

HVG-Mitteilung Nr. 2036

Der Energieverbrauch von Schmelzwannen – gestern, heute und morgen

R. Nebel, Nikolaus Sorg GmbH & Co. KG, Lohr am Main

Erweiterte Fassung eines Vortrags auf der DGG-Jahrestagung
am 27. Mai 2003 in Leipzig

1 Einleitung

Die Debatte um die Umweltverträglichkeit von Glasschmelzwannen konzentrierte sich bisher im wesentlichen auf die Emissionen, wie NO_x , SO_2 oder Staub. Erst mit der verstärkten Diskussion über die CO_2 -Emissionen rückte der spezifische Energieverbrauch von Glasschmelzwannen mehr und mehr in den Vordergrund. Die Betrachtung des Energieverbrauchs von Glasschmelzwannen und damit der spezifischen Schmelzkosten ist aber auch deshalb von immer größerem Interesse, weil sich die Glasindustrie insgesamt unter einem hohen Kostendruck befindet.

In diesem Beitrag werden die Parameter betrachtet, die für den Energieverbrauch maßgeblich sind sowie Möglichkeiten, diese Parameter zu beeinflussen. Ein Benchmarking bezüglich des Energieverbrauchs, wie es von Beerkens [1] durchgeführt wurde, wird diskutiert. Um die Betrachtung zu vereinfachen, soll dabei von einem bekannten und ausgereiften Wannenkonzept ausgegangen werden - der regenerativen U-Flammenwanne. Letztendlich sollen die Betrachtungen zum Energieverbrauch von Glasschmelzwannen nicht ausschließlich unter dem umweltpolitischen Aspekt erfolgen, sondern auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

2 Theoretischer Energiebedarf zum Erschmelzen von Glas

Wenn man vom Energieverbrauch von Glasschmelzwannen spricht, dann kann man zunächst einmal die theoretisch minimal notwendige Wärmemenge für die Erschmelzung von Glas (theoretischer Wärmebedarf) bestimmen. Dieser Wert stellt jene Energiemenge dar, die notwendig ist, um die nötigen chemischen Reaktionen für die Glasherstellung durchzuführen und die Rohstoffe/Schmelze auf die Glastemperatur zu bringen - also die chemischen Reaktionsenthalpien und die Enthalpien von Glasschmelze und Gemengegasen.

Als Beispiel sei dieser Wert für ein Kalk-Natron-Glas angegeben, welches eine Temperatur von 1360 °C und dabei eine spezifische Wärmekapazität von $0,29\text{ kcal}/(\text{kg K})$ haben soll. Die endotherme Reaktionsenthalpie beträgt $116\text{ kcal}/\text{kg}$. Damit ergäbe sich ein theoretischer Wärmebedarf von etwa $605\text{ kcal}/\text{kg}$, wenn das Glas zu 100% aus Gemenge erschmolzen wird und das Gemenge keine Feuchtigkeit aufweist.

Variiert man die Parameter Gemenge-/Scherbenfeuchte und Scherbengehalt in den für die Containerglasindustrie typischen Bereichen (Scherbenanteil $0-75\%$; Wasseranteil $0-3\%$), so variiert der theoretische Wärmebedarf zwischen $448\text{ kcal}/\text{kg}$ und $652\text{ kcal}/\text{kg}$ - also um fast 50% . Hier sieht man bereits, wie stark die Energieverbräuche von bestimmten Parametern abhängig sind, und dass dies beim Vergleichen von Energieverbräuchen unterschiedlicher Wannen zu berücksichtigen ist.

Der Energieverbrauch von Schmelzwannen

Scherben	Feuchte			
	0 %	1 %	2 %	3 %
0 %	605	621	636	652
25 %	553	567	582	598
50 %	499	514	528	543
75 %	448	460	475	489

Tab. 1: Theoretischer Wärmebedarf eines Kalk-Natron-Glases in Abhängigkeit von Scherbengehalt und Gemenge-/Scherbenfeuchte (Angaben in kcal/kg).

3 Die ideale Glasschmelzwanne

Ausgehend vom theoretischen Wärmebedarf müssten nun die Konstrukteure versuchen, einen idealen Ofen zu konstruieren, dessen spezifischer Energieverbrauch gleich dem theoretischen Wärmebedarf ist. Dann gäbe es keine weiteren Energieverluste. Alle Energie würde umgewandelt in die Nutzenergie des geschmolzenen Glases sowie die Gemengegase, die den Glasschmelzofen mit Glasktemperatur verlassen.

