

Die Arbeiten können aber keinesfalls als abgeschlossen betrachtet werden, da noch viele Fragen ihrer Klärung bedürfen. So spielen sicherlich andere bisher noch nicht berücksichtigte Faktoren als Ursache der

Schaumbildung eine Rolle. Weitere dieses Problem betreffende Versuche in Verbindung mit betrieblichen Beobachtungen sind daher noch erforderlich.

### 7. Literatur

- [1a] DIETZEL, A. und FLÖRKE, O. W.: Die Wirkung von Sulfat beim Einschmelzvorgang. *Glastechn. Ber.* **32** (1959) S. 181–185.
- [1b] BUSS, W.: Erhitzungsmikroskopische Untersuchungen von Vorgängen in Glasschmelzen mit und ohne Sulfat. *Glastechn. Ber.* **35** (1962) S. 167–176.
- [2] SHAW, F. und JONES, S. P.: Effect of sodium sulfate and furnace atmosphere on fining a container type glass. *Amer. ceram. Soc. Bull.* **45** (1966) S. 1004–1008. [Ref. *Glastechn. Ber.* **41** (1968) S. 101.]
- [3] SCHOLZE, H. und HANKE, K. P.: Einfluß des Wasserdampfes auf die Blasenbildung sulfathaltiger Glasschmelzen. (Fachauschlußvortrag.) [Ref. *Glastechn. Ber.* **41** (1968) S. 177.]
- [4] KRÖGER, C. und LUMMERZHEIM, D.: Radiologische Bestimmung des Kohlendioxidgehaltes von Natron-Kalkgläsern unterschiedlichen Schmelzzustandes. *Glastechn. Ber.* **38** (1965) S. 229–232.
- [5] GÖTZ, J. und VOSÁHLOVÁ, E.: Beitrag zur quantitativen Bestimmung des Wassergehaltes im Glas mit Hilfe der infraroten OH-Banden. *Glastechn. Ber.* **41** (1968) S. 47 bis 55.
- [6] JEBSEN-MARWEDEL, H.: Raumgewicht und Blasengehalt schmelzender Sulfatgläser unter dem Einfluß von Temperatur und Ofenatmosphäre. *Glastechn. Ber.* **19** (1941) S. 165–171.
- JEBSEN-MARWEDEL, H.: Die blasenförmige Gasausscheidung sulfathaltiger Glasschmelzen. *Sprechsaal* **75** (1942) S. 120–125. [Ref. *Glastechn. Ber.* **20** (1942) S. 353.]
- [7] MEIER ZU KÖCKER, H.: Einfluß des Ofengasschwefels auf die Glasschmelze. (Fachauschlußvortrag.) [Ref. *Glastechn. Ber.* **41** (1968) S. 306.]
- [8] KÖPPEN, N.: Noseanbildung bei Schamottesteinchen. *Glastechn. Ber.* **29** (1956) S. 16–17.
- [9] SNEED, R. B. und MOORE, H.: Sulfides speed flint glass fining. *Ceram. Ind.* **88** (1967) S. 64, 65, 68. [Ref. *Glastechn. Ber.* **41** (1968) S. 101.]
- [10] MANRING, W. H. und CONROY, A. R.: Influence of cullet in the melting of soda-lime glasses. *Glass Ind.* **49** (1968) Nr. 4, S. 199–202, Nr. 5, S. 269–270. [Ref. *Glastechn. Ber.* **42** (1969) S. 19.]
- [11] KRÖGER, C.: Gemengereaktionen und Glasschmelze. Köln und Opladen: Westdt. Verl. 1956. (Forschungsber. d. Wirtschafts- und Verkehrsmin. Nordrhein-Westf. Nr. 319.) S. 3.
- [12] O. Verf.: How to use caustic soda in glass. *Ceram. Ind.* **85** (1965) S. 60–61. [Ref. *Glastechn. Ber.* **39** (1966) S. 386.] (49777)

DK 666.1.031.5:621.365.69:621.3.036.6:66.012.44:666.1.031.74:662.614.2

## Wärmetechnisches und Betriebsverhalten elektrisch beheizter Glasschmelzwannen

Von HEINER STRUBE und MALCOLM C. J. FLEMING, Leigh-on-Sea (England)

(Vortrag auf dem HVG-Kolloquium „Einschmelzen von Gemenge in Glasschmelzwannen“ am 23. Oktober 1968 in Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 17. März 1969)

Mit Rücksicht auf die in Europa noch immer hohen Stromkosten überwiegt die Zahl der mit elektrischer Zusatzheizung ausgerüsteten Glasschmelzwannen über die vollelektrisch beheizten Wannen bei weitem. Die elektrische Zusatzheizung dient hauptsächlich der Erhöhung des Durchsatzes und der Verbesserung der Glasqualität. Molybdän-Stabelektroden mit einer Stromleistung bis 3 A/cm<sup>2</sup> haben sich als geeignet erwiesen. In die Berechnung der elektrischen Leistung gehen der spezifische Widerstand der Gläser und die benötigte theoretische Nutzwärme sowie die verlangte zusätzliche Schmelzleistung ein.

Vollelektrische Glasschmelzwannen arbeiten mit Graphitelektroden (System BOREL), Molybdän-Plattenelektroden (System GELL) und mit Molybdän-Stabelektroden (System PENBERTHY). Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme werden besprochen.

Der Gesamtwirkungsgrad elektrisch beheizter Wannen erreicht bei Kleinanlagen (2 t/24 h) 36%, bei größeren Anlagen (50 t/24 h) fast 70%. Ihre Wirtschaftlichkeit für die Erschmelzung von Spezialgläsern gilt als gesichert.

Um auch für Behältergläser eine wirtschaftlich arbeitende Anlage zu schaffen, wurde der Mixed-Melter entwickelt. Durch Kombination von Ölbeheizung oberhalb des Gemenges und elektrischer Beheizung des Bades lassen sich spezifische Schmelzleistungen von 4 t/m<sup>2</sup> 24 h erreichen, der spezifische Wärmeverbrauch liegt bei 1200 bis 1300 kcal/kg Glas.

Abschließend wird auf die elektrische Beheizung von Speiservorherden durch Bodenelektroden kombiniert mit Gasheizung und bei Spezialgläsern auf eine Kombination aus elektrischem Heizmantel zur Aufhebung der Wandverluste und Bodenelektroden eingegangen.

Wenige Länder in Europa und Asien liefern Strom an ihre Industrie zu einem Preis, der die elektrische Schmelze von Glas ökonomisch rechtfertigt, wenn nur die reinen Beheizungskosten in Betracht gezogen werden. Dieser Zustand wird schon dadurch verdeutlicht, daß der Wirkungsgrad einer größeren, modernen ölgefeuerten Glasschmelzwanne bei etwa 35% liegt, was durchaus dem Wirkungsgrad eines Kraftwerkes entspricht.

