

keit herangezogen werden.

$$\text{Pe-Zahl} = \frac{wl}{a} = \left(\frac{wl}{a} \right)_{\text{or}} = \left(\frac{wl}{a} \right)_{\text{M}},$$

$$\frac{w_{\text{or}}}{w_{\text{M}}} = \frac{a_{\text{or}}}{a_{\text{M}}}$$

Nach REINHARDT [5] und TRIER [12] gelten für

$$a_{\text{or}} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h} \text{ bei } 1000 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_{\text{Clophen}} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h} \text{ bei } 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Mit $\bar{v}_{\text{Gl}} = 100 \text{ mm/s}$ ergibt das für \bar{v}_{M} einen Wert von

$$\bar{v}_{\text{M}} = 37,5 \text{ mm/s} = \left(\frac{H_0}{\tau_{\text{B}}} \right)_{\text{M}}$$

und eine Vorblaszeit von: $(\tau_{\text{B}})_{\text{M}} = 8 \text{ s}$.

Dieser Wert von τ_{B} wird bei einem Blasdruck p_{M} von

$$p_{\text{M}} = 0,15 \text{ atü}$$

erreicht.

Damit sind die wichtigsten Versuchsparameter bekannt:

Anfangstemperatur aus Bild 2:

$$\text{Clophen A 60: } \vartheta_{\text{c}} = 20 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{Clophenharz W: } \vartheta_{\text{ch}} = 72,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kühlbadtemperatur aus Bild 6:

$$\text{Clophen A 60: } \vartheta_{\text{K}} = -14 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{Clophenharz W: } \vartheta_{\text{K}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kontaktzeiten aus Bild 7:

$$\text{Clophen A 60: } \tau' = 0 \text{ bis } 2,2 \text{ min},$$

$$\text{Clophenharz W: } \tau' = 0 \text{ bis } 1 \text{ min}.$$

Blasdruck aus Pe-Zahl:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Clophen A 60} \\ \text{Clophenharz W} \end{array} \right\} p_{\text{M}} = 0,15 \text{ atü}.$$

(52 353)

DK 666.1.031.5:666.112.7

Elektrisches Schmelzen der Borosilicatgläser

Von FRANTIŠEK KONÁREK, Prag (Tschechoslowakei)

(Vortrag auf der 44. Glastechnischen Tagung am 27. Mai 1970 in Lindau)

(Mitteilung aus dem Staatsforschungsinstitut für Glastechnik, Prag)

(Eingegangen am 27. Mai 1970)

Zunächst wird kurz die Problematik des elektrischen Schmelzens harter Borosilicatgläser im Hinblick auf ihre chemische Zusammensetzung und elektrischen Eigenschaften behandelt. Sodann werden einige Ergebnisse der Modell- und halbtechnischen Untersuchungen angeführt, die entscheidenden Einfluß auf die Konzeption neuer elektrischer Schmelzöfen ausübten, die insbesondere für die Handausarbeitung bestimmt sind. Aus der technischen Beschreibung und den grafischen Abbildungen ist die räumliche Anordnung der Heizsysteme in den einzelnen Ofenbereichen ersichtlich.

Ferner werden die Ergebnisse des Langzeitbetriebs angeführt, die insbesondere das Heizsystem, die Stabilisierung des technologischen Schmelzprozesses und die Vorstellungen über die Strömungen in der Glasschmelze betreffen. Große Aufmerksamkeit wurde im Verlauf der Untersuchungen dem feuerfesten Material gewidmet, vor allem im Schmelzteil des Ofens, wo sich am besten geschmolzener Quarz bewährt hat.

Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen der automatischen Regelung des Schmelzprozesses kurz besprochen und eine Betrachtung über die Effektivität des elektrischen Schmelzens von Borosilicatgläsern angestellt.

Die harten Borosilicatgläser sind durch ihren hohen Gehalt an SiO_2 und ihren niedrigen Gehalt an Alkali-oxiden gekennzeichnet. Es sind daher schwerschmelzbare Gläser, die wegen des charakteristischen Verlaufs des elektrischen Widerstandes für das elektrische Schmelzen äußerst ungünstig erscheinen, und die deshalb an die Konzeption eines elektrisch beheizten Schmelzofens äußerste Ansprüche stellen. Bei ungünstiger Anordnung der Elektroden im Schmelzteil des Ofens kommt es leicht zur Verschiebung des Bereichs der maximalen Temperatur, was eine erhebliche Instabilität der Wärmeverteilung und damit auch des technologischen Ablaufs der Schmelze zur Folge hat.

Der geringe Unterschied der Glasbadtemperaturen zwischen Schmelzteil und Arbeitsteil des Ofens, der bei diesen Gläsern nur etwa 100 bis 150 grad ausmacht, erschwert die Einhaltung des linearen Temperaturgradienten zwischen Schmelzteil und Arbeitsteil des Ofens. Ohne diesen ist es jedoch unmöglich, die Stabilität des technologischen Vorgangs und damit auch die verlangte Qualität des Glases zu sichern.

Eine weitere störende Folgeerscheinung beim Schmelzen dieser Glasarten ist die Verdampfung der

Borsäure (B_2O_3). Sie ist dafür verantwortlich, daß sowohl im Bereich der Schmelztechnologie als auch bei manueller Entnahme der Glasmasse ziemlich komplizierte Störungen auftreten können. Um ihnen entgegenzuwirken, müssen u. a. bereits beim Entwurf die Form und Abmessung des Arbeitsteils des Ofens festgelegt werden.

Bisher wurden die besten Ergebnisse beim Schmelzen dieser Glasarten in einem speziellen elektrischen Ofen erzielt, in dem die technologischen Vorgänge des Schmelzens, (der Läuterung und der Homogenisierung) in vertikaler Richtung abliefen. Dabei ist die Oberfläche der Glasmasse mit dem Gemenge vollkommen bedeckt. Der elektrische Strom wird in die Glasschmelze mittels Plattenelektroden eingeführt, die längs der Seitenwände im Schmelzteil des Ofens angeordnet sind. Das Konstruktionsprinzip dieser Ofenart ist allgemein bekannt. Es wäre nur zu erwähnen, daß die Anwendung von Plattenelektroden und der Einphasenschaltung in diesem Fall als unbedingte Notwendigkeit erscheinen. Einen beträchtlichen Nachteil dieses Heizsystems bilden jedoch die sehr komplizierte Handhabung der Plattenelektroden und die kostspielige Betriebseinrichtung, welche die Verwendung der Einphasenschaltung mit sich bringt.

