

DK 662.612.3:536.46:662.612.324

## Die Länge turbulenter Diffusionsflammen

Von RUDOLF GÜNTHER, Karlsruhe

(Vortrag auf der 38. Glastechnischen Tagung am 13. Mai 1964 in Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 16. Juli 1964)

Die Länge turbulenter Flammen läßt sich nach den Grundsätzen der Mischung von Freistrahlen mit der Substanz ihrer Umgebung vorausberechnen. Dabei ergibt sich eine mittlere Länge, aus der man für die Bedürfnisse des Ofenbetriebes eine maximale Länge berechnen kann. An Hand einiger Beispiele von eigenen und fremden Messungen wird die Anwendung dieser Verfahren gezeigt.

Experimentell kann man Flammenlängen photographisch oder durch Gasanalyse bestimmen. Die Durchführung beider Verfahren wird dadurch erschwert, daß gegen Ende der Flammen die Reaktionen langsam abklingen. Beim analytischen Verfahren ist bei höheren Temperaturen die Dissoziation zu berücksichtigen. Diese bewirkt, daß keine der in der Flamme enthaltenen Substanzen den Gehaltswert Null erreichen. Dadurch wird die Messung erschwert.

### 1. Bedeutung der Flammenlänge

Wer Gelegenheit hatte, generatorgasgefeuerte Glasmelzwanen im Betrieb zu beobachten, wird sich daran erinnern, daß Nachverbrennungen von Gas in den Regenerativkammern der abziehenden Ofenseite zu den alltäglichen Erscheinungen gehörten. Um sie nachzuweisen, brauchte man nicht einmal ein Analysengerät, sondern man konnte mit bloßem Auge am Leuchten einzelner Strahlen des Gasstromes erkennen, daß Verbrennungen stattfanden. Offensichtlich waren diese Flammen länger als der im Oberofen vorgesehene Flammenweg.

Eine exakte quantitative Voraussage des Verlaufs der Mischung von Brennstoff und Luft ist bisher noch nicht möglich. Der Mischungsgrad nimmt mit Fortschreiten der Länge der Flamme immer langsamer zu. Bei sehr langen Flammen genügt unter Umständen die im Vormischraum und im Oberofen verfügbare Strecke nicht zum völligen Ausbrand.

Außer dem großen Zeitbedarf der Mischung kann ein zweiter Vorgang zu Nachverbrennungen führen: Die Dissoziation, d. h. die Tatsache, daß die Verbrennungsreaktionen bei Temperaturen über 1500 °C aus Gründen des chemischen Gleichgewichts außer CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O auch CO und H<sub>2</sub> liefern. Bei langsamer Abkühlung in Gegenwart von Luft verbrennen die Anteile von CO und H<sub>2</sub> allmählich, ggf. erst in den Regeneratoren. Auch dieser Vorgang führt zu einer Verlängerung der Flamme.

### 2. Theoretische Behandlung

Das wichtigste Hilfsmittel zur systematischen Behandlung der Vorgänge in Flammen ist der Begriff des Freistrahls. Die Mischungsvorgänge von Gasstrahlen, die aus einer vorzugsweise runden Düsenöffnung in eine ruhende Umgebung austreten, sind von der Strömungslehre eingehend behandelt worden. Insbesondere wurde gezeigt, daß der Verlauf der Geschwindigkeit längs der Strahlachse für alle Strahlen einem einheitlichen

Gesetz gehorcht. Zunächst bleibt die Geschwindigkeit in der Nähe der Düse eine kurze Strecke weit konstant, da hier der Mischungsvorgang noch nicht bis zur Strahlachse vorgedrungen ist. Nach einem kurzen Übergangsstück nimmt die Geschwindigkeit nach einem hyperbolischen Gesetz ab. In Bild 1 ist die Ge-

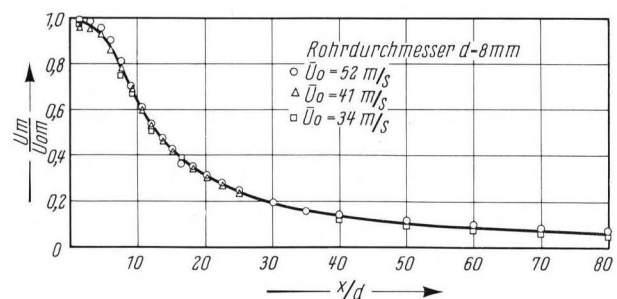


Bild 1. Geschwindigkeitsverlauf längs der Achse eines Freistrahls.

Für  $x/d > 30$  fallen  $\Delta$ - und  $\circ$ -Kurve zusammen.

schwindigkeit auf der Achse über dem Weg in dimensionsloser Form dargestellt. Die Kurve bezieht sich auf die Ausströmung aus einem Rohr, hierbei setzt der Geschwindigkeitsabfall schneller ein als bei einem Düsenstrahl.

Die Konzentration der Strahlsubstanz ändert sich längs der Strahlachse in ähnlicher Weise. Aus dieser Konzentrationskurve kann man eine Aussage über die Länge von Flammen herleiten, wenn man voraussetzt, daß die Gesetze des Freistrahls auch für die brennende Flamme gelten. Da die Verbrennungsluft vom Strahlrand her zur Achse vordringt, wird die stöchiometrische Mischung von Brennstoff und Luft an allen Punkten außerhalb der Strahlachse früher erreicht als auf der Achse selbst. Wenn also auf der Achse stöchiometrisches Gemisch herrscht, ist die Mischung und damit in vielen Fällen praktisch auch die Verbrennung beendet.