Es ist jedoch in der Praxis, und gerade in Europa, klar geworden, daß eine Anzahl von Faktoren, die außerhalb des Gebietes der Beheizungskosten liegen, die Verwendung von Elektroenergie zur Schmelze von Glas nicht nur rechtfertigen, sondern der Elektroschmelze eine dominierende Stellung unter den verschiedenen Beheizungsarten geben. Diese Faktoren haben dazu

geführt, daß heute beinahe 50 elektrisch beheizte Glasschmelzöfen und etwa 300 elektrische Zusatzbeheizungen nach dem Penberthy-Verfahren in Wannen konventioneller Art in Betrieb sind. Dabei darf bezüglich dieser Wannen ein bedeutender Durchbruch in allernächster Zukunft erwartet werden, da eine Anzahl von Glasherstellern jetzt schon eine Umstellung auf Elektroschmelze in die Investitionsplanung einbezieht, die mit dem Bau von Atomkraftwerken koordiniert wird.

Aus diesem Grunde allein ist es äußerst interessant, verschiedene Aspekte der Elektroschmelze zu belichten und Resultate aus der praktischen Erfahrung mit kontinuierlich arbeitenden Glasschmelzwannen zu ziehen.

### 1. Elektrische Zusatzheizung

Zusatzheizungen mit Leistungen von insgesamt 150000 kW sind in den letzten Jahren von der Penberthy-

Gruppe in konventionellen Wannen installiert worden, wobei die Systeme von nur 75 kW bis etwa 2000 kW Leistung variieren. Die Zuwachsrate für Europa allein wird für das Jahr 1969 mit 10 MW angenommen.

Wo liegt also das Anwendungsgebiet, wenn doch die Kosten für elektrische Energie das 8- bis 10fache der Kosten für Gas oder Öl, kalkuliert auf Kalorienbasis, ausmachen?

Zwei Anforderungen werden hauptsächlich an Zusatzheizungen gestellt: 1. Erhöhung des Durchsatzes einer Wanne und 2. Verbesserung der Qualität des Glases.

Als Beispiel kann eine öl- oder gasgefeuerte Regenerativwanne für Grünglas mit einer Schmelzleistung von 100 t/24 h angenommen werden, die etwa 2 Jahre in Betrieb ist. Die Marktlage bedingt eine Erhöhung der Produktion auf 150 t/24 h. Die Wanne hat vor Einbau einer Zusatzheizung eine spezifische Schmelzleistung von etwa 2 t/m<sup>2</sup> 24 h bei einer Schmelztemperatur von 1550 bis 1570 °C. Die zusätzliche Leistung ist durch Erhöhung der Temperatur nicht zu erbringen, da dann die geplante Ofenreise von 3½ bis 4 Jahren wegen des verstärkten Verschleißes des feuerfesten Materials nicht eingehalten werden kann. Zudem ist der thermische Quellpunkt auch bei erhöhter Oberofentemperatur von 1600 °C nicht stark genug, um eine genügende Barriere für das zusätzlich eingelegte Gemenge zu bilden, das bei einem Übertritt offensichtlich die Läuterung beeinflussen würde. Hier ist die elektrische Zusatzbeheizung das gegebene Mittel.

Es gilt herauszustellen, durch welche Beeinflussung des Glasbades die Mehrbelastung von 50 t/24 h erzielt werden kann.

Durch sorgfältige Untersuchung der bestehenden Eigenschaften der Wanne lassen sich Anhaltspunkte finden, die die Basis für die dann notwendigen Labor- und Modelluntersuchungen bilden. Wannenkonstruktion, Temperaturen, Gemengelage und Glaszusammensetzung sind die ausschlaggebenden Faktoren bei der Aufstellung einer sogenannten „Wannenkonstanten“, die für die Bestimmung der Arbeitsspannung des zu installierenden Systems benötigt wird.

Bei dem vorerwähnten Fall der Grünglaswanne ist mit Sicherheit anzunehmen, daß die im Volumen des Glases stagnierende Bodenschicht durch die Elektroenergie mit in den Schmelzprozeß einbezogen werden kann, wenn Elektroden in die untere Region des Schmelztes der Wanne eingeführt werden. Dadurch wird das Bodenglas aufgeheizt und mit in die Konvektionsströmung der Wanne einbezogen. Gleichzeitig müssen Elektroden im Bereich des Quellpunktes einen Stromverlauf quer durch die Wanne erzeugen, der das Gemenge nicht in die Läuterzone eindringen läßt. In der Praxis wird ein System, das eine Anzahl von Elektroden im Bereich des thermischen Quellpunktes vorsieht, häufig angewandt.

Die Elektrodenanordnung ist der wichtigste Punkt, der bei der Planung einer Zusatzheizung in Erwägung gezogen werden muß, da mit der Einführung der Elektroden die Wannenbedingungen je nach den Erfordernissen planmäßig beeinflußt werden können. Der Vorteil der Elektroschmelze gegenüber der herkömmlichen Beheizungsart liegt darin, daß hier Energie gezielt in die Glasschmelze, d. h., an den gewünschten Stellen und nicht nur generell über die Badoberfläche, eingeführt werden kann.

Diese Tatsache führt dazu, daß in keinem Fall über allgemeine Elektrodenanordnung oder Schemata gesprochen werden kann, da jede Wanne ihre eigene Charakteristik besitzt und somit entsprechende Elektrodenlagen verlangt, was jedoch Vergleiche zwischen verschiedenen Aggregaten — und der Erfahrung mit diesen — nicht ausschließt.

Was eine solche individuelle „maßgeschneiderte“ Planung eines Zusatzheizsystems möglich macht, ist die Anwendung von wassergekühlten Molybdän-Stabelektroden, die in jeder gewünschten und technisch möglichen Position installiert werden können, und zwar nicht nur während einer Reparatur, also im kalten Zustand der Wanne, sondern während des uneingeschränkten Produktionsbetriebes. Das bedeutet, daß die elektrische Energie genau dort zugeführt werden kann, wo sie am wirksamsten und wirtschaftlichsten eingesetzt ist. Dabei können die Elektroden sowohl vertikal als auch horizontal eingebaut werden, was einer 100prozentigen Flexibilität der Zusatzheizsysteme gleichkommt, die jeder Anforderung gerecht werden.

