©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Wie erhält sich die Flamme auf dem Brennerrohr?

Von

Heinrich Mache

ordentl. Mitglied d. Akad. d. Wiss.

(Mit 6 Textfiguren)

(Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien)

(Vorgelegt in der Sitzung am 19. Juni 1941)

Sieht man von der Verbiegung am Rand und von der Abrundung der Spitze ab, so läßt sich die im übrigen einem Kegelmantel ähnliche Form der Brennfläche einer auf einem kreisrunden Rohr aufsitzenden Bunsenflamme bekanntlich aus der Übereinanderlagerung der Strömungsgeschwindigkeit u und der Verbrennungsgeschwindigkeit c des brennbaren Gasgemisches erklären (Fig. 1). Das Flammenteilchen m wird gleichzeitig mit der Geschwindigkeit u nach oben und mit der Geschwindigkeit c senkrecht zur Brennfläche nach innen getrieben. Es bewegt sich daher in der Richtung AC der Diagonale des über u und c gebildeten Parallelogramms, wobei $c = u \sin \alpha$ ist, falls 2α den Öffnungswinkel des Kegels bezeichnet.

Da sich nun erfahrungsgemäß der Brennkegel am Brennerrohr stationär erhalten kann, so muß für jedes Flammenteilchen, das, vom Rand A des Kegels ausgehend, den Kegelmantel mit der Geschwindigkeit $u \cos \alpha$ entlang läuft und in der Spitze bei C verschwindet, unten am Rand des Kegels bei A ein neues entstehen; denn die Verbrennung allein treibt das Brennflächenelement nur mit der Geschwindigkeit $c \sin \alpha = u \sin^2 \alpha$ gegen die Strömung.

Die Erklärung für dieses Verhalten wurde schon vor längerer Zeit gegeben.[1] Da sie aber in der einschlägigen, hauptsächlich angelsächsischen Literatur meines Wissens kaum beachtet wurde und in dem die Physik und Chemie der Verbrennung zusammenfassenden, sehr verdienstvollen Buch von W. Jost, „Explosions-

[1] H. Mache, „Die Physik der Verbrennungserscheinungen", Leipzig 1918, S. 27 u. f.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

und Verbrennungsvorgänge in Gasen" (Berlin 1939) auf S. 78 als zweifelhaft hingestellt wird, mag es nicht überflüssig sein, im folgenden auf diese Frage noch einmal ausführlicher zurückzukommen.

Wir beschränken uns hiebei auf den Fall, daß ein Gasgemisch selbständig[1] oberhalb oder innerhalb eines Rohres brennt. Es kommen dann für die Erhaltung der in der Strömungsrichtung höher gelegenen Teile der Flamme drei verschiedene Arten von Zündstellen in Frage:

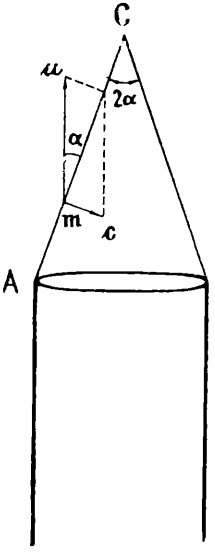

Fig. 1.

Die erste Art bilden Stellen, an denen brennbares Gasgemisch, vor der direkten Strömung geschützt, aber doch ständig aus ihr durch Wirbel und Diffusion ergänzt, sozusagen im „Totwasser" eines Drahtes oder des Rohrendes dauernd brennt. Die zweite Art besteht in glühendem Metall, das von der Flamme selbst erhitzt, zum Herd einer ständigen Zündung werden und so die Flamme erhalten kann. Als dritte Art einer Zündstelle können wir schließlich ein jedes auf der Strömung senkrechte Brennflächenelement ansehen. Da in ihm Strömungs- und Verbrennungsgeschwindigkeit gleich groß sind, kann es sich in der Strömung erhalten und als Zündstelle für höher gelegene und zur Strömung schräge Teile der Brennfläche wirken.

Doch besteht zwischen diesen Zündstellen dreierlei Art insofern ein Unterschied, als die der ersten oder zweiten Art an ihrer Stelle fixiert sind, während eine Zündstelle dritter Art in der Regel durch die geringste Änderung des Mischungsverhältnisses oder der Strömungsgeschwindigkeit mit den von ihr aus gezündeten Teilen der Brennfläche zur raschen Bewegung mit der Strömung oder gegen die Strömung veranlaßt wird.

