

Die Entzündung gasförmiger, flüssiger und fester Brennstoffe in Luft.

Von

H. Mache, w. M. d. österr. Akad. d. Wiss.

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien.

Mit 15 Abbildungen.

(Eingelangt am 28. Okt. 1948. Vorgelegt in der Sitzung am 4. Nov. 1948).

Mit Entzündung bezeichnen wir, dem Sprachgebrauch folgend, das Fortschreiten der Flamme über die Oberfläche eines Brennstoffes, wobei dieser gasförmig, flüssig oder fest, in Ruhe oder in Bewegung sein kann. Handelt es sich hierbei um eine unter Flammenbildung vor sich gehende Oxydation, so ist weiters zwischen dem Fall zu unterscheiden, daß der Brennstoff selbst schon genug Sauerstoff enthält — wie entsprechend vorgemischte Gasgemenge oder Explosivstoffe — und dem Fall, daß der zur Verbrennung nötige Sauerstoff zum großen oder größten Teil erst der umgebenden Atmosphäre entnommen werden muß. Besonders im letzteren Fall wird dann auch der Bewegungszustand dieser Atmosphäre bestimmend sein, jedoch um so schwerer in Rechnung gezogen werden können, als auch die von der Flamme selbst aufsteigenden gasförmigen Verbrennungsprodukte (Flammengase) solche Bewegungen in der umgebenden Luft veranlassen. Einer allgemeinen Behandlung weitaus am hinderlichsten ist aber die konvektive Fortleitung der Entzündung, wie sie durch eben diese aufsteigenden Flammengase eintritt, falls Brennstoff auch oberhalb der schon entwickelten Flamme vorhanden ist. Nur für den Fall, daß die Entzündung wesentlich nach unten verläuft, kann man hoffen, auch bei freier Verbrennung zu Ergebnissen von allgemeinerer Bedeutung zu gelangen.

Im folgenden werden einige Beispiele geregelter Entzündung gegeben, die zwar den Problemen der Praxis noch recht ferne stehen, möglicherweise aber doch den Weg zu einer theoretischen Behandlung dieser verwickelten Erscheinungen zu weisen vermögen.

Läßt man den Strahl eines brennbaren Gasgemisches aus einer glatten Düse ausströmen, so ist er von einem mit der Entfernung von der Mündung an Dicke wachsenden Mantel umgeben, in dem sich das Gemisch mit der umgebenden Luft durch Diffusion vermengt. Genähert kann man

hierbei mit $Jost^1$ das mittlere Quadrat der radialen Verschiebung der Moleküle mit $\overline{x^2} = 2 D t$ annehmen, wo D den Diffusionskoeffizienten bezeichnet und t die Zeit, die seit dem Austritt aus der Düse verflissen ist. Um $\sqrt{\overline{x^2}}$ ist schätzungsweise in der Höhe y (im Querschnitt $m n$, Abb. 1) das Gas in die Luft bzw. die Luft in das Gas eingedrungen. Hierbei ist $t = \frac{y}{U}$, wo U die Strömungsgeschwindigkeit (StrG) des Gasstrahls bedeutet. Von ihr setzen wir voraus, daß sie in der Düsenmündung über den ganzen Querschnitt des Strahles gleich groß ist und sich auch oberhalb der Düse in den achsennahen Teilen durch eine Strecke, die das Mehrfache des Durchmessers beträgt, nicht verändert. Das wurde durch Messungen mit dem Staurohr sichergestellt.² Ist unter Abb. 1 der Schnitt $m n$ in der Aufsicht dargestellt, so wird in a das aus der Düse strömende Gemisch und in b reine Luft vorhanden sein, während sich zwischen a und b alle Mischungsverhältnisse (MischV) vorfinden, die zwischen dem MischV des Gemisches und der reinen Luft gelegen sind. Zugleich sinkt auch die StrG vom Wert U des Gasstrahls auf den niedrigen Wert, mit dem die umgebende Luft infolge Reibung mitgeführt wird. Zwischen a und b liegen alle Übergangswerte der Konzentration und StrG. Hierbei wächst aber die letztere von außen nach innen weit rascher an, als in dieser Richtung die Verbrennungsgeschwindigkeit (VbrG) infolge der steigenden Konzentration zunimmt. Es ist z. B. die maximale VbrG eines Leuchtgas-Luft-Gemisches nur etwa doppelt so groß, als sie in der Nähe der unteren Zündgrenze gemessen wird, während die StrG von b bis a mindestens auf das Zehnfache ansteigt. Das ist zum Verständnis des Folgenden festzuhalten.

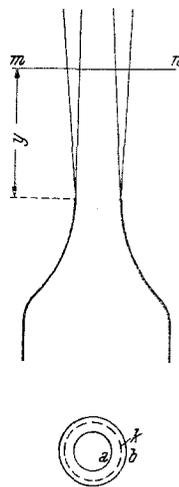


Abb. 1. Diffusion eines Gasstrahles mit der umgebenden Luft.

Nehmen wir zunächst an, daß das Gemisch so gasarm ist, daß sich noch kein auf der Düsenmündung sitzender Brennekegel erhalten läßt. Er kann dann noch immer mittels einer eigenen Zündflamme gebrannt werden. Ein solches kleines Zündflämmchen sei bei z in den Diffusionsmantel gebracht (Abb. 2). Es wird dann zwischen a und b einen Kreis k geben, auf welchem das MischV gerade dem an der unteren Zündgrenze vorhandenen entspricht. Von dort bis a bildet sich dann eine Brennfläche aus, die in der Strömung um so steiler steht, je näher sie a liegt,

¹ *W. Jost*, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, S. 210. Berlin: Springer-Verlag. 1939.

