedehnten Gasvolumens an einem Punkt. Dabei hat die Flamme die Gestalt einer sich ausdehnenden Kugel, und der ganze Verlauf des Vorgangs hängt, wenn die Wirkung des thermischen Auftriebs der verbrannten Gaswolke vernachlässigt werden kann, außer von der Zeit nur von einer Veränderlichen: Der radialen Entfernung vom Zündort ab. Wesentlich verwickelter ist die Verbrennung in geschlossenen Räumen, z. B. im Verbrennungsraum eines Ottomotors, wo das Gasgemisch sich noch von der Füllung her in stark turbulenter Bewegung befindet und die begrenzenden Wände auch die von der sich ausdehnenden Gaswolke hervorgerufenen Bewegungen wesentlich beeinflussen. Der einfachste Fall eines geschlossenen Raumes ist das Rohr mit im Vergleich zum Durchmesser großer Länge, und es sind daher früher in Frankreich, später besonders in England zahlreiche Untersuchungen¹⁾ über die Ausbreitung von Flammen in Rohren angestellt worden. In Deutschland ist dagegen nur wenig auf diesem Gebiet gearbeitet worden. Es erschien daher zweckmäßig, auch bei uns solche Versuche aufzunehmen, zumal Messungen nur an wenigen Gasen vorliegen und einer der gerade für die Verbrennung im Motor wesentlichen Umstände: Der Einfluß der turbulenten Bewegung des Gases auf die Verbrennungsgeschwindigkeit bisher nicht genügend beachtet zu sein scheint.

Im folgenden sollen als erstes Ergebnis dieser Arbeiten einige Lichtbilder gezeigt werden, die im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring an Flammen in Rohren auf-

¹⁾ Ausführliche Literaturangaben finden sich in der ausgezeichneten Monographie von W. Jost: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, Berlin 1939, auf die hier verwiesen werden kann.

genommen wurden. Die Aufnahmen im Eigenlicht der Verbrennung wurden von H. Steinicke, die mit Schlierenbelichtung von U. Neubert ausgeführt, beim Entwurf der Versuchseinrichtungen hat auch W. Schurig mitgearbeitet.

Die Versuchseinrichtungen

Als Versuchsröhre dienten zwei Stahlbomben von $24 \times 24 \text{ mm}^2$ lichte quadratischem Querschnitt und etwa 1 m Länge. Die eine für Schlierenaufnahmen benutzte und in Abbildung 1 gezeigte Bombe war 1088 mm

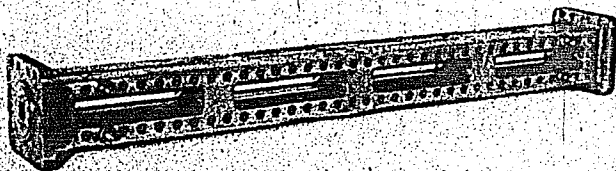


Abb. 1

Versuchrohr für Schlierenaufnahmen der Verbrennung mit Fenstern auf beiden Seiten

lang und hatte auf beiden Seiten je 4 Fenster von 195 mm Länge aus optisch reinem Glas, die andere für Eigenlichtaufnahmen bestimmte war 990 mm lang und hatte 4 Fenster von 205 mm Länge nur auf einer Seite. Alle Fenster waren so breit, daß die ganze lichte Weite des Kanals

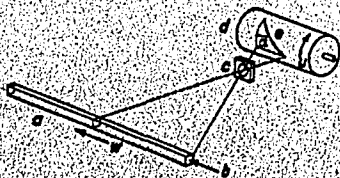


Abb. 2

Verfahren für Eigenlichtaufnahmen der Verbrennung in Röhren

- a Versuchrohr
- b Zündstelle
- c Abbildungslinse

- d Filmrolle mit der Umfangsgeschwindigkeit u
- e Lichtspur der Flamme auf dem Film
- w Geschwindigkeit der Flammenfront

von 24 mm völlig überblickt werden konnte. Sie waren mit Hilfe von Zwischenteilen so eingepaßt, daß der glatte Verlauf der inneren Wände des Rohres an keiner Stelle durch Vorsprünge oder Nischen unterbrochen war. Die Bomben waren sehr kräftig ausgeführt, da sie auch Verbrennungen bei erhöhtem Druck und Detonationen widerstehen sollten.

Die Versuche im Eigenlicht der Verbrennung wurden nach dem in Abbildung 2 skizzierten Verfahren von Mallard und Le Chatelier gemacht, bei dem die fortschreitende Flamme auf einen mit konstanter Geschwindigkeit u bewegten Film eine schräge Lichtspur zeichnet, deren Neigung als Maß der Flammengeschwindigkeit w dient. Ein Lichtbild der ganzen Anordnung zeigt Abbildung 3. Dabei sind in den Lichtweg noch

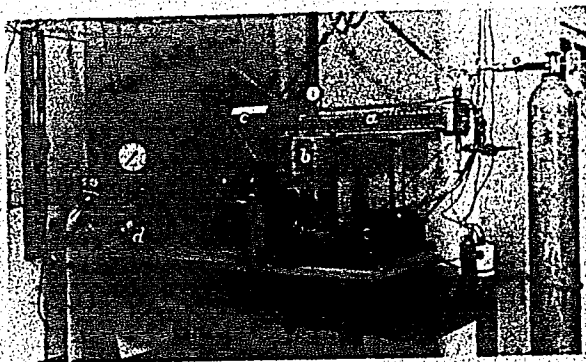


Abb. 3

Versuchseinrichtung für Eigenlichtaufnahmen der Verbrennung

a Versuchsrohr
b Trommelkamera mit Antriebsmotor

c Umlenkspiegel
d Misch- und Vorratsbehälter für die Rohrfüllung

zwei Umlenkspiegel eingeschaltet, um von der waagrecht liegenden Bombe ein senkrechtres Bild auf die um eine senkrechte Achse rotierende Filmtrommel zu werfen.

Die Versuchseinrichtung für Schlierenaufnahmen arbeitet nach dem von A. Toepler angegebenen Verfahren und ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. In dem zylindrischen Behälter a befinden sich vier hintereinander geschaltete, gleichzeitig aufleuchtende Funkenstrecken, die als

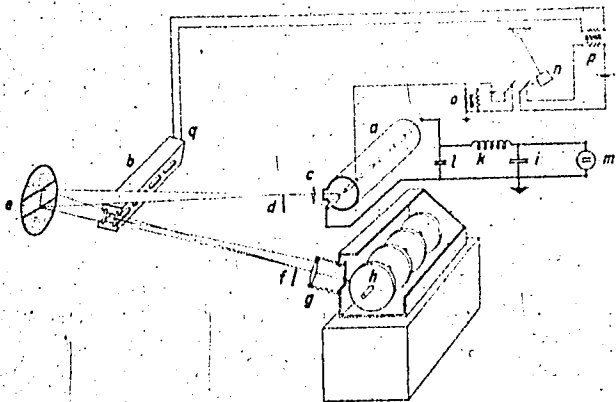


Abb. 4

Schema des Funkenkinematographen für Schlierenbilder der Verbrennung

- | | |
|--------------------------------------|----------------------|
| a Druckgefäß mit vier Funkenstrecken | i Speiterkondensator |
| b Verbrennungstrohr | k Drosselspule |
| c Linse | l Funkenkondensator |
| d erste Schlierenblende | m Gleichstromquelle |
| e Hohlspiegel | n Fallpendel |
| f zweite Schlierenblende | o Funkeninduktor |
| g Photoobjektive | p Zündspule |
| h Filmtrommeln | q Zündkerze |

Lichtquellen für die 4 Fenster der Bombe *b* dienen. Das Licht jeder Funkenstrecke wird mit Hilfe einer Linse *c* auf eine Blendenkante *d* geworfen, die die untere Hälfte des Gesichtsfeldes abblendet. Das Licht der oberen Hälfte fällt dann auf einen von 4 Hohlspiegeln *e*, der es durch ein Fenster der Bombe hindurch auf die zweite Blendenkante *f* wirft. Die Blendenkante ist dabei so einzustellen, daß sie den Hauptteil des Lichts abschneidet und nur ein schmales Lichtband vorbeiläßt. Eine photographische Linse *g* bildet dann mit Hilfe dieser geringen Lichtmenge die Mittelebene der Versuchsbombe auf eine der vier auf der gleichen Achse angeordneten und mit geeigneter Geschwindigkeit umlaufenden Filmtrommeln *h* ab. Ist das Innere der Versuchsbombe optisch homogen, so erscheint auf dem Film eine gleichmäßig schwach beleuchtete Fläche. Befinden sich aber Gase mit örtlich verschiedener optischer Dichte in der Bombe, so lenken sie die Lichtwellen etwas ab, und an der

zweiten Blendenkante fällt mehr oder weniger Licht vorbei, wodurch das Bildfeld stellenweise aufgehellt oder verdunkelt wird — es entsteht ein sogenanntes Schlierenbild. Dabei wird das Bildfeld dunkler an Stellen, wo die über den Weg des Strahls gemittelte optische Dichte senkrecht zur Blendenkante in Richtung nach dem hellen Teil der zweiten Blende — in der Abbildung 4 also nach oben hin — abnimmt, es wird heller dort, wo die optische Dichte in der genannten Richtung zunimmt. Ein kugeliges Gasballon heißen Gases in kälterer Umgebung sieht also aus wie eine von oben beleuchtete Kugel, wie das die ersten Teilbilder der Abbildung 16 veranschaulichen. Der subjektive plastische Eindruck der heißen Gaswolken im Schlierenbildentspricht recht gut ihrer wirklichen Gestalt.

Um bei starkem Eigenlicht der Verbrennung, wie es besonders bei mit Sauerstoff angereicherten Gemischen auftritt, eine zu starke Überstrahlung des Schlierenbildes zu vermeiden, erwies es sich als zweckmäßig, die zweite Schlierenblende als Schlitz auszuführen und so die wirksame Öffnung des die Flamme durch ihr Eigenlicht abbildenden Objektivs zu verkleinern.

Die elektrische Energie der Beleuchtungsfunken wird von einem Speicherkondensator *i* geliefert, der nach der von Toepler angegebenen Schaltung über eine Drosselspule *k* einen Funkenkondensator *l* auflädt, der jeweils nach Erreichen der Überschlagspannung der Funkenstrecken von etwa 25 000 Volt über diese plötzlich entladen wird und die hellen Funken liefert; als Gleichstromquelle *m* diente dabei ein Glühventil in Verbindung mit einem Hochspannungstransformator. Nach dem Funkenüberschlag lädt der Speicherkondensator den Funkenkondensator von neuem auf, bis wieder ein Überschlag erfolgt, und so wiederholt sich das Spiel, bis die Ladung des Speicherkondensators erschöpft ist. Der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender Funken hängt von den elektrischen Konstanten der Anordnung ab und läßt sich in weiten Grenzen regeln. Bei den Versuchen wurden Funkenfrequenzen von etwa 1000 bis 23 000 Hz benutzt. Eine Ladung des Speicherkondensators reichte dabei für bis zu etwa 100 Funken aus. Die Art des Verfahrens bringt es mit sich, daß in der Mitte einer Funkenserie die Funkenfolge am dichtesten ist und gegen deren Anfang und Ende weiter wird. Das ist aber kein Nachteil, da man den hauptsächlich interessierenden Teil eines Vorgangs stets in den Bereich größter Funkenfrequenz legen kann. Bei einer Leuchtdauer der Funken von etwa nur $1 \cdot 10^{-6}$ sec erhält man auf dem

mit Geschwindigkeiten bis zu 60 m/s umlaufenden Film, wie die folgenden Bilder zeigen, sehr scharfe Aufnahmen, deren Abstand bei bekannter Filmgeschwindigkeit zugleich als Zeitmaß dient.

Das Fallpendel *n* (Abbildung 4) löst den Versuch durch Öffnen zweier Schalter aus, von denen der eine mit Hilfe der Zündspule *p* über die Zündkerze *q* das Gemisch zündet, der andere mittels des Induktors *o* die Funkenfolge durch einen Ionisationsfunken auslöst.

Ein Lichtbild der Versuchsanordnung zeigt Abbildung 5.

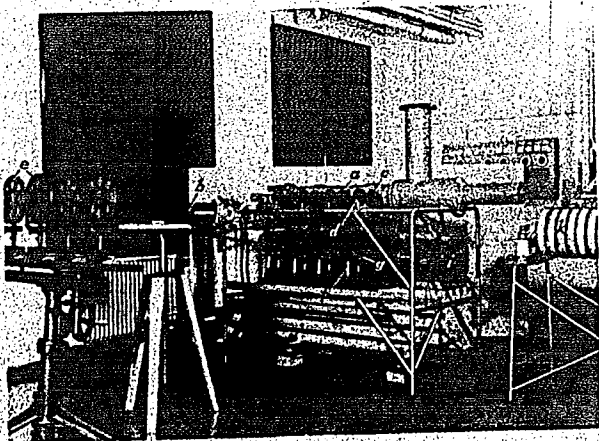


Abb. 5

Versuchseinrichtung zur Aufnahme von Schlierenbildern der Verbrennung

- a Druckgefäß mit vier Funkenstrecken
- b Verbrennungsröhr
- c Linsen
- d erste Schlierenblende
- e Hohlspiegel

- f zweite Schlierenblende
- g Photoobjektive
- h Kästen mit den Filmtrommeln
- i Antriebsmotor der Filmtrommeln
- k Drosselspule

Als Film konnte Feinkornfilm der normalen Breite von 35 mm benutzt werden, da die Optik im Verhältnis 1 : 11 verkleinerte. In Abbildung 6 ist ein Abzug eines Films wiedergegeben. Jedes Einzelbild ist darauf $2 \times 17 \text{ mm}^2$ groß. Für die Auswertung werden die Bilder wieder etwa auf das Vierfache vergrößert.