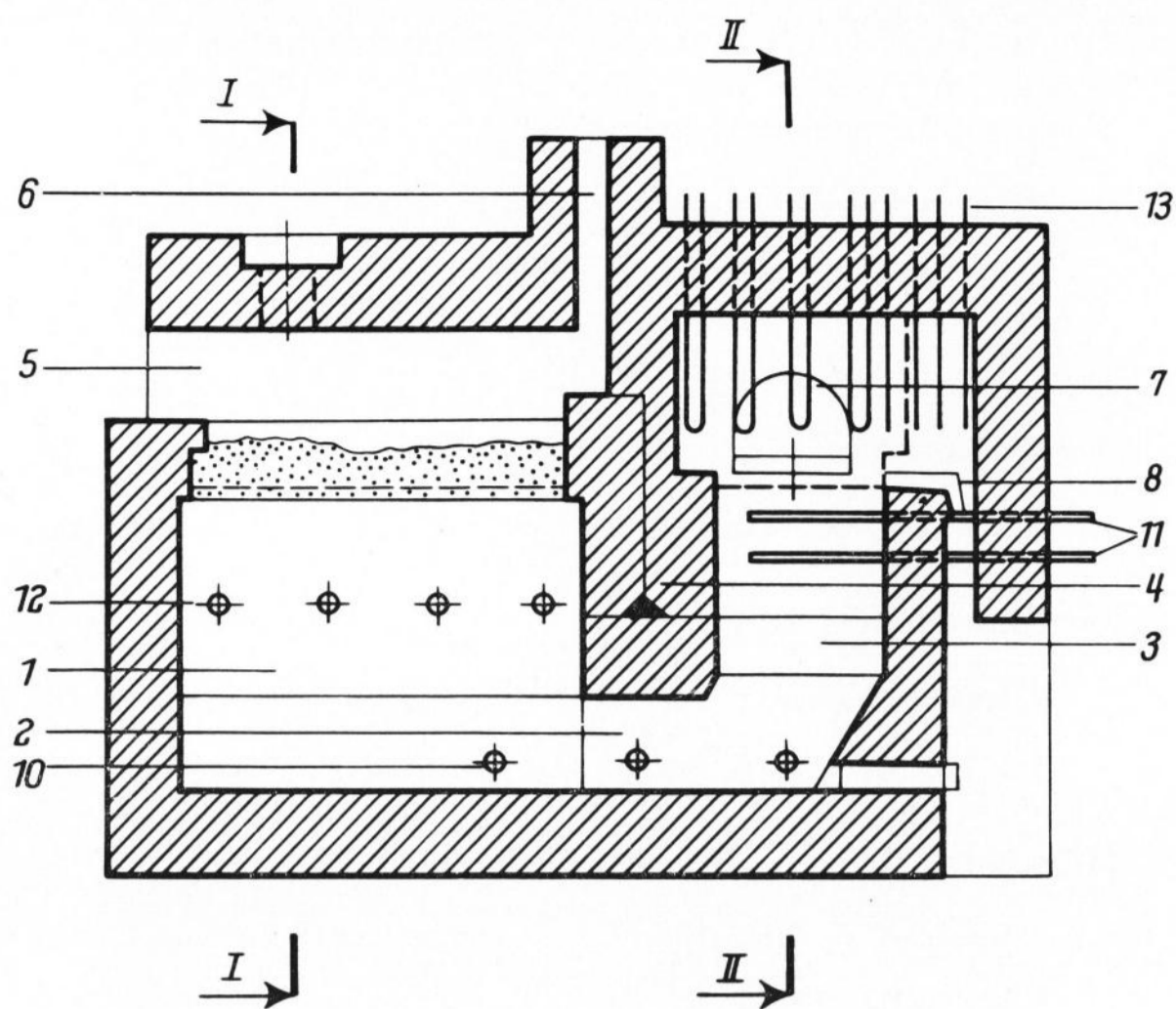


Bild 1. Schematische Darstellung des Versuchsofens.

- | | |
|---------------------|-------------------------------------------|
| 1 = Schmelzteil, | 7 = Arbeitsöffnung, |
| 2 = Durchlaß, | 8 = Ausflußrinne, |
| 3 = Arbeitsteil, | 10 = Zusatzheizelektroden am Boden, |
| 4 = Trennwand, | 11 = Zusatzheizelektroden im Arbeitsteil, |
| 5 = Einlegeöffnung, | 12 = Elektroden im Schmelzteil, |
| 6 = Abzugskanal, | 13 = Wendel aus Kanthal-Super. |

1. Kurze Übersicht über den Verlauf der Untersuchungen

Die Forschungsarbeiten über das elektrische Schmelzen von (harten) Borosilicatgläsern wurden (in unserem Institut) im Jahre 1962 begonnen. Ziel dieser Arbeiten war die Entwicklung einer neuen Konzeption für das kontinuierliche elektrische Schmelzen in Wannen für kleinere und mittlere Leistungen. Daneben sollte auch eine neue Konzeption für den elektrisch beheizten Arbeitsteil bei Handausarbeitung aus zwei oder mehreren Arbeitsöffnungen entwickelt werden.

Im Verlauf der Arbeiten wurde neben Modellmessungen auch eine Reihe verschiedener Typen von elektrischen Versuchsschmelzaggregate im halbertechnischen Maßstab geprüft, insbesondere im Hinblick auf die räumliche Zuordnung von Schmelz- und Arbeitsteil, die Anordnung elektrischer Heizsysteme in den einzelnen Ofenteilen, die Verwendung billigerer Molybdän-Stabelektroden und der elektrischen Dreiphasenschaltung, die Verwendung des am besten geeigneten hochfeuerfesten Materials, insbesondere für den Schmelzteil des Ofens, und eine verlässliche Regelung des Wärmeangebots im Betrieb.

Die einzelnen elektrischen Versuchsschmelzöfen unterschieden sich untereinander insbesondere durch die geometrische Gestaltung des Schmelz- und Arbeitsteils, durch die Anordnung der Elektroden, durch die Art des feuerfesten Materials vor allem im Schmelzraum, durch die Art der Isolierung und durch die Beheizung des Arbeitsteils.

Befriedigende Ergebnisse wurden erst in der letzten Etappe der halbertechnischen Versuche erzielt, wobei nicht nur eine Stabilisierung des technologischen Schmelzverfahrens sondern auch eine gute Qualität des Glases erhalten wurde. Auch die Korrosion des feuer-

festen Materials entsprach den Vorstellungen über die Länge der Betriebsperiode.

Bei Ausarbeitung der neuen Konzeption wurden die Ergebnisse der vorher durchgeführten halbertechnischen und Modellmessungen ausgewertet. Die neue Auffassung unterscheidet sich von der vorangehenden grundsätzlich in folgendem: in der räumlichen Gestaltung des Schmelz- und des Arbeitsteils; es ging dabei um die Gestaltung eines zweiräumigen elektrischen Ofens, in der Anordnung der Heizsysteme im Schmelzteil, im Durchfluß und im Arbeitsteil, wo überall Molybdän-Stabelektroden eingesetzt wurden, die waagrecht eingeführt sind, im verwendeten hochfeuerfesten Material der Ausmauerung und in der Art und Weise der Isolierung, wo an Stelle des Corhart-Materials im Bassin des Schmelzteils und der Trennwand das Quarzmaterial Fondal verwendet wurde, in der Beheizungsart des Arbeitsteils, wo statt der Heizelemente aus Crusilit Heizelemente aus Kanthal-Super verwendet wurden.

Durch die Modellmessungen sollten insbesondere der elektrische Widerstand für die Elektroden in der gegebenen Anordnung, der Einfluß der Geometrie des Schmelzteils auf die Energieübertragung in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe der Elektroden, die Bemessung der spezifischen Belastung längs der Elektroden bei unterschiedlicher Eintauchtiefe und die Strömungen in den einzelnen Ofenteilen festgelegt werden. In allen Fällen wurde eine Modellflüssigkeit verwendet, die aus Glycerin, Zitronensäure und einer kleinen Menge Zucker zum Ausgleich der Viskositätskurve bei höheren Temperaturen zusammengesetzt war. Der Verlauf der kinematischen Viskosität der Modellflüssigkeit und der elektrischen Leitung in Abhängigkeit von der Temperatur, insbesondere im Bereich zwischen 1400 und 1650 °C, stimmte sehr gut mit der theoretischen Kurve der gegebenen Glasmasse überein.

Durch die Modellmessungen wurde eine Reihe von Erkenntnissen gewonnen im Zusammenhang mit verschiedenen Anordnungen der Elektroden; besonderer Wert wurde auf die Ermittlung der Glasströmungen in den einzelnen Ofenteilen gelegt.

Für die letzte Ausbildung des Versuchsofens wurde die Anordnung der Molybdänlektroden so gewählt, wie sie sich beim Vergleich mit den Modellmessungen als beste gezeigt und sich auch im Betrieb voll bewährt hatte. Die Elektroden liegen dabei in den gegenüberliegenden Seitenwänden des Schmelzteils nebeneinander. Der Vorteil dieser Anordnung besteht in der Möglichkeit einer stufenlosen Änderung des Widerstandes in Abhängigkeit von der Auslegung der Elektroden, wobei die Energie auf der gesamten Oberfläche der Elektroden gleichmäßig verteilt ist. Es wurde u. a. nachgewiesen, daß die Auslegung der Elektroden einen bedeutsamen Einfluß auf die Widerstandsänderung ausübt. Ferner gewährt diese Anordnung die Möglichkeit, die günstigsten Widerstandswerte zwischen den Elektroden auch mit üblichen Umformern zu erreichen, wobei die Widerstandsverluste im ganzen Bereich der Auslegung bei einer bestimmten Breite des Wannenbassins keine großen Unterschiede aufweisen.