Durch Versuche wurde gezeigt, daß sich die Vorgänge in der brennenden Flamme von denen im Freistrah unterscheiden. Die Hauptgründe dafür sind die Dichteänderungen längs des Flammenweges und die Tatsache, daß technische Flammen in geschlossenen Räumen brennen, wo ihnen im Gegensatz zum Freistrah Verbrennungsluft nicht in beliebiger Menge zur Verfügung steht, sondern nur soviel, als man von außen in den Ofen einführt. Beide Einflüsse verlangsamen den Mischungsvorgang. Die geringe Dichte und die entsprechend größeren Volumina der heißen Rauchgase verändern die Geschwindigkeits- und Massenverteilung. Die Begrenzung der Luftzufuhr auf das wärmewirtschaftlich zweckmäßige Maß führt dazu, daß außer Verbrennungsluft auch Rauchgas in die Flamme eingesaugt wird, wodurch sich wiederum die Mischung verzögert.

Diese beiden Vorgänge berücksichtigt man bis jetzt durch einen konstanten Faktor, da noch nicht genügend Versuchswerte vorliegen, um z. B. den Einfluß der verschiedenen Feuerraumquerschnitte auf das Zurückströmen von Rauchgas in der Umgebung der Flamme vorauszusagen.

Nach diesen Überlegungen kann man die Flammenlänge aus der Formel für den axialen Abfall der Konzentration in einem Freistrah herleiten. Diese lautet:

$$c = c_0 \cdot \frac{5,3}{x/d_0} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_1}}$$

Hierin bedeutet  $c_0$  die Brennstoffkonzentration an der Düse und  $c$  die Brennstoffkonzentration an einem beliebigen Punkt der Strahlachse. Bei Gasbrennern ohne Vormischung ist  $c_0 = 1$ ,  $x$  ist die Längskoordinate,  $d_0$  der Düsendurchmesser,  $\rho_0$  und  $\rho_1$  die Dichte des Brennstoffes, bzw. der Umgebung des Strahls.  $x$  wird gleich der Flammenlänge  $L$ , wenn  $c$  die Konzentration angibt, die bei stöchiometrischer Mischung herrscht. THRING gibt an, daß für Flammen statt des am kalten Freistrah gemessenen Faktors 5,3 etwa der Wert 6 zu setzen sei, und daß man als Umgebungsdichte die mittlere Dichte der Flammengase einzusetzen habe. Setzt man außerdem statt der stöchiometrischen Konzentration des Gases den in der Feuerungstechnik üblichen stöchiometrischen Luftbedarf ein, und zwar als Massenverhältnis ausgedrückt, so kommt man auf die Formel für die Flammenlänge. Diese lautet:

$$L = 6 \cdot (l_0 + 1) \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_f}} \cdot d_0$$

Für einen bestimmten Brennstoff sind  $l_0$  und  $\rho_0$  Konstanten. Nimmt man außerdem an, daß auch die Dichte der Flammengase für alle Flammen eines Brennstoffes eine Konstante ist, so bleibt als Variable nur der Düsendurchmesser. Man erhält dann z. B. für Koks-ofengas

$$L = 110 \cdot d_0$$

und für Erdgas

$$L = 190 \cdot d_0$$

Man kann also voraussagen, wie sehr sich die Länge einer Flamme bei Veränderung des Düsendurchmessers verändert und besitzt damit ein einfaches Hilfsmittel, freistrahlarig brennende Flammen zu verlängern oder zu verkürzen. Eine Verkürzung ist allerdings nur möglich, wenn genügend Vordruck zur Verfügung

steht, um die für kleine Durchmesser nötigen Geschwindigkeiten zu erzeugen. Bei Generatorgas ist der Vordruck gering, deshalb erhält man mit diesem Brennstoff sehr lange Flammen.

Die zur Berechnung von Freistrahlen benützten Methoden liefern Mittelwerte der Geschwindigkeit und der Konzentration. Durch die Besonderheiten der turbulenten Mischung in Flammen entspricht der Mittelwert der Mischung nicht dem Mittelwert des Ausbrandes, wie schon früher gezeigt wurde [1]. Dementsprechend kann man auch eine mittlere und eine maximale Flammenlänge definieren. Diese beiden Werte unterscheiden sich etwa um den Faktor 1,3. Die oben genannte Gleichung liefert die maximale Flammenlänge. Die mittlere Länge liegt demgemäß z. B. für Koks-ofengas bei etwa 85 Düsendurchmessern.