Molybdän mit einer Schmelztemperatur von 2600 °C und einer Strombelastbarkeit in Stabform von etwa 3 A/cm<sup>2</sup> ist von den wirtschaftlich einsetzbaren Elektrodenmaterialien, die für die Glasschmelze in Frage kommen, am meisten geeignet. Alle Natron-Kalk-Gläser und die meisten der Spezialgläser können mit diesem Material erschmolzen werden, das im Gegensatz zu Graphitelektroden keine Färbung der Schmelze verursacht. Der besondere Vorteil von Stabelektroden liegt darin, daß sie je nach Erfordernis nachgeschoben werden können. Ein Abfall der elektrischen Leistung des Zusatzheizsystems, bedingt durch Abnutzung, abhängig vom Glassatz und speziell den Oxydationsmitteln oder durch eventuellen Bruch, kann sofort kompensiert werden, was bei Graphit- oder Molybdän-Plattenelektroden entweder sehr schwer oder unmöglich ist. Es muß allerdings bemerkt werden, daß die Abnutzung einer Elektrode selten 7 cm pro Monat übersteigt, wenn die Zusatzheizung unter Strom steht. Im stromlosen Zustand ist eine Abnutzung ebenfalls vorhanden, aber bedeutend verringert, so daß hierdurch nur eine geringfügige finanzielle Belastung entsteht.

Es ist in diesem Zusammenhang wichtig, darauf hinzuweisen, daß unter Umständen bei der Inbetriebnahme eines Systems Veränderungen der Glaszusammensetzung (z. B. bei hohem Arsengehalt) vorgenommen werden müssen. Außerdem muß die Eintauchtiefe der Strombelastbarkeit und gegebenenfalls auch der mechanischen Druckwirkung der Glas- oder Gemengeströmung auf die Elektrode angepaßt werden.

Die Strombelastbarkeit ist von der Gesamtleistung der Zusatzheizung direkt abhängig. Sie ist in den meisten Fällen aus technischen Gründen auf drei Phasen gleichmäßig verteilt. Das erfordert bei Systemen größerer Leistung vier oder mehr Elektroden pro Phase, um die normalerweise gebräuchlichen Elektroden (etwa 32 mm Durchmesser) anstatt der stärkeren von etwa 50 mm Durchmesser verwenden zu können.

Die elektrischen Daten einer Zusatzheizung sind, wie die Auslegung der Systeme, für jeden Ofen verschieden. Es ist jedoch möglich, an Hand von einzelnen Bedingungen eine Basis für die Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung zu erreichen. Wie schon erwähnt wurde, ist eine der Grundlagen die Glas-

zusammensetzung, durch die der spezifische elektrische Widerstand des Glases bei gegebener Temperatur bestimmt wird. Die Betriebsspannung des Zusatzheizsystems hängt vom spezifischen Widerstand direkt ab, denn die spezifische Leitfähigkeit und damit der spezifische Widerstand der Glasschmelze wird durch die Anzahl der frei beweglichen Alkaliionen, deren Bewegung für die Leitfähigkeit verantwortlich ist, bestimmt. Es ist also anzunehmen, daß bei Erhöhung des Alkaligehaltes der elektrische Widerstand abnimmt. Gleichzeitig ist der elektrische Widerstand auch von der Viskosität abhängig, er wird kleiner, wenn die Temperatur erhöht wird. Hier ist zu beachten, daß die Größe der verschiedenen Alkaliionen variiert und die Ionen einen verschiedenen Widerstand durch die Moleküle des Glases erfahren. Bei Kaliumionen, die größer als Natriumionen sind, ist auch der elektrische Widerstand größer, und zwar im Verhältnis 2:1. Ein Glas mit 10% Natriumoxid hat also einen um die Hälfte kleineren Widerstand als ein Glas mit 10% Kaliumoxid, vorausgesetzt, daß alle anderen Glasbestandteile gleich sind.

Nachdem die erforderliche Spannung durch den Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstandes eines bestimmten Glases festgelegt ist, wird es notwendig, die Größe der elektrischen Kapazität zu bestimmen. Die theoretische Mindestelektroenergie, die zur Schmelze von 1 t eines bestimmten Glases erforderlich ist, wird mit 585 kWh (nach KRÖGER [1]) angegeben. In der Praxis werden durchschnittlich 600 kWh für jede durch Zusatzheizung erschmolzene Tonne Glas veranschlagt, und die Auslegung des benötigten Transformators richtet sich bei fast allen Installationen nach diesem Erfahrungswert.

Das bedeutet also, daß in der praktischen Anwendung mindestens ein thermischer Wirkungsgrad von 97,5% erreicht werden kann. In vielen Fällen ist es sogar möglich, über 100% hinauszugehen, was durch den stark verbesserten Konvektionsstrom, die dadurch verstärkte Gemengeschmelze aus dem Glasbad heraus und die verbesserte Läuterung, die mit einer Zusatzheizung erzielt werden können, erklärlich ist.

Als Beispiel kann die bereits erwähnte Grünglaswanne dienen. Um auf die 50% höhere Leistung pro Tag zu kommen — und damit auf 3 t/m<sup>2</sup> 24 h — ist also eine Leistung von  $50 \cdot 600/24 = 1250$  kW notwendig. Mit der konventionellen Ölbeheizung zusammen von etwa 180 g Öl/kg Glas ergibt sich eine Reduktion der mit der Beheizung zugeführten Wärmemenge auf  $\frac{2}{3}$  des ursprünglichen Wertes von fast 1800 kcal auf durchschnittlich 1300 kcal/kg Glas, bezogen auf den Gesamtdurchsatz von 150 t/24 h. Bei der Installation eines Systems dieser Kapazität kann der gewünschte Durchsatz gewährleistet werden. Vorausgesetzt wird, daß die Anordnung der Elektroden und die Betriebsspannung richtig gewählt wurden.

Durch die gezielte Einführung der Elektroenergie in die richtig bestimmten Einbauorte in der Wanne werden die Strömungsbedingungen und damit die thermischen Verhältnisse in der Schmelze so günstig beeinflusst, daß ein Großteil der gewünschten Durchsatzsteigerung erreichbar ist, ohne daß der vorgesehene volle Betrag an elektrischer Energie für die entsprechende Glasmenge benötigt wird. Beispiele hierfür sind die Wannen der Unit-Melter-Art.

1968 wurde die Installation einer elektrischen Zusatzheizung in einem Unit-Melter der Größe  $3,05 \times 12,2$  m ausgeführt. Der Durchsatz vor dem Einbau des elektrischen Systems lag bei knapp 55 t/24 h und maximal möglichem Öldurchsatz. Durch Einführung von Elektroenergie konnte der Durchsatz auf 98 t/24 h gesteigert werden, was den Ölverbrauch von 400 auf 250 g/kg Glas reduzierte. Die benötigte elektrische Leistung aber betrug nur 400 kWh/t 24 h erschmolzenes Glas. Das entspricht 2570 kcal/kg Glas, was nicht vergleichbar ist mit modernen Rekuperativ- oder Regenerativwannen, aber für einen Unit-Melter eine recht bedeutende Entwicklungsstufe repräsentiert.