H. Schema der Gasbewegungen in der Bombe

Abb. 6

Zum richtigen Verständnis der Bilder ist es zweckmäßig, sich für die verschiedenen möglichen Versuchsbedingungen ein schematisches Bild der Gasbewegungen und des Fortschreitens der Flamme zu machen, in ähnlicher Weise wie es H. Steinicke¹⁾ getan hat. Dabei sind im wesentlichen drei Arten des Verbrennungsablaufs zu unterscheiden:

1. Der einfachste Fall ist die Zündung am offenen Ende des am anderen Ende geschlossenen Rohres. Dabei bleibt das Unverbrannte dauernd in Ruhe, das Verbrannte strömt gleichmäßig nach dem offenen Ende hin ab. In Abbildung 7 ist für diesen Fall unter der Annahme einer mit konstanter Geschwindigkeit gegen das Unverbrannte fortschreitenden Flamme ein Weg-Zeit-Diagramm gezeichnet, wobei Ordinate der Flammenweg, gemessen als Entfernung vom Rohranfang, Abszisse die Zeit ist. Das Diagramm stellt das Schicksal der einzelnen Teile des in Zehntel geteilten Bombeninhalts dar. Das sechste Zehntel ist durch Schraffur hervorgehoben. Links neben dem Diagramm sind die ersten vier Phasen der Verbrennung im Rohr dargestellt. Das Unverbrannte bleibt, wie das Diagramm zeigt, in Ruhe, bis es von der Flamme erfaßt wird, bewegt sich dann nach dem offenen Ende mit konstanter Geschwindigkeit.

¹⁾ H. Steinicke: Gasbewegung und Turbulenz bei Explosionen in einer langgestreckten Bombe. Diss. T. H. Braunschweig 1942 (D 84).

Originalfilm mit
Schlierenauf-
nahmen. Die
Einzelbilder sind
in Wirklichkeit
2 × 17 mm³ groß



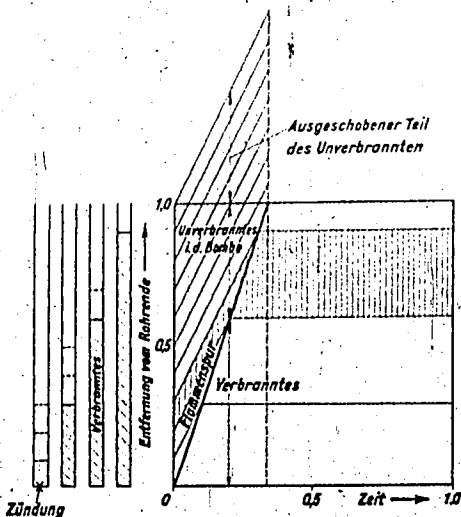


Abb. 8

Gasverschiebung durch die Verbrennung im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende (schematisch)

konstanter Geschwindigkeit vor sich her aus dem Rohr. Das Verbrannte ist dagegen nach dem Durchlaufen der Flamme in Ruhe, und die Flammenspur verläuft steiler, da die absolute Geschwindigkeit der Flamme sich zusammensetzt aus der hier ebenfalls als konstant angenommenen Relativgeschwindigkeit gegen das Unverbrannte und der Verdängungsgeschwindigkeit des Unverbrannten. Für den Druck gilt das oben bei 1. Gesagte.

3. Etwas verwickelter ist der Fall der Verbrennung im beiderseits geschlossenen Rohr bei Zündung an einem Ende, der in Abbildung 9 dargestellt ist. Hier wird das Unverbrannte zunächst vor der Flamme her von der Zündstelle wegbewegt und zugleich auf höheren Druck verdichtet, wie man am Zusammendrängen der das Unverbrannte unterteilenden Kurven erkennt. Wenn das Gemisch von der Flamme erfaßt

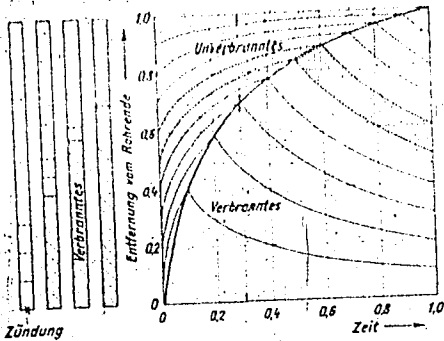


Abb. 9

Gasverschiebung durch die Verbrennung im beidseitig geschlossenen Rohr bei Zündung an einem Ende (schematisch)

wird, dehnt es sich aus und kehrt seine Bewegungsrichtung um. Die Gas-
teile bewegen sich dann nach den Kurven der Abbildung im Gebiet des
Verbrannten und erreichen schließlich wieder nahezu ihren alten Platz,
wenn die Flamme das ganze Rohr durchlaufen hat. Der anfängliche Ort
ist von den Gas-teilen bei Beendigung der Verbrennung noch nicht ganz
wieder erreicht, weil die im Verbrannten und Unverbrannten gleiche
Drucksteigerung in ersterem eine absolut größere Temperatursteigerung
hervorrufft als in letzterem und daher die zuerst verbrannten Gemisch-
teile heißer werden als die später verbrannten. Die Flammenspur ist
hier eine gekrümmte Linie.

Der wirkliche Vorgang unterscheidet sich von dieser schematischen
Darstellung aus folgendem Grunde: Die Geschwindigkeit der Flamme
gegen das Unverbrannte ist auch in den Fällen 1 und 2 nicht konstant,
sondern kann sich im Laufe der Verbrennung ändern durch Schwingun-
gen, durch turbulente Bewegung, durch Änderung von Gestalt und Größe
der Flammensfläche, im Falle 3 noch durch den Einfluß von Druck und
Temperatur und in den Fällen 2 und 3 auch durch Abkühlung und damit
verbundene Kontraktion des zuerst verbrannten Gases. Wir werden also
in diese Umstände Einblick erhalten aus den Abweichungen des wirk-
lichen Bildes von dem beschriebenen vereinfachten Verlauf.

III. Die Flammenaufnahmen

Für sämtliche Versuche wurden Propan-Luft-Gemische mit verschiedenen Luftverhältnis λ benutzt. ($\lambda = 1$ entspricht der stöchiometrischen Verbrennung.) Das Propan war handelsübliches verflüssigtes Gas und enthielt etwa 3% Butan und etwa 5% Propylen und Butylen. Bei einigen Versuchen war die Luft mit Sauerstoff angereichert. Bei den Eigenlichtaufnahmen ist die Ordinate der Weg der Flamme in der Bombe, die Abszisse die Zeit.

1. Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen im einseitig offenen Rohr bei Zündung am offenen Ende

Eine Aufnahme der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches vom Luftverhältnis $\lambda = 0,8$ in der waagrecht liegenden, einseitig offenen Bombe bei Zündung am offenen Ende zeigt Abbildung 10. Dabei ist links neben die Aufnahme der Schattenriß der Bombe gezeichnet. Die Lichtspur der Flamme läuft von links unten nach rechts oben, sie wird durch drei breite waagerechte schwarze Schatten unterbrochen, die den Stegen zwischen den Fenstern der Bombe entsprechen. Der schmale waagerechte Schatten im Bereich des zweiten Fensters von unten ist ein Draht, der nur zur Kennzeichnung der Aufnahme dient. Die Flammenspur verläuft zunächst völlig geradlinig, die Flamme dringt also mit konstanter Geschwindigkeit, die sich aus der Neigung ihrer Spur zu $0,72 \text{ m/s}$ ergibt, in das Rohr ein. Etwa vom Eintritt in das zweite Fenster an, also nach etwa 27 cm Flammenweg, wird die Lichtspur wellig durch überlagerte Schwingungen, deren Frequenz sie als Eigenschwingungen der als offene Pfeife, also mit einer Wellenlänge gleich der vierfachen Rohrlänge, schwingenden Bombe ausweist. Die Grundschwingungszahl der kalten Gassäule beträgt etwa 83 Hz. Die beobachtete Eigenschwingung beginnt bei den wiederholt bei verschiedenen Luftverhältnissen ausgeführten Versuchen mit Frequenzen von 85 bis 100 Hz und steigert sich gegen das Ende der Verbrennung auf 120 bis 190 Hz entsprechend dem zunehmenden Anteil des heißen verbrannten Gases am Inhalt des Rohres. Die überlagerte Schwingung ändert zunächst kaum etwas an der Geschwindigkeit der Flamme. Kurz vor der Mitte der Bombe wird die Amplitude der Schwingung größer und die Lichtspur steiler entsprechend einer Zunahme der Flammengeschwindigkeit im ersten Teil des dritten Fensters auf etwa $2,6 \text{ m/s}$ und gegen Ende dieses Fensters auf $5,4 \text{ m/s}$. Im vierten Fenster nimmt die Geschwindigkeit rasch ab auf etwa denselben Wert,

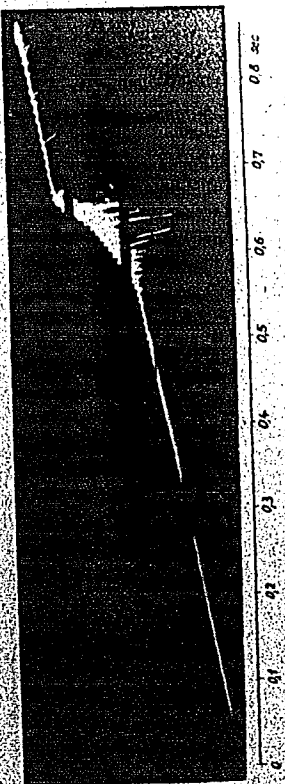
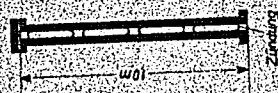


Abb. 10
 Aufnahme der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches mit dem Luftverhältnis $\lambda = 0.8$ beim Eigenlicht im waagrecht liegenden, einseitig offenen Rohr bei Zündung am offenen Ende

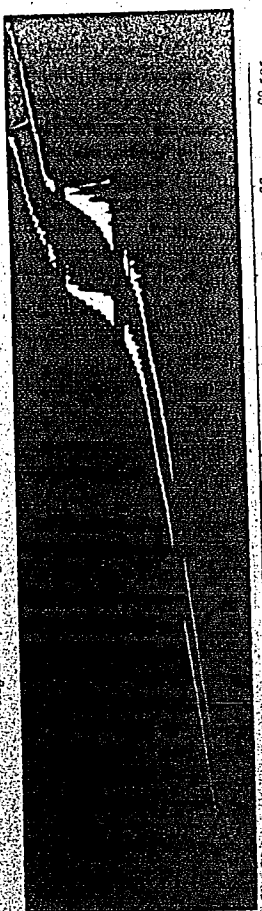


Abb. 11
 Eigenlichtaufnahme der Verbrennung wie bei Abbildung 10, aber mit senkrechter Stellung der Bombe. Die Flamme brennt vom oberen offenen Ende nach unten. Dabei sind zwei Versuche auf demselben Film aufgenommen

den sie bei Beginn der Verbrennung im ersten Fenster hatte. Eine Aufnahme des gleichen Vorgangs aber bei senkrecht stehender Bombe mit der Öffnung oben, also bei abwärts brennender Flamme zeigt Abbildung 11. Dabei sind zwei Versuche auf demselben Film aufgenommen. Der Verlauf des Vorgangs ist, wie der Vergleich mit der Abbildung 10 zeigt, von der Lage der Bombe im Schwerfeld praktisch unabhängig, und die gute Übereinstimmung der beiden auf einem Film wiedergegebenen nacheinander durchgeführten Versuche beweist die eindeutige Reproduzierbarkeit der Erscheinung. Bei dem Vorgang haben wir es mit einer Aufzählung der Schwingung durch die Verbrennung zu tun, die zuerst Nielsen¹⁾ bei Versuchen in einer geschlossenen Bombe angenommen und deren Möglichkeit Guderley²⁾ theoretisch begründet hat.

Die starke Zunahme der Flammengeschwindigkeit in der Mitte des Rohres ist folgendermaßen zu erklären: An dieser Stelle ist die Amplitude der angefachten Schwingung so groß geworden, daß die Bewegung des Gases im Rohr nicht mehr laminar ist, sondern turbulent wird. Schätzt man die Amplitude an der Stelle, wo die Geschwindigkeitssteigerung der Flamme einsetzt, zu 2 cm von der Nulllage an gerechnet, so entspricht dem bei 100 Hz eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s. Nimmt man für die kinematische Zähigkeit des Unverbrannten bei 20° den Wert der Luft mit $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ an und führt als kennzeichnende Abmessung die Seite des Querschnittsquadrats von 2,4 cm ein, so ergibt sich eine Reynoldssche Zahl der Strömung von 20000, das ist wesentlich mehr als der gewöhnliche Wert der kritischen Reynoldsschen Zahl, aber dafür handelt es sich hier auch um einen Schwingungsvorgang, bei dem die höchste Geschwindigkeit jedesmal nur kurzzeitig auftritt und dessen Amplitude im Bruchteil einer Sekunde erst angefacht wurde. Erfahrungsgemäß ist aber für die Entstehung der Turbulenz eine gewisse Zeit erforderlich, und bei zu kurzen Anlaufzeiten bleibt die Strömung noch bis zu weit über dem gewöhnlichen kritischen Wert liegenden Reynoldsschen Zahlen turbulenzfrei. Im vierten Fenster nimmt die Geschwindigkeit der Flamme wieder nahezu auf den Ausgangswert ab. Diese Abnahme ist auf die Verkleinerung der Amplitude der angeregten Schwingungen gegen den Knoten am geschlossenen Rohrende hin zurückzuführen, womit sich auch die angeregte Turbulenz und damit die Ursache der Geschwindigkeitssteigerung der Flamme vermindert. Die

¹⁾ H. Nielsen, *Forsch. u. d. Geb. d. Ing. Wes.* Bd 4 (1933) S. 300.

²⁾ G. Guderley, *Z. f. ang. Math. u. Mech.* Bd 18 (1938) S. 285.

