

schwer zugänglich ist. Wenn eines der Rekuperatorrohre unter dem Dampfdruck und der Hitze der Abgase zusammenklatscht, muß meist der ganze Ofen stillgelegt werden, um das Rohr zu ersetzen. Ganz anders ist es bei den Regenerativöfen: da wird, wenn eine Kammer einmal einfällt, aus einer anderen Kammer gearbeitet und die Kammer neu aufgeschichtet.

A. Hermansen, Ingelstad i. Schweden: In Schweden werden für Hohlglas jetzt fast ausschließlich Rekuperativöfen betrieben, weil sie sich im Preis und Betrieb billiger stellen; auch in Deutschland sind mehrere Oefen im Betrieb, und neulich hat eine deutsche Hütte sich zum Bau einer Flaschenwanne von 60 t Tagesleistung entschlossen. Von meinen Rekuperativöfen ist einer, der 5 Jahre Tag und Nacht im Betrieb gewesen ist, im Sommer zum ersten Male gestoppt worden. Die Ausbesserungen bezogen sich nur auf den Schmelzraum, die Rekuperatoren brauchten keine Ausbesserung. Das beweist am besten die Vorzüge dieser Rekuperativöfen.

Was die Flugasche betrifft, so sind weder in Schweden noch in anderen Ländern Schwierigkeiten dadurch entstanden, gleichviel, ob mit Steinkohle oder mit Holz gefeuert wird, und das erzeugte Glas steht an Güte keinem anderen nach; im Gegenteil, wir behaupten, daß das in unseren Oefen hergestellte Glas höher steht, als das in anderen erzeugte. Das beruht wahrscheinlich darauf, daß die Temperatur in gerader Linie steigt und nicht im Zickzack, wie bei den Regenerativöfen, und daß sie die kürzeste Schmelzdauer ergibt. Uebrigens kann die Gaszufuhr in beliebigem Maße abgestellt werden. Bei kalter Gaszufuhr haben wir oft derart verfahren, daß die beiden bezw. für Gas und für Luft vorgesehenen Rekuperatoren derart umgeschaltet werden können, daß etwaige Absetzungen im Gasrekuperator während seiner Tätigkeit als Luftrekuperator weggebrannt werden. Ein solches Wechseln ist nur etwa einmal täglich nötig.

## Die Flamme im Glasschmelzofen.

Von Chemiker K. Hesse, Penzig O.-L. und Dr.-Ing. W. Friedmann, Frankfurt a. M.

Auf Grund von Erfahrungen der Wärmetechn. Beratungsstelle  
der deutschen Glasindustrie (W. B. G.) Frankfurt a. M.

### I. Einleitung.

Die Beschaffenheit der Flamme, welche bei der Verbrennung des Generatorgases im Schmelzofen entsteht, ist bei einer bestimmten Bauart des Ofens und der Brenner sowie bei gegebener Gaszusammensetzung abhängig von der Menge des Gases, welche in der Zeiteinheit verbrennt und von dem Mischungsverhältnis zwischen Gas und Verbrennungsluft. Die jeweils verbrennende Gasmenge ist durch den Wärmeverbrauch der betr. Schmelzperiode bestimmt; hingegen ist die Frage, ob und mit welchem Luftüberschuß oder ob vielleicht gar mit Gasüberschuß gearbeitet werden soll, viel umstritten. Sie kann nicht allgemein durch Angabe bestimmter Zahlen beantwortet, sondern muß von Fall zu Fall unter Anpassung an die besonderen Verhältnisse des Ofens und der Schmelzperiode untersucht werden; dabei sind wärmetechnische, schmelztechnische und glaschemische Gesichtspunkte zu berücksichtigen, welche sich z. T. auch gegenseitig beeinflussen. Um diese Frage behandeln zu können, muß vorerst erörtert

werden, welchen Einfluß die Vergrößerung oder Verringerung der Verbrennungsluftmenge auf die Beschaffenheit der Flamme ausübt.

## II. Einfluss der Verbrennungsluftmenge auf die Beschaffenheit der Flamme.

Von dem Mischungsverhältnis zwischen Gas und Verbrennungsluft hängen Zusammensetzung der Verbrennungsprodukte, Länge, Temperatur, Farbe, Leuchtkraft und schließlich die chemische Wirkung der Flamme ab.

### a) Begriff der theoretischen Luftmenge:

Zur vollkommenen Verbrennung des Gases ist eine bestimmte „theoretische Luftmenge“ erforderlich, welche aus der Zusammensetzung des Gases in einfacher Weise berechnet werden kann. Zur Verbrennung von 1 cbm Generatorgas ist meist eine theoretische Luftmenge von 1,1 bis 1,3 cbm erforderlich. Findet die Verbrennung des Gases mit dieser theoretischen Luftmenge vollkommen statt, so besteht die durch Analyse zu ermittelnde Zusammenstellung der trockenen Abgase aus etwa 19 bis 20% Kohlensäure ( $\text{CO}_2$ ) und etwa 79–80% Stickstoff ( $\text{N}_2$ ). Brennbare Gase, wie Kohlenoxyd ( $\text{CO}$ ), Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) oder Methan ( $\text{CH}_4$ ) sind nicht mehr vorhanden; auch Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) ist nicht mehr festzustellen, weil er für die Verbrennung vollkommen verbraucht worden ist.

