

Berechnungen zum Einfluß der Rohstoffvorwärmung auf den Wärmehaushalt von Glasschmelzöfen

Von Hansjürgen Barklage-Hilgefort und Wolfgang Trier, Frankfurt (Main)

(Auszugsweise vorgetragen auf dem XIII. Internationalen Glaskongreß am 7. Juli 1983 in Hamburg)

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 18. August 1983)

Ein Rechenmodell zur Beschreibung des Verbundes Glasschmelzöfen/Rohstoffvorwärmer wird vorgestellt. Für die Beschreibung des Oberofens wird eine geschlossene Gleichung hergeleitet, die auf der Differentialgleichung für den Wärmeübergang zwischen Flamme und Umgebung beruht. Zur Beschreibung des Luft- und Rohstoffvorwärmers dienen die bekannten Rekuperatorformeln. Die einzelnen Anlagenteile werden mittels ihrer Wärmedurchgangszahlen charakterisiert, wobei für den Ofen eine für die Wärmeübertragung an das Wärmgut und eine für die Wärmeabgabe an die Umgebung eingeführt werden.

Während durch Verbesserungen der Luftvorwärmung und der Wärmeisolation bei guten, dem Stand der Technik entsprechenden Wannennur noch geringfügige Verbesserungen zu erwarten sind,

bringt die Rohstoffvorwärmung noch deutliche Vorteile. Bei Einführung einer Rohstoffvorwärmung sind eine Parallel- und eine Serienschaltung von Luft- und Rohstoffvorwärmer denkbar. Hinsichtlich der Wärmeübertragungsbedingungen kann für beide Schaltungsarten die Existenz optimaler Parameterkonstellationen aufgezeigt werden. Bei der Parallelschaltung gibt es bezüglich der den einzelnen Anlagenteilen zugeführten Abgasteilströme ebenfalls ein Optimum. Die Parallelschaltung verspricht in wärmetechnischer Hinsicht größere Vorteile, wird aber wegen höherer Abgas- und Rohstoffvorwärmtemperaturen schwerer zu verwirklichen sein. Wichtig ist darüber hinaus, daß ein möglichst großer Rohstoffanteil vorgewärmt wird.

Calculations of the influence of raw material preheating on the thermal balance of glass melting furnaces

A quantitative model is proposed to describe the combined furnace/preheater unit. To describe the combustion space a closed equation is derived which is based on the differential equation for heat transfer between flame and surroundings. The well known recuperator formula is used to describe both air and raw material preheating. The individual parts of the installation are characterized by their heat transfer coefficients; for the furnace there is one for the heat transferred to the charge and one for heat lost to the surroundings.

Although improvements to air preheating and heat insulation must be desirable the state of furnace technology means that only

small improvements are to be expected, yet raw material preheating has significant advantages. By introducing raw material preheating either a parallel or a series linking of the air and batch preheating may be envisaged. According to the heat transfer conditions both kinds of link can be shown to exhibit optimum sets of parameters. For parallel connexion there is also an optimum distribution of waste gas flows between the individual units. Parallel connexion would have greater advantages in terms of thermal efficiency but, because of higher waste gas and batch temperatures, would be more difficult to realize in practice. It is consequently important to preheat as large a proportion of the batch materials as possible.

Calculs pour déterminer l'influence du préchauffage des matières premières sur le bilan thermique des fours de fusion du verre

On présente un modèle de calcul pour décrire l'association four de fusion du verre/préchauffage des matières premières. Pour décrire la superstructure du four, on établit une équation d'une intégrale définie, basée sur l'équation différentielle qui caractérise le transfert de chaleur entre la flamme et son environnement. On se sert des formules bien connues du récupérateur pour décrire le préchauffage de l'air et des matières premières. Chaque partie des installations prises individuellement est caractérisée par son coefficient de transmission thermique; on en introduit un pour la transmission de chaleur au matériau à chauffer et un pour les pertes de chaleur dans l'environnement du four.

En améliorant le préchauffage de l'air et l'isolation thermique, on ne peut plus s'attendre, dans les bons fours à bassin actuels, qu'à de légères améliorations, alors que le préchauffage des matières

premières offre, lui, des avantages appréciables. Un montage en parallèle ou en série des récupérateurs et des systèmes de préchauffage des matières premières est concevable lorsque l'on instaure un préchauffage des matières premières. En ce qui concerne les conditions de transmission de la chaleur, il est possible de mettre en évidence, pour les deux types de montage, un ensemble de paramètres optimaux. Lors du montage en parallèle, on obtient également un optimum en ce qui concerne les quantités de chaleur perdue qui parviennent à chaque partie des installations. Le montage en parallèle, du point de vue thermique, offre des avantages plus grands, mais il est plus difficile à réaliser à cause des températures plus élevées des fumées et du préchauffage des matières premières. En outre, il est important qu'une proportion de matières premières la plus grande possible soit préchauffée.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, welche Möglichkeiten aus rein wärmetechnisch-thermodynamischer Betrachtungsweise bestehen, den Wirkungsgrad des Glasschmelzprozesses zu verbessern. Als Vergleichsmaßstab soll dabei die herkömmliche

Anlage mit großzügig dimensionierten Regeneratoren dienen. Untersucht wird, wie sich die Rohstoffvorwärmung wärmetechnisch auswirkt, wobei verschiedene prozeßtechnische Varianten (Nachschalten des Rohstoffvorwärmers oder Abzweigen eines hei-

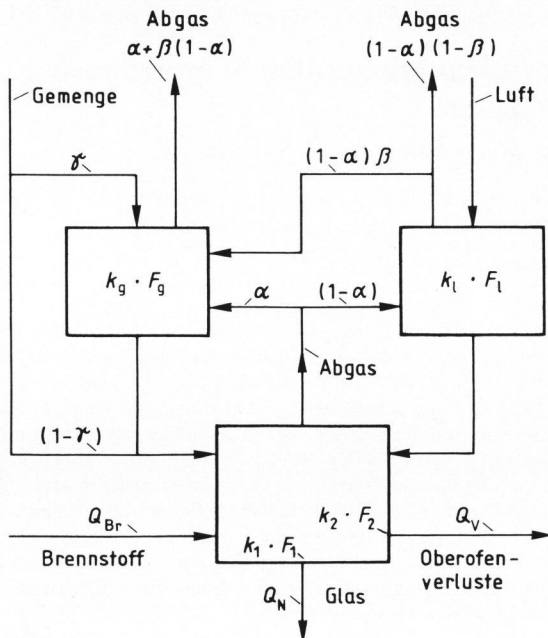


Bild 1. Blockschaltbild eines Glasschmelzofens mit Luft- und Gemengevorwärmer.

ßen Abgasteilstromes) auf ihren Wirkungsgrad hin untersucht werden sollen. Die einzelnen Anlagenkomponenten, insbesondere der Rohstoffvorwärmer, sollen dabei global betrachtet werden, ohne nähere Angaben über die bauliche Ausführung zu machen (Black-Box-Verfahren).

Als einfachste Maßnahme zur Senkung des Energieverbrauches ist die Verbesserung der Luftvorwärmung zu nennen. Allgemein üblich sind heute Kammerwirkungsgrade von 50 bis 70 %. Dies erscheint auf den ersten Blick vielleicht etwas niedrig. Zu berücksichtigen ist aber, daß durch das ungünstige Kapazitätsstromverhältnis Abgas/Luft von über 1,2 – in extremen Fällen bis zu 1,4 – der Wirkungsgrad grundsätzlich auf Werte unter 80 % begrenzt ist. Als Kapazitätsstrom bezeichnet man das Produkt aus dem Volumen- bzw. Massenstrom und der spezifischen Wärmekapazität eines Stoffes.