Außer den axialen Verteilungen läßt sich in Freistrahlen auch die radiale Verteilung der Geschwindigkeit und der Konzentration voraussagen. Die radiale Geschwindigkeitsverteilung wird in dimensionsloser Darstellung in Bild 2 gezeigt. Diese Verteilungskurve

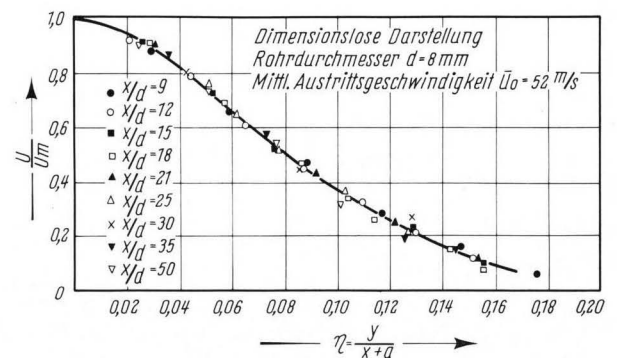


Bild 2. Geschwindigkeitsverteilung senkrecht zur Achse eines Freistrahls.

gilt für den gesamten Bereich des Strahles mit Ausnahme der sog. Kernzone, in welcher die Geschwindigkeit auf der Achse noch konstant ist.

Mit Hilfe dieser Verteilungskurven lassen sich die Mischungsverhältnisse im gesamten Bereich des Strahles bestimmen, so daß man in der Lage ist, den Verlauf der Verbrennung vorauszusagen. Auch die radiale Verteilung wird durch den Verbrennungsvorgang verändert und weicht bei Strahlen, die in Feuerungen brennen, vor allem zum Flammenende hin von der in freier Umgebung herrschenden ab.

Schon eingangs wurde geschildert, daß das Flammenende aus mehreren Gründen nicht ganz leicht zu definieren ist. Deshalb wird gelegentlich vorgeschlagen, durch Übereinkunft einen bestimmten Ausbrand, z. B. 0,98, als Flammenende festzulegen.

### 3. Messung der Flammenlänge

Die wichtigsten Hilfsmittel zur Bestimmung der Flammenlänge sind die Photographie und die Analyse. Die Photographie stützt sich auf die Tatsache, daß alle technischen Verbrennungsvorgänge mit Leuchterscheinungen verbunden sind. Die sichtbare Strahlung geht entweder von Rußteilchen aus, welche die bei der Reaktion von Gasen freierwirdende Wärme aufnehmen und weiterstrahlen oder von einigen instabilen Zwischen-

produkten, die bei allen Verbrennungsreaktionen vorkommen. Sehr schwache Leuchterscheinungen am Flammenende können zwar der Photographie bei kurzer Belichtung entgehen, jedoch hat die Erfahrung gezeigt, daß hierdurch nur sehr geringe Fehler auftreten. Auch die Unterschiede zwischen mittlerer und maximaler Länge turbulenter Flammen ist photographisch zu erfassen. Langzeitaufnahmen mit z. B. 10 Sekunden Belichtungsdauer liefern die gesamte Länge der Flammen. Die mittlere Länge läßt sich aus dem Mittelwert aus einer Reihe von Kurzaufnahmen gewinnen.

Auf analytischem Wege findet man die maximale Länge durch Analyse eines kennzeichnenden Bestandteils, gewöhnlich von CO. Die mittlere Länge kann man analytisch nur finden, wenn man sowohl die brennbaren Bestandteile wie den Sauerstoff erfäßt, um daraus den Mischungszustand zu berechnen.

Man könnte erwarten, daß die Messung des Temperaturverlaufs und des Verlaufs der Wärmeabgabe längs des Flammenweges weitere Aussagen über die Länge von Flammen liefern. Bild 3 zeigt Meßergebnisse von

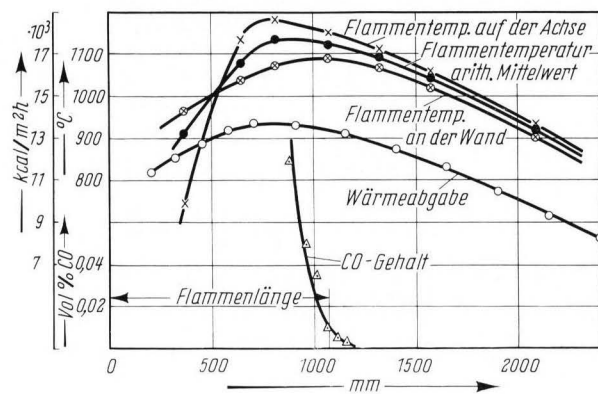


Bild 3. Wärmeabgabe, Temperaturverlauf und Länge einer Ölflamme.

einer Ölflamme, an welcher die genannten Größen bestimmt wurden. Man erkennt, daß das Flammenende, ausgedrückt durch einen CO-Gehalt von 0,02%, außerhalb des Bereiches der Maxima von Temperatur und Wärmeabgabe liegt. Der Bereich des Flammenendes ist auf den Kurven der Temperatur- und der Wärmeabgabe nicht besonders ausgezeichnet. Hierin drückt sich die Tatsache aus, daß die Wärmeentwicklung zum Flammenende hin nur langsam abklingt und daß sich der Mechanismus der Wärmeabgabe nach außen in diesem Bereich grundsätzlich nicht ändert. Sowohl die Temperatur wie die Wärmeabgabe der Flammen hängen nicht nur vom Verbrennungsverlauf, sondern auch von den Verhältnissen in der Umgebung der Flammen ab und sind deshalb als Maß zur Bestimmung der Flammenlänge nur bedingt geeignet.

