

In Nordamerika wird vielfach Rohanthrazit als Brennstoff benutzt. Als letzter Rohstoff gilt die Luft, die man neuerdings der Brennstoffersparnis halber ihres nie fehlenden Wassergehaltes beraubt. Vorläufig dürften die Kosten für derartige Anlagen noch etwas hoch sein. [A. 45.]

Über die sogenannte „flammenlose“ Gasheizung.

VON HEINRICH MACHE.

(Eingeg. 22./2. 1913.)

Das von W. A. Bone¹⁾ und ähnlich von R. Schnabel ausgearbeitete Verfahren, ein brennbares Gasgemisch im Inneren einer festen Substanz zur Verbrennung zu bringen und so eine fast vollkommene Ausnutzung der sonst durch Konvektion und Strahlung zum Teil verloren gehenden produzierten Wärme zu bewirken, ist dem Prinzip nach nicht unbekannt²⁾. Da ich zudem selbst schon im Jahre 1907 den Bone'schen ganz ähnliche Versuche ausführte und mir die von ihm gegebene Erklärung der Erscheinung des Wesentlichen des nach meiner Ansicht mehr der physikalischen als chemischen Klärung bedürftigen Vorganges nicht zu berühren scheint, sei es mir gestattet, auf diese seinerzeit nur nebenbei und unvollständig mitgeteilten Versuche³⁾ zurückzukommen.

Im ersten Versuch, den ich ausführte, brannte zunächst eine Bunsenflamme auf einem (85 cm langen, 0,8–0,2 cm weiten) zylindrischen Brennerrohr, in welches das Leuchtgas aus der Leitung, die Luft aus einem Glockengasometer einströmte. Die Mischung wurde so einreguliert, daß der Kegel das Minimum der Höhe aufwies, während die Strömungsgeschwindigkeit reichlich groß genug war, um ein Rückschlagen der Flamme zu verhindern. Dann zeigte der Kegel dennoch nach einiger Zeit, während welcher sich das obere Ende des Brennerrohrs erwärmte, die Tendenz, aus der Lage ASA' in die Lage asa' (Fig. 1) überzugehen, d. h. sich in das Rohr zurückzuziehen⁴⁾. Das äußerte sich in der Form eines bald schnelleren, bald langsameren Vibrierens oder Hin- und Hergehens zwischen den beiden Gleichgewichtslagen.

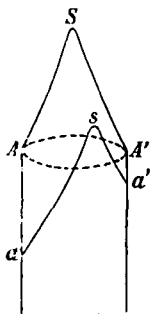


Fig. 1.

Hatte durch diesen Prozeß die Flamme oft und lange genug innen gebrannt, um das Rohrende stark zu erhitzen, dann wurde die Lage ASA' dauernd verlassen, die Flamme blieb im Rohr und wanderte jetzt sehr langsam in dem Maße, als das Rohr durch Leitung und Strahlung nach unten hin erhitzt wurde, nach abwärts. Man kann durch Außenkühlung die Flamme an beliebiger Stelle im Rohr zum Stillstand bringen, andererseits das Eindringen der Flamme in das Rohr durch Erhitzen des Endes, etwa mittels einer Stichflamme, beschleunigen und auf diesem Wege auch Flammen in das Rohr bringen, die wegen der zu großen Strömungsgeschwindigkeit von selbst nicht eindringen würden.

Verwendet man Metallrohr, so erkennt man den jeweiligen Stand der Flamme am Glühen des Metalls und kann so das Eindringen der Flamme ins Rohr einem größeren Auditorium sichtbar machen, wie ich dies auch tatsächlich wiederholt getan habe.

Bei einem zweiten Versuche, der sich als logische Fortführung des ersten ergab, wurde in eine dünnwandige poröse Tonzelle (Höhe 12 cm, Durchmesser 5 cm) durch eine mit zwei Saugansätzen versehene kräftig wirkende

Wasserstrahlpumpe zunächst Leuchtgas eingepreßt. Der Mantel der zylindrischen Zelle war mit Asbestpappe fest umklebt. Das Leuchtgas drang dann nur durch die Porenöffnungen des Bodens und konnte dort entzündet werden. Wurde jetzt durch den zweiten, ursprünglich geschlossenen Saugansatz dem Leuchtgas Luft zugemengt, so bildete sich über dem Boden eine blaue Flammenschicht, die mit der Zeit, wenn die Tonzelle genügend erhitzt war, in deren Poren eindrang und sie ins Glühen brachte. Der Versuch wurde vorzeitig abgebrochen, da eine Explosion des Gasinhaltes der Zelle und der Pumpe befürchtet wurde. Die Anordnung entspricht im übrigen ganz der „Diaphragmenheizung“ von Bone.