Zündstellen der ersten und zweiten Art werden am einfachsten an der Flamme erläutert, die als verkehrter Brennkegel über oder an einem Draht brennt, der in der Achse des Brennerrohrs angebracht wird (Fig. 2). Soll diese Flamme in freier Luft

---

[1] Als unselbständig bezeichnen wir die Flamme eines schwach brennbaren Gemisches bei Verwendung einer zweiten, heißeren Flamme als Zündstelle. Solche Flammen sind in Luft bei gasarmen Mischungen leicht herzustellen. Sie erlöschen bei Entfernen der Zündflamme.

erhalten werden, so muß allerdings das aus dem Rohre strömende Leuchtgas-Luftgemisch einen beträchtlichen Luftüberschuß besitzen, damit die Entzündung nicht außen herabläuft und die Ausbildung des normalen, aufrechten Kegels eintritt. Innerhalb des Rohres oder in sauerstofffreier Atmosphäre lassen sich aber diese verkehrten Kegel auch noch bei gasreicherer Mischung ohneweiters erhalten.

Die Lage der Kegelspitze hängt hiebei vom Mischungsverhältnis ab. Bei sehr luftreicher, kalter Blauflamme schwebt die Kegelspitze 1 *mm* und mehr über dem Ende des Drahtes, der sich infolgedessen nicht erhitzt (Lage *a*). Hier wirkt eine Zündstelle erster Art. In der Spitze des Kegels, also im Totwasser hinter dem Draht, liegt eine brennende Wirbelstelle als Zündflamme, von der der Kegelmantel emporsteigt. Bei weiterer Zuführung von Gas nähert sich aber die Kegelspitze dem Draht, da die heißere Brennfläche schon aus größerer Nähe für den Wärmeverlust an den Draht aufzukommen vermag. Berührt sie schließlich bei weiterer Steigerung des Gasgehaltes das Ende des Drahtes (Lage *b*), so kommt dieser in Glut; der Kegel wandert sehr langsam nach abwärts in das Rohr hinein (Lage *c*). Jetzt ist eine Zündstelle der zweiten Art wirksam geworden. Die Kegelspitze befindet sich jeweils an der Stelle, wo der Draht, durch die Flammengase von oben her erhitzt, sich auf derjenigen Temperatur befindet, die für das Gas-Luftgemisch unter den gegebenen Verhältnissen als „Entzündungstemperatur" wirkt.

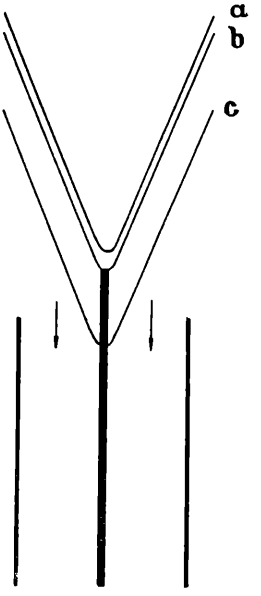

Fig. 2.

Eine Zündstelle dritter Art wird am einfachsten beobachtet, wenn man in einem nicht zu weiten Rohr die Strömungsgeschwindigkeit und das Mischungsverhältnis so einstellt, daß die Brennfläche ganz langsam zurückschlägt. Sie hat dann eine einem Wassermeniskus ähnliche Form: eine ebene Mitte mit zurückgebogenem Rand (Fig. 3). Diese Rückbiegung erklärt sich daraus, daß, zumal am Rand, ein ganz beträchtlicher Teil der sonst zur Fortpflanzung der Verbrennung verwendeten Wärme radial in das Rohr abfließt und hiedurch die Verbrennungsgeschwindigkeit in ähnlicher Weise erniedrigt wird, wie vor einem Davy'schen Drahtnetz. Außerdem steigt die Entzündungstemperatur. So wurde

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

z. B. für ein 20%iges Leuchtgas-Luftgemisch in einem Glasrohr von 7 *mm* Durchmesser in der Achse eine Verbrennungsgeschwindigkeit von 16 *cm/sec* beobachtet, während man aus dem über dem Rohr brennenden Kegel eine solche von 37 *cm/sec* ableitete. Obwohl die der Rohrwand benachbarten Schichten infolge der Reibung langsamer strömen als in der Mitte, ja die anliegende Schichte an der Rohrwand haftet, vermag also diese Wärmeabgabe an das Rohr nicht nur das Voreilen der Verbrennung in diesen langsamer strömenden Schichten zu verhindern; die Verbrennungsgeschwindigkeit wird vielmehr darüber hinaus so weit verringert, daß sich die Brennfläche sogar schrägstellt, wie überall, wo die Geschwindigkeit der Strömung die der Verbrennung übertrifft. An der Wand selbst wird schließlich die Kühlung so stark, daß dort überhaupt keine Zündung stattfindet. Daß unter diesen Umständen aus der Form der Brennfläche nicht auf die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt des Rohres geschlossen werden kann, liegt auf der Hand. Das ist nur dort möglich, wo die Verbrennungsgeschwindigkeit als konstant angenommen werden darf, wie das in der über dem Rohr brennenden Flamme wenigstens beiläufig der Fall ist.