An dieser Stelle ist es interessant, daß bei der Erhöhung der spezifischen Schmelzleistung dieses speziellen Unit-Melters die Gelegenheit bestand, diese Erhöhung in getrennten Abschnitten auszuführen, um den Zusammenhang zwischen der Schmelzleistungssteigerung und dem spezifischen Stromverbrauch zu verfolgen. Es besteht weitläufig die Meinung, die anfänglich zugeführte Leistung sei von größter Wirkung, während ab einer bestimmten Energiezufuhr eine geringere Leistungszunahme zu verzeichnen sei. Dieses stimmt jedoch keineswegs mit den Erfahrungen der Autoren in den letzten Jahren überein und wird durch die Ergebnisse widerlegt, die an Hand dieses Unit-Melters ermittelt worden sind. Ein detaillierter Bericht wird demnächst veröffentlicht.

Es ist damit gezeigt, daß eine wirksame Beeinflussung der Schmelzleistung von Wannen durch diese Systeme erzielt werden kann, wenn äußerste Sorgfalt bei der Auslegung unter Berücksichtigung bereits vorhandener Erfahrungen angewandt wird. Es ist durchaus möglich, nach verschiedenen Analysen zu einer Elektrodenauslegung zu kommen, die unerwünschte Eigenschaften einer Wanne mit der Intensität verstärkt, mit der sie Verbesserungen erzielen sollte. Auf Grund der angewandten stark verbesserten Modelltechnik sind fehlerhafte Auslegungen jedoch fast ausgeschlossen, und der Sollzustand einer Anlage kann im allgemeinen mit hoher Genauigkeit vorher bestimmt werden.

Die Regelung der Zusatzheizsysteme ist einfach, sie wird allgemein durch Vielstufenschalter direkt am Transformator bewirkt, der durch Sammelschienen entsprechender Strombelastbarkeit mit den Elektroden verbunden ist. Bei gleichbleibendem Durchsatz muß nur etwa zweimal in 24 h eine Neueinstellung vorgenommen werden.

Die Strombelastung der Elektroden kann an einem zentralen Steuerschrank überwacht werden, der die gesamten notwendigen Instrumente aufnimmt.

Als besondere Einrichtung ist in den letzten Jahren ein Überwachungsgerät für die Temperatur der wassergekühlten Elektrodenhalter hinzugefügt worden, durch das die Abnutzung des feuerfesten Materials in der Umgebung der Elektrode beobachtet werden kann. Dies ist unter Umständen äußerst wichtig, da z. T. Systeme in Wannen eingebaut werden, in denen kein schmelzflüssig gegossenes Material für die Elektrodensteine oder den Bodenbelag angewandt wird. Obwohl es ratsam ist, Elektrodensteine aus schmelzflüssig gegossenem Material zu verwenden, sind andere Materialien ebenfalls, wenn auch mit verkürzter Standzeit, eingesetzt worden.

Eine Anzahl von Wannen wird bei ständig schwankendem Durchsatz betrieben, so daß nur während weniger Monate im Jahr die maximale Leistung dieser Wannen in Anspruch genommen und dadurch unwirtschaftlich gearbeitet wird. Auch hier bietet sich die Anwendung der Zusatzheizung an, da dann die Wanne nur für z. B. 75% ihrer ursprünglichen Kapazität konstruiert und die jeweilige Mehrlast durch Elektroschmelze erbracht werden kann, während die Gas- oder Ölbeheizung bei gleichbleibender, optimaler Leistung betrieben wird.

Was die Durchsatzerhöhung betrifft, so ist es selbstverständlich, daß durch die Anpassungsfähigkeit der Zusatzheizung bei jeder Wanne ein Produktionsanstieg erzielt werden kann. Es ist schwer, eine obere Grenze anzugeben, im Durchschnitt liegt die durchschnittliche Erhöhung der Schmelzleistung durch Elektrozusatzheizung im Bereich von 10 bis 60%, bevor das sogenannte „Superboosting“ in Frage kommt.

Bei den Qualitätsverbesserungen, die durch diese Systeme erreicht werden können, handelt es sich hauptsächlich um die Verminderung von Schlieren, Blasen und Steinen. Denn durch die Elektroden werden lokal verstärkte thermische Strömungen in dem sie unmittelbar umgebenden Glas erzeugt. Dadurch kann eine bedeutende Verbesserung der Homogenität des Glases erreicht werden.

Bei den meisten Elektrozusatzheizungen werden die Forderungen nach Produktionsanstieg und gleichzeitig nach Qualitätsverbesserung durch ein einziges System gelöst. Bei Behälterglas wird für eine Qualitätsverbesserung allein der Einbau einer Zusatzbeheizung meist gar nicht verlangt.

Eine Zwischenstufe zwischen der elektrischen Zusatzheizung und dem vollelektrischen Schmelzofen stellt das „Superboosting“ dar, das bei sehr großer zusätzlich verlangter Schmelzleistung eingesetzt wird. Im Gegensatz zu der Grundstufe werden hier nicht nur einzelne Strömungsbereiche beeinflusst, sondern die Gesamtcharakteristik der Wanne wird verändert. Da das Gemenge sonst nicht mehr in der Schmelzzone gehalten werden kann, muß der konventionelle Schmelz- und Läuterprozeß durch verstärkte vertikale Strömungen in die Schmelze hinein verlegt werden. Dabei wird das gesamte Glasbad in die elektrische Beheizung einbezogen und absinkende Gemengeteile geschmolzen und geläutert, bevor sie zum Durchlaß gelangen. Auf diese Weise kann unter Beibehaltung der Verbrennungsraumtemperatur der Durchsatz um 100% oder mehr gesteigert werden. Das „Superboosting“ kommt dann in Frage, wenn bei entsprechender Leistungssteigerung keine Vergrößerung der Wanne möglich ist.

## 2. Vollelektrische Schmelzöfen

Im wesentlichen sind heute drei Arten vollelektrischer Schmelzöfen in der Glasindustrie in Betrieb: BORELS Graphitelektrodenöfen, GELLS Plattenelektrodenwannen und die Molybdän-Stabelektroden verwendenden Systeme von PENBERTHY.

Die von BOREL mit Graphitelektroden ausgerüsteten Wannen wurden schon in der Mitte der 30er Jahre entwickelt und sind bekannt für gute Ergebnisse, besonders bei der Flachglasproduktion. Verbrauchsdaten sind wenig bekannt; doch dürfte eine 50t-Wanne etwa 1600 kWh/t erschmolzenen Glases benötigen. Die Zahl neuer Installationen dieses Systems ist jedoch zugunsten

von Gell- und Penberthy-Wannen zurückgegangen, als 1950 die metallurgische Entwicklung den Einsatz von Molybdän für die Glasschmelze ermöglichte.