² *H. Mache* und *A. Hebra*, S.-B. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa 150, 163 (1941).

da, wie eben gesagt wurde, die StrG von außen nach innen weit rascher wächst als die VbrG. Von a nach innen zu bleiben aber StrG und VbrG konstant. Es bildet sich von dort an ein Kegel bestimmter Neigung, der je nach der Geschwindigkeit U des Gasstrahls eine größere oder geringere Höhe erreicht und auf der Seite der Zündflamme tiefer ansetzt als auf der gegenüberliegenden. Außerhalb k biegt sich schließlich der zerfranste Rand der erst bei k beginnenden normalen Brennfläche ringsherum nach oben (vgl. Abb. 5). Dieser schwach leuchtende Teil entsteht wie die Spitzen (Hauben), die sich nach *Davy* über einer Flamme bilden,

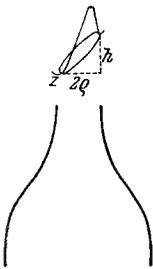


Abb. 2. Schiefer Kegel bei einseitiger Zündung.

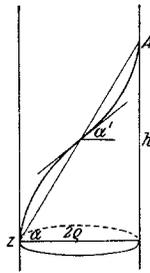


Abb. 3. Ausbreitung der Entzündung von einer Zündstelle über die Oberfläche des Strahles.

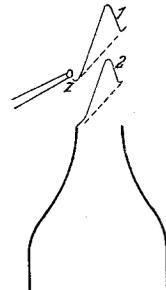


Abb. 4. Labile Zustände des schiefen Brennkegels.

wenn die umgebende Atmosphäre brennbares Gas, aber in so geringer Konzentration enthält, daß es nicht mehr zur Ausbildung einer normalen Brennfläche kommt.

Daß der untere Rand des Kegels schief im Strahl steht, erklärt sich aus der Übereinanderlagerung von Verbrennung und Entzündung. Das in z gebildete Flammenteilchen führt einerseits die Verbrennung radial in das Innere des Gasstrahls weiter, wobei die Geschwindigkeit dieser Verbrennung von k bis a wächst und von da ab konstant bleibt; andererseits breitet sich aber die Flamme auch als Entzündung über die Oberfläche des Gasstrahls aus, wobei sie in der Gasschicht bleibt, in welcher das der unteren Zündgrenze entsprechende MischV herrscht, also die selbständige Brennbarkeit einsetzt. Man wird annehmen dürfen, daß die Geschwindigkeit dieser Ausbreitung hier nicht wesentlich von der VbrG abweicht, die das brennbare Gas an seiner unteren Zündgrenze aufweist. Wir bezeichnen diese Entzündungsgeschwindigkeit (EntzG) mit C' , während U' die StrG bedeuten soll, die im Kreis k vorhanden ist. Während dann die Entzündung auf k die halbe Peripherie $\varrho\pi$ des Zylinders zurücklegt (Abb. 3), wird sie zugleich von der dort vorhandenen Strömung um die Strecke h gehoben, so daß $\frac{\varrho\pi}{h} = \frac{C'}{U'}$ oder

$\frac{U'}{C'} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{h}{2\rho} = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \alpha$ ist, wo α den Winkel bezeichnet, den die Gerade zA mit dem Horizont einschließt. Dieser Winkel wird mit wachsendem Gasgehalt des Gemisches rasch kleiner, da der Kreis k , in dem das MischV der unteren Zündgrenze erreicht wird, an eine Stelle rückt, wo U kleinere Werte aufweist. Für $\alpha = 57\frac{1}{2}^\circ$, wo $C' = U'$ wird, muß der Kegelrand im labilen Gleichgewicht sein und die geringste weitere Gaszufuhr ein Herablaufen der Entzündung bis in die unmittelbare Nähe der Düsenmündung veranlassen.

Die Basis des Brennkegels wird hierbei nicht von einer Ellipse gebildet, sondern von zwei um je die Hälfte des Zylinderumfanges entwickelte Schraubenlinien, die

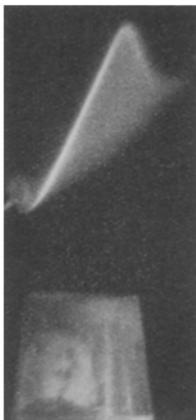


Abb. 5.

von der Zündstelle nach rechts und links ausgehen und sich, um h gehoben, gegenüber in A wieder treffen. Bringt man die beiden Hälften in Parallelprojektion zur Deckung, so ergibt sich also eine Sinuslinie wie in Abb. 3. Im tatsächlichen Flammenbild (Abb. 5) werden aber in der Regel weder die Kerbe bei z , noch die Spitze bei A deutlich wahrgenommen und die Basis als eine Ebene aufgefaßt, die den Strahl unter dem Steigungswinkel α' der Spirale schneidet. Im Gleichgewichtsfall ist wegen $\operatorname{tg} \alpha' = \frac{h}{\rho\pi} = \frac{U'}{C'}$ dieser Winkel $\alpha' = 45^\circ$.

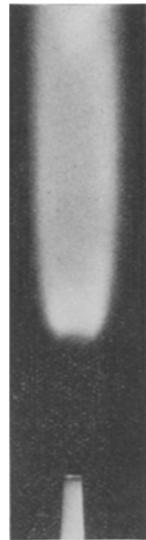


Abb. 6.

Bringt man also das Zündflämmchen z etwa 1 cm über der gleich-

weiten Düse an, so bildet sich bei entsprechender Einstellung des MischV der schiefe Kegel bald knapp unter z (Abb. 4, Lage 1), bald knapp über dem Düsenrand (Lage 2), wobei der kleinste auf- oder abwärts gerichtete Luftzug den Übergang von der einen in die andere Lage veranlassen kann. In der Tat liegt für diesen Fall des Gleichgewichtes der Winkel, den die Kegelbasis mit dem Horizont einschließt, bei 45° .