Leider ist dieses Vorhaben unmöglich, da beim Glasschmelzprozess weitere Verluste anfallen, die sich in zwei Posten zusammenfassen lassen. Das wären

1. die Wandverluste der Schmelzwanne, die sich aus den Verlusten durch die Ofenwände sowie durch Abstrahlung und Kühlung zusammensetzen und
2. die Abgasverluste, die dadurch entstehen, dass gasförmige Verbrennungsprodukte und andere Gase den Ofenraum mit hoher Temperatur verlassen.

Diese beiden zusätzlichen Verluste bestimmen im wesentlichen den Energieverbrauch oberhalb des theoretischen Wärmebedarfes. Dabei sind sie von einer Vielzahl von zum Teil komplexen Parametern abhängig, die im folgenden untersucht werden sollen, wobei keine Vollständigkeit erreicht werden kann.

3.1 Parameter, die den Energieverbrauch beeinflussen

Bei der Betrachtung der den Energieverbrauch einer Glasschmelzwanne bestimmenden Parameter ist deren Größe und deren Einfluss von Interesse. Dieser ist aber wiederum von Parametern wie Wannengröße, Schmelzleistung etc. abhängig. Um eine Vergleichbarkeit zu erhalten, soll aus diesem Grunde hier von einer standardisierten Einheitschmelzwanne ausgegangen werden. Die in Tabelle 2 definierte Schmelzwanne ist zwar fiktiv, aber die Parameter dieser Schmelzwanne beruhen auf Praxiswerten verschiedener Schmelzwannen vergleichbarer Größe. Ausgehend von Tabelle 2 wird zunächst die Energiebilanz dieser Standardwanne berechnet. Dabei ergeben sich die Daten in Tabelle 3. Die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung stellen diejenigen CO₂-Emissionen dar, die nur aus der Verbrennung des Erdgases entstehen. Das Wannengas enthält jedoch zusätzliches CO₂ aus dem Schmelzverlust des Gemenges, was bei der Angabe der CO₂-Emission inklusive Gemengegas berücksichtigt ist.

Wannentyp	Regenerative U-Flammenwanne
Schmelzfläche [m ²]	125
Glastyp	Kalk-Natron-Glas
Scherbenanteil [%]	50
Schmelzleistung [t/d]	360
Glastemperatur im Riser [°C]	1360
Gewölbtemperatur [°C]	1580
Abgastemperatur Port [°C]	1550
Abgastemperatur nach Regenerator [°C]	450-500
Luftvorwärmtemperatur [°C]	1280-1300
Energieträger	Erdgas
Heizwert [kcal/Nm ³]	8600

Tab. 2: Charakterisierung der Standardschmelzwanne.

Energieverbrauch	4000 kcal/s
Brennstoffverbrauch (Erdgas)	1672 Nm ³ /h
Spezifischer Energieverbrauch	959 kcal/kg _{Glas}
CO ₂ -Emission (aus Verbrennung)	3323 kg/h
CO ₂ -Emission (inklusive Gemengegas)	4750 kg/h
Spezifische CO ₂ -Emission (Verbrennung)	222 g/kg _{Glas}
Spezifische CO ₂ -Emission (Inkl. Gemengegas)	317 g/kg _{Glas}

Tab. 3: Energiebilanz der Standardschmelzwanne.

3.2 Einfluss von Scherbengehalt und Gemengefeuchte

Ausgehend von der Auswertung vieler Praxisdaten wurde mittels eines Wärmebilanzmodells der Einfluss der Änderung der Scherbengehalte und der Gemenge- und Scherbenfeuchte auf den spezifischen Energieverbrauch sowie auf die CO₂-Emissionen berechnet. Dabei ergibt sich das in Tabelle 4 dargestellte Bild. Wie man erkennen kann, sind durch erhöhte Scherbengehalte große Energieeinsparungen zu erzielen. Die Energieeinsparung beträgt beim Übergang von 50 auf 75 % Scherben immerhin 9 % - also ca. 3,6 % je 10 % mehr Scherben.

Zum Vergleich wurde noch eine kleine regenerative U-Flammenwanne (Tabelle 5) ausgewertet. Auch hier flossen in das Bilanzmodell wieder die Praxisdaten verschiedener Schmelzöfen ein. Mit den Daten aus Tabelle 5 ergeben sich für diese Wanne die CO₂-Emissionen und der Energieverbrauch in Tabelle 6. Auch hier ist die deutliche Energie-

Der Energieverbrauch von Schmelzwannen

einsparung sichtbar. Die Einsparung von 50 auf 75 % Scherben beträgt hier 8 % - also 3,2 % je 10 % mehr Scherben. Die Einsparung fällt bei der kleinen Wanne je 10 % mehr Scherben deutlich geringer als bei der großen Schmelzwanne aus. Der Grund ist, dass sich die Wandverluste bei ändernden Scherbengehalten nur unwesentlich ändern und diese bei der kleinen Schmelzwanne im Verhältnis einen größeren Anteil an den Gesamtverlusten als bei der großen Schmelzwanne haben. So betragen die Wandverluste der kleinen Schmelzwanne ca. 24 % der zugeführten fossilen Energie; bei der großen Schmelzwanne sind es dagegen nur etwa 15 %.