#### 4. Anwendung auf Glasschmelzwannen

Prüft man, ob sich die Freistrahlbetrachtung auf Glasschmelzwannen anwenden läßt, so muß man zunächst festhalten, welche Hauptformen von Brennern bei diesen Öfen vorkommen. Diese sind in Bild 4 dargestellt. Bild 4a zeigt als Vergleichsgrundlage den in einem Ofenraum eingeschlossenen Einzelstrahl, die Bilder 4b bis 4e die wichtigsten Brennerkonstruktionen.

Bei der ältesten Form, dem Generatorgasbrenner (Bild 4b), hat man es nicht mit einem Einzelstrahl des Brennstoffs in einer Umgebung ruhender oder sehr langsam fließender Luft zu tun, wie etwa bei Bild 4a, sondern mit zwei etwa gleich schnellen Strahlen von Brennstoff und Luft. Diese Strahlen vermischen sich an ihrer Berührungsfäche und saugen an ihren freien Außenflächen Rauchgas

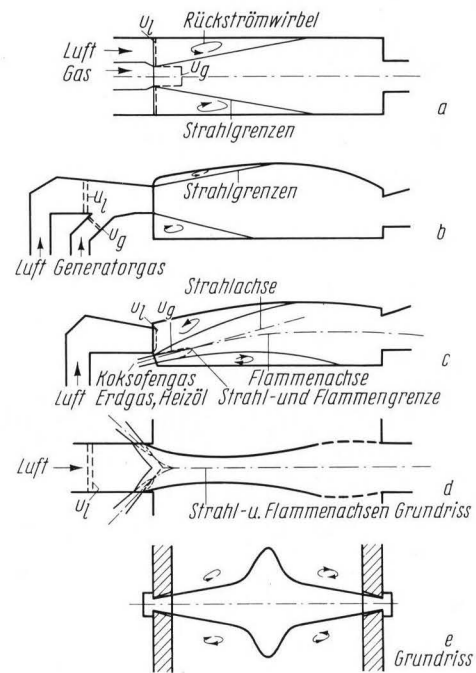


Bild 4. Flammenanordnung bei Glasschmelzöfen.

- a. Strahl in geschlossenem Raum (Schema),
- b. Generatorgas-Brenner,
- c. Unterbankbrenner für Erdgas und Öl,
- d. seitliche Zufuhr von Koksofengas und Erdgas,
- e. Brenner des Unit Melters.

ein. Eine Betrachtung nach den Gesichtspunkten des Einzelstrahles ist deshalb nicht ohne weiteres möglich, zumal bei dem großen Durchmesser des Brenners der Ähnlichkeitsbereich eines Strahles erst gegen Ende des Ofenraumes beginnt. Für das Studium des Mischungsverlaufes ist man in diesem Fall auf Modellversuche angewiesen. Solche sind mehrfach durchgeführt worden, z. B. von RENNER [2] und von WILHELM [3]. Auch die ältesten Modellversuche auf dem Gebiet der Feuerungen, nämlich die von RUMMEL [4], bezogen sich auf Generatorgasbrenner, bei denen flache Strahlen ähnlicher Geschwindigkeit unter verschiedenen Winkeln aufeinandertreffen.

Wenn auch auf diese Ausführung die an Einzelstrahlen gewonnenen Erkenntnisse nicht ohne weiteres zu übertragen sind, so gilt doch auch hier der allgemeine Grundsatz, daß mit zunehmendem Strahlimpuls die Flammenlänge geringer wird. Allerdings läßt sich dieses Prinzip bei Generatorgasbrennern nicht unmittelbar ausnutzen, da der Generatorgasdruck, vor allem wegen der geringen Dichtigkeit der Gaskammern, nicht in dem Maß erhöht werden kann, wie es für eine entscheidende Steigerung der Geschwindigkeit und damit des Strahlimpulses nötig wäre. Hinzu kommt, daß der Brennerquerschnitt auch der Abgasströmung Rechnung tragen

muß. Trotzdem hat man in Frankreich an Siemens-Martin-Öfen versucht, den Strahlimpuls von Generatorgasbrennern zu steigern. Man führte zu diesem Zweck Preßluft in den Gas- oder Luftstrom ein und konnte damit die Flamme merklich verkürzen.

Bei Betrieb mit Koksofengas, Erdgas oder Heizöl liegen die Verhältnisse völlig anders. Diese Brennstoffe führt man durch Düsen unter hoher Geschwindigkeit in den Feuerraum ein. Dabei liegt die Geschwindigkeit des Brennstoffstromes zum Teil wesentlich höher als die der Luft, so daß die Vorbedingung des Freistrahls erfüllt ist. Dies gilt besonders für die Ausführung nach Bild 4c, wie man sie für Erdgas und für Öl verwendet. Der Brennstoff wird in einem oder mehreren Strahlen schräg von unten her in den Luftstrom eingeblasen. Im Gegensatz zu Bild 4a ist dabei die Strahlachse nicht gerade, sondern durch die Neigung der beiden Ströme gegeneinander und durch die Form des Ofenraumes etwas gekrümmt. Trotzdem ist es aber möglich, diese Vorgänge auf das Freistrahprinzip zurückzuführen. Wenig geklärt sind dabei die Besonderheiten, die durch das Zusammenwirken zweier oder mehrerer benachbarter Einzelstrahlen entstehen, wie sie bei vielen Wannen vorliegen.

