

März 1949

H V G - Mitteilung Nr. 506

Fortschritte des Ofenbaues auf Glashütten

Die Entwicklung des Ofenbaues und der Wärmetechnik hat in verschiedener Hinsicht zu neuen, bisher auf Glashütten wenig bekannten Ergebnissen geführt. Einige besonders wichtige sind in einer Arbeit von R. G ü n t h e r zusammengestellt, welche unter dem Titel

"Fortschritte des Ofenbaues auf Glashütten"

in den "Glastechnischen Berichten" 22 (1948) Heft 3/4, Seite 50-57 veröffentlicht ist und dieser Mitteilung als Sonderdruck beiliegt.

Die in der Arbeit aufgeführten Einzelpunkte bedürfen zum Teil der systematischen Weiterbearbeitung, welche im Rahmen der künftigen Tätigkeit der HVG vorgesehen ist. Ebenso wird sich der Fachausschuss II der DGG mit diesen Fragen nach seiner bevorstehenden Wiedergründung zu befassen haben.

Anlage: 1 Sonderdruck

Sonderdruck aus
Glastechnische Berichte
Zeitschrift für Glaskunde

22. Jahrgang · Heft 3/4 · Oktober 1948

Verlag: Deutsche Glastechnische Gesellschaft Frankfurt (Main)
(Printed in Germany)

DK 66.041:662.95:666.1.031.2/3

Fortschritte des Ofenbaues auf Glashütten.

R. GÜNTHER, Frankfurt a. M.

(Mitteilung aus der „HÜTTENTECHNISCHEN VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE“ [HVG],
Frankfurt a. M.)

(Eingegangen am 1. September 1948.)

Im folgenden wird die Entwicklung skizziert, die der Ofenbau auf Glashütten im vergangenen Jahrzehnt genommen hat und außerdem auf einige Ergebnisse der Feuerungstechnik hingewiesen, die bisher bei der Glasherstellung keinen oder wenig Eingang gefunden haben, aber in Zukunft größere Beachtung verdienen.

A. Gesamtaufbau der Öfen.

Erst spät fand man im Ofenbau, besonders der Glashütten, den Weg vom Primitiven zur technisch durchdachten Konstruktion. Auch heute ist die Erkenntnis noch nicht überall durchgedrungen, daß man einen Ofen nur dann gut, d. h. einwandfrei arbeitend, und zugleich wirtschaftlich bauen kann, wenn man die darin ablaufenden Vorgänge im einzelnen kennt, und danach Gesamtanordnung und Einzelteile bemißt. Genau wie im Maschinenbau kann man nur dann zu einem guten Ergebnis kommen, wenn man technisch, ingenieurmäßig, vorgeht. Insbesondere kommt es darauf an, für einen geordneten und planmäßigen Ablauf der einzelnen Vorgänge zu sorgen, denen der Ofen dient, und alle Bauelemente ihren Aufgaben genau anzupassen. Die Erfüllung dieser banal scheinenden Grundsätze führte zu Ergebnissen wie der heutigen Hochleistungswanne oder dem Leichtbau-Bandkühlöfen.

1. Ofenwand.

a) Konstruktion.

An Ofenwände werden verschiedenartige Anforderungen gestellt: Sie müssen Druckkräfte aufnehmen, wie sie sich aus den statischen Bedingungen der Konstruktion ergeben, sie haben auf ihrer Innenseite hohen Temperaturen und teilweise auch chemischen Angriffen standzuhalten, sollen den Ofenraum gegen die Außenluft dicht abschließen, möglichst wenig Wärme an diese abgeben und mit geringen Kosten zu erstellen sein. Die Vielfalt dieser Anforderungen führt zu Kompromissen, welche sich für die einzelnen Bauteile der Öfen in verschiedener Weise herausgebildet haben.

In Temperaturbereichen über 1400°C befinden sich die aus wirtschaftlichen Gründen vorwiegend benutzten Schamotte- und Silika-Steine an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Wenn man hier durch Isolation die natürliche Kühlwirkung der Raumluft vermindert, begibt man sich in ein gefährliches Gebiet. Bei den Silika-Steinen der Gewölbe verzichtet man aus diesem Grund im heißesten Bereich auf die Isolation. Unterhalb 1400°C wird fast durchweg mit Schamotte-Steinen gearbeitet und deren Wandstärke nur so groß bemessen, wie

es Standfestigkeit oder sonstige Rücksichten erfordern. Isolierschichten vermindern hierbei den Wärmeverlust. Unterhalb etwa 1000°C wird mit Leichtsteinen gearbeitet, welche zugleich für Standfestigkeit und geringe Wärmeabgabe sorgen. Besondere Überlegungen sind notwendig für Öfen oder Ofenteile mit zeitlich schwankenden Temperaturen. Bei periodisch betriebenen Öfen wird zur Verminderung der Speicherverluste so leicht als möglich gebaut.

b) Berechnung der Wandverluste.

Die Wandverluste von Öfen werden nach der Grundformel für den zeitlich konstanten Wärmestrom bestimmt (FOURIER'sche Gleichung in spezieller Form).

$$q = \frac{\lambda}{s} (t_i - t_a) = \alpha_a (t_a - t_1) \text{ kcal/m}^2\text{h} \quad (1)$$

Die Gleichung besagt, daß ebensoviel Wärme infolge der Wärmeleitung durch die Wand fließt als an der Außenseite durch Wärmeübergang an die Luft weitergegeben werden kann. Nach diesem Gesetz stellt sich die Außentemperatur der Wand ein.

Es bedeutet:

t_i = Innentemperatur der Wand °C,

t_a = Außentemperatur der Wand °C,

t_1 = Raumlufttemperatur °C,

q = Wandverlust bezogen auf Wandfläche kcal/m²h,

λ = Wärmeleitzahl der Wand kcal/mh°C,

α_a = Wärmeübergangszahl der Außenseite kcal/m²h°C,

s = Dicke der Wand m.

Da man im allgemeinen nur die Innentemperatur der Wand, ihre Dicke und Wärmeleitzahl kennt sowie die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von der Raumluft-Temperatur, läuft die Berechnung von q auf ein Probieren hinaus. Man muß durch mehrmaliges Benutzen der Formel feststellen, welche Außentemperatur sich in einem bestimmten Fall einstellt. Um dies zu vermeiden, wird nachstehend die Wärmeübergangszahl als Funktion der Außentemperatur angegeben. Sie beträgt mit guter Genauigkeit

$$\text{unterhalb } 200^\circ \text{ C : } \alpha_a = 6,8 + 0,046 \cdot t_a \quad (2)$$

$$\text{über } 200^\circ \text{ C : } \alpha_a = 1,8 + 0,07 \cdot t_a \quad (3)$$

Durch Einsetzen dieser Werte in Gleichung 1 und Annahme einer konstanten Raumtemperatur von 25° C lassen sich Wandverlust und Außentemperatur unmittelbar und ohne Probieren berechnen.

Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in den Bildern 1 und 2 enthalten. Für die am häufigsten benutzten Wandkonstruktionen wurden die entsprechenden Werte in Tafel I zusammengestellt.

Bei der Bestimmung der in Tafel I angegebenen Zahlen wurde mit Mittelwerten der Wärmeleitzahl gerechnet, welche für die im allgemeinen benutzten feuerfesten Baustoffe etwa zutreffen. Abweichungen bis $\pm 5\%$ und mehr sind möglich, da die Wärmeleitzahl in hohem Grad von der Porosität der Steine abhängig ist, welche bei den einzelnen Erzeugnissen in weiten Grenzen schwankt.

c) Wannensteinkühlung.

Eine Nachrechnung nach den oben gegebenen Grundsätzen gibt einen guten Überblick über die Vorgänge bei der Wannensteinkühlung, wie sich am besten an einem Beispiel zeigen läßt: Ein Schamotte-Wannenstein hat bei einer Mitteltemperatur von 800°C eine Wärmeleitzahl von $1,03 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$; bei einer Dicke von 30 cm und einer Innentemperatur von 1400°C kommt man auf

einen Wandverlust von $4500 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ (Bild 1) und eine Außentemperatur von 240°C (Bild 2). Hat sich die Wanddicke durch Auflösung auf 15 cm vermindert, so wird der Wandverlust $7500 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ und die Außentemperatur 305°C . Um den Einfluß der Kühlung auf die Innentemperatur der Wannensteine festzustellen, muß man die Wärmeübergangszahl Glas/Stein kennen. Dabei wird die vereinfachende Annahme gemacht, daß eine eindeutige Grenzfläche zwischen den beiden Stoffen besteht. Um einen Anhalt über die Größe dieser Wärmeübergangszahl zu finden, vergleicht man am besten mit den Verhältnissen zwischen Rauchgas und Glas. Dort treten Wärmeübergangszahlen von etwa $200 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ auf, die überwiegend durch Strahlung zustande kommen. Diese Strahlung wird auf dem Weg durch das Glasbad allmählich absorbiert, jedoch sendet das heiße Glas seinerseits eine entsprechende Strahlung aus. Die Wärmezufuhr zur Wand wird also in den obersten Teilen vorwiegend durch die Strahlung aus dem Ofenraum bestimmt, welche mit zunehmender Badtiefe geringer wird,

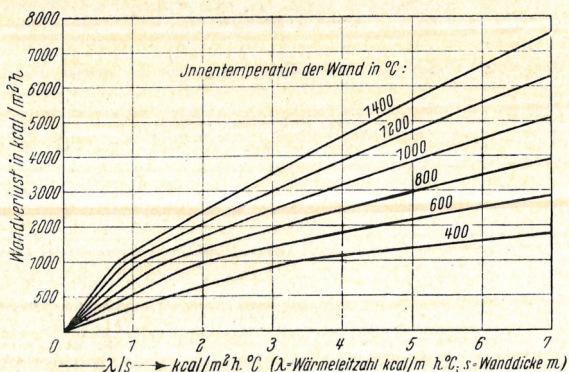


Bild 1. Wandverluste senkrechter ebener Wände in ruhender Luft ($\text{kcal/m}^2\text{h}$).

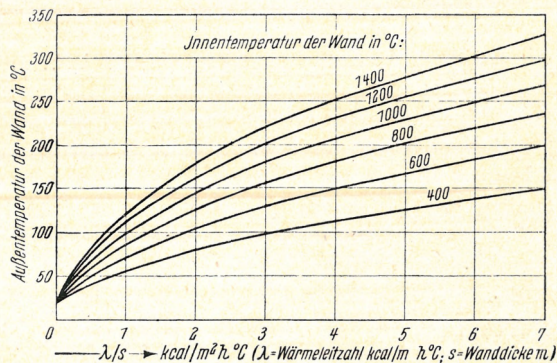


Bild 2. Außentemperaturen senkrechter ebener Wände in ruhender Luft ($^{\circ}\text{C}$).

Tafel I.

Wandverluste q ($\text{kcal/m}^2\text{h}$) und Außentemperaturen t_a ($^{\circ}\text{C}$) von Ofenwänden in Abhängigkeit von der Innentemperatur bei verschiedenen Wandkonstruktionen.

Konstruktion der Ofenwand	Innentemperatur der Wand $^{\circ}\text{C}$									
	600		800		1000		1200		1400	
	q	t_a	q	t_a	q	t_a	q	t_a	q	t_a
$1/2$ Stein Schamotte.	2990	205	4170	256	6845	280	6400	322	8850	360
1 " "	1660	144	2350	176	3070	205	3880	232	4700	266
$1\frac{1}{2}$ " "	1150	114	1620	140	2130	165	2620	188	3250	211
2 " "	910	99	1250	120	1630	141	2050	162	2420	191
$1/2$ Stein Schamotte $1/2$ Stein Isolierung	420	62	620	78	800	92	1020	109	1300	121
1 " " $1/2$ " "	375	59	550	73	740	88	930	102	1150	113
$1\frac{1}{2}$ " " $1/2$ " "	340	56	500	70	680	83	830	98	1050	104
1 Stein Schamotte 1 Stein Isolierung	215	44	300	52	425	63	570	73	690	82
$1\frac{1}{2}$ " " 1 " "	200	42	280	50	400	61	520	71	640	79
1 Stein Schamotte $1/2$ Stein Ziegel	870	96	1220	120	1660	142	2060	164	2500	185
1 " " 1 " "	590	76	830	95	1150	112	1420	129	1700	144
1 " " $1\frac{1}{2}$ " "	450	64	630	80	860	96	1070	111	1300	124
$1/2$ Feuerleichtstein $\gamma = 0,8 \text{ kg/dm}^3$	850	94	1220	120	1700	145	—	—	—	—
1 " "	450	64	650	82	910	98	—	—	—	—
$1\frac{1}{2}$ " "	300	52	440	66	600	77	—	—	—	—
25 cm Silika	1770	149	2530	185	3500	218	4530	250	5550	281
30 " "	1520	136	2150	167	2980	201	3850	231	4850	259
38 " "	1240	119	1740	146	2430	180	3130	208	3900	234