### b) Praktische Verbrennung mit der theoretischen Luftmenge:

Führt man dem zu verbrennenden Gase eine der theoretischen gleiche Luftmenge zu, so zeigt sich, daß unter den praktisch in den Oefen vorliegenden Verhältnissen eine vollkommene Verbrennung im Ofenraum nicht auftritt; die Mischung von Gas und Luft ist niemals derart gleichmäßig, daß jedes brennbare Gasteilchen den erforderlichen Sauerstoff aus der Luft auch gleich findet. Die Folge davon ist, daß die Zündgeschwindigkeit geringer ist, und es auch länger dauert, bis der größte Teil des Gases verbrannt ist; d. h. auch die Verbrennungsgeschwindigkeit ist geringer. Dabei legt das strömende, brennende Gas, die Flamme, einen längeren Weg zurück; die Verbrennung ist langflammig. An den Abzugsöffnungen ist die Verbrennung noch nicht beendet, sondern die Flamme erstreckt sich oft weit bis in die Kammern hinein. Aus der Analyse ist die unvollkommene Verbrennung daran zu erkennen, daß die Abgase weniger Kohlensäure, hingegen noch einige Hundertstel brennbare Gase, hauptsächlich Kohlenoxyd und noch etwas unverbrauchten Sauerstoff enthalten. Ein Beispiel für die mit dem Orsat-Apparat bestimmte volumetrische Zusammensetzung der trockenen Abgase bei der Verbrennung mit der theoretischen Luftmenge ist folgendes:

15,3%  $\text{CO}_2$ , 1,2%  $\text{O}_2$  und 2,4%  $\text{CO}$ .

Die untersuchte Abgasprobe wurde aus dem abziehenden Brennerschacht entnommen.

Messungen zeigen, daß die bei der langsameren Verbrennung mit der theoretischen Luftmenge entstehenden langen Flammen geringere Temperaturen aufweisen, als wenn die Verbrennung des gleichen Gases mit kurzer Flamme oder gar plötzlich an einer bestimmten Stelle (örtlich) erfolgt. Das kommt daher, daß während der ziemlich lange Zeit in Anspruch nehmenden Verbrennung verhältnismäßig große Wärmemengen an die Umgebung (Ofenwände, Häfen, Glas) abgegeben werden. Die

Flamme wird also schon vor der vollständigen Verbrennung des Gases stark abgekühlt, sodaß die entstehenden Höchsttemperaturen wesentlich geringer sind als bei schneller Verbrennung. Da auf der ganzen Strecke zwischen den beiden Brennern durch Verbrennung Wärme erzeugt wird, so ist der Temperatur-Abfall in der Strömungsrichtung geringer und die Temperaturverteilung im Ofen zwischen den beiden Brennern ziemlich gleichmäßig. Die Kurve a in Bild 1 zeigt an einem Beispiel den Temperaturverlauf zwischen den beiden Brennern eines Schmelzofens bei Verbrennung mit der theoretischen Luftmenge.

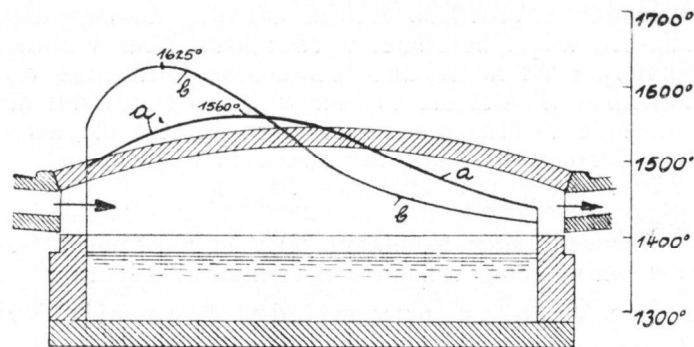


Bild 1.  
 Temperaturverlauf zwischen den Brennern  
 Kurve a = Verbrennung mit der theoretischen Luftmenge  
 Kurve b = Verbrennung mit 30% Luftüberschuss.

Charakteristisch für die langsame Verbrennung ohne Luftüberschuß ist das Leuchten der rötlichen oder gelblichen Flamme; es rührt her von der Lichtausstrahlung der in dem brennenden Gasstrom schwebenden festen Kohlenstoffteilchen, welche aus der durch die Hitze bewirkten Zersetzung der Kohlenwasserstoffverbindungen stammen und nur langsam in dem Maße verbrennen, als sie Sauerstoff finden. Die Kohlenwasserstoffe sind im Gas hauptsächlich enthalten als Methan ( $\text{CH}_4$ ), schwere Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ), z. B. Aethylen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) und insbesondere als Teerdämpfe, von welchen jedes Molekül aus vielen Kohlenstoff- und Wasserstoff-Atomen besteht. Alle Kohlenwasserstoffe haben die Eigenschaft, daß sie durch hohe Temperaturen in einfachere gespalten werden (pyrogene Zersetzung) und schließlich sich in Wasserstoff und Kohlenstoff auflösen. Der Wasserstoff verbrennt fast augenblicklich, während die festen Kohlenstoffteilchen (Ruß) in der Flammenhitze zum Leuchten gebracht werden und nur langsam verbrennen, wenn nicht Luft im Ueberschuß vorhanden ist. Der Teergehalt des Gases ist also nicht nur wegen des im Teer enthaltenen Heizwertes vorteilhaft, sondern auch wegen der dadurch vergrößerten Leuchtkraft. Diese Leuchtkraft, d. h. die Ausstrahlung von Licht, ist auch immer verbunden mit einer vergrößerten Ausstrahlung von Wärme; die glühenden Kohlenstoffteilchen geben nicht nur die bei ihrer Verbrennung entstehende Wärme durch Strahlung an das Schmelzgut ab, sondern nehmen auch die Wärme aus dem brennenden Gas und strahlen sie ab.

