

- suchung von Oxydationsgleichgewichten. Teil I und II. Glastechn. Ber. **18** (1940) S. 33–45, 65–69.
- [3] DUNAJEW, W. G. und LITWAKOWSKI, A. D.: Eine neue Methode zur Auswahl von feuerfesten Baustoffen für die Glasindustrie. (Orig. russ.) *Steklo i Keram.* **15** (1958) S. 13–16. [Ref. Glastechn. Ber. **32** (1959) S. 298.]
- [4] IHARA, M., YAMAMOTO, T., KONISHI, A. und ARIMORI, T.: The electrochemical study on the corrosion of refractory by molten glass. Part I: On the electromotive force between refractory oxides and glasses. (Orig. jap. mit engl. Zsfssg.) *J. ceram. Assoc. Jap.* **67** (1959) S. 20–32. [Ref. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 433.]
- [5] SHONEBARGER, F. J.: Galvanic corrosion of glass tank refractories. *Glass Technol.* **2** (1961) S. 53–59.
- [6] Persönliche Mitteilung der Herren FRENZEL und WU.
- [7] GODRON, Y.: Polarisation des réfractaires mis, à température constante, en contact avec des verres ou des sels fondus. *Silic. ind.* **28** (1963) Nr. 1, S. 19–27. (39909)

DK 662.612.001.5:536.46:66.041:662.951.2

Flammenforschung und Industrieofenbau

Von RUDOLF GÜNTHER, Karlsruhe

(Mitteilung aus dem Institut für Gastechnik, Feuerungstechnik und Wasserchemie der Technischen Hochschule Karlsruhe)

(Eingegangen am 12. November 1963)

Flammen werden nach ihrem Strömungszustand und nach dem Zeitpunkt der Mischung unterschieden. Für den Industrieofenbau interessieren die turbulenten Diffusionsflammen. Die Flammenforschung versucht, die Länge und Form sowie den Mischungsverlauf auf Grund der Vorgänge im Freistrahler zu beschreiben und von diesem einfachsten Fall ausgehend drallbehaftete und konzentrische Strahlen zu behandeln, um schließlich zur Vielfalt der technisch vorkommenden Fälle vorzudringen. Dabei müssen die Einflüsse des Raumes berücksichtigt werden, in welchem die Flammen brennen. Weitere Aufgaben der Flammenforschung betreffen die Verbrennung von Öltropfen und den Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion. Die bisher erzielten Ergebnisse haben Anregungen für die Konstruktion von Brennern und Öfen gebracht und das technische Niveau des Industrieofenbaues entscheidend gehoben.

Die Gründung der Deutschen Gesellschaft für Verbrennungsforschung richtete die Aufmerksamkeit eines größeren Kreises von Fachleuten auf die Arbeiten zum Studium von Flammen, die seit 15 Jahren in Ijmuiden durchgeführt werden. Durch diese Arbeiten und die Untersuchungen einer Reihe von anderen Forschungsstellen in der Industrie und an Hochschulen ist die Kenntnis der Vorgänge, die in Flammen und Öfen ablaufen, wesentlich erweitert worden. Trotzdem stehen dem, der eine Feuerung konstruieren will, noch nicht alle erwünschten Berechnungsunterlagen zur Verfügung. Im Folgenden wird der Stand der heute auf dem Gebiet der Flammenforschung verfügbaren Kenntnisse festgehalten, ihre praktische Anwendbarkeit gezeigt und außerdem dargelegt, welche Entwicklung für die nächsten Jahre erwartet werden kann.

1. Arten von Flammen

Es hat sich eingebürgert, Flammen nach ihrem Strömungszustand und nach der Art der Vermischung von Brennstoff und Luft zu klassifizieren. Man unterscheidet demnach:

1. laminare und turbulente Flammen und
2. vorgemischte und nicht vorgemischte Flammen.

Die Unterscheidung nach dem Strömungszustand bietet sich an, da die Verbrennungsvorgänge in Feuerungen meist im strömenden Medium vonstatten gehen. Laminare Strömung kommt nur bei sehr kleinen Brennern vor, wie sie für viele industrielle Wärmevorgänge sowie in Laboratorien, im Handwerk und im Haushalt benutzt werden. In Industrieöfen hat man dagegen meist mit turbulenten Flammen zu rechnen. Auch das Zwischengebiet der Flammen, die in ihrem Anfangsteil laminar sind und später zum turbulenten Zustand umschlagen, kommt in Industrieöfen kaum vor.

Das zweite Unterscheidungsmerkmal zielt auf die Frage hin, ob die Mischung zwischen Brennstoff und Luft außerhalb oder innerhalb des Feuerraumes stattfindet. Man spricht im einen Fall von vorgemischten, im anderen von Diffusionsflammen, um damit auszu-

drücken, daß die Mischung erst im Feuerraum durch Diffusion zwischen Brennstoff und Luft vonstatten geht. Die Grenzen zwischen den beiden Fällen sind fließend. Es kommt nicht selten vor, daß ein Teil der Verbrennungsluft außerhalb des Feuerraumes, d. h. durch Vormischung, beigegeben wird, während man den Rest der Luft erst innerhalb der Feuerung zuführt. Dieser Fall ist sowohl bei manchen Industrieofenbrennern verwirklicht wie auch bei Bunsenbrennern.

Eine Vormischung verbietet sich, wenn man lange Flammen erzeugen will, oder wenn die Verbrennungsluft auf hohe Temperaturen vorgewärmt ist. Für Großöfen kommt deshalb in erster Linie die nicht vorgemischte Flamme in Betracht. Man hat es dann mit den sogenannten turbulenten Diffusionsflammen zu tun. Unter Diffusion versteht man im allgemeinen die Mischung zweier Gase durch Molekularbewegung. Turbulente Ströme vermischen sich aber nicht so sehr durch die Eigenbewegung der einzelnen Moleküle als durch die der turbulenten Strömung eigenen Querbewegungen und durch Wirbel, die im Grenzbereich zwischen den beiden reagierenden Stoffen auftreten. In dem Begriff „turbulente Diffusionsflamme“ kennzeichnet also das Wort „turbulent“ nicht nur in Analogie zur laminaren Flamme den Strömungszustand, sondern zugleich auch einen Teil des Mischungsmechanismus, während statt des Wortes „Diffusion“ besser ein Hinweis auf das Fehlen der Vormischung stehen sollte. Trotz dieser Unklarheit hat sich der Begriff der turbulenten Diffusionsflamme eingebürgert.

