

Mathematische und meßtechnische Untersuchung verschiedener Glaswannen

Von Gerd Leyens, Aachen, und Raymond Moreau, Neuilly (Frankreich)

(Auszugsweise vorgetragen auf dem XI. Internationalen Glaskongreß im Juli 1977 in Prag)

(Mitteilung aus dem Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik im Hüttenwesen der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen und der Saint-Gobain Industries, Services Techniques Communs, Neuilly (Frankreich))

(Eingegangen am 1. September 1977)

Es wird untersucht, inwieweit die mit einem mathematischen Modell errechneten Energie- und Strömungsverhältnisse in Glaswannen sich auf die tatsächlichen Betriebsverhältnisse im Ofen übertragen lassen. Berechnet werden zweidimensionale Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder für die Symmetrieebenen verschiedener Wannentypen. Als Randbedingungen dienen die an den Öfen eingestellten Verteilungen der zugeführten Energie, die Glasentnahmeströme sowie wärmetechnische Daten für die Wannenummauerung, Isolierung und Wannenabkühlung.

Die errechneten Temperaturen werden mit Meßwerten verglichen, die während des Wannenbetriebs regelmäßig erfaßt werden.

Darüber hinaus werden Temperaturen mit Tauchelementen gemessen, so daß ein zweidimensionaler Vergleich möglich wird.

Die Untersuchung erstreckt sich

- a) auf drei verschiedene Wannenentypen: Rekuperatoröfen, querbeheizter Ofen und U-Flammenofen,
- b) auf zwei verschiedene Glasfarben: weißes Glas und Rauchglas,
- c) bei einer Glassorte auf einen normalen Durchsatz und eine fehlende Glasentnahme.

Übereinstimmungen und Abweichungen von Rechnung und Messung werden kritisch analysiert und die Anwendbarkeit des verwendeten mathematischen Modells für die Praxis bestätigt.

Mathematical and technological investigations of various glass tank furnaces

How far the energy of flow behaviour calculated from a mathematical model of a glass tank may be carried over into the real operating furnaces has been examined. Two-dimensional temperature and velocity fields were calculated for the planes of symmetry of various furnaces. Boundary conditions involved defining the distribution of energy supplied to the furnace, the throughput and heat transfer data for the furnace walls including effects of insulation and tank cooling.

The calculated temperatures are compared with values determined regularly during furnace operation. In addition temperatures

were also measured with immersed thermocouples to obtain a true two-dimensional comparison.

The investigation included three types of tank (recuperative, crossfired and horseshoe flame), two colours of glass (colourless and tinted) and, for one type of glass, normal throughput and no output.

The agreement and discrepancies between measurements and calculation were analyzed critically and the practical usefulness of the mathematical model confirmed.

Analyse mathématique et métrologique de différents modèles de fours à cuve

L'étude a pour but de déterminer dans quelle mesure les données énergétiques et les caractéristiques des différents courants calculées à partir d'un modèle mathématique concordent avec les conditions de fonctionnement réelles du four. Les calculs portent sur des champs de températures et de vitesses bidimensionnels dans le plan de symétrie des différents fours. Comme conditions initiales, on prend les valeurs de réglage de l'énergie alimentant le four, les courants de tirée et les caractéristiques thermiques des parois, de l'isolant et du système de refroidissement.

Les températures calculées sont comparées aux valeurs mesurées à des intervalles réguliers pendant le fonctionnement du four. De

plus, on effectue des mesures à l'aide de cannes pyrométriques, ce qui permet de faire une comparaison bidimensionnelle.

L'étude porte

- a) sur trois types de fours: four à récupérateur, four à brûleurs transversaux, four à boucle;
- b) sur deux types de verre coloré: verre blanc et verre de fumée;
- c) pour un type de verre, on étudie le cas d'un débit normal et le cas d'une tirée nulle.

Les concordances et les écarts entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées sont analysés, les possibilités d'application du modèle mathématique utilisé sont confirmées.