Scherben [%]	Gasmenge [Nm ³ /h]	CO ₂ aus Verbrennung [kg/h]	CO ₂ inkl. Gemenge- gase [kg/h]	Spez. Energie- verbrauch [kcal/kg]	Spez. CO ₂ aus Ver- brennung [g/kg]	Spez. CO ₂ Inkl. Gemenge- gase [g/kg]
0	1981	3936	6789	1136	262	453
25	1826	3628	5770	1047	242	385
50	1672	3323	4750	959	222	317
75	1521	3022	3735	872	201	249

Tab. 4: CO₂-Emission und Energieverbrauch.

Wannentyp	Regenerative U-Flammenwanne
Schmelzfläche [m ²]	33
Glastyp	Kalk-Natron-Glas
Scherbenanteil [%]	50
Schmelzleistung [tpd]	90
Glastemperatur im Riser [°C]	1360
Gewölbetemperatur [°C]	1580
Abgastemperatur Port [°C]	1550
Abgastemperatur nach Regenerator [°C]	450-500
Luftvorwärmtemperatur [°C]	1280-1300
Energieträger	Erdgas
Heizwert [kcal/Nm ³]	8600

Tab. 5: Charakterisierung einer kleinen Standardschmelzwanne.

Scherben	Gasmenge	CO ₂ aus Verbrennung	CO ₂ inkl. Gemengegase	Spez. Energie- verbrauch	Spez. CO ₂ aus Ver- brennung	Spez. CO ₂ Inkl. Gemenge- gase
[%]	[Nm ³ /h]	[kg/h]	[kg/h]	[kcal/kg]	[g/kg]	[g/kg]
0	568	1129	1843	1303	301	491
25	528	1050	1586	1212	280	423
50	489	971	1328	1122	259	354
75	450	894	1072	1032	238	286

Tab. 6: CO₂-Emission und Energieverbrauch kleine Wanne.

Feuchte	Gasmenge	CO ₂ aus Verbrennung	CO ₂ inkl. Gemengegase	Spez. Energie- verbrauch	Spez. CO ₂ aus Ver- brennung	Spez. CO ₂ Inkl. Gemenge- gase
[%]	[Nm ³ /h]	[kg/h]	[kg/h]	[kcal/kg]	[g/kg]	[g/kg]
0	1560	3100	4525	895	207	302
	461	916	1273	1057	244	339
1	1597	3174	4600	1079	212	307
	470	935	1291	1079	249	344
2	1635	3249	4677	938	217	312
	479	953	1353	1100	254	361
3	1672	3323	4750	959	222	317
	489	971	1328	1122	259	354

Tab. 7: Ergebnisse der großen und kleinen Schmelzwanne (oben bzw. unten).

Noch deutlicher fallen die Einsparungen an CO₂-Emissionen mit steigendem Scherbengehalt aus, wenn man die Gemengegase mit berücksichtigt. Hier sind Einsparungen von 6-9 % je 10% mehr Scherben möglich. Wird als Parameter die Gemenge- und Scherbenfeuchte variiert, so ergeben sich die Ergebnisse in Tabelle 7.

Hier ergeben sich Einsparungen durch die verminderte Gemengefeuchte in Höhe von ca. 2,3 % je 1 % Feuchte bei der großen Schmelzwanne sowie ca. 2 % je 1 % Feuchte für die kleine Schmelzwanne.

Interessant an diesen Ergebnissen ist, dass die Einsparungen mit höherem Scherbenanteil auch von der Schmelzwannengröße abhängig sind, ebenso wie die Gemengefeuchtigkeit. Es zeigt sich, dass bei einem Benchmarking von Schmelzwannen nicht nur der Scherbenanteil zu berücksichtigen und zu normalisieren ist, sondern dass streng genommen auch die Schmelzwannengröße in diese Normalisierung eingehen sollte sowie auch der Feuchtegehalt des Gemenges und der Scherben.

3.3 Einfluss der Wannenisolierung

Eine der naheliegendsten Möglichkeiten, die Verluste und damit den spezifischen Energieverbrauch von Schmelzwannen zu vermindern besteht darin, deren Isolierung zu verbessern. Deshalb ist es sinnvoll, sich die Wandverluste einer Schmelzwanne näher anzuschauen. Auch hier wird wieder auf die beiden regenerativen U-Flammenwannen mit 360 und 90 t/d Schmelzleistung eingegangen.