statt dessen macht sich in den unteren Bereichen die Strahlung der Glasmasse stärker bemerkbar. Der Anteil der Konvektion dürfte gering sein, man wird also mit einem Wert von 200 für die Wärmeübergangszahl Glas/Stein zum mindesten in den oberen Wandteilen nicht allzu weit von den tatsächlichen Verhältnissen entfernt sein. Rechnet man mit diesem Wert, so bekommt man auf der Innenseite des Steins ein Temperaturgefälle von q/α , also im Neuzustand 23°C , bei Abnutzung auf die halbe Dicke von 38°C , jeweils ohne Kühlung. Nimmt man an, daß die Kühlung eine Verminderung der Außentemperatur auf 200°C bewirkt, so fließen durch die Wand nunmehr $8200 \text{ kcal/m}^2\text{h}$. Der Temperatursprung an der Innenseite wird damit 41°C , d. h. die Kühlung setzt die Innentemperatur des Steins nur um 3°C herunter. In dieser geringen Wirkung kann offenbar nicht, wie vielfach angenommen wird, ihre Aufgabe liegen. Sie hat vielmehr den Zweck, den Wärmeübergang auf der Außenseite der Steine sicherzustellen. Hier ist oft die freie Abstrahlung durch heiße Bauteile, wie Brennerschächte, behindert und die Verankerungskonstruktion stört die Ausbildung von Konvektionsströmen. Unter solchen Voraussetzungen findet kein ordnungsgemäßer Wärmeübergang an die Raumluft, wie er obigen Berechnungen zugrunde liegt, statt, und es ist Aufgabe der Kühlung, dem abzuhelfen. Man kann demnach schließen, daß die Steinkühlung an freiliegenden Wannenteilen keine große Wirkung hat, dagegen im Bereich der Brennerschächte und an sonstigen unzugänglichen Stellen mit Erfolg einsetzt.

Bei Steinen des CORHART-Typs liegen die Verhältnisse grundlegend anders. Dieser Stein hat infolge seines geringen Porenraums eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit und führt entsprechend große Wärmemengen aus dem Wann Becken ab, so daß bereits im Neuzustand eine höhere Wärmeabgabe stattfindet (für die Verhältnisse des obigen Beispiels $10500 \text{ kcal/m}^2\text{h}$) als bei einem um 50 % abgenutzten Schamottestein. Deshalb muß hier die Kühlung schon im Neuzustand einsetzen.

Wieder andere Überlegungen gelten für die Wannböden; Innentemperatur und Abnutzung sind hier geringer, so daß man sich auf die natürliche Kühlung durch Raumluft beschränken kann, zumal es in erster Linie darauf ankommt, daß das Glas in den Fugen fest bleibt. Verwendet man auch für die Böden CORHART, wie neuerdings angeregt wird, so ist eine Isolierschicht auf der Unterseite notwendig, um den hohen Wandverlust dieser Steine zu vermindern. Die Gefahr des Hochschwimmens, die bei der Isolierung von Schamotteböden besteht, fällt bei dem hohen spezifischen Gewicht der CORHART-Steine weg.

2. Feuerführung.

Einwandfreie Feuerführung ist nur möglich, wenn Gas und Luft stets in den richtigen Mengen und im richtigen Mengenverhältnis zugeführt werden. Die Beeinflussung der Luftmenge macht oft Schwierigkeiten, wenn diese durch den Ofen selbst, z. B. den Auftrieb in den Kammern angesaugt wird.

In solchen Fällen reicht der verfügbare Unterdruck meist gerade zur Förderung der Luftmenge aus. Reserven, wie sie zum Einbau wirksamer Regelgeräte benötigt werden, stehen nicht zur Verfügung (Bild 3). Bei der großen Bedeutung, die einer geordneten Feuerführung insbesondere in Bezug auf die Qualität der Erzeugnisse zukommt, kann man aber auf die Dauer auf eine Regelung der Luftmenge nicht verzichten und wird deshalb zum Betrieb mit Ventilatorluft auch bei den großen Anlagen übergehen müssen, bei denen man wegen der Anlage- und Stromkosten dies bisher scheute. Diese Kosten werden meist größer angesehen als sie in der Tat sind, weil Erfahrungen mit ungeeigneten Ventilatoren vorliegen, die für unnötig hohe Drucke ausgelegt sind. Bei diesen muß der größte Teil der erzeugten Druckhöhe in einem oder mehreren Regelorganen wieder vernichtet werden. Für die in Glashütten vorkommenden Fälle genügt jedoch

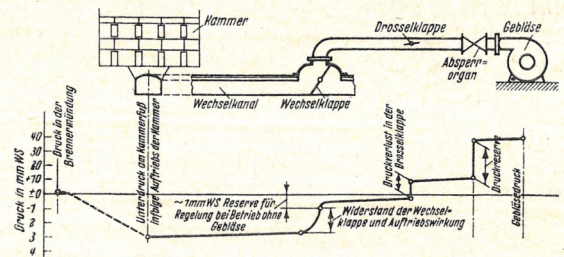


Bild 3. Zugverhältnisse und Strömungswiderstände an Glasschmelzöfen mit und ohne Gebläse für die Verbrennungsluft.

an Schmelzöfen im allgemeinen ein Druck von 20—50 mm WS, an Nebenöfen werden je nach Art der Brenner und sonstigen Einrichtungen meist 50—100 mm WS benötigt. Als Beispiel sei angeführt, daß für eine Wanne mit einem täglichen Verbrauch von 20 t Briketts eine Antriebsleistung von 1,5 kW für das Gebläse ausreicht.

3. Reingasbetrieb.

Bei Betriebe mit reinen Brennstoffen, wie Koks- ofengas, Erdgas usw. bietet die Messung der Gas- mengen und damit auch in Abhängigkeit von ihr die automatische Regelung der Luftmenge keine Schwierigkeiten. Anders bei Rohgas, bei welchem alle Meßeinrichtungen infolge der im Gas enthaltenen Teerdämpfe und Verunreinigungen eine sehr sorgfältige Wartung benötigen, wenn sie nicht ungenau und dadurch eher schädlich als nützlich sein sollen. Da diese Wartung über das bei Meßgeräten Gewohnte hinausgeht, verzichtet man bei Rohgasbetrieb meist auf eine automatische Regelung. Um solche Öfen einigermaßen gleichmäßig zu führen, ist eine sehr große Sorgfalt nötig, sowohl im Betrieb der Gaserzeuger wie am Ofen selbst. Trotzdem werden Störungen und Schwankungen nie unter ein gewisses Maß herabzumindern sein. Man wird sich deshalb die Frage vorzulegen haben, ob man diesen Zustand, insbesondere in Rücksicht auf die Qualität der Erzeugnisse, auf die Dauer beibehalten kann, oder ob zum Reingasbetrieb unter weitgehender Ausscheidung von Teer, Staub und Wasser überzugehen ist. Für sehr empfindliche Gläser hat man den letztgenannten Weg bereits beschritten. Er ist wegen der schlechten Wärmeabgabe der nicht leuchtenden Reingasflamme un-

angenehm und wärmewirtschaftlich meist ungünstiger. Eine Verbesserung der Verhältnisse wird durch Zusatz von Sauerstoff zur Verbrennungsluft (s. unten) erreicht oder durch Spezialerzeuger, die Gase bis 1700 kcal/Nm³ liefern.