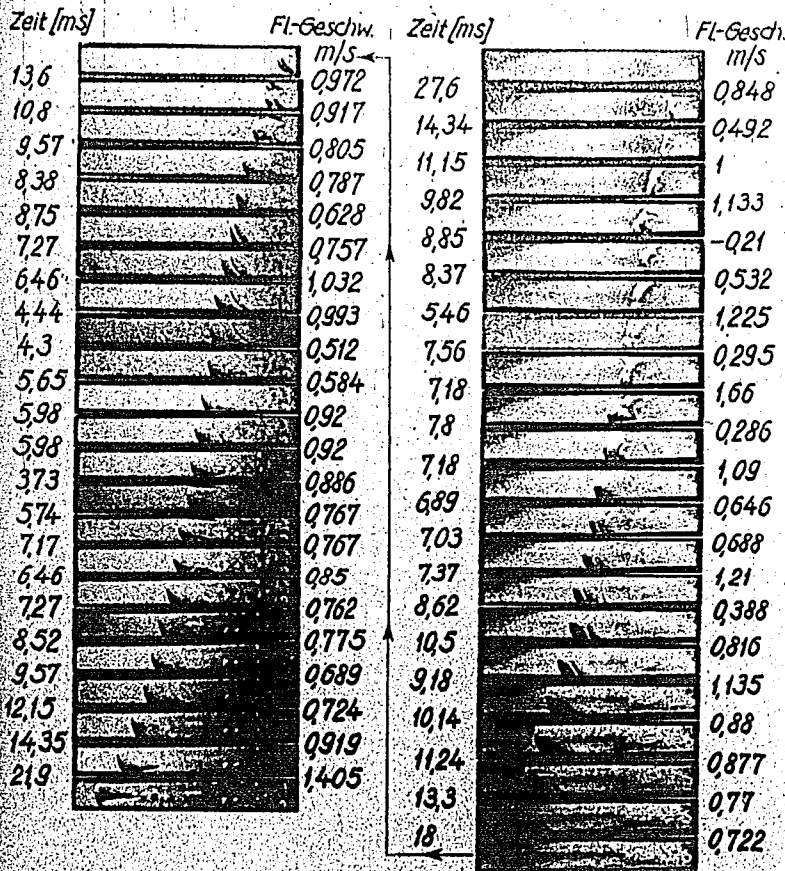


Abb. 12

Schlierenbilder der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches mit $\lambda = 0,8$ im einseitig offenen Rohr bei Zündung am offenen Ende

Frequenz der Schwingungen wird gegen das Rohrende wieder kleiner, da der Rohrinhalt sich durch Wärmeabgabe an die Wände und Mischung mit der Außenluft stark abkühlt.

Bei anderen Mischungsverhältnissen ergeben sich ähnliche Bilder, nur bei starkem Luftüberschuß verschwindet die Schwingung und damit das starke Anwachsen der Geschwindigkeit, und die Flamme läuft mit nahezu gleichbleibender Geschwindigkeit durch die ganze Rohrlänge. Reihenbilder von Schlierenaufnahmen der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches vom Luftverhältnis $\lambda = 0,8$ bei Zündung am offenen Ende zeigt Abbildung 12. Der rechte Bildstreifen gilt für das erste Fenster, der linke für das zweite. Aus aufnahmetechnischen Gründen sind hier beide Streifen nicht bei demselben Versuch aufgenommen, aber die Versuche sind so gleichartig, daß der linke Bildstreifen ohne weiteres als Fortsetzung des rechten angesehen werden kann, so, als wenn das oberste Bild des linken Streifens kurz nach dem untersten des rechten Streifens aufgenommen wäre, wie das der mit Pfeilen versetzte Geradenzug andeutet. An jeden Bildstreifen ist links der zeitliche Abstand der aufeinanderfolgenden Einzelbilder in Millisekunden, rechts die daraus und aus dem abgemessenen Fortschreiten der Flammenfront berechnete Flammengeschwindigkeit aufgeschrieben. Der zeitliche Abstand der Bilder ist, wie bereits erwähnt, zu Beginn und Ende einer Bildfolge am größten, in ihrer Mitte wesentlich kleiner.

Die Flamme läuft von der Zündstelle rechts oben beginnend von rechts nach links, wobei die Flammenfront anfangs eigenartige Wülste zeigt, die durch das Hineinzwängen der zunächst kugelförmig von der Zündstelle aus anwachsenden Wolke verbrannten Gases in die Form des quadratischen Rohres entstehen. Außerdem erzeugt die Reibung an der Wand des Rohres gewisse Sekundärbewegungen, die sich in der Gestalt der Flammenfront ausprägen. Diese Wülste fließen beim Fortschreiten der Flamme zu einem abgerundeten Kopf zusammen, erscheinen aber von neuem beim Eintritt in das zweite Fenster, vermutlich infolge kleiner vorstehender Kanten an der Stoßstelle der Glasplatten und ihrer Fassung. Die jeweils an zwei aufeinanderfolgenden Bildern ermittelten Flammengeschwindigkeiten sind von der Größenordnung 1 m/s , schwanken aber ziemlich stark und erreichen einmal sogar einen negativen Wert infolge des unregelmäßigen Hinundherwogens der Wülste und des Kopfes der Flammenfront. In den Eigenlichtaufnahmen ist von diesen Schwankungen nichts zu erkennen, denn Aufnahmen bei Dauerlicht auf be-

wegen Film ergeben keine scharfen Bilder, da verschiedene Stellen der räumlich ausgedehnten Leuchtzone ihre Spuren übereinander auf den Film schreiben und so ein verwaschenes Lichtband liefern. Am Ende des zweiten Bildstreifens sind vermutlich auch die bei den Eigenlichtaufnahmen der Abbildungen 10 und 11 beachteten Schwingungen eine zweite Ursache der Geschwindigkeitsschwankungen.

2. Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende

Eigenlichtaufnahmen der Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen mit verschiedenen Luftverhältnissen λ bei Zündung des Gemisches am geschlossenen Ende zeigen die Abbildungen 13, 14 und 15. Hier ist die be-

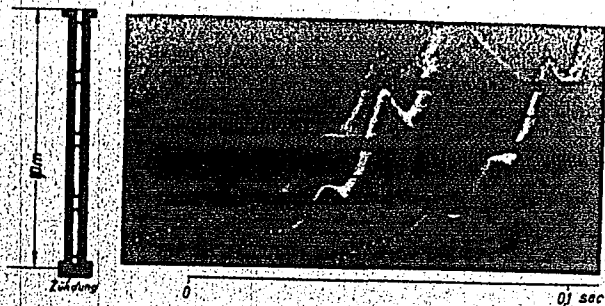


Abb. 13

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende. Es sind drei Versuche auf denselben Film aufgenommen. (An Stellen geringer Lichtstärke ist die Flammenspur durch nachträglich eingetragene weiße Punkte markiert, um ihren Verlauf auch im Druck erkennbar zu machen.) Luftverhältnis 0,6

obachtete Flammengeschwindigkeit wesentlich größer als bei Zündung am offenen Ende, da wegen der starken Volumenzunahme bei der Verbrennung das Unverbrannte eine Geschwindigkeit — die sogenannte Verdrängungsgeschwindigkeit — annimmt, die 80 bis 90 % der beobachteten Flammengeschwindigkeit betragen kann. Am Rohrende wurden Flammengeschwindigkeiten bis zu 90 m/s beobachtet bei mittleren Geschwindigkeiten (über die Rohrlänge gemittelt) bis zu 26 m/s. Die Ursache der



Abb. 14
Luftverhältnis 0,8

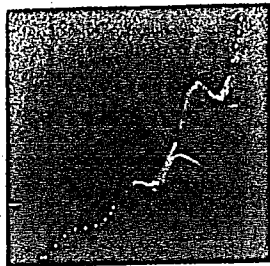


Abb. 15
Luftverhältnis 1,0

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende. (An Stellen geringer Lichtstärke ist die Flammenspur durch nachträglich eingetragene weiße Punkte markiert, um ihren Verlauf auch im Druck erkennbar zu machen.)

hohen Geschwindigkeit ist aber nicht allein die Verdrängung, sondern auch die von der großen Verdrängungsgeschwindigkeit im Unverbrannten angeregte starke Turbulenz. Die Flammenbewegung ist ferner meist überlagert von Schwingungen großer Amplituden, die oft bis zur Umkehr der Bewegung gehen. In Abbildungen 13 und 15 sind diese Schwingungen besonders stark, bei Abbildung 14 führen sie nur am Ende des ersten Fensters zu einer »Schulter«, hinter der die Geschwindigkeit nahezu gleichförmig wird. Die Frequenz dieser Schwingungen ist mit 60 bis 70 Hz meist etwas niedriger als die Eigenfrequenz der Bombe, weil der reine Schwingungsvorgang durch die Verdrängungsbewegung und auch durch Turbulenz gestört wird. Die besonders in Abbildung 14 von der Flammenfront fahnenartig herabhängenden Streifen zeigen, daß die Verbrennung nicht gleich das ganze Gemisch erfaßt, sondern Teile davon brennen erst nachträglich ab, wobei ihre rückläufige Bewegung eine Folge der starken Abkühlung des Bombeninhalts ist.

Eine besonders anschauliche Vorstellung des ganzen Verlaufs der Verbrennung vermitteln die Reihenbilder von Schlierenaufnahmen. Abbildung 16 zeigt z. B. die Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches vom Luftverhältnis $\lambda = 0,8$ in der rechts offenen Bombe bei Zündung am

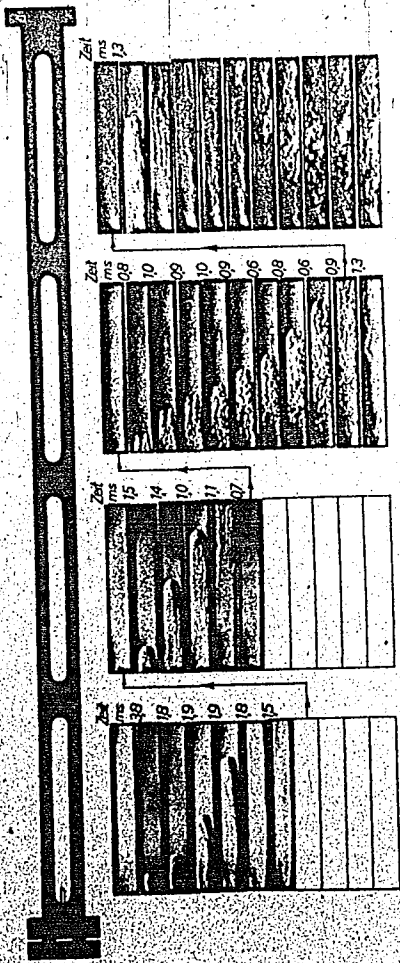


Abb. 16

Schlierenbilder der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches mit $\lambda = 0,8$ im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende

linken geschlossenen Ende. Um die Deutung der Bilder zu erleichtern, ist der Schattenriß der Bombe darüber gezeichnet. Rechts neben den Bildstreifen ist wieder der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Einzelbilder angegeben. Die Flamme beginnt von der am linken Rande der ersten Bildreihe gerade noch erkennbaren Zündstelle und breitet sich, wie die ersten Teilbilder zeigen, zunächst kugelförmig und dann ballonförmig aus. Da die Zündstelle, um sie noch sichtbar zu machen, nicht an Rohrende lag, läuft die Flamme anfangs nach beiden Seiten und erzeugt dabei eine größere Verdrängungsgeschwindigkeit als bei den Eigenlichtaufnahmen, die in der Regel am Bombenende gezündet wurden. Der Kopf der Flamme ist zunächst von glatter Rundung, die Gasbewegung also laminar geordnet. Vom dritten Teilbild des zweiten Fensters an beginnt die Strömung von der Wand her turbulent zu werden, wie man deutlich an den Kräuselungen des Bildes erkennt. Die aus dem Flammenweg und dem Zeitabstand zwischen dem zweiten und dritten und dem dritten und vierten Teilbild ermittelte Flammengeschwindigkeit ist 54 m/s , wovon rund 85% , d. h. etwa 46 m/s auf die Verdrängung entfallen. Dem entspricht im kalten Unverbrannten eine Reynoldszahl von etwa $73\,000$. In den folgenden Abbildungen dringt die Turbulenz bis in die Rohrmitte vor, und der vorher runde Kopf der Flamme zerteilt sich in mehrere Gipfel mit starker Turbulenz. Ein etwas anderes Bild eines Versuchs gleicher Art zeigt Abbildung 19. Hier sieht man im ersten Bildstreifen besonders deutlich, wie eine Schwingung von der Art, wie wir sie bei den Eigenlichtaufnahmen der Abbildungen 13 und 14 kennengelernt hatten, im Schlierenbild aussieht. Etwa bei Einzelbild 5 beginnt die rückläufige Bewegung des Unverbrannten, die natürlich in der Rohrmitte am stärksten ist und in den folgenden Abbildungen den runden Kopf der Flammenfront einstülpt, so daß die Flamme von Einzelbild 10 bis 15 stillsteht. Aus dem unteren Teil der eingebeulten Flammenfront quillt dann ein neuer Kopf hervor, der sich von Einzelbild 17 bis 22 beschleunigt und im Bereich des zweiten Fensters von der Wand her turbulent wird, ähnlich wie in Abbildung 16.

Den Einfluß des Luftverhältnisses auf den Vorgang zeigen die Abbildungen 17 bis 22.