Die Forschung ging bei der Untersuchung von Flammen vom einfachsten Fall aus, nämlich von laminaren, vorgemischten Flammen, wie man sie z. B. in Bunsenbrennern als Innenkegel erzeugt. Auf diese Art von Flammen beziehen sich vorwiegend die Arbeiten über Flammengeschwindigkeit, Zündgrenzen, Zündtemperaturen und ganz allgemein über die Reaktionskinetik.

In turbulenten Diffusionsflammen treten die Fragen der Reaktionsführung und der Ausbreitung gegenüber den Mischungsvorgängen zurück, da der Gesamtlauf

hier überwiegend durch den Mechanismus der Mischung bestimmt wird. Diese Tatsache veranlaßte K. RUMMEL [1] zu der in ihrer Überspitzung einprägsamen Formulierung „gemischt = verbrannt“. Erst die eingehende Beschäftigung mit diesem Fragenkomplex zeigt, wie sehr sich auch dieses Gebiet auf die Arbeiten an anderen Arten von Flammen stützt.

2. Gegenstände der Flammenforschung

2.1. Flammenlänge

Die einfachste Frage, die der Konstrukteur einer Feuerung oder eines Brenners an die Flammenforschung stellt, scheint die nach der Länge einer Flamme zu sein. Er möchte vermeiden, daß bei einer zu langen Flamme unverbrannte Substanz in den Abzug gerät und damit zu Wärmeverlusten führt, daß durch Auftreffen unverbrannter Substanz auf die Ofenwände lokal eine intensive Verbrennung und Wärmeentwicklung einsetzt, die das Mauerwerk beschädigt oder daß sich an den Wänden Ruß unverbrannt absetzt. Andererseits will er vielfach verhindern, daß bei zu kurzer Flamme der Ofenraum ungleichmäßig beheizt wird.

Arbeiten über die Länge von Flammen befaßten sich zunächst mit laminaren Diffusionsflammen von Gas. Sie gehen von der Vorstellung aus, daß aus einer runden Öffnung Gas in einen luftgefüllten Raum eintritt, und daß Luft vom Rande des Gasstromes her in diesen eindiffundiert. Ist so viel Luft eingewandert, daß auf der Achse ein stöchiometrisches Gemisch herrscht, so ist das Ende der Flamme erreicht. Diesen Vorgang kann man für die Mischung kalter Gase exakt berechnen. Für die Flamme ergeben sich Abweichungen, da sich mit der Temperatur nicht nur die Dichte und die Strömungsgeschwindigkeit, sondern auch die Diffusionszahl der Gase verändert. Da die Temperatur örtlich verschieden ist, hat man mit recht komplexen Vorgängen zu rechnen, die bisher mit Hilfe einer empirisch bestimmten mittleren Diffusionszahl beschrieben werden. Die Rechnung beruht nach W. JOST [2] auf folgendem Schema:

$$L = u \cdot t_{st}$$

$$t_{st} = \frac{2y^2}{D}$$

für $y \rightarrow \frac{d_0}{2}$ wird

$$L = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_0}{D}$$

Für turbulente Flammen kann man entsprechend vorgehen. Statt der Diffusionszahl muß man dann eine Austauschzahl einführen, welche den turbulenten Mischungsvorgang auf Grund der hierfür verfügbaren Theorien, z. B. nach L. PRANDTL [3] beschreibt. Dabei wird statt der Diffusionszahl D eine Austauschzahl $\varepsilon = s \cdot u$ gesetzt. Auf diese Weise kommt man zu einer Formel für die Flammenlänge, die nicht mehr die austromende Menge V_0 , sondern den Düsendurchmesser d_0 enthält.

Da die turbulenten Austauschgrößen für Flammen nicht bekannt sind, zieht man es im allgemeinen vor, turbulente Flammen nach den Grundsätzen des Freistrahls zu behandeln. Für den einfachen Fall, daß ein Gasstrahl in einen Raum eintritt, der ein ruhendes Gas von gleicher Dichte wie die Strahlsubstanz enthält, lassen

sich die Strömungs- und Mischungsverhältnisse berechnen. Man weiß aus Versuchen, daß sich ein solcher Strahl nach einer kurzen Anlaufstrecke kegelförmig ausbreitet, und daß die Geschwindigkeitsverteilung längs der Strahlachse eine Hyperbel bildet, während die Geschwindigkeitsverteilung senkrecht zu Achse — sofern sie zunächst eben war — allmählich in die Form einer Gauß-Kurve übergeht. Sobald der Bereich verlassen ist, in welchem im Kern des Strahles noch die Anfangsgeschwindigkeit erhalten bleibt, ergeben sich Verteilungskurven, die einander in verschiedenen Abständen von der Düse ähnlich sind. Sind die beiden Substanzen, die sich mischen, chemisch verschieden, so läßt sich auch die Konzentrationsverteilung im Strahl nach ähnlichen Grundsätzen bestimmen wie die Geschwindigkeitsverteilung.

Nach O. HINZE [4] gelten für die axiale Verteilung folgende Ansätze:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{6,39}{\frac{x}{d_0} + 0,6} \quad \frac{c_m}{c_0} = \frac{5,27}{\frac{x}{d_0} + 0,8}$$

Auf diese Weise läßt sich sowohl die axiale Geschwindigkeit wie der Konzentrationsverlauf auf der Achse berechnen. Genau wie bei der Diffusionsrechnung ist die Flammenlänge erreicht, wenn auf der Achse so viel Luft zugewandert ist, daß dort stöchiometrische Mischung herrscht. Auch diese Formeln gelten zunächst nur für kalte Strahlen. Die Verhältnisse bei hohen Temperaturen müssen durch empirisch ermittelte Konstanten berücksichtigt werden. Dies ist bisher nur in beschränktem Umfang gelungen.