1. Stand der mathematischen Wannenmodelle

Die zur Zeit in der Literatur vertretenen mathematischen Modelle für Glasschmelzöfen sind meist zweidimensional und berechnen die Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder entweder in einem Wannenquerschnitt [1 bis 3] oder in einem Wannenlängsschnitt [4 bis 9]. Es sind auch dreidimensionale Modelle bekannt [10 bis 12]; sie beziehen sich jedoch meist auf nahezu würfelförmige Elektroöfen, die eine für die Berechnung günstigere Geometrie als langgestreckte Wannenöfen (für Hohl- und Flachglas) haben.

Die Hauptschwierigkeit aller mathematischen Modelle für Wannenöfen liegt in der Einhaltung vertretbarer Rechenzeiten. Bei dreidimensionalen Modellen benötigt man etwa 10mal mehr Stützstellen zur Berechnung der Temperaturen und Geschwindigkeiten als bei zweidimensionalen. Die Rechenzeit steigt jedoch in Abhängigkeit von der Stützstellenzahl nicht linear, sondern mindestens quadratisch an, so daß dreidimensionale Modelle wenigstens die 100fache Rechenzeit von zweidimensionalen verlangen. Da dieser Aufwand zur Klärung vieler Ofenprobleme nicht in jedem Fall erforderlich ist,

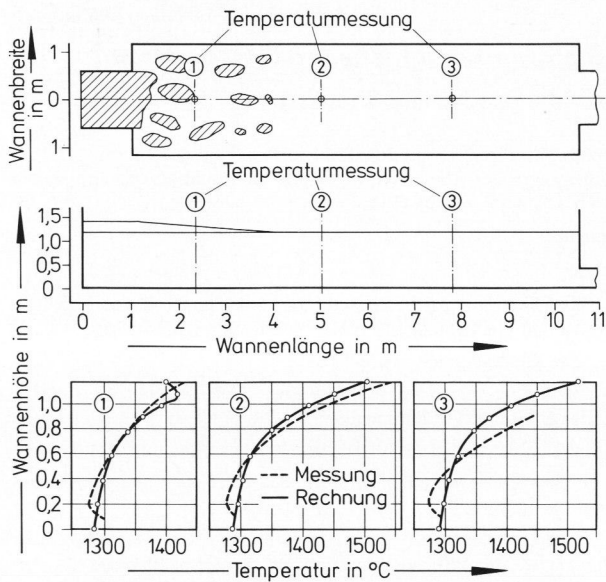


Bild 1. Querbeheizte Glasschmelzwanne. Berechnete und gemessene Temperaturen in Abhängigkeit von der Wannenhöhe.

bieten zur Zeit zweidimensionale Modelle breitere Anwendungsmöglichkeiten als dreidimensionale.

2. Mathematisches Modell und Meßmethode

Das von den Autoren entwickelte und im Rahmen dieser Arbeit benutzte mathematische Modell [7] ist aus den oben angegebenen Überlegungen zweidimensional und basiert auf folgenden Eigenschaften:

1. Es löst das System der gekoppelten Differentialgleichungen für den Energie- und den Impulstransport iterativ.
2. Die numerische Berechnung stützt sich auf die sogenannte Teilgebietsmethode, bei der Partikulärlösungen der Differentialgleichungen angewandt werden, um den physikalischen Inhalt der Differentialgleichungen möglichst genau wiederzugeben.
3. Das mathematische Modell erfaßt sowohl die Durchsatz- als auch die Auftriebsströmung in der Symmetrieebene der Wanne.
4. Als Randbedingung für die Energiegleichung ist die Randbedingung dritter Art benutzt worden, bei der keine Temperatur der Schmelze, sondern nur Oberofentemperaturen und Temperaturen außerhalb der Wanne sowie Wärmewiderstände vorgegeben werden. Die im Gemengebereich entzogene Energie wird durch eine Wärmesenke dargestellt.
5. Zu den Randbedingungen für das Strömungsfeld gehören die Größe des Durchsatzes, die Haftbedingungen an den Wänden sowie eine schubspannungslose Beweglichkeit der Schmelze an der freien Oberfläche.