Bemerkenswert sind die erheblichen Reste unverbrannten Gemisches, die hinter der Flammenfront in den besonders in den Teilbildern 20 bis 24 des ersten Fensters der Abbildung 19 stark ausgeprägten Einbuchtungen der verbrannten Gaswolke zurückbleiben. Diese Reste sitzen zu-

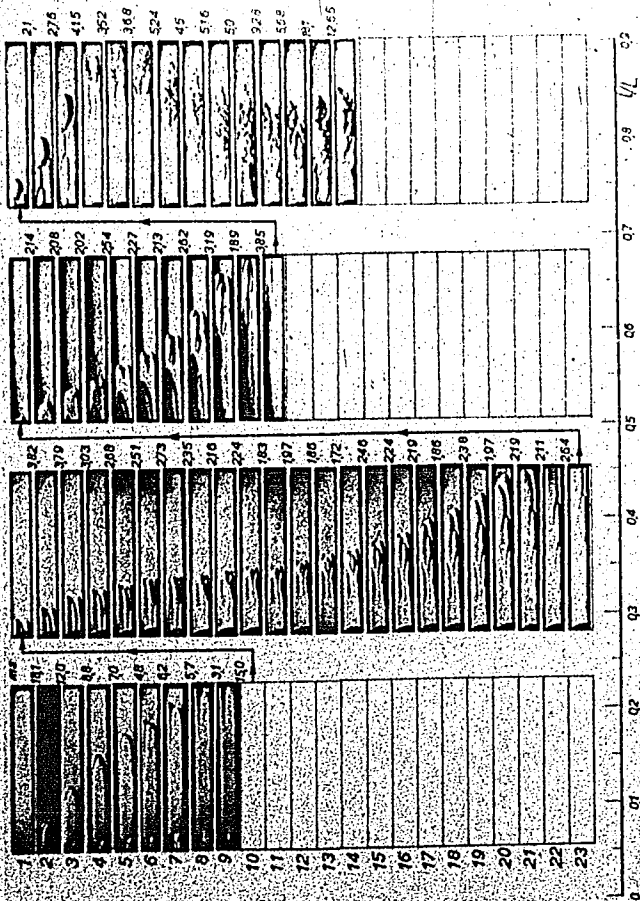


Abb. 17

Schlierenbilder der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch mit dem Luftverhältnis 0,55 im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende

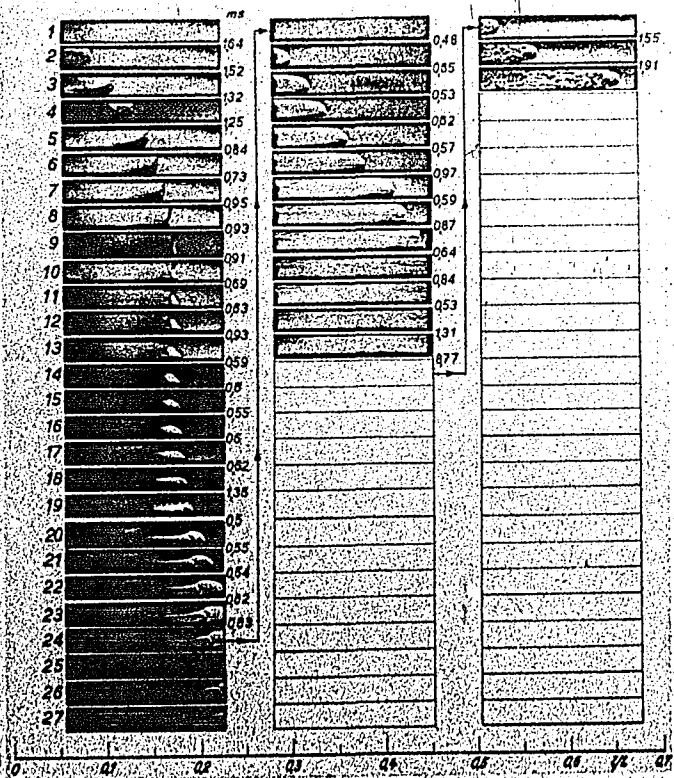


Abb. 19

Schlierenbilder der Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen mit dem Luftverhältnis 0,8 im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende

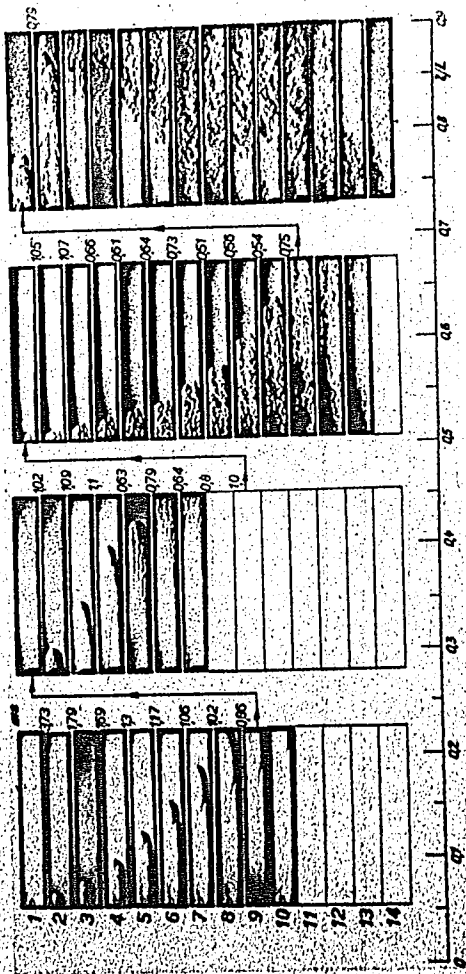


Abb. 20

Schlierenbilder der Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen mit dem Luftverhältnis 1,0 im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende

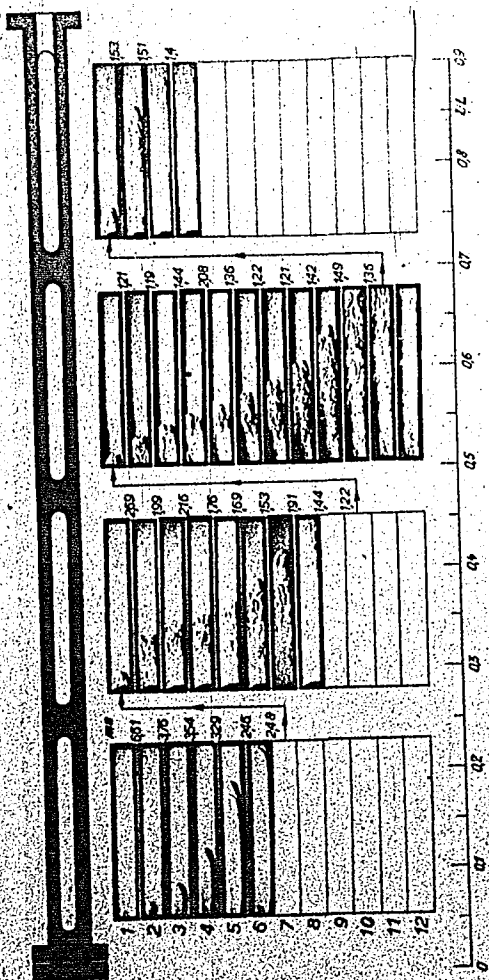


Abb. 21
 Schlierenbilder der Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen mit dem Luftverhältnis 1,2 im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende

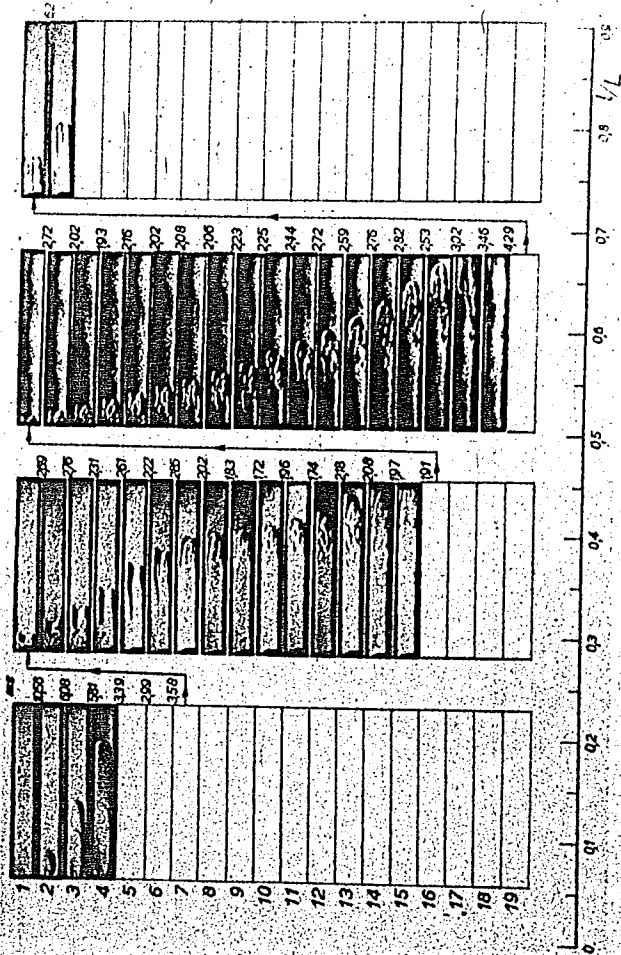


Abb. 22

Schlierenbilder der Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen mit dem Luftverhältnis 1,3 im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende

nächst an der Wand und werden durch deren kühlende Wirkung am sofortigen Abbrennen gehindert. Durch Sekundärströmungen werden sie dann von der Wand ins heiße Innere des Rohres befördert und brennen hier nachträglich ab, wobei sie in den Eigenlichtaufnahmen die wallenden Fahnen, z. B. in Abbildung 14, erzeugen. Zeichnet man ein Weg-Zeit-Diagramm der Bewegung des Flammenkopfes auf Grund der Reihenbilder der Abbildung 19, so erhält man fast denselben Verlauf und auch dieselben Flammengeschwindigkeiten wie in Abbildung 14. Insbesondere entspricht die »Schulter« am Ende des ersten Fensters in Abbildung 14 dem Stehenbleiben des Flammenkopfes in den Einzelbildern 9 bis 15 im ersten Fenster der Abbildung 19.

Auch bei turbulenter Verbrennung bleiben unverbrannte Reste zurück, die erst hinterher abbrennen; denn man sieht auf den Einzelbildern der Bildstreifen deutlich, wie die turbulenten Flammenköpfe hauptsächlich im Kern des Rohres vorstoßen und nicht den ganzen Querschnitt ausfüllen.

3. Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen im beiderseits geschlossenen Rohr bei Zündung an einem Ende

Typische Eigenlichtaufnahmen im beiderseits geschlossenen Rohr zeigt Abbildung 23 für das stöchiometrische Propan-Luft-Gemisch ($\lambda = 1,0$) bei



Abb. 23

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemischen mit dem Luftverhältnis $\lambda = 1,0$ im beiderseits geschlossenen Rohr bei 1 at Anfangsdruck. (Um die gute Reproduzierbarkeit des Vorganges zu zeigen, sind 3 Versuche auf demselben Film bei gleicher Filmgeschwindigkeit aufgenommen)

einem Druck von 1 at vor der Verbrennung. Um die gute Reproduzierbarkeit des Vorgangs zu zeigen, sind drei Versuche gleicher Art auf demselben Film aufgenommen. Der zeitliche Ablauf entspricht im großen Ganzen den vereinfachten Vorstellungen der Abbildung 9, d. h. im ersten Teil des Vorgangs, wo die Verdrängungsgeschwindigkeit groß ist, hat auch die sichtbare Flammengeschwindigkeit große Werte, im letzten Teil wird sie kleiner, da die Verdrängungsgeschwindigkeit gegen das geschlossene Rohrende auf Null abnimmt. Wie durch Vergleich der berechneten Gasverschiebungskurve (Abbildung 9) mit der gemessenen Flammenspur (Abbildung 23) quantitative Aussagen über den Verlauf des Umsatzes je Zeiteinheit, die Änderung der Größe der Flammenfläche während der Verbrennung und über die Aufteilung der sichtbaren Flammengeschwindigkeit in Verdrängungsgeschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit der Flamme gegen das Unverbrannte gewonnen werden können, ist in der genannten Arbeit von Steinicke¹⁾ ausgeführt. Über den glatten Verlauf der Kurve lagern sich aber besonders zu Anfang Schwingungen. Bei anderen Mischungsverhältnissen sind die Schwingungen noch ausgeprägter, wie die Abbildungen 24 bis 30 zeigen. Besonders schön treten sie bei dem brennstoffreichsten Gemisch mit $\lambda = 0,5$ der Abbildung 24 auf. Die Frequenz dieser Schwingungen liegt zwischen 140 und 3,5 Hz, ist also kleiner — und bei reichen Gemischen wesentlich kleiner als die Eigen-



Abb. 24

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch im beiderseits geschlossenen Rohr beim Luftverhältnis 0,5 und bei 1 at Anfangsdruck, erstes und zweites Fenster vergrößert

¹⁾ l. c. S. 113

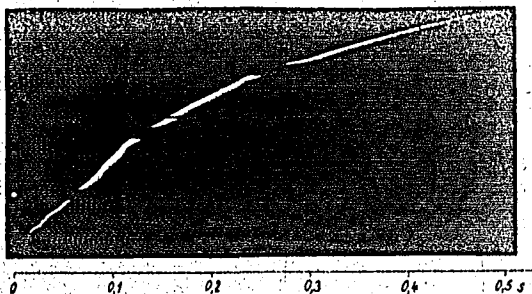


Abb. 25

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch im beiderseits geschlossenen Rohr bei Luftverhältnis 0,6 und bei 1 at Anfangsdruck

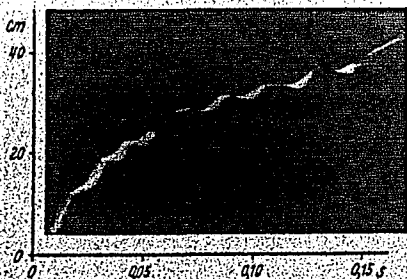


Abb. 26

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch im beiderseits geschlossenen Rohr bei dem Luftverhältnis 0,6 und bei 1 at Anfangsdruck, erstes und zweites Fenster vergrößert

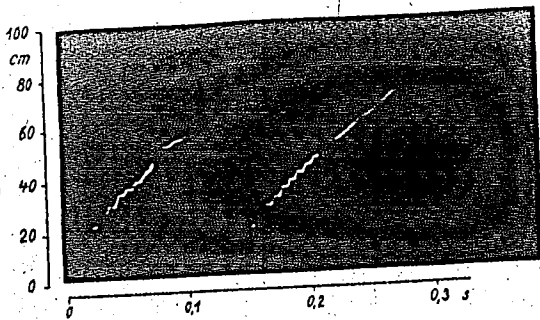


Abb. 27

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch im beiderseits geschlossenen Rohr bei dem Luftverhältnis 0,7 und bei 1 at Anfangsdruck