In der Literatur findet man eine Reihe von Formeln zur Bestimmung der Flammenlänge, für laminare Flammen z. B. von K. WOHL, C. GAZLEY und N. KAPP [5] sowie von H. C. HOTTEL und W. R. HAWTHORNE [6]. Beide stützen sich auf S. P. BURKE und T. E. W. SCHUMANN [7]. Auf Grund der Diffusionsrechnung kommen sie zu Formeln folgender Art:

$$L = \text{const.} \cdot \frac{V_0}{D} l_{st}$$

Für turbulente Flammen rechnen WOHL und Mitarbeiter ebenfalls nach dem Diffusionssatz, nach der Freistrahlmethode rechnen W. R. HAWTHORNE, D. S. WEDDELL und H. C. HOTTEL [8], M. W. THRING und M. P. NEWBY [9] und S. TRAUSTEL [10], nach dem Impulssatz A. L. CUDE [11]. Sie kommen zu Formeln des Typs

$$L = \text{const.} \cdot d_0 \cdot l_{st}$$

Statt l_{st} kann auch c_{st} eingeführt werden. Eine Korrektur über die Wurzel aus dem Dichteverhältnis zwischen Umgebung und Flammgasen ist nach THRING unerläßlich.

Die Anwendung der Formeln auf Versuchsergebnisse an laminaren und turbulenten Flammen zeigt, daß nur die Ergebnisse von THRING [9] etwa der Wirklichkeit entsprechen. Die anderen Verfahren bringen Abweichungen der Rechenwerte von den Versuchsergebnissen um — 50 bis etwa + 200%.

Bei turbulenten Flammen spielt ein bisher wenig beachteter Einfluß eine Rolle. Die strömungstechnischen Berechnungen beziehen sich stets auf Mittelwerte. Das theoretische Flammenende ist also z. B. der Punkt, an

welchem im zeitlichen Durchschnitt stöchiometrisches Gemisch herrscht. Der Definition der turbulenten Mischung entsprechend kommt jedoch an diesem Punkt auch zeitweise z. B. Luftmangel vor. Die Flamme wird dann länger. Stellt man die Flammenlänge z. B. photographisch durch Langzeitaufnahmen fest, so findet man die maximale Flammenlänge. Diese unterscheidet sich je nach Strömungsverhältnissen mehr oder weniger stark von der mittleren.

In sehr vielen Fällen kann der Reaktionsbereich dem Gebiet der Leuchterscheinungen gleichgesetzt werden, man kann deshalb die Flammenlänge photographisch bestimmen. Bei turbulenten Flammen läßt sich aus einer Reihe von Kurzaufnahmen die mittlere, aus Langzeitaufnahmen die maximale Flammenlänge bestimmen.

2.2. Mischungsverlauf in Flammen

Die bisherigen Arbeiten über den Mechanismus der Mischungsvorgänge gehen vom drallfreien Strahl aus, der aus einer runden Düse austritt. Sie liefern nicht nur Angaben über die Flammenlänge, sondern auch über den Verlauf der Mischung längs des Flammenweges und in den Ebenen senkrecht zur Flammenachse. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge bildet die Grundlage für die Beurteilung der örtlichen Wärmeentwicklung und damit der Wärmeverteilung in der Feuerung.

Der Mischungsverlauf auf der Flammenachse läßt sich rechnerisch in der gleichen Weise bestimmen wie die Flammenlänge. Man kann aus den genannten Gleichungen den Geschwindigkeits- und Konzentrationsverlauf ermitteln. Für die Verteilung senkrecht zur Flammenachse gelten für den Freistrahler die folgenden Gleichungen, z. B. nach O. HINZE [4]

$$\frac{u}{u_m} = \frac{1}{(1 + \eta^2/8a)^2}; \quad \frac{c}{c_m} = \left(\frac{u}{u_m}\right) \xi_i/\xi_s.$$

Bei Gasflammen ist es zulässig, die Reaktionszeit zu vernachlässigen, so daß man aus dem Mischungsverlauf unmittelbar auf die Wärmeentwicklung schließen kann. Bei Öl- und Kohlenstaubflammen ist zusätzlich die Kenntnis der Reaktionszeit erforderlich, die man aus Brennversuchen an Einzeltropfen und Einzelkörnern summarisch bestimmt. Obwohl es sehr mühsam ist, Strömungs- und Mischungsfelder zu messen, verfolgte man bei den über viele Jahre ausgedehnten Versuchen in Ijmuiden und auch anderwärts diesen Weg. Feldmessungen der Konzentration und Geschwindigkeit sind erforderlich, da bei den großen örtlichen Unterschieden Mittelwerte, etwa quer über die Flamme, nur eine grobe Annäherung liefern.

Die Geschwindigkeit der Flammengase muß wegen der turbulenten Strömung als zeitlicher Mittelwert erfaßt werden. Erschwerend wirkt dabei, daß die Strömungsgeschwindigkeiten in Betriebsanlagen vielfach klein sind. Erst seit wenigen Jahren stehen Transmitter-Geräte zur Verfügung, die es gestatten, auch kleine Drücke mit Registriergeräten zu messen.

Beim Ausmessen der Konzentrationsfelder müssen sowohl bei flüssigen Brennstoffen wie bei Gasen der technisch üblichen Zusammensetzung CO, CO₂, O₂, N₂ und H₂O gegebenenfalls H₂ und CH₄ in Betracht gezogen werden.

Die meisten dieser Komponenten lassen sich mit Analysengeräten bestimmen, die auf physikalischer Basis arbeiten. Der Aufwand wird noch größer, wenn bei Ölflammen außer den genannten Komponenten auch der feste Kohlenstoff bestimmt werden soll. Umfassende Untersuchungen über Mischungsfelder sind vorwiegend in Ijmuiden durchgeführt worden. Eine systematische Anwendung der Freistrahlerberechnung auf den Mischungsverlauf bei Verbrennung verschiedener Gase steht jedoch noch aus.

2.3. Einfluß des Ofenraumes auf den Mischungsverlauf

Außer der Vernachlässigung der tatsächlichen Temperaturverteilung setzt die Benutzung der Freistrahlerrechnung für Flammen von Industrieöfen weitere Vereinfachungen voraus. Insbesondere ist hier der Einfluß der Ofenwände zu nennen.

