

Zur Messung der Verbrennungsgeschwindigkeit explosiver Gasmische

Von

Heinrich Mache

ordentl. Mitglied d. Akad. d. Wiss.

und

Alexius Hebra

(Mit 7 Textfiguren)

(Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien)

(Vorgelegt in der Sitzung am 3. Juli 1941)

Zwecks Verfeinerung der Gouy'schen Methode zur Messung der Verbrennungsgeschwindigkeit (VG) von explosiven Gasmischen hat W. Michelson schon im Jahre 1890 die genauere Form des auf einem zylindrischen Rohr brennenden Bunsenkegels zu berechnen versucht.¹ Hiezu war es nötig, bestimmte Annahmen über die Strömungsverhältnisse in dem aus dem Rohr austretenden freien Strahl zu machen, die sich mindestens bis zur Höhe erstrecken mußten, in welche die Kegelspitzen reichen. Michelson setzte laminare Strömung voraus und nahm an, daß sich auch im Mündungsquerschnitt die Strömungsgeschwindigkeit von der Mitte nach außen so ändert, wie das für eine mit konstantem Druckgefälle im Rohr strömende inkompressible Flüssigkeit der Fall wäre, die unter dem Einfluß innerer und endlicher äußerer Reibung steht. Hienach hätte das Gas in der äußersten Schichte eine von Null verschiedene Geschwindigkeit. Weiters nahm Michelson einfach an, daß diese im Mündungsquerschnitt vorausgesetzte Geschwindigkeitsverteilung über die ganze Höhe des Brennkegels unverändert erhalten bleibt.

Beide Annahmen werden nicht zutreffen. Sie tragen wohl dem Umstand Rechnung, daß ein freier Strahl, wenn er anfangs gut parallel gerichtet ist, den Raum geradlinig durchsetzt und erst in größerer Entfernung vom Mündungsquerschnitt durch Vermischung mit der umgebenden, teilweise mitgerissenen Luft

¹ Vgl. H. Mache, „Die Physik der Verbrennungserscheinungen“, Leipzig, 1918.

aufgelöst wird, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man dem Gas Tabakrauch zumischt. Doch ist in Wirklichkeit weder im Rohr endliche äußere Reibung zu beobachten, noch wird die im Mündungsquerschnitt vorhandene Geschwindigkeitsverteilung als unverändert gelten dürfen, falls es sich um Querschnitte handelt, die von der Mündung etwas weiter entfernt liegen.

Die bezügliche Rechnung Michelsons, die auf elliptische Integrale führt, findet sich l. c. auf Seite 46 bis 53 ausführlich wiedergegeben. Dort und auf Seite 39 wird aber auch schon bemerkt, daß der im Gasstrahl einsetzende Geschwindigkeitsausgleich die Form der Brennfläche beeinflussen kann. Es heißt dort: „Im Gasstrahl wird mit Fortfallen der äußeren Reibung an der Rohrwand die innere Reibung dahin wirken, daß die Geschwindigkeitsunterschiede über den ganzen Querschnitt mit wachsender Entfernung vom Rohrende kleiner werden, indem die inneren Schichten die äußeren beschleunigen und hierdurch selbst an Geschwindigkeit verlieren. Außerdem wird die lebendige Kraft des Gasstrahles sinken.“

Besonders nachdrücklich weist aber W. Jost in seinem Buch „Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen“ (Berlin, Springer, 1939), Seite 80 bis 82, auf diesen Umstand hin und fordert mit Recht eine eingehende Untersuchung der Strömungsverhältnisse im Gasstrahl als Vorbedingung einer jeden Betrachtung über die Formen, welche die Brennfläche über kreisrunden Rohren annehmen kann.

Eine befriedigende theoretische Darstellung ist kaum möglich. Aber auch experimentell wurde die Erscheinung noch wenig untersucht.

A. Predvoditelev und E. Stupotshenko¹ haben in einer von Jost auf Seite 81 referierten Arbeit die Geschwindigkeitsverteilung über der Mündung von mehr als 10 cm weiten Röhren mittels eines kleinen Anemometers gemessen. F. A. Smith² mischt dem aus dem Brenner ausströmenden Luftstrom leichte Aluminiumpartikelchen zu und ermittelt deren Geschwindigkeit auf photographischem Weg. Die Ergebnisse bezeichnet er selbst als vorläufige. So werden zur Klärung dieser Frage weitere Versuche nötig sein, die auch bereits in Angriff genommen sind.

Soweit es sich aber um nichts anderes handelt, als um die Verfeinerung des Verfahrens, das die Messung der VG von Gasgemischen aus der Form der Brennfläche bezweckt, liegt es nahe,

¹ Techn. Phys. USSR, 2, 357 (1935).

² Chem. Rev., 21, 389 (1937).

von der Anwendung eines kalibrischen, langen Brennerrohres überhaupt abzugehen und statt dessen das Gemisch aus einer geeigneten Düse ausströmen zu lassen. In der Düse wird nämlich, wie man längst weiß, wenigstens im Mündungsquerschnitt eine bis auf den Rand homogene Strömung beobachtet und hiedurch auch im Strahl eine einfachere Geschwindigkeitsverteilung erzielt als in dem aus einem Rohr austretenden Strahl, wo in der Mündung bestenfalls Poiseuille'sche Strömung herrscht.

So hat der eine von uns schon vor vielen Jahren die regelmäßige Kegelform der auf einer kreisrunden Düse sich bildenden Brennfläche beobachtet und anlässlich eines Vortrages vor Gas- und Feuerungsingenieuren demonstriert.¹ Das gleiche bemerken Van de Poll und Westerdijk² an Schlierenaufnahmen, die sie von derartigen Brennkegeln hergestellt haben. Freilich wird hier die Beurteilung durch die optische Verzeichnung, welche die Linsenwirkung der Flamme hervorruft, erschwert. So beruht auch der aus diesen Aufnahmen von den genannten Autoren gezogene Schluß, daß der Fuß des Brennkegels über das Rohr nicht hinausreicht und daß die Spitze des Kegels in Wirklichkeit gar nicht abgerundet ist, auf einer durch diese Verzeichnung veranlaßten Täuschung.