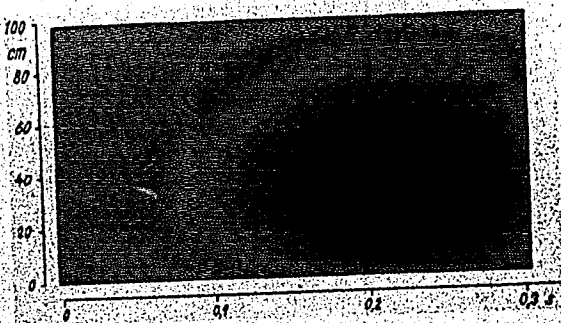


Abb. 28

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch im beiderseits geschlossenen Rohr beim Luftverhältnis 0,8 und bei 1 at Anfangsdruck

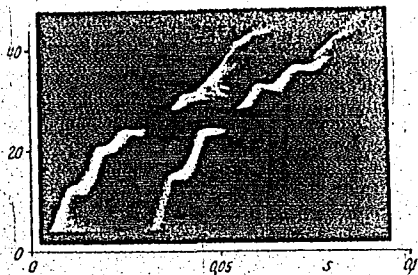


Abb. 29

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch im beiderseits geschlossenen Rohr bei dem Luftverhältnis 0,8 und bei 1 at Anfangsdruck, erstes und zweites Fenster vergrößert

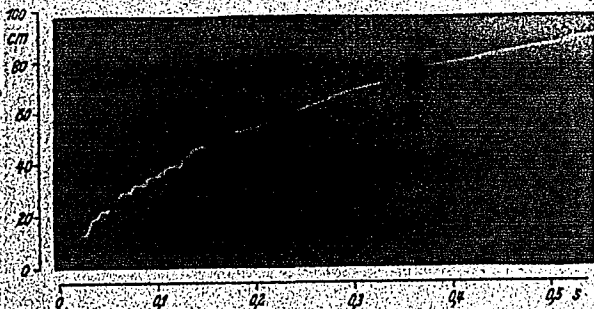


Abb. 30

Eigenlichtaufnahme der Verbrennung von Propan-Luft-Gemisch im beiderseits geschlossenen Rohr beim Luftverhältnis 1,1 und bei 1 at Anfangsdruck

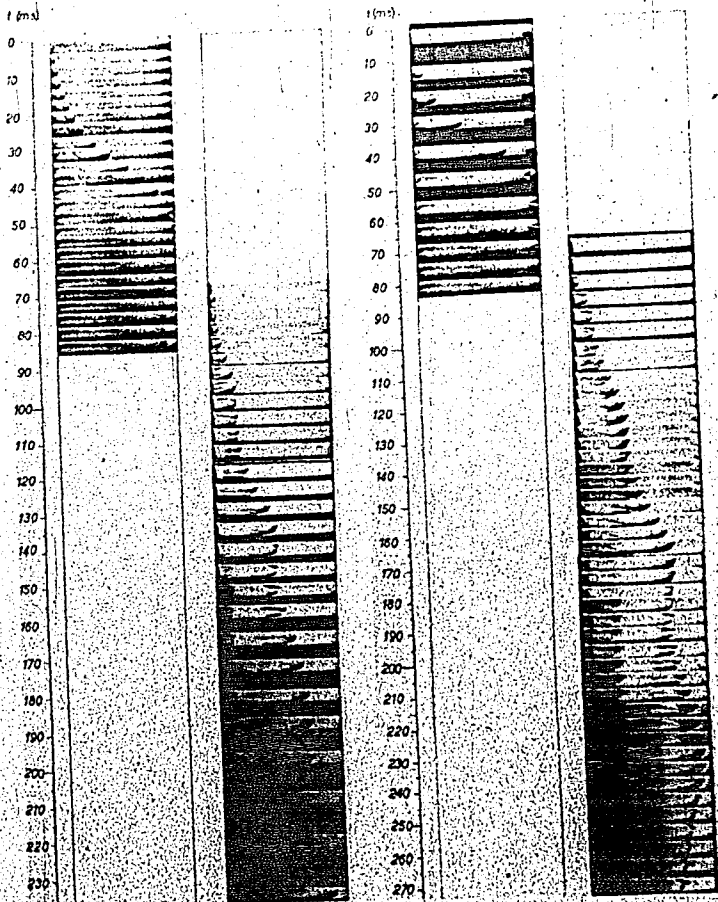


Abb. 31 a und b

Schlierenaufnahme der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches mit dem Luftverhältnis $\lambda = 0,6$ im beiderseits geschlossenen Rohr bei 1 at Anfangsdruck. Zwei Versuche gleicher Art sind jeweils in den Bildern des ersten und zweiten Fensters nebeneinander wiedergegeben

Frequenz der Gassäule im geschlossenen Rohr, die bei Zimmertemperatur bei etwa 167 Hz liegt und im Laufe der Verbrennung ansteigt wegen der steigenden mittleren Temperatur der Gassäule. Die beobachtete Frequenz der Schwingungen nimmt aber gerade im Laufe der Verbrennung ab und ist am kleinsten bei den langsam brennenden Gemischen. Bei diesen ist auch die Verdrängungsgeschwindigkeit und damit die Reynoldssche Zahl der Strömung vor der Flamme am kleinsten. Steinicke hat die beobachteten Frequenzen über der Reynoldsschen Zahl der Verdrängungsströmung aufgetragen und dabei etwa die gleiche Abhängigkeit erhalten, wie sie Hahnemann¹⁾ früher an den Frequenzen der Wirbelablösung beim Einlauf einer Strömung in ein gerades glattes Rohr gefunden hat. Daraus ergibt sich, daß die Ursache der langsamen Flammenschwingungen in der periodischen Ablösung von Wirbeln in der Grenzschicht der Verdrängungsströmung zu suchen ist.

Schlierenaufnahmen der Verbrennung eines Propan-Luft-Gemisches mit dem Luftverhältnis $\lambda = 0,6$ im beiderseits geschlossenen Rohr zeigt Abbildung 31. Dabei sind, um die Reproduzierbarkeit des Vorgangs zu zeigen, die Aufnahmen der beiden ersten Fenster für zwei verschiedene Versuche nebeneinander gestellt. Jeder Bildstreifen ist eine unmittelbare Vergrößerung des Films, es sind also die unbelichteten Zwischenräume zwischen den Einzelbildern nicht herausgeschnitten, so daß die von oben nach unten gemessene Filmlänge der Zeit proportional ist, wie die beiden in Millisekunden geteilten Maßstäbe es angeben. Bei dem Versuch a liegt die dichteste Bildfolge bei Beginn des Vorgangs, bei Versuch b etwa in dessen Mitte. Man sieht in beiden Versuchen, wie nach etwa 47 Millisekunden kurz vor dem Ende des ersten Fensters der bisher runde Flammenkopf sich trichterförmig einstülpt und die Flamme gleichzeitig langsamer wird. Es muß also die Geschwindigkeit des Unverbrannten an dieser Stelle in der Rohrmitte kleiner sein als in der Nähe der Wand, während es an den Stellen mit konvexem Flammenkopf gerade umgekehrt ist. Beim Eintritt in das zweite Fenster hat die Einstülpung unregelmäßige wulstige Formen angenommen, die an Gehirnwindungen erinnern. Aus einem der Wülste bildet sich ein neuer Flammenkopf, der sich dann wieder einstülpt usw. In dieser Weise wiederholt das Spiel sich mehrfach, wie das die Bilder des zweiten Fensters des Versuchs b besonders schön zeigen. Die Flammenfront geht dabei mehrmals vor und zurück, ebenso wie bei den Eigenlichtaufnahmen der Abbildungen 24

¹⁾ H. Hahnemann, *Forsch. u. d. Geb. d. Ing. Wes.* Bd 3 (1937) S. 226.

und 26. Vergleicht man die mittlere Flammengeschwindigkeit und die Frequenz der Schwingungen bei beiden Aufnahmeverfahren, so sieht man, daß die Versuchsbedingungen der Schlierenaufnahme etwa denen der Abbildung 26 nahekommen müssen. In allen Fällen wird die Frequenz im Laufe der Verbrennung, also mit steigender mittlerer Temperatur des Bombeninhalts kleiner.

Eigenlichtaufnahmen in der geschlossenen Bombe bei erhöhtem Anfangsdruck zeigen die Abbildungen 32 bis 37. Die Verbrennung ist, wie zu erwarten, wesentlich lichtstärker, ihr zeitlicher Ablauf ist aber im allgemeinen nur um 20 bis 30% schneller als bei 1 at Anfangsdruck, was wohl durch die bei größerer Ladedichte relativ geringere Kühlwirkung der Wände zu erklären ist. Langsame, durch periodische Wirbelablösung erzeugte Schwingungen sind kaum erkennbar, dagegen treten manchmal Eigenschwingungen der Gassäule auf, besonders deutlich in Abbildung 34, wo sie auch an den hinter der Flammenfront nachbrennenden Teilen als lockenartige Lichtbänder sichtbar werden. Die Frequenz dieser Schwingungen entspricht zu Beginn der Verbrennung der Grundschwingung bei Raumtemperatur von etwa 167 Hz und steigt im letzten Teil der Verbrennung auf 350 bis 370 Hz, was Mitteltemperaturen des Bombeninhalts von 1000 bis 1200° entspricht. Die höchste bei stöchiometrischem Gemisch von 10 at Anfangsdruck gegen Ende der Verbrennung beobachtete Frequenz betrug 440 Hz entsprechend einer mittleren Temperatur von etwa 1700° C. Einzelne Versuche bei rasch brennenden Gemischen ergaben durch starke Schwingungen eine Verdoppelung der mittleren Flammengeschwindigkeit (siehe Abbildung 33).

4. Schlierenaufnahmen der Verbrennung von Gemischen aus Propan und an Sauerstoff angereicherter Luft in einem einseitig offenen Rohr

Die Verbrennung eines Gemisches aus 35% Sauerstoff, 50% N_2 und 15% Propan im einerseits offenen, d. h. nur durch eine dünne mit Klebwachs befestigte Aluminiumfolie verschlossenen Rohr zeigt Abbildung 38. Die Flamme läuft, wie die kurzen Zeitabstände der Bilder zeigen, wesentlich schneller als bei Gas-Luft-Gemischen und erreicht im dritten Fenster etwa 200 m/s. Feinballige Wandturbulenz tritt im 7. Teilbild des 1. Fensters bei einer Reynoldsschen Zahl von etwa 300 000 auf. Bei der hohen Flammengeschwindigkeit kann das Unverbrannte nicht mehr schnell genug abströmen, und es treten Stoßwellen vor der Flammenfront auf,

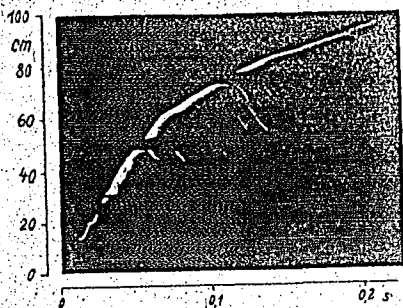


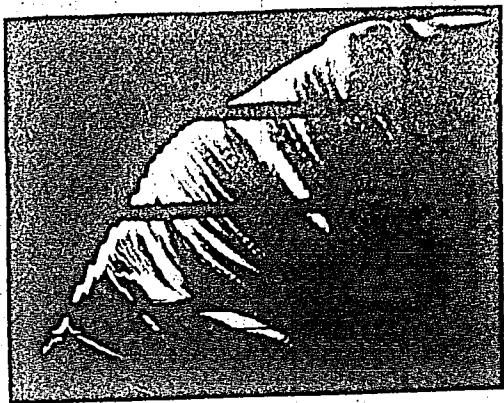
Abb. 32

Eigenlichtaufnahme im beiderseits geschlossenen Rohr bei erhöhtem Anfangsdruck, Luftverhältnis 0,8, Anfangsdruck 4 at



Abb. 33

Eigenlichtaufnahme im beiderseits geschlossenen Rohr bei erhöhtem Anfangsdruck, Luftverhältnis 0,8, Anfangsdruck 4 at



0 0,1 0,2 s

Abb. 31

Eigenlichtaufnahme im beiderseits geschlossenen Rohr bei erhöhtem Anfangsdruck.
Luftverhältnis 0,8, Anfangsdruck 5 at

die im 1. und 2. Bild des 4. Fensters als feiner senkrechter Strich erkennbar sind. Um ihre Lage auch in der Wiedergabe sichtbar zu machen, sind sie durch kleine weiße Dreiecke gekennzeichnet. Die Geschwindigkeit der Stoßwelle, die sich aus der eigentlichen Wellengeschwindigkeit und der Verdrängungsgeschwindigkeit zusammensetzt, ist 424 m/s. An dem offenen Ende wird die Stoßwelle zurückgeworfen und ist als reflektierte Welle im 5. bis 7. Einzelbild des vierten Fensters mit einer Geschwindigkeit von etwa 230 m/s wieder sichtbar. Ihre Front ist dabei konkav, da sie gegen eine Strömung anläuft, deren Geschwindigkeit in der Mitte am größten ist und nach dem Rande zu abnimmt; die Wellenform ist also zugleich eine Darstellung des Geschwindigkeitsprofils der Strömung. Nimmt man an, daß die Amplitude der Wellen noch nicht so groß ist, daß die Schallgeschwindigkeit gegen das ruhend gedachte Gas überschritten wird, so ergibt sich aus dem Unterschied der beiden Wellengeschwindigkeiten eine Verdrängungsgeschwindigkeit des Unverbrannten auf den ersten Einzelbildern des vierten Fensters von rund 100 m/s. Im



Abb. 35

Eigenlichtaufnahme im beiderseits geschlossenen Rohr bei erhöhtem Anfangsdruck.
Luftverhältnis 0,7, Anfangsdruck 6 at

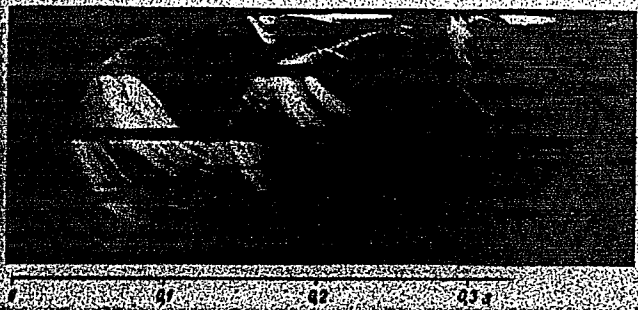


Abb. 36

Eigenlichtaufnahme im beiderseits geschlossenen Rohr bei erhöhtem Anfangsdruck.
Luftverhältnis 0,8, Anfangsdruck 10,5 und 9,7 at

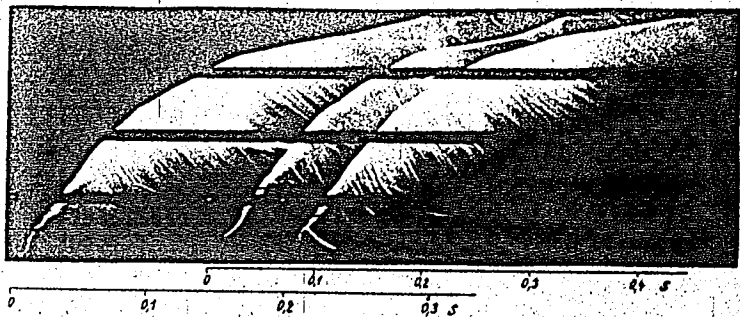


Abb. 37

Eigenlichtaufnahmen im beiderseits geschlossenen Rohr bei erhöhtem Anfangsdruck. Luftverhältnis 1,0, Anfangsdruck 6,4 und 5 at

9. Einzelbild erscheint die Flammenfront im 4. Fenster und erreicht in seiner Mitte eine Geschwindigkeit von etwa 330 m/s, wovon aber mindestens 100 m/s auf die Bewegung des Unverbrannten entfallen. Beim 13. Einzelbild verläßt die Flamme das Rohr, und in den letzten Einzelbildern des Fensters sieht man die durch den Flammenaustritt angeregte Verdünnungswelle in das Rohr zurücklaufen.