Als Ergebnis dieser Modell- und Versuchsforschung entstand ein neuer Typ des elektrischen Schmelzofens (Bild 1), der für das kontinuierliche Schmelzen von

Borosilicatglas (z. B. Pyrex) bei Handausarbeitung aus zwei Arbeitsöffnungen bestimmt ist.

2. Beschreibung des elektrischen Ofens

Der abgebildete elektrische Ofen (Bild 1) besteht aus dem Schmelzteil, dem Durchflußkanal und dem Arbeitsteil. Der Schmelzteil ist vom Arbeitsteil durch eine einfache Trennwand abgeteilt, unterhalb der sich der Durchflußkanal befindet. Der rechteckige Schmelzteil ist in der Höhe des Glasspiegels mit einem sogenannten Deflektor ausgestattet. Der Glasspiegel bzw. die Grenze Glasgemenge/Glasschmelze liegt ungefähr in Höhe der unteren Kante des Deflektors. Darüber befindet sich die Gemengesicht mit einem beträchtlichen Wärmegradienten. Die Größe und Form des Arbeitsteils wurden mit Rücksicht auf die Anordnung zweier Arbeitsöffnungen und der Überflußrinne so gewählt. Die Arbeitsöffnungen können entweder gegenüberliegend in den Seitenwänden oder schräg in der Stirnwand angeordnet werden. Der Schmelzteil ist mit einem Gewölbe versehen, in das die Brenner für das Antempfern des Ofens und für das anfängliche Schmelzen eingelassen sind. Oberhalb der Trennwand, die den Schmelzteil vom Arbeitsteil trennt, befindet sich ein Abzugskanal, der sowohl zum Abführen der Abgase beim Antempfern als auch der flüchtigen Bestandteile des Glasgemenges beim eigentlichen Schmelzen dient. Das Einlegen des Gemenges besorgt ein spezieller Einleger in der ganzen Breite der Stirnwand des Ofens.

Die Beheizung des Schmelzteils des Ofens erfolgt mit einem Satz von vier Molybdänelektroden, die waagrecht nebeneinander in der oberen Hälfte des Bassins des Schmelzteils angeordnet sind, wie Bild 2 zeigt.

Das Heizsystem des Durchflußkanals besteht aus drei Molybdänelektroden, die ebenfalls horizontal angeordnet sind, so daß das elektrische Feld über den Durchflußkanal bis in den Arbeitsteil hineinreicht.

Die Zusatzbeheizung der Glasschmelze im Arbeitsteil wird durch ein Paar Elektroden bewirkt, das nebeneinander unterhalb der Glasschmelzoberfläche waagrecht angeordnet ist. Oberhalb der Heizelektroden, in der Nähe des Glasspiegels, befindet sich ein Paar Erdungselektroden, das als Sicherung bei der Entnahme der Glasschmelze von Hand dient. Die Beheizung des Arbeitsteils oberhalb der Glasmasse erfolgt durch Widerstandsheizkörper aus Kanthal-Super, die senkrecht über dem Glasspiegel in der Nähe der Seitenwände des Arbeitsteils angeordnet sind. Die in der Achse des Arbeitsteils angeordneten Heizelemente oberhalb des Spiegels dienen gleichzeitig als Luftzugblende zwischen zwei gegenüberliegenden Arbeitsöffnungen.

Alle beschriebenen Heizsysteme, d. h. das des Schmelzteils, des Durchflußkanals und des Arbeitsteils, sind voneinander vollkommen unabhängig und getrennt regelbar mittels Dreiphasen-Induktivumformern, wodurch die Einführung beliebiger elektrischer Leistung in die einzelnen Ofenteile möglich ist. Auf diese Weise kann eine stabile und ausgeprägte Lage der maximalen Temperaturen in der oberen Hälfte des Schmelzteils gehalten und die Wärmeverteilung im ganzen Ofen stabilisiert werden.

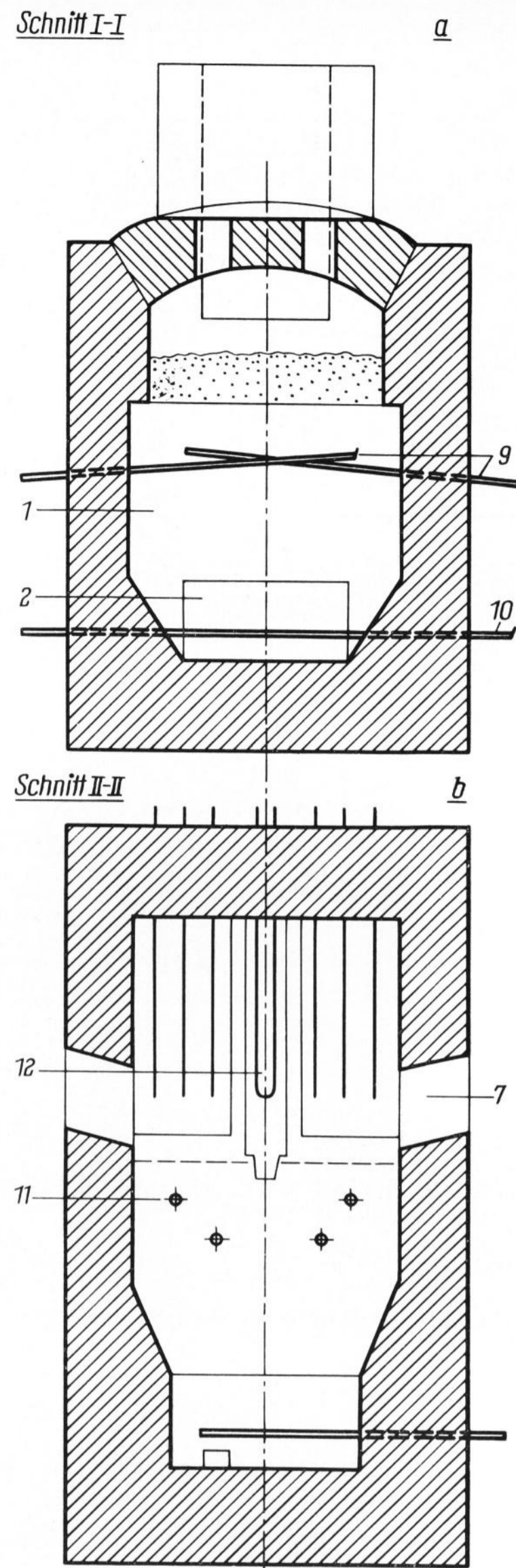


Bild 2. Anordnung der Elektroden im Schmelzteil des Ofens.

a) Schnitt I-I, b) Schnitt II-II.

- | | |
|---------------------|-------------------------------------|
| 1 = Schmelzteil, | 9 = Elektroden im Schmelzteil, |
| 2 = Durchlaß, | 10 = Zusatzheizelektroden am Boden, |
| 7 = Arbeitsöffnung, | 11 = Elektroden im Arbeitsteil, |
| | 12 = Wendel aus Kanthal-Super. |

Dieser elektrische Ofen arbeitet mit einer spezifischen Belastung der aktiven Schmelzfläche von 2 t/m² 24 h bei einem spezifischen Gesamtverbrauch an Wärme von 2,60 kWh/kg Schmelze. Die auf eine Volumeneinheit des Schmelzteils umgerechnete spezifische Schmelzleistung beträgt ungefähr 1,600 t/m² 24 h.