B. Wannenöfen.

1. Schmelzleistungen.

Die Schmelzleistungen der Wannenöfen sind bei unverminderter oder verbesserter Qualität des erzeugten Glases erheblich gestiegen. 1927 fand die WBG als Mittelwert der spezifischen Schmelzleistung bei Hohlglas 0,5 t/m²24 h bezogen auf die Schmelzfläche, der Maximalwert lag bei 0,7. Heute erreichen gute europäische Anlagen 1,8 t/m²24 h, aus den USA wird über Rekord-Werte von 2,5 t/m²24 h berichtet. Die Steigerung ist in erster Linie der Durchlaßkonstruktion zu verdanken, die infolge ihrer bekannten Vorteile das Gebiet des Weißhohlglases ausschließlich beherrscht und auch in das Gebiet des Flachglases und der farbigen Gläser immer weiter eindringt. Des weiteren sind die Erhöhung der Schmelztemperatur auf etwa 1550° C, wie sie teilweise für Kalk-Soda-Gläser angewendet wird, und die sorgfältigere Ofenführung an der Leistungssteigerung beteiligt.

2. Durchlaßkonstruktion.

Die Abkühlung des Glases auf dem Weg von der Schmelzwanne zur Arbeitswanne entspricht bei der Durchlaßbauart etwa dem Wert $t_1 - t_2$ (Bild. 4). Die Temperatur, welche in der Schmelzwanne an der

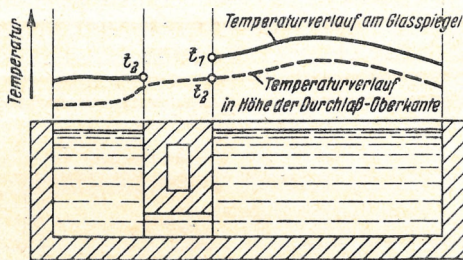


Bild 4. Temperaturverlauf in einer Durchlaßwanne.

Oberkante der Durchlaßöffnung herrscht, stellt sich etwa in der Arbeitswanne am Glasspiegel ein. Das Temperaturgefälle $t_1 - t_2$ hängt einerseits ab vom Niveauunterschied zwischen Glasspiegel und Oberkante Durchlaß, ferner von Art und Farbe des Glases und in großem Maße von den Strahlungseigenschaften der Flamme. Bei Weiß- und Halbweißgläsern ist für das Temperaturgefälle der Eisengehalt von entscheidender Bedeutung, ebenso spielt die Oxydationsstufe des Eisens eine große Rolle. Da aber Weißhohlgläser fast immer mit Soda und bei oxydierender Flamme geschmolzen werden, macht sich bei ihnen der letztgenannte Einfluß nur wenig bemerkbar.

Aus orientierenden Versuchen von HALLE¹⁾ über die Durchlässigkeit verschiedener Gläser wurden nachstehende Anhaltswerte für den Tempera-

turabfall in der Glasschmelze bei der Herstellung von Kalk-Soda-Gläsern hergeleitet.

Eisengehalt des Glases ausgedr. in % Fe ₂ O ₃	Temperaturabfall i. der Schmelze (°C/cm Badtiefe)
0,05	0,8—1,2
0,1	1,4—2,0
0,2	3,0—4,0
0,3	3,8—5,2
0,4	4,2—5,8

Diese Zahlen geben nur eine ungefähre Größenordnung, im einzelnen sind Abweichungen aus den genannten Gründen und infolge der Mannigfaltigkeiten der Bauart möglich. Bei der Tendenz, die Badtiefen gering zu halten (80—90 cm) und Weißglas großer Reinheit herzustellen, bleibt der mit dem Durchlaß zu erzielende Temperatursprung in engen Grenzen und man versteht die Neigung, zum „versenkten“ Durchlaß überzugehen, dessen Oberkante auf dem Niveau des Wannenbodens liegt. Dies gilt besonders für Wannen, die mit sehr hohen Schmelztemperaturen und -leistungen arbeiten. Wendet man z. B. bei einem Glas mit 0,1 % Gesamteisengehalt einen Durchlaß an, der 90 cm unter Glasspiegel liegt, so bekommt man nach obigem ein Temperaturgefälle von 90 (1,4—2,0) = 126°—180°, im Mittel 150°, etwa von 1450° auf 1300° C. Außerdem bringt ein großer Glasdurchsatz erhebliche Wärmemengen mit in die Arbeitswanne, welche leicht in der Lage sind, die dort auftretenden Wandverluste zu decken. In solchen Fällen werden die Schattenwände sehr dicht gesetzt, um wenigstens die Einstrahlung aus dem Schmelzraum niedrig zu halten.

3. Schmelztemperatur.

Eine Steigerung der Schmelzleistung über das Maß der „normalen“ Durchlaßwannen hinaus ist ohne grundlegende Abweichungen von den bestehenden Verfahren nur möglich durch Steigerung der Schmelztemperatur. Diesen Weg hat man bei den Hohlglaswannen der USA beschritten und die erwarteten Erfolge erzielt. Voraussetzung für die Maßnahme ist zur Vermeidung örtlicher Überhitzungen eine gleichmäßige, geregelte Feuerführung, welche man auch aus Qualitätsgründen anstrebt. Man arbeitet deshalb mit automatischer Regelung der Verbrennungseinstellung nach den seit langem bekannten Verfahren^{2) 3)}, nämlich

Konstanthaltung von :	durch Beeinflussung
Oberofentemperatur	der Brennstoffmenge
Brennst./Luft-Verhältn.	„ Luftmenge
Oberofendruck	des Kaminzuges.

Außerdem wird die Vorwärmtemperatur der Luft dadurch auf einen bestimmten Temperaturbereich festgelegt, daß man die Wechseleinrichtung automatisch bedient in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen den Kammern der beiden Ofenseiten.

²⁾ BÜSSING, W. Erfahrungen mit der selbsttätigen Regelung von Glasschmelzöfen. Glastechn. Ber. 14 (1936), S. 212.