Schlierenaufnahmen der Verbrennung eines Gemisches aus 49,7% Sauerstoff, 42,3% Stickstoff und 8% Propan im offenen Rohr, wieder bei Zündung am geschlossenen Ende, zeigt Abbildung 39. Der Film ist hier nicht in Einzelbilder zerschnitten, diese folgen also ihrem zeitlichen Abstand entsprechend aufeinander, wie es der links neben dem Bildstreifen aufgetragene Zeitmaßstab angibt. Die Bildfrequenz beträgt demnach etwa 23 000 Bilder je Sekunde. Diese rasche Funkenfolge würde durch Füllen der Funkenkammer mit Wasserstoff von etwa 1,69 ata erzielt. Das erste Fenster des Rohres ist nicht mitphotographiert, dafür zeigt der 4. Bildstreifen Aufnahmen des Austritts der Gase aus dem Rohr. Gleichzeitige Stellen benachbarter Bildstreifen sind wieder durch geknickte, mit Pfeilen versehene Geradenzüge verbunden. Beim zweiten und dritten Fenster sind unten noch Filmstücke hinzugefügt, die einer späteren Zeit entsprechen, wie der daneben gezeichnete Zeitmaßstab angibt.



Abb. 39

Präparat im zentralen offenen Raub 3,2 in Höhe.
 Gemisches aus 40,7% Samtstoff, 7%
 Schlierenfasern der Verbrennung eines
 am geschlossenen Ende. Der Abstand der Bilder entspricht ihrer zeitlichen Aufeinanderfolge, wie der Fensterabstand. Die
 1. Fensterabstände sind 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4, 2,6, 2,8, 3,0, 3,2, 3,4, 3,6, 3,8, 4,0, 4,2, 4,4, 4,6, 4,8, 5,0, 5,2, 5,4, 5,6, 5,8, 6,0, 6,2, 6,4, 6,6, 6,8, 7,0, 7,2, 7,4, 7,6, 7,8, 8,0, 8,2, 8,4, 8,6, 8,8, 9,0, 9,2, 9,4, 9,6, 9,8, 10,0, 10,2, 10,4, 10,6, 10,8, 11,0, 11,2, 11,4, 11,6, 11,8, 12,0, 12,2, 12,4, 12,6, 12,8, 13,0, 13,2, 13,4, 13,6, 13,8, 14,0, 14,2, 14,4, 14,6, 14,8, 15,0, 15,2, 15,4, 15,6, 15,8, 16,0, 16,2, 16,4, 16,6, 16,8, 17,0, 17,2, 17,4, 17,6, 17,8, 18,0, 18,2, 18,4, 18,6, 18,8, 19,0, 19,2, 19,4, 19,6, 19,8, 20,0, 20,2, 20,4, 20,6, 20,8, 21,0, 21,2, 21,4, 21,6, 21,8, 22,0, 22,2, 22,4, 22,6, 22,8, 23,0, 23,2, 23,4, 23,6, 23,8, 24,0, 24,2, 24,4, 24,6, 24,8, 25,0, 25,2, 25,4, 25,6, 25,8, 26,0, 26,2, 26,4, 26,6, 26,8, 27,0, 27,2, 27,4, 27,6, 27,8, 28,0, 28,2, 28,4, 28,6, 28,8, 29,0, 29,2, 29,4, 29,6, 29,8, 30,0, 30,2, 30,4, 30,6, 30,8, 31,0, 31,2, 31,4, 31,6, 31,8, 32,0, 32,2, 32,4, 32,6, 32,8, 33,0, 33,2, 33,4, 33,6, 33,8, 34,0, 34,2, 34,4, 34,6, 34,8, 35,0, 35,2, 35,4, 35,6, 35,8, 36,0, 36,2, 36,4, 36,6, 36,8, 37,0, 37,2, 37,4, 37,6, 37,8, 38,0, 38,2, 38,4, 38,6, 38,8, 39,0, 39,2, 39,4, 39,6, 39,8, 40,0, 40,2, 40,4, 40,6, 40,8, 41,0, 41,2, 41,4, 41,6, 41,8, 42,0, 42,2, 42,4, 42,6, 42,8, 43,0, 43,2, 43,4, 43,6, 43,8, 44,0, 44,2, 44,4, 44,6, 44,8, 45,0, 45,2, 45,4, 45,6, 45,8, 46,0, 46,2, 46,4, 46,6, 46,8, 47,0, 47,2, 47,4, 47,6, 47,8, 48,0, 48,2, 48,4, 48,6, 48,8, 49,0, 49,2, 49,4, 49,6, 49,8, 50,0, 50,2, 50,4, 50,6, 50,8, 51,0, 51,2, 51,4, 51,6, 51,8, 52,0, 52,2, 52,4, 52,6, 52,8, 53,0, 53,2, 53,4, 53,6, 53,8, 54,0, 54,2, 54,4, 54,6, 54,8, 55,0, 55,2, 55,4, 55,6, 55,8, 56,0, 56,2, 56,4, 56,6, 56,8, 57,0, 57,2, 57,4, 57,6, 57,8, 58,0, 58,2, 58,4, 58,6, 58,8, 59,0, 59,2, 59,4, 59,6, 59,8, 60,0, 60,2, 60,4, 60,6, 60,8, 61,0, 61,2, 61,4, 61,6, 61,8, 62,0, 62,2, 62,4, 62,6, 62,8, 63,0, 63,2, 63,4, 63,6, 63,8, 64,0, 64,2, 64,4, 64,6, 64,8, 65,0, 65,2, 65,4, 65,6, 65,8, 66,0, 66,2, 66,4, 66,6, 66,8, 67,0, 67,2, 67,4, 67,6, 67,8, 68,0, 68,2, 68,4, 68,6, 68,8, 69,0, 69,2, 69,4, 69,6, 69,8, 70,0, 70,2, 70,4, 70,6, 70,8, 71,0, 71,2, 71,4, 71,6, 71,8, 72,0, 72,2, 72,4, 72,6, 72,8, 73,0, 73,2, 73,4, 73,6, 73,8, 74,0, 74,2, 74,4, 74,6, 74,8, 75,0, 75,2, 75,4, 75,6, 75,8, 76,0, 76,2, 76,4, 76,6, 76,8, 77,0, 77,2, 77,4, 77,6, 77,8, 78,0, 78,2, 78,4, 78,6, 78,8, 79,0, 79,2, 79,4, 79,6, 79,8, 80,0, 80,2, 80,4, 80,6, 80,8, 81,0, 81,2, 81,4, 81,6, 81,8, 82,0, 82,2, 82,4, 82,6, 82,8, 83,0, 83,2, 83,4, 83,6, 83,8, 84,0, 84,2, 84,4, 84,6, 84,8, 85,0, 85,2, 85,4, 85,6, 85,8, 86,0, 86,2, 86,4, 86,6, 86,8, 87,0, 87,2, 87,4, 87,6, 87,8, 88,0, 88,2, 88,4, 88,6, 88,8, 89,0, 89,2, 89,4, 89,6, 89,8, 90,0, 90,2, 90,4, 90,6, 90,8, 91,0, 91,2, 91,4, 91,6, 91,8, 92,0, 92,2, 92,4, 92,6, 92,8, 93,0, 93,2, 93,4, 93,6, 93,8, 94,0, 94,2, 94,4, 94,6, 94,8, 95,0, 95,2, 95,4, 95,6, 95,8, 96,0, 96,2, 96,4, 96,6, 96,8, 97,0, 97,2, 97,4, 97,6, 97,8, 98,0, 98,2, 98,4, 98,6, 98,8, 99,0, 99,2, 99,4, 99,6, 99,8, 100,0, 100,2, 100,4, 100,6, 100,8, 101,0, 101,2, 101,4, 101,6, 101,8, 102,0, 102,2, 102,4, 102,6, 102,8, 103,0, 103,2, 103,4, 103,6, 103,8, 104,0, 104,2, 104,4, 104,6, 104,8, 105,0, 105,2, 105,4, 105,6, 105,8, 106,0, 106,2, 106,4, 106,6, 106,8, 107,0, 107,2, 107,4, 107,6, 107,8, 108,0, 108,2, 108,4, 108,6, 108,8, 109,0, 109,2, 109,4, 109,6, 109,8, 110,0, 110,2, 110,4, 110,6, 110,8, 111,0, 111,2, 111,4, 111,6, 111,8, 112,0, 112,2, 112,4, 112,6, 112,8, 113,0, 113,2, 113,4, 113,6, 113,8, 114,0, 114,2, 114,4, 114,6, 114,8, 115,0, 115,2, 115,4, 115,6, 115,8, 116,0, 116,2, 116,4, 116,6, 116,8, 117,0, 117,2, 117,4, 117,6, 117,8, 118,0, 118,2, 118,4, 118,6, 118,8, 119,0, 119,2, 119,4, 119,6, 119,8, 120,0, 120,2, 120,4, 120,6, 120,8, 121,0, 121,2, 121,4, 121,6, 121,8, 122,0, 122,2, 122,4, 122,6, 122,8, 123,0, 123,2, 123,4, 123,6, 123,8, 124,0, 124,2, 124,4, 124,6, 124,8, 125,0, 125,2, 125,4, 125,6, 125,8, 126,0, 126,2, 126,4, 126,6, 126,8, 127,0, 127,2, 127,4, 127,6, 127,8, 128,0, 128,2, 128,4, 128,6, 128,8, 129,0, 129,2, 129,4, 129,6, 129,8, 130,0, 130,2, 130,4, 130,6, 130,8, 131,0, 131,2, 131,4, 131,6, 131,8, 132,0, 132,2, 132,4, 132,6, 132,8, 133,0, 133,2, 133,4, 133,6, 133,8, 134,0, 134,2, 134,4, 134,6, 134,8, 135,0, 135,2, 135,4, 135,6, 135,8, 136,0, 136,2, 136,4, 136,6, 136,8, 137,0, 137,2, 137,4, 137,6, 137,8, 138,0, 138,2, 138,4, 138,6, 138,8, 139,0, 139,2, 139,4, 139,6, 139,8, 140,0, 140,2, 140,4, 140,6, 140,8, 141,0, 141,2, 141,4, 141,6, 141,8, 142,0, 142,2, 142,4, 142,6, 142,8, 143,0, 143,2, 143,4, 143,6, 143,8, 144,0, 144,2, 144,4, 144,6, 144,8, 145,0, 145,2, 145,4, 145,6, 145,8, 146,0, 146,2, 146,4, 146,6, 146,8, 147,0, 147,2, 147,4, 147,6, 147,8, 148,0, 148,2, 148,4, 148,6, 148,8, 149,0, 149,2, 149,4, 149,6, 149,8, 150,0, 150,2, 150,4, 150,6, 150,8, 151,0, 151,2, 151,4, 151,6, 151,8, 152,0, 152,2, 152,4, 152,6, 152,8, 153,0, 153,2, 153,4, 153,6, 153,8, 154,0, 154,2, 154,4, 154,6, 154,8, 155,0, 155,2, 155,4, 155,6, 155,8, 156,0, 156,2, 156,4, 156,6, 156,8, 157,0, 157,2, 157,4, 157,6, 157,8, 158,0, 158,2, 158,4, 158,6, 158,8, 159,0, 159,2, 159,4, 159,6, 159,8, 160,0, 160,2, 160,4, 160,6, 160,8, 161,0, 161,2, 161,4, 161,6, 161,8, 162,0, 162,2, 162,4, 162,6, 162,8, 163,0, 163,2, 163,4, 163,6, 163,8, 164,0, 164,2, 164,4, 164,6, 164,8, 165,0, 165,2, 165,4, 165,6, 165,8, 166,0, 166,2, 166,4, 166,6, 166,8, 167,0, 167,2, 167,4, 167,6, 167,8, 168,0, 168,2, 168,4, 168,6, 168,8, 169,0, 169,2, 169,4, 169,6, 169,8, 170,0, 170,2, 170,4, 170,6, 170,8, 171,0, 171,2, 171,4, 171,6, 171,8, 172,0, 172,2, 172,4, 172,6, 172,8, 173,0, 173,2, 173,4, 173,6, 173,8, 174,0, 174,2, 174,4, 174,6, 174,8, 175,0, 175,2, 175,4, 175,6, 175,8, 176,0, 176,2, 176,4, 176,6, 176,8, 177,0, 177,2, 177,4, 177,6, 177,8, 178,0, 178,2, 178,4, 178,6, 178,8, 179,0, 179,2, 179,4, 179,6, 179,8, 180,0, 180,2, 180,4, 180,6, 180,8, 181,0, 181,2, 181,4, 181,6, 181,8, 182,0, 182,2, 182,4, 182,6, 182,8, 183,0, 183,2, 183,4, 183,6, 183,8, 184,0, 184,2, 184,4, 184,6, 184,8, 185,0, 185,2, 185,4, 185,6, 185,8, 186,0, 186,2, 186,4, 186,6, 186,8, 187,0, 187,2, 187,4, 187,6, 187,8, 188,0, 188,2, 188,4, 188,6, 188,8, 189,0, 189,2, 189,4, 189,6, 189,8, 190,0, 190,2, 190,4, 190,6, 190,8, 191,0, 191,2, 191,4, 191,6, 191,8, 192,0, 192,2, 192,4, 192,6, 192,8, 193,0, 193,2, 193,4, 193,6, 193,8, 194,0, 194,2, 194,4, 194,6, 194,8, 195,0, 195,2, 195,4, 195,6, 195,8, 196,0, 196,2, 196,4, 196,6, 196,8, 197,0, 197,2, 197,4, 197,6, 197,8, 198,0, 198,2, 198,4, 198,6, 198,8, 199,0, 199,2, 199,4, 199,6, 199,8, 200,0, 200,2, 200,4, 200,6, 200,8, 201,0, 201,2, 201,4, 201,6, 201,8, 202,0, 202,2, 202,4, 202,6, 202,8, 203,0, 203,2, 203,4, 203,6, 203,8, 204,0, 204,2, 204,4, 204,6, 204,8, 205,0, 205,2, 205,4, 205,6, 205,8, 206,0, 206,2, 206,4, 206,6, 206,8, 207,0, 207,2, 207,4, 207,6, 207,8, 208,0, 208,2, 208,4, 208,6, 208,8, 209,0, 209,2, 209,4, 209,6, 209,8, 210,0, 210,2, 210,4, 210,6, 210,8, 211,0, 211,2, 211,4, 211,6, 211,8, 212,0, 212,2, 212,4, 212,6, 212,8, 213,0, 213,2, 213,4, 213,6, 213,8, 214,0, 214,2, 214,4, 214,6, 214,8, 215,0, 215,2, 215,4, 215,6, 215,8, 216,0, 216,2, 216,4, 216,6, 216,8, 217,0, 217,2, 217,4, 217,6, 217,8, 218,0, 218,2, 218,4, 218,6, 218,8, 219,0, 219,2, 219,4, 219,6, 219,8, 220,0, 220,2, 220,4, 220,6, 220,8, 221,0, 221,2, 221,4, 221,6, 221,8, 222,0, 222,2, 222,4, 222,6, 222,8, 223,0, 223,2, 223,4, 223,6, 223,8, 224,0, 224,2, 224,4, 224,6, 224,8, 225,0, 225,2, 225,4, 225,6, 225,8, 226,0, 226,2, 226,4, 226,6, 226,8, 227,0, 227,2, 227,4, 227,6, 227,8, 228,0, 228,2, 228,4, 228,6, 228,8, 229,0, 229,2, 229,4, 229,6, 229,8, 230,0, 230,2, 230,4, 230,6, 230,8, 231,0, 231,2, 231,4, 231,6, 231,8, 232,0, 232,2, 232,4, 232,6, 232,8, 233,0, 233,2, 233,4, 233,6, 233,8, 234,0, 234,2, 234,4, 234,6, 234,8, 235,0, 235,2, 235,4, 235,6, 235,8, 236,0, 236,2, 236,4, 236,6, 236,8, 237,0, 237,2, 237,4, 237,6, 237,8, 238,0, 238,2, 238,4, 238,6, 238,8, 239,0, 239,2, 239,4, 239,6, 239,8, 240,0, 240,2, 240,4, 240,6, 240,8, 241,0, 241,2, 241,4, 241,6, 241,8, 242,0, 242,2, 242,4, 242,6, 242,8, 243,0, 243,2, 243,4, 243,6, 243,8, 244,0, 244,2, 244,4, 244,6, 244,8, 245,0, 245,2, 245,4, 245,6, 245,8, 246,0, 246,2, 246,4, 246,6, 246,8, 247,0, 247,2, 247,4, 247,6, 247,8, 248,0, 248,2, 248,4, 248,6, 248,8, 249,0, 249,2, 249,4, 249,6, 249,8, 250,0, 250,2, 250,4, 250,6, 250,8, 251,0, 251,2, 251,4, 251,6, 251,8, 252,0, 252,2, 252,4, 252,6, 252,8, 253,0, 253,2, 253,4, 253,6, 253,8, 254,0, 254,2, 254,4, 254,6, 254,8, 255,0, 255,2, 255,4, 255,6, 255,8, 256,0, 256,2, 256,4, 256,6, 256,8, 257,0, 257,2, 257,4, 257,6, 257,8, 258,0, 258,2, 258,4, 258,6, 258,8, 259,0, 259,2, 259,4, 259,6, 259,8, 260,0, 260,2, 260,4, 260,6, 260,8, 261,0, 261,2, 261,4, 261,6, 261,8, 262,0, 262,2, 262,4, 262,6, 262,8, 263,0, 263,2, 263,4, 263,6, 263,8, 264,0, 264,2, 264,4, 264,6, 264,8, 265,0, 265,2, 265,4, 265,6, 265,8, 266,0, 266,2, 266,4, 266,6, 266,8, 267,0, 267,2, 267,4, 267,6, 267,8, 268,0, 268,2, 268,4, 268,6, 268,8, 269,0, 269,2, 269,4, 269,6, 269,8, 270,0, 270,2, 270,4, 270,6, 270,8, 271,0, 271,2, 271,4, 271,6, 271,8, 272,0, 272,2, 272,4, 272,6, 272,8, 273,0, 273,2, 273,4, 273,6, 273,8, 274,0, 274,2, 274,4, 274,6, 274,8, 275,0, 275,2, 275,4, 275,6, 275,8, 276,0, 276,2, 276,4, 276,6, 276,8, 277,0, 277,2, 277,4, 277,6, 277,8, 278,0, 278,2, 278,4, 278,6, 278,8, 279,0, 279,2, 279,4, 279,6, 279,8, 280,0, 280,2, 280,4, 280,6, 280,8, 281,0, 281,2, 281,4, 281,6, 281,8, 282,0, 282,2, 282,4, 282,6, 282,8, 283,0, 283,2, 283,4, 283,6, 283,8, 284,0, 284,2, 284,4, 284,6, 284,8, 285,0, 285,2, 285,4, 285,6, 285,8, 286,0, 286,2, 286,4, 286,6, 286,8, 287,0, 287,2, 287,4, 287,6, 287,8, 288,0, 288,2, 288,4, 288,6, 288,8, 289,0, 289,2, 289,4, 289,6, 289,8, 290,0, 290,2, 290,4, 290,6, 290,8, 291,0, 291,2, 291,4, 291,6, 291,8, 292,0, 292,2, 292,4, 292,6, 292,8, 293,0, 293,2, 293,4, 293,6, 293,8, 294,0, 294,2, 294,4, 294,6, 294,8, 295,0, 295,2, 295,4, 295,6, 295,8, 296,0, 296,2, 296,4, 296,6, 296,8, 297,0, 297,2, 297,4, 297,6, 297,8, 298,0, 298,2, 298,4, 298,6, 298,8, 299,0, 299,2, 299,4, 299,6, 299,8, 300,0, 300,2, 300,4, 300,6, 300,8, 301,0, 301,2, 301,4, 301,6, 301,8, 302,0, 302,2, 302,4, 302,6, 302,8, 303,0, 303,2, 303,4, 303,6, 303,8, 304,0, 304,2, 304,4, 304,6, 304,8, 305,0, 305,2, 305,4, 305,6, 305,8, 306,0, 306,2, 306,4, 306,6, 306,8, 307,0, 307,2, 307,4, 307,6, 307,8, 308,0, 308,2, 308,4, 308,6, 308,8, 309,0, 309,2, 309,4, 309,6, 309,8, 310,0, 310,2, 310,4, 310,6, 310,8, 311,0, 311,2, 311,4, 311,6, 311,8, 312,0, 312,2, 312,4, 312,6, 312,8, 313,0, 313,2, 313,4, 313,6, 313,8, 314,0, 314,2, 314,4, 314,6, 314,8, 315,0, 315,2, 315,4, 315,6, 315,8, 316,0, 316,2, 316,4, 316,6, 316,8, 317,0, 317,2, 317,4, 317,6, 317,8, 318,0, 318,2, 318,4, 318,6, 318,8, 319,0, 319,2, 319,4, 319,6, 319,8, 320,0, 320,2, 320,4, 320,6, 320,8, 321,0, 321,2, 321,4, 321,6, 321,8, 322,0, 322,2, 322,4, 322,6, 322,8, 323,0, 323,2, 323,4, 323,6, 323,8, 324,0, 324,2, 324,4, 324,6, 324,8, 325,0, 325,2, 325,4, 325,6, 325,8, 326,0, 326,2, 326,4, 326,6, 326,8, 327,0, 327,2, 327,4, 327,6, 327,8, 328,0, 328,2, 328,4, 328,6, 328,8, 329,0, 329,2, 329,4, 329,6, 329,8, 330,0, 330,2, 330,4, 330,6, 330,8, 331,0, 331,2, 331,4, 331,6, 331,8, 332,0, 332,2, 332,4, 332,6, 332,8, 333,0, 333,2, 333,4, 333,6, 333,8, 334,0, 334,2, 334,4, 334,6, 334,8, 335,0, 335,2, 335,4, 335,6, 335,8, 336,0, 336,2, 336,4, 336,6, 336,8, 337,0, 337,2, 337,4, 337,6, 337,8, 338,0, 338,2, 338,4, 338,6, 338,8, 339,0, 339,2, 339,4, 339,6, 339,8, 340,0, 340,2, 340,4, 340,6, 340,8, 341,0, 341,2, 341,4, 341,6, 341,8, 342,0, 342,2, 342,4, 342,6, 342,8, 343,0, 343,2, 343,4, 343,6, 343,8, 344,0, 344,2, 344,4, 344,6, 344,8, 345,0, 345,2, 345,4, 345,6, 345,8, 346,0, 346,2, 346,4, 346,6, 346,8, 347,0, 347,2, 347,4, 347,6, 347,8, 348,0, 348,2, 348,4, 348,6, 348,8, 349,0, 349,2, 349,4, 349,6, 349,8, 350,0, 350,2, 350,4, 350,6, 350,8, 351,0, 351,2, 351,4, 351,6, 351,8, 352,0, 352,2, 352,4, 352,6, 352,8, 353,0, 353,2, 353,4, 353,6, 353,8, 354,0, 354,2, 354,4, 354,6, 354,8, 355,0, 355,2, 355,4, 355,6, 355,8, 356,0, 356,2, 356,4, 356,6, 356,