Daß auf der Düse auch bei großer Geschwindigkeit (z. B. bei 16 m/sec), bei der im und über dem Rohr längst Turbulenz eintreten würde, die Potentialströmung erhalten bleibt, bedeutet einen weiteren Vorteil des Düsenbrenners. Muß man doch, um das Zurückschlagen der Flamme zu verhindern, bei hoch explosiven Gemischen Geschwindigkeiten anwenden, bei denen im Rohr die Strömung turbulent ist.

Hiernach bestand die nächste Aufgabe darin, für eine bestimmte Düse, deren inneres Profil die Fig. 1 in natürlicher Größe wiedergibt, die Geschwindigkeitsverteilung im Strahl zu untersuchen. Es sei hierzu bemerkt, daß Düsen von etwas anderer Form keine wesentlich andere Geschwindigkeitsverteilung ergaben, so daß die Form der Düse nicht sehr wichtig ist. Selbst eine scharfrandige Blende gibt dieselbe Brennfläche von fast vollkommener Kegelform. Es soll aber keineswegs behauptet werden, daß die hier gewählte Düse auch schon die geeignetste ist.

Diese aus Messing gedrehte Düse von 1 cm Öffnung wurde nun an einem 3 m langen, gezogenen Messingrohr von 4 cm Weite glatt angesetzt, durch das Luft aus einem Gasometer strömte.

¹ Es wurde ein Teclu-Brenner von $1\frac{1}{2}\text{ m}$ Höhe und 4 cm Weite verwendet, der oben eine Düse von 1 cm Durchmesser trug.

² Zeitschr. f. techn. Physik, 22, 29 (1941).

Dieses Gasometer von bis zu 300 l Inhalt war von der Fa. S. Elster in Wien für die Eichung von Gasuhren hergestellt worden. Der Auftrieb, den die Glocke beim Einsinken in das Wasser erfährt, wird durch das Gewicht einer über Räder laufenden Kette kompensiert, an der die Glocke hängt. Dadurch wird der Gasdruck konstant gehalten. Durch Auflegen von Gewichten auf die Glocke oder durch Anbringen von Gegengewichten am andern Ende der Kette kann er weitgehend verändert werden. Um die Füllung leicht vornehmen zu können und um bei größerer Entnahme genügend Luft zur Verfügung zu haben, wurde unter der Glocke ein zweites Rohr von 6 cm Weite eingeführt, an das die Druck-

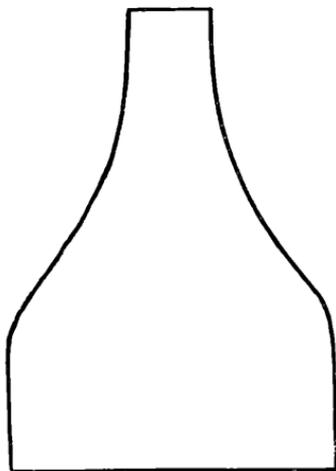


Fig. 1.

seite eines Staubsaugers angeschlossen war. So hätte bei 109 kg/m^2 Überdruck ein Verbrauch von 13·5 Litersekunden Luft noch dauernd gedeckt werden können.

Die Verbindung des Gasometers mit dem langen Messingrohr erfolgte durch einen 4 cm weiten Schlauch. Um Unregelmäßigkeiten in der Strömung zu beseitigen, ließ man die Luft zunächst beim Einlauf in das Rohr mehrere feinmaschige Drahtnetze passieren. Um die Ausbildung von Rotationen innerhalb des langen Rohres und damit ein Schiefwerden des Strahles zu verhindern, wurde außerdem ein 4 cm breiter und 1 m langer Streifen aus gewalztem Messingblech in die Mitte des Rohres eingesetzt.

Die Messung der Geschwindigkeit im Strahl erfolgte mittels eines Stauröhrchens aus Glas, das an der Spitze einen inneren

Durchmesser von 0.286 mm und einen äußeren von 0.620 mm besaß. Es war aus einem Glasrohr von 5.7 mm Weite konisch zu einer Länge von 77.5 mm ausgezogen und mit dem anderen, rechtwinkelig abgebogenen Ende in einem durchbohrten Messingblock eingesiegelt, dessen Bohrung mittels eingesetzter Schlaucholive und Gummischlauch zu einem Mikromanometer führte. Der Messingblock war in einem Reiter einer optischen Bank befestigt und konnte waagrecht und senkrecht mikrometrisch verschoben werden. So war es möglich, das Ende des Stauröhrchens an jede Stelle eines bestimmten Strömungsquerschnittes zu bringen, während die Verschiebung des Reiters auf der Bank das Einstellen verschiedener Querschnitte in wechselnder Entfernung vom Mündungsquerschnitt erlaubte. Da innerhalb des für die Messung in Frage kommenden Bereiches die Strömung parallel zur Rohrachse verläuft, konnte die Justierung des Stauröhrchens in die Stromrichtung leicht mittels eines Fernrohres vorgenommen werden.