Zwei Formen von Molybdänelektroden werden heute hauptsächlich eingesetzt. Eine ist die von GELL entwickelte Plattenelektrode, von denen mehrere nebeneinander installiert werden, um eine Schiene entlang jeder Seitenwand zu bilden. Ein Schaft wird zur Stromversorgung durch die Elektrodensteine geführt. Die elektrischen Stromlinien verlaufen also quer durch das Wannenbecken. Die Schäfte selbst können wassergekühlt werden. Der Nachteil dieses Systems besteht jedoch darin, daß die Betriebszeit dieser Elektroden und daher der Wanne selbst ganz von ihrer Abnutzung abhängig und ein Austausch nur in einer Kaltreparatur möglich ist.

In Penberthy-Wannen, in denen wie bei den Zusatzheizungen Stabelektroden eingesetzt werden, ist dieses Problem nicht vorhanden, da die Stabelektroden ohne Schwierigkeiten je nach Erfordernis nachgeschoben werden können.

Der zweite große Unterschied beider Systeme besteht darin, daß GELL einphasige Schmelzsaltungen verwendet, die eine zusätzliche elektrische Ausrüstung für eine ausgeglichene Phasenbelastung erfordern. PENBERTHY hingegen erzielt diese gleichmäßige Belastung wie bei der elektrischen Zusatzheizung durch die gegenüberliegende Anordnung der Elektroden und durch ihre Eintauchtiefe im Glasbad, die durch Berechnung und Modelluntersuchungen bestimmt werden.

Im Gegensatz zu dem System nach BOREL haben die beiden letzteren Systeme jedoch eines gemeinsam: Das Gemenge wird über die gesamte Oberfläche des Glases eingelegt. Diese Methode sichert einen höheren Wirkungsgrad dieser vollelektrischen Wannen bei geringen Strahlungsverlusten. Sie erfordert andere Methoden der Gemengeeinlage, da der Ofenraum wegen der Abdeckung des Bades Temperaturen von weniger als 200 °C besitzt. Der bedeutendste Unterschied zu konventionellen Wannen mit weitgehend horizontalem Schmelzverlauf besteht im Senkrechtschmelzprinzip, bei dem jeder Teil der Schmelze durch die im Glasbad liegende elektrische Heizzone geführt wird, bevor er durch den Durchlaß in den Vorherd gelangt.

Ein weiterer Unterschied zu den meisten anderen Schmelzwannentypen — konventionell oder elektrisch — besteht darin, daß das erschmolzene Glas mit nur wenigen Ausnahmen direkt vom Durchlaß in den Vorherd oder Speiser strömt. Versuche haben gezeigt, daß die Glasqualität in der Arbeitswanne nicht mehr verbessert werden konnte, wenn sie im Durchlaß nicht schon den Anforderungen entsprach. Bei einer durchschnittlichen spezifischen Schmelzleistung von 2,5 t/m<sup>2</sup> 24 h und ohne Arbeits- oder Abstehwanne sowie ohne Unterofen ist der Platzbedarf eines vollelektrischen Ofens auf ein Minimum reduziert. Diese Wannen können bei erträglichem Aufwand mit hochwertigem Steinmaterial, im allgemeinen aus einer Kombination von schmelzflüssig gegossenem, lunkerfreiem Material und Sillimanit, versehen werden.

Es ist unerlässlich, daß zur Erzielung von Wannenergebnissen annehmbarer Dauer schmelzflüssig gegossene Materialien eingesetzt werden. Kleinere Aggregate, die hauptsächlich aus Sillimanit bestehen, haben ununterbrochene Betriebszeiten bis zu 1 1/2 Jahren erreicht,

während bei Hochleistungswannen Betriebszeiten von 46 bis 48 Monaten, besonders bei den neueren und moderneren Ausführungen, erzielt worden sind. Die Temperaturen, die innerhalb der Glasschmelze herrschen, liegen bei Natron-Kalk-Gläsern höchstens bei 1400 bis 1450 °C, bei Borosilicatgläsern nur in seltenen Fällen höher als 1500 °C. Die Abnutzung des Bodenbelages ist nicht stärker als bei konventionellen Wannen. Die Abnutzung der Seitenwände ist jedoch im Vergleich zu dem Verschleiß konventioneller Wannen gering. Die Korrosion ist im Bereich der Elektroden selbst am größten, während der Verschleiß des Steinmaterials an der Spiegellinie durch das abdeckende Gemenge und den vertikalen Schmelzverlauf gering bleibt, so daß die Abnutzung über die Gesamthöhe eines Steines relativ gleichmäßig verläuft. Dies hat zur Folge, daß keine Luftkühlung an der Spiegellinie benötigt wird.

Die Betriebsspannung dieser Wannen wird sorgfältig auf die elektrische Leitfähigkeit des feuerfesten Materials abgestimmt, und es treten keine hohen Spannungen zwischen den benachbarten Elektroden auf, wenn sich der spezifische Widerstand des schmelzflüssig gegossenen Materials dem des Glases nähert, wie z. B. bei Borosilicatgläsern mit niedrigem Alkaligehalt. Dies trifft auch für die Auslegung jeder Zusatzheizung zu.

Kaum ein Problem stellt dagegen die hohe Wärmeleitfähigkeit dieses Materials dar, da die Wannen gut isoliert werden können. Obgleich die Isolation der Seitenwände oder des Bodens von verschiedenen Fachleuten abgelehnt wird, sind dabei keine nachteiligen Erfahrungen gemacht worden. Auf jeden Fall kann der ohnehin schon hohe Wirkungsgrad elektrisch betriebener Schmelzwannen dadurch bedeutend verbessert werden.

Die Abnutzung des feuerfesten Materials hängt von der Temperatur in der Wanne ab, und es ist selbstverständlich wünschenswert, die Schmelztemperatur möglichst niedrig zu halten. Gläser, wie z. B. Borosilicatgläser, benötigen höhere Schmelztemperaturen, die Lebensdauer dieser Wannen ist daher kürzer.

Die maximale spezifische Schmelzleistung der elektrischen Schmelzwannen des beschriebenen Typs liegt im allgemeinen bei 2,5 t/m<sup>2</sup> 24 h, abhängig von der effektiven Schmelzleistung und daher von der Wannengröße. Kleinere Aggregate erreichen kleinere spezifische Schmelzleistungen.

