

## Beitrag zur Berechnung zweidimensionaler Konvektionsströmungen in kontinuierlich betriebenen Glasschmelzwannen \*)

### Teil 2. Ergebnisse der Berechnungen<sup>1)</sup>

Von GERD LEYENS, Aachen

(Vortrag auf der 48. Glastechnischen Tagung am 15. Mai 1974 in Bad Neuenahr)

(Mitteilung aus dem Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik im Hüttenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen)

(Eingegangen am 27. Juni 1974)

Mit dem in Teil 1 aufgestellten mathematischen Modell werden Temperatur- und Strömungsfelder für verschiedene Betriebszustände in der Glasschmelzwanne erzeugt. Für die in diesem Teil näher untersuchte Strömung sind zwei Rotationswalzen charakteristisch, die auf Grund des Auftriebs entstehen. Die zwischen diesen Walzen fließende Durchsatz-

strömung enthält eine „kritische“ Stromlinie, die je nach ihrem Verlauf die Homogenisierungsprozesse im Glasbad entscheidend beeinflusst. Deshalb sind die Variationen der verschiedenen Wannenparameter mit dem Verlauf dieser „kritischen“ Stromlinie in Beziehung gesetzt und beurteilt worden.

### Contribution to the calculation of two dimensional convection currents in continuous glass tank furnaces. Part 2. Results of calculations

Temperature and velocity distributions have been determined for different operating conditions using the mathematical model developed in Part 1. Two closed circulation loops are characteristic of these flows which are due to buoyancy. The throughput flowing between these two 'rolls' includes a

'critical' streamline the path of which has a very important influence on the homogenizing action of the furnace. The effects of the different tank parameters on the path of this 'critical' streamline are related and evaluated.

### Contribution au calcul des courants de convection bidimensionnels dans les fours à bassin continus. 2<sup>e</sup> partie. Résultats des calculs

En utilisant le modèle mathématique décrit dans la première partie, on obtient les champs de température et d'écoulement correspondant à différentes conditions de fonctionnement. Deux mouvements tourbillonnaires dus à la poussée caractérisent l'écoulement étudié en détail dans la seconde partie de l'article. Le courant de passage qui s'écoule entre

ces deux tourbillons contient une ligne de courant « critique » dont la trajectoire influence de manière déterminante les processus d'homogénéisation dans le bain de verre. Les variations des différents paramètres du four sont donc mises en relation avec l'évolution de cette ligne d'écoulement « critique » et évaluées.

## 6. Auswertung der Modellergebnisse

### 6.1. Typische Merkmale der errechneten Temperatur- und Strömungsfelder

In Teil 1 der vorliegenden Arbeit wurden die theoretischen Ableitungen erläutert, mit denen ein mathematisches Modell zur Berechnung des Temperatur- und Strömungsfeldes in Glasschmelzwannen aufgestellt wurde. Mit den durch das mathematische Modell erzeugten Isothermen- und Stromlinienbildern sollen nun die Temperatur- und Strömungsverteilungen im Glasbad gedeutet werden.

Bild 6 zeigt die Isothermen und Stromlinien für einen angenommenen „normalen“ Betriebszustand. Die hierzu gehörenden Daten sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Bei genauerer Betrachtung läßt sich das Temperaturfeld in zwei Gebiete zerlegen:

Das erste Gebiet umfaßt das Feld von der rechten Wannenseite bis zur Stelle  $x = 3,3$  m, bezieht sich also

auf den Bereich unterhalb der nicht vom Gemenge bedeckten Oberfläche. Die absinkende Temperatur an der Oberfläche von  $\vartheta = 1531$  °C ( $x = 3,4$  m, „hot spot“) bis auf  $\vartheta = 1364$  °C ( $x = 10,0$  m) entspricht prinzipiell der beim vorausgesetzten Wärmeübergang (Gleichungen (18) und (19)) zu erwartenden Verteilung. Da aber Schubspannungslosigkeit, d. h. freie Bewegung der Schmelze an der Oberfläche, vorausgesetzt wurde (Gleichung (27)), ist die Temperaturverteilung an der Oberfläche wesentlich ausgeglichener als dies bei einer ruhenden Oberflächenschmelze der Fall wäre. Unterhalb dieser freien Oberfläche fallen die nahezu waagrecht verlaufenden Isothermen auf, die lediglich in den Wannenecken und unmittelbar an der Oberfläche stärker gekrümmt sind.