Was gemeinhin mit Wandverlusten bezeichnet wird, stellt im wesentlichen die Summe der Wärmemengen dar, welche den Ofenraum durch die Ofenwände oder durch Abstrahlung verlassen sowie Kühlungsverluste. Um die Möglichkeiten der Energieeinsparung in diesem Bereich zu untersuchen, ist es zweckmäßig die Wandverluste aufzuteilen. Es soll dabei zwischen Verlusten durch Strahlung, Wandverlusten an isolierten Flächen und Wandverlusten an nichtisolierten Flächen unterschieden werden. Bilanzgrenze soll dabei die Schmelzwanne sein.

Strahlungsverluste fallen hauptsächlich im Bereich der Brennerports, der Brennerdüsen und des Einlegevorbaus an. Isolierte Flächen sind zum Beispiel der Wannenboden, die Bassinseitenwände, das Gewölbe, die Oberofenseitenwände usw. Die Spiegellinie, die Palisadenfugen, Dehnfugen, Widerlager, Nasensteine etc. sind zum Beispiel nichtisolierte Flächen. Eine genaue Aufteilung und Quantifizierung der Wandverluste ist in Tabelle 8 für beide Schmelzwannen dargestellt.

	Schmelzwanne mit					
	90 t/d	360 t/d	90 t/d	360 t/d	90 t/d	360 t/d
	kW		Anteil in %		Fläche in m ²	
Gesamtwandverluste	1155	2538	100	100	290	678
Strahlung	260	759	23	30	-	-
Isolierte Flächen	419	890	36	35	255	610
Nichtisolierte Flächen	476	889	41	35	35	68

Tab. 8: Wandverluste der großen und kleinen Schmelzwanne (oben bzw. unten).

Die Verluste durch Strahlung, die zwischen 23 und 30 % liegen, lassen sich nur schwer verringern, da hier Brennerports und Brennerdüsen zu verändern wären. Das Gleiche gilt im Prinzip auch für die nichtisolierten und insbesondere für die gekühlten Bereiche wie die Spiegellinie. Hier müssten schon entscheidende Fortschritte im Bereich der Feuerfestmaterialien gemacht werden, um kritische Bereiche wie Doghouse-Ecken, Spiegellinie oder Palisadenfugen isolieren zu können.

Trotzdem bieten sich in diesem Bereich wohl die noch besten Aussichten, die Wärmeverluste signifikant zu verringern. Wenn es gelänge, die Wärmeverluste durch nichtisolierte Flächen zu halbieren, dann würde man die Gesamtwandverluste um ca. 17-20 % verringern. Das ergäbe eine Minderung des spezifischen Energieverbrauches um etwa 3,5-4 %.

Temperaturerhöhung	von	auf
Glastemperatur Riser	1360 °C	1390 °C
Gewölbetemperatur	1570 °C	1600 °C
Abgastemperatur aus Wanne	1540 °C	1570 °C

Tab. 9: Erhöhung der Temperaturen um 30 K.

		Schmelzwanne mit	
		90 t/d	360 t/d
Energieverbrauch vorher	Nm ³ /h	489	1672
Energieverbrauch nachher	Nm ³ /h	505	1725
Spezifischer Verbrauch vorher	kcal/kg	1122	959
Spezifischer Verbrauch nachher	kcal/kg	1159	989
Zunahme des spez. Verbrauchs	%	3,30	3,13

Tab. 10: Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch.

3.4 Einfluss der Wannenfahrweise

An dieser Stelle soll ermittelt werden, inwieweit die Wannenfahrweise den Energieverbrauch bestimmt, wenn die Schmelzwanne – zum Beispiel aus Sicherheitsgründen (in bezug auf die Produktqualität) – mit höheren Temperaturen betrieben wird. Auch wenn quantitative Aussagen schwer möglich sind, soll anhand eines Bilanzmodells eine Abschätzung gegeben werden.

Ausgehend von den Praxisdaten und dem Wärmebilanzmodell wird der Anstieg des Energieverbrauchs aufgezeigt, wenn die Wanne auf einem höheren Temperaturniveau gefahren wird. Für diese Bestimmung wird angenommen, dass die Wanne mit einer um 30 K erhöhten Glastemperatur gefahren wird, also das Glas mit 1390 °C die Schmelzwanne verlässt. Vereinfachend wurde weiterhin angenommen, dass hierfür auch eine Erhöhung der Temperaturen im Oberofen um 30 K notwendig ist.