Die chemische Wirkung der ohne Luftüberschuß brennenden Flamme ist infolge ihres Gehaltes an unverbrannten, kohlenstoffhaltigen

Gasen usw. auch an festen Kohlenstoffteilchen eine reduzierende, d. h. die Flamme kann Sauerstoff aus chemischen Verbindungen aufnehmen oder Kohlenstoff abgeben.

c) Verbrennung mit Gasüberschuß:

Wird noch weniger Verbrennungsluft zugeführt als zur vollständigen Verbrennung des Gases theoretisch erforderlich ist, d. h. erfolgt die Verbrennung mit Gasüberschuß, so treten die für die unvollständige Verbrennung charakteristischen Eigenschaften der Flamme in verstärktem Maße auf. Die Verbrennung erfolgt schleichend, mit langer, rotleuchtender und oft qualmender Flamme bei niedrigen Temperaturen, mit ziemlich gleichmäßiger Verteilung in der Strömungsrichtung. Die Abgase enthalten am abziehenden Brenner noch größere Mengen unverbrannter Bestandteile und Ruß aus der Zersetzung der Kohlenwasserstoffe, auf welche das Qualmen zurückzuführen ist. Ein Beispiel für die volumetrische Zusammensetzung der Abgase bei Verbrennung mit Luftmangel ist folgendes:

16,0% CO<sub>2</sub>, 4,9% CO und 0,3% O<sub>2</sub>.

Die Flamme hat ausgesprochen reduzierende Eigenschaften.

d) Verbrennung mit Luftüberschuß:

Mit wachsendem Luftüberschuß verlieren sich allmählich die Erscheinungen der unvollkommenen Verbrennung. Die Flamme wird kürzer, die Farbe geht aus dem Rötlichen und Gelblichen ins Bläuliche und schließlich Farblose über, die Leuchtkraft sinkt. Die Verbrennungstemperatur ändert sich mit dem Luftüberschuß nicht eindeutig. Rechnerisch ergibt sich wohl die durchschnittliche Temperatur umso niedriger, je höher der Luftüberschuß ist, was ohne weiteres aus der Ueberlegung hervorgeht, daß der Luftüberschuß die Verbrennungsprodukte abkühlt. Praktisch zeigt sich aber, daß, wenn die Luftmenge von dem theoretisch erforderlichen Wert ohne Ueberschuß bis zu einem gewissen Luftüberschuß steigt, die Flammentemperatur zunächst höher wird; und zwar deshalb, weil die Zündgeschwindigkeit infolge der besseren Durchmischung des Gases mit der Luft steigt, die Verbrennung schneller die ganze Gasmasse ergreift und früher beendet ist. Dadurch entstehen auf dem kürzeren Flammenwege höhere Temperaturen, während der Temperaturabfall in der Strömungsrichtung rascher erfolgt als bei geringerer Luftzuführung; und zwar einmal deshalb, weil nach dem Ausbrennen auf der kurzen Flammenstrecke keine weitere Wärmeerzeugung auf dem Strömungsweg der Abgase mehr eintritt und sodann wegen der im weiteren Verlauf des Strömungsweges eintretenden Mischung der Verbrennungsprodukte mit dem Luftüberschuß. Schließlich nimmt die Temperatur auch deshalb rascher ab, weil mit der höheren Anfangstemperatur der Temperaturabfall gegen das Schmelzgut und damit auch die an dieses abgegebene Wärmemenge steigt. Die Folge der hohen Anfangstemperatur und des schnellen Temperaturabfalls ist eine sehr ungleichmäßige Temperatur- und Wärmeverteilung zwischen den Brennern. Kurve b in Bild 1 zeigt den Temperaturverlauf zwischen den Brennern eines Schmelzofens bei Verbrennung mit einem Luftüberschuß von 30%.

Die Menge der unverbrannten Bestandteile am abziehenden Brenner sinkt mit wachsendem Luftüberschuß und verschwindet schließlich bei einem bestimmten Werte desselben. Dieser Wert kann nicht allgemein angegeben werden; er schwankt meist zwischen 10 und 30% der theoretischen Luftmenge. Der erforderliche Luftüberschuß kann durch alle Mittel verringert

werden, welche die Zündgeschwindigkeit erhöhen, braucht also umso geringer zu sein, je höher Gas und Luft vorgewärmt sind und je früher und inniger die Mischung von Gas und Luft erfolgt. Mit wachsender Ausströmgeschwindigkeit wird die Mischung verbessert und daher die Zündgeschwindigkeit erhöht. Insbesondere steigt die Zündgeschwindigkeit mit dem Wasserstoffgehalt des Gases; höherer Wasserstoffgehalt ergibt schon bei sehr geringem Luftüberschuß vollständige Verbrennung mit kurzer, heißer, beinahe farbloser Flamme, u. U. mit ausgesprochener Stichflamme.