In der ersten, dem zweiten Fenster entsprechenden Bildreihe sieht man die Flamme als schwarzen Schatten mit der nahezu gleichbleibenden Geschwindigkeit von 270 m/s von links nach rechts läufend. Der Flammenkopf ist zunächst gewölbt und stulpt sich etwa von 0,3 ms an nach rückwärts ein, ähnlich wie wir das in den Abbildungen 19 und 22 gesehen haben. Vor der Flammenfront sieht man Druckwellen, die sich infolge von Reflexionen an den Wänden mehrfach durchkreuzen. Der bei 0,3 ms in das Bildfenster eintretende helle Schein rührt vom Eigenlicht der Flamme her. Das stärkste Aufleuchten des Gases erfolgt also erst etwa 10 cm hinter dem Flammenkopf. Die chemische Reaktion ist demnach nach dem Durchlaufen der Flammenfront keineswegs beendet, sondern findet gerade mit ihrer photographisch wirksamsten Phase merklich später statt. Die Richtung der Streifung des Eigenlichts kennzeichnet die Bewegung des heißen Gases, die Schwaden laufen zunächst nahezu mit gleicher Geschwindigkeit hinter der Flamme her, kommen zur Ruhe und kehren dann ihre Bewegungsrichtung um. Die anfänglich starke Bewegung in Richtung der Flammenbewegung ist vielleicht dadurch hervorgerufen, daß die Zündung nicht am Rohrende erfolgte und wegen der doppelten Flammenfront eine stärkere Verdrängung des Gases stattfindet, als es bei Zündung genau am Rohrende der Fall wäre.

In der zweiten, dem dritten Fenster entsprechenden Bildreihe haben sich die vor der Flammenfront herlaufenden Stoßwellen zu einem senkrechten Verdichtungsstoß gesammelt, der von links nach rechts mit einer Geschwindigkeit von 457 m/s läuft und in den ersten vier Einzelbildern besonders deutlich erkennbar ist. Vom 5. Einzelbild an sieht man einen zweiten Verdichtungsstoß, der, wie es sein muß, mit größerer Geschwindigkeit von 636 m/s hinter dem ersten herläuft. Vom 12. Einzelbild an tritt noch ein dritter Verdichtungsstoß auf, dem die rascher gewordene Flamme in kurzem Abstand folgt. Im 4. Fenster sieht man in den ersten Bildern wieder den ersten Verdichtungsstoß, der sich mit dem zweiten vereinigt hat. Im 7. Bild erscheint der dritte Verdichtungsstoß und direkt dahinter die Flamme. Im 10. Bild hat die Flamme diesen Verdichtungsstoß eingeholt, und wir erkennen ein sehr starkes Aufleuchten des Gases, das dem Übergang in die Detonation entspricht. Für die nach vorn laufende Detonationswelle ergibt sich aus der Neigung der Leuchtspur eine Geschwindigkeit von 2750 m/s, für die nach rückwärts laufende Retonationswelle eine solche von 1050 m/s. Das starke Leuchten der Retonationswelle ist eine Folge der hohen Temperatur; es würde noch

stärker überstrahlen, wenn das abbildende Objektiv nicht bis auf einen schmalen Spalt von nur 1 mm Breite abgedeckt wird. In den folgenden Bildern des 4. Fensters sieht man dicht vor dem rechten Rand eine tiefschwarzen balkenförmigen Schatten und einige kleinere kürzere Striche, die sich in allen weiteren Bildern an derselben Stelle wiederholen. Sie sind das Bild der Bruchzone der an dieser Stelle durch den hohen Detonationsdruck zerstörten vorderen Glasplatte. Die vierte Bildreihe zeigt das Aus-treten der Flamme aus dem offenen, nur durch ein dünnes Seidenpapierblatt abgeschlossenen Rohrende. Man sieht, wie das starke Leuchten der Detonation aufhört und diese wieder in die gewöhnliche Form der Flammenausbreitung übergeht. Die zahlreichen schwarzen Flecke, die sich mit einer mehr oder weniger großen Geschwindigkeit nach rechts bewegen, sind Bruchstücke des Seidenpapierblattes.