³⁾ KLEIN, V. Versuch einer vollautomatischen Regelung der Ofenatmosphäre bei Verwendung von ungerinigtem Generatorgas. Glastechn. Ber. 19 (1941), S. 172—173.

¹⁾ HALLE, R. Untersuchungen über die Temperaturverteilung bei geschmolzenem Glase in Wannenöfen. J. Soc. Glass Technol. 31 (1947), S. 122—133.

4. Einlegeverfahren.

Das Einlegen des Gemenges und die dabei anzuwendenden Verfahren und Einrichtungen gewinnen fortlaufend an Bedeutung, da richtiges Einlegen sowohl auf die Schmelzleistung wie auf die Lebensdauer des Ofens Einfluß hat. Bei den alten offenen Wannen lagen die Gemengehaufen der beiden Ofenseiten jeweils in einem bestimmten Gebiet. Dazwischen und daneben gab es weite Bereiche, welche niemals mit Gemenge bedeckt wurden und damit für den Ofenbetrieb ohne großen Nutzen waren. Als man die Schmelzleistung steigerte, ohne die Ofentemperatur sehr wesentlich zu erhöhen, mußte man immer weitere Bereiche der Schmelzwanne mit Gemenge bedecken und es ging nicht mehr an, auf jeder Ofenseite nur einen Gemengehaufen zu haben, der bei der nächsten Einlage, meist nach Ablauf einer Stunde, bereits ganz oder weitgehend eingeschmolzen war. Statt dessen wird mit mehreren Gemengehaufen auf jeder Ofenseite gearbeitet, oder bei maschinellem Einlegen mit langgestreckten Gemengeinseln oder Gemengedecken, je nach Art der benutzten Einlegemaschine. Während es nach dem alten System nicht schwer war, für den Gemengehaufen die Stelle herauszufinden, an welcher er am besten einschmolz, ist es nunmehr notwendig, die Gemengezufuhr auf die einzelnen Bereiche der Schmelzwanne aufzuteilen, und zwar nach Maßgabe der jeweils herrschenden Temperaturen und Wärmeverhältnisse. Hierin liegt die Hauptschwierigkeit des mechanischen Einlegens in Hochleistungswannen.

Die Verstaubung des Gemenges mit ihren nachteiligen Einflüssen auf den Oberofen und das Gitterwerk wurde durch die Einführung der Vorbauten wesentlich vermindert. Neuerdings wird besonders darauf geachtet, insbesondere bei den mechanischen Einlegeverfahren, daß kein Gemenge mit trockener Oberfläche in den Ofen eintritt, sondern daß dieses vorgeschmolzen („glasiert“) ist und dadurch keine nennenswerte Verstaubung mehr eintreten kann.

5. Verbrennung mit leuchtender Flamme.

Leuchtende Flammen strahlen in einem weiten Spektralbereich und bei den Temperaturen der Glasschmelzöfen besonders intensiv im Sichtbaren, in welchem das Glas in hohem Maße durchlässig ist. Nichtleuchtende Flammen strahlen nur in einigen wenigen Banden des mittleren und langwelligen Infrarot. Die leuchtende Flamme ist in doppelter Weise wertvoll: sie gibt infolge ihres großen Strahlungsbereiches ihre Wärme lebhaft ab und zudem bei Wellenlängen, welche die Wärme nachhaltig in das Glas eindringen lassen⁴⁾. Infolgedessen kommt man bei leuchtender Flamme mit niedrigerer Flammentemperatur aus als bei nichtleuchtender; der Unterschied beträgt bei den Glasschmelzöfen etwa 100°C. Eine Erhöhung der Lebensdauer des Ofens ist deshalb zu erwarten, wenn mit leuchtender

4) SCHNEEKLOTH, W. Gasbeheizung und Wärmeübergang in Glasschmelzwannen. Glastechn. Ber. 13 (1935), S. 185—193.

Flamme gearbeitet wird, u. U. auch eine gewisse Wärmeersparnis. Um auch gereinigte Gase mit leuchtender Flamme zu verbrennen, kann man ihnen entweder die Stoffe zusetzen, die das Leuchten der Rohgasflamme verursachen, d. h. Teer bzw. Teeröl (Karburierung) oder durch geeignete Wärmebehandlung die im Reingas vorhandenen Kohlenwasserstoffe, insbesondere Methan, so umwandeln, daß Kohlenstoffteilchen als Träger der Leuchtkraft abgespalten werden. Bei dem geringen Gehalt des Generatorgases an Kohlenwasserstoffen kommt dieses Verfahren dafür kaum in Frage, es interessiert in erster Linie für Koksofengas und Erdgas. Eingehende Untersuchungen^{5) 6) 7)} haben gezeigt, daß nur in einem sehr begrenzten Temperaturbereich die Umwandlungen des Methans stattfinden und daß sie eine gewisse, für den Ofenbau recht merkwürdige Zeit für ihr Abfließen benötigen. Wenn es auch für den praktischen Zweck genügt, eine Teilmenge umzuwandeln, so ist es doch nicht leicht, diese Wirkung auf die Dauer mit völliger Sicherheit zu erzielen. Zur Kennzeichnung der Größenordnungen, um die es sich dabei handelt, sei angeführt, daß die Abscheidung von Teer und Ölen bei etwa 1100°C ein Maximum hat. Nach einer Aufheizzeit von 2,9 Sek. wurden aus einem Gas mit 63% CH₄ nahezu 40 g/Nm³ Teer und Leichtöl gebildet. Unter den gleichen Bedingungen wurden 20 g/Nm³ Kohlenstoff abgespalten. Bei weiterer Steigerung der Temperatur sinkt die Teer- und Ölmenge, während die Kohlenstoffmenge steigt.

Für die praktische Durchführung des Verfahrens kommen zwei Methoden in Frage. Entweder wird das Gas in einem besonderen Vorwärmer auf die Umwandlungstemperatur gebracht und dort eine entsprechende Zeit auf dieser Temperatur gehalten. Es tritt dann zusammen mit den Zersetzungs-

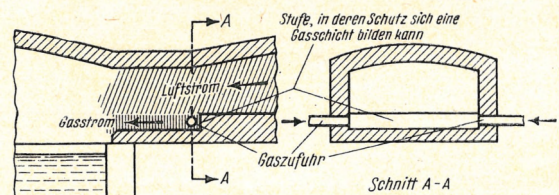


Bild 5. Brenner für leuchtende Ferngas (Erdgas-) Flamme.

produkten in den Ofen ein. Der andere, bei der technischen Ausführung meist beschrittene Weg besteht darin, daß die Verbrennung im Ganzen oder in einem Teilstrom verzögert wird, so daß eine gewisse Menge an Spaltungsprodukten entstehen kann.