Das ungünstige Kapazitätsstromverhältnis beruht auf dem größeren Volumenstrom und auf der höheren spezifischen Wärmekapazität des Abgases. Gerade bei niedrigerem Wärmeverbrauch und entsprechend niedrigen Volumenströmen von Abgas und Verbrennungsluft kommt erschwerend hinzu, daß bei einer Gemengesmelze das Kapazitätsstromverhältnis durch Gemengegas und Gemengefeuchte, die dem Abgas zuzuschlagen sind, noch weiter zur ungünstigen Seite verschoben wird. Berücksichtigt man zusätzlich den Einfluß von Undichtigkeiten, so zeigt sich bei genauerer Überlegung, daß eine Vergrößerung der Regenerativkammern nur in sehr begrenztem Umfang weiterhilft, insbesondere auch, weil der Wirkungsgrad der Kammern nicht proportional zu ihrer Größe ansteigt.

Aus all diesen Gründen drängt sich die Suche nach neuen Möglichkeiten auf, die in den Abgasen enthaltenen und zur Zeit nicht direkt dem Prozeß zurückführbaren Energiemengen zurückzugewinnen. Ein Weg ist der Einsatz von Abhitzeesseln [1]. Will man jedoch die zurückgewonnene Wärme wieder in den Prozeß zurückführen, so bleibt als einziger Weg die Gemengevorwärmung und hier als Sonderfall die Scherbenvorwärmung.

1. Wärmetechnische Fragestellung

Bild 1 zeigt das Blockschaltbild einer Glasschmelzwanne mit Luftvorwärmer und Rohstoffvorwärmer. Für die drei beteiligten Medien Rohstoffe bzw. Glas, Luft und Abgas sind die folgenden Wege zugelassen:

Gemenge: durch den Rohstoffvorwärmer zum Ofen, Bypass direkt zum Ofen;

Luft: durch den Luftvorwärmer zum Ofen;

Abgas: zum Luftvorwärmer und zum Rohstoffvorwärmer, vom Luftvorwärmer zum Rohstoffvorwärmer.

Die Koeffizienten α , β und γ charakterisieren jeweils den Anteil, der über die möglichen Wege geleitet wird, und haben folgende Bedeutung:

α : Anteil der Abgase, der direkt zum Rohstoffvorwärmer geleitet wird;

β : Anteil der aus dem Luftvorwärmer austretenden Abgase, der zum Rohstoffvorwärmer geleitet wird;

γ : über den Rohstoffvorwärmer geleiteter Rohstoffanteil.

Damit ist der Verband dreier gekoppelter, verschiedenen beaufschlagter Wärmetauscher zu beschreiben. Als Besonderheit kommt hinzu, daß einer der Wärmetauscher, nämlich der eigentliche Ofen, Brennstoffenergie aufnimmt, in Bild 1 mit Q_{Br} bezeichnet, und Wandverluste Q_V an die Umgebung abgibt. Zur Theorie der Wärmetauscher kann auf einschlägige Lehrbücher verwiesen werden, z. B. [2]. Über gekoppelte Wärmetauscher wurden eigene, auf die hier angesprochene Problematik begrenzte Überlegungen angestellt. Sehr umfassende Berechnungen zum wärmetechnischen Verhalten von Glasschmelzöfen, bei denen das Verhalten des Oberofens im Mittelpunkt stand, wurden z. B. von Trier und Voss [3 und 4] durchgeführt. Für das hier angesprochene Problem reicht eine pauschalere Beschreibung des Oberofens aus. Der Ofen soll die Breite B und die Länge L haben. Die Temperatur des wärmenden Mediums, also der Flammengase, sei ϑ_F , die des aufzuwärmenden Mediums ϑ_2 . Der Kapazitätsstrom der Flammengase sei C_a , wofür näherungsweise der Kapazitätsstrom der Abgase gewählt werden kann. Die Umgebungstemperatur ist mit ϑ_0 angegeben. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Flamme und Glasbad ist k_1 , der zwischen Flamme und Umgebung

k_2 . Vereinfachend wird angenommen, daß das Glasbad eine konstante mittlere Oberflächentemperatur ϑ_{OB} haben soll.

Für die Flammentemperatur ϑ_F kann unter diesen Voraussetzungen die Differentialgleichung (1) aufgestellt werden:

$$\frac{d\vartheta_F}{dx} = -(\vartheta_F - \vartheta_{OB}) \frac{k_1 \cdot B}{C_a} - (\vartheta_F - \vartheta_0) \frac{k_1 \cdot B}{C_a} + \frac{Q_{Br}}{C_a} \frac{dH(x)}{dx} \quad (1)$$

Gleichung (1) sagt aus, daß die Abnahme der Flammentemperatur proportional zu den an Glasbad und Umgebung abgegebenen Wärmemengen ist. Über den dritten Term auf der rechten Seite von Gleichung (1) wird das Ausbrandverhalten der Flamme in die Rechnung eingebracht, wobei $dH(x)/dx$ die differenzierte Ausbrandfunktion der Flamme längs des Flammenweges x ist. Für Freistrahlfammen kann nach Günther [5] folgende Ausbrandfunktion eingesetzt werden:

$$H(x) = 1 - \exp(-p(x/D_0)^b) \quad (2)$$

mit: $p = 0,001$ und $b = 1,8$.

Normiert man die Länge des Ofens auf 1, so kann man unter der Annahme, daß nach $2/3$ der Ofenlänge der Ausbrand zu 95 % erfolgt ist, für den Düsenquerschnitt D_0 den Wert 0,0075 einsetzen. Die Lösung von Gleichung (1) kann wie folgt angegeben werden:

$$\vartheta_F = \exp(ax) \cdot (\vartheta'_1 - G(0)) - \frac{\vartheta_{OB} k_1 + \vartheta_0 k_2}{k_1 + k_2} (1 - \exp(ax)) + G(x) \cdot \exp(ax) \quad (3)$$

mit

$$a = -B \cdot \frac{(k_1 + k_2)}{C_a} \quad (4)$$

und

$$G(x) = \frac{Q_{Br}}{C_a} \int_0^x \frac{dH}{dx}(x') \cdot \exp(ax') dx' \quad (5)$$

Die Starttemperatur ϑ_1 muß aus der Luftvorwärmtemperatur ermittelt werden. Durch Einsetzen von $x = L$ ergibt sich die Abgastemperatur ϑ_a bei Verlassen des Oberofens:

$$\vartheta_a = \exp(aL) \cdot (\vartheta'_1 - G(0)) - \frac{\vartheta_{OB} k_1 + \vartheta_0 k_2}{k_1 + k_2} (1 - \exp(aL)) + G(L) \cdot \exp(aL) \quad (6)$$

Zur Beschreibung des Luft- und Rohstoffvorwärmers, die durch ihre $(k \cdot F)$ -Werte charakterisiert werden, werden die bekannten Rekuperatorformeln herangezogen [2]:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 - (\vartheta_1 - \vartheta'_1) A, \quad (7)$$

$$\vartheta'_2 = \vartheta_1 - (\vartheta_1 - \vartheta'_1) A' \quad (8)$$

Beim Index 1 handelt es sich hier um Eintrittstemperaturen, beim Index 2 um Austrittstemperaturen. Die gestrichenen Größen beziehen sich immer auf das wärmeaufnehmende Medium. Für A und A' gilt im Gegenstrombetrieb:

$$A = (1 - E)/(1 - E \cdot C/C'), \quad (9)$$

$$A' = (1 - C/C')/(1 - E \cdot C/C'), \quad (10)$$

$$E = \exp(k \cdot F (1/C' - 1/C)), \quad (11)$$

wobei C und C' die Kapazitätsströme des wärmeabgebenden und wärmeaufnehmenden Mediums sind. Für den Luftvorwärmer ist für C und C' nach Bild 1 einzusetzen:

$$C = C_a \cdot (1 - \alpha), \quad (12)$$

$$C' = C_1 \quad (13)$$

Entsprechend gilt für den Rohstoffvorwärmer:

$$C = C_a \cdot (\alpha + (1 - \alpha) \beta), \quad (14)$$

$$C' = \gamma \cdot C_g \quad (15)$$

Mit C_a , C_1 und C_g werden die Kapazitätsströme von Abgas, Luft und Rohstoffen bezeichnet.