Steigert man den Gasgehalt des Gemisches nur wenig, so wird an den Strömungsverhältnissen im Strahl und seiner Umgebung nicht viel geändert. Doch rückt jetzt die Stelle, an der das MischV der unteren Zündgrenze erreicht wird, weiter nach außen. Der Kreis k kommt an eine Stelle kleinerer StrG zu liegen und die Entzündung läuft mit der Geschwindigkeit $C' - U'$ auf den Brennerrand herab. Die Zündflamme wird entbehrlich. Man muß U erhöhen, um den oben geschilderten Gleichgewichtszustand wieder herzustellen.

Enthält schließlich der Strahl überhaupt keine Luft, sondern nur brennbares Gas, so finden sich in der Diffusionsschicht alle MischV zwischen Null und 100% vor; der Kreis k rückt noch weiter hinaus, so daß U recht groß gemacht werden muß, um den labilen Zustand zu erhalten. Man wird für diesen Fall den Durchmesser der Düse herabsetzen müssen, um die „Abblasegeschwindigkeit“ zu erreichen. So wurde statt der Düse ein entsprechend ausgezogenes Glasrohr verwendet, dessen Mündung nur 1 mm Weite besaß. Wählt man dann ein schweres Gas, wie Propan, so kann man es in größerer Entfernung über der Düse zünden und verbrennen, ohne daß der Gasstrahl selbst sich entzündet (Abb. 6). In dieser Höhe hat sich nämlich der Strahl bereits in Wirbel aufgelöst und mit der umgebenden Luft gemischt, so daß eine turbulente, brausende und sich selbst erhaltende Flamme entstanden

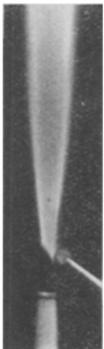


Abb. 7.

ist. Bringt man aber, ohne die StrG zu ändern, der Düse näher ein Zündflämmchen an (Abb. 7), so entzündet sich darüber der Strahl und bildet eine ruhige Flamme nach Art einer in die Länge ausgezogenen Kerzenflamme. Jetzt verbrennt das Gas, ehe es in die grob turbulente Zone gelangt. Wieder schneidet die Basis der Flamme den Strahl schräge und schließt die so entstehende ellipsenähnliche Schnittfläche mit dem Horizont einen Winkel ein, der um so größer ist, je schneller das Gas strömt. Nach unten pflanzt sich aber die Entzündung wieder erst dann fort, wenn man die StrG so weit herabgesetzt hat, daß der Winkel 45° unterschreitet.

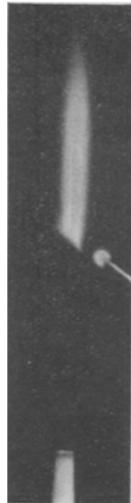


Abb. 8.

Ist das aber einmal eingetreten, so sitzt die Flamme auf der Düsenmündung fest und hebt sich auch nicht ab, wenn man die StrG auf höhere Werte zurückbringt. Es hat sich jetzt durch Diffusion und durch den unter der Flamme gegen die Umgebung etwas gesteigerten Druck um die Mündung ein Ring brennenden Gases gebildet, der, vor der Strömung geschützt, als Zündflamme wirkt.

Etwas anders verläuft der Versuch, wenn man statt Propan das stark diffundierende Leuchtgas wählt. Hier bleibt, wenigstens zeitweise, die Strömung über der Düse auch in großer Höhe laminar. Wenn man dort das Zündflämmchen anbringt, erhält man die in Abb. 8 wiedergegebene Erscheinung. Aber in größerer Tiefe, also der Düse näher, läßt sich diese Flammenform mit Leuchtgas nicht beobachten, da die Entzündung sofort auf die Düsenmündung herabläuft. Hier sitzt die Flamme sehr fest, da wegen des hohen Diffusionsvermögens von Leucht-

gas der um die Düsenmündung entstehende Zündring besonders gut ausgebildet ist.

Versuche über die Entzündung brennbarer Flüssigkeiten wurden bereits vor längerer Zeit beschrieben und über die Ergebnisse, soweit sie ruhende Flüssigkeiten betrafen, hinlänglich berichtet.³ Hiernach sind drei Arten der Ausbreitung einer Entzündung über die Oberfläche von Flüssigkeiten zu unterscheiden:

1. *Art.* Die der Oberfläche anliegende Gasschicht, die zwar immer mit dem Dampf der Flüssigkeit gesättigt erscheint, ist bei der herrschenden Temperatur noch gar nicht brennbar. Erst die Zündflamme erzeugt von ihrem Fuß aus durch Wärmeleitung, Strahlung und Eindiffundieren des eigenen Brennstoffes das brennbare Gemisch. Diese Art Zündung, wie sie bei festen Brennstoffen die Regel ist, tritt bei Flüssigkeiten nur dann ein, wenn sie am Docht brennen, also durch Strömen der Erhitzung nicht ausweichen können. So lassen sich z. B. Nitrobenzol, Tetralin, Dekalin, Amylacetat oder Petroleum zwischen 0 und 20° ohne Docht überhaupt nicht entzünden, da die zur genügenden Dampfentwicklung nötige Erhitzung der Flüssigkeitsoberfläche durch Strömungen verhindert wird.

2. *Art.* Die der Oberfläche unmittelbar anliegende Luft-Dampf-Schicht besteht bereits aus einem brennbaren Gemisch, das heißt das MischV übersteigt in ihr die untere Zündgrenze. Die Flüssigkeit ist dann ohne Docht zündbar, aber ihre EntzG in hohem Maße von der Temperatur der Flüssigkeitsoberfläche abhängig. Sie steigt mit dieser Temperatur zuerst sehr rasch, dann langsamer und bleibt schließlich nahezu konstant, wenn das Gemisch auf der Oberfläche im Dampfgehalt die Zusammensetzung übertrifft, welche der maximalen VbrG entspricht. So verhalten sich z. B. Toluol und Alkohol.

