

Über den Druck in der Explosions- und Diffusionsflamme.

Von
H. Stampfer.

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien.

Mit 5 Abbildungen.

(Eingelangt am 16. Jan. 1952. Vorgelegt in der Sitzung am 17. Jan. 1952.)

Zwischen der VbG. (Verbrennungsgeschwindigkeit) c , der StrG. (Strömungsgeschwindigkeit) u und dem halben Öffnungswinkel α des Kegels einer Bunsenflamme besteht für den Fall, daß er ein geometrisch vollkommener Kegel ist (wie er z. B. infolge der Konstanz von u und c auf dem größten Teil des Kegelmantels über einer kreisrunden Düse beobachtet wird¹) (Abb. 1), die Beziehung

$$c = u \sin \alpha. \quad (\text{I})$$

Sie folgt entweder aus der Definition der VbG. als Quotient aus Gaskonsum V und Brennfläche F gemäß

$$c = \frac{V}{F} = \frac{r^2 \pi \cdot u}{\pi \cdot r \cdot s} = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot u}{r \cdot \pi \cdot r} \cdot \sin \alpha = u \cdot \sin \alpha$$

oder auch aus dem Geschwindigkeitsparallelogramm auf Grund folgender Überlegung:

Ein Flammenteilchen bei M bewegt sich auf dem einmal gebildeten Kegel mit der StrG. nach oben und infolge der Reaktion zugleich mit der VbG. nach innen. So läuft es längs der Diagonale des über u und c errichteten Parallelogramms mit der Geschwindigkeit $v = u \cdot \cos \alpha$ gegen die Kegelspitze S . Es besteht also die oben gegebene Beziehung. Auch die Stabilität der Bunsenflamme am Brenner wurde schon sehr bald aus der Annahme erklärt², daß Brenngas durch Diffusion aus dem Strahl in die umgebende Atmosphäre tritt und dadurch im Windschatten des Brennerrohres einige Zehntelmillimeter über ihm einen ringförmigen Zünd-

¹ H. Mache und A. Hebra, S.-B. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa 150, 157 (1941).

² H. Mache, Z. angew. Chem. 26, 167 (1913).

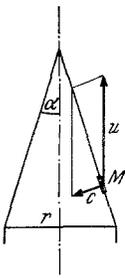


Abb. 1.

saum beliefert, von dem aus der Brennkegel emporsteigt. Da die Breite dieses Zündsaumes vom Durchmesser des Brenners wesentlich unabhängig ist, fällt er besonders bei engen Brennröhren auf. Seine auch bei Leuchtgasüberschuß hellblaue Färbung beweist, daß in ihm ein gasarmes Gemisch verbrennt. Im übrigen erscheint er als Fortsetzung des Kegelrandes. Es ist aber bekannt, daß auch Diffusionsflammen dünne Reaktionszonen bilden, deren Aussehen dem von Explosionsflammen ganz ähnlich ist³.

Der stabile Zündring erscheint also besonders bei wasserstoffhaltigen Gemischen durch Diffusion von Brenngas in die im Windschatten des Brennrandes befindliche Luft alimentiert. Außerdem tritt nach *Mache*⁴ noch eine zweite Kraft hinzu, und zwar der Rückdruck der beschleunigten Flammengase. Er bewirkt eine Stauung im Kegel und damit eine mechanische Zufuhr von noch unverbranntem Gemisch in den engen Spalt, der stets zwischen Zündring und Brennerende offen bleibt und der seine Entstehung der kühlenden bzw. sonst die Reaktion hemmenden Wirkung des Brennrandes verdankt.

Dieser Rückdruck des Flammengases ist gleich dem Druckabfall in der Brennfläche zu setzen⁵, nämlich

$$p' - p'' = \Delta p = \rho' c^2 \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right), \quad (\text{II})$$

wobei unter p' bzw. p'' der Druck im Brennkegel bzw. im Flammengas, unter ρ' bzw. ρ'' die entsprechenden Dichten und unter c die VbG. verstanden wird.