Man erreicht diese Verzögerung z. B. dadurch, daß man das Gas in getrennter Schicht unter der Luft strömen läßt und die Geschwindigkeit so bemißt, daß nur eine allmähliche Vermischung stattfindet. Durch Beimischen von Rauchgas zum

5) HERNING, F. Analytische Untersuchungen über die Spaltung und Umwandlung des Methans. Arch. Eisenhüttenw. 14 (1940/41), S. 581—586.

6) RUMMEL, K. und P. O. VEH. Die Strahlung leuchtender Flammen, T. I. Arch. Eisenhüttenw. 14 (1940/41), S. 489—499. Ref. Glastechn. Ber. 20 (1942), S. 24.

7) VEH, P. O. Die Strahlung leuchtender Flammen, T. II. Arch. Eisenhüttenw. 14 (1940/41), S. 533—542. Ref. Glastechn. Ber. 19 (1941), S. 271.

Frischgasstrom kann man die Gasgeschwindigkeit und damit auch die Mischung und den Verbrennungsablauf ändern, ohne den einmal eingestellten Luftüberschuß zu beeinflussen⁸⁾. Ein Beispiel für die Konstruktion derartiger Brenner gibt Bild 5.

Verschiedene Versuchs- und Betriebsanlagen der letztgenannten Art sind bzw. waren in Betrieb, insbesondere an erdgasbeheizten SM.- und Glasschmelzöfen. Über die verwendeten Anordnungen und Ergebnisse sind wenig Einzelheiten bekannt geworden.

6. Sauerstoffanreicherung⁹⁾ 10).

Der Stickstoff der Verbrennungsluft geht als Ballast durch den Ofen, er wird mit Hilfe der bei der Verbrennung erzeugten Wärme auf Ofentemperatur erhitzt, gibt einen Teil dieser Wärme im Ofen wieder ab und nimmt den Rest als Abgasverlust mit aus dem Ofen heraus. Hält man diese großen Stickstoffmengen der Luft dem Ofen fern, indem man die Verbrennung mit Sauerstoff durchführt, so erreicht man eine wesentlich bessere Ausnutzung der Brennstoffwärme bzw. eine höhere Verbrennungstemperatur. Die Anwendung eines solchen Verfahrens ist durch den hohen Preis des Sauerstoffs begrenzt, es gibt jedoch verschiedene Fälle, in denen dieser Preis in Kauf genommen werden kann, z. B. wenn es sich darum handelt, mit geringwertigen Brennstoffen hohe Temperaturen zu erzielen oder wenn sehr kleine Räume beheizt werden sollen, so daß das Flammenvolumen niedrig gehalten werden muß. In den Glashütten ist in erster Linie zu denken an die Beheizung von Schmelzöfen mit gereinigtem Generatorgas, ferner an die Beheizung von Drehwannen, insbesondere solchen kleinen Durchmessers, sowie von Auftreibtrommeln. Entsprechende Versuche sind bisher nicht bekannt geworden, dagegen liegen Erfahrungen aus der Eisenindustrie vor, wo man besonders auf die Steigerung der Leistung von SM.-Öfen hingearbeitet hat.

In den meisten Fällen genügt eine Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff, um den gewünschten Erfolg zu erzielen, da nur geringe Fehlbeträge der Energiebilanz auszugleichen sind; es braucht dann nur eine Teilmenge der Luft durch Sauerstoff ersetzt zu werden. Auch kann zur weiteren Verbilligung in der Herstellung dem Sauerstoff eine Restmenge Stickstoff als Verunreinigung belassen werden.

Als Zahlenbeispiel wird die Wirkung der Sauerstoffanreicherung auf die Beheizung einer Drehwanne berechnet. Es sind folgende Angaben zugrunde gelegt:

Abmessung des Ofenraums der Drehwanne:

lichter Durchmesser	2 m
lichte Höhe	0,6 m
Innenraum	1,9 m ³

⁸⁾ SCHWALBE, F. G. Regelung der leuchtenden Flamme im Glasschmelzofen. J. Amer. Ceram. Soc. 23 (1940), S. 173—178.

⁹⁾ LENNINGS, W. Versuche mit sauerstoffangereicherter Luft. Stahl und Eisen 63 (1943), S. 757—767.

¹⁰⁾ BULLE, G. Gichtgasbeheizung unter Verwendung sauerstoffreicher Luft. Stahl und Eisen 60, (1940), S. 201—260.

Beheizung: Generatorgas (gereinigt)	1350 kcal/Nm ³
Luftüberschuß	1,1
Austrittstemperatur des Rauchgases aus der Drehwanne	1500 ⁰ C
Luftvorwärmung	1000 ⁰ C
Gasvorwärmung	400 ⁰ C

Bei Verbrennung mit Luft können im Ofenraum die Feuergase von 0,13 Nm³ Frischgas Platz finden, bei Verbrennung mit sauerstoffangereicherter Luft (halber O₂-Bedarf als reiner Sauerstoff) erhöht sich dieser Wert auf 0,164.

Nimmt man — als günstigsten Fall — die völlige Durchströmung des gesamten Ofenraumes an, so beträgt die Aufenthaltsdauer der Feuergase im Ofen bei Verbrennung mit Luft 1,5 Sek., bei Sauerstoffanreicherung 2 Sek.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad erhöht sich von 43 auf 50 %, vgl. Bild 6 (S. 56).

7. Doppeldecken.

Es erscheint bei oberflächlicher Betrachtung recht kühn, einen Ofen mit Doppelgewölbe zu bauen, d. h. bei den Steinen des Innengewölbes sowohl auf die Kühlwirkung der Außenluft wie auf die Beobachtungsmöglichkeit durch Augenschein zu verzichten. Allerdings wird diese Bauart meist für schmale Wannen angewendet, bei denen das Gewölbe an sich leicht zu beherrschen ist. Hinzu kommt, daß bei der Doppeldecke die Steine des inneren Gewölbes nur ein geringes Temperaturgefälle aufzunehmen haben, sie dehnen sich einheitlich aus und eine Konzentration der Druckkräfte auf den ofenseitigen Bereich mit allen nachteiligen Folgen wird vermieden. Diese Erscheinung bleibt dem äußeren Gewölbe vorbehalten, ist jedoch bei dem hier vorliegenden niedrigen Temperaturniveau leicht zu beherrschen. Damit wird die gute Lebensdauer verständlich. Wärmewirtschaftlich gesehen bringt eine Doppeldecke etwa die gleiche Ersparnis wie eine Isolierung des einfachen Gewölbes gewöhnlicher Bauart, d. i. etwa 8—10 % der insgesamt dem Ofen zugeführten Wärmemenge. Höhere Ersparnisse, die manchmal vermutet werden, sind im allgemeinen der günstigen Gesamtordnung zuzuschreiben, welche die Doppeldecke für Rekuperativwannen ermöglicht.

