

8. Schrifttum

- [1] SALMANG, H. und BECKER, A.: Die Gase im Glas. Teil II: Glastechn. Ber. 6 (1928/29) S. 625–634. Teil III: Glastechn. Ber. 7 (1929/30) S. 241–244.
- [2] JEBSEN-MARWEDEL, H. und BECKER, A.: Über den Farbstich von Glas ohne Entfärbung. Sprechsaal 63 (1930) S. 874–878. [Ref. Glastechn. Ber. 9 (1931) S. 174.]
- [3] BORK, A.: Färbung des Glases durch Kohle und Sulfide. Glastechn. Ber. 8 (1930) S. 275–279.
- [4] ZSCHACKE, F. H.: Verfahren zur Herstellung von gelben, braunen oder schwarzen Gläsern. DRP Nr. 599563. Kl. 32b, Gr. 2. Pat. ab 25. 11. 1932, ausgeg. 14. 6. 1934. [Ref. Glastechn. Ber. 12 (1934) S. 358.]
- [5] NEUMANN, C. und DIETZEL, A.: Die Farbkörper in den sogenannten kohlegeblen Gläsern. Teil I–III: Glastechn. Ber. 16 (1938) S. 389–391; 17 (1939) S. 286–290; 18 (1940) S. 267–273.
- [6] SPRINGER, L.: Gibt es ein Kohlegeblglas? Welches ist der färbende Bestandteil beim sog. Kohle- bzw. Schwefelgelb-Glas? Glashütte 72 (1942) S. 13–15.
- [7] JEBSEN-MARWEDEL, H.: Erklärungen zur Schwefelbraun-Glasschmelze und ihren Fehlern. Glastechn. Ber. 22 (1948/49) S. 325–327.
- [8] LYLE, A. K.: Amber glass and batch composition for making same. USA-Pat. Nr. 2443142. 8. 6. 1948. (29. 8. 1944.)
- [9] LYLE, A. K.: The influence of base composition and of minor constituents on the coloration of carbon-sulphur amber glasses. J. Amer. ceram. Soc. 33 (1950) S. 300 bis 304. [Ref. Glastechn. Ber. 24 (1951) S. 45.]
- [10] WEYL, W. A.: Coloured glasses. Sheffield: Hrsg. Soc. of Glass Technol. 1951. Hier besonders: Teil III, Kap. 17. [Ref. Glastechn. Ber. 25 (1952) S. 302.]
- [11] LÖFFLER, J.: Die Braunglassschmelze mit Na_2SO_4 . Fachauschussbericht Nr. 46 der Dtsch. Glastechn. Ges. 1952. Hier besonders S. 318.
- [12] LOEWENSTEIN, K. L.: Some observations on the colour and constitution of so-called carbon-sulphur amber glasses. J. Soc. Glass Technol. 36 (1952) S. 33–36 N. [Ref. Glastechn. Ber. 28 (1955) S. 61.]
- [13] HOPKINS, R. W. und MÄNRING, W. H.: Factors influencing control of color in amber glasses. Glass Ind. 34 (1953) S. 251–254, 276. Auch veröffentlicht in: Ceram. Ind. 61 (1953) Nr. 6, S. 78–79; 62 (1954) Nr. 2, S. 72, 90. [Ref. Glastechn. Ber. 28 (1955) S. 440.]
- [14] SHARMA, K. D.: Sulphur amber glasses. Bull. Centr. Glass & Ceram. Res. Inst. 2 (1955) S. 28–32, 40. [Ref. Glastechn. Ber. 29 (1956) S. 330.]
- [15] LITZOW, K. und BROCKS, G.: Der Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die Braunfärbung der Gläser durch Schwefel. Sprechsaal 68 (1935) S. 51–53. [Ref. Glastechn. Ber. 13 (1935) S. 284.]
- [16] BUDD, S. M., EXELBY, V. H. und KIRWAN, J. J.: The forming of gas bubbles in glass at high temperature. Glass Technol. 3 (1962) S. 124–129. [Ref. Glastechn. Ber. 36 (1963) S. 198.]
- [17] JEBSEN-MARWEDEL, H. und DINGER, K.: La température d'équilibre de la teneur en gaz de différents verres en fusion, comme critérium de l'affinage. Verr. et Réfract. 1 (1947) S. 19–25. [Ref. Glastechn. Ber. 22 (1948/49) S. 370–371.]
- [18] ENSS, J.: Analyse des Gasinhaltes von Glasblasen. Sprechsaal 66 (1933) S. 662–666. [Ref. Glastechn. Ber. 11 (1933) S. 424.]
- [19] BILTZ, H. und W.: Ausführung quantitativer Analysen. 6. Aufl. Bearb. v. W. FISCHER. Leipzig: Akadem. Verl.-Ges. 1953. Hier besonders S. 312.
- [20] DIETZEL, A. und FLÖRKE, O.: Die Wirkung von Sulfat beim Einschmelzvorgang. Glastechn. Ber. 32 (1959) S. 181–185.
- [21] BUSS, W.: Erhitzungsmikroskopische Untersuchungen von Vorgängen in Glasschmelzen mit und ohne Sulfat. Glastechn. Ber. 35 (1962) S. 167–176.
- [22] LÖFFLER, J.: Über den Einfluß des Einschmelzvorganges insbesondere seine ersten Stadien auf die Homogenität. Glastechn. Ber. 30 (1957) S. 117–121.
- [23] KRÖGER, C.: Gemengereaktionen und Glasschmelze. Köln u. Opladen: Westdtsch. Verl. 1956. (Forschungsber. d. Wirtschafts- u. Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen Nr. 319.) Veröffentlichung gleichen Titels in: Glastechn. Ber. 25 (1952) S. 307–324.
- [24] KITAIGORODSKI, I. I.: Technologie des Glases. München: Oldenbourg; Berlin: VEB Verl. Technik 1957. Hier besonders S. 161. [Ref. Glastechn. Ber. 31 (1958) S. 117.]
- [25] ZSCHIMMER, E., ZIMPELMANN, E. und RIEDEL, L.: Über das Läutern von reinen und tonerdehaltigen Alkali-Kalk-Silikat-Gläsern mit Sulfat oder Arsenik. Sprechsaal 59 (1926) S. 331–333, 353–357, 393–395, 411–413, u. 422–425. [Ref. Glastechn. Ber. 9 (1931) S. 181.] (39/306)