Das auf dem Prinzip des Horizontalmanometers beruhende, mit Toluol gefüllte Mikromanometer gab bei empfindlichster Einstellung für $\frac{1}{50}\text{ mm}$ Wassersäule oder 1.96 Mikrobar einen Ausschlag von 1 mm .¹ Aus dem so gemessenen Staudruck p kann dann die an der Öffnung des Staurohres vorhandene Strömungsgeschwindigkeit u ohneweiters in cm/sec berechnet werden. Es ist nämlich außerhalb der Düse und bei den hier verwendeten Geschwindigkeiten der sonst am Staudruck noch abzuziehende statische Druck ganz zu vernachlässigen. Der Staudruck ist mit dem dynamischen

gleich und die Geschwindigkeit aus der Formel $p = \frac{1}{2} \rho u^2$ unmittelbar zu berechnen. Hierin bedeutet ρ die dem Barometerstand und der Temperatur entsprechende Luftdichte, wobei die Luft als mit Wasserdampf gesättigt angenommen wurde.

Die nebenstehenden Diagramme enthalten die hier interessierenden Meßergebnisse.

Fig. 2 gibt bei verschiedener aus dem durchströmenden Volumen berechenbarer mittlerer Geschwindigkeit \bar{u} die in der Achse der Düse in der Entfernung x vom Mündungsquerschnitt gemessene Strömungsgeschwindigkeit u . Hiernach bleibt die im

¹ Um die Variometereigenschaft, die ein solches Manometer bei Wind zeigt, auszuschalten, wurde die andere Seite des Manometers mit einer Glas-
kugel verbunden, die das gleiche Luftvolumen enthielt wie das Manometer
und durch ein dem Staurohr ähnliches Röhrchen mit der Atmosphäre in Ver-
bindung stand.

Mündungsquerschnitt der Düse vorhandene Geschwindigkeit in der Achse bis auf eine Entfernung von 5 bis 6 *cm* unverändert. Ein Steigern der Geschwindigkeit der Strömung auf das Mehrfache hat eher eine Verminderung, jedenfalls aber keine

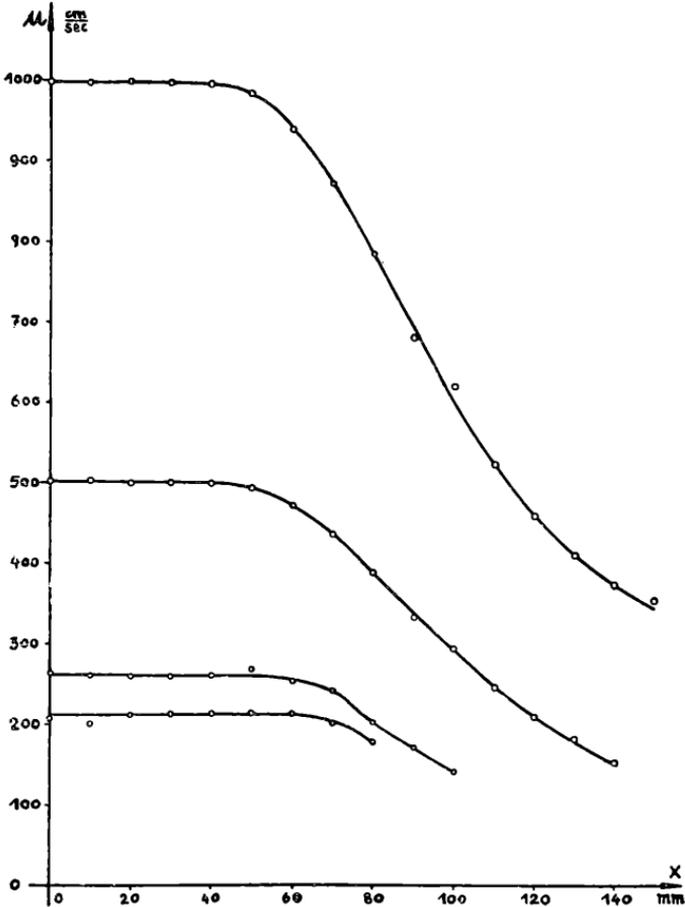


Fig. 2.

Vergrößerung dieser für die Düse kennzeichnenden Entfernung zur Folge.

Fig. 3 gibt für die Mündungsgeschwindigkeiten von zirka 2·5 und 10 *m/sec* die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt des Strahles und seine Umgebung für $x = 0, 2, 4$ und 6 *cm*. Wie man sieht, ist im Mündungsquerschnitt ($x = 0$) die Geschwindigkeit, vom