Mit Hilfe des mathematischen Modells sind verschiedene Betriebsverhältnisse berechnet und die Ergebnisse mit den Messungen in den realen Öfen verglichen worden. Als Meßsonden dienten in Stäbe eingebaute Mantelthermoelemente PtRh-Pt mit 0,5 mm Durchmes-

ser. In den verschiedenen Öfen wurden jeweils drei Stabsonden gleichzeitig durch Bodenöffnungen in das Glasbad eingeführt. Gemessen wurde in Bodenhöhe, dann 5 und 10 cm darüber und anschließend alle weiteren 10 cm bis zur Oberfläche. Die Thermospannungen wurden bei jeder Meßhöhe mit einem Schreiber erfaßt und das Einstellen in den stationären Zustand beobachtet. Die richtige Funktionsweise der Thermoelemente wurde überprüft, indem vor und nach jeder Versuchsreihe neue Eichkurven aufgenommen wurden.

3. Ziel der Arbeit

Um die Anwendbarkeit des mathematischen Modells in der Praxis zu überprüfen, wurde versucht, drei Fragen zu beantworten.

1. Gibt das mathematische Modell die Temperaturverhältnisse im Ofen qualitativ richtig wieder?
2. Beeinträchtigt die Zweidimensionalität des Modells die Genauigkeit der Rechnung erheblich?
3. Unterscheiden sich die aus den Temperaturfeldern verschiedener Öfen errechneten Strömungsfelder voneinander und geben sie Auskunft über günstige Betriebsverhältnisse?

Der Vergleich der Rechen- und Meßergebnisse wurde für verschiedene Betriebsverhältnisse in drei Öfen durchgeführt.

4. Vergleich der Rechen- und Meßergebnisse

Der erste Ofen (Bild 1) ist ein schmaler Rekuperatorofen mit Querflammenbeheizung. An drei Stellen der Symmetrieebene wurde der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Wannenhöhe gemessen.

An der mit ① bezeichneten Stelle stimmen die gemessenen Temperaturen im Innern des Glasbades mit einer Genauigkeit von 20 K oder 5,8% der maximal im Glasbad auftretenden Temperaturdifferenz mit den berechneten überein. Der unterhalb der Badoberfläche auftretende Unterschied im Temperaturverlauf beruht darauf, daß für die Rechnung eine geschlossene Gemenge-decke vorausgesetzt worden ist, so daß die Temperatur zur Oberfläche hin abfallen muß. Bei der Messung im Ofen wurde die Sonde zwischen den sich in Wirklichkeit ausbildenden Gemengeinseln eingeführt. Als Folge entstand lokal eine freie Oberfläche, und die Temperatur nahm von der Oberfläche an stetig ab. Das kurz oberhalb des Bodens gemessene Temperaturminimum ist von der Rechnung nicht wiedergegeben worden. Möglicherweise ist der Messung eine Änderung der Wanneneinstellung vorausgegangen, so daß der stationäre Zustand noch nicht erreicht war. Frühere, aus der Literatur bekannte Messungen, wie sie von Trier [9] zusammengefaßt worden sind, weisen diese Inversionserscheinung nicht auf.

Die Temperaturverläufe an den Stellen ② und ③ zeigen eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung. Die gemessenen Temperaturen bleiben jedoch in der oberen Badhälfte über, in der unter-

ren Badhälfte unter den berechneten Werten. Diese Temperaturunterschiede nehmen zum Durchlaß hin zu. Eine Erklärung für diese Abweichungen kann mit Hilfe des berechneten Strömungs- und Temperaturfeldes (Bild 2) gegeben werden. Das Strömungsfeld besteht aus einer Hauptströmungswalze, die die unter dem Gemenge entstehende Schmelze erfäßt, an der Doghouseseite und am Boden entlang führt und schließlich zur Oberfläche aufsteigen läßt. Diese Durchsatzströmung wird dann durch eine schwache Gegenwalze zum Wannende und schließlich zum Durchlaß hin umgelenkt. Wegen der thermischen Durchmischung durch die Strömung verlaufen die in der unteren Bildhälfte angegebenen Isothermen, den Gemengebereich ausgenommen, nahezu waagrecht. Da das mathematische Modell zweidimensional ist, stammt die im Bereich der Quellströmung aufsteigende Schmelze nur vom kalten Bodenglas. Die Querströmung bleibt also unberücksichtigt. Im realen Ofen bewirkt die Querströmung aus Kontinuitätsgründen ein Absinken der Geschwindigkeit in Wannenslängsrichtung. Dadurch dauert der Wärmeaustausch mit dem Oberofen länger, und die realen Oberflächentemperaturen liegen höher als die errechneten. Im Bodenbereich sind die wirklichen Temperaturen etwas niedriger als die Rechenwerte, weil die Wärmeverluste an den Seitenwänden der Wanne von der Querströmung abhängen und deshalb nicht erfäßt worden sind.