Zur Erklärung des ersten der beiden Versuche sei zunächst daran erinnert, daß die Neigung des Kegels der Bunsenflamme durch die Superposition der Strömungsgeschwindigkeit des explosiblen Gasgemenges u und der normalen Verbrennungsgeschwindigkeit c bestimmt ist⁵⁾. Ein Flammenteilchen in m (Fig. 2) wird durch die Strömung mit der Geschwindigkeit u nach oben getrieben, während es gleichzeitig durch Verbrennen des Gasgemisches mit der Verbrennungsgeschwindigkeit c in der Richtung der Flächennormalen in das unverbrannte Gasgemisch fortschreitet. Es bewegt sich infolgedessen längs der Resultierenden beider Geschwindigkeiten in der Richtung des Kegelmantels. Gegen die Strömung bewegt es sich aber hierbei nur mit der Geschwindigkeit $c' = c \sin \beta = u \sin^2 \beta$, was an sich ein Erlöschen der Flamme in kürzester Zeit zur Folge hätte. Der Kegel müßte (Fig. 3) sofort von selbst aus der Form 1 in die Formen 2 und 3 übergehen und in S erlöschen. Daß dies nicht geschieht, hat nach meiner Ansicht zweierlei Gründe. Erstens müssen Flammen mit freien Rändern (wie die Kegelreste in 2 und 3) nach dem, was ich an anderer Stelle (l. c.) darüber ausgeführt habe, vom Rand aus in der Richtung der Brennfläche (in der Richtung der Pfeile) sich ausbreiten, und zwar sogar mit weit größerer Geschwindigkeit als der normalen Verbrennungsgeschwindigkeit c , wie sie senkrecht zur Brennfläche besteht. Zweitens, und das ist für die Stabilisierung der Flamme an bestimmter Stelle das Wesentlichere, findet von AA' aus eine beständige Neuzündung des Kegels statt. Das aus dem Rohre austretende explosive Gasgemisch strömt nämlich durch die außen befindliche relativ ruhende Luft in der Form eines Zylinders in die Höhe⁶⁾. In die diesem Zylinder unmittelbar anliegenden Luftschichten tritt aber beständig durch Diffusion brennbares Gas ein. So bildet sich außen um den Fuß des Kegels, vor der direkten Strömung geschützt, eine sich beständig erneuernde Zone brennendes Knallgas, das als Zündflamme für den Kegel wirkt. In der Tat hebt sich die Flamme sofort vom Rohre ab, wenn man sie in einer Kohlensäure- oder Stickstoffatmosphäre brennen läßt, also die Ausbildung einer solchen brennbaren Diffusionszone verhindert⁷⁾. Aus demselben Grunde erhalten sich in einer Leuchtgasatmosphäre die in Luft mantellosen, blauen, mit großem Luftüberschuß brennenden Flammen sehr stabil am Rohr, während die grünen, in Luft so stabilen Flammen sich in Leuchtgas vom Rohre abheben.

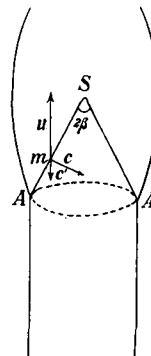


Fig. 2.

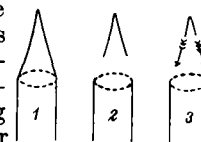


Fig. 3.

Die Notwendigkeit dieser beständigen Neuzündung von unten her wird auch durch folgenden Versuch in schöner Weise illustriert: Spannt man einige Zentimeter über dem Brennerrohr

¹⁾ Ber. 46, 5 (1913).

²⁾ Vgl. die Bemerkung von F. Fischer, Angew. Chem. 26, I, 72 (1913).

³⁾ Ann. d. Physik [4] 10, 408 (1903) und 24, 527 (1907); speziell Fußnote auf S. 532.

⁴⁾ Die Brennfläche in asa' hat hierbei die Form einer Sattelfläche mit seitlich aufgesetztem Kegel, eine Deformation, die durch die im Rohre verhinderte freie Expansion des verbrennenden Gases bewirkt wird.

⁵⁾ Gouy, Ann. chim. phys. [5] 18, 27 (1879).

⁶⁾ Man kann denselben Kegel, wie er am Rohre aufsitzt, auch einige Zentimeter über dem Rohre, etwa auf einem Ring aus Platindraht von gleichem Durchmesser wie das Brennerrohr aufsitzend erhalten.