Mit den Gleichungen (6) bis (15) kann ein lineares Gleichungssystem aufgestellt werden, das die Berechnung aller zur Frage stehenden Temperaturen und Wärmeströme im Gesamtsystem ermöglicht.

Die Einführung von dimensionslosen Kennzahlen kann im vorliegenden Fall in sehr einfacher Weise geschehen. Als Bezugsgröße dient dabei der Wasserwert des hergestellten Glases, der die Belastung des Ofens im wärmetechnischen Sinne darstellt. Dividiert man die Wasserwerte des Abgases, der Luft und der Gemengegase durch diesen Wert, so werden alle Wasserwerte zu dimensionslosen Zahlen, wobei die dimensionslose Kennzahl des Glases den Wert 1 annimmt. Weiterhin ist es möglich, die $(k \cdot F)$ -Werte, die den Wärmeaustausch in den einzelnen Anlagenkomponenten beschreiben, durch den Wasserwert des erschmolzenen Glases zu dividieren. Die $(k \cdot F)$ -Werte haben ursprünglich ebenfalls die Dimension eines Wasserwertes und werden somit ebenfalls zu dimensionslosen Zahlen. Dividiert man weiterhin die von außen dem Gesamtprozeß zugeführte Wärmemenge durch den Wasserwert des Glases, so nimmt diese Wärmemenge die Dimension einer Temperatur an. Diese Temperatur würde das Glas bei einem Anlagenwirkungsgrad von 1 ohne Berücksichtigung der Gemengereaktionen annehmen. Die folgende Tabelle 1 soll eine Vorstellung darüber vermitteln, in welcher Größenordnung die genannten Kennwerte in dimensionsbehafteter und dimensionsloser Darstellung liegen.

Die dimensionslosen Wasserwerte von Luft und Abgas sind bei der Flachglaswanne wegen des

Tabelle 1. Wärmetechnische Kenndaten von Glasschmelzöfen

	mittelgroße Behälterglaswanne		große Flachglaswanne	
	absolute Größen	normierte Größen	absolute Größen	normierte Größen
<u>Ofendaten</u>				
Durchsatz	100 t Glas/d		600 t Glas/d	
spezifischer Wärmeverbrauch	5 023 kJ/kg Glas (1 200 kcal/kg Glas)		6 698 kJ/kg Glas (1 600 kcal/kg Glas)	
Brennstoff	Erdgas H		Heizöl S	
Heizwert H_u	32 391 kJ/m ³		40 964 kJ/kg	
Brennstoffmenge	645,24 m ³ /h		4 081,63 kg/h	
Luftüberschußzahl λ	1,05		1,15	
Luftmenge	6 707 m ³ /h		50 694 m ³ /h	
Abgasmenge	7 353 m ³ /h		52 735 m ³ /h	
Gemengegase (CO ₂)	340 m ³ /h		2 038 m ³ /h	
<u>Kapazitätsströme</u>				
Luft ($c_p = 1,44$ kJ/(m ³ K))	9 643 kJ/(K h)	1,977	7 286 kJ/(K h)	2,491
Abgase ($c_p = 1,68$ kJ/(m ³ K))	12 356 kJ/(K h)	2,533	89 402 kJ/(K h)	3,055
Gemengegas ($c_p = 1,68$ kJ/(m ³ K))	573 kJ/(K h)	0,117	3 457 kJ/(K h)	0,118
Glas ($c_p = 1,17$ kJ/(kg K))	4 878 kJ/(K h)	1	29 260 kJ/(K h)	1
<u>Temperaturen</u>				
entnommenes Glas	1 385 °C		1 429 °C	
Abgas über Kammer	1 400 °C		1 450 °C	
Abgas unter Kammer	557 °C		539 °C	
Luft eintritt	20 °C		20 °C	
Luft über Kammer	1 150 °C		1 180 °C	
Wirkungsgrad der Anlage	0,435		0,334	
Wirkungsgrad der Regeneration	0,611		0,637	
<u>Wärmeströme</u>				
Verluste:				
a) Oberofen Q_v	23,2 %		37,8 %	
b) Abgase Q_a	33,2 %		28,8 %	
Wärmezufuhr Q_{Br}	$2,09 \cdot 10^7$ kJ/h	4 284 °C	$1,67 \cdot 10^8$ kJ/h	5 714 °C
<u>($k \cdot F$)-Werte</u>				
Regenerator	29 026 kJ/(K h)	5,95	174 682 kJ/(K h)	5,97
Flamme/Glasbad	38 568 kJ/(K h)	7,91	222 083 kJ/(K h)	7,59
Oberofenumgebung	3 269 kJ/(K h)	0,67	40 086 kJ/(K h)	1,37

höheren spezifischen Wärmeverbrauchs und der hier angenommenen größeren Luftüberschußzahl größer als die entsprechenden Werte der Behälterglaswanne. Die ($k \cdot F$)-Werte der Regeneratoren unterscheiden sich nur geringfügig voneinander, auch die Wirkungsgrade liegen sehr nah zusammen. Ebenfalls gering sind die Unterschiede des ($k \cdot F$)-Wertes für den Wärmeübergang zwischen Flamme und Glasbad, während der ($k \cdot F$)-Wert, der die Verluste an die Umgebung beschreibt, bei der Flachglaswanne doppelt so groß ist. Dementsprechend wird die pro kg Glas bei der Flachglaswanne mehr eingesetzte Energie in erster Linie in Form von Oberofenverlusten an die Umgebung abgegeben. Wesentlich ist, daß nach Tabelle 1 für zwei auf den ersten Blick sehr unterschiedlichen Anlagen die ($k \cdot F$)-Werte, die als Konstruktionsmerkmale zusammen mit den Betriebsdaten die Beschreibung des Verhaltens der gesamten Anlage ermöglichen, zum Teil fast identische Werte annehmen. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit,

mit dimensionslosen Zahlen Ergebnisse zu erhalten, die fast uneingeschränkt auf reale Anlagen übertragen werden können.

2. Ergebnisse der Berechnungen

2.1. Auswirkungen von Vergrößerungen der Regeneratoren und von Isolationsmaßnahmen

Als erster und aus verfahrenstechnischer Sicht einfachster Schritt zur Verbesserung der Wärmeregeneration von Glasschmelzöfen bietet sich die Vergrößerung der Regeneratoren an. Bild 2 zeigt den Wirkungsgrad eines Glasschmelzofens in Abhängigkeit von der zugeführten Wärmemenge, die in °C angegeben wird, entsprechend der Normenkatur in Tabelle 1. Hier und in allen folgenden Berechnungen wurden für den Oberofen die ($k \cdot F$)-Werte der Hohlglaswanne in Tabelle 1 zugrundegelegt. Als Kurvenparameter wird der ($k \cdot F$)-Wert des Regenerators, ebenfalls in dimensionsloser Darstellung nach

Tabelle 1, angegeben. Die zusätzlich eingezeichneten Hyperbeln grenzen den technologisch interessanten Bereich von Entnahmetemperaturen zwischen 1400 und 1600 °C ein, wobei die Gemengereaktionen mit berücksichtigt werden. Wesentlich ist, daß die einzelnen Kurven mit zunehmender Regeneratorgröße immer enger zusammenrücken. Gleichbedeutend damit ist, daß die Auswirkungen von Vergrößerungen an den Regeneratoren um so geringer sind, je größer diese bereits sind. Die Auswirkungen bauseitiger Verbesserungen an den Regeneratoren bedürfen aus diesem Grunde einer kritischen Überprüfung ihrer Rentabilität. Die in Tabelle 1 angegebenen $(k \cdot F)$ -Werte der Regeneratoren zeigen im Zusammenhang mit Bild 2, daß die Rentabilitätsgrenzen mit den heutigen Anlagen zum Teil schon fast erreicht werden. Die Berechnung von Regeneratoren wird aus diesem Grunde mit einem erheblichen Aufwand betrieben, um zu einer möglichst genauen Abschätzung der zu erwartenden Spareffekte zu kommen, die dann zu den entstehenden Kosten in Relation gesetzt werden können. Eine wesentliche Verbesserung der derzeitigen Anlagenwirkungsgrade ist auf diesem Wege nicht zu erwarten.