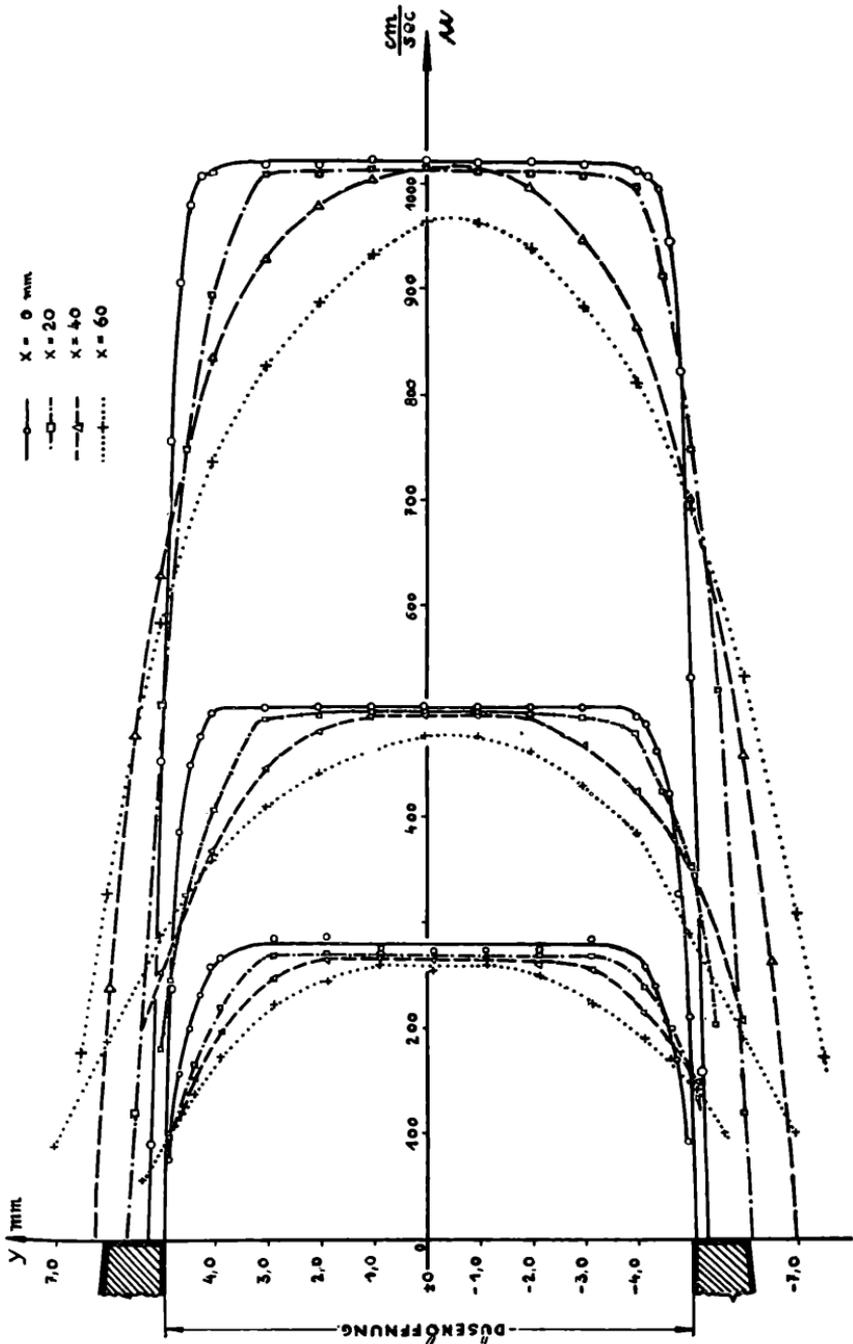


Fig. 3.

äußeren Rand abgesehen, überall die gleiche. Daß sie noch in 1 mm Entfernung vom Rand kleiner gemessen wird, entspricht nicht ganz der Wirklichkeit, sondern ist zum Teil auf das Staurohr zurückzuführen, das bei seinem äußeren Durchmesser von 0.62 mm in dieser Lage den Rand des Gasstrahls bereits störend beeinflusst. Ohne diese Störung würde der Geschwindigkeits-

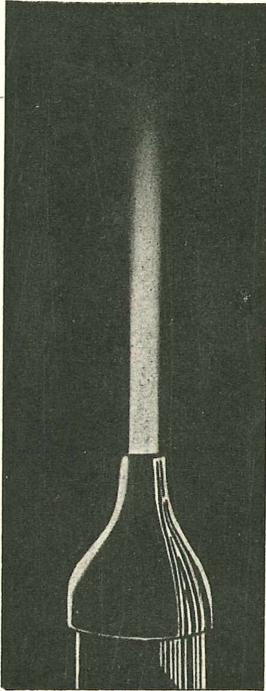


Fig. 4.

abfall am Rand sicher noch steiler sein. Daß dem so ist, ergibt sich aus der Form der Brennkegel auf der Düse und aus der Tatsache, daß die aus dem ausströmenden Volumen berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} sich mit der im übrigen Teil des Mündungsquerschnitts gemessenen auf etwa 8% deckt; es wäre denn, daß man annehmen wollte, daß in die obige zur Berechnung der Geschwindigkeit verwendeten Formel noch eine von Eins verschiedene Proportionalitätskonstante eingeht, wofür nach allen bisherigen Messungen bei laminarer Strömung kein Grund vorliegt.

Mit Entfernen von der Mündung beschränkt sich aber die homogene Strömung immer mehr und mehr auf den zentralen Teil des jeweiligen Querschnittes. In den peripheren Teilen sinkt die Strömung ab. Zugleich reißt der Strahl in mit der Entfernung wachsendem Maß die Außenluft mit, ohne aber hiebei, wie Versuche mit Tabakrauch zeigen, seine geschlossene Form zu verlieren (vgl. Fig. 4). Es ist daher anzunehmen, daß die Geschwindigkeitsverteilungskurven der Fig. 3 am Rand des Strahles eine Knickung aufweisen, diese Diskontinuitäten aber im steilen Abfall der Kurven nicht zum Ausdruck kommen. Es wäre vielmehr möglich, diese Geschwindigkeitsverteilungskurven durch eine Formel von der Art

$$u_r = u_{\max} \left[\left(1 - \frac{r}{R+c} \right)^n \right]$$

hinreichend darzustellen, wo R den Halbmesser der Düse, r den Abstand von der Achse, u_{\max} die Geschwindigkeit in der Achse,

endlich n und c Parameter bedeuten, die noch Funktionen des Abstandes x vom Mündungsquerschnitt sind.

Doch brauchen wir uns damit nicht zu beschäftigen. Hier genügt es auf Grund unserer Diagramme festzustellen, daß es hinter der Düse einen Raum von kegelähnlicher Form gibt, in dem die Strömungsgeschwindigkeit überall die gleiche ist. Der Mantel dieses Kegels ist etwas nach außen gewölbt und im innersten Kern in der Nähe des Mündungsquerschnittes kann die Strömungsgeschwindigkeit etwas höher liegen. Im übrigen ist aber dieser Raum mit homogener Strömung erfüllt, so daß die Brennofläche, wofern sie nur in ihn hineinfällt, die Form eines außer der Spitze vollkommenen Kegels annimmt. Da sich dieser Raum homogener Strömung in der Achse bei jeder Geschwindigkeit auf 5 bis 6 cm Entfernung erstreckt, darf also auch die Höhe des Brennkegels maximal nicht über 5·5 cm liegen. Nach der bekannten Beziehung, welche die Geschwindigkeit der Verbrennung mit der der Strömung und mit dem Öffnungswinkel des Brennkegels verknüpft, heißt das auch nichts anderes, als daß bei unserer Düse die Strömungsgeschwindigkeit die VG nicht mehr als elffach übertreffen darf.