Als Parameter für die Geometrie der Gemengedecke gelten im mathematischen Modell die Gesamtlänge und die Länge, bis zu der eine konstante Massenstromdichte angenommen werden sollte. Diese Größen sind in der Praxis nur ungenau meßbar. Berechnungen zeigten aber, daß eine in gewissen Grenzen falsch angenommene Verteilung des Gemenges die Badtemperaturen nicht wesentlich beeinflußt.

Bei einer Regeneratorbeheizung und seitlicher Gemengeeinlage (Bild 3) stellte sich die Frage, ob die Unsymmetrie der Beheizung und die seitliche Gemengezufuhr Unterschiede zwischen Rechnung und Messung deutlich werden lassen.

Die in Abhängigkeit von der Badhöhe aufgetragenen Temperaturverläufe stimmen an der Stelle ③ in Rechnung und Messung mit einer Genauigkeit von etwa 8,3% (18 K) überein. Im Gegensatz zum vorhergehenden Beispiel ist eine Querströmung nur in abgeschwächter Form zu erwarten, da sich zwischen den Meßstellen ② und ③ ein kleiner Wall befindet. Die an der Badoberfläche der Meßstelle ② auftretenden unterschiedlichen Temperaturverläufe in Rechnung und Messung lassen darauf schließen, daß die Messung unter einer Gemengeinsel stattgefunden hat, die Rechnung an dieser Stelle jedoch nahezu kein Abschmelzen mehr voraussetzte. Die gemessene Z-förmige Temperaturkurve an der Meßstelle ① muß als instationär aufgefaßt werden. Während der Messung kann sich eine Gemengeinsel bewegt und diese Meßkurve verursacht haben.

Der berechnete Strömungsverlauf (Bild 4) unterscheidet sich grundlegend von dem im vorigen Beispiel.

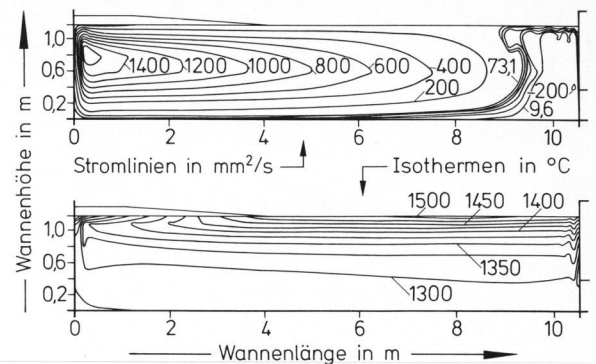


Bild 2. Berechnete Stromlinien und Isothermen in einer querbeheizten Glasschmelzwanne. Durchsatz: 1,21 t/(m² d).