⁷⁾ Es löscht dabei die Flamme nicht etwa über die Formen 2 und 3 aus, sondern der Kegel wandert unverändert in die Höhe, ein Beweis für die rasche seitliche Ausbreitung der Entzündung.

quer einen dünnen Metalldraht und läßt aus dem Rohr Leuchtgas mit einem so großen Luftüberschuß strömen, daß man auf dem Rohr keinen stabilen Kegel mehr erhielte, d. h. das Gas in normaler Weise nicht mehr gebrannt werden könnte, so bildet sich doch, wenn man am Draht etwa mittels des Funkens einer kleinen Leydener Flasche zündet, eine Flamme von der Form $b a b'$ aus (Fig. 4). Der Draht kommt hierbei nicht ins Glühen. Doch entsteht hinter dem Draht bei a , an einer vor der direkten Strömung hinreichend geschützten Stelle eine kleine Zündflamme, von der die Verbrennung durch die Strömungs- und die Verbrennungsgeschwindigkeit längs $a b$ und $a b'$ in die Höhe getragen wird. Man erhält sozusagen den umgekehrten Bunsenkegel. Wegen des Luftreichtums des Gemenges ist hier die den Strömungszylinder umgebende Diffusionszone zunächst zu gasarm, um brennbar zu sein. Steigert man aber die Gaszufuhr, so erhält die Flamme die unter II veranschaulichte labile Form, wobei der Punkt a sich dem Draht nähert, so daß er ins Glühen kommt. Jetzt wirkt schon die Diffusionszone

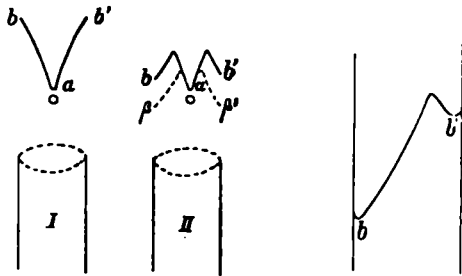


Fig. 4.

Fig. 5.

bei b und b' als Zündungsstelle. Bei weiterer Gaszufuhr läuft die Entzündung in der Diffusionszone nach abwärts, nimmt die Flamme längs $\beta a \beta'$ usw. mit, und es bildet sich am Rohr der gewohnte stabile Kegel.

Natürlich ist auch hier die Erscheinung in einer Leuchtgasatmosphäre zu der in Luft komplementär, d. h. man erhält die Drahtflamme bei großem Überschuß an Leuchtgas und den Bunsenkegel bei luftreicher Mischung.

Auch im Rohr ist nun die Bildung einer gegen die Strömung geneigten an bestimmter Stelle verbleibenden Brennfläche an das Vorhandensein von Zündungsstellen in den tiefsten Teilen der Flamme gebunden^{*)}. Bei den labilen, der geringsten Änderung der Strömungsgeschwindigkeit nachgebenden Brennflächen, wie sie sich beim „Zurückschlagen“ der Flamme in das kalte Rohr ausbilden (Fig. 5), sind die zur Strömung senkrechten Flächenelemente b, b' , welche in den dem Rohre anliegenden langsamer strömenden Schichten auftreten, die Stellen der Flamme, die sich in der Strömung erhalten und die übrigen, gegen die Strömung geneigten höher gelegenen Teile der Flamme mit sich ziehen. Im erhitzten Rohre ist die Erscheinung die gleiche, nur mit dem Unterschied, daß die Verbrennungsgeschwindigkeit durch Vorwärmung des unverbrannten Gasgemisches erhöht ist, und infolgedessen sich die Flamme auch bei hoher Strömungsgeschwindigkeit noch im Rohr erhält. Natürlich muß hier auch die im kalten Rohre links von b und rechts von b' beobachtbare Aufbiegung (eine Folge der kühlenden Wirkung des Rohres) verschwinden. Zugleich wird aber die Flamme in der erhitzten Partie des Rohres stabilisiert, und zwar an der tiefsten Stelle, wo bei der gegebenen Strömungsgeschwindigkeit die Erhitzung gerade zur Ausbildung eines ebenen Randes ausreicht. Steigt sie empor, so kommt sie zu heißeren Stellen des Rohres und wird nach abwärts getrieben, geht sie nach unten, so kommt sie zu kühleren Stellen des Rohres und wird in die Höhe gehoben.

^{*)} Bei Gleichheit von Strömungs- und Verbrennungsgeschwindigkeit ist die Brennfläche bekanntlich eine zur Rohrachse senkrechte Ebene, mit durch die kühlende Wirkung der Rohrwand etwas zurückgebogenen Rändern. Hier handelt es sich aber um Flammen, die sich in einem weit rascher als mit Verbrennungsgeschwindigkeit bewegtem Gasstrom erhalten.