Der folgend beschriebene Versuch läßt den Einfluß der Flammengase auf die Erhaltung der Flamme am Brenner auf besonders einfache Weise erkennen:

Über dem Brenner einer Bunsenflamme justiert man mit gleicher Achse eine Düse (Abb. 2), die sich in vertikaler Richtung verschieben läßt. Zunächst bringt man die Düse in eine so hohe Stellung, daß sie die Flamme nicht stört und erzeugt auf dem Brennerrohr eine so gas-

³ Neuerdings entwickeln *v. Elbe* und *Mentser* aus Messungen des Strömungsverlaufes im Inneren der Bunsenflamme die Ansicht, daß knapp am Rande des Kegels ringsherum ein Kreis vorhanden ist, auf dem die Komponenten der StrG. und VbG. senkrecht zur Brennfläche genommen einander gleich sind (ähnlich wie das schon *L. Ubbelohde* behauptet hat) und daß dieser Kreis sich stabil erhält. Wird er von der Strömung gehoben, so überwiegt die VbG., wird er gesenkt, so überwiegt die StrG. Er kehrt daher in beiden Fällen an seinen Platz zurück. Natürlich würde dieser Kreis ebenso wie unser Zündring wirken, d. h. er würde — weil am tiefsten Punkt gelegen — wie eine jede stabile Zündstelle alle höher gelegenen Teile der Brennfläche erhalten können. (Vgl. *B. Lewis* u. *G. v. Elbe*: *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, New York, Acad. Press, 1951, S. 242.)

⁴ *H. Maché*, „Radex-Rundschau“ der Radentheimer Magnesit A. G., S. 199. 1949.

⁵ *F. A. Smith*, *Chem. Review* 21, 389 (1937).

arme Bunsenflamme, daß sie gerade noch am Rohrrand verbleibt. Bewegt man die Düse nun (wie gezeichnet) so weit nach unten, daß die Flamme in ihr brennt, so hebt sich die Flamme bei weiterem Drosseln der Gaszufuhr nicht ab, obwohl dies ohne Düse bei gleichem niedrigen MV. (Mischungsverhältnis) längst geschehen wäre. Andererseits braucht man die Düse nur nach aufwärts zu schieben, um bei bestimmter Stellung das Abheben der Flamme zu beobachten. Ist das eingetreten, so läßt sich die Flamme auch bei tiefster Stellung der Düse nicht wieder zünden.

Dieses Verhalten erklärt sich zwanglos daraus, daß die Flammgase zusätzliche Beschleunigungsarbeit leisten müssen, wenn sie durch die

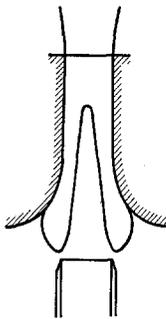


Abb. 2.

Düse gezwungen werden, mit größerer StrG. abzuströmen als bei der offenen brennenden Flamme. Dadurch wird die Stauung und der Druck innerhalb des Bunsenkegels, die diese zusätzliche Beschleunigung der Flammgase bedingten, weiter erhöht und die Zufuhr unverbrannten Gemisches durch den Spalt in den Zündring weiter gesteigert. Es kann sich daher eine Flamme am Brenner erhalten, die sich sonst bei dem gegebenen niedrigen MV. abheben würde.

Man könnte vielleicht meinen, daß das bessere Haften der Flamme durch eine Erhitzung des Brennerrohres durch Strahlung von der Düse her bedingt ist, da durch Vorwärmen des brennbaren Gemisches die VbG. erhöht wird. Es hat aber *F. A. Smith*⁵ gezeigt, daß bei Anheizen des Brenners die StrG. infolge der Volumausdehnung rascher zunimmt, als die VbG. durch die Temperatursteigerung wächst, so daß eine stabile Bunsenflamme mit steigender Temperatur in der Regel vom Brenner abgeblasen wird.