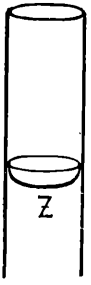

Fig. 3.

Es ist nun die tiefste, bei *z* gelegene Stelle der Brennfläche, von der hier die Zündung ausgeht und die höher gelegenen Teile der Flamme erhalten werden. Sie steht zur Strömung senkrecht und kann auch im kalten Rohr wenigstens zeitweise sich an Ort und Stelle erhalten, wenn dort die Geschwindigkeit der Strömung und die der Verbrennung einmal gerade gleich sind. Ist dies aber durch einige Zeit der Fall gewesen, so tritt eine Erscheinung ein, die man als „Hängenbleiben" der Flamme bezeichnen könnte. Es vermag nämlich jetzt selbst eine kleine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit die sonst so bewegliche Brennfläche weder nach oben noch nach unten zu treiben.

Der Grund für dieses Verhalten ist darin gelegen, daß sich oberhalb der stehenden Flamme das Rohr rasch stark erhitzt. Würde sich die Brennfläche heben, so käme sie an diese Stellen, an denen durch Vorwärmung des unverbrannten Gasgemisches die Verbrennungsgeschwindigkeit über die Strömungsgeschwindigkeit gesteigert wäre; die Brennfläche müßte wieder an die frühere Stelle zurückkehren. Ginge die Brennfläche hingegen nach unten, so käme sie an kühlere Stellen des Rohres und würde wieder in die Höhe gehoben. So wird die einmal hängen-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

gebliebene Flamme nur in dem Maße sehr langsam nach unten wandern, in dem sich das Rohr durch Wärmeleitung in dieser Richtung erhitzt.[1]

Nach dieser Vorbereitung sind wir nun imstande zu verstehen, wie auch der aufrechte Kegel stationär zu brennen vermag. Brennt er auf dem Rohr, so schwebt er hiebei in der Regel knapp oberhalb des Rohrrandes, über den er aber bei *z* ringsum etwas hinausgreift (übertrieben gezeichnet, Lage *a*). An dieser geschützten Stelle wird durch mechanische Mischung und Diffusion zwischen dem aus dem Rohre strömenden Gemisch und der außen hochsteigenden Luft ein Ring brennenden Gases erhalten, der als Zündstelle erster Art für die höher gelegenen Teile der Brennfläche dient. Bei der Bildung dieser Zündstelle mag auch der Umstand mitwirken, daß durch den Rückdruck der in der Brennfläche beschleunigten Verbrennungsgase der Gasdruck innerhalb des Kegels über den der umgebenden Luft meßbar erhöht ist und so durch den zwischen Kegelbasis und Brennerrand vorhandenen Spalt unverbranntes Gasgemisch zu entweichen sucht.[2]

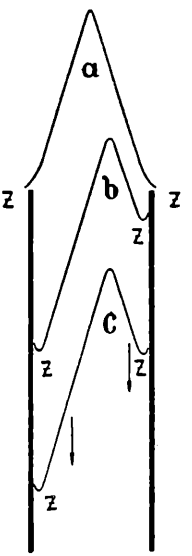

Fig. 4.

Aber auch hier kann, wie im Fall des Drahtes (Fig. 2), bei entsprechendem Mischungsverhältnis oder geringerer Strömungsgeschwindigkeit der Rand des Kegels dem des Rohres so nahe kommen, daß sich dieses stark erhitzt. Durch die jetzt erfolgende Vorwärmung des Gasgemisches wird dann die Verbrennungsgeschwindigkeit am Kegelrand bis auf die Strömungsgeschwindigkeit einer der peripheren Schichten im Rohr erhöht. Es kann unter diesen Umständen die Flamme auch im Rohr brennen (Lage *b*), wobei der Kegel durch den Rückdruck der abströmenden

[1] Man macht den Versuch in einem langen Rohr (das Ende aus Glas), in welches Leuchtgas und Luft aus Gasometern durch eine Mischkammer einströmen. Stellt man einen niedrigen, grünen Brennkegel her und sperrt die Luftzufuhr plötzlich ab, so wird das im langen Rohr enthaltene Gasgemisch nur mehr mit der geringeren Geschwindigkeit hinausgeschoben, mit der das Leuchtgas allein nachströmt. Bei entsprechender Wahl der Kegelhöhe wandert dann die Brennfläche als „Meniskus" ganz langsam in das Rohr und bleibt an jeder Stelle hängen, die man durch Vorwärmen des Rohres mittels einer kleinen Gebläseflamme vorher bestimmt hat. Erst das nachströmende reine Leuchtgas hebt die Flamme wieder auf das Rohrende.