3. *Art.* Bei sehr flüchtigen Brennstoffen, wie Äther, Benzol, Azeton oder Pentan, enthält das Gemisch an der Flüssigkeitsoberfläche auch schon bei niedrigen Temperaturen Brennstoffdampf im Überschuß. Darüber befinden sich Gasschichten, die durch Diffusion zwischen Dampf und Luft rasch dampfärmer werden. Die Entzündung wird in derjenigen Schicht voreilen, in der das MischV der maximalen VbrG entspricht. Steigert man die Temperatur, so liegt diese Schicht etwas höher; aber die EntzG erhöht sich nur in dem geringen Ausmaß, in welchem die VbrG mit der Anfangstemperatur wächst und vor allem mit dem Abheben der Flamme von der Flüssigkeit die Verzögerung kleiner wird, die das Ausbreiten der Entzündung durch die kühlende oder anderweitig hemmende Wirkung der Flüssigkeitsoberfläche erfährt. Erst

³ H. Mache, S.-B. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa 137, 455 (1928).

wenn die Flüssigkeit siedet und der Dampf zu strömen beginnt, wird der Diffusionsvorgang völlig zerstört.

Natürlich besteht im Fall 2 und 3 zwischen der EntzG einer in Luft brennbaren, ruhenden Flüssigkeit und der VbrG in den betreffenden Luft-Dampf-Gemischen nach dem Obigen ein enger Zusammenhang. Doch sind für beide Vorgänge außer den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Brennstoffes und dem MischV auch noch die äußeren Umstände maßgebend; für die Entzündung noch weit mehr als für die Verbrennung, so daß quantitativ eine nur beiläufige Übereinstimmung erwartet werden kann. Grundsätzlich sollte die EntzG die Größe der VbrG des betreffenden Luft-Dampf-Gemisches erreichen und wäre im besonderen für flüchtige Brennstoffe, die sich nach dritter Art entzünden, ein Wert möglich, der der maximalen VbrG entspricht.

Vergleichen wir die l. c. für Azeton, Pentan, Äthyläther und Benzol gegebenen Höchstwerte der EntzG, die natürlich relativ zum Verbrennungsprodukt gemessen werden, mit den Höchstwerten der VbrG, die sich, wie üblich, auf das unverbrannte Gasgemisch beziehen und von *E. Hartmann*⁴ stammen, so ergibt sich zunächst die gleiche Reihenfolge:

Tabelle I.

	Azeton	Pentan	Äther	Benzol
EntzG m/s	1,17	1,31	1,46	1,52
VbrG m/s	0,316	0,350	0,376	0,384
EntzG/VbrG	3,70	3,74	3,88	3,96

Vergleichbar sind diese Werte aber erst, wenn man die VbrG mit dem Verhältnis multipliziert hat, das zwischen der Dichte des unverbrannten Gemisches und der des Verbrennungsproduktes (gemessen bei Flammentemperatur) besteht. Für Benzol findet man z. B. dieses Verhältnis aus der Verbrennungswärme, den Molwärmern von CO₂, H₂O und N₂ und der daraus berechneten Verbrennungstemperatur zu 9,0, was für die auf das Verbrennungsprodukt bezogene VbrG den Höchstwert 3,47 m/s ergäbe. Es könnte somit die EntzG mehr als doppelt so groß sein, als sie beobachtet wird. Daß sie es nicht ist, hat seinen Hauptgrund in der Hemmung, welche die vom Rand der Flamme in dünner Schicht fortschreitende Entzündung durch die Umgebung erfährt. So kann man auch in einem kalten Glasrohr von 5 mm Durchmesser für Leuchtgas-Luft-Gemische Werte der VbrG beobachten, die weit unter der Hälfte des Wertes liegen, der an dem über dem Rohr brennenden Bunsenkegel gemessen wird.

Anders als auf einer ruhenden Flüssigkeit schreitet die Entzündung

⁴ Dissertation Karlsruhe 1931, auch *W. Jost*, l. c. S. 71.

auf der Oberfläche eines Flüssigkeitsstrahles weiter. Für diese Beobachtungen wurde ein mit $\frac{1}{2}$ l der brennbaren Flüssigkeit gefülltes Gefäß durch einen Schlauch entleert, der in ein horizontal gelegtes Messingrohr ausging, das in einer glatten Düse von 1 mm Durchmesser endigte. Der parabolisch ausfließende freie Strahl, der über eine Strecke von 26 cm um 7 cm sank und aus der Düse mit rund 3 m/s Geschwindigkeit austrat, wurde in einem Blechtopf aufgefangen, der, falls Zündung eintrat, zwecks Löschen der Flamme mit einem Deckel geschlossen wurde.

Zur Zündung dienten ein Leuchtgasflämmchen von 2 bis 5 mm Länge, ein Schnittbrenner von 5 cm Flammenbreite, der entweder quer zum Strahl oder so gestellt wurde, daß der Strahl die Flamme entlang floß, sowie ein mit einer Reihe vieler kleiner Löcher versehenes Rohr von 8 cm Länge (Heizflöte). Gezündet wurde der freie Strahl 4 cm nach dem Austritt aus der Düse, also an einer Stelle, wo seine Oberfläche, die sich weiterhin durch Turbulenz aufräut, noch völlig glatt war. Die Versuche wurden bei etwa 7° C mit Petroleum, Toluol und Benzol ausgeführt.

Bei *Petroleum* war mit der kleinen Flamme keinerlei Zündung wahrzunehmen. Mit quergestelltem Schnittbrenner zeigt sich auf dem Strahl hinter der Zündstelle eine kleine, leuchtende Flamme, die größer wird und mehrere Millimeter weit über den Strahl reicht, wenn man die Flüssigkeit in der Längsrichtung durch die Flamme des Schnittbrenners oder der Heizflöte führt. Ein selbständiges Brennen des Petroleums war bei dieser Temperatur und den angewandten Zündmitteln nicht zu erreichen.