Während in der freien Umgebung beliebige Luftmengen zur Verfügung stehen, wird einer Feuerung nur eine begrenzte Luftmenge zugeleitet. Die Flamme brennt so lange, bis von außen genügend Luft eingedrungen ist, um auch auf der Achse den gesamten Brennstoff zu verbrennen. Wenn dieser Zustand erreicht ist, haben die Außenzonen bei der freibrennenden Flamme wesentlich mehr Luft aufgenommen als für die Verbrennung nötig ist. Freibrennende Flammen haben immer einen erheblichen Luftüberschuß.

Bei eingeschlossener Flamme braucht dies nicht der Fall zu sein. Man kann sie z. B. mit stöchiometrischer Luftmenge betreiben. Da in diesem Fall dem Strahl nicht die Luftmenge zur Verfügung steht, die er seinem Impuls nach ansaugen könnte, entspricht der Mischungsvorgang nicht mehr dem, der an einem Freistrahler stattfindet.

Auch die Druckverteilung in der Umgebung des Strahles wird im eingeschlossenen Raum anders sein als im freien. Durch das Ansaugen von Substanz in den Strahl entsteht in der Umgebung ein Unterdruck, dessen Größe und räumliche Verteilung von der Art der Luftzufuhr beeinflußt wird. Dieser Unterdruck führt dazu, daß Rauchgas aus stromabliegenden Teilen der Flamme an den Flammenanfang zurückgesaugt wird. Um die Flamme herum bildet sich eine Rückströmung aus. Dieser Vorgang ist bei Hochtemperaturöfen unerwünscht, da die zurückströmenden Rauchgase die Flammentemperatur herabsetzen. Man versucht deshalb, die Querschnitte so zu bemessen, daß die Rückströmung möglichst gering wird. Dies gelingt am besten bei kreisrunden Öfen, deren Flamme in der Ofenachse liegt. Bei rechteckigen Querschnitten bildet sich eine Rückströmung bevorzugt in den Ecken aus, in denen der Flammenstrahl die Wand erst später berührt als an den Seitenflächen. Erwünscht ist die Rückströmung nur dann, wenn die Gefahr des Abhebens der Flamme besteht. In diesem Fall wirkt die Zufuhr heißen Rauchgases zur Flammenwurzel stabilisierend.

Die Vorgänge der Rückströmung sind von A. CRAJA [12] eingehend untersucht worden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse bringt E. H. HUBBARD [13]. Es zeigt sich, daß für das Verhältnis zwischen Rück- und Vorwärtsstrom gilt:

$$\frac{M_r}{M_0 + M} \sim \frac{M_0}{M_0 + M_1} \cdot \frac{b}{r_0}.$$

Für einige kennzeichnende Fälle hat CRAJA den Rückstrom und die Geschwindigkeitsverteilung im Vor- und Rückstrom gemessen. Die Arbeiten wurden an Modellen durchgeführt. In Betriebsöfen und Brennstrecken ist die direkte Messung des Rückstromes wegen der geringen Geschwindigkeit schwierig. Man mißt leichter die Veränderung des Hauptstromes längs seines Weges und gewinnt daraus den Grad der Rückströmung.

2.4. Bedeutung der Brennerbauart

Weitere Abweichungen vom Fall des einfachen Freistrahls ergeben sich aus der Brennerkonstruktion. Nur bei wenigen Brennern und Öfen hat man mit Strahlen zu tun, die drallfrei aus einer runden Düse austreten. Abweichende Konstruktionen braucht man insbesondere dann, wenn die schlanke Form des einfachen Strahls nicht zum Feuerraum paßt, oder wenn man Durchsatz, Flammenlänge und Wärmeentwicklung in weiteren Grenzen verändern will. Den verschiedenen Anforderungen entsprechend gibt es eine große Zahl von Brennerkonstruktionen. Die wichtigsten Grundformen sind die folgenden:

2.4.1. Doppelstrahlbrenner

Die Vorstellung des einzelnen Freistrahls ist nur dann anwendbar, wenn die Luft der Feuerung mit wesentlich geringerer Geschwindigkeit zufließt als der Brennstoff. In diesem Falle, der z. B. bei den großen gemauerten Luftschräkten der Hochtemperaturöfen verwirklicht ist, kann man die geringe Geschwindigkeit der Luft im Vergleich zur Geschwindigkeit des Brennstoffstrahles vernachlässigen. Bei den meisten Metallbrennern, insbesondere bei Gasbrennern, liegen aber die Geschwindigkeiten von Brennstoff und Luft in ähnlicher Größenordnung. Man muß also davon ausgehen, daß man es mit zwei Strahlen zu tun hat. Typische Fälle der räumlichen Zuordnung der Strahlen sind z. B. der von RUMMEL [1] untersuchte Brenner mit nebeneinanderliegenden, rechteckigen Schlitzen für Gas und Luft oder Brenner, bei denen Gas und Luft aus zwei konzentrischen Rohren austreten.

2.4.2. Drallbrenner

Eine zweite Gruppe bilden die Brenner, welche dem Gasstrom und/oder dem Luftstrom einen Drall verleihen. Brenner mit Drallstrahlen sind von H. ULLRICH [14] für Kohlenstaub und neuerdings in Ijmuiden für Öl untersucht worden. Je nach Größe des Drehimpulses ändert sich der Strahlwinkel. Man kann also durch Anwendung von Drall verschiedene Flammenformen erzeugen. Da hier längs des Weges nicht nur der Massenstrom sondern auch der Radius des Strahles größer wird, nimmt wegen des auch hier konstanten Impulses die Geschwindigkeit wesentlich schneller ab, als bei geradem Strahl. Man erhält also kürzere Flammen.