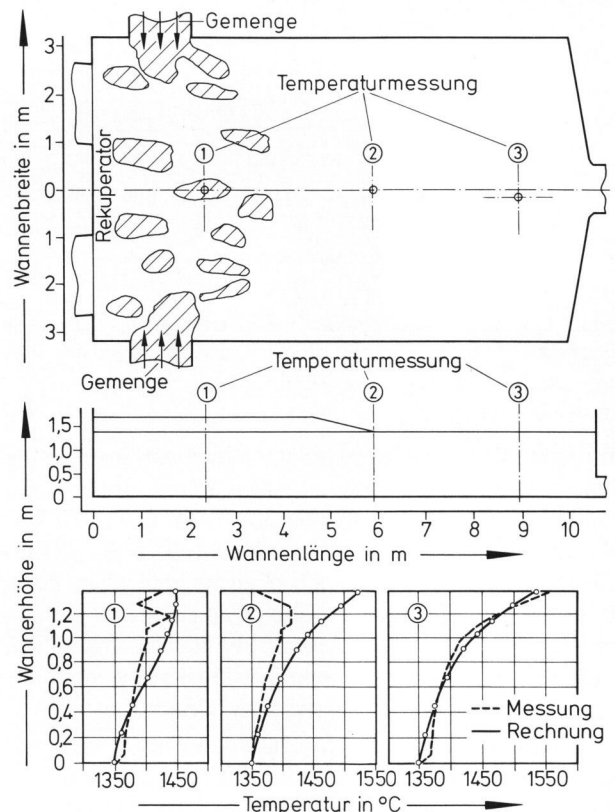


Bild 3. U-Flammenwanne. Berechnete und gemessene Temperaturen in Abhängigkeit von der Wannenhöhe.

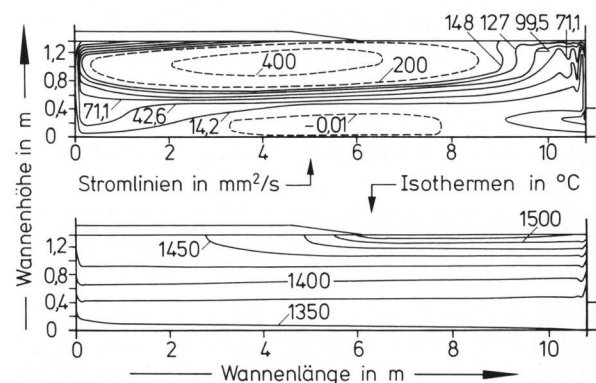


Bild 4. Berechnete Stromlinien und Isothermen in einer U-Flammenwanne. Durchsatz: 2,8 t/(m² d).

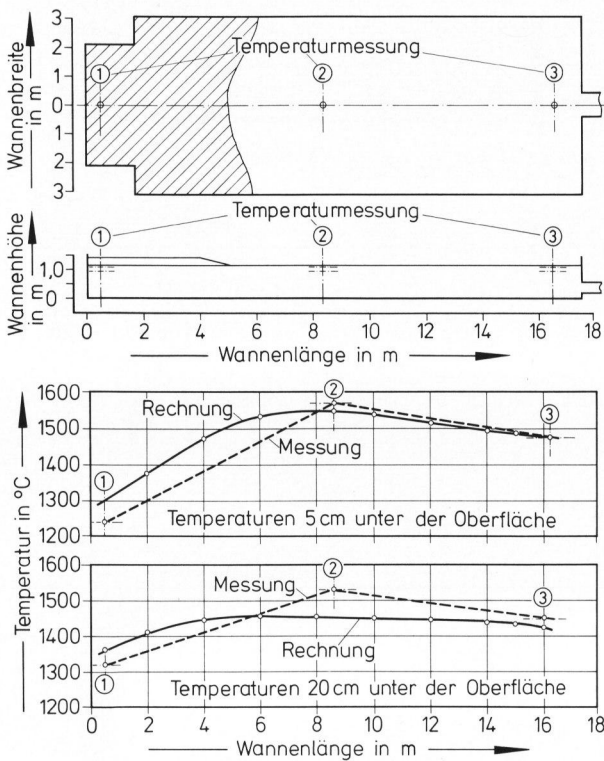


Bild 5. Querbeheizte Glasschmelzwanne. Berechnete und gemessene Temperaturen in zwei verschiedenen Tiefen unterhalb der Badoberfläche.

Es gibt zwar eine ausgeprägte Hauptwalzenströmung unter dem Gemenge, jedoch tritt die Gegenwalze nicht in der oberen Wannenecke kurz vor dem Durchlaß auf. Sie liegt vielmehr unterhalb der Hauptwalze. Sie drängt die Durchsatzströmung nach oben, so daß diese heiße Bereiche durchfließt. Die hohen Temperaturen werden im Hinblick auf die Läuterung als günstig angesehen, weil Blasen wegen der niedrigen Viskosität und der Oberflächennähe leicht entweichen können.