Das ist mit gewissen durch die Enge der Kanäle bedingten Modifikationen zugleich auch der Vorgang, der sich beim zweiten Versuch im Innern der porösen Tonzelle abspielt.

Zunächst wirkt die kühle Oberfläche dem Eindringen der Flamme entgegen, so etwa wie das Drahtnetz einer Davy'schen Lampe, nur daß diese Wirkung hier einerseits durch die große Flächenverminderung, die die Flamme beim Eindringen in die poröse Substanz erfährt, unterstützt, andererseits durch das geringe Wärmeleitungsvermögen der Substanz vermindert wird. Es wird fast die ganze der Fläche von der über ihr schwebenden Brennfläche mitgeteilte Wärme teils aufgespeichert, teils zur Vorwärmung des durch die Poren strömenden Gasgemisches verwendet. Hierdurch wird die Verbrennungsgeschwindigkeit erhöht und damit wieder die Distanz der Flamme von der porösen Oberfläche vermindert, bis durch diesen sich wechselseitig unterstützenden Vorgang die Verbrennungsgeschwindigkeit groß genug geworden ist, um das Eintreten der Flamme in die Poren, trotz der dort herrschenden hohen Strömungsgeschwindigkeit zu ermöglichen. Das wird natürlich nicht gleichzeitig an allen Stellen geschehen. Auch kann in diesen engen Kanälen kaum mehr von einer flächenförmigen Ausbreitung der Brennfläche die Rede sein. Doch wird in jedem Stromfaden durch Erhitzung von den Wänden und vom brennenden Gas aus die Entzündungstemperatur des Gemisches an einer bestimmten Stelle erreicht, und diese Stelle bezeichnet den Ort der Verbrennung.

Ist die Flamme einmal eingedrungen, so wandert sie mit der Zeit von selbst nach unten, genau so und aus derselben Ursache, wie die Flamme im Rohre. Dieses Wandern wird erst dann aufhören, wenn überall die Distanz von der unteren, durch das zuströmende Gasgemisch beständig gekühlten Grenzfläche der porösen Substanz so klein geworden ist, daß eine weitere Erhitzung der Porenwänden nach unten hin durch die kühlende Wirkung dieser Fläche und des einströmenden Gasgemisches verhindert wird. Jetzt ist die Verbrennung überall an bestimmter Stelle stabilisiert. Sie kann nicht höher erfolgen, da dort die poröse Substanz zu heiß ist, und die Verbrennungsgeschwindigkeit über die Strömungsgeschwindigkeit gesteigert würde; sie kann nicht tiefer erfolgen, da dort die poröse Substanz zu kalt ist, und infolgedessen die Flamme durch die Strömung in die Höhe getragen würde.

Bone sieht das Wesentliche der Erscheinung in der katalytischen Wirkung des festen Materials, in das die Flamme eindringt. Zugegeben, daß eine solche Wirkung, die an Platin und einigen anderen Metallen sichergestellt ist, auch an Ton, Ziegeln oder Magnesia auftritt, so kann sie meines Erachtens den Vorgang sehr unterstützen, aber nicht hervorrufen; denn es unterliegt keinem Zweifel, daß das Eindringen der Flamme in genau derselben Weise auch in eine Substanz erfolgen würde, welche gar keine katalytische Wirkung besitzt, wofern sie nur hinreichend porös ist. Daß die Verbrennung in den Poren vollkommener ist, als bei offener Flamme, daß man also vollständige Verbrennung mit nur geringem Luftüberschuß erzielt, kann kaum wundernehmen, wenn man bedenkt, daß hier die Gase nach Passieren der eigentlichen Brennfläche noch durch die nahe auf Verbrennungstemperatur erhitzten engen Kanäle streichen müssen.

Jedenfalls erscheint es aber gewagt, die Erscheinung als flammenlose Verbrennung zu bezeichnen. Das Kriterium für die Existenz einer Flamme ist ja nicht ihre Sichtbarkeit; denn in diesem Sinne wäre auch die Verbrennung reinen Wasserstoffes flammenlos. Insoweit aber eine Flamme dadurch charakterisiert erscheint, daß Schichten verschiedener chemischer Zusammensetzung und verschiedener Temperatur und Dichte so nahe aneinander grenzen, daß die Kontinuität nur innerhalb Dimensionen von der Größenordnung der molekularen Weglänge erhalten bleibt, erfolgt auch in der porösen Substanz des Diaphragmas oder der Bone'schen Heizröhren die Verbrennung mit Flamme.

[A. 51.]