Was die Größe dieses Rückdruckes anlangt, der im unverbrannten Gemisch durch die Beschleunigung der Flammgase entsteht, so hat darüber *Mache*⁶ die ersten Messungen ausgeführt. Für Stadtgas-Luftgemische betrug er wenige Mikrobar (μb). Das angewandte Verfahren beruht auf der Annahme, daß p' den Druck darstellt, der auch im Ende des Brennerrohres herrscht, da der Druckgradient in der Achse sehr klein ist; weiters, daß p'' wesentlich mit dem Druck der umgebenden Atmosphäre übereinstimmt, so daß Δp einfach die Druckvermehrung bedeutet, die zwischen dem Gasgemisch im Brennerrohr und der äußeren Atmosphäre eintritt, wenn die Flamme gezündet wird. Man braucht also nur unter der Mündung des Brennerrohres ein Röhrchen senkrecht einzulöten und dieses mit einem entsprechend empfindlichen Manometer zu verbinden, um Δp aus der Druckvermehrung zu erhalten, die beim Zünden des Gemisches eintritt.

⁵ *H. Mache*, Die Physik der Verbrennungerscheinungen, S. 44. Leipzig: Veit u. Co. 1918.

Neuerdings haben *v. Elbe* und *Mentser*⁷ nach dem gleichen Verfahren für Azetylen-Sauerstoffgemische Werte erhalten, die wegen der großen VbG. und des hohen Dichtenverhältnisses ρ'/ρ'' über 5 cm WS. (Wassersäule) lagen, also bequem zu messen waren. Es wurden von ihnen mittels der gemessenen Werte von Δp und der thermodynamisch berechneten Dichtenverhältnisse ρ'/ρ'' aus der Gl. (II) Werte der VbG. (c) berechnet und mit denjenigen verglichen, die nach *Gouy-Michelson* als Quotient aus Gaskonsum und Brennfläche erhalten wurden. Man kann in der Übereinstimmung beider Wertereihen eine Bestätigung des Verfahrens erblicken.

In den im folgenden mitgeteilten Versuchen wurden schwach explosible Gemenge von Stadtgas und Luft bei geringer StrG. verwendet. Das Brennerrohr von 120 cm Länge hatte 0,976 cm Durchmesser. Da die Druckeffekte niedrig blieben, war es nötig, zu ihrer Messung besondere Sorgfalt aufzuwenden. Sie geschah an einem mit Toluol gefüllten, auf größte Empfindlichkeit gestellten Horizontalmanometer, das durch Anschluß an ein in mm WS. anzeigendes Manometer (Minimeter der Askania-Werke mit Spitzeneinstellung) auf $1/100$ mm WS. genau geeicht werden konnte. Das Ablesen der Verschiebung des Meniskus beim Zünden der Flamme erfolgte auf der Okularskala eines zur Kapillare parallel verschiebbaren Mikroskops. Besonders mußte aber die Variometereigenschaft des Horizontalmanometers durch zwei Ausgleichsgefäße von je 2 l Inhalt vor beiden Druckeingängen ausgeschaltet werden. Auf diese Weise gelang es, besonders zu Zeiten geringen Straßenverkehrs, das Manometer zu sehr ruhigen Arbeiten zu bringen, so daß Druckänderungen von $1/10$ Mikrobar noch gut abgelesen werden konnten.

Für die Versuche wurde Wiener Stadtgas mit Luft gemischt verwendet, wobei aber die häufige Änderung der Zusammensetzung des Stadtgases zu beachten war. Für die wesentlichen Versuchsreihen, die jeweils an ein und demselben Tage durchgeführt wurden, hat die bei Herrn Prof. Dr. *H. Hiller* in dankenswerter Weise durchgeführte Analyse des verwendeten Gases folgende Zusammensetzung in Volumprozenten ergeben:

	CO ₂	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
%	3,1	1,5	0,9	11,4	27,2	26,2	29,7

was einem stöchiometrischen Verhältnis von etwa 20,8% entspricht. Luft wie Gas wurden hierbei größeren Kubizierapparaten entnommen, in deren Auslauf ein Rotameter bzw. eine Gasuhr (mit Wasser als Sperrflüssigkeit) eingeschaltet waren, so daß sich gewünschte Werte von StrG. oder MV. unschwer einstellen ließen.