Auf Grund der Ergebnisse aus dem Betrieb kann festgestellt werden, daß der beschriebene elektrische Ofen den technologischen Anforderungen des elektrischen Schmelzens von harten Borosilicatgläsern entspricht und auch zum Schmelzen von speziellen Glasarten, wie z. B. Einschmelzgläsern, evtl. auch alkali-freien Gläsern, geeignet ist. Unter normalen Betriebsbedingungen ist der technologische Prozeß des Schmelzens vollkommen stabil, und die Qualität des Glases

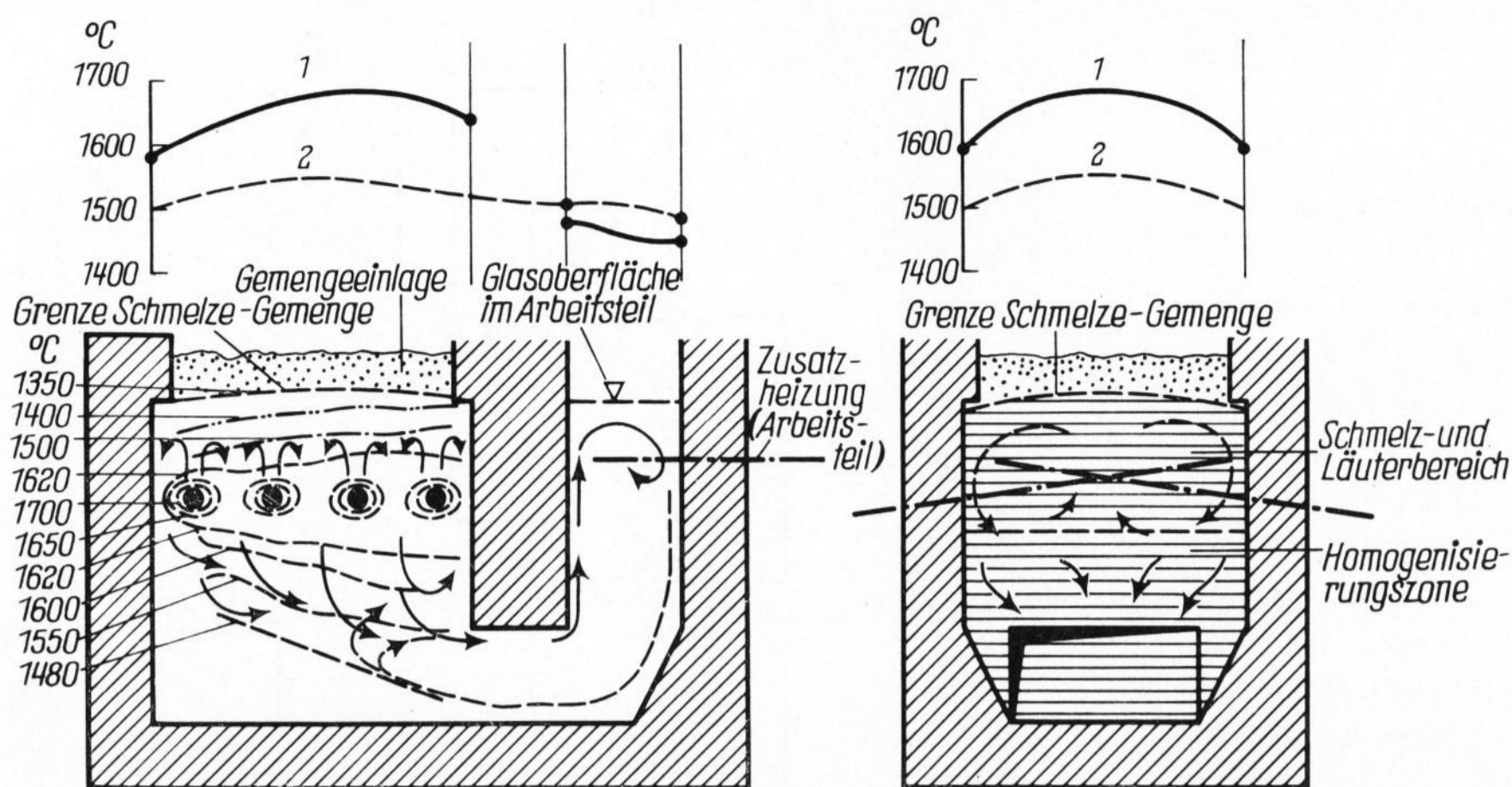


Bild 3. Temperaturverlauf in der Längs- und Querachse des Versuchsofens.

1 = Temperaturverlauf in Höhe der Elektroden,
2 = Temperaturverlauf in Höhe der oberen Grenze des Durchlasses.

erlaubt es, hohe Ausbeuten bis über 90% zu erreichen. Obwohl es sich um einen kleinen Schmelzofen für die Ausarbeitung des Glases von Hand handelt, beträgt der spezifische Gesamtwärmeverbrauch nur ungefähr $\frac{1}{4}$ des üblichen Verbrauchs von größeren mit Generatorgas beheizten Schmelzöfen. Dieselbe Ausführung wurde deshalb bei der Konstruktion größerer und leistungsfähigerer elektrischer Schmelzöfen verwendet, bei denen gleichzeitig eine rationelle Anordnung mehrerer Arbeitsöffnungen vorgesehen wurde. Außerdem wird auch die Bildung der Entglasungsschicht auf der Oberfläche im Arbeitsteil unterdrückt, was bei Ausarbeitung des Glases von Hand bis heute ein dauerndes Problem darstellt.

3. Technologie des Schmelzens

Der technologische Schmelzvorgang, d. h. das Vorwärmen des Gemenges, das Schmelzen, die Läuterung und die Homogenisierung der Glasmasse, verläuft in diesem Ofen ähnlich wie bei allen elektrischen Schmelzöfen mit bedeckter Schmelzoberfläche, d. h. vertikal in Richtung zum Boden des Ofens.

Der Hauptteil der Reaktionen verläuft in der unteren Schicht des Gemenges, namentlich in der Grenze Gemenge/Schmelze. In der Zone oberhalb der Elektroden im Schmelzteil des Ofens ist das Glas praktisch bereits geschmolzen, jedoch noch nicht vollkommen geläutert. Die Schmelzzone und die Läuterzone kann man nicht eindeutig begrenzen, jedoch kann nach den Ergebnissen des Modellverfahrens und der Messungen an Versuchsofen angenommen werden, daß die Endläuterung der Glasmasse im Bereich der maximalen Temperaturen verläuft, der knapp unterhalb der Elektroden im Schmelzteil festgestellt wurde.

Die größte Temperaturschwankung wurde in Nähe der Grenze zwischen Gemenge und Schmelze festgestellt. Die thermische Inhomogenität der Glasmasse macht diese Zone instabil und beeinflußt in bestimmtem Maße auch den Bereich in Höhe der Elektroden. Die Schwankung der elektrischen Leitfähigkeit in diesem Bereich kann bei einer ungeeigneten Regelung der Stromzufuhr zu bedeutenden Betriebsstörungen führen.

Vor dem Durchfluß ist die Glasmasse thermisch bereits fast homogen, und auf ihrem ganzen weiteren

Weg bis zur Oberfläche im Arbeitsteil ist es notwendig, nur die lineare Senkung des Wärmeinhalts zu sichern, damit die verlangte Ausarbeitungstemperatur erreicht wird.

Zur Stabilisierung des technologischen Schmelzprozesses ist es nach den bisherigen Erfahrungen wichtig, die richtige Entfernung der Elektroden unterhalb der Schmelzoberfläche im Schmelzteil zu bestimmen. Die bei den Versuchen gewählte Entfernung kann mit Rücksicht auf die erreichten Ergebnisse als optimal betrachtet werden. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß diese Entfernung von der Gesamttiefe der Glasschmelze im Ofen abhängt, und daß diese also nur für die gegebene Ofenkonzeption und zum Schmelzen von Gläsern ähnlicher Zusammensetzung zutreffend ist.