In einem querbeheizten Durchlaßofen, in dem ungefärbtes Gußglas hergestellt wird, wurde der Temperaturverlauf in waagerechter Richtung überprüft (Bild 5). Es wurden jeweils drei Temperaturen in 5 und in 20 cm Tiefe gemessen.

Der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messungen zeigt folgende Merkmale:

Im Bereich unter der freien Oberfläche stimmen die gemessenen und berechneten Temperaturen bis auf etwa 4% (22 K) überein. Größere Abweichungen von etwa 15% (80 K) treten im gleichen Bereich jedoch 20 cm unterhalb der Oberfläche auf. Die errechneten zu tiefen Temperaturen sind wie im ersten Beispiel auf die im Modell nicht berücksichtigte Querströmung zurückzuführen. Unterhalb des Gemenges sind die Rechenwerte zu hoch. Nachrechnungen haben ergeben, daß die angenommene Wärmesenke für das Aufheizen und Schmelzen des Gemenges etwas zu niedrig geschätzt worden ist. Die erwartete Temperaturabsenkung durch das einschmelzende Gemenge wird jedoch, von der Verschie-

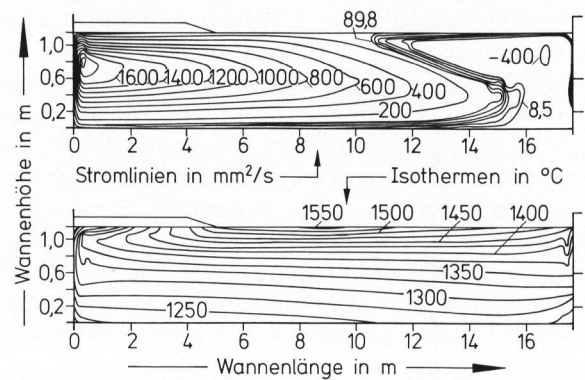


Bild 6. Berechnete Stromlinien und Isothermen in einer querbeheizten Glasschmelzwanne. Durchsatz: $1,33 \text{ t}/(\text{m}^2 \text{ d})$.

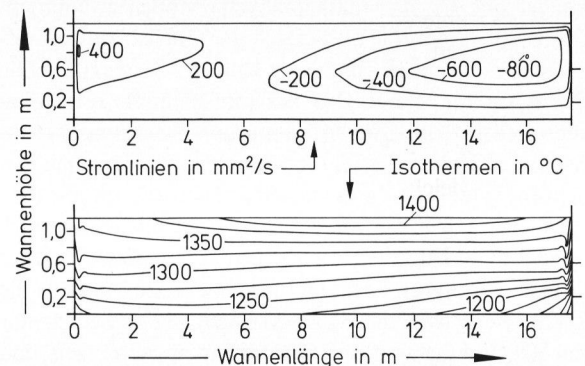


Bild 7. Berechnete Stromlinien und Isothermen in einer querbeheizten Glasschmelzwanne ohne Glasentnahme.

bung zu höheren Werten abgesehen, sehr genau wiedergegeben.

Das berechnete Strömungsfeld (Bild 6) zeigt die für Durchlaßwannen dieser Größenordnung typischen Merkmale: eine starke Rotationswalze unter dem Gemenge, eine schwache Gegenwalze oberhalb des Durchlasses und einen S-förmigen Verlauf der Durchsatzströmung im Bereich der Quellströmung. Bemerkenswert ist jedoch, daß die Durchsatzströmung vor dem Durchlaß insgesamt zur Oberfläche hin umgelenkt wird. Dies weist auf einen besonders guten Betriebszustand in bezug auf die Läuterung hin, da die Durchsatzströmung den heißen Oberflächenbereich durchfließt. Frühere Nachrechnungen von Betriebsverhältnissen in ähnlichen Wannen zeigten häufig, daß die Durchsatzströmung vom Wannenboden herkommend nur teilweise zur Oberfläche hin aufstieg. Der übrige Teil floß direkt zum Durchlaß. Im Hinblick auf die Läuterung wurden solche Betriebsverhältnisse als weniger günstig angesehen.