Die seltenere Einführung des Öl- oder Gasstromes vom Gewölbe her ist in Bild 4 nicht gezeigt. Sie führt zu ähnlichen Verhältnissen, wie sie in Bild 4c wieder gegeben sind.

Die Ausführung in Bild 4d wird vorwiegend für Koksofengas verwendet und ist in Europa auch für Erdgas im Gebrauch. Ein oder mehrere Paare von Gasdüsen werden von der Seite her in einem Winkel von 30 bis 45° zur Brennerachse eingeführt. Man hat es dabei mit einer Anzahl von Einzelstrahlen zu tun, die in der Brennerachse paarweise zusammentreffen. Dabei werden Brennstoff und Rauchgas unter starker örtlicher Mischung mit Luft in die Brennerachse umgelenkt. Sie bilden im weiteren Verlauf einen Einzelstrahl. Die Anfangsteile der Flammen gehorchen den Freistrahgrundätzen, ebenso der schließlich entstehende Einzelstrahl. Der Vorgang des Zusammentreffens der Strahlen, welcher zugleich die Anfangsbedingungen für den Einzelstrahl liefert, kann nur durch Modellversuche beschrieben werden.

Im letzten Teil des Bildes 4e ist die Flammenanordnung des Unit Melter dargestellt. Dieser unterscheidet sich von den bisher behandelten Fällen nicht so sehr durch das axiale Auftreffen zweier Strahlen aufeinander, sondern dadurch, daß mit vorgemischten Flammen gearbeitet wird. Brennstoff und Luft werden bereits im Brenner miteinander vermischt. Der Brennerstrahl saugt also nicht Verbrennungsluft aus seiner Umgebung an, sondern Rauchgas. Die Länge der Strecke, die er für den Ausbrand benötigt, ergibt sich dadurch, daß die Mischung im Brenner nicht vollkommen ist und daß auch für den Zünd- und Reaktionsvorgang eine gewisse Strecke gebraucht wird. In der Nähe des Auftreffpunktes wird die Verbrennung auf kleinem Raum zu Ende geführt, es entsteht eine Flammenscheibe. Der sonst übliche langsame Ausbrand am Flammenende wird auf diese Weise vermieden.

Alle bisherigen Betrachtungen gingen davon aus, daß der Zeitbedarf der Zündvorgänge und Verbren-

nungsreaktionen gering ist im Vergleich zum Zeitbedarf der Mischung. Diese Voraussetzung ist bei gasbeheizten Wannen mit Sicherheit erfüllt. Bei der Ölfeuerung gelten jedoch Einschränkungen, da zur Verdampfung und Vergasung der Öltropfen eine größere Wärmemenge nötig ist, deren Zufuhr eine gewisse Zeit benötigt. Im Anfangsteil der Flamme muß deshalb ein zeitlicher Abstand zwischen Mischung und Verbrennung bestehen. Da dieser Teil der Flamme vielfach in den Brennerhals verlegt wird, besitzen diese Unterschiede keine entscheidende technische Bedeutung. Wichtiger ist, daß bei schwerem Heizöl nur die leichtflüchtigen Anteile, die entweder im Öl bereits vorhanden sind oder bei der Erwärmung durch Spaltung entstehen, mit geringem Zeitbedarf verbrennen können. Für den Rußanteil dagegen wird, wie insbesondere MASDIN [5] gezeigt hat, wesentlich mehr Zeit benötigt.

### 5. Länge verschiedener Ölflammen

An Hand von zwei Beispielen wird nachstehend gezeigt, in welchem Maß die Länge von Ölflammen durch den Impuls der aus dem Brenner austretenden Ströme und durch die Form des Feuerraumes beeinflusst wird. Für diese Untersuchung wurden die beiden Zerstäuber benutzt, die in den Bildern 5 und 6 gezeigt sind.

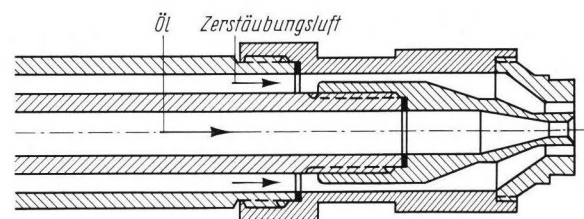


Bild 5. Preßluftzerstäuber, System Körting, (Schema).

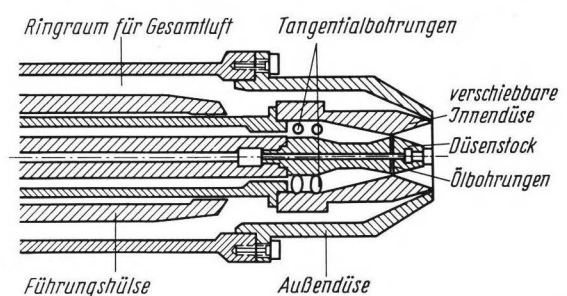


Bild 6. Niederdruckzerstäuber, System Hauck, (Schema).