DK 532.529.6:546.21:541.135.52:620.193.43:541.134.5:666.76

Der Einfluß des Luftsauerstoffes auf die Blasenbildung in der galvanischen Kette Platin / Glas-Feuerfestmaterial / Platin I

Von JUTTA DIEFENBACH-KADEN und ALFRED SENDT Gerresheim

(Mitteilung aus dem Hauptlaboratorium der A. G. der Gerresheimer Glashüttenwerke, vorm. Ferd. Heye, Düsseldorf-Gerresheim)

(Eingegangen am 16. November 1963)

Die Entstehungsursache der Blasen, die sich innerhalb der Glasschmelze an Platinflächen ausbilden, wenn das Platin mit dem Glas und dem Feuerfestmaterial ein galvanisches Element bildet, wurde untersucht.

Dabei stellte sich heraus, daß das Auftreten der Blasen durch die Atmosphäre oberhalb der Glasschmelze entscheidend beeinflußt wird. In verschiedenen Versuchsreihen wurde gezeigt, daß die Anwesenheit von Luftsauerstoff für die Ausbildung der Blasen notwendig ist.

Der der Blasenentwicklung zugrunde liegende Reaktionsmechanismus wird diskutiert.

Es ist seit längerer Zeit bekannt, daß zwischen Feuerfestmaterial und Glasschmelze eine meßbare Potentialdifferenz besteht. Neben anderen Autoren [2–5] haben vor allem E. PLUMAT und Mitarbeiter [1] eingehende Untersuchungen darüber durchgeführt.