Durch die Temperaturerhöhung in der Wanne erhöhen sich auch die Wandverluste. Eine Wärmedurchgangsberechnung ergibt, dass für die nichtisolierten Bereiche mit einer Erhöhung der Wärmeverluste um etwa 2-2,5 % und für die isolierten Bereiche mit einer Erhöhung um ca. 3-4 % gerechnet werden muss. Für die Bilanzierung wurden 3,5 % und 2,2 % angenommen.

Bei den Verlusten durch Strahlung kann sogar von einer Erhöhung von etwa 5 % ausgegangen werden, wenn sich die Oberofentemperatur um 30 K von 1570 auf 1600 °C erhöht. Damit ergibt sich eine abgeschätzte Erhöhung der Wandverluste von 3,3 % für die kleine und 3,5 % für die große Schmelzwanne. Eine Bilanzierung ergibt dann den Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch, wie aus Tabelle 10 ersichtlich.

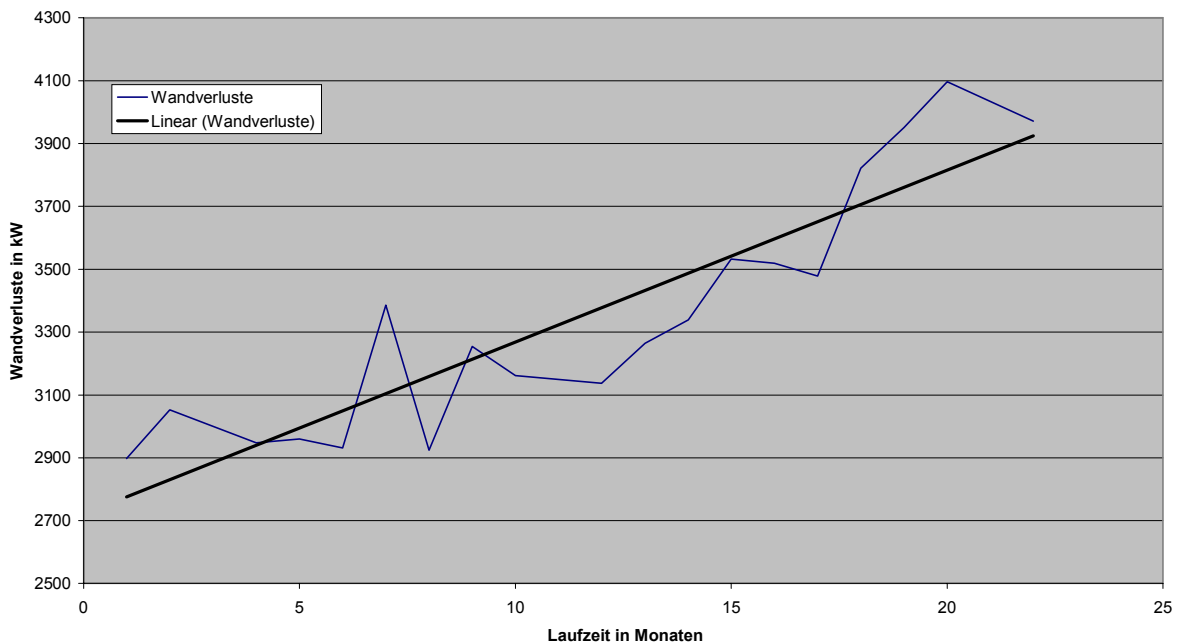


Bild 1: Wandverluste einer U-Flammenwanne

3.5 Einfluss der Wannentalterung

Der Einfluss der Wannentalterung ist sehr eng mit den Wandverlusten infolge Verschleiß verbunden. Die Wandstärken werden dünner, die Kühlung wirksamer. Bestimmte Bereiche der Wanne müssen abisoliert werden, um eventuellen Verschleißfortschritt zu verlangsamen. Zusätzliche Strahlungsöffnungen in Form von Fugen können entstehen.

Manchmal kann es auch sein, dass eine ältere Wanne mit höheren Temperaturen gefahren werden muss, um die gleiche Qualität zu erreichen, wie sie vorher mit der jüngeren Wanne erzielt wurde. Dies führt zu einem Anstieg des spezifischen Energieverbrauches. Eine Beurteilung des Anstiegs des Energieverbrauches mit dem Alter ist von sehr vielen Faktoren abhängig und kann quantitativ schlecht vorhergesagt werden. Rückschlüsse lassen sich letztendlich nur durch Aufzeichnung über die Laufzeit gewinnen.

So wurden Aufzeichnungen über einen Zeitraum von zwei Jahren bei einer regenerativen U-Flammenwanne mit einer Schmelzfläche von ca. 117 m² gemacht. Mittels des Bilanzrechnungsmodells wurden die verschiedenen Zustände der Schmelzwanne so normalisiert, dass eine Berechnung der jeweiligen Wandverluste ermöglicht wurde. Die resultierenden Wandverluste sind in Bild 1 dargestellt.