Das Temperaturverhalten des Ofens wurde auf Grund der Forschungsergebnisse und langfristiger Betriebserfahrung ermittelt. Der Verlauf der Temperaturen in der Längs- und Querachse des Ofens ist in Bild 3 grafisch dargestellt. Gleichzeitig werden die Strömungen der Glasmasse angegeben, die dem Temperaturverhalten des Ofens entsprechen.

Die niedrigsten Temperaturen herrschen an der Oberfläche des Gemenges im Schmelzteil des Ofens, sie bewegen sich zwischen 300 und 500 °C während der Zeitspanne des Einlegens. In der Grenze zwischen Gemenge und Schmelze schwankt die Temperatur zwischen 1230 und 1380 °C. Die höchsten Temperaturen herrschen in der Nähe der Elektroden in der Längsachse des Schmelzteils, wo bei wiederholten Messungen eine Temperatur von rund 1700 °C festgestellt wurde.

Infolge der gegebenen Anordnung der Elektroden im Schmelzteil des Ofens entsteht der Bereich der maximalen Temperatur in der Längsachse, der das Entstehen zweier Konvektionsströme hervorruft, die zu den Seitenwänden hinzielen, wo die Temperatur um mindestens 100 grd niedriger ist. Unterhalb des Niveaus der Elektroden im Schmelzteil sind die Temperaturunterschiede in den waagerechten Ebenen bereits bedeutend niedriger und damit auch die lokale Bewegung der Glasmasse langsamer. Diese Vorstellung über die Strömung der Glasmasse entspricht den Erkenntnissen, die bei den Modellmessungen und bei Beurteilung der Korrosion der Ofenausmauerung nach dem Löschen des Ofens gemacht wurden.

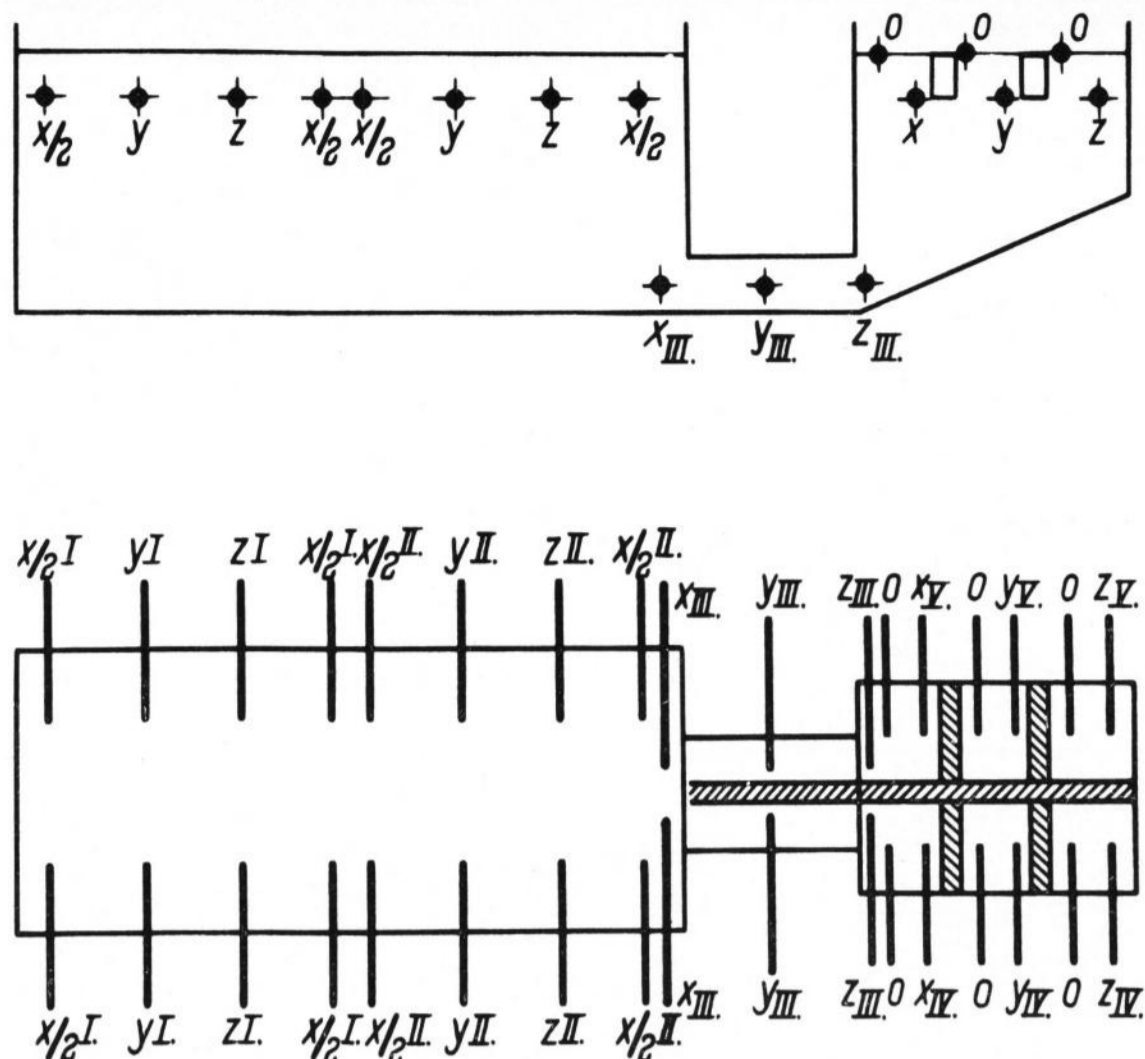


Bild 4. Schema der Anordnung der Heizsysteme.

4. Elektrische Schmelzöfen größerer Leistung

Die größeren Typen der elektrischen Schmelzöfen zum Schmelzen von Borosilicatgläsern sind in der Konzeption im Grunde identisch mit der bereits beschriebenen Art und unterscheiden sich nur durch die Größe des Schmelzteils und durch eine abweichende räumliche Anordnung des Arbeitsteils infolge einer höheren Zahl von Arbeitsöffnungen. Ein Beispiel ist schematisch in Bild 4 dargestellt. Der Arbeitsteil wurde in diesem Falle der Länge nach in der Mitte durch eine Trennwand in zwei selbständige Kanäle geteilt, in welchen die Arbeitszellen angeordnet sind. Die einzelnen Arbeitszellen sind funktionsmäßig und auch wärmemäßig voneinander oberhalb des Spiegels getrennt, wobei die Trennwand teilweise auch unter den Schmelzespiegel hinabreicht.

Die Beheizung des Arbeitsteils oberhalb des Glasschmelzespiegels erfolgt für jede Arbeitszelle selbständig durch Widerstandsheizelemente aus Kanthal-Super, die in jeder Arbeitszelle senkrecht in Nähe der Seitenwände angeordnet sind.

Die Modellmessungen wurden alternativ für sechs und acht Zellen durchgeführt, wobei dieselbe Meßtechnik angewandt wurde wie früher angeführt. Das Einlegen des Gemenges wurde über der ganzen Oberfläche im Schmelzraum simuliert. Die konstante Höhe des Glasspiegels wurde mit einem elektrischen Glasstandregler kontrolliert. Die Arbeit der Glasmacher wurde durch Entnahme in geeigneten Zeitintervallen simuliert, die dem Sortiment der Erzeugnisse entsprach. Ferner wurde der Einfluß des Ausschaltens einzelner Arbeitszellen auf das Strömen der Flüssigkeit verfolgt. Die Temperaturen am Modell wurden mit Hilfe von Thermistoren und speziellen Stangenthermometern gemessen.

Die Gesamtanordnung des Modells und dessen Zubehör ist aus Bild 5 ersichtlich. Im unteren Teil des Bildes sind ein Satz von Meßgeräten, die das gleichzeitige Vermessen einzelner Systeme für Spannung und Strom ermöglichen und der Satz der Meßgeräte zur Messung der Temperaturen mittels Thermistoren zu erkennen.