Die Isolation des Oberofens hat einen ganz erheblichen Einfluß auf den Wärmeverbrauch der Anlage. Die in Tabelle 1 verglichenen Anlagen unterscheiden sich wesentlich nur in dem die Oberofenverluste bestimmenden $(k \cdot F)$ -Wert, so daß der in Tabelle 1 angegebene um ein Drittel höhere spezifische Wärmeverbrauch der Flachglaswanne hauptsächlich durch die höheren Oberofenverluste bestimmt wird. Neben Unterschieden in der Isolation des Oberofens spielen hier jedoch auch höhere Qualitätsanforderungen bei der Flachglasherstellung und damit verbundene größere Verweilzeiten im Schmelzofen, die zwangsläufig zu höheren Verlusten führen, eine Rolle. Die Verbesserung der Oberofenisolation stellt allgemein eine wirksame Maßnahme zur Energieeinsparung dar, wenn auch keine Maßnahme zur Verbesserung der Wärmeregeneration im ursprünglichen Sinne. Zu berücksichtigen ist aber bei Isolationsmaßnahmen am Oberofen, daß hier auch aus ofenbautechnischen Gründen Grenzen gesetzt sind. Darüber hinaus kann die Überwachung einer zu stark isolierten Anlage Probleme verursachen, da etwa auftretende Schäden wegen der starken Isolationsschicht erst dann erkannt werden, wenn eine Beseitigung nur mit großem Aufwand möglich oder sogar eine Kaltreparatur unumgänglich ist.

2.2. Einfluß einer Gemengevorwärmung

Die vorstehenden Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß beim heutigen Stand der Glasschmelztechnik und des Ofenbaus mit einem Nutzwärmeanteil von 50 %, unter sehr günstigen Umständen von maximal 55 %, zu rechnen ist. Für einen Hochtemperaturprozeß sind dies zwar respektable Zahlen, jedoch fordern die insgesamt immer noch benötigten großen

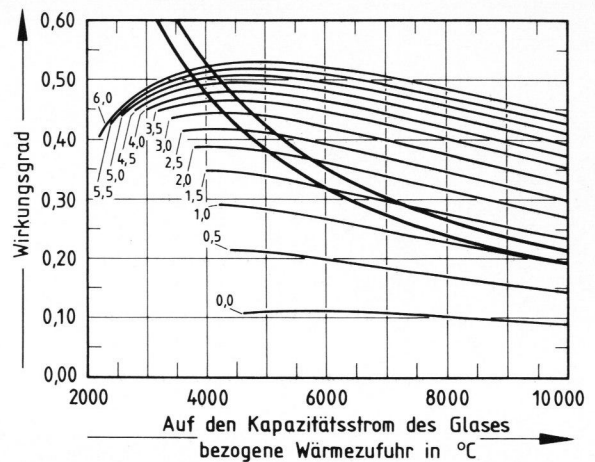


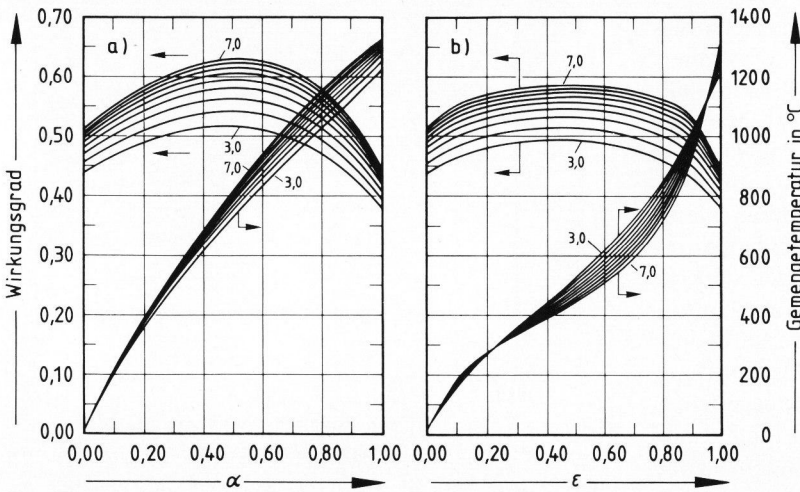
Bild 2. Wirkungsgrad eines Glasschmelzofens als Funktion der Wärmezufuhr (in $\text{kJ/h}/(\text{kJ/h} \cdot ^\circ\text{C})$) (Kurvenparameter: $(k \cdot F)$ -Wert der Regenerators; für den Oberofen wurden die Daten der Behälterglaswanne in Tabelle 1 angesetzt). Die Hyperbelbögen grenzen den Bereich von Glasentnahmetemperaturen zwischen 1400 und 1600 °C ein.

Energiemengen dazu heraus, die Möglichkeiten einer weiterführenden Energieausnutzung zu prüfen. Hierbei kommen nach Tabelle 1 in erster Linie die Abgasverluste, die auch bei großzügig dimensionierten Regeneratoren wie in den vorliegenden Beispielen immerhin 30 % und mehr ausmachen können, in Frage, während die teilweise noch höheren Oberofenverluste meist relativ diffus an die Umgebung abgegeben werden und somit für eine weitere Nutzung kaum in Frage kommen.

In diesem Abschnitt sollen die Bedingungen ermittelt werden, unter denen ein herkömmlicher Glasschmelzofen im Verbund mit einem Gemengevorwärmer die günstigsten Verbrauchswerte verspricht. Zugrunde gelegt wird dabei ein Verbund aus Glasschmelzofen mit Luftvorwärmer und Gemengevorwärmer, wie er in Bild 1 gezeigt ist. Der Luftvorwärmer und der Gemengevorwärmer werden dabei beide im Gegenstrom betrieben.

Um möglichst wirklichkeitsnahe Ergebnisse zu erhalten, wird hier und im folgenden über eine Iteration die zugeführte Brennstoffmenge solange variiert, bis die Temperatur des entnommenen Glases 1400 °C beträgt. Hiermit ist gewährleistet, daß alle ermittelten Temperaturen, insbesondere die des Gemenges bei Verlassen des Gemengevorwärmers, den tatsächlich zu erwartenden Werten entsprechen. Zusammen mit der Brennstoffmenge müssen die Wasserwerte von Luft und Abgas variiert werden, so daß auch die Verschiebung der Wasserwerte von Luft und Abgas berücksichtigt wird.