Zur Messung der Potentialdifferenz verwendete PLUMAT zwei in eine Glasschmelze tauchende Platinelektroden, von denen eine mit einer Schicht aus Feuerfestmaterial umkleidet war. Er stellte fest, daß in den meisten Fällen die keramische Elektrode den positiven und die reine Platinelektrode den negativen Pol bildete.

Beim Kurzschließen dieser Ketten trat stets unmittelbar darauf an der negativen Elektrode eine mehr oder weniger starke Blasenbildung auf.

Ähnliche Hinweise sind auch aus der Praxis zu erhalten, da z. B. geerdete Platin-Thermoelemente, Glasstandregler oder Platinummantelungen von Feuerfestmaterial Ausgangspunkte einer starken Blasenentwicklung sein können, die oftmals zu erheblichen Störungen der Produktion Anlaß gibt.

Es wurde festgestellt, daß die Blasenbildung zum Verschwinden gebracht werden konnte, wenn die Ver-

bindung Platin/Feuerfestmaterial (in den meisten Fällen über die Erde) gelöst wurde.

Im Zusammenhang mit der Korrosion von Feuerfestmaterial durch Metalle war es für uns von Interesse, die physikalisch ablaufenden Vorgänge bei der Blasenbildung genauer kennenzulernen.

PLUMAT hat im Verlauf seiner EMK-Messungen den Inhalt der Blasen analysiert und in der Hauptsache Sauerstoff gefunden. Daneben waren in den Blasen wechselnde Mengen Wasser oder auch Kohlendioxyd enthalten, von denen angenommen wird, daß sie durch Diffusion in die primär entstandenen Sauerstoffblasen gelangt sind. — Diese Ergebnisse wurden vom Forschungszentrum der Owens-Illinois Glass Co. [6] bestätigt. Die Untersuchungen haben auch dort gezeigt, daß der Sauerstoffanteil vor allem in den ersten Augenblicken der Entstehung der Blasen besonders hoch ist. Die Analyse der Blasen erfolgte sowohl massenspektrographisch als auch gaschromatographisch.

Die Überlegungen über die Entstehungsursache der Blasen müssen davon ausgehen, daß hier nur eine Entladung von Sauerstoffionen unter dem Einfluß der galvanischen Spannung vorliegen kann. Zwangsläufig folgt daraus, daß zur Erhaltung der Elektroneutralität auch positive Ionen an der Reaktion beteiligt sind, die dementsprechend an der zweiten Elektrode, in diesem Fall Feuerfestmaterial/Platin, in Erscheinung treten müssen. Einer Entladung negativer Ionen kann nur eine Entladung positiver Ionen bzw. ein Wertigkeitswechsel gegenüberstehen.

Zur Klärung dieser Frage haben wir an diesem Punkte unsere Untersuchungen begonnen.

1. Experimenteller Teil

Da das in industriellen Öfen erschmolzene Glas sehr komplex zusammengesetzt ist, hätte dessen Verwendung eine Aussage über die ablaufenden Reaktionen erschwert. Aus diesem Grunde war es notwendig, auf reine Rohstoffe überzugehen und vor allem auch die Anzahl der Komponenten einzuschränken.

Als Tiegelmateriale wurde reine Sintertonerde verwendet und als Glas ein Natriumsilikat der Zusammensetzung $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2 \text{SiO}_2$.

Die Versuche wurden in der Weise durchgeführt, daß ein Platindraht in Form einer Schlaufe in der Mitte des Tiegels in die Glasschmelze eintauchte und mit der Außenwand des Tiegels durch Umwickeln der Drahtenden verbunden war. Die Temperatur betrug etwa 1350–1400 °C.

Bei den Experimenten war es wesentlich, den Einfluß des Gasgehaltes der Schmelze zu kennen bzw. auszuschalten. Aus diesem Grunde wurde das Glas zunächst in einem Platintiegel aus Gemenge erschmolzen. Scherben dieses Glases konnten dann in den Sintertoneretiegel eingefüllt und unter Vakuum eingeschmolzen werden. Die Schmelze, die von oben durch eine Glasscheibe beobachtet werden konnte, wurde solange evakuiert, bis keine Entgasung mehr auftrat.