8. Metallrekuperatoren.

Für Kleinanlagen zieht man heute Rekuperativöfen der regenerativen Anordnung vor, da sie eine einfachere und übersichtlichere Bauweise zulassen und weniger Aufwand an Bedienung verlangen.

Steinrekuperatoren sind wegen des großen Raumbedarfs unerwünscht, außerdem sind sie auf die Dauer schwer dicht zu halten, insbesondere wenn sie für den Bereich hoher Temperaturen nicht aus Spezialformensteinen in Sillimanitqualitäten o. ä. hergestellt sind, es liegt deshalb nahe, zum Metallrekuperator auszuweichen. Da aber auf die Dauer keiner der verfügbaren metallischen Werkstoffe den Abgastemperaturen der Glasschmelzöfen widersteht, muß man entweder dem Metallrekuperator einen Steinrekuperator vorschalten oder dem Rauchgas Kaltluft zusetzen, um seine Anfangstemperatur auf

das tragbare Maß zu vermindern. Man führt auf diese Weise dem Rekuperator ein Rauchgas-Luftgemisch von etwa 1000—1100° C zu, so daß die Verbrennungsluft kaum noch über 800° C erwärmt werden kann und der gesamte Wirkungsgrad des Ofens entsprechend sinkt. Trotzdem macht man bei ferngasbeheizten Öfen, insbesondere Kleinschmelzöfen, manchmal von der Kaltluftbeimischung zum Rauchgas Gebrauch, da man auf diese Weise sehr einfache Bauarten bekommt, welche die wärmewirtschaftlichen Nachteile in gewissem Umfang ausgleichen. Bei Generatorgas ist es im allgemeinen nicht möglich, mit einem solchen Ofen Schmelztemperaturen zu erreichen, wie sich an einer ausgeführten Anlage dieser Art bestätigte.

Der Ausweg einer Hintereinanderschaltung von Stein- und Metallrekuperator wurde bisher nicht beschritten, obwohl er vielerlei Vorteile verspricht.

Die nachstehende Tafel 2 sowie Bild 6 geben die zahlenmäßigen Unterlagen für die geschilderten Zusammenhänge.

Tafel 2.

Vorwärmung und feuertechnischer Wirkungsgrad an Glasschmelzöfen (auf ganze Zahlen aufgerundet), vgl. Abb. 6.

Luftvorwärmung °C	Generatorgas (Hu = 1350 kcal/Nm³) Vorwärmungstemp. °C						Koksofengas (Hu = 4000 kcal/Nm³) nicht vorgewärmt
	0	200	400	600	800	1000	
0	5	10	15	20	25	31	22
200	10	15	20	25	30	36	28
400	15	20	25	30	35	41	35
600	21	26	31	36	41	47	42
800	27	32	37	42	47	53	49
1000	33	38	43	48	53	59	56
1200	39	44	49	54	59	65	62

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der Brennstoffwärme im Oberofen zur Verfügung steht. Dabei ist vorstehend in Tafel 2 mit einer Rauchgas-Austrittstemperatur aus dem Oberofen von 1500° C, einem Luftüberschuß von 10% und einem Heizwert von 1350 kcal/Nm³ für Generatorgas und 4000 kcal/Nm³ für Koksofengas gerechnet. Bei den gewöhnlichen Bauarten der Glasschmelzöfen werden im Oberofen für das Schmelzen und zur Deckung der Wandverluste 45—55% der Brennstoffwärme benötigt, d. h. mit feuerungstechnischen Wirkungsgraden, die wesentlich unter 45% liegen, erreicht man nicht die erforderlichen Schmelztemperaturen. Die Tafel zeigt somit, daß man mit kaltem Ferngas bei einer Luftvorwärmung auf 800° C arbeiten kann, während Generatorgasöfen selbst mit Gastemperaturen von 400° C und Luftvorwärmung von 1000° C unter den genannten Bedingungen nur schwer auf Temperatur zu halten sind.

C. Hafenöfen.

Die in ihrer Entwicklung lange Zeit vernachlässigten Hafenöfen lassen, ähnlich wie die Wannen, durch neuzeitliche Ausbildung der Bauelemente zahlreiche Verbesserungen zu. Hierüber wird in einer gesonderten Arbeit berichtet.

D. Kühl- und Nebenöfen.

Die erhebliche Kürzung der Kühlzeiten von 6 bis 12 auf 1 bis 2 Stunden bei den kontinuierlichen Kühlöfen war nur möglich durch ihre wärmetechnisch zweckmäßige Ausbildung. Bereits bei der Bemessung der Heizungseinrichtung und der Ofenwände muß berücksichtigt werden, welche Wärmemengen bei den verschiedenen Belastungsgraden des Ofens zu- bzw. abzuführen sind, um die geforderten Kühlkurven zu erhalten. Man hat erkannt, daß übertriebene Sicherheitsfaktoren, die man früher im Interesse einer sorglosen Bedienung einbaute, zu sehr hohen Anlagekosten führen.

Neben den seit längerer Zeit beachteten Grundsätzen des Leichtbaues, der besonders für periodisch betriebene Öfen wichtig ist, und der geordneten Feuerführung, sind einige neue Fortschritte für den Bau der Nebenöfen von Bedeutung, die im Betrieb der Glashütten noch wenig oder gar nicht ausgenutzt werden.

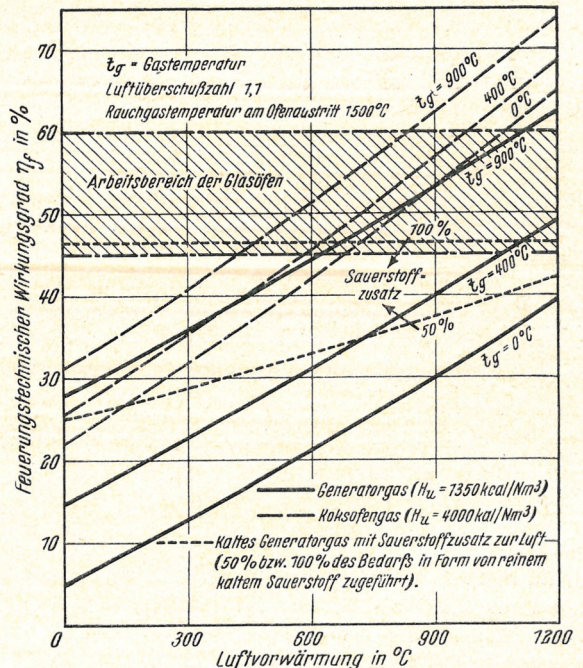


Bild 6. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad (η_f) von Glasschmelzöfen in Abhängigkeit von Luft- u Gasvorwärmung, Wirkung der Sauerstoffanreicherung.