Ein Beispiel für die volumetrische Zusammensetzung der trockenen Abgase bei Verbrennung mit einem Luftüberschuß von 30% ist folgendes:

15,3% CO<sub>2</sub> und 4,8% O<sub>2</sub>.

(Bei der Nachrechnung des Luftüberschusses ist zu berücksichtigen, daß ein Teil der Kohlensäure im Abgas aus der Zersetzung des Gemenges herrührt.)

In chemischer Beziehung gewinnt die Flamme mit wachsendem Luftüberschuß immer stärker oxydierenden Charakter, d. h. der in ihr enthaltene freie Sauerstoff kann chemische Verbindungen mit dem Schmelzgut eingehen. (Abbrand, Brandflecken.)

### III. Gesichtspunkte für die Einstellung der Flamme.

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist die Einstellung des Luftüberschusses für die Verbrennung durch wärmetechnische, schmelz- und betriebstechnische sowie glaschemische Bedingungen beeinflusst.

a) Der rein wärmetechnische Standpunkt hat das Ziel im Auge, den Wirkungsgrad des Ofens möglichst groß zu halten, d. h. einen möglichst großen Teil der im Gas enthaltenen Wärme dem Schmelzprozeß zuzuführen. Die Einstellung der Verbrennung muß dabei so erfolgen, daß die Abgase möglichst wenig Wärme aus dem Ofenraum mitnehmen. Der Wärmeinhalt der Abgase setzt sich zusammen aus der fühlbaren Wärme (Produkt aus Abgasmenge, spezifischer Wärme und Temperatur), vermehrt um den Heizwert der noch brennbaren Bestandteile. Der Wärmeinhalt der Abgase ist ein Minimum bei einem ganz bestimmten Luftüberschuß, welcher von Fall zu Fall durch Versuch und Rechnung zu ermitteln ist. Die fühlbare Wärme wird umso geringer, je geringer die Abgasmenge und je niedriger ihre Temperatur am abziehenden Brenner ist. Die Gasmenge nimmt mit sinkendem Luftüberschuß ab; die Austrittstemperatur ist hingegen umso niedriger, je kürzer und heißer die Flamme am Einströmbrenner ist; nimmt also bis zu einer gewissen Grenze mit wachsendem Luftüberschuß ab. Der Höchstwert der Temperatur wird bei einem bestimmten Luftüberschuß erreicht, welcher nach den bereits erörterten Bedingungen von der Bauart des Ofens und der Brenner, der Höhe der Vorwärmung von Gas und Luft, der Einströmgeschwindigkeit und der Gaszusammensetzung abhängt.

Ebenso gehört zur Erzielung einer vollkommenen Verbrennung ein bestimmter Luftüberschuß. Die unvollkommene Verbrennung, wie sie bei zu geringem Luftüberschuß eintritt, bedeutet erhebliche Wärmeverluste. Aus 1 cbm trock. Frischgas entstehen unter normalen Verhältnissen etwa 2 cbm trock. Abgas. 1% Kohlenoxyd im Abgas entspricht also 2% Kohlenoxyd im Frischgas, was bei einem Heizwert des Kohlenoxyds von 3050 WE/cbm einen Heizwertverlust von  $0,02 \cdot 3050 = 61$  WE/cbm Gas bedeutet.

Bei einem Heizwert des Gases von rd. 1500 WE/cbm verursacht also jedes CO i. H. des Abgases einen Heizwertverlust von 4%. Der Brennstoffverlust ist entsprechend dem Wirkungsgrad der Wärmeausnützung im Ofen geringer. Hierzu kommen noch Verluste durch unverbrannten Wasserstoff und Kohlenstoff in Form von Ruß. Vom rein wärmetechnischen Standpunkt aus soll also vollkommene und schnelle Verbrennung mit scharfer und kurzer Flamme bei möglichst hoher Anfangstemperatur und möglichst geringem Luftüberschuß erstrebt werden.

b) Vom schmelz- und betriebstechnischen Standpunkt aus ist das Ziel, unter Einhaltung einer guten Gasqualität eine möglichst rasche Schmelze bei möglichster Schonung des Ofens bzw. auch der Häfen zu erreichen. Die Verhältnisse sind dabei verschieden, je nachdem, ob das Schmelzen im Wannen- oder Hafenofen erfolgt.

Beim Hafenofen ist für eine rasche Schmelze außer den hohen Temperaturen auch eine möglichst gleichmäßige Wärmeverteilung auf die einzelnen Häfen erforderlich, sodaß die Schmelze in allen Häfen in ungefähr gleicher Zeit beendet ist und nicht einzelne Häfen zuviel, die anderen zu wenig Wärme erhalten. Die kurzflämmige, schnelle Verbrennung mit hohen örtlichen Temperaturen ist dafür nicht immer geeignet, da der Temperaturabfall in der Flammenrichtung zu schnell erfolgt und in der Mitte des Ofens die Temperatur auch unter Berücksichtigung der Umsteuerung dauernd niedriger bleibt als an den Brennern.