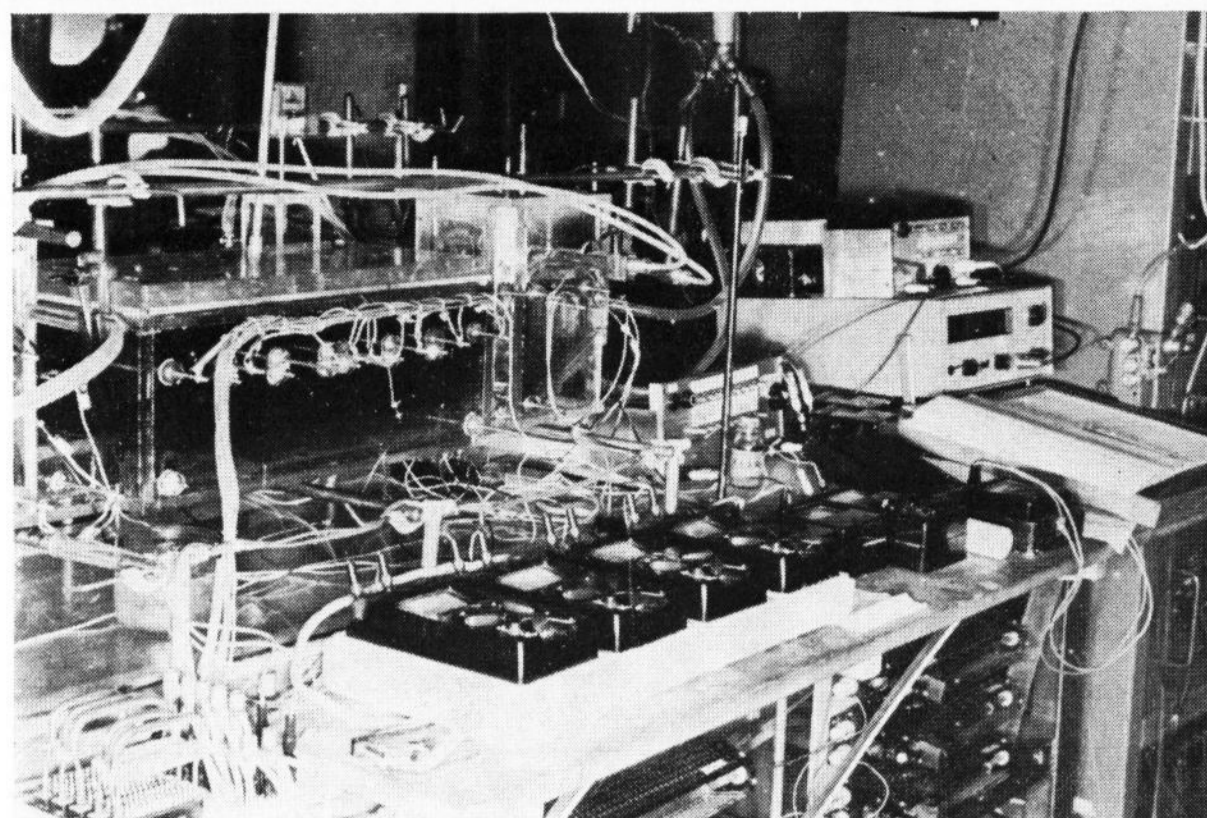


Bild 5. Gesamtanordnung des Modells und des Zubehörs.

Zur Beobachtung der Strömungsgeschwindigkeit am Modell wurden Färbungsmittel, zubereitet aus einer Alkohollösung mit Methylenblau und Modell-Flüssigkeit verwendet. Das Dosieren des Färbungsmittels wurde durch Zugabe mit Injektionsspritzen auf die Oberfläche des Schmelzteils durchgeführt. Die Farbspuren wurden mit Filmaufnahmen verfolgt.

Der Charakter der Strömung im Schmelzteil hat zwei ausgeprägte Zonen, deren Trennungsebene im Bereich der Elektroden liegt. Die Zone oberhalb der Ebene der Elektroden ist durch intensive Strömung in Form von rotierenden Zylindern gekennzeichnet, die quer im Schmelzteil orientiert sind, wie Bild 6 zeigt. Die Zone unterhalb der Elektroden hat dagegen eine sehr langsame Strömung in beiden Richtungen vertikal und horizontal, die in der Zone vor dem Durchflußkanal in eine waagerechte Strömung übergeht.

Zu besserer Vorstellung und zwecks Vergleichs der Geschwindigkeit der Strömung in den einzelnen Teilen des Schmelzraums wird die Geschwindigkeit in Nähe der Seitenwände des Schmelzteils mit 100% angesetzt. Bezugnehmend auf diesen Wert steigt die Geschwindigkeit in Richtung von der Seitenwand zur Längsachse des Schmelzteils allmählich bis auf 170%. Unterhalb der Ebene der Elektroden kommt es plötzlich zu einer Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit bis ungefähr auf 30 bis 45%. Am Ofenboden sinkt die Geschwindigkeit bis auf nur 5%, im Bereich des Durchflusses macht sie rund 10% aus, und beim Eintritt in den Durchfluß steigt die Geschwindigkeit wiederum bis auf rund 30%.

Nach dem Austritt des Hauptstroms aus dem Durchfluß in den Kanal im Arbeitsraum setzen die Stromlinien in der Nähe der Trennwand ihren Weg in Richtung zur Oberfläche ungefähr mit derselben Geschwindigkeit fort, die sie beim Verlassen des Durchflußkanals hatten. Die Strömungen im Kanal im Arbeitsteil ergeben



Bild 6. Strömungen im Schmelzteil des Ofens.