2.4.3. Brenner mit Mehrfachstrahlen

Eine weitere Möglichkeit zur Abwandlung der Eigenschaften einer Flamme ergibt sich daraus, daß man einen oder beide Strahlen in mehrere Zweige aufteilt. Dabei erhält man im einfachsten Fall eine Vielzahl von kleineren Abbildern der bereits beschriebenen Formen. Eine solche Aufteilung kann z. B. zur Verminderung der Flammenlänge nützlich sein. Meistens aber beeinflussen sich Einzelstrahlen gegenseitig, so daß recht verwickelte Zusammenhänge auf-

treten können. Von der exakten Beschreibung der Vorgänge in derartigen Brennern ist man einstweilen weit entfernt. Die bisherigen Arbeiten befassen sich vorwiegend mit einfachen Grundformen, verwickelte Konstruktionen, bei denen z. B. mehrere Flammen in unregelmäßig geformten Ofenräumen brennen, sind der theoretischen Behandlung einstweilen unzugänglich. Es wird notwendig sein, vom Einfachen zum Komplizierten fortschreitend auch Wege zur Bearbeitung solcher Fälle zu suchen.

2.5. Flammenstabilität

Fragen des Abhebens und Zurückschlagens von Flammen spielen seit langem eine Rolle auf dem Gebiet der vorgemischten laminaren Flammen. Nachdem man Brennstoffe mit niedriger Flammgeschwindigkeit, wie Erdgas und Flüssiggas, zunehmend benutzt und seit in den Ölbrennern mit erheblichen Strömungsgeschwindigkeiten gearbeitet wird, hat der Vorgang des Abhebens auch für die turbulenten Diffusionsflammen an Industrieöfen Bedeutung gewonnen. Flammenhalter gehören seither zu den bekannten Konstruktionselementen, und die Beeinflussung des Abhebens durch mechanische und thermische Hilfsmittel wurde Gegenstand eingehender Untersuchungen.

2.6. Strömungsverlauf der Flamme

Die systematischen Arbeiten über Form, Länge und Mischungsverlauf von Flammen setzen fast immer voraus, daß einzelne Flammen in gerader Richtung in einem runden oder rechteckigen Raum brennen, dessen Querschnitt etwa dem Durchmesser entspricht, den die Flamme nach Zurücklegen von einem Drittel oder der Hälfte ihres Weges erreicht hat. Solche Verhältnisse sind etwa bei SM-Öfen oder Drehöfen gegeben. Vielfach hat man es jedoch mit verwickelteren Flammenformen zu tun. Umlenkungen des Stromes der Flammengase in einer oder sogar mehreren Ebenen sind nicht selten.

Der Einfluß solcher Umlenkungen auf den Mischungsverlauf und damit auf die Wärmeabgabe der Flammen ist einstweilen nicht systematisch zu behandeln. Vielfach genügt es aber, insbesondere bei kurzen Flammen, zunächst ohne Rücksicht auf den Mischungsverlauf den Strömungsweg des Rauchgasstromes zu verfolgen und so zu führen, daß die konvektive Wärmeabgabe aus dem Rauchgas zweckentsprechend vonstatten geht. In solchen Fällen kommt es also darauf an, festzustellen, wie der Strömungsweg durch die Form des Feuerraumes und die Lage des oder der Brenner beeinflußt wird. Für derartige Aufgaben hat sich der Modellversuch als wertvolles Hilfsmittel bewährt. Darüber hinaus ist er geeignet, Aufschlüsse über den Mischungsverlauf in Flammen, die Aufenthaltszeit der Gase im Ofen, über Korrosionsvorgänge und vieles andere zu geben. Kalte, d. h. ohne Verbrennung arbeitende Modelle mit Luft oder mit Wasser als Modellsubstanz haben sich vielfach bewährt.

2.7. Wärmeübertragung

Es gibt drei grundsätzlich verschiedene Wege zur Bestimmung der Wärmeabgabe einer Flamme:

1. rein experimentell,
2. rein rechnerisch,
3. durch Verbindung von Rechnung und Experiment,

Experimentelle Verfahren beruhen entweder auf der Messung mit Wandkalorimeter oder die Wärmeabgabe wird mit Hilfe der kalorimetrischen Brennstrecke nach W. LITTSCHIEDT [15] oder durch Temperaturmessungen der Flamme, z. B. nach der SCHMIDT-Methode, gemessen.

Alle experimentellen Verfahren haben den grundsätzlichen Nachteil, daß ihre Ergebnisse zunächst nur für eine bestimmte Flamme und einen bestimmten Ofen gelten und nicht ohne weiteres auf andere Bauformen zu übertragen sind. Trotzdem gehören die Arbeiten, die insbesondere in Ijmuiden über die Wirkung einer großen Zahl von Einflüssen auf die Wärmeabgabe längs der Flamme durchgeführt wurden, zu den wichtigsten Ergebnissen der bisherigen Flammenforschung [16]. Sie liefern einen Überblick über die Wirkung der wichtigsten Veränderungen und gestatten es, deren Einflüsse abzuschätzen.

Die rein rechnerische Methode ist bisher noch nicht vollständig ausgearbeitet. Eine exakte Vorausberechnung der Wärmeabgabe muß von einer Berechnung des Mischungsverlaufs ausgehen, um daraus die Wärmeentwicklung und schließlich die Wärmeabgabe herzuleiten. Verfügbar ist aus diesem Komplex bisher insbesondere der letzte Teil, nämlich die Berechnung der Wärmeabgabe. Zunächst ging man von Strahlern einheitlicher Temperatur und Strahlungszahl aus. Bekannt wurden die Rechenverfahren von A. SCHACK [17], H. SCHWIEDESEN [18] und K. ELGETI [19].

H. C. HOTTEL und E. S. COHEN [20] teilen den Ofenraum in eine Anzahl von Quadern, die so klein bemessen werden, daß man in jedem einzelnen Temperatur und Strahlungszahl jeweils konstant setzen kann. Ein System von Gleichungen gestattet die Berechnung des Wärmeaustausches dieser Quader untereinander und mit den Ofenwänden bzw. dem Wärmegut.

Der Anfangsteil der Rechnung, die Bestimmung des Mischungsverlaufs, ist für den einfachen Fall des runden drallfreien Strahls heute ebenfalls durchführbar. Um aber aus dem Mischungsverlauf die Temperaturverteilung zu berechnen, ist es notwendig, Wärmeabgabe und Wärmeentwicklung miteinander in Beziehung zu setzen, ähnlich wie dies M. W. THRING [21] in seinem „Rechenmodell“ für sehr vereinfachte Bedingungen getan hat. — Man erkennt, daß es jetzt darauf ankommt, die einzelnen Rechenverfahren zusammenzufügen und das ganze Gebilde so weit zu verfeinern, daß trotz der unumgänglichen Vereinfachungen eine praktisch brauchbare Genauigkeit erzielt wird. Ein erster aussichtsreicher Versuch in dieser Richtung wurde von THORNEYCROFT und THRING unternommen [22].