In einer vollelektrischen Wanne ist die Tiefe des Glasbades ein wichtiger Faktor, da die Temperatur des durch den Durchlaß fließenden Glases bedeutend niedriger sein sollte als die Maximaltemperatur in der Nähe der Elektroden. Ist dies nicht der Fall, so wird das durch den Durchlaß fließende Glas zu große Wärmemengen wegführen, und damit wird die Wirtschaftlichkeit der Wanne reduziert. Die Temperatur am Durchlaß und in Bodennähe ist in einer Farbglaswanne bedeutend niedriger als in der gleichen Wanne bei Weißglaserzeugung und bei gleicher Badtiefe, was auf die unterschiedliche Strahlungsabsorption bei der Glasarten zurückzuführen ist.

Die obere Grenze für die spezifische Schmelzleistung, die in einer elektrischen Wanne erzielt werden kann, ist schwer zu definieren; es ist jedoch klar, daß eine erhöhte spezifische Schmelzleistung eine steigende Temperatur voraussetzt, die wiederum verstärkten Verschleiß und verminderten Wirkungsgrad durch die höhere Temperatur des am Durchlaß austretenden Glases bedingt. Elektrische Wannen mit sehr hohen spezifischen Schmelz-

leistungen können daher unwirtschaftlicher arbeiten als Wannen mit niedrigerer spezifischer Leistung.

Die Glasqualität einer vollelektrischen Wanne kann durch Regulierung der Energiezufuhr und somit der Schmelztemperatur gut beeinflußt werden. Es ist möglich, die benötigte elektrische Energie, die spezifische Schmelzleistung und die zu erwartende Glasqualität aus der Erfahrung sehr genau vorauszusagen. Der Schmelzprozeß kann sehr genau kontrolliert werden, besonders, wenn eine automatische Überwachung der Energiezufuhr, wie bei vielen vollelektrischen Öfen üblich, angewandt wird. Im Vergleich zur Temperaturkontrolle ist die Regulierung der Energiezufuhr vorzuziehen. Eine Temperatur-Meßvorrichtung besitzt nicht immer die benötigte Betriebssicherheit, ihr Einbauort stellt ein Problem dar. Faktoren, wie Stärke und Gleichmäßigkeit der Gemengedecke, können die Temperatur beeinflussen.

Durch die Regulierung der Energiezufuhr können die Wannenbedingungen leichter kontrolliert werden, und normalerweise ist nur eine geringfügige manuelle Steuerung notwendig. Häufige Schwankungen der Wannenleistung bedeuten kein Problem, weil bei bekanntem Energiebedarf die Energiezufuhr gleichzeitig mit der geforderten Erhöhung der Wannenleistung neu eingestellt wird. Normalerweise tritt bei elektrischen Wannen auch nicht die Notwendigkeit auf, die Energiezufuhr lange vor Erhöhung des Durchsatzes zu verstärken, wie es bei konventionellen öl- oder gasbeheizten Wannen oft der Fall ist.

Das Thema der „Selbstentregelung“, die sich durch das Glastemperatur-Widerstands-Verhältnis ergibt, ist verschiedentlich in der Literatur erwähnt worden. Mit steigender Glastemperatur vermindert sich der Widerstand der Schmelze, und bei gleichbleibender Spannung erhöht sich der Stromfluß und daher die Energiezufuhr, was zu einer weiteren Temperatursteigerung der Schmelze führt. Umgekehrt reagiert die Wanne bei Abnahme der Temperatur. Selbstverständlich wird dieses Problem durch automatische Temperaturregelung gelöst. Bei Wannen, die keine automatische Energie-Kontrollvorrichtung besitzen, stellte man jedoch fest, daß sich die Tendenz zur „Selbstentregelung“ so langsam entwickelt, daß die gleichbleibende Energiezufuhr durch manuelle Nachregelung der Spannung aufrechterhalten werden kann. Nur bei Gläsern mit sehr hohem Widerstand (E-Glas) ist die Tendenz zur „Selbstentregelung“ ein wichtiges Problem. Auch bei einem Borosilicatglas ist eine automatische Kontrolle der Energiezufuhr wünschenswert, aber nicht unbedingt notwendig.

Wenn auch für die automatische Überwachung einer elektrischen Schmelzwanne die Energie-Kontrollvorrichtung vorgezogen wird, so ist es dennoch wünschenswert, auch die Temperatur laufend zu messen. Die zuverlässigste Ausrüstung besteht aus einem optischen Meßsystem mittels einer eingetauchten Sonde. Diese Vorrichtung vermittelt wichtige Informationen über die tatsächlichen Verhältnisse innerhalb des Glasbades. Treten z. B. in einer vollelektrischen Wanne übermäßig hohe Temperaturen auf, ohne daß die Warnsignale für niedrige Spannung und sehr hohe Ströme beachtet werden, so kann eine zusätzliche Temperaturkontrolle eine Beschädigung des feuerfesten Materials verhindern.

Es ist einleuchtend, daß bei einer die ganze Oberfläche des Glasbades bedeckenden Gemengedecke ein sehr hoher thermischer Wirkungsgrad erreichbar ist,

wenn die Seitenwände und der Boden gut isoliert sind. Bei einer 50t-Wanne für Behälterglas liegt die Energiezufuhr für eine Tonne Glas normalerweise bei weniger als 850 kWh (731 000 kcal), womit ein Wirkungsgrad von 69% erreicht wird (basierend auf dem theoretischen Nutzwärmeverbrauch von 585 kWh/t Glas). Bei einer 100t-Wanne wird die Energiezufuhr auf etwa 700 kWh/t reduziert, was einen thermischen Wirkungsgrad von 84% repräsentiert. Diese Daten sind im Betrieb erreicht worden und können durch modernere, leistungsfähigere Konstruktionen vermutlich noch reduziert werden. Es muß beachtet werden, daß die Verbrauchsdaten vom Glastyp und Glasqualität abhängen, dieselben Einschränkungen sind aber auch für konventionelle öl- oder gasbeheizte Wannen gültig. Sie zeigen, daß die vollelektrische Schmelze heute nicht mehr wegen der Schmelzkosten abgelehnt werden kann. Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen über die Wirtschaftlichkeit der vollelektrischen Glasschmelze, so daß eine detaillierte Erörterung an dieser Stelle nicht notwendig erscheint. Es ist jedoch anzunehmen, daß Fachleute, die über ungünstige ökonomische Verhältnisse der elektrischen Schmelze berichtet haben, keine ausreichenden Erfahrungen mit dem Betrieb solcher Wannen besitzen.