Insbesondere bei großräumigen Oefen für größere Leistungen ist es kaum möglich, die erforderliche gleichmäßige Wärmeverteilung mit schneller, kurzflämmiger Verbrennung zu erzielen. Man braucht eine lange Flamme mit geringem Temperaturabfall zwischen den Brennern, muß also mit entsprechend geringem Luftüberschuß arbeiten. Freilich sinkt dadurch auch die Temperatur am Flammeneintritt und daher auch der wärmetechnische Wirkungsgrad des Ofens. Der Brennstoffverbrauch für die Schmelze steigt.

Wesentlich vorteilhafter liegen die Verhältnisse bei dem neuen Vielflammen-Hafenofen von Knoblauch, welcher aus dem Vortrag auf der 2. Glastechn. Tagung, Dresden\*) bekannt ist.

Während bei dem gewöhnlichen Hafenofen die Einstellung der Flamme also nicht immer nach den wärmetechnischen günstigsten Bedingungen erfolgen darf, kann bei Wannenöfen mit scharfer, heißer Flamme geschmolzen werden, da die auch örtlich an das Gemenge oder Glas übertragene Wärme sich durch Wärmeleitung schnell verteilt. Diese günstige Einstellung der Verbrennung beim Wannenofen ist einer der Hauptgründe für die wärmetechnische Ueberlegenheit des Wannenofens, welche sich in einem geringeren Verbrauch an Brennstoff für die Schmelze äußert.

Auch die Leuchtkraft der Flamme ist bei Wannen- und Hafenöfen von verschiedenem Einfluß. Bei der Wanne wird wohl in den meisten Fällen der größte Teil der Wärme durch die direkte Berührung der auf das Bad geworfenen Flamme übertragen, sodaß auch bei blauer, nicht leuchtender heißer Flamme eine gute Wärmeübertragung auf das Schmelzgut erfolgt. Anders bei Hafenöfen: Hier wird nur ein Teil der Wärme durch direkte Berührung von der Flamme an die Häfen und durch Leitung durch die Hafenwand hindurch an das Glas übertragen. Der größere Teil wird wohl durch Strahlung der Flamme auf den Glasspiegel an den Hafen-

\*) Siehe den Vortrag auf den Seiten 39 bis 46 dieses Heftes.

inhalt abgegeben, insbesondere bei Oberflämmöfen, bei welchen die Wärmeübertragung durch die Hafewand hindurch sicher verhältnismäßig gering ist. Dazu kommt noch die Strahlung des Gewölbes auf das Glas; sie ist bei Bütenöfen besonders wichtig. Auf jeden Fall spielt aber bei allen Hafenoefen die Strahlung der Flamme eine sehr große Rolle, hauptsächlich in Perioden, wo mit kurzer Flamme gearbeitet wird. Dabei ist auf die zeitliche Veränderung der Bedingungen im Verlauf der Schmelze Rücksicht zu nehmen. Bei der Silikatbildung, also dem ersten Teil der Schmelze tritt wegen der dabei erfolgenden chemischen Umsetzungen der höchste Wärmeverbrauch auf; die Menge des zugeführten Gases ist am größten, die Ausströmungsgeschwindigkeit aus den Brennern die höchste und daher die Flamme am längsten. Es bereitet hier keine Schwierigkeiten, überall im Ofen Feuer zu haben, sodaß die Wärmeverteilung günstig ist. Anders liegen die Verhältnisse nach dem Bülwern in der Läuterperiode oder Feinschmelze. Dabei läßt der Wärmeverbrauch nach, da wärmebindende chemische Reaktionen nicht mehr vor sich gehen, und die Glasmasse nur vor dem Abkühlen geschützt werden muß. Gas und Luft werden immer mehr zurückgenommen. Die Flamme wird kürzer und füllt den Ofen immer weniger aus. Die Wärmeübertragung durch direkte Berrührung zwischen Flamme und Hafen bzw. Flamme und Glas ist daher nur gering und es ist deswegen von großem Vorteil, der Flamme eine möglichst starke Leuchtkraft zu verleihen, also mit geringerem Luftüberschuß zu arbeiten.

Bei Hafenoefen ist eine schnelle Verbrennung mit größerem Luftüberschuß auch deshalb nicht erwünscht, weil durch die scharfe Flamme ein Hafenbruch entstehen kann. Insbesondere ist dies bei Bütenöfen der Fall. Ist ein solcher Ofen mehrere Monate im Betrieb, so sind die Brenner meist ausgeschmolzen; sie sind breiter geworden und gleichen Trichtern. Die Flamme wird an ihrer Basis breiter, geht auseinander und greift die Eckhäfen stark an. Eine verbrennungstechnisch gut eingestellte, scharfe Flamme würde in einem solchen Ofen bewirken, daß die Eckhäfen heruntergeschürt werden, ohne daß das Gemenge der mittleren Häfen rechtzeitig schmilzt; die Flamme ist zu kurz und füllt nur einen kleinen Teil des Ofens. Schon vergrößerte Büten, aus welchen scharfe Flammen brennen, schmelzen sehr leicht zu förmlichen Kratern aus. Bei Oberflämmöfen sind die Eckhäfen weniger gefährdet, sondern bleiben im Gegenteil oft in der Schmelze zurück.