Bild 5 zeigt einen Preßluftzerstäuber, System Körting. Bei den Versuchen wurden ihm 6,5% der Verbrennungsluft als Zerstäubungsluft unter einem Druck von 2,6 atü zugeführt. Daneben wurde ein Niederdruckbrenner nach Bild 6, System Hauck, benutzt. Er arbeitete mit einem Luftdruck von 0,15 atü. Beide Zerstäuber wurden in kalorimetrische Brennstrecken von 16 dm<sup>2</sup> Querschnitt eingebaut. Zwei Brennstrecken gleicher Querschnittsflächen standen zur Verfügung; die eine davon hatte kreisrunden, die andere quadratischen Querschnitt. Es wurde mit einem Leichtöldurchsatz von 11 kg/h bei einer Luftzahl von 1,15 gearbeitet.

Zum Vergleich der beiden Zerstäuber wurde die runde Brennstrecke verwendet. Die Ergebnisse der

Messungen sind in den Bildern 7 und 8 wiedergegeben. Die Flammenlänge wurde jeweils aus dem CO-Gehalt bestimmt. Dieser wurde mit dem Ultrarotabsorptionsschreiber (URAS) in der Flammenachse gemessen. Die niedrigen Konzentrationen, die im Bereich des Flammenendes vorliegen, sind in den Bildern 7 und 8 eingetragen. Ein CO-Wert von 0,02% wurde als Flammenende definiert. Diese Größe erwies sich aus Gründen der Meßtechnik und der Auswertung als zweckmäßig. Sie entspricht einem Ausbrand von mehr als 0,99.

Man erkennt, daß die Flamme des Preßluftzerstäubers etwa 1,75 m lang ist, die des Niederdruckzerstäubers etwa 0,8 m lang ist, die des Niederdruckzerstäubers

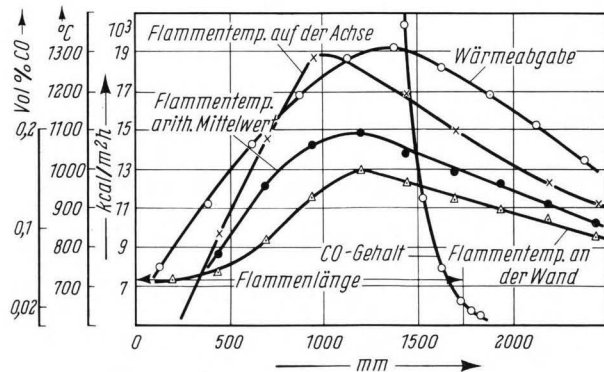


Bild 7. Flamme des Preßluftzerstäubers, Länge und Wärmeabgabe (runder Brennkanal). Körting-Brenner. Kanal rund, 11 kp/h,  $\lambda = 1,15$ .

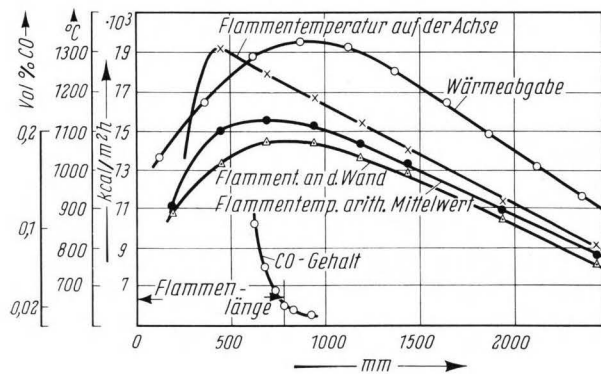


Bild 8. Flamme des Niederdruckzerstäubers, Länge und Wärmeabgabe (runder Brennkanal). Hauck-Brenner. Kanal rund, 11 kp/h,  $\lambda = 1,15$ .

bers dagegen nur 0,8 m. Der Unterschied erklärt sich daraus, daß dem Niederdruckzerstäuber die gesamte Verbrennungsluft unter erhöhtem Druck und mit entsprechend größerer Geschwindigkeit zugeführt wurde. Der Strahlimpuls des gesamten Brennerstromes betrug beim Preßluftzerstäuber 0,1 kp, beim Niederdruckzerstäuber dagegen 0,46 kp. Da die Flammenlänge umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Strahlimpuls ist, erkennt man, daß auch in diesem Fall Versuch und Rechnung mit sehr guter Genauigkeit übereinstimmen. Die Flammenlängen stehen nämlich im Verhältnis 1:2,19, der Impulsvergleich führt zu dem Verhältnis 1:2,14.

In den Bildern 7 und 8 ist außer der Flammenlänge auch die Wärmeabgabe längs des Flammenweges eingetragen und außerdem der Verlauf der Temperaturen längs der Flamme. Die Temperaturen wurden sowohl an der Wand gemessen wie in der Flamme selbst. Zur Messung in der Flamme wurden Absaugthermoelemente

benutzt, die jeweils an einer Reihe von Punkten senkrecht zur Flammenachse die dort herrschende Temperatur feststellten. In den Bildern ist die Temperatur auf der Flammenachse wiedergegeben und außerdem ein Mittelwert, welcher in erster Annäherung einer Durchschnittstemperatur der Flamme entspricht. Man erkennt auch aus diesen Kurven die grundlegenden Unterschiede zwischen der kurzen Flamme des Hauckbrenners und der langen Flamme des hier benutzten Preßluftzerstäubers. Wenn man, wie im vorliegenden Fall, mit dem Preßluftzerstäuber das Prinzip des Freistrahls konsequent anwendet, erhält man sehr lange Flammen. Weicht man von diesem Prinzip ab, indem man, wie z. B. beim Hauckbrenner, eine Verzweigung in Teilströme vornimmt und Ströme der verschiedenen Medien unter großen Winkeln gegeneinander führt, so kann man auch mit mäßigen Drücken kurze Flammen erzielen.