Zunächst wurde noch die VbG. des verwendeten Gases in ihrer Abhängigkeit von MV. nach der Düsenmethode¹ ausgemessen und folgende Werte erhalten:

VbG. des Wiener Stadtgases am 10. April 1949:

MV. %	17,8	18,9	19,8	20,8	21,9	22,9	23,9	24,9	25,9	27,0	28,0	29,1
c cm/s	33,8	39,1	42,8	45,5	47,6	47,7	47,3	44,0	38,2	28,7	22,4	17,6

Das Maximum lag bei 22,9%, also über dem stöchiometrischen Verhältnis.

⁷ *G. v. Elbe* und *M. Mentser*, J. chem. Physics **13**, 89 (1945).

Nach Gl. (II) sollte der Rückdruck Δp von der VbG. (c) und dem Quotienten ϱ'/ϱ'' abhängen, also wesentlich nur vom MV. n und nicht von der StrG. u . Es wurden darum für mehrere bestimmte MV. eine Reihe von Werten des Δp bei verschiedener StrG. gemessen, wie dies für $n = 24,3\%$ in Abb. 3 dargestellt ist (allerdings hier für ein Gas

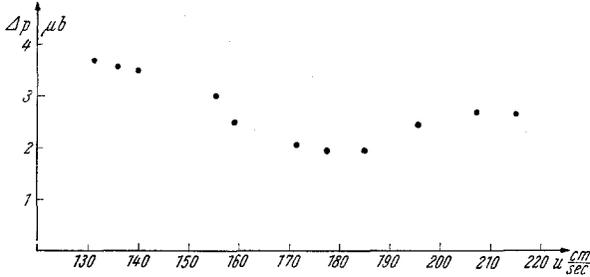


Abb. 3.

etwas anderer Zusammensetzung). Das Ergebnis entspricht nicht ganz der Erwartung. Wohl zeigen die Meßwerte keine eindeutig steigende oder fallende Tendenz mit der StrG., doch weisen sie auch bei allen anderen MV. für mittlere StrG. ein Minimum auf. Dieses Minimum rückt bei gasarmen Flammen mit sinkendem, bei gasreichen dagegen

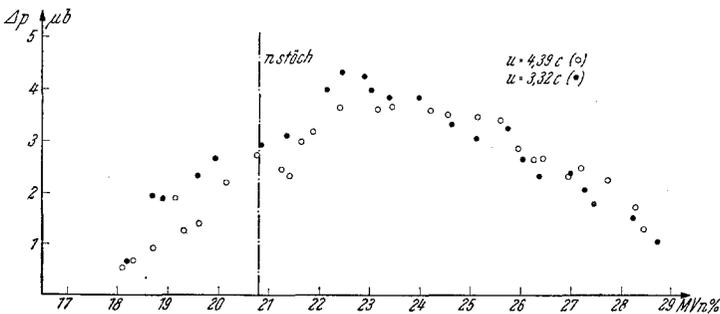


Abb. 4.

mit steigendem MV., also allgemein mit kleiner werdender VbG. nach links, das heißt in das Gebiet kleinerer StrG.

Es war dieses Verhalten, das den Gedanken nahebrachte, die fundamentale Abhängigkeit des Rückdruckes von dem MV. nicht an beliebigen Flammen, sondern an solchen gleicher Kegelhöhe zu studieren und damit zu erreichen, daß bei gleicher Form der Brennflächen auch die Strömungsverhältnisse und damit etwa verbundene andere sekundäre Einflüsse die Meßergebnisse in ähnlicher Weise beeinflussen. Abb. 4 gibt den Zusammenhang zwischen Δp und n für zwei Meßreihen (○ und ●).