Ein besonders interessanter Betriebsfall liegt vor, wenn der Wanne kein Glas entnommen wird (Bild 7). Da die Wärmesenke zum Schmelzen des Gemenges fehlt, ist die Hauptströmungswalze sehr schwach. Etwa 2 m hinter der Eingabeseite beträgt die Oberflächengeschwindigkeit nur $1,8 \text{ mm/s}$. Beim vorhergehenden Beispiel betrug sie in derselben Entfernung 20 cm unter der Oberfläche $7,1 \text{ mm/s}$, also etwa das Vierfache. Obwohl die Gegenwalze im hier vorliegenden Fall sehr ausgedehnt ist, unterscheiden sich die Oberflächengeschwin-

digkeiten im Abstand von 16 m bei den Durchsätzen 0 und $1,33 \text{ t}/(\text{m}^2 \text{ d})$ praktisch nicht voneinander.

In der gleichen querbeheizten Durchlaßwanne lagen Messungen der Bodentemperaturen vor für zwei verschiedene Gläser mit den Farben durchsichtig-weiß und bronze. In beiden Fällen waren die Schmelzleistungen mit 150 und 145 t/d sowie die Beheizungsbedingungen nahezu gleich. An einem bestimmten Bodenelement unterschieden sich die bei beiden Gläsern gemessenen Temperaturen um 70 K. Im mathematischen Modell wird die Glasfarbe durch den Absorptionskoeffizienten erfaßt, der für das bronzefarbene Glas etwa doppelt so groß ist wie der für das klare Glas. Die Temperaturdifferenz, die sich aus den Rechenergebnissen ergab, betrug 68,5 K. Sie unterschied sich somit praktisch nicht von der gemessenen Temperaturdifferenz.

5. Schlußfolgerungen

Der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messungen hat ergeben:

1. Für die drei untersuchten Wannentypen
 - a) schmale Rekuperatorwanne mit Querbeheizung und Fronteinlage,
 - b) breite Regeneratorwanne mit Querbeheizung und Fronteinlage sowie
 - c) breite Regeneratorwanne mit U-Flammenbeheizung und seitlicher Einlage
- stimmen die gemessenen Temperaturfelder in qualitativ richtiger Weise mit den berechneten überein.

2. Quantitativ konnte im ungünstigsten Fall eine Genauigkeit von 15% der maximalen Temperaturdifferenz erzielt werden, obwohl die Querströmung nicht erfaßt wurde. Hieraus läßt sich ableiten, daß die Strömung in Querrichtung wesentlich schwächer als in Längsrichtung ist.

3. Am Beispiel zweier Gläser mit unterschiedlichem Absorptionskoeffizienten konnte gezeigt werden, daß das mathematische Modell physikalisch richtig auf Änderungen der Betriebsparameter reagieren kann. Die hierbei auftretenden Temperaturänderungen werden mit hoher Genauigkeit wiedergegeben.

4. Die Strömungsfelder, die für die verschiedenen Betriebsverhältnisse berechnet wurden, unterscheiden sich wesentlich durch die unterschiedliche Lage und Rotationsstärke der Haupt- und der Nebenwalze.

Die Aussage, welcher Betriebszustand der günstigere ist, kann nur getroffen werden, wenn quantifizierbare Beurteilungskriterien benutzt werden. Als solche sind die sogenannten Läuter- und Homogenisierungskennzahlen entwickelt worden [14 bis 17]. Sie erfassen das sogenannte thermische und strömungsmechanische „Schicksal“ von Schmelzpartikeln entlang ihrer Strömungswege. Die Kennzahlen sind dimensionslos und erlauben somit den objektiven Vergleich verschiedener Schmelzprozesse. Den Berechnungen der Kennzahlen müssen jedoch Temperatur- und Strömungsfelder zugrunde gelegt werden, so wie sie für die hier vorgelegten Beispiele berechnet wurden.

Die vom Autor angegebenen Berechnungen wurden im Rechenzentrum der RWTH Aachen durchgeführt.