Auch bei Wannenöfen muß natürlich die Wirkung der Flamme auf Brenner und Gewölbe beachtet werden. Zu scharfe örtliche Verbrennung führt insbesondere bei unzuweckmäßigen Brennerkonstruktionen leicht zu einem Tropfen des Gewölbes und der Brenner und einer Verunreinigung des Glases.

c) Vom glaschemischen Standpunkt aus ist auf die chemische Wechselwirkung zwischen Flamme und Glas Rücksicht zu nehmen. Sie ist ohne merklichen Einfluß, wenn bei der Schmelze Soda (Natrium-Carbonat  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) als alkalisches Flußmittel verwendet wird, und es kann dann die Verbrennung nach den bereits erörterten wärme- und betriebstechnischen Gesichtspunkten eingestellt werden. Wird aber Glaubersalz (Natrium-Sulfat  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) allein oder in größeren Mengen als alkalisches Flußmittel zugesetzt, so ist nach der vorherrschenden Meinung eine mehr oder minder stark reduzierende Flamme erforderlich; es soll durch Verminderung der Luftzufuhr unvollkommene Verbrennung, Rauchfeuer, erzielt werden. Wie weit ist diese Forderung berechtigt?

Glaubersalz hat im Gegensatz zu Soda die Eigenschaft, sich auch bei hohen Temperaturen nicht ohne weiteres in glasbildendes Natron ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) und Schwefeltrioxyd ( $\text{SO}_3$ ), welches gasförmig entweicht, zu zersetzen. Durch Zuführung von Kohlenstoff wird aber das schwer zersetzliche Sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) in leichter zersetzliches Sulfit ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) verwandelt, und zwar dadurch, daß der Kohlenstoff dem Sulfat Sauerstoff entzieht und mit diesem Sauerstoff zu Kohlenoxyd bezw. Kohlensäure verbrennt.

Zu dieser Reduktion des Sulfats wird dem Gemenge Kohlenstoff in Form von Holzkohle, Koks oder Anthrazit zugesetzt. Auch bei genügendem Zusatz an solcher sog. „Schmelzkohle“ ist es jedoch nicht immer möglich, eine vollständige Reduktion des Sulfats zu erzielen; das unzersetzte Glaubersalz gibt Veranlassung zur Bildung der sog. „Glasgalle“, welche zum größten Teil aus geschmolzenem Sulfat besteht und, auf dem Glase schwimmend, dessen Qualität herabsetzt. Ist die Menge der Galle nicht zu groß, so kann sie noch nachträglich durch Reduktion mit Kohlenstoff zersetzt und unschädlich gemacht werden. Das geschieht entweder durch Aufstreuen von kohlenstoffhaltigem Pulver oder Holzstückchen, oder aber durch die reduzierende Wirkung von Rauchfeuer, welches reaktionsfähigen Kohlenstoff im Kohlenoxyd und Ruß enthält. Ist man gezwungen, die Galle auf diese Weise abzubrennen, so wird die oberste Glasschicht infolge des plötzlich auftretenden verglasbaren Natrons alkalireicher als die weiter unten liegenden Glasschichten; auch bei guten Bülwern läßt sich dieses weichere Oberflächenglas nicht mehr gleichmäßig mit der übrigen Glasmasse mischen, sodaß kein homogenes Glas erzielt wird. Arbeitet man aber bei dem Niederschmelzen des Gemenges mit reduzierender Flamme, so tritt nicht nur keine Gallenbildung ein, sondern das Glas wird auch homogener, weil das Sulfat in dem Maße, wie es hoch kommt, sofort reduziert und verglast wird.

Während also wärmetechnische Rücksichten für eine vollständige Verbrennung mit Luftüberschuß sprechen, so ist bei der Glaubersalz-Schmelze eine unvollkommene Verbrennung mit reduzierender Flamme aus glaschemischen Gründen von Vorteil. Natürlich darf zur Vermeidung von größeren Brennstoffverlusten durch die unvollkommene Verbrennung die Verbrennungsluftmenge nicht kleiner gehalten werden, als es für die beabsichtigte chemische Wirkung der Flamme unbedingt erforderlich ist. Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, daß es in keinem Fall nötig ist, über 1–1,5% Kohlenoxyd in den Abgasen zu gehen. Oft wird man mit geringerem Gehalt an reduzierenden Gasen auskommen. Der günstigste Wert muß in jedem einzelnen Fall durch systematische Beobachtung und Versuche festgestellt werden. Dagegen wird sehr oft gefehlt und die Untersuchungen der W. B. G. haben in vielen Fällen gezeigt, daß die Abgase am abziehenden Brenner noch 4, 5 und mehr Teile Kohlenoxyd im Hundert enthalten, ohne daß es erforderlich ist. Damit wird natürlich der Brennstoffverbrauch für die Schmelze ganz erheblich heraufgesetzt.

Schmilzt man Bleiglas, zumal im offenen Hafen, so muß eine reduzierende Flamme nach Möglichkeit vermieden werden.

#### IV. Ursachen des Luftmangels.

Aus den vorstehenden Erörterungen geht hervor, daß unter besonderen Umständen trotz der vom rein wärmetechnischen Standpunkte aus vorliegenden Bedenken eine unvollkommene Verbrennung mit zu geringer Luftmenge absichtlich herbeigeführt wird.