Toluol gibt hinter der kleinen, einseitig an den Strahl angelegten Zündflamme einen kurzen, blau brennenden Mantel um den Strahl herum, dessen Basis ebenso schräg steht, wie das oben (Abb. 7 und 8) an Gasstrahlen beobachtet wurde. Zündet man ringsherum, z. B. mit dem quergestellten Schnittbrenner, so verschwindet natürlich diese Schrägheit. Stellt man den Schnittbrenner in die Längsrichtung, so wird der Mantel 1 bis 2 cm lang und an seinem Ende leuchtend; aber erst die Heizflöte bringt den Strahl von der Zündstelle abwärts zum selbständigen Brennen und damit auch die Flüssigkeit im Topf zur Entzündung.

Bei *Benzol* tritt die zuletzt beschriebene Erscheinung stets, auch bei Anwendung der kleinsten Zündflamme ein. Aber auch hier bleibt der Strahl zwischen Düse und Zündstelle ungezündet. Die EntzG vermag gegen die Strömung, an der sich das den Strahl umgebende Dampf-Luft-Gemisch beteiligt, unter den gegebenen Verhältnissen nicht aufzukommen.

Auf Grund der im vorgehenden über die Entzündung am Gasstrahl und an ruhenden Flüssigkeiten gemachten Erfahrungen sind diese Vorgänge leicht zu deuten.

Bei der Entzündung fester Brennstoffe hat man vor allem zwischen der Entzündung von unten und der von oben zu unterscheiden. Im ersten Fall können die aufsteigenden Flammengase höher gelegene, noch ungezündete Teile der Oberfläche des brennbaren Körpers berühren und in Brand setzen. Es wird dann bei gegebener Zündstelle die Ausbreitung der Entzündung schwer vorauszusehen sein. Solange aber die aufsteigenden Flammengase höher gelegene Teile des Brennstoffes nicht berühren, liegen einfachere Verhältnisse vor; auf sie allein beziehen sich die folgenden Ausführungen.

Weiters ist zwischen Brennstoffen mit eigenem Sauerstoffgehalt und solchen zu unterscheiden, die ihren Sauerstoffbedarf hauptsächlich aus der Luft decken müssen. Stoffe mit großem, eigenem Sauerstoffgehalt (kolloide Schießpulver, Zelluloid u. dgl.) können auch in einer sauerstofffreien Atmosphäre brennen und sich daher in einer solchen auch entzünden. Für diesen Fall ist die Geschwindigkeit c , mit der die Verbrennung in das Innere des Brennstoffes fortschreitet (VbrG), von der Geschwindigkeit C , mit welcher sie sich über die Oberfläche des Brennstoffes ausbreitet (EntzG), kaum verschieden. Erfolgt aber die Verbrennung in Luft, so zeigt sich die EntzG größer als die VbrG, so daß, falls sich keine schwere Asche bildet, auf einem kreisrunden Stab eines solchen Stoffes durch die Übereinanderlagerung der beiden Geschwindigkeiten ein vollkommener Kegel entsteht, dessen halber Öffnungswinkel α der Beziehung

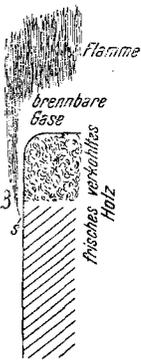


Abb. 9. Fortleitung der Entzündung über die Oberfläche brennenden Holzes.

$\sin \alpha = \frac{c}{C}$ entspricht.⁵ Das gasförmige Produkt der Reaktion dieser Stoffe enthält nämlich noch H_2 und CO , also

brennbare Gase. Indem sich diese am Rand der jeweiligen Brennfläche mit Luft mischen und verbrennen, entsteht eine über ihn hinausgreifende dünne Schicht, unter der die angrenzende Oberfläche des Brennstoffes bis zur Entzündung erhitzt wird.

Stoffe ohne hinreichenden eigenen Sauerstoff, wie Holz, Papier u. dgl., können in sauerstofffreier Atmosphäre weder mit Flamme brennen noch sich entzünden. Aber in Luft ist dennoch der Entzündungsvorgang dem eben geschilderten ganz ähnlich, wie das in Abb. 9 dargestellt wird.

Auf dem bereits verkohlten Holz brennt die Flamme, die sich aus ihm entwickelnden, brennbaren Gasen mit dem Sauerstoff der darüber befindlichen Luft. Am Rand jedoch, wo das oberflächlich verkohlte (versengte) Holz an das frische Holz grenzt, bildet sich überall, vom Holz etwas abgehend, aus den brennbaren Gasen und der von der Seite

⁵ H. Mache, Die Physik der Verbrennungserscheinungen, S. 72ff. Leipzig: Veit. 1918.

und von unten eindringenden Luft eine blau brennende Diffusionsschicht aus, die, indem sie wie eine *Zunge* weitergreift, das unter ihr befindliche Holz durch Wärmeübergang versengt und zur Gasentwicklung veranlaßt. Im selben Maß, mit dem diese Zunge sich weiterschiebt, schreitet die Entzündung fort.

Hieraus sieht man schon, daß die Form und Art der Flamme, wie auch der Umstand, ob der Brennstoff völlig vergast oder mit Aschenbildung verbrennt, für die Entzündung fast ohne Belang ist, da diese wesentlich nur durch die Vorgänge am Rand bestimmt wird. Sie ist also auch keineswegs durch die chemische Natur des Brennstoffes allein gegeben. Handelt es sich doch um den Wärmedurchgang von der Oberseite der Zunge zum Holz durch eine dünne, am Holz selbst noch nicht brennende Gaslamelle. So wird die Beschaffenheit der Oberfläche, deren Absorptionsfähigkeit für Wärmestrahlen, die Wärmeleitfähigkeit und die Schichtdicke des Brennstoffes, seine Temperatur, seine Struktur und sein Wassergehalt von großem Einfluß sein können; desgleichen der Luftdruck und besonders auch alle Luftströmungen. Wirkt Luft, die man in eine solche Flamme bläst, auf die Verbrennung auch fördernd ein, so wird doch die Entzündung auf der angeblasenen Seite hierdurch nur gehemmt. In diesem Sinne können bei träger Verbrennung sogar die Luftströmungen, welche die Flamme selbst erzeugt, die Entzündung verzögern. Wir werden darauf zurückkommen. Hier sei nur noch eine Erklärung für das Entstehen dieser die Entzündung fortleitenden Zunge gegeben:

Jede Flamme setzt, wie bekannt,⁶ der Gasströmung, durch welche sie gespeist wird, einen gewissen, wenn auch kleinen Widerstand entgegen. Die Beschleunigung, welche das Gasgemisch beim Verbrennen durch Ausdehnung erfährt, löst als mechanische Gegenwirkung einen Rückdruck, also eine Stauung aus, vermöge welcher der Druck in dem von der Brennfläche umgebenen Raum den der Atmosphäre etwas übertrifft. So ist der Druck im Inneren des Brennkegels einer Bunsenflamme gegen außen stets um einige Mikrobar gesteigert, wie man mit jedem hinreichend empfindlichen Manometer feststellen kann. Es ist dieser Überdruck, welcher unverbranntes Gemisch durch den schmalen Spalt ausströmen läßt, der infolge der Wirkung des Brennerrohres rings zwischen Kegel- und Brennerrand offen bleibt und hinter dem Brennerrohr, also an einer vor der direkten Strömung geschützten Stelle, die Bildung eines Ringes von brennendem Gas ermöglicht, der den Kegel ständig von unten her neu zündet. Da er durch Diffusion mit Außenluft gemischt ist, brennt dieser äußerste, über den Strahl hinausgreifende Kegelrand immer blau. *Lewis* und *v. Elbe*⁷ haben die Strömungen im

⁶ l. c., S. 45.

⁷ *B. Lewis* und *G. v. Elbe*, *J. Chem. Physics* 11, 89 (1943).

Inneren des Bunsenkegels durch Anwendung von im Gemisch schwebenden und von außen intermittierend beleuchteten Magnesia-Staubteilchen photographiert und meßbar gemacht. Tatsächlich zeigen sich die äußersten Stromlinien über den Brennerrand um 90° nach außen abgelenkt, so daß sie parallel zur Kegelsbasis verlaufen.

Aber auch in den Flammen nicht künstlich vorgemischter Gase, also bei der Verbrennung sauerstofffreier Gemenge oder reiner Brenngase in Luft, wie sie bei der leuchtenden Gasflamme oder bei den hier untersuchten festen Brennstoffen vorliegt, lassen sich für den Vorgang der Entzündung ähnliche Verhältnisse experimentell nachweisen.

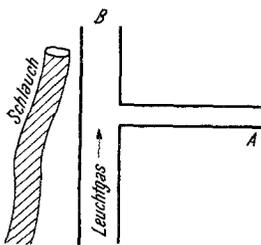


Abb. 10. Nachweis des Überdrucks im Innern einer Diffusionsflamme.

In Abb. 10 strömt reines Leuchtgas durch ein Messingrohr von 1 cm Durchmesser, an das 2 cm unter seinem oberen Rand ein Röhrrchen von 4 cm Länge und 4 mm Weite stumpf gelötet ist. Zündet man zunächst bei A, so wird das dort entstandene kleine Flämmchen sofort größer, wenn man auch bei B zündet. Wird die Gaszufuhr so weit gedrosselt, daß am Röhrrchen keine Zündung möglich ist, so wird sie wieder möglich, wenn man vorher auf dem weiten Rohr gezündet hat. Ließ man Kohlendioxyd oder Wasserdampf aus einem Schlauch

längs des Rohres langsam emporsteigen, wodurch die Flamme sich dort einseitig abhob und die Diffusionsschicht, in der die Reaktion vor sich geht, seitlich weit geöffnet wurde, so hatte das ein Kleinerwerden des Flämmchens bei A zur Folge. Es haben also auch Diffusionsflammen die Eigenschaft, den strömenden Brenngasen einen Widerstand zu bieten; es besteht auch unter ihnen ein wenn auch geringer Überdruck, eine Stauung.

So erfolgt die Bildung des oben als Zunge bezeichneten Flammenrandes ähnlich wie die des Zündringes am Rand des Bunsenkegels. Durch die kühlende und die Reaktion hemmende Wirkung des noch nicht erhitzten Brennstoffes bleibt ein schmaler, Bruchteile eines Millimeters betragender Spalt s (Abb. 9) offen, durch den das bei der Verkohlungs gebildete Holzgas infolge dieser Stauung hervorquillt. Durch Diffusion mit dem Sauerstoff der von vorn und oben eindringenden Luft gemischt, brennt die Zunge an ihrer Oberseite mit einem im Dunkeln gut sichtbaren, bläulich leuchtenden Saum, der hier die Zündflamme darstellt. Es ist bekannt, daß solche durch die Diffusion eines brennbaren Gases gegen Luft entstehenden Gemische Brennzonen bilden, die den Brennflächen ganz ähnlich sind, wie sie an mit Luft vorgemischten, explosiven Gemengen beobachtet werden.

Auf Grund dieser Auffassung leuchtet ein, daß jede Vermehrung

des der Zunge erreichbaren Sauerstoffes eine Vergrößerung der EntzG bewirken wird. Das erklärt im besonderen auch, daß die Entzündung auf der Kante eines räumlichen oder über den Rand eines blattförmigen Brennstoffes mit beträchtlich größerer Geschwindigkeit fortschreitet, als über eine Fläche.