Eine ähnliche Aufnahme, bei der aber die Detonation durch eine spontane Zündung vor der Wellenfront eingeleitet wird, zeigt Abbildung 10 wieder für das zweite, dritte und vierte Fenster. Die Selbstzündung vor der Flammenfront beginnt mit zwei kleinen dunkleren Strichen auf dem durch einen Pfeil gekennzeichneten Bilde des vierten Fensters. Im nächsten Bilde haben diese Striche sich nach rechts hin ausgedehnt und zu einer den ganzen Querschnitt ausfüllenden Zündzone verbreitert. Im folgenden Bilde ist die Detonation beim Zusammentreffen der Flammenfront mit der Selbstzündungszone erfolgt. Man erkennt auf diesem Bilde besonders deutlich den Weg der heißen Schwaden an den Streifen des Eigenlichtes der Verbrennung.

Im dritten Fenster sieht man auf den ersten sieben Bildern eine von rechts nach links laufende Welle. Sie ist erzeugt durch die Explosion einer Zündkapsel außerhalb der Bombe und soll dazu dienen, die Strömungsgeschwindigkeit des Unverbrannten aus der Differenz von Schallgeschwindigkeit und beobachteter Wellengeschwindigkeit zu bestimmen.

Die große Leistungsfähigkeit des Schlierenverfahrens mit hoher Bildfrequenz zeigt besonders anschaulich die Abbildung 41, die eine Reihenaufnahme des Gebietes zwischen dem offenen Ende der Bombe und der Zündkapsel kurz nach ihrer Detonation bei dem Versuch der Abbildung 40 darstellt. Der Zeitmaßstab ist der gleiche wie in Abbildung 40, die mittlere Bildfrequenz beträgt etwa 23 000 Bilder in der Sekunde. In den ersten Bildern des rechten längeren Bildstreifens sieht man Machsche Wellen, hervorgerufen von Splintern der Metallhülse der Sprengkapsel. Ihre Geschwindigkeit ergibt sich sowohl aus dem Machschen

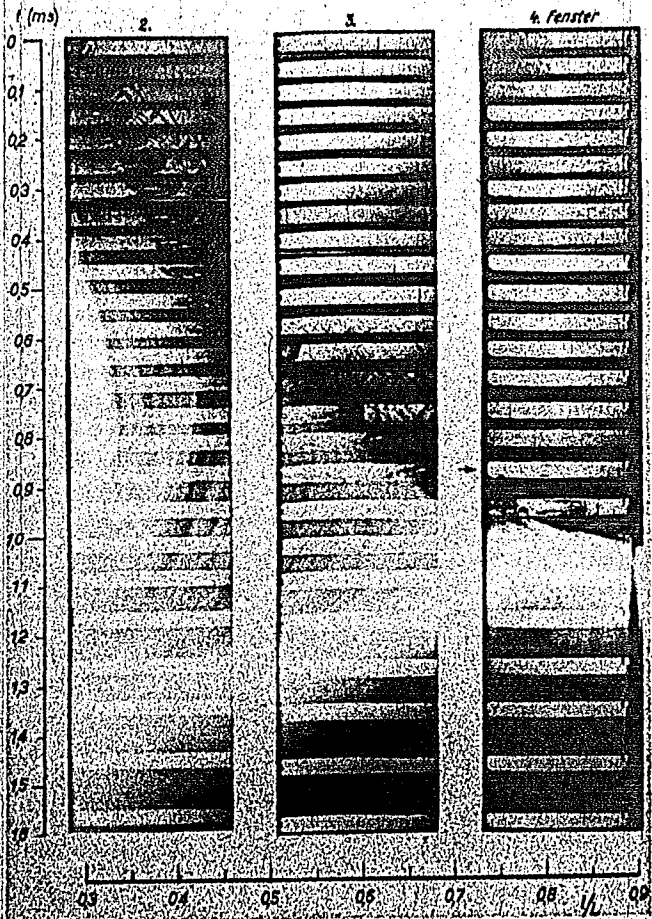


Abb. 40

Schlierenaufnahme der Verbrennung eines Gemisches aus 49,2% Sauerstoff, 41,8% Stickstoff, 9% Propan im einseitig offenen Rohr bei Zündung am geschlossenen Ende, wobei von rechts nach links eine Knallwelle läuft.

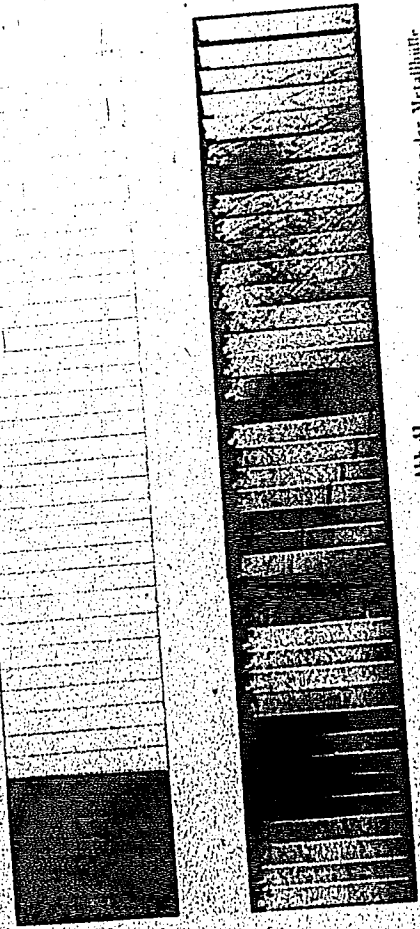


Abb. 41
Detonation einer Sprengkapsel mit Mäschchen Wellen der mit etwa 1000 m/s fliegenden Splitter der Metallhülle
und der Knallwelle

Winkel der Wellen wie aus dem Bewegungsfortschritt von Bild zu Bild übereinstimmend zu etwa 1000 m/s. In den Bildern 3 bis 5 kann man besonders deutlich zwei hintereinanderfliegende Splitter auf ihrem Wege verfolgen. Vom sechsten Bilde sieht man am linken Rande, wie die von der Stirnfläche des Bombenflansches zurückgeprallten Splitter sich mit viel geringeren Geschwindigkeiten wieder nach rechts bewegen. Etwa in der Mitte der Bildreihe läuft die Knallwelle von rechts nach links durch das Gesichtsfeld. Auf den letzten Bildern erkennt man den nach rechts laufenden, an der Bombenstirnwand reflektierten Teil der Knallwelle. Der kurze linke Bildstreifen zeigt Bilder des vierten Fensters der Bombe mit der von rechts nach links laufenden Knallwelle, deren weiteren Lauf wir im dritten Fenster der Abbildung 40 gesehen hatten.

Aussprache

Lindner: Die hier dargestellten Untersuchungen erstrecken sich zunächst auf die Entwicklung und den Ablauf von Detonationen. Das Auftreten von Druckwellen, wie es hier gezeigt wird, ist bei den Klopferscheinungen im Motor als bisher nicht nachgewiesen zu betrachten. Die im Verbrennungsraum auftretenden Druckschwingungen können am einfachsten als Folgeerscheinungen der mit dem raschen Durchzünden beim Klopfstoß entstehenden plötzlichen Drucksteigerungen gedeutet werden. Die sehr eingehenden Untersuchungen von Mallard und Le Chatelier (Ann. d. min. 1883) über die Entwicklung der Explosionswelle aus der normalen Verbrennung in Röhren lassen die Möglichkeit offen, daß es sich beim Klopfvorgang um Übergangerscheinungen in die Detonation handelt, die nach den Aufnahmen dieser Forscher ebenfalls mit Schwingungerscheinungen verknüpft sind.

Die von mir seinerzeit aufgenommenen Schlierenaufnahmen von klopfenden und nichtklopfenden Verbrennungen in einer Kugelbombe ließen ein Auftreten von Druckwellen beim Klopfen nicht erkennen. Es ist sehr schwierig, beim kugelförmigen Brennraum, der für diese Versuche nur zur Verfügung stand, Schlierenaufnahmen innerhalb des nahe der Wandungen gelegenen Klopfbereichs durchzuführen. Als einziger Unterschied zwischen klopfender und klopfreier Verbrennung ergab sich, daß bei erstgenannter schon vor Eintritt des Klopfstoßes eine sehr viel stärkere Unterteilung der Flammenfront eintritt. Während bei der klopfreien Verbrennung die glatte Flammenfläche nur durch wenige Ausbeulungen gestört ist, treten bei der zum Klopfen führenden Verbrennung eine große Zahl im Schlierenbild deutlich sichtbarer Verschneidungslinien der einzelnen kugelförmigen Flächenteile der Front auf, die dieser eine wolkenartige Struktur verleihen. Dieser Umstand läßt darauf schließen, daß bei der klopfenden Verbrennung schon vor Eintritt des Klopfstoßes eine erhöhte Turbulenz der Gasbewegung im Brennraum vorhanden sein muß. Es liegt nahe, diese Turbulenz mit den Übergangerscheinungen zur Detonation, wie sie von Mallard und Le Chatelier festgestellt wurden, in Zusammenhang zu bringen. Die Entwicklung von Detonationswellen selbst ist im Motor jedoch nicht anzunehmen.

Rügener: Ich möchte zum möglichen Zusammenhang zwischen Detonation und Klopfen etwas sagen. Man rechnet bei der rein hydrodynamisch-thermodynamischen Behandlung der Detonation im allgemeinen mit einer vollständigen Verbrennung in der Front der Stoßwelle. Tatsächlich erfordert aber der Umsatz komplizierterer Moleküle eine ganze Anzahl von gaskinetischen Stößen, so daß die Verbrennungsenergie des Gemischs erst in einem gewissen Abstand hinter der Front der Stoßwelle vollständig umgesetzt sein kann. Dieser zeitliche Abstand zwischen Eintreffen der Druckwelle an einem bestimmten Punkt und vollständiger Verbrennung könnte doch wohl mit der bei der Selbstzündung adiabatisch verdichteter Gemische beobachteten Induktionszeit identisch sein.

Lindner: Entsprechend den Zündgrenzen für die normale Verbrennung bestehen für das Auftreten von Explosionswellen sog. Detonationsgrenzen. Maßgebend ist hier die Reaktionsgeschwindigkeit des brennbaren Gemischs, die groß genug sein muß, um die für das Bestehen einer stabilen Detonationswelle erforderliche Energieentwicklung in der Front aufrechtzuerhalten. So ist bei den sehr träge reagierenden Kohlenoxyd-Luft-Gemischen unter normalen Druck und Temperatur das Auftreten von stabilen Explosionswellen nach Versuchen von Wendlandt nicht möglich. (Eine große Bedeutung besitzt für den Ablauf der Kohlenoxydreaktion allerdings die Gegenwart geringer Mengen von Wasserdampf.)

Dankühler: Ich möchte zur Detonation sagen: Man muß da sehr vorsichtig sein. Lange Zeit glaubte man, daß die Detonation in Brennstoff-Luft-Gemischen nicht möglich sei. Wir haben jetzt in Braunschweig Verbrennungsversuche in einer 50 m langen Rohrstraße durchgeführt, und dabei konnte Herr Steinicke zeigen, daß z. B. nach 20 oder 25 m sehr wohl eine Detonation in Propan-Luft-Gemischen auftreten kann. Es hängt oft sehr davon ab, welche Anlaufänge für die Detonation zur Verfügung steht.

Rögener: Experimentelle und theoretische Untersuchungen haben bekanntlich zu dem Ergebnis geführt, daß die Kohlenoxydverbrennung verhältnismäßig langsam — etwa im Vergleich zur Knallgasverbrennung — abläuft. Trotzdem hat man auch bei Kohlenoxyd-Sauerstoff-Gemischen Detonationen beobachtet. Vielleicht darf ich noch eine Bemerkung machen zur Frage des Zusammenhangs zwischen Detonations- und Klopferscheinungen. Es fiel uns früher schon auf, daß der Prädetonationsweg, d. h. die Laufstrecke der Flamme bis zum Einsetzen der Detonation, durch Druckerhöhung in vielen Fällen sehr stark verkürzt, durch Temperaturerhöhung dagegen kaum oder in entgegengesetztem Sinn beeinflußt wird; rein formal ist das eine Parallele zum Druck- und Temperatureinfluß auf die Klopfneigung der Kraftstoffe.

Gliwitsky: Ich habe in Versuchsstrecken von etwa 50 m Länge mit Kohlenoxyd-Luft-Gemischen Detonationen erzielt. Es ist dies immer ohne Schwierigkeit gelungen, wenn vor die Versuchsstrecke eine 6 Liter fassende Explosionsbombe geschaltet wurde, in der die Explosion ausgelöst wurde. Messungen, die ich zwischen dem 9. und 41. m der Strecke an verschiedenen Stellen vorgenommen habe, ergaben stets die Detonationsgeschwindigkeit.

E. Schmidt: Ich glaube auch nicht, daß die Detonation mit dem Klopfen identisch ist, aber ich glaube, daß das Klopfen in dem Bereich liegt, wo sich in den gezielten Bildern die Druckwellen vor der Flamme entwickeln, bevor die eigentliche Detonation einsetzt. Für den Motor ist nicht genügend Zeit oder nicht genügend Laufweg, um es bis zur eigentlichen Detonation kommen zu lassen, aber was wir in diesen Bomben vor der Detonation beobachten, das ist wohl etwas Ähnliches wie das Klopfen im Motor.