Bild 3a zeigt die Ergebnisse, die für eine reine Parallelschaltung erhalten werden. Aufgetragen ist der Nutzwärmeanteil in Abhängigkeit vom vorgewärmten Gemengeanteil. Zusätzlich ist die Gemengetemperatur bei Eintritt in den Oberofen eingetragen. Der linke Bildrand stellt somit den Ausgangs-



Bilder 3a und b. Wirkungsgrad und Gemengetemperatur eines Glasschmelzofens mit a) parallel zum Luftvorwärmer geschaltetem Gemengevorwärmer ($k_1 \cdot F_1 + k_g \cdot F_g = k_0 \cdot F_0$; Kurvenparameter ist $k_0 \cdot F_0$; $3,0 < k_0 \cdot F_0 < 7,0$, Schrittweite 0,5); b) hinter den Luftvorwärmer geschaltetem Gemengevorwärmer ($\epsilon = (k_g \cdot F_g) / (k_g \cdot F_g + k_1 \cdot F_1)$).

zustand, wie er bereits in Bild 2 dokumentiert ist, dar. Der rechte Bildrand gibt dagegen einen Ofen ohne Luftvorwärmer mit vorgeschaltetem Gemengevorwärmer wieder. Zusätzlich wurde angenommen, daß die Summe der $(k \cdot F)$ -Werte von Gemengevorwärmer und Luftvorwärmer konstant ist. Diese Größe wurde als dimensionsloser Kurvenparameter von 3,0 bis 7,0 in Schritten von 0,5 variiert. Die $(k \cdot F)$ -Werte dieser beiden Wärmeaustauscher sollen sich zueinander verhalten wie die Abgasteilströme, die ihrerseits durch den Parameter α festgelegt sind. Es gelten also die folgenden Beziehungen:

$$k_1 \cdot F_1 + k_g \cdot F_g = k_0 \cdot F_0 = \text{const}, \quad (16)$$

$$\frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{k_g \cdot F_g}{k_1 \cdot F_1}, \quad (17)$$

$$\beta = 0,0, \quad (18)$$

$$\gamma = 1,0, \quad (19)$$

wobei der Index l sich auf den Luftvorwärmer, der Index g sich auf den Gemengevorwärmer bezieht.

Augenfällig ist das bei allen Kurvenzügen in Bild 3a auftretende Maximum bei einem Abgasanteil von etwa 50 %, der zum Gemengevorwärmer geführt wird. Bezogen auf den Ausgangszustand, bei dem jeweils die ganzen Verbrennungsabgase ungeteilt zur Luftvorwärmung eingesetzt werden, wird der Wirkungsgrad um etwa 8 % ($k \cdot F = 3,0$) bis 12 % ($k \cdot F = 7,0$) gesteigert. Theoretisch sind demnach Wirkungsgrade bis 63 % zu erreichen, wenn Luft- und Gemengevorwärmer in Parallelschaltung arbeiten.

Von erheblicher verfahrenstechnischer Bedeutung sind die im vorliegenden Beispiel ermittelten Gemengetemperatur. Hier sind enge Grenzen nach oben gezogen. Im Bereich des genannten Maximums werden Gemengetemperatur bis zu etwa 900 °C ermittelt. Dieser Wert liegt zweifellos oberhalb von dem, was in der Praxis durchgeführt werden kann. Jedoch zeigt Bild 3a auch, daß die erzielbaren Wirkungsgrade mit zunehmendem

Abgasanteil für die Gemengevorwärmung nicht so steil ansteigen wie die Gemengetemperatur. Bescheidet man sich mit Wirkungsgraden bis zu 60 %, was einem Abgasanteil von 30 % entspricht, so gehen die entsprechenden Gemengetemperatur deutlich zurück auf etwa 550 °C, bei 20 % sogar auf Werte um 400 °C, die aus verfahrenstechnischer Sicht durchaus vertretbar sind.

Bild 3b zeigt die Ergebnisse, die mit einer reinen Serienschaltung erzielt werden. Auf der Abszisse ist das Verhältnis der $(k \cdot F)$ -Werte von Luft- und Gemengevorwärmer angegeben, deren Summe für jeden Kurvenzug konstant ist:

$$k_1 \cdot F_1 + k_g \cdot F_g = k_0 \cdot F_0 = \text{const}, \quad (20)$$

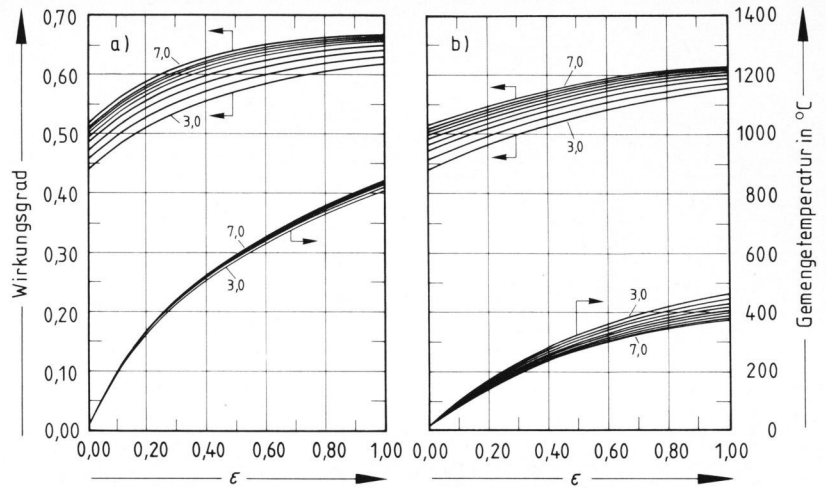
$$\alpha = 0,0, \quad (21)$$

$$\beta = \gamma = 1,0. \quad (22)$$

Auch hier konnte die Existenz eines Maximums nachgewiesen werden, das jedoch nicht so deutlich ausgeprägt ist wie bei der Parallelschaltung. Im günstigsten Fall wird eine Zunahme auf Wirkungsgrade von etwa 58 % erzielt. Die Gemengetemperatur sind allerdings dafür auch nicht höher als etwa 550 °C, sofern man sich auf die technologisch interessante linke Bildhälfte beschränkt (Abszissenwerte kleiner als 0,5).

Grundsätzlich kann festgestellt werden, daß Öfen mit einer Gemenge- und Luftvorwärmung gegenüber Öfen mit reiner Luftvorwärmung einen deutlich höheren Wirkungsgrad haben. Vom erzielbaren Wirkungsgrad aus gesehen, hat die Parallelschaltung gewisse Vorteile. Für eine gute Wärmeübertragung sorgen hier im Gemenge- und im Luftvorwärmer hohe Temperaturdifferenzen. Gleichzeitig ist in beiden Wärmetauschern der Wasserwert des wärmeaufnehmenden Gutes größer als der des wärmeabgebenden, was für eine wirkungsvolle Wärmereneration nur von Vorteil sein kann. Letzteres gilt zumindest im wärmetechnisch interessanten Mittelbereich von Bild 3a.

Bilder 4a und b. Wirkungsgrad eines Glas-schmelzofens mit
 a) parallel zum Luftvorwärmer geschaltetem Gemengevorwärmer
 ($0 < k_g \cdot F_g < k_l \cdot F_l$; Kurvenparameter ist $k_l \cdot F_l$;
 $3,0 < k_l \cdot F_l < 7,0$, Schrittweite 0,5);
 b) Luft- und Gemengevorwärmer in Serienschaltung ($\epsilon = k_g \cdot F_g / (k_l \cdot F_l)$).



Der Nachteil der Parallelschaltung liegt in den z. T. sehr hohen Gemengetemperatur bei Eintritt in den Oberofen, so daß ein Einsetzen von Gemengereaktionen nicht ausgeschlossen werden kann. Bei einer Scherbenvorwärmung ist dagegen mit einem Kleben oder Zusammensintern der Scherben zu rechnen, was ebenfalls zu unerwünschten Nebeneffekten führt. Diese Nachteile können bei einer Serienschaltung mit einiger Sicherheit umgangen werden. Dadurch, daß die Abgase im Luftvorwärmer bereits weitgehend abgekühlt wurden, liegen die zu erwartenden Gemengetemperatur deutlich unter 500 °C. Diese verfahrenstechnischen Vorteile können unter Umständen bewirken, daß in der Praxis der Serienschaltung der Vorzug gegeben wird, zumal insgesamt auch hier noch mit deutlichen wärmewirtschaftlichen Vorteilen zu rechnen ist.