Der Tonerdetiegel (Bild 1) befand sich während der Versuche in der temperaturkonstanten Zone eines gasdichten, einseitig geschlossenen Keramikrohres, dessen unteres Ende in einen elektrisch beheizten Ofen eingesetzt war. Das kalte Ende des 80 cm langen Keramik-

rohres wurde mit Hilfe eines Gummistopfens abgedichtet, durch den die Gas- bzw. Vakuumleitungen führten. Nach Abschalten des Vakuums konnten verschiedene Gase eingeleitet werden, die durch die Verwendung eines Gummiballons unter einem geringen Überdruck gehalten wurden. Damit war gewährleistet, daß auch durch eventuelle Undichtigkeiten keine Luft einströmen konnte.

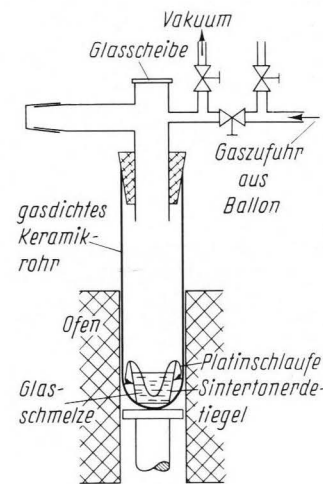


Bild 1. Versuchsanordnung.

2. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Bei den ersten Versuchen wurde der Tiegel nach der Entgasung der Schmelze dem Vakuum entnommen und das Glas mikroskopisch im durchscheinenden Licht auf Blasen untersucht. Es ergab sich, daß die Schmelze vollkommen blasenfrei war und auch am Platindraht keinerlei Blasenbildung aufwies.

Sobald jedoch diese entgaste Schmelze im Ofen einige Minuten lang der atmosphärischen Luft ausgesetzt wurde, war der Platindraht mit zahlreichen Blasen bedeckt. Da man annehmen muß, daß die den entladenen Sauerstoffionen äquivalente Anzahl positiver Ionen an der Seite Feuerfestmaterial/Platin Elektronen aufgenommen hat, bleibt die Frage offen, in welcher Weise die Reaktion abläuft.

Die Möglichkeit der Freisetzung von Sauerstoffgas durch eine Wertigkeitsänderung mehrwertiger Ionen ist nicht gegeben, da solche nicht in der Schmelze vorhanden waren. Auch der Einfluß des Gasgehaltes der Schmelze entfällt, wie weiter unten besprochen wird. Es ist naheliegend, daß der Sauerstoff der Luft eine Rolle spielt, da die positiven Ionen nach der Elektronenaufnahme wiederum mit dem Luftsauerstoff unter Bildung von Oxyd reagieren können.

Weitere Reaktionsmöglichkeiten sind mit dem Wasserdampf und dem Kohlendioxyd der Atmosphäre gegeben. Die Reaktion mit Wasserdampf und Kohlendioxyd müßte dabei zu einer Freisetzung von Wasserstoff bzw. Kohlenmonoxyd am Feuerfestmaterial führen. In Stickstoffatmosphäre dürfte unter der obigen Annahme keine Blasenbildung auftreten.