\*) Auszug in zwei Teilen aus der von der Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen genehmigten Dissertation des Autors (1974).

<sup>1)</sup> Teil 1, Mathematisches Modell, Glastechn. Ber. 47 (1974) Nr. 11, S. 251 – 259.

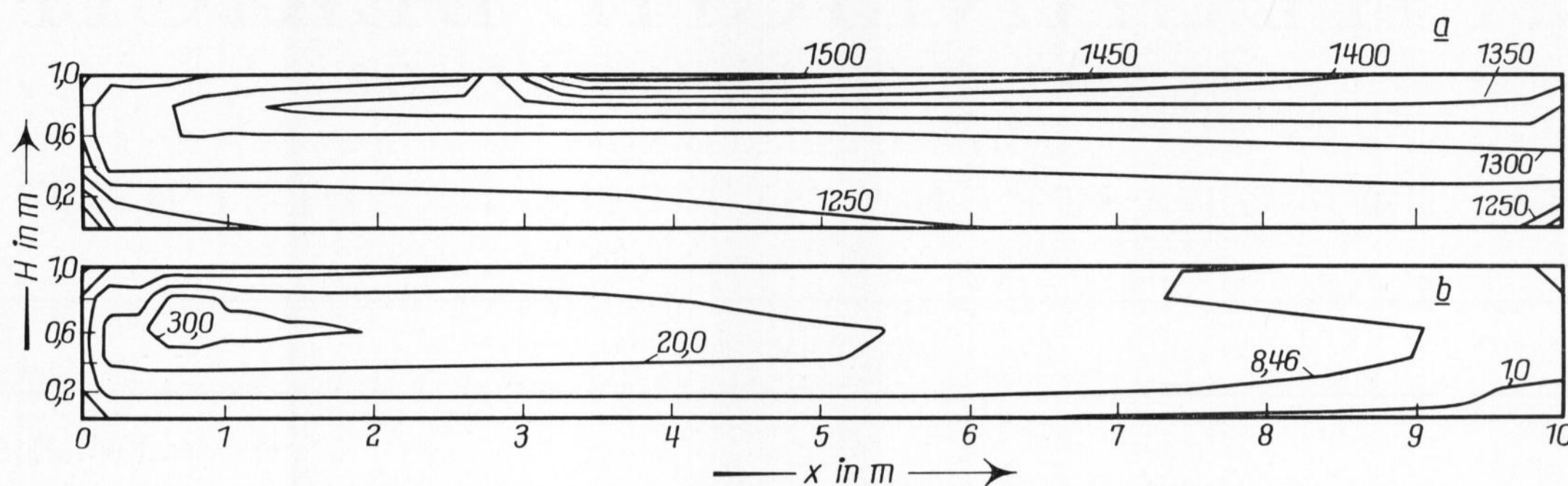


Bild 6. Berechnete Isothermen und Stromlinien im Glasschmelzbad (Durchsatz:  $\dot{M}/A_0 = 2,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$ );  
 a) Isothermen, Temperaturangaben in °C;  
 b) Stromlinien zur Stromfunktion  $\Psi$ , die Werte sind in  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  angegeben.