Auffällig ist, daß in beiden Fällen fast die gleichen Maximaltemperaturen erreicht wurden. Man hätte erwarten können, daß bei der längeren Freistrahlf Flamme von Bild 7 das Temperaturmaximum niedriger liegt. Wenn dieser Effekt nicht eintritt, so erklärt sich dies

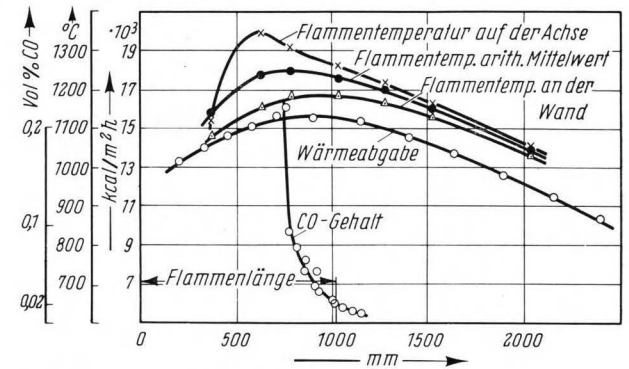


Bild 9. Flamme des Niederdruckzerstäubers, Länge und Wärmeabgabe (quadratischer Brennkanal). Hauck-Brenner. Kanal quadratisch, 11 kp/h,  $\lambda = 1,15$ .

daraus, daß die Flamme die Form eines langen, schlanken Kegels hat, welcher im Anfangsteil verhältnismäßig kalt ist. Die Wärmeentwicklung setzte bei dieser Flamme so langsam ein, daß man eine gleichmäßige Flamme nur durch Halteflammen herbeiführen konnte. Zu diesem Zweck wurden an der Flammenwurzel drei kleine Gasflammen angebracht.

Der zweite Vergleich bezieht sich auf die Form des Feuerraumes. Hierfür wurde der Hauckzerstäuber benutzt. Die Ergebnisse sind aus den Bildern 8 und 9 zu ersehen. Die Flamme war im quadratischen Kanal ungefähr 1 m lang, im Gegensatz zu den 0,8 m des runden Kanals. Die Querschnitte waren, wie erwähnt, in beiden Fällen gleich; der quadratische Kanal hatte 40 cm Kantenlänge und der runde 45 cm Durchmesser. Der Unterschied erklärt sich aus der verschiedenartigen Rückströmung. Im runden Kanal breitet sich der Flammenstrahl rotationssymmetrisch aus, die Rückströmung, die sich um die Flamme herum ausbildet, ist ebenfalls rotationssymmetrisch. Im quadratischen Kanal können in den Ecken besonders kräftige Rückströmungen auftreten, welche dazu führen, daß mehr Rauchgas in den Anfangsteil der Flamme gelangt als beim runden Kanal. Die Mischung von Brennstoff und Luft wird durch die Beimischung von Rauchgas verzögert und dadurch die Flamme verlängert.

## 6. Zusammenfassung

Obwohl die Gesetze des Freistrahls für die Flammen technischer Feuerungen nicht exakt gelten, hat sich die Anwendung dieses Prinzips als sehr nützlich erwiesen. Die in Glasschmelzwannen üblicherweise benutzten Flammen entsprechen diesem Prinzip nur zum Teil. Die größten Abweichungen bestehen bei den Generatorgas-

flammen. Die Flammen zweier Ölzerstäubertypen, die an Glasschmelzwannen häufig benutzt werden, wurden in Brennstrecken untersucht. Man erkennt den Einfluß des Impulses auf die Flammenlänge sowie auf die Temperatur und Wärmeabgabe der Flamme. Außerdem wird der große Einfluß des Feuerraumquerschnittes auf die Flammenlänge gezeigt.

## 7. Schrifttum

- [1] GÜNTHER, R.: Brenneruntersuchungen II. Mischung und Verbrennung in Wannenofenbrennern. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 97—110.
- [2] RENNER, K.: Brenneruntersuchungen III. Modelluntersuchungen über Strömung und Mischung in Brennern querbeheizter Glasschmelzwannenöfen. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 386—407.
- [3] WILHELM, H.-H.: Mischungsuntersuchungen am kalten Modell eines gasgefeuerten Glasschmelzofens. Teil I. Modellversuche ohne Nachahmung der Volumenvergrößerung der Gase durch die Verbrennung. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 145—158. Teil II. Modellversuche mit Nachahmung der Volumenvergrößerung der Gase durch die Verbrennung. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 232—237.
- [4] RUMMEL, K.: Der Einfluß des Mischungsvorganges auf die Verbrennung von Gas und Luft in Feuerungen. Arch. Eisenhüttenwes. **10** (1936) S. 505—510, 541—548, **11** (1937) S. 19—30, 67—80, 113—123, 163—181, 215—224. [Ref. Glastechn. Ber. **16** (1938) S. 179.]
- [5] MASDIN, E. G. und THRING, M. W.: Combustion of single droplets of liquid fuel. J. Inst. Fuel **35** (1962) S. 251—260. (40940)

DK 662.69:666.1:662.61:662.951.2

## Erdgas in der Glasindustrie

Von HANS BUSCHMANN, Oldenburg i. O.