[2] Diese Anschauung steht allerdings mit der von Ubbelohde und Koelliker (Gas- und Wasserfach, *59*, 49, [1916]) im Widerspruch, die umgekehrt annehmen, daß durch diesen Spalt Außenluft unter den Kegel einströmt.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

im Rohr an der freien Ausdehnung und Querschnittsvergrößerung gehinderten Flammengase unsymmetrisch wird. Gewöhnlich springt oder vibriert die Flamme unter Entwicklung eines brummenden Geräusches eine Zeitlang zwischen den Lagen *a* und *b*, bis sie dauernd in das Rohr tritt. Man kann dieses Eintreten aber auch beschleunigen und Flammen in das Rohr bringen, die von selbst nicht eintreten würden, indem man das Ende des Rohres anheizt. Natürlich verläßt bei einseitigem Anheizen der Kegel den Rand an der Heizstelle zuerst.

Fig. 5.

Die genauere Betrachtung (in einem Rohr aus „Supremax"-Glas) zeigt, daß hiebei der Rand dieses einseitigen Kegels ringsherum genau so aufgebogen ist, wie der des Flammenmeniskus in Fig. 3. Es setzt also auch hier in den peripheren Schichten die radiale Wärmeabgabe an das Rohr die Verbrennungsgeschwindigkeit stärker herab, als dort die Strömungsgeschwindigkeit durch die Reibung herabgesetzt wird. Wieder sind es die tiefsten Stellen bei *z*, in denen die Brennfläche auf der Strömung senkrecht steht, die sich in der Strömung erhalten können und von denen aus die übrigen Teile der Brennfläche ständig gezündet und erneuert werden.

Hat die Flamme einige Zeit im Rohr gebrannt, so beginnt sie langsam nach unten zu wandern, wobei das Rohr am jeweiligen Standort der Flamme in Glut kommt. Es mag sich hiebei die Zündstelle der Rohrwand noch weiter nähern, ja sie erreichen, falls sich das Rohr bis zu der hier geltenden Entzündungstemperatur erhitzen kann.

Keinesfalls ist also die Tatsache, daß ein Brennkegel nicht nur auf, sondern auch in einem Rohr sich stationär erhalten kann, im Widerspruch mit der Auffassung, daß die Flamme am Rand des Brennkegels ständig neu gezündet werden muß. Es darf nur nicht übersehen werden, daß es sich hiebei um Zündstellen ganz verschiedener Art handelt: bei einem auf dem Rohr brennenden Kegel um Zündstellen erster Art, bei dem innerhalb des Rohres brennenden Kegel um Zündstellen dritter, gegebenenfalls zweiter Art.

Aber auch der Einwand, daß sich stationäre Kegel auf einem Rohr in einer Atmosphäre brennen lassen, die keinen Sauerstoff enthält, kann leicht durch Überprüfung der Verhältnisse entkräftet werden, unter denen dies der Fall ist.

Hiezu kann ein Teclu'sches Flammenspaltrohr verwendet werden, wie es in Fig. 5 dargestellt ist. Es zeigt sich dann, daß vor allem die Blauflammen, also die Flammen von Gemischen mit Luftüberschuß, auf dem Innenrohr ruhig brennen. Das kann nicht überraschen, da die Verbrennungsprodukte solcher Flammen noch unverbrannten Sauerstoff enthalten. So kann sich knapp über dem Brennerrand an geschützter Stelle zwischen dem strömenden Gasgemisch und dem sauerstoffhaltigen Verbrennungsprodukt sehr wohl ein Ring brennenden Gemisches bilden und erhalten, von dem der Brennkegel dann emporsteigt.

Wenn es sich nun aber zeigt, daß nicht nur die Blauflammen, sondern auch Gemische höchster Brennbarkeit, ja selbst solche mit einem geringen Leuchtgasüberschuß noch immer auf dem Innenrohr stationäre Brennkegel bilden können, die sich nicht abheben, so ergeben sich auch daraus für unsere Erklärung keine Schwierigkeiten. Wohl brennt jetzt die Flamme in einer sauerstofffreien Atmosphäre. Aber es geht hier um die Zumischung von sauerstofffreien Gasen zu einem noch höchst brennbaren Gemisch! Das Gemisch bleibt darum auch noch brennbar, wenn es sich mit den sauerstofffreien Flammengasen gemischt hat. Es ist nur nötig, daß in der ringförmigen Mischungszone am Brennerrand gut brennbares Gemisch vorhanden ist und so stark abgebremst wird, daß der brennende Ring sich erhält.