Tabelle 2. Daten für einen angenommenen „normalen“ Betriebszustand

Wannengeometrie:

$L = 10 \text{ m}$ ;  $H = 1 \text{ m}$ ;  $B = 6 \text{ m}$ ;  $S = L/3$ ;  $SA = 0,2 \text{ m}$ ;  $SE = 0,4 \text{ m}$

Wärme- und strömungstechnische Größen:

$c = 1230 \text{ Ws/kg K}$	$\varepsilon = -0,351 + \frac{3156}{(T/K) - 547}$
$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$	$\alpha_b = 350 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
$\beta = 8,715 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$k_u = 0,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
$\lambda = \left(0,0349 \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} - 32,6\right) \text{ W/m K}$	$k_r = k_l = 3,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
$\mu = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^2$	$\vartheta_u = \vartheta_r = \vartheta_l = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
	$\dot{M} = 1,39 \text{ kg/s}$

In der Glastechnik ist es üblich, den Durchsatz auf die freie Oberfläche der Glaswanne zu beziehen. Aus den o. a. Daten folgt dann:  $\dot{M}/A_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$ .

Die ausgeglichene Temperaturverteilung an der Oberfläche und die fast waagerechten Isothermen innerhalb der Schmelze deuten darauf hin, daß der Wärmetransport durch Konvektion wesentlich größer ist als derjenige durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Reine Wärmeleitungsfelder müßten annähernd V-förmige Isothermen aufweisen, da die in diesem Fall senkrecht zu den Isothermen fließenden Wärmeströme von der höchsten Temperaturstelle an der Oberfläche („hot spot“) ausgehen und zur kälteren Schmelze an der rechten Wannenseite sowie zur kalten Gemengeseite hin fließen würden. Das aus den Isothermenbildern deutlich werdende Übergewicht der Wärmekonvektion wird durch die mit der Glasbadhöhe berechneten maximalen Péclet-Zahl  $Pe_{\text{max}} = 435$  bestätigt.

Da sich das berechnete Temperaturfeld unterhalb der freien Oberfläche zwischen die von TRIER [19] gemessenen Temperaturfelder für weißes Wirtschaftsglas und grünes Flaschenglas einordnen läßt (in [19] Tafel I, erstes und fünftes  $y-\vartheta$ -Diagramm), darf angenommen werden, daß die für den „normalen“ Betriebszustand hier verwendeten Stoffwerte ebenfalls etwa in der Mitte zwischen denen der eben genannten Gläser liegen (Bild 7). Eine noch genauere Anpassung an die von TRIER gemessenen Temperaturfelder wäre nur möglich, nachdem die für das mathematische Modell notwendigen Stoffwertfunktionen ermittelt worden sind.

Das zweite Gebiet liegt unterhalb der Gemengedecke; es reicht also von der Stelle  $x = 3,3 \text{ m}$  bis zur