In den im folgenden mitgeteilten Versuchen wurde geprüft, ob die obigen Feststellungen tatsächlich zu einer Vereinfachung und Verbesserung des Gouy'schen Verfahrens verwendet werden können. Die Vereinfachung ergibt sich daraus, daß man die Flamme nicht auf dem Rohr, sondern auf der Düse brennen läßt und so die VG (c) nicht als Quotienten aus der genau nur mühsam zu messenden Brennofläche F und dem Volumen V des verbrannten Gasgemisches bestimmt, sondern aus dem leicht und genau meßbaren Öffnungswinkel 2α des auf der Düse zu erhaltenden, fast vollkommenen Brennkegels. Bedeutet u die Geschwindigkeit des Gemisches im Raum homogener Strömung, so ist $c = u \sin \alpha$. Die Verbesserung aber besteht darin, daß auf diese Weise gewisse störende Einflüsse ausgeschaltet werden können, die am Fuß und an der Spitze der Brennkegel auftreten und beim üblichen Verfahren die VG zu niedrig messen lassen.

Diese Störungen betreffen einerseits den Fuß der Brennkegel, wo die Kühlung vom Rohrrand aus eine Erniedrigung der VG bewirkt. Diese Wirkung ist an sich auf dem Rohr stärker als auf der Düse; denn während die Brennofläche auf der Düse vom Rand aus steil emporsteigt, ist sie auf dem Rohr infolge der starken Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit in den äußeren Schichten nach unten konvex verbogen.

In Fig. 5 sind die Brennflächen einer Rohr- und einer Düsenflamme ein und desselben Gemisches bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit vergrößert dargestellt.

Eine zweite Störung betrifft die Spitze der Brennfläche, die immer abgerundet ist, vornehmlich deshalb, weil in den vorher knapp an den tieferen Teilen der Brennfläche vorbeistreichenden

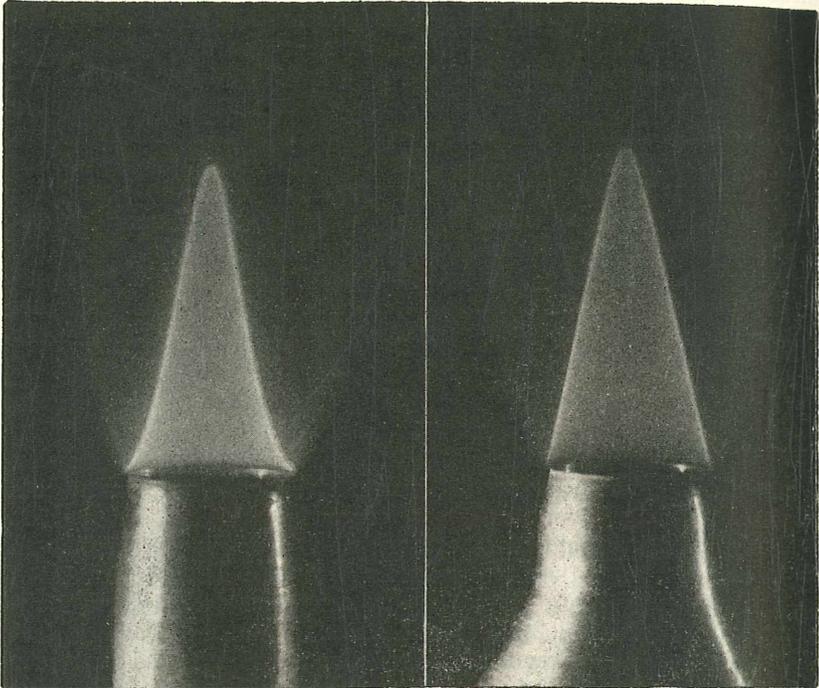


Fig. 5.

achsennahen Strömungsfäden die VG durch Vorwärmung erhöht erscheint. Für das übliche Gouy'sche Verfahren bedeutet allerdings diese zweite Störung, soweit sie durch die obige Erklärung voll erfaßt wird, keine Fehlerquelle; wird doch die in der Spitze auftretende Erhöhung der VG durch die Abnahme kompensiert, welche diese Größe an den Stellen erfahren muß, denen der zur Vorwärmung verwendete Wärmebetrag entzogen wurde.

Jedenfalls kann man aber beide Störungen an den Düsenflammen ganz einfach und sicher dadurch ausschalten, daß man

zur Bestimmung des Winkels α die Seiten des Kegels nur soweit benützt, als sie genau geradlinig erscheinen. Das war an unseren Aufnahmen stets zu mindesten acht Zehntel ihrer gesamten Länge der Fall. Der Anfang war durch die Wärmeabgabe an das Rohr und die doch auch schon im Mündungsquerschnitt am äußersten Rand bemerkbare Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit leicht gestört und das Ende durch die Krümmung an der Spitze unbrauchbar. Im übrigen erschienen aber die Seiten des Kegels auf den in vier- bis fünffacher linearer Vergrößerung hergestellten Photographien der Düsenflammen wie mit dem Lineal gezogen. So konnte der Öffnungswinkel sehr genau gemessen werden.