Fig. 6.

Führt man durch den gut passenden Kork, der den Boden des Spaltrohres bildet, ein Glasröhrchen, so daß man fremde Gase in das Außenrohr einleiten kann — wobei man durch Abbiegen des Glasröhrchens und durch einen Pfropfen aus Asbestwolle das einströmende Gas beruhigt —, so kann man die Stabilität des Brennkegels am Innenrohr auch in anderen Atmosphären als in der des Verbrennungsproduktes untersuchen. Es zeigt sich dann, daß auch in einer CO_2-Atmosphäre der Kegel am Innenrohr brennt, und zwar zwischen nahezu gleichen Grenzen, wie in dem unten geschlossenen mit den Flammengasen gefüllten Spaltrohr. Kleine Unterschiede sind aber vorhanden. Während sich die Flamme in CO_2 bei 28·6 Volumsprozent Leuchtgasgehalt abhebt, kann sie im Flammengas auch noch bei 30% am Innenrohr erhalten werden.

Läßt man im Außenrohr Luft oder Leuchtgas strömen, so erhält man Flammen, deren Formen und Farben von der Zu-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

sammensetzung des vom Innenrohr aufsteigenden Gemisches abhängen. So bildet sich z. B. in einem Spaltrohr, dessen Röhren 1 bzw. 2 *cm* weit sind, wenn außen langsam Luft und innen ein 30%iges Leuchtgas-Luftgemisch mit einer Geschwindigkeit von 170 *cm/sec* emporsteigt, eine Flamme der in Fig. 6 wiedergegebenen Form: am Innenrohr ein violetter, becherförmiger Teil, aus dem der grünblaue, in der Spitze hellgrün leuchtende Kegel emporsteigt, der besonders im oberen Teil von einem rötlichen Flammenmantel umgeben wird. Beträchtlich über dem Rohr schwebt schließlich ein blauer, unten offener Kegel von geringer Helligkeit, in dem das noch unverbrannte Leuchtgas in der Außenluft verbrennt und der in der Regel gesondert gezündet werden muß. Hier steigen also von der ringförmigen Zündstelle über dem Innenrohr zwei Brennflächen auf: die eine kegelförmige, in der das Gasgemisch verbrennt, und die andere becherförmige, in der das noch brennbare, den Gasüberschuß enthaltende Flammengas mit der im Außenrohr aufsteigenden Luft zusammentrifft.

Doch brauchen diese Erscheinungen hier nicht weiter beschrieben zu werden. Es genügt zu bemerken, daß in Luft die Flammen mit Gasüberschuß, in Leuchtgas die mit Luftüberschuß fest am Innenrohr sitzen, während im ersten Fall die mit Luftüberschuß, im zweiten Fall die mit Gasüberschuß die Tendenz haben, sich vom Innenrohr abzuheben und stabil nur in oder über dem Außenrohr zu brennen sind. Das ist, wie man leicht überlegt, in voller Übereinstimmung mit der für das Erhalten der Flamme auf dem Brennerrohr gegebenen Erklärung.

Eine leicht zu deutende Erscheinung beobachtet man auch, wenn man im mit Flammengas gefüllten, also unten geschlossenen Spaltrohr dem am Innenrohr brennenden Gemisch so viel Leuchtgas zusetzt, daß der Kegel sich gerade vom Innenrohr abhebt und auf dem Außenrohr brennt. Er bleibt dann dort nur so lange, bis die Flammengase verdrängt sind und das Außenrohr sich mit dem nachströmenden brennbaren Gemisch gefüllt hat. Ist das geschehen, so kehrt er für kurze Zeit auf den Rand des Innenrohres zurück. Dieser Vorgang spielt sich immer wieder ab, und zwar in regelmäßiger, von der Strömungsgeschwindigkeit des brennbaren Gemisches abhängiger Periode.

Dieselbe Erscheinung zeigt übrigens auch die Blauflamme, deren Luftüberschuß so weit gesteigert wird, daß sie sich vom Innenrohr abhebt. Nur muß jetzt über dem Außenrohr eine Zündflamme angebracht werden, da sie oben selbständig nicht mehr brennen kann.

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

Artikel/Article: Wie erhält sich die Flamme auf dem Brennerrohr? 109-116