Der dritte Weg zur Bestimmung der Wärmeverteilung ergibt sich aus dem Vorstehenden. Wenn man aus Messungen z. B. an vergleichbaren Anlagen oder auch aus Modellversuchen einleuchtende Annahmen über die Temperaturverteilung und über Strahlungszahlen herleiten kann, so gelingt die Berechnung der Wärmeabgabe nach der geschilderten Methode.

Die bisherigen Darlegungen gelten in erster Linie für den Wärmeaustausch durch Strahlung. In den letzten Jahren hat man erkannt, daß auch der bisher im Ofenbau vielfach vernachlässigte Wärmeübergang durch Konvektion eine wichtige Rolle zu spielen vermag. Deshalb wurde sowohl dem Wärmeübergang auf-

treffender Flammen wie der konvektiven Wärmeabgabe der Rauchgase zunehmende Beachtung geschenkt [23,24].

2.8. Verbrennungsmechanismus von Öl und Kohlenstaub, Rußbildung

Die Kenntnis der Vorgänge, die bei der Verbrennung von Öl und Kohlenstaub ablaufen, ist zur vollständigen Beurteilung der Flammen dieser Brennstoffe erforderlich. Als erstes Resultat solcher Arbeiten liegen Auskünfte über die Brennzeit von Tröpfchen und Körnern in Abhängigkeit vom Durchmesser und von der chemischen Zusammensetzung vor [25]. Darüber hinaus wurde die Vorstellung der von der Oberfläche her schalenförmig nach innen fortschreitenden Verdampfung bzw. Vergasung kugelförmiger Tropfen bzw. Körner ausgebaut [26].

Für die exakte Behandlung des Mischungsverlaufs wäre es erwünscht, den zeitlichen Ablauf der Dampf- und Gasentwicklung zumindest für die Fälle zu kennen, bei denen der Zeitbedarf dieser Vorgänge nicht gegenüber der Aufenthaltszeit des Brennstoffes in der Feuerung vernachlässigt werden kann.

Die Entstehung von Ruß interessiert als Zwischenstufe der Verbrennung von Öl und Gas wegen der hohen Strahlungszahl, die glühende Feststoffteilchen der Flamme verleihen. Zwar liegen quantitative Ergebnisse über den Einfluß des C/H-Verhältnisses und der Bindungsarten der Moleküle auf die Strahlungszahl vor [27]. Im einzelnen sind jedoch die Vorgänge der Kohlenwasserstoffspaltung und der Bildung von Rußskeletten durch Anlagerung noch nicht genügend bekannt.

3. Bedeutung der Ergebnisse der Flammenforschung für die Technik

Die technische Bedeutung der Arbeiten, die in den letzten dreißig Jahren in der Flammenforschung geleistet wurden, ist in vollem Umfange nur für den verständlich, der sich schon lange mit der Feuerungstechnik beschäftigt. Am Anfang der dreißiger Jahre standen über turbulente Diffusionsflammen fast ausschließlich empirische Kenntnisse zur Verfügung. Heute ist die wissenschaftlich exakte Bearbeitung in vollem Gange.

Trotz der großen Schwierigkeiten, die das Experimentieren bei hoher Temperatur bietet und trotz der Vielzahl von Vorgängen, die in Flammen zusammenwirken, sind die Grundvorgänge teils in großen Zügen und teils in Einzelheiten beschrieben worden. Viele Unterlagen und auch so wichtige Dinge, wie die Berechnung der Temperaturverteilung in einer Flamme, fehlen noch. Es läßt sich aber bereits absehen, auf welchen Wegen die bestehenden Lücken zu schließen sind. Bei der großen Zahl der technisch vorkommenden Einflüsse ist noch viel geduldige Einzelarbeit zu leisten, um das ganze Gebiet so weit auszubauen, wie es für die praktische Anwendung erwünscht ist.

Im nachstehenden sind einige technische Anwendungen wiedergegeben, die sich auf die bisherigen Untersuchungen stützen.

3.1. Brennerkonstruktion

Für die Konstruktion von Brennern entscheidend ist die Erkenntnis, daß die Flammenlänge umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Strahlimpuls ist

$$L = \frac{\text{const}}{\sqrt{I}}$$

$$I_1 = M_1 \cdot u_1 \quad I_2 = M_2 \cdot u_2$$

Dieses Prinzip hat nicht nur zur Konstruktion einfacher Ölzerstäuber angeregt, sondern dem Konstrukteur ganz allgemein gezeigt, wie er die Flammenlänge in der Feuerung beherrschen kann.

Weiter gab die Beschäftigung mit drallfreien und drallbehafteten Strahlen die Anregung zu neuartigen Brennerkonstruktionen, z. B. mit regelbarer Flammenform und -länge, für mehrere Arten von Brennstoffen usw. Außerdem regte sie an zur Entwicklung der sogenannten Tunnelbrenner und Kombustoren, d. h. von Brennern, welche die Mischung und Verbrennung von Brennstoff und Luft auf kleinstem Raum ermöglichen. Man kann damit Rauchgasstrahlen hoher Temperatur und Geschwindigkeit erzeugen, die es gestatten, die Strömungsvorgänge im Ofenraum viel nachhaltiger zu beeinflussen, als dies mit Brennern üblicher Art möglich ist. Außerdem kann man damit die Verbrennungsreaktionen aus der Feuerung heraus verlegen, so daß im eigentlichen Ofenraum die sonst unvermeidlichen Bereiche mit Luft- oder Gasüberschuß vermieden werden. Unter dem Stichwort der Schnellerwärmung finden solche Brenner Anwendung in Hochleistungsöfen.

Ein weiteres wichtiges Resultat der Beherrschung der Misch- und Brennvorgänge liegt in der Verbrennung ohne Luftüberschuß. Dies ist sowohl mit Rücksicht auf das Wärmegut wie auch bei Ölflammen wegen der Verminderung der Schwefelkorrosion bedeutungsvoll.