Dadurch, daß die Kegelseiten sich geradlinig erweisen, erscheint schließlich auch noch eine dritte Fehlerquelle ausgeschaltet, deren Einfluß sonst nur sehr schwer abzuschätzen wäre. Es betrifft dies die Deformation, welche die Brennfläche durch den Rückdruck der in ihr beschleunigten Flammengase und durch den Staudruck, den sie durch ihre Eigenschaften als Widerstand hervorruft, erleiden kann. Wie groß dieser Effekt unter Umständen ist, läßt sich an den verkehrt brennenden Kegeln beobachten, die knapp über oder an einem in der Rohrachse angebrachten Draht bei gasarmen Gemischen in Luft beobachtet werden.¹ Diese verkehrten Kegel werden infolge der Konvergenz der abströmenden Flammengase oft stark auseinandergedrückt, so daß die Kegelbasis den Mündungsquerschnitt besonders bei heißen Flammen beträchtlich übertrifft und aus dem Öffnungswinkel sich wesentlich zu hohe Werte der VG ergeben (vgl. Fig. 6, Fall *a*). Man darf also nicht übersehen, daß die Geschwindigkeitsverteilung im Gasstrahl, wie wir sie oben gemessen haben, doch nur für den ungezündeten Gasstrahl gilt und daß die Flamme rückwirkend diese Verteilung ganz wesentlich verändern kann.

Für den aufrechten Kegel ist aber eine solche Rückwirkung wegen der großen Querschnittsvermehrung, welche die von der Brennfläche hier divergent abströmenden Flammengase erfahren, nicht zu bemerken (vgl. Fig. 6, Fall *b*); denn man wird gewiß nicht annehmen wollen, daß einerseits eine Rückwirkung stattfindet, also die Parallelität der Strömung gestört wird, daß aber andererseits die Geschwindigkeiten in Größe und Richtung gerade so geändert werden, daß trotzdem das vom Brennerrand aufsteigende Flammenteilchen durch Übereinanderlagerung von Strömungs- und Verbrennungsgeschwindigkeit sich genau längs eines Kegelmantels bewegt.

¹ L. c., Fig. 13, 14 und 16.

Eine theoretische Behandlung des Problems auf hydrodynamischer Grundlage wäre gewiß erwünscht. Solange es aber nicht einmal gelungen ist, die Verteilung der Geschwindigkeit in einem laminar aus Rohr oder Düse strömenden Gasstrahl zu berechnen, muß es wohl aussichtslos erscheinen, den vorliegenden Fall theoretisch zu erfassen, in welchem diese Aufgabe durch Einschluß der Rückwirkungen der Flamme noch so ganz wesentlich erschwert ist. Man wird sich demnach auch weiterhin mit der experimentellen Klarstellung der hier herrschenden Strömungsverhältnisse begnügen müssen.

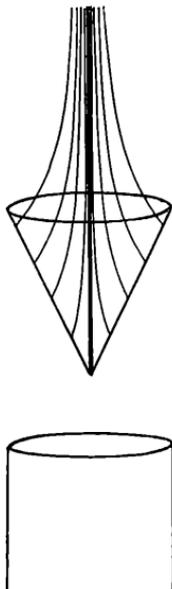


Fig. 6a.

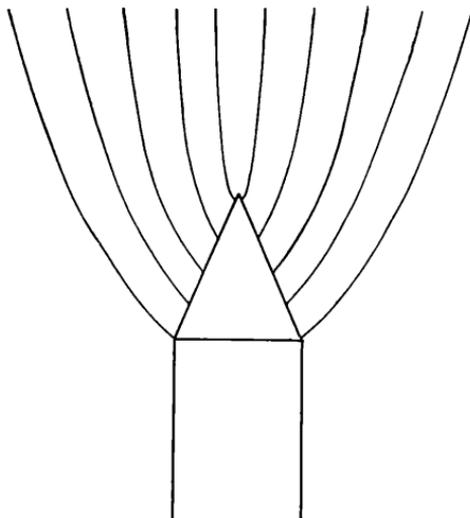


Fig. 6b.

In den im folgenden mitgeteilten Ergebnissen wurde die überhaupt zu erzielende Meßgenauigkeit noch nicht erreicht. Die Größe der Brennflächen an den Rohrflammen und der Öffnungswinkel der Kegel an den Düsenflammen konnte an Vergrößerungen der photographischen Flammenbilder recht genau ermittelt werden. Ein mit den Rohrflammen zugleich photographierter Maßstab sicherte das Größenverhältnis. Hingegen war es schwierig, das Mischungsverhältnis des Gasgemenges konstant zu halten, da an dem zweiten nur 48 l fassenden Gasometer, das das brennbare Gas enthielt, keine Kompensation für den beim Sinken der Glocke wachsenden Auftrieb vorgesehen war. Zwar wurde bei gleicher

Lage der Glocke immer über ein und dasselbe Intervall von 10 *cm* an einer in Millimeter geteilten Skala unter Verwendung einer stark vergrößernden Lupe gemessen und die Aufnahme der Flamme in der Mitte des Intervalls vorgenommen; doch war auch auf diese Art die Unvollkommenheit des Gerätes nicht ganz auszugleichen. Besonders ist aber noch hervorzuheben, daß bei den Messungen auf der Düse die Geschwindigkeit im Raume homogener Strömung mit der aus dem austretenden Gasvolumen ermittelten mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} einfach gleich gesetzt wurde, obwohl, wie wir schon früher bemerkt haben, \bar{u} hinter der im zentralen Teil des Mündungsquerschnittes gemessenen Strömungsgeschwindigkeit zurückbleibt. Doch ist anderseits die Strömungsgeschwindigkeit in den peripheren Teilen des Raumes homogener Strömung, in denen die Brennfläche tatsächlich emporsteigt, gegenüber der in den zentralen Teilen des Mündungsquerschnittes um etwas erniedrigt, so daß der begangene Fehler wenigstens zum Teil kompensiert wird.