Dabei ergibt sich eine Zunahme der Wandverluste von 1,8-2,0 % je Monat. Anzumerken ist, dass bei dieser Berechnung auch Verschlechterungen der Effektivität der Regeneratoren zum Beispiel durch Verstaubung den Wandverlusten zugerechnet werden. Bei einer Verschlechterung der Wandverluste um 1,8 % je Monat ergibt sich für die Bilanzierung ein Anstieg des spezifischen Energieverbrauches von etwa 0,3 % je Monat.

Auch hier ist anzumerken, dass bei der vorliegenden Auswertung die ersten beiden Jahre der Wannentalterung berücksichtigt wurden. Möglicherweise ist die Verschlechterung der Wandverluste während der ersten Betriebsjahre etwas höher als im Mittel über die Wannentalterung, da ja in der ersten Zeit auch der Wannenschleiß am größten ist.

Eine weitere Untersuchung an einer sehr ähnlichen Schmelzwanne (115 m² Schmelzfläche) ergab einen Zuwachs des spezifischen Energieverbrauchs in den ersten zwei Betriebsjahren um 0,24 %. Wenn man diese Zahlen über eine Wannendreise hochrechnet, dann muss z.B. bei einer Wannendreise von 96 Monaten mit einem Mehrverbrauch von 20-33 % infolge der Wannendegradation gerechnet werden.

Unterlast	Gasmenge	CO ₂ aus Verbrennung	CO ₂ inkl. Gemengengase	Spez. Energieverbrauch	Spez. CO ₂ aus Verbrennung	Spez. CO ₂ Inkl. Gemengengase
[%]	[Nm ³ /h]	[kg/h]	[kg/h]	[kcal/kg]	[g/kg]	[g/kg]
0	489	971	1328	1122	259	354
	1672	3323	4750	959	222	317
10	450	894	1215	1147	265	360
	1522	3024	4307	970	224	319
20	411	818	1103	1181	273	368
	1374	2730	3871	985	228	323
30	374	743	992	1226	283	378
	1228	2441	3439	1007	232	328

Tab.11: Einfluss von Unterlast bei einer Wanne mit 90 und 360 t/d (oben bzw. unten).

3.6 Einfluss von Unterlast

Eine Schmelzwanne wird für einen bestimmten Anwendungsfall für ihre Höchstlast ausgelegt, d.h., sie muss diese Last ohne Probleme auch über einen längeren Zeitraum hinweg erreichen können. Neben der Qualitätsanforderung an das Glas ist die Höchstlast der bestimmende Parameter für die spezifische Schmelzleistung (Schmelzleistung pro Tag und Quadratmeter Schmelzfläche).

Im späteren Wanneneinsatz wird die Wanne oft nicht mit der Höchstleistung beaufschlagt. Für diesen Fall ist dann von energetischer Seite her ebenfalls mit einer Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs zu rechnen, was anhand von Praxisdaten und dem Bilanzrechnungsmodell nachfolgend betrachtet wird.

Die Ergebnisse der Untersuchung in Tabelle 11 zeigen, dass für die große Schmelzwanne mit 360 t/d der spezifische Energieverbrauch bei 30% Unterlast um ca. 5 % ansteigt, bei der kleinen Schmelzwanne mit 90 t/d führt eine Unterlast von 30 % sogar zu über 9 % Erhöhung.

4 Diskussion der Ergebnisse

Der Einfluss von Gemengefeuchte und Scherbengehalt ist sehr deutlich. Während die Möglichkeiten der Beeinflussung für die Gemengefeuchte relativ gering sind, ist es deutlich, dass mit höchstmöglichen Scherbengehalten der Energieverbrauch sehr positiv beeinflusst werden kann. Die Bedeutung dieser nicht neuen Erkenntnis für den Schmelzwannenkonstrukteur bedeutet, dass die Schmelzwannen so konzipiert werden

müssen, dass sie mit den Problemen zurechtkommen, die ein massiver Scherbeneinsatz mit sich bringt.

Da wären zum einen die Verunreinigungen, insbesondere durch anorganisch-nichtmetallische Stoffe. Es ist daher wichtig, dass die Schmelzwannen ein sehr gutes Steinchenauflösungsvermögen haben. Dies kann bei den modernen regenerativen Schmelzwannen dadurch erreicht werden, dass die Temperatur und die Verweilzeit des Glases der kritischen Strömungslinie erhöht bzw. verlängert werden. Konkret muss man hier einerseits die elektrische Zusatzbeheizung nennen und andererseits ein modernes Bassindesign mit Barrierewall und SORG® Deep Refiner®.