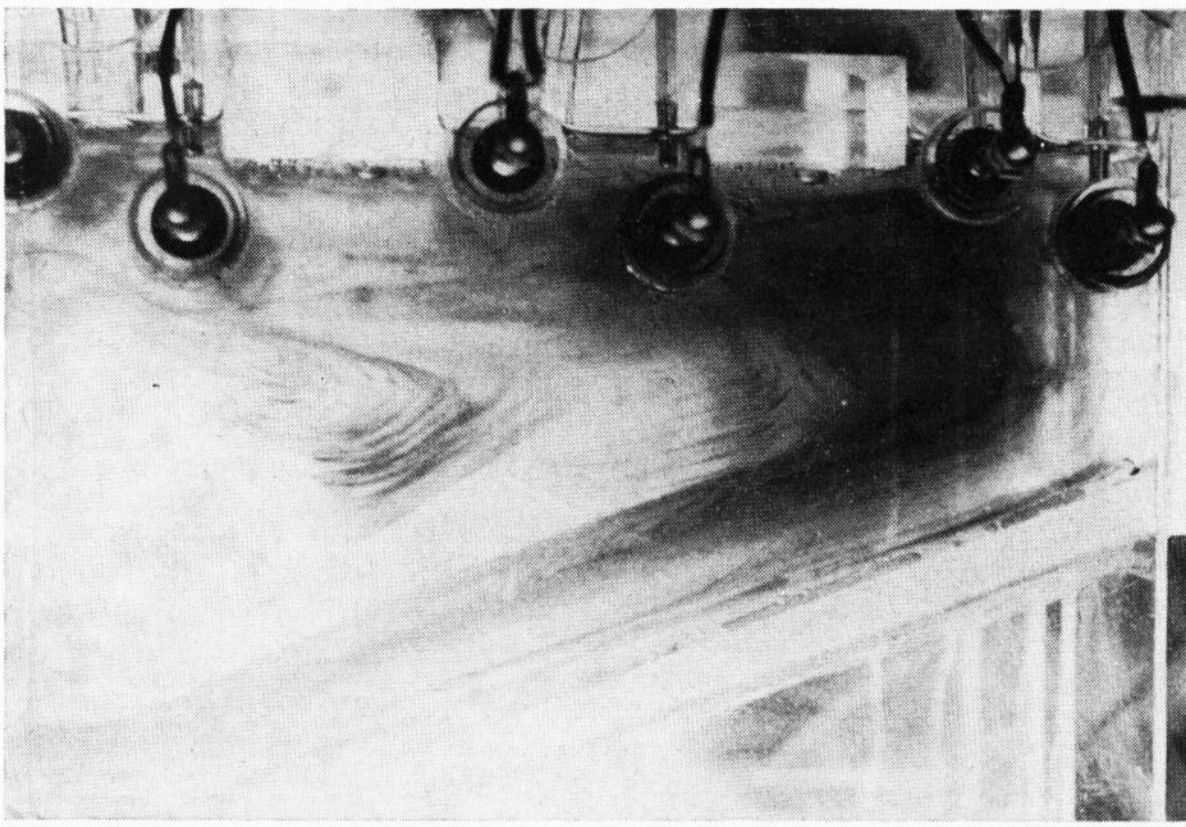


Bild 7. Detailansicht des Strömungsverlaufs im Arbeitsteil bei vorgegebener Elektrodenanordnung und nominaler Glasentnahme.

sich aus Bild 7. Ein Teil des Hauptstroms fließt dann in Nähe des Glasspiegels zu den Entnahmestellen, wo er sich erneut verteilt; der Rest kehrt zum Durchflußkanal zurück. Auf diese Weise bildet sich ein rotierendes Feld mit einem verhältnismäßig großen Zentralraum aus, in dem bedeutend niedrigere Geschwindigkeiten herrschen (Bild 8). Die Geschwindigkeiten der Ströme unterhalb der Oberfläche in diesem Teil erreichen ungefähr 30 bis 50% der Werte aus dem Bereich der Elektroden im Schmelzteil.

5. Feuerfestes Material

Im Verlauf der Untersuchungen wurde dem feuerfesten Material besondere Aufmerksamkeit gewidmet, insbesondere im Schmelzteil des Ofens. Eine gründliche Auswertung der Ergebnisse zeigte, daß sich für das elektrische Schmelzen harter Borosilicatgläser am besten geschmolzener Quarz eignet, namentlich Fondal. Bedeutend weniger günstige Ergebnisse brachten die Materialien des Corhart-Typs. Eine wichtige Rolle bei der Korrosion dieses Materials bei elektrischem Schmelzen von harten Borosilicatgläsern ist der Erscheinung zuzuschreiben, daß die erweichten Schichten des feuerfesten Materials bei höheren Temperaturen über 1600 °C in Anwesenheit der Glasphase elektrisch leitend werden, so daß sich die Charakteristiken des elektrischen Widerstandes der Corhart-Auskleidung und der Glasschmelze sehr annähern. Die Folgeerscheinung ist dann, daß es mit dem Schmelzen des Glases gleichzeitig zum Abschmelzen der oberen Schichten der Auskleidung kommt. Diese Annahme wurde auch durch Betriebserfahrungen bestätigt. Durch das Austreiben der Schmelzphase aus dem Zac-Material sammelt sich am Boden der Wanne eine spezifisch schwerere Glasmasse, die von Zeit zu Zeit beseitigt werden muß, wenn nicht ungünstige Einflüsse auf die Qualität des erschmolzenen Glases auftreten sollen.

Die Benutzung von geschmolzenem Quarz zur Ausmauerung der Wanne erfordert richtiges Antempfen, damit sich die innere Oberfläche der Ausmauerung in Cristobalit umwandelt. Diese Reaktion verläuft bei einer Temperatur von 1550 bis 1600 °C bei guter äußerer Isolierung. Nach den Empfehlungen des Herstellers von Fondal ist es notwendig, diese Temperatur über 250 bis 300 h einzuhalten, damit die Rekrystallisation bis in die

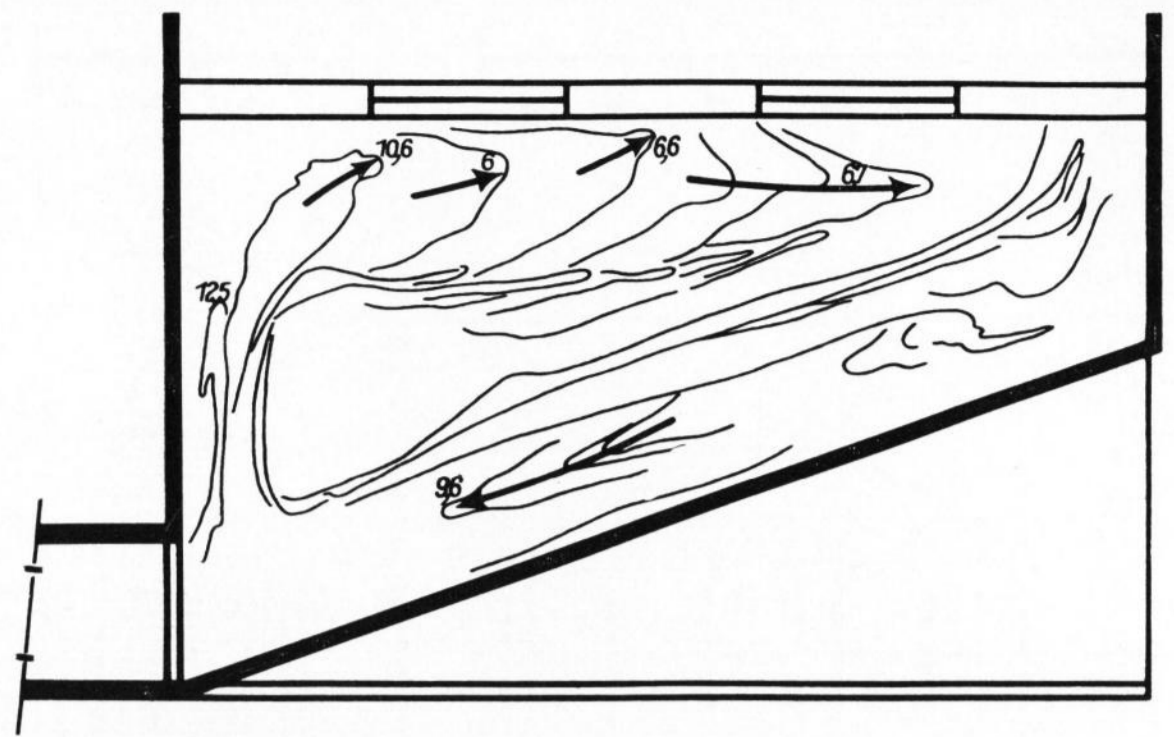


Bild 8. Kennzeichnung der Hauptströmungsrichtungen und der Strömungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Bereichen des Arbeitsteils.

Tiefe hinein zustandekommt. Falls erhöhte Anforderungen an die Qualität des Glases gestellt werden, empfiehlt es sich, geschmolzenen Quarz auch im Arbeitsteil des Ofens einzubauen, was die Bildung von Schlieren, Steinen und auch Blasen praktisch verhindert.

6. Regelung des Schmelzprozesses

Um eine stabile Regelung des Schmelzprozesses zu erreichen, ist die Wahl der einflußnehmenden Größe von wesentlicher Bedeutung. Im vorliegenden Fall wurden bei der Regelung des Schmelzverfahrens drei Größen verfolgt: Temperatur, Strom und elektrische Leistung. Auf Grund der Auswertung der Betriebsergebnisse kann festgestellt werden, daß die Regelung des technologischen Schmelzprozesses über die Temperaturmessung mit Thermoelementen für die Betriebsführung sehr schwierig und für die Regelung ungeeignet ist. Der Hauptgrund dafür ist, daß bei der Verwendung von Thermoelementen z. T. Fehler in den Regelvorgang hineingetragen werden, die durch Änderung der thermoelektrischen Eigenschaften der Thermoelemente mit der Zeit hervorgerufen werden. Im Fall des elektrischen Schmelzens sind die Messungen noch darüber hinaus durch das starke elektrische Feld im Bereich der Schmelze beeinflusst. Ein weiterer Grund ist, daß die Ansprechempfindlichkeit der Thermoelemente auf Belastungsänderungen im Elektroden-Heizsystem zu gering ist.