Wird ein Blatt Zelluloid senkrecht gestellt und am oberen, waagrecht gehaltenen Rande bei z gezündet (Abb. 11), so bildet sich

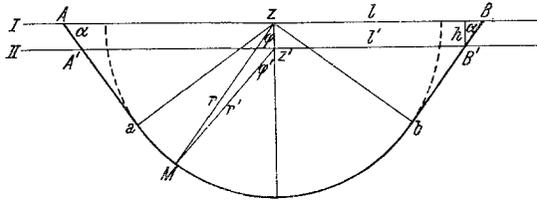


Abb. 11. Verbrennung eines Blattes von Zelluloid, bzw. Papier, das in senkrechter Stellung in einem Punkt des waagrecht gehaltenen Randes (z bzw. z') gezündet wurde.

eine Brennlinie, die aus einem Kreisbogen ab und zwei ihm angesetztten Geraden aA und bB besteht, deren Entwicklung an anderer Stelle⁸ aus der Übereinanderlagerung der Rand- und der Flächengeschwindigkeit der Entzündung, C^* bzw. C auf Grund einer Art *Huygensscher* Konstruktion bereits ausführlich beschrieben wurde. Daß hierbei $C^* > C$ ist, erklärt sich daraus, daß für die am Rand von z gegen A oder B fortschreitende Entzündung die erreichbare Sauerstoffmenge größer ist, als für die nach abwärts über die Fläche fortschreitende. In der Fläche ist jedes Element der Brennlinie, z. B. das bei M befindliche, auf den Sauerstoff beschränkt, den es senkrecht zu seiner Richtung vorfindet; seitwärts wird der Sauerstoff von den benachbarten Elementen in Anspruch genommen. Hingegen findet sich am Rand auch noch ringsherum Sauerstoff. So ist immer $C^* > C$, und wird der Randwinkel α durch die Beziehung $\sin \alpha = \frac{r}{l} = \frac{C}{C^*}$ festgelegt.

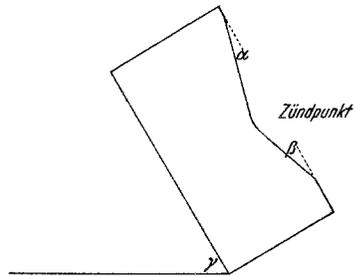


Abb. 12. Verbrennung eines Zelluloidblattes, das in senkrechter Stellung in einem Punkt des schief gehaltenen Randes gezündet wurde.

Hält man das Zelluloidblatt wieder senkrecht, aber so, daß der Rand mit dem Horizont einen Winkel γ einschließt (Abb. 12), so zeigt sich die Randgeschwindigkeit C^* gegen B kleiner als gegen A und wächst dieser Unterschied mit dem Winkel γ . Die die Entzündung fortführende

⁸ l. c., S. 79.

Zunge ist bei A länger und heißer als bei B , da bei A der thermische Auftrieb das Vorquellen des Brenngases längs des Randes unterstützt. Dagegen bleibt C^* in der Richtung gegen B gleich groß wie auf horizontalem Rand. Es ist also der untere Randwinkel β konstant, der obere Randwinkel α hingegen von γ so abhängig, wie das durch die Kurve in Abb. 13 dargestellt wird.

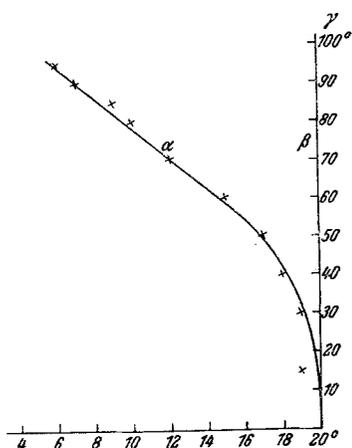


Abb. 13. Abhängigkeit des oberen Randwinkels α vom Winkel γ .

In einem zweiten Versuch wurde der obere Rand horizontal gelassen, dagegen das Blatt so geneigt, daß seine Fläche mit dem Lot einen Winkel einschloß, der 90° betrug, wenn das Blatt horizontal lag. Natürlich sind

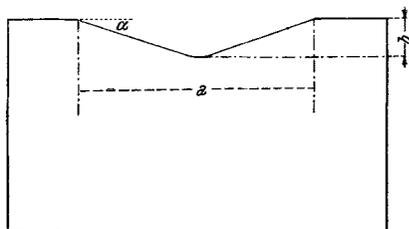


Abb. 14. Verbrennung eines Zelluloidblattes, das in schräger Stellung in einem Punkt des waagrecht gehaltenen Randes gezündet wurde.

jetzt beide Randwinkel gleich groß. Ihr Wert zeigt sich aber auch von der Neigung des Blattes unabhängig, was überraschen könnte. Hält man immer die gleiche Brenndauer von einigen Sekunden ein, so ergibt die Ausmessung der Blätter die folgende, aus Abb. 14 verständliche kleine Tabelle.

Tabelle 2.

Neigungs- winkel Grad	α Grad	a mm	b mm	Neigungs- winkel Grad	α Grad	a mm	b mm
0	19	70	10	60	19	78	11
30	19	75	11	75	19	92	13
45	18	78	11	90	18	100	14

Wohl wachsen also Flächen- und Randgeschwindigkeit der Entzündung mit zunehmender Neigung, aber so, daß ihr Quotient, der den Randwinkel bestimmt, konstant bleibt. Daß sie wachsen, ist daraus zu verstehen, daß das Zelluloidblatt auf beiden Seiten brennt; wird es geneigt, so erscheint die Zündung auf der Unterseite begünstigt. — Die Stärke der verwendeten Blätter betrug 0,3 mm.