3.2. Modelluntersuchungen

Die Einführung von Modelluntersuchungen, sowohl zum Studium des Mischungsverlaufs wie zur Beobachtung des Flammenweges, gibt dem Konstrukteur von Öfen und Feuerungen erstmals die Möglichkeit, die Auswirkung konstruktiver Maßnahmen vorauszusagen. Je verwickelter die Flammenführung in einer Feuerung ist, um so notwendiger wird es, solche Aufschlüsse zu gewinnen. Nicht nur die zweckmäßige Form des Feuerraumes, die Anordnung und Größe der Brenner und die Lage und Führung der Flammen läßt sich auf diese Weise voraussagen, sondern auch konstruktive Einzelheiten, wie die Durchströmung von Regeneratoren, Kanälen, Ventilen usw. Fast alle Zweige des modernen Ofenbaues haben aus Modelluntersuchungen Anregungen gewonnen.

3.3. Berechnung des Wärmeübergangs

Verfahren zur Berechnung des Wärmeübergangs durch Strahlung sind schon seit langem bekannt, aber erst jetzt beginnt sich die Praxis ernstlich dafür zu interessieren, nachdem man erwarten kann, daß die Einflüsse der Wärmeverteilung und der Form des Feuerraumes besser erfaßt werden können, als dies mit den früher bekannten summarischen Methoden möglich war. An vielen Stellen wird versucht, spezielle und allgemeine Fragen auf diese Weise zu lösen.

3.4. Bau und Betrieb von Öfen

Im weiten Gebiet des Industrieofenbaus gibt es eine große Zahl von Neuerungen, die sich auf verbesserte Kenntnisse der Vorgänge in Flammen zurückführen lassen. Auf dem Gebiet des Eisenhüttenwesens sind etwa die SM-Öfen nach BOELENs, die Einwegtiefofen und die zweistufigen Schmiedeöfen zur zunderfreien Erwärmung oder die Glühöfen mit Schutzgasumwäl-

zung zu nennen sowie verschiedene Formen moderner Cowper. Auf glastechnischem Gebiet sind ähnliche weitreichende Veränderungen bisher nicht zu verzeichnen, obwohl man die Verbesserung der Temperaturverteilung in Schmelzöfen und die Bemühungen zum Bau leistungsfähiger Kleinwannen nicht unterschätzen sollte.

3.5. Meßtechnik

Das Instrumentarium der Feuerungstechnik war bis in die dreißiger Jahre hinein höchst einfach. Lediglich Thermolemente und Pyrometer, Schwimmerdruckmesser und Ringwaagen, sowie chemische Analysengeräte standen zur Verfügung. Heute können nicht nur alle wichtigen Größen mit hoher Genauigkeit registrierend gemessen werden, die Flammenforschung hat darüber hinaus Anregungen zur Entwicklung neuartiger Geräte, wie Sonden zur Rußentnahme, Periskope, Kalorimeter und Wärmeflußmesser der verschiedensten Arten gegeben. Diese Geräte haben sich auch außerhalb der eigentlichen Flammenforschung für Betriebszwecke bewährt, z. B. zur Beobachtung der Schmelze und des Ofenmaterials mit dem Auge oder mit der Kamera. Sie gaben Anregungen zur Entwicklung weiterer Meßverfahren, etwa zur Beobachtung der Schmelztemperaturen oder der Glasströmungen.

3.6. Technisches Niveau

Trotz dieser zahlreichen bemerkenswerten Ergebnisse liegt der wichtigste Erfolg der Flammenforschung darin, daß durch die systematische Arbeit vieler Fachleute das technische Gesamtniveau auf diesem Gebiet wesentlich gehoben wurde. Eine Fülle von Einzelkenntnissen steht zur Verfügung, die es in ihrer Gesamtheit gestatten, Vorgänge in Flammen weitgehend zu verstehen und zu beherrschen. Die erheblichen Fortschritte, die in der Konstruktion vieler Arten von Öfen erreicht wurden, gehen zum großen Teil auf Anregungen aus der Flammenforschung zurück.

Bei einem Gebiet, das in voller Entwicklung steht, ist es fast unvermeidlich, daß sich die Ergebnisse nur dem erschließen, der sich intensiv damit beschäftigt. Eine Ausrichtung der Arbeiten auf Einzelfälle verbietet sich z. T. schon dadurch, daß die Arbeiten mit Mitteln durchgeführt werden, die viele Industrien in einer bemerkenswerten Gemeinschaftsleistung aufbringen.

4. Ausblick

Die nächsten Aufgaben der Flammenforschung lassen sich aus den geschilderten Ergebnissen herleiten. Es geht darum, die einzelnen Vorgänge der Mischung und Strömung, der Verbrennung und Wärmeübertragung so genau wie möglich zu bestimmen und in ihrem Zusammenwirken zu erfassen. Dabei ist von vornherein klar, daß eine völlig systematische Durchdringung, die in alle Einzelheiten des weitläufigen Gebietes reicht, nicht möglich ist. Aus dem Bestreben der Wissenschaft, von den theoretisch zugänglichen einfachen Fällen auszugehen, und dem Bedürfnis der Praxis nach der Beantwortung konkreter Fragen ergibt sich die Auswahl der Arbeiten, die von der Forschung zweckmäßig zu behandeln sind.

