

173. Über Flammen III. Frei schwebende Butanflammen

von Klaus Clusius und Ernst Schumacher.

(31. V. 51.)

1. *H. Mache* hat darauf hingewiesen, dass die Stabilität der entleuchteten Bunsenflamme und ihr Haften auf der Brennermündung keineswegs selbstverständlich sind¹⁾. Nach ihm wird die Flamme nur deshalb nicht nach oben weggeblasen, weil sie vom Rand der Rohröffnung her dauernd neu gezündet wird. An dieser Stelle herrscht ein grosser Geschwindigkeitssprung zwischen dem strömenden Leuchtgas und der ruhenden Luft, der eine starke Durchmischung bewirkt; in der entstehenden Wirbelschicht, sozusagen im „Totwasser“ des Mündungsrandes, kann sich die Flamme halten, da hier grössere vertikale Geschwindigkeitskomponenten fehlen.

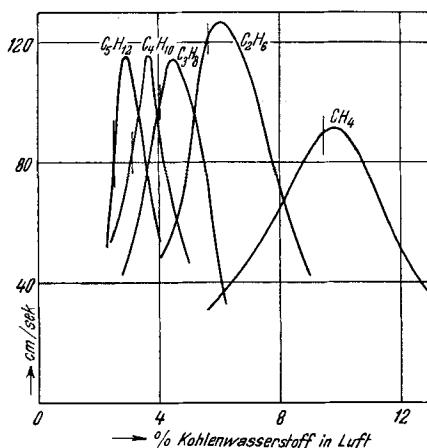


Fig. 1.

Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von Kohlenwasserstoff-Luftmischungen von der Zusammensetzung. Der vertikale Strich an jeder Kurve markiert die stöchiometrische Mischung (nach *W. Mason*).

Man darf sich dieser Ansicht wohl anschliessen, muss jedoch hinzufügen, dass der hohe Wasserstoffgehalt des Leuchtgases für die angeschnittene Frage in dreifacher Hinsicht bedeutsam ist. Zunächst begünstigt die vorzügliche Beweglichkeit des Wasserstoffs die rasche Bildung der Mischzone. Ausserdem wird die Zündung des nachströmenden Frischgases durch die hohe Fortpflanzungsge-

¹⁾ *H. Mache*, Die Physik der Verbrennungserscheinungen, Leipzig 1918, S. 27 ff; ferner *H. Mache*, Sitzungsber. d. Wiener Akad. 1941, 109.

schwindigkeit der Verbrennung in Wasserstoff-Luftgemischen sehr erleichtert. Letztere steigt maximal bis etwa 267 cm/sec, während die gesättigten Kohlenwasserstoffe nach *Mason* rund 2 bis 3, nach *Hartmann* sogar nur 8 mal kleinere Werte erreichen¹⁾ (s. Fig. 1). Dazu kommt noch als dritter Umstand die Tatsache, dass beim Wasserstoff die maximale Brenngeschwindigkeit schon bei einem Zusatz von 58% Luft erreicht wird, während bei Butan 96,3% Luft notwendig sind. Die Vermischung braucht also beim Wasserstoff prozentual viel weniger weit fortgeschritten zu sein als bei den höheren Kohlenwasserstoffen, um Gemenge gleicher Brenngeschwindigkeit zu liefern. Der innere Grund für dieses Verhalten ist darin zu erblicken, dass die maximale Reaktionsgeschwindigkeit stets in der Nähe der stöchiometrischen Mischung liegt. Während nun Wasserstoff zur vollständigen Oxydation das 2,39fache Luftvolumen braucht, ist für Butan das 31,1fache Luftvolumen notwendig.