Ein weiteres Problem beim Scherbeneinsatz betrifft die Reinheit der Fremdscherben in Bezug auf ihre Farbe. Häufig enthalten Fremdscherben einer bestimmten Farbe große Anteile an Scherben anderer Farben. Dies führt dann aufgrund der unterschiedlichen Sulfatgehalte und -löslichkeiten häufig zu einer Schaumentwicklung in der Schmelzwanne. Dieser Schaum kann am besten mittels einer sehr genauen und möglichst nahstöchiometrischen Fahrweise der Verbrennung vermindert werden. Demnach kommt der Brennertechnologie und Regelung eine immer größere Bedeutung nicht nur hinsichtlich der NO_x -Emissionen zu. Ein modernes regeneratives Wannenkonzept verfügt deshalb über die Brennstoff-Einzelbrennerregelung und über die Möglichkeit, Brennstoff-Luft-Verhältnisse für jede Feuerseite einzeln einzustellen und – in bestimmten Grenzen – zu regeln.

Bei der Betrachtung der Isolierung von Glasschmelzwannen wurde deutlich, dass hier ebenfalls noch Potential zur Minderung des spezifischen Energieverbrauches besteht. Allerdings beträgt das mögliche Einsparpotential dem Ermessen nach nicht wesentlich mehr als 4 %. Die Einsparungen in diesem Bereich sind von Verbesserungen der Qualität des Feuerfestmaterials abhängig. Wahrscheinlich liegen die größten Einsparpotentiale in der Isolierung bisher nicht isolierter Wandflächen. Die Verringerung der Strahlungsöffnungen, z.B. durch Verkleinerung der Brennerports, ist weniger geeignet, da man hier an die Grenzen der Luftgeschwindigkeit stößt, die den NO_x -Ausstoß negativ beeinflussen.

Weiteres Einsparpotential wird deutlich, wenn man die Wannenfahrweise betrachtet. Moderne Schmelzwannen müssen so beschaffen sein, dass man ohne Störungen bezüglich Produktqualität möglichst nah am Energieoptimum fahren kann, ohne die Notwendigkeit, Energiereserven im Glasbad vorzuhalten. In diesem Zusammenhang muss wieder auf die elektrische Zusatzbeheizung und den SORG® Deep Refiner® verwiesen werden. Eine elektrische Zusatzbeheizung erlaubt es, bei Störungen des Wannenbetriebes oder auch bei alltäglichen Laständerungen mit elektrischer Energie sehr schnell und zielgerichtet in den Schmelzprozess eingreifen zu können, wodurch die Notwendigkeit der Energievorhaltung geringer wird. Ein Deep Refiner® wirkt in diesem Zusammenhang ebenfalls als Puffer für Schwankungen.

Auch die Wannentalterung hat einen recht großen Effekt auf den spezifischen Energieverbrauch. Ein Einsparpotential bietet sich hier vor allem durch entsprechende Verbesserungen in Konstruktion und Feuerfestmaterial, aber auch durch einen verbesserten Betrieb der Schmelzwanne. Das Ziel der Entwicklung im Ofenbau muss daher auch sein, bessere Regelkonzepte zu entwickeln, die ein möglichst gleichmäßiges und damit verschleißminderndes Betreiben der Anlage ermöglichen.

In diesem Zusammenhang soll auch die Notwendigkeit nicht unerwähnt bleiben, regelmäßige Inspektionen zu definieren und durchzuführen, um besonderen Verschleiß frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen. In der Praxis wurden Unterschiede in der Wannentalterung festgestellt, die auf eine Wannentrip von 96 Monaten hingesehen zu einem Unterschied im spezifischen Energieverbrauch von 13 % führen. Hier sind allerdings noch mehr Datenauswertungen notwendig, um diese Zahlen verlässlicher zu quantifizieren. Das große Einsparpotential ermutigt aber, diesem Punkt in Zukunft mehr Aufmerksamkeit zu widmen.

Ein weiterer interessanter Punkt ist die optimale Auslastung von Schmelzwannen. Häufig stehen Kunden der Möglichkeit des Einsatzes von elektrischer Zusatzbeheizung zur Schmelzleistungserhöhung skeptisch gegenüber, da oftmals die Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs der Schmelzwanne die Mehrkosten der elektrischen Zusatzbeheizung nicht ganz rechtfertigt. Hier sollte allerdings in Betracht gezogen werden, dass es der Einsatz der Elektrozusatzbeheizung erlaubt, das Schmelzaggregat so auszulegen, dass es für die fossile Beheizung die passgenaue Schmelzfläche für eine typische Mindertonnage aufweist und Belastungsspitzen oder zeitweise notwendige höhere Tonnagen durch die Ergänzung der elektrischen Zusatzbeheizung erreicht werden. Dann müssen bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und der CO₂-Emissionen nicht nur die Einsparungen durch die Elektrozusatzbeheizung bei Vollast betrachtet werden, sondern auch die Minderungen des Energieverbrauchs durch Vermeiden der Mindertonnagen und die Einsparungen an Feuerfestmaterial.