Weiterhin wurde bei beiden Variationen ein Bereich optimaler Größenverteilung des Verhältnisses der $(k \cdot F)$ -Produkte von Gemenge- und Luftvorwärmer nachgewiesen. Bei der Parallelschaltung sollte die Aufteilung des Abgasstromes aus plausiblen Gründen entsprechend diesem Verhältnis erfolgen.

2.3. Erweiterung vorhandener Anlagen mit Gemengevorwärmern

Im vorhergehenden Abschnitt 2.2. wurde untersucht, wie sich Anlagen mit Gemengevorwärmern verhalten, bei denen die Summe der $(k \cdot F)$ -Werte von Gemenge- und Luftvorwärmer, im folgenden als Regenerationspotential bezeichnet, konstant gehalten wurde. Die Installation des Gemengevorwärmers erfolgte quasi auf Kosten des Luftvorwärmers, das gesamte Regenerationspotential wurde dagegen konstant gehalten. Hierdurch konnten einige grundlegende Trends aufgezeigt werden, wobei zusätzlich angenommen wurde, daß am Oberofen im Hinblick auf Isolation bzw. Wärmeübertragung an das Glasbad keine Veränderungen vorgenommen werden.

Im folgenden soll untersucht werden, wie sich eine Erweiterung von Anlagen mit Gemengevorwär-

mern auswirkt, wenn die Regeneratoren in ihrer ursprünglichen Größe belassen werden. Das Regenerationspotential der Anlage soll also vergrößert werden. Nach den Ergebnissen von Abschnitt 2.2. genügt es, die Größe des Gemengevorwärmers nicht über die des Luftvorwärmers hinausgehen zu lassen. Nach den Bildern 3a und b ist der optimale Zustand bereits überschritten, wenn mehr als 50 % des Regenerationspotentials auf den Gemengevorwärmer entfallen. Wird der Anteil des Gemengevorwärmers so groß wie der des Luftvorwärmers, so entfallen bereits 50 % des Regenerationspotentials auf den Gemengevorwärmer, und man überschreitet deutlich den Optimalbereich in den Bildern 3a und b, so daß weiterführende Verbesserungen zunächst wieder den Luftvorwärmer betreffen sollten.

Für die im folgenden diskutierten Berechnungen wurden, wie schon im vorhergehenden Abschnitt 2.2., als Ausgangsdaten die Zahlen für die Behälterglaswanne in Tabelle 1 zugrunde gelegt. Der $(k \cdot F)$ -Wert des Regenerators wurde von 3,0 bis 7,0 in Schnitten von 0,5 variiert.

In Bild 4a sind der Wirkungsgrad und die zu erwartenden Gemengetemperatur als Funktion des $(k \cdot F)$ -Wertes des Gemengevorwärmers dargestellt. Als Abszisse wurde der Quotient ϵ aus den $(k \cdot F)$ -Werten von Gemenge- und Luftvorwärmer gewählt. Weiterhin wurde reine Parallelschaltung vorausgesetzt und das gesamte Gemenge über den Gemengevorwärmer geleitet. Es gelten somit die folgenden Gleichungen:

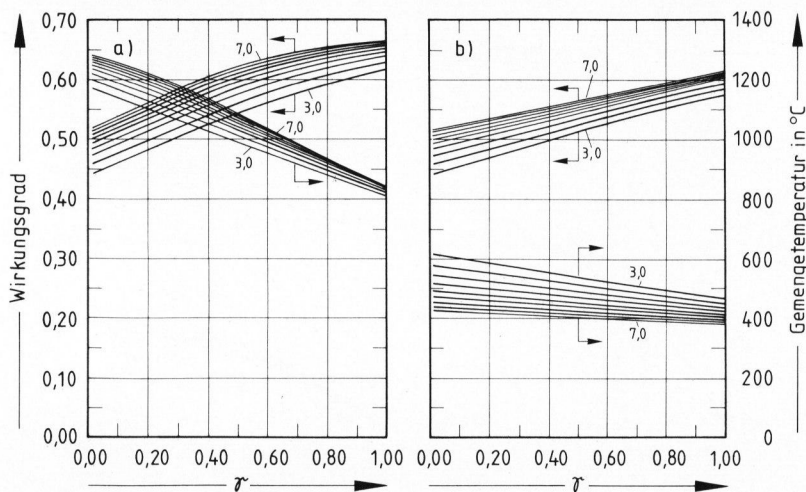
$$\epsilon = \frac{k_g \cdot F_g}{k_l \cdot F_l}, \tag{23}$$

$$\alpha = \frac{k_g \cdot F_g}{k_l \cdot F_l + k_g \cdot F_g}, \tag{24}$$

$$\beta = 0,0, \tag{25}$$

$$\gamma = 1,0. \tag{26}$$

Bei bereits großzügig dimensionierten Regeneratoren und entsprechend großen Gemengevorwärmern



Bilder 5a und b. Wirkungsgrad eines Glasschmelzofens in Abhängigkeit vom vorgewärmten Gemengeanteil γ (Kurvenparameter $k_1 \cdot F_1$; siehe hierzu auch Bild 6b; $k_g \cdot F_g = \gamma \cdot k_1 \cdot F_1$);
 a) parallel zum Luftvorwärmer geschalteter Gemengevorwärmer;
 b) hinter den Luftvorwärmer geschalteter Gemengevorwärmer.

lassen sich auf diese Weise Wirkungsgrade von über 65 % erzielen. Dabei ist mit Gemenge-temperaturen von etwa 800 bis 850 °C zu rechnen, die in der Praxis nicht zu vertreten sind. Je nach Größe des gesamten Regenerativsystems wird daher ein Überschreiten des Mittelbereichs von Bild 4a technisch nicht möglich sein. Bereits hier erhält man jedoch Wirkungsgrade von etwa 55 bis 62 % gegenüber 44 bis 53 % am linken Bildrand, der dem Ofen ohne Gemengevorwärmung entspricht. Steigerungen des Wirkungsgrades um etwa 10 % können bei der Parallelschaltung vorausgesetzt werden, sofern Gemenge-temperaturen von etwa 500 °C erlaubt sind.

In Bild 4b sind die Bild 4a entsprechenden Ergebnisse für die reine Serienschaltung wiedergegeben. An Stelle der Gleichungen (24) und (25) gelten:

$$\alpha = 0,0, \tag{27}$$

$$\beta = 1,0. \tag{28}$$

Die übrigen Voraussetzungen für die Berechnungen zu Bild 4b entsprechen denen von Bild 4a. Zwar werden hier nur Wirkungsgradverbesserungen von 10 % erzielt, jedoch werden Gemenge-temperaturen von etwa 450 °C nicht überschritten. Hier zeigt sich die Besonderheit der Serienschaltung gegenüber der Parallelschaltung.

2.4. Einfluß des vorgewärmten Gemengeanteils

In den Abschnitten 2.2. und 2.3. wurde bei sämtlichen Berechnungen vorausgesetzt, daß das gesamte Gemenge über den Gemengevorwärmer geleitet wird. Wie bereits erwähnt, bedeutet diese Annahme, z. B. im Hinblick auf eine getrennte Scherbenvorwärmung, eine erhebliche Einschränkung. In diesem Abschnitt soll zusätzlich untersucht werden, wie sich eine Gemengeteilvorwärmung auf den Gesamtwirkungsgrad eines Glasschmelzofens mit Gemengevorwärmer auswirkt. Hierbei sollen die in den beiden vorhergehenden Abschnitten ermittelten Ergebnisse nach Möglichkeit berücksichtigt werden.