Weit zahlreicher jedoch sind die Fälle, wo unabsichtlich mit unvollkommener Verbrennung gearbeitet wird; z. T. ist dies auf den Mangel an technischer Einsicht der Bedienung zurückzuführen. Man glaubt, die zu geringe oder aus irgend welchen Gründen nachlassende Leistung des Ofens steigern zu können, indem man ihm mehr Gas zuführt, ohne die Luftzufuhr in gleichem Maße zu erhöhen. Das ist natürlich unrichtig, denn das im Ofen nicht verbrennende Gas kann auch keine Wärme erzeugen; im Gegenteil wirkt erfahrungsgemäß ein Gasüberschuß stärker abkühlend als ein Luftüberschuß von gleicher Höhe. Man hat wohl den Ofen voll Feuer, an das Schmelzgut wird aber dabei weniger Wärme übertragen als bei geringerer Gaszufuhr.

In zahlreichen Fällen ist auch die Luftzufuhr geringer, als den Abmessungen des Herdraumes entspricht, und die Wärmeleistung je qm Herdfläche und Stunde liegt dadurch unter den bei der Glasschmelze üblichen Werten. Dies liegt daran, daß der Auftrieb in der Luftkammer, welche die Verbrennungsluft in den Ofen fördern soll, zu gering ist. Die Ansicht, daß die Luft durch den Schornstein in den Ofen gesaugt wird, ist in den meisten Fällen nicht begründet. Es soll bei normalem Betrieb im Herdraum ungefähr atmosphärischer Druck ( $\pm 0$ ) oder ein leichter Ueberdruck vorhanden sein, sodaß die Flammen ein wenig aus den Arbeitsöffnungen herauspitzen. Wird durch zu scharfen Zug des Schornsteins im Herdraum ein Unterdruck hervorgerufen, so wird dadurch nicht nur die vorgewärmte Verbrennungsluft durch die Kammern in den Herdraum gesaugt, sondern es dringt auch durch alle Undichtigkeiten und Oeffnungen des Oberofens kalte Falschlufft in unkontrollierbaren Mengen ein, welche abkühlend wirkt und u. U. auch die Häfen beschädigt. Der Schornstein soll nicht die Verbrennungsluft in den Ofen fördern, sondern hat nur die Aufgabe, die Abgase aus dem Ofen abzusaugen.

Wird der Zug verringert, so entsteht am Ofen ein Ueberdruck, welcher die Gas- und Luftzufuhr zum Ofen hemmt. Die Leistung des Ofens läßt nach und kann auch durch Erhöhung des Gasdrucks, also vermehrte Gaszuführung nicht merklich vergrößert werden, wenn nicht auch die Menge der zugeführten Verbrennungsluft entsprechend gesteigert wird.

Der die Verbrennungsluft in den Ofen fördernde Auftrieb ist abhängig von der Höhe der Luftkammern und der Temperatur der Luft in den Kammern. Bei den meisten Glasöfen sind die Luftkammern zu knapp bemessen, sodaß schon geringe bauliche Beschädigungen oder Veränderungen, wie sie im Laufe der Betriebszeit eintreten, einen Mangel an Verbrennungsluft bewirken. Größere Luftkammern, vor allem aber höhere Luftkammern, sind daher wichtig, um die Verbrennungsluftmenge in der erforderlichen Höhe einstellen zu können.

Die Aenderung der geförderten Luftmenge mit der Temperatur erfolgt nicht eindeutig. Der Auftrieb nimmt wohl mit wachsender Temperatur zu; hingegen sinkt das spezifische Gewicht der Luft, sodaß die geförderte Luftmenge schließlich wieder zu sinken beginnt.

Daß zu kalte Kammern eine unvollkommene Verbrennung mit Rauch und Ruß bewirken können, ist bekannt. Sie tritt z. B. augenscheinlich bei Hafenöfen auf, wo während der Arbeit nicht gewechselt wird, sondern der Ofen auf sog. „Konstantfeuer“ gestellt ist. Dabei wird der Ofen aus beiden Brennern gleichzeitig beheizt und sämtliche Kammern erhalten Frischluft bzw. Frischgas; die Abgase ziehen nicht durch

die Kammern ab, ihre Wärme geht dadurch vollständig verloren. Diese Stellung ist in Hohlglashütten, zumal bei Oefen, an denen aufgetriebene Gegenstände gearbeitet werden, recht häufig im Gebrauch. Bereits nach 2—3 Stunden sind die Kammern bis zur Hälfte herauf schwarz; gegen Ende der 8—9stündigen Arbeitszeit sind sie vielfach bis in die oberste Steinlage hinein schwarz oder wenigstens stark abgekühlt. Setzt nun die Schmelze ein, so wird wieder gewechselt; der Ofen soll so schnell wie möglich aufgeheizt werden, bekommt also gleich eine Höchstmenge Gas. Durch den Nachschub aus den Generatoren ist wohl die erforderliche Gasmenge in den Ofen zu bringen, aber der Auftrieb in den kalten Kammern reicht meist nicht aus, um die entsprechende Luftmenge anzusaugen. Erst nach 2- bis 3maligem Wechseln wird der Zug und damit die Luftzuführung besser. Dieser Uebelstand wäre wohl durch richtige Bemessung der Kammern und Kanäle zu beseitigen, aber wie bereits erwähnt, sind in den meisten Glashütten die Kammern zu knapp bemessen. Es ist also in den ersten Stunden der Schmelze nach Konstantstellung ein, wenn auch schwaches Rauchen des Schornsteins und unvollkommene Verbrennung nicht immer zu vermeiden.