Der Einfluß der verschiedenen Gasatmosphären auf die Blasenbildung am Platin wurde im folgenden nachgeprüft.

a) Stickstoff: Wird die evakuierte Schmelze ohne vorherigen Luftzutritt einer Stickstoffatmosphäre ausgesetzt, so bilden sich selbst nach Stunden am Platindraht keine Blasen aus.

b) Wasserdampf: Um den Einfluß des Wasserdampfes kennenzulernen, wurde die Stickstoffatmosphäre mit Wasserdampf gesättigt, wobei sich als sehr wichtig herausstellte, das zu verdampfende Wasser vorher zu entgasen. Auch hier war am Platindraht wie auch in der übrigen Schmelze keine Blase festzustellen.

c) Kohlendioxyd: Der Einfluß des Kohlendioxyd-Gases wurde in der gleichen Weise wie der des Wasserdampfes nachgeprüft. Als Ausgangsmaterial wurde Kohlensäureschnee in den Reaktionsraum eingebracht und so lange evakuiert, bis der größte Teil des Schnees abgedampft war. Hierdurch sollte das Kohlendioxyd von anderen Gasen befreit werden. Anschließend wurde Stickstoff in den Reaktionsraum eingelassen und der Rest des Kohlensäureschnees verdampft. Der Anteil des Kohlendioxyds an der Atmosphäre betrug etwa 20%. Das Ergebnis entsprach den vorhergegangenen Versuchen. Es waren keine Blasen am Platindraht und in der Schmelze festzustellen.

Dagegen trat die Blasenbildung sofort wieder auf, wenn bei allen vorhergenannten Versuchen die Stickstoff- bzw. Stickstoff-Wasserdampf- oder Stickstoff-Kohlendioxyd-Atmosphären gegen Luft ausgetauscht wurden.

Aus diesen Untersuchungen ist zu erkennen, daß der Luftsauerstoff auf die Blasenbildung von Einfluß sein muß.

d) Sauerstoff: Wurde die Schmelze nach dem Entgasen einer reinen Sauerstoffatmosphäre ausgesetzt, so traten nach wenigen Minuten am Platindraht zahlreiche Blasen auf. Dieser Vorgang ließ sich mit der gleichen Schmelze beliebig oft wiederholen. Nach jeder Entgasung und anschließendem Sauerstoffzutritt zeigten sich wieder spontan Blasen.

3. Diskussion

Die vorliegenden Ergebnisse haben über die Ausbildung von Blasen an Platin-Elektroden insofern eine Klärung gebracht, als der Einfluß des Luftsauerstoffes eindeutig herausgestellt werden konnte. Bei der Frage, welche Rolle der Luftsauerstoff bei dem beobachteten Reaktionsablauf spielt, ist die Tatsache wichtig, daß die Blasen in einer entgasten Schmelze nach Luftzutritt spontan auftreten. Sie überziehen den Platindraht unabhängig von der Eintauchtiefe über die ganze ins Glas tauchende Drahtlänge. Da sich der Tiegel in einer konstanten Temperaturzone befand, ist kaum anzunehmen, daß innerhalb weniger Minuten eine wesentliche Konvektion stattgefunden hat, die den Gehalt des Glases an gelöstem Sauerstoff merklich erhöhen konnte. Von einer Sauerstoffanreicherung der Schmelze durch Diffusion muß man bei der Kürze der Zeit ohnehin absehen. Ebenfalls reicht nach unseren Versuchen mit Natriumsilikatglas die allgemein im Glas gelöste Gasmenge nicht aus, bei Abwesenheit von Luftsauerstoff die Abscheidung von Sauerstoff an der Platin-Elektrode zu ermöglichen. Nicht entgaste Glasschmelzen ergaben nämlich unter Stickstoff am Platindraht keine Blasenbildung. Maßgebend für den Effekt muß also der an der Oberfläche des Tiegels bzw. der Glasschmelze zur Verfügung stehende Sauerstoff sein.