Nimmt man statt Zelluloid ein Blatt ungeleimtes Papier und zündet es am oberen, horizontalen Rand — als den wir aber jetzt in Abb. 11 die Gerade *II* betrachten wollen — an der Stelle *z'*, so schreitet die Entzündung über Rand und Fläche mit Geschwindigkeiten fort, die wir mit *C*'* bzw. *C'* bezeichnen und die beide als gestört anzusehen sind. Papier brennt nämlich um so viel langsamer als Zelluloid, daß hier die durch die Flamme entwickelten, senkrecht aufsteigenden Luftströmungen die Entzündung in der Richtung nach unten verzögern. Es zeigt sich, daß wohl auch hier ein Kreisbogen mit tangential ansetzenden Geraden entsteht, daß aber der Mittelpunkt des Kreises nicht im Zündpunkt *z'* liegt, sondern um eine Strecke *h* nach oben verschoben scheint, die mit der Zeit, also mit der Größe der Flamme wächst. Anders gesagt: das Bild der Brennlinie, das sich ohne diese durch die aufsteigende Luft verursachte Störung entwickelt hätte, ist von oben um einen Streifen beschnitten, dessen Breite *h* mit der Zeit *t*, die seit der Zündung verfließen ist, proportional wächst. Hiernach bleibt $\frac{h}{t}$ konstant. Dagegen zeigt sich die Flächengeschwindigkeit *C'* vom Winkel φ' abhängig. Es ist allgemein $C' = \frac{1}{t} \sqrt{r^2 + h^2 - 2 r h \cos \varphi}$, also senkrecht nach abwärts $C'_s = \frac{r-h}{t}$ und in waagrechter Richtung $C'_w = \frac{\sqrt{r^2 - h^2}}{t}$. Aber auch die Randgeschwindigkeit *C** erscheint durch den aufsteigenden Luftstrom von $C^* = \frac{l}{t}$ auf $C'^* = \frac{l'}{t} = \frac{l-h \operatorname{ctg} \alpha}{t}$ verringert.

Tabelle 3. Sorte 1.

<i>t</i>	<i>l'</i>	α°	<i>r</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	$\frac{h}{t}$	$\frac{r}{t} = C$	<i>C'</i>	<i>C'_w</i>	<i>C*</i>	<i>C*'</i>
4,4	16,8	44	15,8	5,5	22,5	1,2	3,6	2,3	3,4	5,1	3,8
5,4	22,8	46	20,4	6,2	28,8	1,1	3,8	2,6	3,6	5,3	4,2
8,5	28,8	47	27,1	9,0	37,2	1,1	3,2	2,1	3,0	4,4	3,4
10,6	35,7	50	35,2	12,0	45,8	1,1	3,3	2,2	3,1	4,3	3,4
15,0	52,2	50	52,8	16,9	66,4	1,1	3,5	2,4	3,3	4,4	3,5
Mittel...							3,5	2,3	3,3	4,7	3,7

Tabelle 4. Sorte 2.

<i>t</i>	<i>l'</i>	α°	<i>r</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	$\frac{h}{t}$	$\frac{r}{t} = C$	<i>C'_s</i>	<i>C'_w</i>	<i>C*</i>	<i>C*'</i>
4,2	28,0	48	25,8	7,1	34,4	1,7	6,1	4,5	5,9	8,2	6,7
5,4	30,0	52	29,1	8,8	36,9	1,6	5,4	3,8	5,1	6,8	5,6
6,6	34,0	54	33,3	9,3	40,8	1,4	5,0	3,6	4,8	6,2	5,2
8,7	47,5	54	46,3	13,5	57,3	1,6	5,3	3,8	5,1	6,6	5,5
9,9	61,5	49	58,4	14,5	74,1	1,5	5,9	4,4	5,7	7,5	6,2
11,4	69,5	52	66,2	18,3	83,8	1,6	5,8	4,2	5,6	7,4	6,1
Mittel...							5,6	4,1	5,4	7,1	5,9

Die Zahlen in Tabelle 3 und 4 gelten für zwei Papiersorten (1 und 2) von 0,060 bzw. 0,038 mm Stärke, welche die Eigenschaft hatten, daß sich ihre Asche nicht einrollte. Dieses Einrollen stört nämlich sonst die regelmäßige Entwicklung der Brennlinie. Es bedeutet t die seit der Zündung verstrichene Zeit in Sekunden; die Längen sind in Millimeter gegeben.

Die Konstanz von h/t bestätigt hinreichend die obige Darstellung, wenn man die Inhomogenitäten des Papiers in Erwägung zieht. Die Luftströmung vermindert also bei dem Papier der Sorte 1 die EntzG auf der Fläche in vertikaler Richtung von 3,5 auf 2,3 mm/s und auf dem horizontalen Rand von 4,7 auf 3,7 mm/s; bei der Papiersorte 2

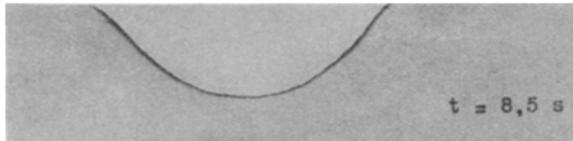


Abb. 15.

von 5,6 auf 4,1 bzw. von 7,1 auf 5,9 mm/s, beim starken Papier mehr als bei dem dünnen. Abb. 15 zeigt die Brennlinie des dritten Versuches (Sorte 1) nach Abstreifen der Asche in natürlicher Größe. Wie man sieht, setzt sie am oberen Rande leicht abgerundet an, was davon herührt, daß auch bei der Ausbreitung der Flamme über den Rand eine Zunge vorausläuft und das Papier versengt, ehe es verkohlt wird. Daß das gleiche auf der Fläche geschieht, zeigt sich längs der ganzen Brennlinie.

Die Breite dieses versengten Randstreifens (δ) wächst mit der Dicke des Papiers. Am Rande ist die Verbrennung beendet, auf der Innenseite des Streifens hatte sie eben begonnen. Ist c die VbrG des Papiers und d seine Dicke, so ist $\tau = \frac{d}{2c}$ die Zeit, während welcher das Papier an jeder Stelle brennt und $\delta = \frac{d}{2c} C'$. Wie man am Original besser erkennt, ist δ in der Mitte kleiner als an beiden Seiten.

Herr Dipl.-Ing. *E. Wallauschek* hat mich bei der Ausführung dieser Versuche in sehr dankenswerter Weise unterstützt.