Wenn allein die Beheizungskosten berücksichtigt werden, wird die vollelektrische Schmelze aus ökonomischen Gründen für die Erzeugung von Behälterglas nicht in Betracht gezogen werden können. Dennoch gibt es eine große Zahl von Herstellern, die nach sorgfältiger Erwägung aller Faktoren zu dem Schluß gekommen sind, daß die vollelektrische Schmelze auch für die Produktion von Behälterglas wirtschaftlich sein kann. Es gibt Firmen in den USA und Europa, die lieber vollelektrische Wannen als konventionelle öl- oder gasgefeuerte Wannen installiert haben, und zwar auch an Orten, an denen Erdgas zu niedrigem Preis verfügbar ist. In Texas wurde eine vollelektrische Wanne in Betrieb genommen, obwohl die Kosten pro Kalorie — verglichen mit Gas — ein Verhältnis von 9:1 ergeben. Zwei Gründe sind für die Anwendung der elektrischen Energie bestimmend: die allgemein bessere Qualität des in vollelektrischen Wannen erschmolzenen Glases, wobei diese während der ganzen Ofenreise beibehalten wird und nicht am Ende der Ofenreise abfällt, wie dies z. B. bei konventionellen öl- oder gasgefeuerten Wannen beobachtet wird, wenn die Regeneratoren ausfallen.

Dabei läßt sich die Qualität eines Glases nicht allein auf Grund der Anzahl von Gispn, Blasen oder Steinen oder an Hand der Farbe festlegen. Man muß auch die physikalisch noch nicht endgültig definierte „Verarbeitbarkeit“ des Glases beachten. In diesem Zusammenhang soll der Vortrag von POOLE [2] erwähnt werden. Auch PECKHAM [3] stellte 1962 anlässlich der Columbus Glas-konferenz fest, daß seine Firma mit ihrer ersten vollelektrischen Wanne eine im Durchschnitt um 3 bis 5% höhere Ausbeute im Vergleich mit ihren konventionell beheizten Wannen erzielte.

Es ist vielleicht schwer, die Möglichkeit einer solchen Verbesserung zu erkennen, wenn man schon eine Ausbeute von 98 oder 99% für bestimmte Sorten erzielt. Das wichtigste Ergebnis einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit ist jedoch die Steigerung der Maschinengeschwindigkeit. PECKHAM [3] ist einer der Glashersteller, die ihre Erfahrungen mit der vollelektrischen Schmelze uneingeschränkt veröffentlicht haben. Was die

Beurteilung einer Wannenkonstruktion betrifft, sind Glashersteller von Natur aus vorsichtig; man kann jedoch darauf hinweisen, daß die Zahl vollelektrischer Wannen nicht nur für spezielle Gläser sondern auch für Behälterglas ständig ansteigt.

Für Gläser mit flüchtigen Bestandteilen, z. B. Borsilicat-, Blei- und Fluor-Opalgläser, sind die ökonomischen Verhältnisse sehr viel günstiger. In den Wannen, die ein kaltes Gewölbe haben, können die flüchtigen Substanzen an der Gemengeoberfläche nicht austreten und während etwa 50% des Fluorids bei der konventionellen Schmelze eines Fluor-Opalglases verlorengehen, beträgt der Verlust bei der vollelektrischen Schmelze nur 4 bis 5%.

Die kontinuierliche Schmelze von Bleiglas ist in größerem Umfang erst durch die wirtschaftliche Herstellung von Elektroden aus Zinnoxid ermöglicht worden. Diese Elektroden haben keinen nachteiligen Einfluß auf die Glasqualität und reagieren nicht mit Bleigläsern, während Molybdänelektroden aus diesem Grund nicht verwendet werden können. Die vollelektrische Schmelze von Bleigläsern ist jetzt aus dem experimentellen Stadium heraus, und es ist nachweisbar, daß diese Wannen Bleiglas hoher Qualität produzieren können, die der eines Hafnofens entspricht. Die Verminderung der PbO-Verluste durch Verdampfung stellt eine Kostenersparnis dar, die in bestimmten Fällen die Energiekosten einer vollelektrischen Bleiglaswanne mit einem Durchsatz von etwa 20 t/24 h deckt.

### 3. Mixed-Melter

Auch die offensichtlichen Vorteile in bezug auf die Glasqualität, die durch die vollelektrische Schmelze erzielt werden können, sind in vielen Fällen nicht imstande, die europäischen Elektrizitätspreise im Vergleich zu den Preisen der konventionellen Brennstoffe annehmbar zu machen und den Einsatz elektrischer Schmelzaggregate zu fördern. Unter Berücksichtigung der besseren Wärmeübertragung an das relativ kalte Gemenge mittels Gas- oder Ölflammen ist es finanziell günstiger, für die Rauhschmelze herkömmliche Brennstoffe einzusetzen statt elektrischer Energie. Andererseits ist es erwünscht, die deutlichen Vorteile der vollelektrischen Wanne beizubehalten. Besonders die geringen Abmessungen der Anlagen, ihre kurze Reparaturzeit, die bessere Beherrschung des Schmelzprozesses und die Gleichmäßigkeit der Glasqualität sind Vorteile, die beibehalten werden sollten. Deshalb wurde unter dem Namen „Mixed-Melter“ eine Wannenkonstruktion entwickelt, die die Vorteile einer vollelektrischen Wanne beibehält, aber zusätzlich Gas- oder Ölbeheizung für die Rauhschmelze des Gemenges benutzt. Versuche und Berechnungen ergaben, daß durch Kombination der vertikalen Elektroschmelze mit der Brennstoffbeheizung der Gemengedecke der elektrische Energiebedarf weit unter den der vollelektrischen Wannen gesenkt werden konnte. Die Praxis hat gezeigt, daß so weniger als 50% des Energieverbrauches einer vollelektrischen Wanne benötigt werden.

Im Prinzip wird die Gemengedecke im Mixed-Melter beibehalten; sie wird durch Öl- oder Gasfeuerung auf Temperaturen über 1000 °C aufgeheizt. Der Öl- oder Gasbedarf im Mixed-Melter beträgt jedoch im Vergleich mit konventionellen Wannen nur etwa 40%. Die Steigerung des auf über 1000 °C vorgewärmten Gemenges auf

die Schmelz- und Läutertemperaturen wird dann allein mit elektrischer Beheizung bewirkt. Die Gemengedecke schließt Abstrahlungsverluste vom heißeren Glasbad in den Oberofen aus, was sich auf den Bedarf an elektrischer Energie günstig auswirkt.