1. Rauchgasrückführung.

Niedrige Verbrennungstemperaturen, wie sie in Kühlöfen, Farbeinbrennöfen und in der Anheizzeit bei Temperöfen herrschen, erzielt man vielfach durch hohen Luftüberschuß. Die Verbrennungstemperatur, die sich mit „normalem“ Luftüberschuß von 10—20% einstellt, ist bei den meisten Brennstoffen für die Zwecke dieser Nebenöfen zu hoch. Durch erheblichen Luftzusatz vermindert man sie auf das für den Ofenbetrieb zweckmäßige Maß. Auf die Brennstoffausnutzung bzw. den Wirkungsgrad der Anlagen hat dieses Verfahren einen sehr nachteiligen Einfluß, wie sich aus dem hohen Abgasverlust leicht erkennen läßt. Man kann eine Brennstoffersparnis erzielen, wenn man, wie bei Hochtemperaturöfen, die Luft mit Abgaswärme rekuperativ erhitzt. Da aber die Überschlußluft ohnehin nur als Ballaststoff dient, dessen chemische

Zusammensetzung wenig interessiert, ist es wesentlich einfacher, die Abgase selbst in den Ofen zurückzuführen (Bild 7).

Das Rauchgas wird vom Ofenausstritt zum Brenner zurückgeleitet und lediglich der Temperaturverlust, den das Rauchgas durch die Wärmeabgabe im Ofen und der Rückleitung erlitten hat, durch Beheizung mit Frischgas (und entsprechende Verbrennungsluft) ausgeglichen. Auf diese Weise lassen sich nicht nur Brennstoffersparnisse erzielen, die bei Kühlöfen etwa 50 % betragen, es wird auch durch die geordnete und beeinflussbare Strömung der Gase die Wärmeverteilung und der Wärmeübergang verbessert, so daß mit größerer Sicherheit auf eine ausreichende Entspannung aller in den Ofen gegebenen Stücke und in allen ihren Teilen gerechnet werden kann.

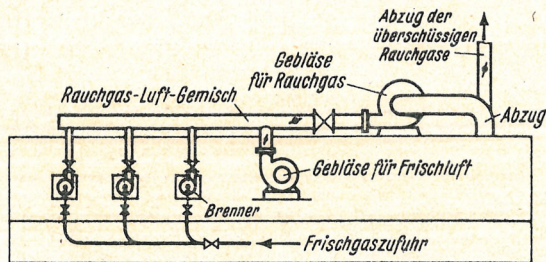


Bild 7. Bandkühlofen mit Rauchgasrückführung.

2. Strahlrohrheizung.

Seit etwa 10 Jahren wird in der Stahlindustrie für verschiedene Zwecke die Strahlrohrheizung benutzt. Sie beruht auf dem Grundgedanken, daß die Feuergase nichtleuchtender Flammen nur in einigen Banden strahlen, während feste Körper eine graue Strahlung aussenden, in der alle in Frage kommenden Wellenlängenbereiche vertreten sind. Wenn es daher gelingt, durch geeignete Maßnahmen, z. B. hohe Geschwindigkeiten, die Wärme wirksam von den Rauchgasen auf einen festen Körper zu übertragen, so steht für ihre Weitergabe an das Wärmgut die intensive Strahlung des festen Körpers zur Verfügung. Die Einschaltung eines Zwischengliedes erweist sich in diesem Fall nicht als Hemmnis, sondern als Vorteil, sie hat sich bei der Strahlrohrheizung vielfach bewährt. Die Wärmeübergabe vom Rauchgas an das Rohr kann durch zweckmäßige Bemessung, insbesondere hohe Rauchgasgeschwindigkeit in seinem Innern, gesichert werden,

die Weitergabe an das Wärmgut erfordert eine günstige Anordnung des Wärmgutes zum Strahler.

Über die Anwendung der Strahlungsheizung für kontinuierliche Kühlöfen wird neuerdings aus den USA berichtet; auch für sonstige Nebenöfen kann das Verfahren von Vorteil sein. Da die Rauchgase vom Ofenraum getrennt sind, entspricht es einer Vollmuffelheizung. Dieser ist es durch geringere Baukosten, der Feuermuffelkonstruktion durch bessere Abdichtung und einfachere Regelung überlegen.

Die neuerdings viel propagierte „Infrarot-Heizung“ (infrared-heating) entspricht in ihrem Grundgedanken dem Strahlrohr, d. h. der wirksamen Wärmeabgabe durch Heranziehung der Strahlung fester Körper, die allerdings nicht immer geschlossene Hohlräume bilden, so daß die Rauchgase z. T. auch in den Arbeitsraum des Ofens eintreten. Infrarotheizung kommt besonders für Trocknung u. ä. in Frage, da für diesen Prozeß ein Vorhandensein bestimmter Wellenlängen wichtig ist.

3. Haubenöfen.

Die wärmetechnische Ausbildung der Kammerkühlöfen wird meist völlig vernachlässigt. Um die Anlagekosten niedrig zu halten, werden primitive Konstruktionen ausgeführt, die mit sehr ungünstigen Wärmeverbrauchszahlen arbeiten. Da dieses Ofensystem für Sonderzwecke auch weiterhin in Gebrauch bleiben wird, verdient es eine gewisse Beachtung.

Das wärmetechnisch zweckmäßigste System der Beheizung für diesen Ofentyp ist die Rauchgasrückführung. Sie hat den Nachteil hoher Anlagekosten, aber auch diese können vermindert werden, wenn man das System der Heizhaube benutzt, das in der Stahlindustrie bekannt ist und auf dessen Übertragbarkeit für Kammerkühlöfen hingewiesen sei. Es arbeitet derart, daß die Seitenwände und Decke des Ofens (in Leichtausführung) ein geschlossenes Ganzes bilden, das mittels Einschienenkran von Heizstätte zu Heizstätte gebracht werden kann. Die Haube trägt alle Heizeinrichtungen, Brenner, Ventilator, Umwälzer usw. und wird an jedem Betriebsplatz an die Gaszufuhr und die Stromleitung angeschlossen. Vor dem Weitertransport der Heizhaube wird das Wärm- bzw. Kühlgut mit einer Blechhaube (u. U. mit Glaswattbelag) bedeckt, die den erforderlichen Wärmeschutz bietet. (17452)