Regenerative Glasschmelzwannen stellen ein sehr ausgereiftes und effizientes Glasschmelzkonzept dar, welches trotzdem noch über ein Einsparpotential verfügt. Dieses Potential kann jedoch nur durch eine Kombination von Maßnahmen ausgeschöpft werden, die einerseits eine Optimierung der spezifischen Schmelzleistung der Schmelzwannen durch modernes Design wie Brennertechnologie, Bassindesign (Barrierewall, Deep Refiner®), elektrische Zusatzbeheizung, Bubblingsysteme beinhalten und andererseits eine damit mögliche Optimierung des technologischen Prozesses der Glasschmelze. Als Beispiel seien hier zwei Schmelzwannen angeführt, bei denen die oben angeführten Vorschläge konsequent verwirklicht wurden. Bei der ersten Schmelzwanne handelt es sich um eine große U-Flammenwanne mit 100 m² Schmelzfläche, die Grün- glas für Flaschenproduktion erschmolz. Sie wurde mit Erdgas beheizt, verfügte über eine elektrische Zusatzbeheizung und einen SORG® Deep Refiner® mit einer Badtiefe von 2600 mm. Der Scherbengehalt betrug 90 %. Die in Tabelle 12 angeführten Daten stammen aus dem ersten Betriebsjahr. Die Isolierung dieser Wanne war sehr stark ausgeführt. Eine weitere Wanne mit 125 m² Fläche erschmolz Weißglas für die Flaschenproduktion (Tabelle 13). Der Energieträger ist Erdgas. Auch diese Wanne verfügt über einen SORG® Deep Refiner® mit einer Badtiefe von 2600 mm sowie über eine Elektrozusatzbeheizung. Der Scherbengehalt beträgt 64 %.

Wie man sieht, ist der spezifische Energieverbrauch von Glasschmelzwannen, selbst wenn sie sehr ähnlich sind, von vielen Faktoren abhängig. Insbesondere beim Benchmarking einer großen Anzahl von Schmelzwannen wird es sehr schwierig, hier zu einer gerechten Normalisierung der Werte und damit zu einer Vergleichbarkeit der Anlagen zu kommen. Es reicht oftmals nicht aus, die Normalisierung auf Scherbengehalte und den Einsatz elektrischer Energie zu reduzieren. Weitere Parameter, wie zum Beispiel Wannentalter und vor allem auch Wannengröße, haben großen, auch gegenseitigen Einfluss. Aus diesem Grunde können Vergleiche, die zudem eine relativ große Anzahl von Schmelzwannen beinhalten, nur bedingt zu Aussagen über den spezifischen Ener-

gieverbrauch herangezogen werden, es sei denn, es wird ein großer Aufwand speziell zur Erfassung der Verbrauchsdaten und der Parameter zur Normalisierung betrieben.

Schmelzleistung [t/24 h]	Spezifischer Energieverbrauch [kcal/kg]	Einsatz Elektro- zusatzbeheizung [%]	Einsatz Elektro- zusatzbeheizung [kW]
335	791	7,4	950
340	797	7,5	895
350	771	9,2	1203
360	771	7,9	1062
370	757	7,9	1072
380	760	8,7	1217

Tab. 12: Ergebnis der ersten optimierten Schmelzwanne.

Schmelzleistung [t/24 h]	Spezifischer Energieverbrauch [kcal/kg]	Einsatz Elektro- zusatzbeheizung [%]	Einsatz Elektro- zusatzbeheizung [kW]
340	877	0	0
360	839	1,1	165
385	834	3,4	540
410	817	6	970

Tab. 13: Ergebnis der zweiten optimierten Schmelzwanne.

5 In Betracht gezogene Literatur

- [1] Ruud Beerkens, Hans van Limpt: Energy Efficiency Benchmarking of Glass Furnaces; Novem Workshop on Energy Efficiency, Amsterdam; May 2000
- [2] Wolfgang Trier: Glasschmelzöfen - Konstruktion und Betriebsverhalten; © Springer Verlag; 1984
- [3] Rüdiger Nebel: Potential Developments for Saving Energy and Reducing Pollutant Emissions; Novem Workshop on Energy Efficiency, Amsterdam; May 2000