Die ausströmenden Gasvolumina wurden unter der Annahme isothermer Ausdehnung aus den in den Gasometern gemessenen Überdrücken berechnet und alle auf den Druck von 750 *mm Hg* und auf 20° C reduziert. Die bei den Beobachtungen tatsächlich abgelesenen Barometerstände und Temperaturen sind gesondert vermerkt. Da als Sperrflüssigkeit in den Gasometern Wasser verwendet wurde, waren Luft und Gas feucht.

Die Messungen erstreckten sich auf Propan und auf Wiener Stadtgas. Das Propan, technisches „Leuna“-Propan, wurde einer größeren Vorratsflasche entnommen. Es war zu 95% rein; der Rest bestand aus Propylen, Normal- und Isobutan, Äthan, Äthylen und Butylen. Das Leuchtgas hatte die folgende mittlere Zusammensetzung:

CO ₂	2·4%
C _n H _m	1·9%
O ₂	0·5%
CO	12·4%
H ₂	44·3%
CH ₄	21·8%
N ₂	16·7%

Um vor Schwankungen in dieser Zusammensetzung frei zu sein, wurde auch eine Vorratsflasche verwendet, in der 4 *m*³ des Gases auf 40 *l* verdichtet waren.

Die Brennerrohre aus glatt gezogenem Messing hatten eine Länge von $1\frac{1}{2} m$. Das eine von $1 cm$ innerer Weite diente zur Erzeugung der Rohrflammen, also zur Messung der VG nach dem üblichen Gouy-Michelson'schen Verfahren. Es war am Ende zu einem scharfen Rand abgedreht. Das andere, auf dem die Düsenflammen erzeugt wurden, hatte einen inneren Durchmesser von $4 cm$, so daß die oben untersuchte Düse von $1 cm$ (genau $1.027 cm$) Weite auch darauf paßte.

Luft und Gas wurden in einer Mischkammer von $0.86 l$ Inhalt zusammengeführt und gingen von dort, um die Mischung recht vollkommen zu machen, durch ein mit feinen Drahtnetzen versehenes Labyrinth, ehe sie durch das Brennerrohr empor-

Tabelle I. Propan.

$$b = 747.0 mm \quad \vartheta = 20.3^\circ C$$

Rohr

Nr.	$n\%$	V cm^3/sec	F cm^2	$c = \frac{V}{F}$ cm/sec
1	5.63	162.1	8.82	18.4
2	5.49	161.9	7.95	20.4
3	5.13	161.3	6.19	26.1
4	4.95	160.9	5.71	28.2
5	4.77	160.8	5.26	30.6
6	4.64	160.6	5.02	32.0
7	4.39	160.1	4.88	32.8
8	4.29	159.9	5.01	31.9
9	4.06	159.6	5.13	31.1
10	3.92	159.2	5.26	30.3
Düse				
Nr.	$n\%$	\bar{u} cm/sec	$\sin \alpha$ —	$c = \bar{u} \sin \alpha$ cm/sec
13	5.78	195.3	0.0881	17.2
14	5.45	194.7	0.1188	23.1
15	5.14	193.8	0.1514	29.3
16	4.94	193.4	0.1635	31.7
17	4.73	193.3	0.1806	34.9
21	4.65	193.2	0.1840	35.4
18	4.52	192.9	0.1875	36.1
19	4.39	192.3	0.1892	36.4
20	4.27	192.2	0.1908	36.7

Tabelle II. Leuchtgas.

$$b = 750 \cdot 0 \text{ mm} \quad \vartheta = 22 \cdot 0^\circ \text{ C}$$

Rohr

Nr.	$n\%$	V cm^3/sec	F cm^2	$c = \frac{V}{F}$ cm/sec
23 L	29·9	214·4	11·13	19·3
22 L	28·3	209·8	7·25	28·9
24 L	27·7	210·2	6·57	32·0
25 L	26·4	206·3	4·88	42·2
26 L	25·6	203·5	4·20	48·4
27 L	24·3	199·8	3·75	53·2
28 L	23·3	196·8	3·55	55·4
29 L	22·4	194·3	3·54	54·7
30 L	21·0	193·3	3·73	51·8
31 L	19·7	190·2	4·03	47·2
32 L	18·9	188·9	4·31	43·8
33 L	18·1	187·0	4·87	38·4
34 L	17·1	185·2	5·37	34·5
35 L	15·6	182·9	6·71	27·2

$$b = 752 \cdot 5 \text{ mm} \quad \vartheta = 22 \cdot 0^\circ \text{ C}$$

Düse

Nr.	$n\%$	\bar{u} cm/sec	$\sin \alpha$ —	$c = \bar{u} \sin \alpha$ cm/sec
2 L	30·1	276·2	0·0774	21·4
3 L	29·0	272·3	0·0976	26·5
4 L	27·9	267·5	0·1352	36·2
5 L	26·2	261·5	0·1941	50·7
6 L	25·3	258·7	0·2153	55·6
7 L	24·6	256·0	0·2265	58·0
8 L	24·1	254·3	0·2307	58·6
9 L	23·0	251·3	0·2360	59·2
10 L	22·2	248·3	0·2280	56·6
11 L	21·0	244·5	0·2182	53·4
12 L	20·2	242·4	0·2039	49·4
13 L	19·8	240·6	0·2003	48·3
14 L	18·9	238·0	0·1808	43·1
16 L	17·7	234·6	0·1549	36·4
15 L	17·1	233·0	0·1423	33·2

stiegen. Außerdem war im weiten Rohr, das die Düse trug, auch hier in der Achse ein Blechstreifen eingesetzt, der eine Länge von $\frac{1}{2} m$ hatte. Er verhinderte das sonst leicht eintretende Schiefwerden des Kegels.