2. Diese Zusammenhänge lassen erwarten, dass eine reine Butanflamme

1. wegen der schlechteren Diffusion dieses Gases vom Molgewicht 58 in Luft,
2. wegen der viel geringeren maximalen Brenngeschwindigkeit,
3. wegen der grossen zur stöchiometrischen Oxydation notwendigen Luftmenge,

verglichen mit Leuchtgas oder gar mit reinem Wasserstoff, sich auf einem Brennerrohr viel schlechter halten kann und verhältnismässig leicht abgeblasen werden muss. Der Umstand, dass beim Butan der Bereich für die maximale Brenngeschwindigkeit nur schmal, also sehr mischungsempfindlich ist, begünstigt noch das Abheben der Flamme.

Der Versuch lässt sich mit dem im Handel erhältlichen „Butagas“ bequem ausführen. Man schraubt an den Behälter ein gewöhnliches Reduzierventil für Wasserstoff und verbindet es durch einen Schlauch mit einem grossen Teclubrenner, dessen Luftzufuhr voll geöffnet ist. Um das Gasgemisch besser zu homogenisieren, ist das Brennerrohr durch ein 35 cm langes Glasrohr verlängert.

3. Entzündet man das Gas an der Mündung, so erhält man bei geringer Strömungsgeschwindigkeit eine hohe, leuchtende, flackernde Flamme. In den Brennern üblicher Konstruktion reisst nämlich der Butanstrom viel zu wenig Luft mit, um eine entleuchtete Bunsenflamme mit Innenkegel zu bilden; dazu sind nur spezielle Brenner mit besonders feinen Düsen geeignet. Verstärkt man den Gasstrom, so hebt sich die Flamme bald vom Rohr ab; sie schwebt frei darüber und kann bei vorsichtiger Regulierung bis zu 25 cm von der Mündung weggeblasen werden ohne zu erlöschen (Fig. 2). In dem Masse, wie sie sich abhebt, wird die Flamme mehr und mehr entleuchtet, da mit der Entfernung von der Mündung mehr Luft beigemischt wird.

¹⁾ *W. Mason*, Soc. 123, 210 (1923), u. *E. Hartmann*, Diss. Karlsruhe 1931, zitiert nach *W. Jost*, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, Berlin 1939, S. 121.

Die am weitesten abgehobenen, eben noch stationären Flammen zeigen nur noch an der Basis eine schmale leuchtende Zone, in der sich das Wassergasgleichgewicht einstellt. Diese brausend, etwas unruhig brennenden und in lotrechter Richtung ein wenig auf und ab tanzenden Flammen stabilisieren sich in der Luft durch zwei antagonistische Einflüsse dort, wo die Brenngeschwindigkeit des Gemisches an der Basis gleich der Strömungsgeschwindigkeit des Gasstroms ist. Letztere nimmt bei einer Annäherung an die Mündung zu, da hier die Impulsdiffusion des aufsteigenden Frischgases in die ruhende Atmosphäre noch nicht so weit fortgeschritten ist wie in grösserer Entfernung; die Flamme wird dann nach oben verschoben. Steigt sie jedoch zu hoch, so nimmt der Luftgehalt im Gasstrom und damit die Verbrennungsgeschwindigkeit so weit zu, dass sie sich wieder der Mündung nähern muss. Hat die Zusammensetzung des Gemisches die maximale Brenngeschwindigkeit erreicht, so ist bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit eine Stabilisierung in einer neuen Gleichgewichtslage nicht mehr möglich — die Flamme wird ganz nach oben fortgeblasen und erlischt.

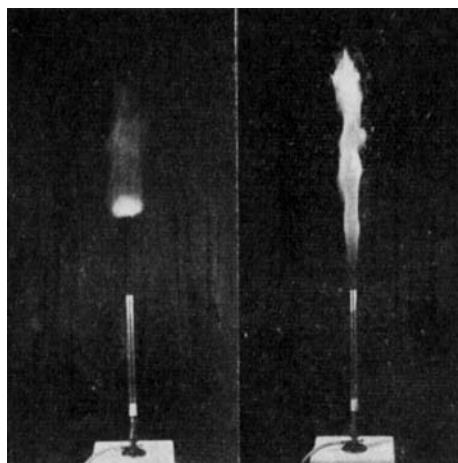


Fig. 2.
Frei schwebende Butanflamme; der Abstand Flammenbasis/Rohrmündung beträgt 25 cm.