Bei den beiden anderen Stellgrößen, der Stromstärke und der elektrischen Leistung, hat das System ein stabiles Regelverhalten. Für beide Fälle wurden sehr gute Ergebnisse gewonnen, die Regelung hat den Betriebserfordernissen entsprochen. Die Regelung, bei der als Stellgröße die Stromstärke verwendet wird, scheint für den Schmelzteil vorteilhafter zu sein wegen des Selbstregelungseffektes der Schmelze. Dasselbe gilt für die Fälle, bei denen die Änderung des Widerstandes auch durch eine Verformung der Elektroden verursacht werden kann. Im Gegensatz dazu wird für die Regelung des Arbeitsteils, bei dem die Änderung des Wärmeaushalts überwiegend durch äußere Einflüsse verursacht wird (z. B. durch Öffnen der Arbeitsöffnung), der elektrische Strom nicht als Stellgröße verwendet.

7. Zusammenfassung

Die Vorteile des elektrischen Schmelzens des Glases sind bereits allgemein bekannt, und es erscheint nicht notwendig, sie zu wiederholen. Neben den vielen Ge-

sichtspunkten, die bei der Bewertung dieser Technologie entscheidend sind, sind vor allem die energetischen Bedingungen und der Preis der elektrischen Energie zu erwähnen.

Falls diese Gesichtspunkte bisher noch Gegenstand von Diskussionen bilden, insbesondere aus ökonomischen Gründen und im Zusammenhang mit der Energieversorgung und dem Preis der elektrischen Energie, so muß ihre Anwendung für den Fall des Schmelzens von Borosilicatgläsern bejaht werden. Hier ist das elek-

trische Schmelzen sowohl aus technologischen als aus ökonomischen Gründen nachweisbar vorteilhaft.

Es ist begreiflich, daß die elektrischen Schmelzöfen für die maschinelle Glasverarbeitung noch ausgeprägtere Vorteile mit sich bringen als die Öfen für Ausarbeitung von Hand, in denen ein großer Teil der Energie zur Beheizung des Arbeitsteils verbraucht werden muß. Aber auch in diesen Fällen sind die Ersparnisse an Energie im Vergleich zu den klassischen gasbeheizten oder ölbeheizten Öfen gut nachweisbar. (52235)

DK 662.612.54:536.46:536.33:535.231

Untersuchungen zum Strahlungsverhalten von Heizöl- und Gasflammen mit verschiedenen Brennersystemen

Von KLAUS HEIN, Ijmuiden (Niederlande)

(Vortrag vor dem Fachausschuß II der DGG am 6. Mai 1970 in Ijmuiden (Niederlande))

(Mitteilung aus der Versuchsanstalt Ijmuiden der Internationalen Flammenforschungsgemeinschaft, Ijmuiden (Niederlande))

(Eingegangen am 18. Juni 1970)

Von der Internationalen Flammenforschungsgemeinschaft sind Untersuchungen an leuchtenden, turbulenten Heizöl- und Gasdiffusionsflammen mit dem Ziel durchgeführt worden, die Zusammenhänge zwischen den Vorgängen der Rußbildung und des Rußabbrandes einerseits und den Mischungs- und Temperaturverteilungen, die sich bei der Verwendung verschiedener Brennertypen und Eingabebedingungen einstellen, andererseits zu untersuchen. Die Flammen wurden grundsätzlich mit drei verschiedenen Brennertypen rotationssymmetrischer Bauart mit jeweils einem oder mehreren Eingangsparametern erzeugt.

Nach Beschreibung der Brenner sowie der zur Messung der örtlichen Flammeneigenschaften benötigten Geräte werden Ergebnisse bezüglich des Temperatur- und Strahlungsverlaufs über die Flammenlänge mitgeteilt und die Beeinflussungsmöglichkeiten des Strahlungswärmeübergangs durch brennerseitige Eingangsparameter aufgezeigt.

In flammenbeheizten, industriellen Brennkammern nimmt der Wärmeübergang durch Strahlung einen wichtigen Platz im Gesamtprozeß ein. Der Strahlungswärmeübergang ergibt sich als Überlagerung der Selektivstrahlung der Gase, im wesentlichen des Wasserdampfes und des Kohlendioxids, und der Kontinuumstrahlung (Graustrahlung) des Feststoffs.

Bei Ölflammen stellt sich der Feststoff als durch die thermische Zerlegung des Brennstoffs entstandener Ruß mit einer Teilchengröße von 0,02 bis 0,08 μm dar. Nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann nimmt die Intensität der Rußstrahlung mit etwa der vierten Potenz der absoluten Temperatur zu. Die spezifische Emission hängt dabei von der örtlichen Rußkonzentration in der Flamme sowie vom Aufbau der Rußpartikel ab.

Die Vorgänge der Rußbildung und des Rußabbrandes sind somit für die Strahlungswärmeübertragung sowie das Ausbrandverhalten industrieller Flammen von großem Interesse.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, daß Rußbildung und Leuchtverhalten turbulenter Diffusionsflammen von einer ganzen Reihe von „technischen“ Einflußgrößen abhängen: der Brennstoffart, den durch Brennerkonstruktion und Betrieb bestimmten aerodynamischen und thermischen Eingabebedingungen von Brennstoff und Luft, der Luftzahl, der Art und Güte der Zerstäubung, der die Flammenströmung beeinflussenden Brennraumgeometrie und dem Temperaturniveau der Brennkammerwände.

In letzter Zeit sind von der Internationalen Flammenforschungsgemeinschaft zwei Versuchsreihen [1, 2] durchgeführt worden, deren Zielsetzung u. a. darin bestand, in Ölflammen von verschiedenen, an industrielle Bedürfnisse angepaßten Brennersystemen hohe Rußkonzentrationen zu erreichen und die Abhängigkeit der

Rußbildung und des Rußabbrandes von Eingangsparametern sowie vom Strömungs- und Mischungsfeld zu erfassen. Mit der gleichen Zielsetzung wurden weitere Untersuchungen an Erdgas- und Propanflammen durchgeführt. Da es sich bei Gasflammen um Einphasensysteme handelt, können sie im Hinblick auf den Strömungs- und Mischungsverlauf als heiße Modelle für Ölflammen gleicher aerodynamischer Konzeption angesehen werden.

1. Meßinstrumente

Da Versuche dieser Art zuvor in Ijmuiden noch nicht durchgeführt worden waren, stellte sich zunächst die Aufgabe, geeignete Meßmethoden und -instrumente zu entwickeln.

Abgesehen von der mit Absaugthermoelementen ermittelten örtlichen Flammengastemperatur sowie der aus Prandtlrohrmessungen bestimmten örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten war es notwendig, die Konzentrationen der festen, flüssigen und gasförmigen Komponenten und die Strahlungsintensitäten in jedem Flammenpunkt zu messen. In Bild 1 ist eine Sonde zur Probenahme in Gasflammen und im trockenen, d. h. ölfreien Teil von Heizölflammen dargestellt, die eine Trennung der festen Phase, also des Rußes, von der Gasphase zuläßt.

Durch die Absaugdüse gelangt das Feststoff-Gasgemisch in den Sinterbronze-Filter (Ausgangsporengröße 5 bis 7 μm), in dem der Ruß abgeschieden wird. Der gesamte Sondenkopf, insbesondere die Absaugdüse, sind wassergekühlt, um Nachverbrennungen innerhalb des Meßkopfs zu vermeiden.

Zur Trennung der Phasen bei der Probenahme im vorderen Teil von Ölflammen, in dem außer Ruß und