Eine Deutungsmöglichkeit für die Entstehung der Blasen besteht in der Annahme, daß unter Einwirkung der EMK der Zelle Platin/Glas-Feuerfestmaterial/Platin Sauerstoffionen der Glasschmelze an die Platinelektrode gelangen und dort entladen werden. An der Feuerfest-Seite des Systems muß dementsprechend eine Entladung positiver Ionen erfolgen, deren Existenz in ungeladenem Zustand aufgrund der vorliegenden Ergebnisse jedoch nicht ohne weiteres möglich ist, da in diesem Fall einer Ausbildung der Blasen unter Stickstoff nichts im Wege stehen würde. Die fortgesetzte Entladung positiver Ionen scheint erst durch die nachfolgende Reaktion mit dem Luftsauerstoff ablaufen zu können. Dieser Vorgang läßt sich in der Weise verstehen, daß die elektrolytisch abgeschiedenen Stoffe eine Gegen-EMK erzeugen, die die primäre Reaktion zum Stillstand bringt, wobei man allerdings eine Abwanderung der abgeschiedenen Metallionen in das Platin ausschließen muß. Die Sekundärreaktion mit dem Luftsauerstoff führt gewissermaßen zu einer Entpolarisierung. (Die Konzentrationspolarisation bleibt davon natürlich unbeeinflusst.) Eine Folge dieser Sekundärreaktion mit Sauerstoff wäre die Abhängigkeit des inneren Widerstandes der Zelle von der Atmosphäre, die GODRON [7] in seiner sehr aufschlußreichen Arbeit auch ermittelt hat.

Für den Reaktionsmechanismus der Entladung positiver Ionen sind zwei Möglichkeiten zu diskutieren. Einmal eine Entladung der Ionen an der Grenzfläche Platin/Feuerfestmaterial und zum anderen eine Entladung an der Grenzfläche Feuerfestmaterial/Glas. Während der erstere Fall bei einer Ionenleitfähigkeit zutrifft, die bei höheren Temperaturen infolge der Beweglichkeit der am Aufbau des Feuerfestmaterials beteiligten Ionen immer vorliegt, muß im letzteren Fall eine Elektronenleitfähigkeit vorhanden sein, die in der Literatur im allgemeinen auf Verunreinigungen durch Oxyde der Übergangsmetalle zurückgeführt wird.

Die Sauerstoffentwicklung am Platindraht wirft die Frage auf, ob in der kurzgeschlossenen Zelle bei Gegenwart von Luftsauerstoff eine höhere Korrosionsgeschwindigkeit zu erwarten ist. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei der Korrosion verschiedene Einflüsse wirksam sein können. Neben der Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen in der Berührungszone Feuerfestmaterial/Glas wird insbesondere die Auflösung der Reaktionsschicht für den Angriff maßgebend sein.

Vom Verhältnis der Geschwindigkeiten dieser unabhängig voneinander ablaufenden Vorgänge wird es abhängen, ob die Korrosion in der kurzgeschlossenen Zelle bei Sauerstoffzutritt verändert werden kann.

Über diesen Punkt sowie über andere noch offene Fragen sollen weitere Untersuchungen Aufschluß geben.

Die Verfasser danken dem Vorstand der A. G. der Gerresheimer Glashüttenwerke, vorm. Ferd. Heye für die Genehmigung zur Durchführung und Veröffentlichung dieser Arbeit.

4. Schrifttum

- [1] PLUMAT, E.: Étude des phénomènes de contact entre verre et oxyde à haute température par les mesures de potentiel électrique. *Silic. ind.* **19** (1954) S. 141–154. [Ref. *Glastechn. Ber.* **30** (1957) S. 407.]
 PLUMAT, E.: Sur les causes de forces électromotrices entre systèmes vitreux. *Silic. ind.* **22** (1957) S. 657–667, **23** (1958) S. 17–28. [Ref. *Glastechn. Ber.* **32** (1959) S. 289.]
 LEGER, L., BOFFE, M. und PLUMAT, E.: Electrochemical

phenomenon at the glass-refractory material interface. *Glass Technol.* **1** (1960) S. 174–179. [Ref. *Glastechn. Ber.* **34** (1961) S. 510.]

BOFFE, M., DELZANT, M., PECRIAUX, G. und PLUMAT, E.: Diffusion des gaz dans le verre. *Silic. ind.* **28** (1963) Nr. 6, S. 277–295.

- [2] CSAKI, P. und DIETZEL, A.: Elektrochemische Messung des Sauerstoffpartialdruckes in Glasschmelzen. Unter-

- 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 Freistrah 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