6. Literatur

- [1] Sawai, I. und Takahashi, K.: Flow of molten glass in the melting chamber of a tank furnace. In: O. Verf.: Symposium sur la fusion du verre, Bruxelles 1958. Charleroi: Union Sci. Continentale du Verre 1958. S. 557–589. [Ref. Glastechn. Ber. 33 (1960) S. 31.]
- [2] Peschke, J. von: Berechnung von Konvektionsströmungen in Glasschmelzwannen. Glastechn. Ber. 38 (1965) S. 276–281.
- [3] Wright, S. und Rawson, H.: Calculation of natural convection in a rectangular cell containing glass with specified temperatures on the boundaries. Glass Technol. 14 (1973) S. 42–49. [Ref. Glastechn. Ber. 47 (1974) 74R0891.]
- [4] Noble, J. J.; Clomburg, L. A.; Hottel, H. C. u. a.: Mathematical and experimental modeling of the circulation patterns in glass melts. Vortrag auf: ASME Winter Annual Meeting, New York 1970. [Ref. Glastechn. Ber. 44 (1971) R71-1229.] Veröff. in: Trans. ASME Ser. C: J. Heat Transfer 94 (1972) S. 149–154.
- [5] Austin, M. J. und Bourne, D. E.: A mathematical model of an electric glass furnace. Glass Technol. 14 (1973) S. 78–84. [Ref. Glastechn. Ber. 47 (1974) 74R1254.]
- [6] Mase, H. und Sasagawa, Y.: Mathematical modeling of glass tank furnace. In: Mouly, R. J. (Hrsg.): Automatic control in glass. Pittsburgh, Pa.: Instrument Soc. Amer. 1973. S. 93–105. [Ref. Glastechn. Ber. 48 (1975) 75R0953.]
- [7] Leyens, G.: Beitrag zur Berechnung zweidimensionaler Konvektionsströmungen in kontinuierlich betriebenen Glasschmelzwannen. Teil 1. Mathematisches Modell. Teil 2. Ergebnisse der Berechnungen. Glastechn. Ber. 47 (1974) S. 251–259, 261–270.
- [8] Hayakawa, M.; Mishima, Y.; Kato, T. u. a.: Studies on glass tank furnace by numerical model. In: O. Verf.: XI. Internat. Glaskongreß, Prag 1977. Sammelbd. 4. Prag: ČVTS-Dům techn. 1977. S. 33–42.
- [9] Štefan, J. und Skřivan, M.: Contribution to the solution of non-stationary model of continuous glass tank. In: O. Verf.: XI. Internat. Glaskongreß, Prag 1977. Sammelbd. 4. Prag: ČVTS-Dům techn. 1977. S. 43–53.
- [10] Chen, T.-S. und Goodson, R. E.: Computation of three-dimensional temperature and convective flow profiles for an electric glass furnace. Glass Technol. 13 (1972) S. 161–167.
- [11] Riederer, A.: Zur Berechnung und Verifikation dreidimensionaler Geschwindigkeits- und Temperaturfelder in elektrisch beheizten Glasschmelzwannen. In: O. Verf.: XI. Internat. Glaskongreß, Prag 1977. Sammelbd. 4. Prag: ČVTS-Dům techn. 1977. S. 55–64.
- [12] Suzuki, J.: Three-dimensional flow and temperature distribution in rectangular cavities. Univ. Sheffield, Ph.D. Thesis 1976.
- [13] Trier, W.: Temperaturmessungen im Glasbad von Wannenöfen. Glastechn. Ber. 26 (1953) S. 5–12.
- [14] Leyens, G.; Rhiel, F. und Woelk, G.: Erfassung der Homogenisierungswirkung der Glasströmungen in einer „Läuter kennzahl“. Glastechn. Ber. 48 (1975) S. 207–212.
- [15] Leyens, G.: Einfluß von Walleinbauten auf die Läuterwirkung der Glasströmungen in einer Durchlaßwanne. Glastechn. Ber. 49 (1976) S. 227–231.
- [16] Rhiel, F. F.: Beitrag zur Berechnung der Homogenisierungsvorgänge in Glasschmelzwannen. Glastechn. Ber. 49 (1976) S. 217–226.
- [17] Rhiel, F. F.: Beitrag zur Berechnung der Läutervorgänge in Glasschmelzwannen. Glastechn. Ber. 49 (1976) S. 251–256.