Bei den Parallelschaltungen wurden die im folgenden beschriebenen Annahmen getroffen: Der Koeffizient γ , der nach Bild 1 den vorgewärmten Gemengeanteil charakterisiert, wird von 0 bis 1 variiert:

$$0 \leq \gamma \leq 1. \tag{29}$$

Wegen der Parallelschaltung gilt:

$$\beta = 0,0. \tag{30}$$

Der $(k \cdot F)$ -Wert des Gemengevorwärmers ist proportional zu dem des Regenerators und zu γ :

$$k_g \cdot F_g = \gamma \cdot k_1 \cdot F_1. \tag{31}$$

Der zum Gemengevorwärmer geleitete Abgasanteil α ergibt sich aus dem Anteil des Gemengevorwärmers am gesamten Regenerationspotential:

$$\alpha = \frac{k_g \cdot F_g}{k_1 \cdot F_1 + k_g \cdot F_g}. \tag{32}$$

Für die übrigen, den Oberofen betreffenden, Daten werden, wie in den vorhergehenden Kapiteln, die Werte der Hohlglaswanne in Tabelle 1 eingesetzt.

Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Bild 5a dargestellt. Der zunächst linear ansteigende Gesamtwirkungsgrad nähert sich linear, bei größeren $(k \cdot F)$ -Werten später asymptotisch an die bereits früher erhaltenen Maximalwerte von 62 bis 66 % an. Gleichzeitig nehmen die Gemenge-temperaturen fast linear von 1300 bis auf 800 °C ab. Durchweg erhält man also viel zu hohe Gemenge-temperaturen. Eine Reduzierung des für die Gemengevorwärmung benutzten Abgasteilstromes würde hier zwar Abhilfe schaffen, aber gleichzeitig eine Verminderung des Wirkungsgrades bewirken.

Die in Bild 5a entsprechenden Ergebnisse für die Serienschaltung zeigt Bild 5b. An die Stelle der Gleichungen (29) und (32) treten die Beziehungen:

$$\alpha = 0,0, \tag{33}$$

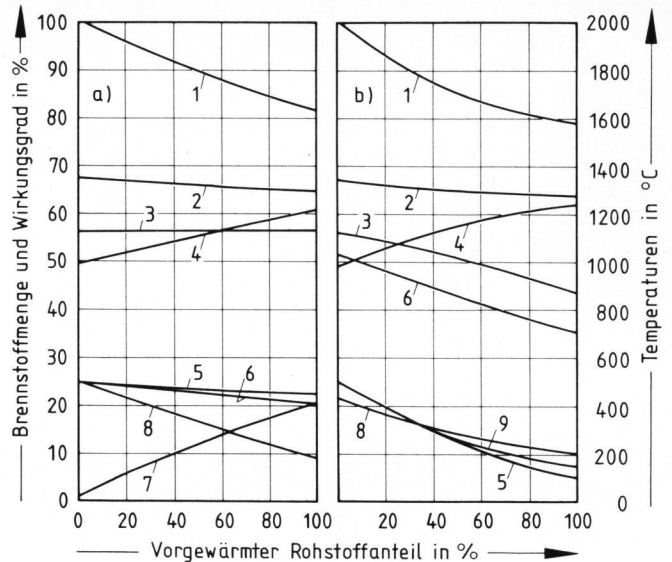
$$\beta = 1,0. \tag{34}$$

Bilder 6a und b. Allgemeine Betriebsdaten für die Reihen- und Parallelschaltung von Luft- und Rohstoffvorwärmer.

($k \cdot F$)-Wert des Luftvorwärmers: 5,0;

a) Reihenschaltung, b) Parallelschaltung.

1: Brennstoffverbrauch in %; 2: Abgastemperatur bei Ofenaustritt in °C; 3: Luftvorwärmtemperatur in °C; 4: Wirkungsgrad der Gesamtanlage in %; 5: Abgastemperatur unter Gitterung in °C; 6: Rohstoffvorwärmtemperatur in °C; 7: Gemengegetemperatur in °C; 8: Abgastemperatur nach Rohstoffvorwärmung in °C; 9: Abgastemperatur (gemischt) in °C.



Hier ergibt sich ein fast linearer Anstieg des Nutzwärmeanteils mit zunehmendem vorgewärmten Gemengeanteil. Die Gemengegetemperaturen bewegen sich, wie nach den Ergebnissen der vorhergehenden Rechnung zu erwarten war, bei vorgewärmten Gemengeanteilen von über 50 % in erträglichen Grenzen. Hierfür wurde bereits durch die Anpassung des Gemengevorwärmers an die zu erwartenden Wasserwerte des Gemenges nach Gleichung (32) Sorge getragen. Die bei vorgewärmten Gemengeanteilen von unter 50 % erhaltenen Wirkungsgrade sind nur wenige Prozent besser als beim Ausgangszustand.

2.5. Allgemeine Betriebsdaten

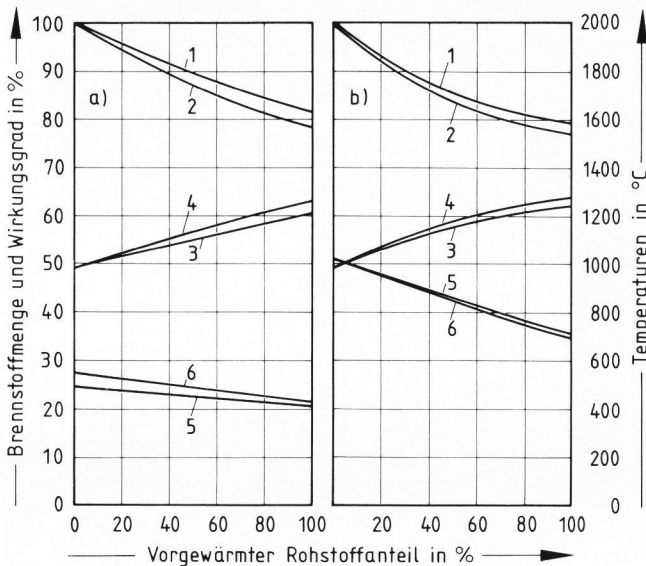
In Bild 6a sind die allgemeinen Betriebsdaten in Abhängigkeit vom vorgewärmten Gemengeanteil eines Glasschmelzofens mit Gemengevorwärmer in Serienschaltung zum Luftvorwärmer dargestellt. Es gelten für α , β und γ die Gleichungen (29) und (31) sowie (33) und (34). Der Brennstoffverbrauch für den Ausgangszustand ohne Gemengevorwärmung wurde als Ausgangswert gleich 100 % gesetzt. Für den Regenerator wurde ein ($k \cdot F$)-Wert von 5,0, bezogen auf den Wasserwert des erzeugten Glases, zugrunde gelegt. Durch die lastabhängige Dimensionierung des Gemengevorwärmers bleibt die Gemengevorwärmtemperatur (Kurvenzug 6) über dem gesamten Bereich fast unverändert. Drastisch sind die Veränderungen im Wirkungsgrad (Kurvenzug 4) und dementsprechend im Brennstoffverbrauch (Kurvenzug 1) sowie in der Abgasaustrittstemperatur (Kurvenzug 8), die als Maß für die durch die Rohstoffvorwärmung verringerten Abgasverluste herangezogen werden kann.