(Vortrag auf der 38. Glastechnischen Tagung am 13. Mai 1964 in Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 27. Mai 1964)

In den letzten Jahren ist Erdgas, bedingt durch große Funde im norddeutschen Raum, auch für die industrielle Anwendung interessant geworden. Im Vergleich zum amerikanischen Verbrauch ist die Anwendung von Erdgas in Europa durchaus noch steigerungsfähig. Die speziellen Kennziffern des in der Oldenburgischen Glashütte verwendeten Erdgases werden in Vergleich gesetzt zu Erdgasen aus anderen Quellen und dem in Deutschland üblichen Stadt- und Ferngas. Aus diesem Vergleich ergeben sich einige Folgerungen für die Flammengeschwindigkeit, das Stabilitätsverhalten usw. Dies wird an Hand eines vereinfachten Mechanismus der Verbrennung erklärt. Anschließend wird auf die Anwendung des Erdgases und die über einen längeren Zeitraum bei der Beheizung von Kühltürmen und Speiservorherden gesammelten Erfahrungen eingegangen. Die Vor- und Nachteile der beiden zur Debatte stehenden Gasarten werden hierbei besprochen. Als weiterer Punkt wird die Beheizung einer mittelgroßen Glasschmelzwanne, die versuchsweise mit Erdgas beheizt wurde, diskutiert. Die Ergebnisse, soweit sie sich schon während der kurzen Versuchszeit abzeichneten, werden mitgeteilt. Zum Abschluß wird eine Brennerleiste zur Beheizung eines Drahtgeflechtbandes geschildert, bei der auf Grund der geringeren Flammengeschwindigkeit des Erdgases einige Schwierigkeiten auftraten.

Allgemein kann gesagt werden, daß die Umstellung einer Glashütte auf Erdgas zwar einige Anfangsschwierigkeiten mit sich bringt, jedoch durchaus vertretbar ist, wenn das Gas preiswert bezogen werden kann.

Das Wort „Erdgas“ ist ein Sammelbegriff für natürliche Gase mit relativ hohem Heizwert. Unter diesen Sammelbegriff fällt einmal das „trockene“ Erdgas. Dies ist ein natürlich vorkommendes brennbares Gas, das vor allem aus Methan mit geringen Beimengungen von höheren Kohlenwasserstoffen und Stickstoff besteht. Der Gehalt an Methan kann bis zu 95% und mehr betragen. In diesem Falle liegt der Heizwert bei 7500 bis 8500 kcal/Nm<sup>3</sup>. Dieses Trockengas wird nur in reinen Erdgasfeldern gefunden, bei denen Erdöl nicht auftritt.

Die zusammen mit Erdöl gefundenen Naturgase werden im deutschen Sprachgebrauch mit „Erdölgase“ bezeichnet. Sie haben einen größeren Gehalt an schweren Kohlenwasserstoffen, wie Äthan, Propan und Butan. Durch diese schweren Kohlenwasserstoffe hat das Erdölgas einen hohen Heizwert von 9000 bis 11000 kcal/Nm<sup>3</sup>. Das Erdölgas wird einmal in gesonderten Erdgasbohrungen auf Ölfeldern gewonnen, in den meisten Fällen jedoch fällt es als Nebenprodukt bei der Förderung des Erdöls an. Bei der Druckentlastung des Öles an der Erdoberfläche werden die im Öl gelösten Erdölgase frei. Die Mengen der „nassen“ Erdgase können sehr groß gegenüber dem Erdölanteil werden. Außerdem fallen nasse Erdgase auch bei der Weiterverarbeitung des Erdöls an.

Im allgemeinen tritt Erdgas generell als Begleiter des Erdöls auf. Es wird also immer in der Nähe der großen Erdölvorkommen gefunden. Die größten Reserven für diese natürliche Energie liegen in den USA, Kanada, Südfrankreich, Norditalien, in der Sahara und — wie man seit neuerem weiß — auch in Deutschland und Holland. Während das Erdgas in Europa bis vor wenigen Jahren eine völlig untergeordnete Rolle spielte, hat die Gewinnung und der Verbrauch in den USA schon in den letzten Jahrzehnten eine große Bedeutung erlangt.

Aus Tabelle 1 ist zu erkennen, daß 1950 Erdgas fast 20% des gesamten Energiebedarfs der USA deckte.

Tabelle 1. Primärenergieverbrauch der USA in den Jahren 1900—1960 (Angaben in %) [1]

Jahr	Steinkohle	Braunkohle	Erdöl	Erdgas	Wasserkraft
1900	18,4	70,5	4,7	3,2	3,2
1910	14,0	71,1	7,9	3,5	3,5
1920	10,7	69,7	12,0	4,1	3,5
1930	8,0	55,4	23,5	9,7	3,4
1940	5,2	48,1	31,3	11,9	3,5
1950	3,2	39,2	33,2	19,8	4,6
1960	1,2	26,0	35,7	33,0	4,1