In der einen wurde $u = 4,39 c$, in der anderen $u = 3,32 c$ gewählt. Vollkommene Kegelform vorausgesetzt, entspricht das nach Gl. (I) den Werten von $\alpha = 13^\circ 10'$ bzw. $17^\circ 30'$ und bei dem Rohrdurchmesser 0,976 cm einer Kegelhöhe von 2,09 bzw. 1,55 cm. Man sieht, daß der Höchstwert des Druckes in der hier untersuchten Explosionsflamme bei einem MV. von 22 bis 23% liegt, also in der Nähe des Gemisches maximaler VbG. und nicht beim stöchiometrischen MV. Auch Azetylen-Sauerstoffgemische zeigen nach den oben erwähnten Messungen von *Elbe* und *Mentser*⁷ ein ähnliches Verhalten.

Nicht nur in den Flammen vorgemischter Gase, sondern auch in den Diffusionsflammen, wie sie jedes ausströmende Brenngas bei Zündung

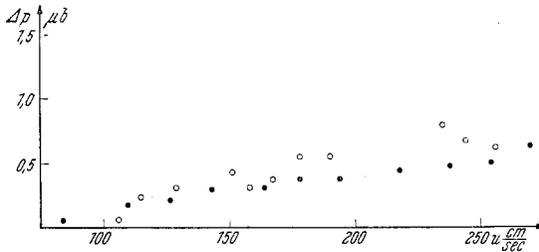


Abb. 5.

in Luft bildet, muß die Reaktionszone, falls sie auf der Brennermündung sitzt, von dort aus von einem Zündring aufsteigen. Dieser Zündring bildet sich auch hier hauptsächlich durch Diffusion im Windschatten des Brennerrohres als ein hellblau leuchtender Saum und hebt sich bei wasserstoffhaltigem Brenngas nur bei hoher StrG. ab. Es kann dann erst weit über dem Rohr zu einer turbulenten Verbrennung kommen. Aber auch hier wird außer der Diffusion noch ein im ausströmenden Strahl entwickelter Staudruck zur Alimentierung des Zündsaumes beitragen, wenn auch in weit geringerem Maß.

Daß ein solcher Staudruck vorhanden ist, läßt sich ebenfalls durch einen einfachen Versuch demonstrieren, den *Mache*⁵ schon mitgeteilt hat. Ein Rohr mit senkrecht angelötetem Röhrechen wird von Brenngas durchströmt und zunächst nur das aus dem Röhrechen austretende Gas gezündet, worauf man das Flämmchen durch Drosselung der Strömung fast zum Erlöschen bringt. Zündet man aber jetzt auch auf dem weiten Rohr, so wird das Flämmchen wieder größer. Die Beschleunigung, die die Verbrennungsprodukte in der Reaktionszone bei ihrer thermischen Expansion erfahren, muß auch hier aus einer Drucksteigerung im noch unverbrannten Gas bestritten werden. Diese Drucksteigerung kann natürlich nach dem gleichen Verfahren gemessen werden, wie bei der Explosionsflamme; nur erreichte sie bei Verwendung des gleichen Brenner-

rohres und von Stadtgas erst bei einer StrG. über 1 m/s und Flammenlängen über 30 cm Beträge, welche eine hinreichende Anzeige am Horizontalmanometer ergaben. Abb. 5 zeigt zwei Meßreihen (○ und ●) ausgewertet, die an zwei verschiedenen Tagen aufgenommen wurden. Man sieht, daß die Effekte sehr klein sind, wenn sie auch mit der StrG. steigen. Wegen der großen Beweglichkeit der Gase scheint eine Wirkung dieser kleinsten Druckunterschiede aber trotzdem möglich.