Die entsprechende Darstellung für die Parallelschaltung enthält Bild 6b. Die Kurven für den Wirkungsgrad (Kurvenzug 3), den entsprechenden Brennstoffverbrauch (Kurvenzug 1) und die Abgas-

austrittstemperatur nach Zusammenführung der Teilströme (Kurvenzug 7) fallen entsprechend den Ausführungen der vorhergehenden Abschnitte günstiger aus als bei der Serienschaltung. Die Gemengevorwärmtemperaturen (Kurvenzug 5) liegen allgemein zu hoch; erst wenn das gesamte Gemenge vorgewärmt wird, kommt man langsam in die Größenordnung technologisch vertretbarer Temperaturen. Auffallend ist der rapide Abfall der Luftvorwärmtemperatur (Kurvenzug 4) und der Abgasaustrittstemperatur aus dem Regenerator (Kurvenzug 8), die mit dem geringeren, dem Regenerator zugeführten Abgasstrom in Zusammenhang stehen. Tatsächlich liegt eine Verbesserung des Wirkungsgrades des Regenerators vor, da das Wasserwertverhältnis zugunsten der Luft verschoben ist.

2.6. Einfluß von Durchsatzsteigerungen

Abschließend soll auf einen Nebenaspekt hingewiesen werden, der für den Betrieb von Glasschmelzöfen mit zusätzlicher Gemengevorwärmung zum entscheidenden Vorteil werden kann. Da im Gemengevorwärmer ein Teil der sonst im Oberofen zu verrichtenden Aufgabe bereits erledigt wurde, ist durch die Gemengevorwärmung mit der Möglichkeit der Durchsatzsteigerung bei sonst unveränderten konstruktiven Kenndaten der Anlage zu rechnen. Die Bilder 7a und b geben eine Abschätzung der Auswirkungen dieses Nebeneffekts, wobei eine mögliche Durchsatzsteigerung um 20 % zugrunde gelegt wurde. Die Darstellung entspricht im übrigen den Bildern 6a und b. Bei der Reihenschaltung wirkt sich dieser Sekundäreffekt besonders stark aus: Ausgehend von der normalen Durchsatzmenge ist mit einer Vergrößerung des maximal erzielbaren Spareffekts von etwa 18 auf 22 % zu rechnen (Bild 7a). Bei der Parallelschaltung ist der Nebeneffekt mit einer Steigerung von etwa 21 auf etwa 23 % Brennstoffeinsparung zwar vergleichsweise bescheiden, aber doch



Bilder 7a und b. Brennstoffverbrauch, Anlagenwirkungsgrad und Rohstoffvorwärmtemperatur für normalen und um 20 % gesteigerten Durchsatz bei Reihen- und Parallelschaltung von Luft- und Rohstoffvorwärmer;

a) Reihenschaltung, b) Parallelschaltung.

1: Brennstoffverbrauch in %, normaler Durchsatz; 2: Brennstoffverbrauch in %, Durchsatz 120 %; 3: Wirkungsgrad der Gesamtanlage in % (100 %); 4: Wirkungsgrad der Gesamtanlage in % (120 %); 5: Rohstoffvorwärmtemperatur in °C (100 %); 6: Rohstoffvorwärmtemperatur in °C (120 %).

fühlbar (Bild 7b). Eine nennenswerte Änderung der Gemengevorwärmtemperaturen ist dagegen nicht zu erwarten.

3. Zusammenfassung

Die Berechnungen zeigen, daß durch eine Erhöhung der Luftvorwärmung nur noch geringfügige Verbesserungen zu erwarten sind. Eine verbesserte Oberofenisolation wirkt sich zwar positiv aus, doch sind hier betriebstechnische Grenzen gesetzt.

Bei Einsatz einer Gemengevorwärmung werden bei der Parallelschaltung von Luft- und Gemengevorwärmer ebenso wie bei der Serienschaltung optimale Parameterkonstellationen hinsichtlich der Größe der beiden peripheren Wärmetauscher und der Abgasmengen, die diesen zugeführt werden, aufgezeigt. Die Parallelschaltung verspricht zwar in wärmetechnischer Hinsicht gewisse Vorteile, die jedoch durch zu hohe Gemengevorwärmtemperaturen in der Praxis schwer zu realisieren sind. Dies würde eine totale Umstellung der derzeit üblichen Verfahrenstechnik voraussetzen. Bei der Serienschaltung werden diese Nachteile umgangen, auch hier ist eine wesentliche Verbesserung des Nutzwärmeanteils zu erwarten. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Anteil des vorgewärmten Gemenges am gesamten Gemenge. Bei der Parallelschaltung sollte dieser 50 % nicht unterschreiten, bei der Serienschaltung wird ein linearer Anstieg des Gesamtwirkungsgrades mit dem vorgewärmten Gemengeanteil beobachtet.

Ein nicht zu unterschätzender Nebeneffekt ist durch mögliche Durchsatzsteigerungen gegeben, die auf der Vorwegnahme eines Teils der im Oberofen zu verrichtenden Aufgabe im Gemengevorwärmer beruhen. Dieser Nebeneffekt macht sich bei der verfahrenstechnisch einfacheren Reihenschaltung stärker bemerkbar.

4. Formelzeichen

A, A', E	Hilfsgrößen zur Beschreibung von Wärmetauschern	
B	Breite des Ofens in m	
C, C'	Kapazitätsströme von wärmeabgebendem und wärmeaufnehmendem Glasbad in kJ/(K h)	
C_a	Kapazitätsstrom der Verbrennungsabgase	
C_g	Kapazitätsstrom des Glases	
C_1	Kapazitätsstrom der Verbrennungsluft	
D_0	normierter Düsenquerschnitt	
F	Wärmetauscherfläche in m ²	
G	Hilfsfunktion	
H	Ausbrandfunktion	
k	Wärmedurchgangszahl in W/(m ² K)	
k_1	Wärmedurchgangszahl Flamme – Glasbad	
k_2	Wärmedurchgangszahl Flamme – Umgebung	
L	Länge des Flammenweges im Ofen in m	
p, b	Parameter zur Beschreibung des Ausbrandverhaltens der Flamme	
Q_{Br}	mit dem Brennstoff zugeführte Wärme	} in kJ bzw. bei normierter Darstellung in °C
Q_N	Nutzwärme	
Q_V	Verlustwärme des Oberofens	
x	Ortskoordinate in m	
α	vom Ofen zum Rohstoffvorwärmer geleiteter Anteil der Abgase	
β	vom Luftvorwärmer zum Rohstoffvorwärmer geleiteter Abgasanteil	
γ	über den Rohstoffvorwärmer geleiteter Rohstoffanteil	
ϑ	Temperatur in °C	
ϑ_a	Abgastemperatur in °C	
ϑ_F	Flammentemperatur in °C	
ϑ_1	Luftvorwärmtemperatur in °C	
ϑ_{OB}	Glasbadoberflächentemperatur in °C	
ϑ_0	Umgebungstemperatur (20 °C)	
ε	Hilfsgröße	

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, für die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung der Berechnungen.

5. Literatur

- [1] Schubert, P.: Energieversorgung einer mittleren Hohlglashütte unter besonderer Berücksichtigung von Hochdruckabhitzeesselanlagen. Glastechn. Ber. **40** (1967) S. 81–88.
- [2] Hausen, H.: Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1976. [Ref. Glastechn. Ber. **50** (1977) 77R1949.]
- [3] Trier, W. und Voss, H.-J.: Wärmetechnisches Verhalten von Glasschmelzwannenöfen. (Teil I.) Teil II: Einfluß der Brennstoffverteilung auf den Wärmeverbrauch. Teil III: Einfluß elektrischer Zusatzbeheizung auf Schmelzleistungssteigerung und Wärmeverbrauch. Glastechn. Ber. **41** (1968) S. 217–229, 552–556; **42** (1969) S. 409–418.
- [4] Voss, H.-J.: Mathematisches Modell zur Abschätzung des Energiehaushaltes von Glasschmelzwannenöfen. Glastechn. Ber. **48** (1975) S. 190–206.
- [5] Günther, R.: Verbrennung und Feuerungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1974. [Ref. Glastechn. Ber. **48** (1975) 75R1324.] 83R1410