Das bereits auf 1000 °C vorgewärmte Gemenge kann aus der elektrisch beheizten Schmelze in kürzerer Zeit eingeschmolzen werden, was eine viel höhere spezifische Schmelzleistung im Vergleich mit der vollelektrischen oder konventionellen Wanne zur Folge hat. Der praktische Betrieb hat gezeigt, daß sehr gute Resultate hinsichtlich der Glasqualität und des Energieverbrauches erreicht wurden bei spezifischen Schmelzleistungen von über 3,5 t/m<sup>2</sup> 24 h. Eine Steigerung der spezifischen Schmelzleistung auf 4 t/m<sup>2</sup> 24 h ist seit Februar 1969 erreicht worden. Überraschend ist bei dieser hohen Leistung, daß die Wannentemperaturen an keiner Stelle 1400 °C übersteigen. Es ist zu erwarten, daß die Abnutzung der Wannensteine geringer als bei vollelektrischen oder konventionell beheizten Wannen sein wird. Es wäre jedoch voreilig, die Lebensdauer einer solchen Wanne vorauszusagen, da sich bis jetzt noch kein Mixed-Melter lange genug in Betrieb befindet.

Es ist vielleicht von Interesse, die Betriebsdaten des ersten Mixed-Melters, der mit einer Schmelzfläche von 18 m<sup>2</sup> konstruiert wurde, anzuführen. Diese Wanne arbeitet heute mit einer Leistung von über 2 t/24 h, was einer spezifischen Schmelzleistung von 4 t/m<sup>2</sup> 24 h entspricht. Ohne Rekuperatoren für die Luftvorwärmung liegt der Ölverbrauch bei 95 g/kg Glas, zusätzlich werden 0,425 kWh/kg Glas benötigt. Diese Daten ergeben einen spezifischen Wärmeverbrauch von insgesamt 1278 kcal/kg Glas, was einem Wirkungsgrad von etwa 46% entspricht. Wie schon erwähnt, sind diese Werte ohne Rekuperatoren erzielt worden, deren Anwendung den spezifischen Wärmeverbrauch auf etwa 1130 kcal/kg reduzieren und den Gesamtwirkungsgrad auf über 50% erhöhen könnte.

Da der Mixed-Melter die Vorteile des vollelektrischen Ofens beibehält und trotzdem die Betriebskosten beachtlich reduziert, dürfte dieser Wannentyp auch für die Erzeugung von Verpackungsgläsern interessant sein. Weitere Verbesserungen sind vorgesehen, um die Betriebskosten noch weiter zu reduzieren. In den reduzierten Investitionskosten und der verkürzten Reparaturzeit (mit geringen Produktionsverlusten während der Reparatur) dürfte ein weiterer Anreiz für den Einsatz dieses Ofentyps liegen.

#### 4. Elektrisch beheizte Speiservorherde

Abschließend verbleibt ein Thema, das — obwohl nicht zur Schmelze gehörend — doch in Zusammenhang mit der Entwicklung der elektrischen Beheizung von Glasschmelzwannen erwähnt werden muß. Es behandelt die elektrische Beheizung von Vorherden, die seit etwa 2 Jahren starken Einfluß auf die Vorherdkonstruktion ausübt.

Die Anforderungen durch höhere Maschinengeschwindigkeiten, bessere Glasqualität, geringere Glasgewichte und allgemein besserer Kontrolle des Vorherd-

betriebes werden ständig verstärkt, was für die Penberthy-Gruppe Anlaß zur Entwicklung spezieller Systeme gab.

Zwei Faktoren tragen hauptsächlich dazu bei, daß der Vorherdbetrieb in der bekannten Form bei Gasbeheizung — aber auch bei Einsatz elektrischer Strahler-elemente — Nachteile mit sich bringt: 1. Die Gesamtwärmeübertragung erfolgt von oben nach unten durch die Oberfläche des Glases, und 2. die Wärmeverluste durch Seiten und Boden gehen vom Glasvolumen aus, was vertikale und horizontale Temperaturgradienten in diesem erzeugen muß.

Es ist naheliegend, dieses Problem durch die Einführung von Wärmeenergie direkt in das Glas zu lösen. Bei der Entwicklung von dazu geeigneten Systemen und speziellen Elektroden wurde die Technik der Zusatzheizung zugrunde gelegt und diese in verkleinertem Maßstab auf die Vorherde übertragen. Durch die Einführung elektrischer Energie in das Glas werden die genannten Nachteile weitgehend reduziert; Temperaturmessungen zeigen, daß die Gradienten auf höchstens 10% der ursprünglichen Werte abgenommen haben.

Die Anordnung der Elektroden hängt von der Glasart ab, sie werden aber meist durch den Boden des Speiserkanals eingeführt. Ihre Anzahl, Verteilung und Schaltung gegeneinander richten sich nach der erforderlichen elektrischen Energiezufuhr.

Durch kontinuierliche Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Glases zwischen den Elektroden wird eine einfache Überwachung und Steuerung des gesamten Systems ermöglicht. Schwankungen der Glaszusammensetzung oder der Belastung haben nur bei größerem Ausmaß einen spürbaren Einfluß auf den Meßwert, er kann durch Nachsteuerung ausgeglichen werden.

Um Temperaturgleichheit über die Tiefe des Glasbades zu erzielen, muß die Gasbeheizung meist reduziert werden, sobald die Elektroenergie eingesetzt wird, da es sich bei diesem Verfahren mehr um eine Kompensation der Wärmeverluste als um eine zusätzliche Beheizung handelt.

Elektrisch beheizte Vorherde mit zusätzlicher Gasbeheizung sind größtenteils in der Behälterglasindustrie eingesetzt, während für Spezialgläser vollelektrische Vorherdbeheizungen zur Erzielung weiter verbesserter thermischer Homogenität entwickelt wurden. Sie werden zusätzlich mit einem elektrischen Heizmantel ausgerüstet, der die Wandungsverluste dieser Speiservorherde kompensiert. Dies führt zu maximaler thermischer Homogenität und ermöglicht zugleich einen Verzicht auf den Gasraum über dem Glasfluß, was besonders bei Opal-, Borosilicat- und Bleiglas von Bedeutung ist.

Die Systeme sind im vorliegenden Fall auf den Speiserbetrieb zugeschnitten, doch sind sie in entsprechend veränderter Form und Leistung in Vorherden jeglicher Art anwendbar. Der Einsatzbereich dieser Vorherde mit elektrischer Heizung ist unbegrenzt. Die Praxis hat gezeigt, daß die eingeschlagene Richtung gute Ergebnisse erbracht hat, und es besteht kein Zweifel, daß sich die Anwendung dieser Systeme in Zukunft auf alle Zweige der Glasindustrie ausdehnen wird.

#### 5. Literatur

- [1] KRÖGER, C.: Theoretischer Wärmebedarf der Glasschmelzprozesse. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 202–214. S. 129–130, 132–134, 136. [Ref. Glastechn. Ber. **41** (1968) S. 379.]
- [2] POOLE, J. P.: Glass workability. Glass Ind. **41** (1967)
- [3] PECKHAM, G. W.: New electric furnace reduces melting costs. Glass **39** (1962) S. 444–446. (49599)