In den vorstehenden Tabellen sind in der ersten Spalte die Nummern des Beobachtungsprotokolls, in der zweiten die Mischungsverhältnisse ($n\%$) eingetragen, und zwar in üblicher Weise ausgedrückt durch den Prozentgehalt des brennbaren Gases im Gesamtvolumen des Gemisches. Die dritte Spalte enthält bei den Rohrflammen das reduzierte, in der Sekunde ausströmende Volumen V des Gemisches in cm^3/sec und die vierte die durch graphische Integration ermittelte Brennfläche F in cm^2 ; der in der fünften Spalte verzeichnete Quotient aus beiden Größen gibt also

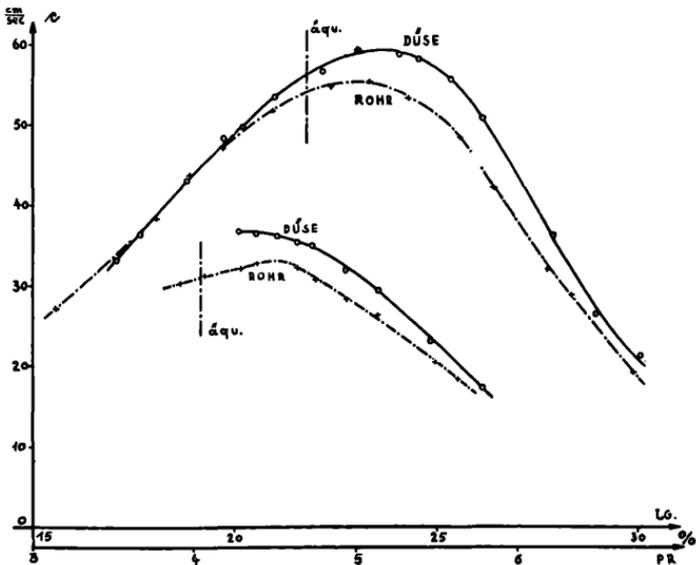


Fig. 7.

die gesuchte Verbrennungsgeschwindigkeit c in cm/sec . Bei den Düsenflammen enthält die dritte Spalte die aus V und dem Mündungsquerschnitt berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} in cm/sec , die vierte den Sinus des Winkels α und die fünfte wieder die VG aus $c = \bar{u} \sin \alpha$.

Da also bei den Düsenflammen zur Berechnung der VG nicht die im Gebiet der homogenen Strömung zu messende, sondern einfach die mittlere Strömungsgeschwindigkeit eingesetzt wurde, sind die so gefundenen Werte noch etwas zu klein, sicher aber nicht zu groß. Um so mehr muß es aber auffallen, daß die Düsenwerte, von den luftreichsten Leuchtgasflammen abgesehen, noch immer beträchtlich über den Werten liegen, die am Rohr gemessen

werden. Das läßt die graphische Darstellung der Meßergebnisse in Fig. 7 erkennen.¹ Man hat dieses Verhalten der kühlenden Wirkung des Brennerrohres zuzuschreiben, deren störender Einfluß bei dem Gouy'schen Verfahren voll zur Geltung kommt; besonders bei den heißen und niedrigen Flammen, wo dieser Wärmeverlust prozentuell mehr ausbleibt.

Man könnte vielleicht daran denken, daß die höhere VG, die man an den Düsenflammen mißt, auch damit zusammenhängt, daß sich bei ihnen der Gasstrahl erst in der Mündung bildet, während bei den Rohrflammen der Strahl schon auf dem langen Weg im Rohr vorgebildet wird. So könnte auf der Düse der allgemeinen laminaren Strömung noch eine feine Wirbelung oder Welligkeit überlagert sein, die im Rohr fehlt und welche die VG erhöht, ohne daß sie selbst sichtbar in Erscheinung tritt. Man müßte aber dann erwarten, daß eine Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit auch eine Erhöhung dieser Störung und eine weitere Vergrößerung der VG zur Folge hätte.

Das ist, wie die folgende Tabelle lehrt, nicht der Fall. Es wurden hier auf der Düse Flammen erzeugt, die bei fast gleichem

Tabelle III.

Propan

Nr.	$n\%$	\bar{u} cm/sec	$\sin \alpha$ —	$c = \bar{u} \sin \alpha$ cm/sec
19	4·39	192·3	0·1892	36·4
22	4·39	132·5	0·2760	36·6
23	5·36	283·3	0·0816	23·0
25	5·34	194·3	0·1176	22·8
24	5·33	140·3	0·1610	22·6

Leuchtgas

17 L	27·1	457·5	0·0972	44·3
19 L	27·1	227·0	0·2010	45·4
21 L	23·2	424·5	0·1342	57·1
9 L	23·0	251·3	0·2360	59·2
20 L	23·0	214·8	0·2810	60·3
36 L	17·2	344·6	0·1040	35·9
37 L	17·3	161·7	0·2245	36·3

¹ Propanflammen mit Luftüberschuß konnten auf der Düse nicht gebrannt werden, da sie sich von ihr abhoben.

Mischungsverhältnis sehr verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten aufwiesen. Es zeigte sich aber kein eindeutiges Verhalten. Die bei hoher Strömungsgeschwindigkeit gefundenen Werte sind bald kleiner, bald größer als diejenigen, die bei niedriger Strömungsgeschwindigkeit erhalten werden. Da sich zudem beim Herausgreifen von Einzelwerten, die so verschieden starker Strömung zugehören, die oben erwähnte Schwierigkeit des Festhaltens eines bestimmten Mischungsverhältnisses besonders bemerkbar machte, wird man dieses Ergebnis nur dahin deuten können, daß ein Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit, falls er überhaupt vorhanden ist, innerhalb der Versuchsfehler bleibt.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften
mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1941

Band/Volume: [150_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Mache Heinrich, Hebra Alexius

Artikel/Article: [Zur Messung der Verbrennungsgeschwindigkeit explosiver
Gasgemische. 157-174](#)