Fig. 3.
Dieselbe Flamme wie in Figur 2 bei Zufuhr von etwas Sauerstoff in die Luftöffnung des Brenners.

4. Überraschend ist das Verhalten einer frei schwebenden Flamme, wenn man durch ein kleines Glasröhrchen etwas Sauerstoff in die Luftöffnung des Teclubrenners einführt. Sie kehrt dann sofort auf die Mündung des Rohres zurück und wird wieder leuchtend (Fig. 3). Der Grund dafür liegt in der starken Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von der Sauerstoffkonzentration, die mit steigendem O_2 -Gehalt kräftig zunimmt; gleichwohl reicht die O_2 -Konzentration noch nicht zur Ausbildung eines Bunsenkegels aus. Weil die Flamme bis zur Rohrmündung zurückgeführt wird, diffundiert insgesamt weniger O_2 in den Gasstrom ein, als wenn sie abgehoben ist; so kommt

die paradoxe Erscheinung zustande, dass eine entleuchtete Flamme durch O₂-Zufuhr infolge einer veränderten räumlichen Verteilung der Brennflächen und damit der gesamten Sauerstoffzufuhr zur Kohlenstoffabscheidung angeregt wird.

Das umgekehrte Paradoxon beobachtet man bei der Zufuhr von Stickstoff. Dadurch wird eine eben noch auf der Rohrmündung sitzende Flamme abgehoben und entleuchtet. Das Abheben ist dabei der primäre Vorgang, der deshalb eintritt, weil in sauerstoffärmeren Gemischen als normaler Luft die Brenngeschwindigkeit herabgesetzt, die Flamme also abgeblasen wird; auf der anderen Seite reisst der Gasstrahl über der Brenneröffnung doch genügend Sauerstoff aus der umgebenden Luft mit, um die Flamme weitgehend zu entleuchten.

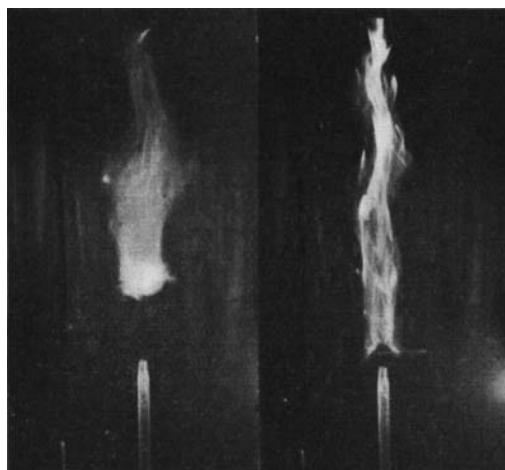


Fig. 4.
Frei schwebende
Butanflamme
übereinem düsen-
förmig ausgezogene-
nen Brennerrohr.

Fig. 5.
Dieselbe Flamme
wie Figur 3, ge-
stört durch einen
quer in den Gas-
strom gehaltenen
Glasstab.

5. Ganz im Sinne *Mach's* und seiner verkehrten Kegelflammen kann die abgehobene Flamme sich an ein wirbelbildendes Hindernis anheften. Figur 4 zeigt eine schwebende Flamme über einem düsenförmig verengerten Glasrohr. Hält man dicht über die Mündung einen Glasstab quer in den Gasstrom, so fährt die Flamme herab und umfasst sofort das Hindernis wie eine Kralle (Fig. 5). Dies ist jedoch, genau besehen, nur an den Rändern in der eigentlichen Mischzone der Fall, in der die Impulsdiffusion überwiegt. In der Mitte ist dagegen die Front der Flammenbasis deutlich nach oben durchgebogen und hängt nicht am Glasstab; dort herrscht die geringste Sauerstoff-Konzentration und die schnellste Strömung. Auch hier beobachtet man stärkeres Leuchten durch Kohlenstoffabscheidung in der gestörten Flamme aus denselben Gründen wie oben.