5. Formelzeichen

a = Abstand zwischen Strahlursprung und Düsenmündung	y = Koordinate senkrecht zur Strahlachse, von der Achse aus gerechnet
b = Halbe Breite der Brennkammer	α = Konstante nach Hinze
c = Konzentration (c_{st} = Mol Gas/Mol stöch. Gemisch)	ϵ = Austauschzahl der turbulenten Strömung
d = Durchmesser	ξ = Austauschgröße nach Hinze
D = Diffusionszahl	η = Bezogene Radialkoordinate = $y/(x + a)$
I = Strahlimpuls	
l = Molarer Luftbedarf	
L = Flammenlänge	
M = Massenstrom	
r = Radius	
s = Prandtl'scher Mischungsweg	
t = Zeit (t_{st} = Zeit bis zum Erreichen stöchiometrischen Gemischs)	
T = Temperatur	
u = Geschwindigkeit (\bar{u} = mittlere Geschwindigkeit)	
V = Volumstrom	
x = Koordinate in Strahlachse, von der Düsenmündung aus gerechnet	

Indices

o = Düsenaustritt
b = Brennstoff
i = Impulsaustausch
l = Verbrennungsluft
m = Strahlachse
r = Rückstrom
s = Stoffaustausch
st = Stöchiometrisches Gemisch

6. Schrifttum

- [1] RUMMEL, K.: Der Einfluß des Mischvorganges auf die Verbrennung von Gas und Luft in Feuerungen. T. IA, B. II., IIIA, B. C. IV. Arch. Eisenhüttenwesen, **10** (1936) Seite 505–510, 541–548, **11** (1937) S. 19–30, 67–80, 113–123, 163–181, 215–224 [Ref. Glastechn. Ber. **17** (1938) S. 179.]
- [2] JOST, W.: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Berlin: 1939.
- [3] PRANDTL, L.: Strömungslehre. 3. Aufl. Braunschweig: Vieweg: 1949.
- [4] HINZE, O. und VAN DER HEGGE ZIJNEN, B. G.: Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetrical jet. Appl. Sci. Res. A 1 (1949) S. 435–461.
- [5] WOHL, K., GAZLEY, C. und KAPP, N.: Diffusion flames. In: Third symposium on combustion, flame and explosion phenomena. Baltimore: Williams & Wilkins 1949. S. 288–300.
- [6] HOTTEL, H. C. und HAWTHORNE, W. R.: Diffusion in laminar flame jets. In: Third symposium on combustion flame and explosion phenomena. Baltimore: Williams & Wilkins 1949. S. 254–266.
- [7] BURKE, S. P. und SCHUMANN, T. E. W.: Diffusion flames. Ind. Eng. Chem. **20** (1928) S. 918–1004. [Ref. Glastechn. Ber. **30** (1957) S. 405.]
- [8] HAWTHORNE, W. R., WEDDEL, D. S. und HOTTEL, H. C.: Mixing and combustion in turbulent gas jets. In: Third symposium on combustion. Baltimore: Williams & Wilkins 1949. S. 266–288.
- [9] THRING, M. W. und NEWBY, M. P.: Combustion length of enclosed turbulent jet flames. In: Fourth symposium on combustion. Baltimore: Williams & Wilkins 1953 S. 789–796.
- [10] TRAUSTEL, S.: Impuls und Flammenlänge, Glastechn. Ber. **29** (1956) S. 429–431.
- [11] CUDE, A. L.: The length of oil and gas flames. J. Iron Steel Inst. **175** (1953) S. 304–312 und **176** (1954) S. 270–273. [Ref. Glastechn. Ber. **29** (1956) S. 57.]
- [12] CRAYA, A. und CURTET, R.: Sur l'évolution d'un jet en espace confiné. C. R. hebd. Acad. Sci. (Paris) **241** (1955) S. 621–622.
- [13] HUBBARD, E. H.: Recirculation in cold models of furnaces: a review of work carried out of Sogreah. J. Inst. Fuel **35** (1962) S. 160–173. [Ref. Glastechn. Ber. **35** (1962) S. 486.]
- [14] ULLRICH, H.: Über einen Rundbrenner für unterschiedliche Brennstoffe. Brennstoff, Wärme, Kraft **11** (1959) S. 465–467. [Ref. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 103.]
- [15] LITERSCHIEDT, W.: Versuche an einer wassergekühlten Brennstrecke, Gaswärme **10** (1961) S. 265–270.
- [16] Flame Radiation Research Joint Committee: Reports of the trials at Ijmuiden. J. Inst. Fuel **24** (1951) S. 1; **25** (1952) S. 17; **26** (1953) S. 189.
THRING, M. W.: Methods of increasing the emissivity of cokeoven gas flames without addition of liquid fuels. J. Inst. Fuel **29** (1956) S. 27–30.
- [17] SCHACK, A.: Der industrielle Wärmeübergang, 6. Aufl. Düsseldorf: Verl. Stahleisen 1962. [Ref. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 103.]
- [18] SCHWIEDESEN, H.: Die Strahlung von Kohlensäure und Wasserdampf mit besonderer Berücksichtigung hoher Temperaturen, Arch. Eisenhüttenwes. **13** (1939/40) S. 713.
- [19] ELGETI, K.: Ein neues Verfahren zur Berechnung des Strahlungsaustausches zwischen einem Gas und einer grauen Wand. Brennstoff, Wärme, Kraft **14** (1962), H. 1, S. 1–6, [Ref. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 378.]
- [20] HOTTEL, H. C. und COHEN, E. S.: Radiant heat exchange in a gas-filled enclosure. Inst. Chem. Eng. J. **4** (1958) S. 3–14.
- [21] THRING, M. W.: An improved model for the calculation of heat transfer in the open hearth furnace, J. Iron Steel Inst. **179** (1955) S. 227.
- [22] THORNECROFT, W. T. und THRING, M. W.: A theoretical method for predicting heat transfer in a petroleum heater. Trans. Inst. Chem. Engrs. **38** (1960) S. 63–70.
- [23] GERMERDONCK, R.: Über die Größe des konvektiven Wärmeübergangs von der Flamme auf das Glas in Glaswannenöfen. I u. II. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 86–90 und 158–169.
- [24] O. Verf.: C. R. des essais effectués sur un four à creuset type „Four Cornet“ Chauffé au propane pour la fusion des alliages légers. Rep. Centre Techn. Ind. Fondérie, Div. Etudes Thermiques, (November 1958).
- [25] SPALDING, D. B.: Combustion of Liquid Fuels. Nature **165** (1950) S. 160.
- [26] MASDIN, E. G. und THRING, M. W.: Combustion of single droplets of liquid fuel. J. Inst. of Fuel **35** (1962) S. 251–260.
- [27] LAIUDDIN, S. S.: Untersuchungen über die Strahlungseigenschaften karburiertter Stadtgasflammen. Brennstoff, Wärme, Kraft **14** (1962) S. 7–12. (39851)