Steht der Ofen auch bei der Ausarbeitung auf Wechselfeuerung, so daß eine stärkere Abkühlung der Kammern und eine entsprechende Verminderung des Auftriebs der Luft nicht eintritt, so entfällt dieser Uebelstand.

Eine der häufigsten Ursachen für die unbeabsichtigte unvollkommene Verbrennung ist der Luftmangel infolge Undichtheit des Luftumsteuerorgans bei Regenerativöfen. Meist erfolgt die Umsteuerung durch eine Klappe, welche schon im neuen Zustand kaum vollständig dicht hält, im Laufe der Betriebszeit aber sich fast immer mehr oder minder stark verzieht. Dadurch strömt ein Teil der Luft aus dem Wechsel direkt in den Abgaskanal, statt in den Ofen. Abgastemperatur und Zugstärke des Schornsteins sinken infolgedessen, während gleichzeitig die Fördermenge erhöht wird. Außerdem geht die direkt in die Abgaskanäle strömende Luftmenge für die Verbrennung verloren. Durch die Untersuchungen der W. B. G. ist der Mangel an Luft sehr häufig als Folge undichter Luftwechselklappen festgestellt worden. Die W. B. G. empfiehlt daher, dem Beispiel der Eisenindustrie folgend, die unvollkommenen Luftwechselklappen der Regenerativöfen durch besser dichtende Umsteuerorgane zu ersetzen, z. B. durch Glockenventile in der Art der Gaswechsel oder weniger Raum einnehmende Forter-Ventile, wie sie an den Siemens-Martin-Oefen der Eisenindustrie sehr verbreitet sind.

#### V. Zusammenfassung.

Wärmetechnisch bleibt zur Verminderung des Brennstoffverbrauchs vollkommene und schnelle Verbrennung mit entsprechend hohem, aber doch möglichst gering zu haltendem Luftüberschuß zu erstreben. Bei Wannenöfen sprechen auch keine schmelztechnischen Bedenken dagegen. Bei Hafenöfen jedoch zwingen schmelz- und betriebstechnische Bedingungen, wie z. B. gleichmäßige Verteilung der Wärme auf größere Räume, Leuchtkraft der Flamme usw., zumal in Perioden geringeren Wärmeverbrauchs, oft zur Einstellung einer schleichenden, unvollkommenen, wärmetechnisch ungünstigen Verbrennung.

Vom glaschemischen Standpunkt aus ist unvollkommene Verbrennung zur Erzielung einer reduzierenden Wirkung der Flamme nur

bei der Glaubersalz-Schmelze begründet; jedoch soll auch hier zur Vermeidung größerer Brennstoffverluste mit dem Gehalt der Abgase an brennbaren Bestandteilen nicht höher gegangen werden, als zur Erzielung eines guten Glases unbedingt erforderlich ist.

Mangelnde Einsicht, technische Unvollkommenheiten des Ofens und bauliche Fehler, wie z. B. zu niedrige Kammern und undichte Luftwechselklappen verursachen häufig unabsichtlich unvollkommene Verbrennung durch zu geringe Luftzufuhr.

### Entwurf über die Festsetzung der Verkehrsfehlergrenzen von Meßgeräten für Temperaturen und Wärmemengen.

Von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Charlottenburg  
Abt. III (Wärme u. Druck).

Auf Grund des § 3 des Gesetzes über die Temperaturskala und die Wärmeeinheit vom 7. Aug. 1924 (Reichsges. Bl. I S. 679) wird hiermit festgesetzt, daß die Angaben der Temperaturmeßgeräte, soweit sie im geschäftlichen Verkehr, insbesondere bei Ausübung eines Berufes oder Gewerbes, benutzt werden, um die folgenden Beträge von den Sollwerten abweichen dürfen:

Im Meßbereich		Zulässige Abweichung
unter	100° bis 200°	4°
„	0 „ 100	2
von	0 „ 100	1
über	100 „ 200	2
„	200 „ 300	3
„	300 „ 400	6
„	400 „ 500	9
„	500 „ 600	12
„	600 „ 700	15
„	700 „ 1000	20
„	1000 „ 1500	30
„	1500 „ 2000	50

Thermometer für Verbrennungskalorimeter müssen Temperaturdifferenzen auf 0,05° genau zu messen erlauben.

Instrumente, die nur in einem beschränkten Teil ihrer Skala die vorgeschriebene Genauigkeit einhalten, dürfen benutzt werden, wenn dieser Teil durch zwei rote Grenzstriche oder durch die Aufschrift „Zulässiger Meßbereich von ...° bis ...°“ gekennzeichnet ist.

#### Begründung.

Nach § 3 des Gesetzes über die Temperaturskala und die Wärmeeinheit vom 7. August 1924 hat die Physikalisch-Technische Reichsanstalt Verkehrsfehlergrenzen für die Meßgeräte festzusetzen. Die Verwendung von Meßgeräten mit diese Grenzen überschreitenden Fehlern ist im geschäftlichen Verkehr nach § 4 des Gesetzes verboten und wird nach § 7 bestraft, damit grobe auf unrichtige Meßgeräte zurückzuführende Fehler vermieden werden.

Die zulässigen Abweichungen der Angaben der Instrumente von den Sollwerten dürfen nicht größer sein, als sie mit der handelsüblichen Herstellung der Instrumente verträglich ist, wenn der beabsichtigte Zweck