6. Zur Technik der Aufnahmen sei folgendes bemerkt. Es besteht die Schwierigkeit, dass die Flammen eine so kurze Belichtungszeit brauchen, dass der Brenner usw. weit unterbelichtet wird. Daher wurde zunächst der Brenner ohne Flamme mit passender

Belichtungszeit aufgenommen, dann der Gasstrom angestellt, entzündet und die Flamme durch eine Momentaufnahme dazuexponiert. Deshalb ist das Zufuhrrohr für O_2 auf Figur 2 gar nicht und der Glasstab in Figur 4 nur schlecht sichtbar.

Zusammenfassung.

Das Haften des Kegels beim Bunsenbrenner auf der Rohrmündung wird durch den Gehalt des Leuchtgases an Wasserstoff entscheidend erleichtert. Wasserstoff ist durch grosse Diffusion, grosse Brenngeschwindigkeit und kleinen Sauerstoffbedarf bei der Verbrennung ausgezeichnet. Gerade entgegengesetzt liegen die Verhältnisse bei einer Kohlenwasserstoffflamme, etwa beim Butan. Eine Butanflamme kann daher leicht von der Mündung eines Brennerrohres abgeblasen werden, worauf sich eine stationäre frei schwebende Flamme ausbildet. Einige Versuche mit solchen Flammen werden beschrieben.

Physikalisch-Chemisches Institut der Universität Zürich.

174. Eine papierchromatographische Trennung und Bestimmung der Alkali- und Erdalkali-Ionen

von H. Erlenmeyer, H. von Hahn und E. Sorkin.

(1. VI. 51.)

In einer vorangegangenen Mitteilung¹⁾ wurde am Beispiel von Cu^{++} und Co^{++} gezeigt, dass es möglich ist, papierchromatographisch getrennte Metallkationen mit Hilfe der Violursäure (5-Isonitroso-barbitursäure) nachzuweisen. Da Violursäure auch mit den Alkali- und Erdalkali-Ionen charakteristisch gefärbte Salze bildet²⁾, war die Möglichkeit gegeben, diese sonst nur schwer fassbaren Ionen sicher zu bestimmen.

Wir berichten im Folgenden über solche Versuche, die wir insbesondere auch im Hinblick auf eine Nachweis- und Bestimmungsmethode der biologisch wichtigen Ionen K^+ , Na^+ , Ca^{++} und Mg^{++} durchgeführt haben³⁾⁴⁾.

¹⁾ H. v. Hahn, E. Sorkin & H. Erlenmeyer, Exper. 7, 258 (1951).

²⁾ Siehe A. v. Bayer, A. 127, 200 (1863); J. Wagner, Z. physikal. Ch. 12, 314 (1893); H. Erlenmeyer & W. Schoenauer, Helv. 24, 878 (1941).

³⁾ E. Beerstecher jr. gibt zur Trennung von K^+ von anderen Metallionen ein Gemisch von Alkohol und Salzsäure an. Anal. Chem. 22, 1200 (1950).

⁴⁾ Andere papierchromatographische Trennungs- und Nachweismethoden für die Alkali- und Erdalkali-Ionen werden von I. I. M. Elbeih, J. F. W. McOmie & F. H. Pollard, Trans Farad. Soc., Disc. 7, 183 (1949); F. H. Pollard, J. F. W. McOmie & I. I. M. Elbeih, Soc. 1951, 466, 470, 771, angegeben. Diese Autoren behandelten das Chromatogramm mit 8-Oxychinolin und Kojisäure und identifizierten die Ionen in ultraviolettem Licht durch Hemmung oder Verstärkung der Fluoreszenz; s. a. F. H. Burstall, G. R. Davies, R. P. Linstead & R. A. Wells, Soc. 1950, 516.