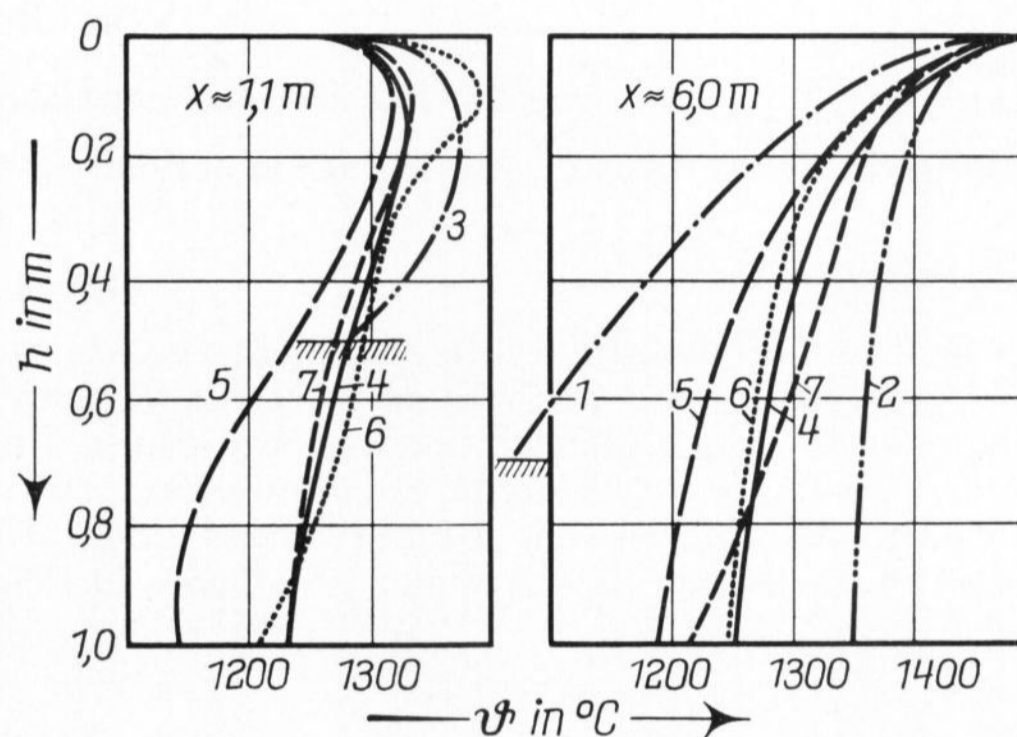


Bild 7. Gemessene und berechnete Temperaturen im Glasschmelzbad. Messungen an: 1 = grünem Flaschenglas, 2 = weißem Wirtschaftsglas, 3 =  $3/4$  weißem Wirtschaftsglas. Mathematisches Modell für: 4 =  $\lambda$ -hoch,  $\mu$ -hoch (Normalfall); 5 =  $\lambda$ -niedrig,  $\mu$ -hoch; 6 =  $\lambda$ -niedrig,  $\mu$ -niedrig; 7 =  $\lambda$ -hoch,  $\mu$ -niedrig.

linken Wannenseite. In diesem Bereich fällt die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Schmelze und Gemenge sehr steil ab von  $\vartheta = 1531 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $x = 3,4 \text{ m}$ ) bis auf Werte von  $\vartheta = 1290 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $x = 2,0 \text{ m}$ ) und  $\vartheta = 1245 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $x = 0 \text{ m}$ ). Dringt man unterhalb der Gemengedecke in die Schmelze ein, so steigt die Temperatur zunächst noch an, da die Strömung warme Schmelze vom ersten Gebiet unter die Gemengedecke transportiert. Erst nach mehr als 20 cm Eintauchtiefe (vorausgesetzte Wannenhöhe:  $H = 1,0 \text{ m}$ ) sinkt die Temperatur immer weiter ab, bis sie  $\vartheta = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $x = 2,0 \text{ m}$ ) am Boden erreicht hat, weil die gerade entstandene, noch kalte Schmelze von der Gemengedecke her über den Wanneboden zur Wannemitte fließt. Der berechnete Temperaturverlauf vom Gemenge bis zum Wanneboden stimmt etwa mit dem von SCHULZ [20] gemessenen überein, obwohl SCHULZ die Temperaturen in einer nur 0,5 m tiefen Wanne ermittelt hat (Bild 7).

Eine zweidimensionale Temperaturverteilung über den gesamten Wannenzängsschnitt wird durch Bild 8 wiedergegeben.

Der durch das Temperaturfeld verursachte Auftrieb wirkt auf die Schmelze so ein, daß eine starke, gegen den Uhrzeigersinn drehende Walzenströmung entsteht (Bild 6). Da sich die Stromlinien etwa um den gleichen Betrag  $\Delta\psi \approx 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  unterscheiden, kann nach der Kontinuitätsgleichung aus einer Verengung des Abstandes zwischen den Stromfunktionslinien unmittelbar auf eine proportionale Geschwindigkeitserhöhung geschlossen werden. Die sich in der linken oberen Wannenecke verdichtenden Stromlinien sind also charakteristisch für die

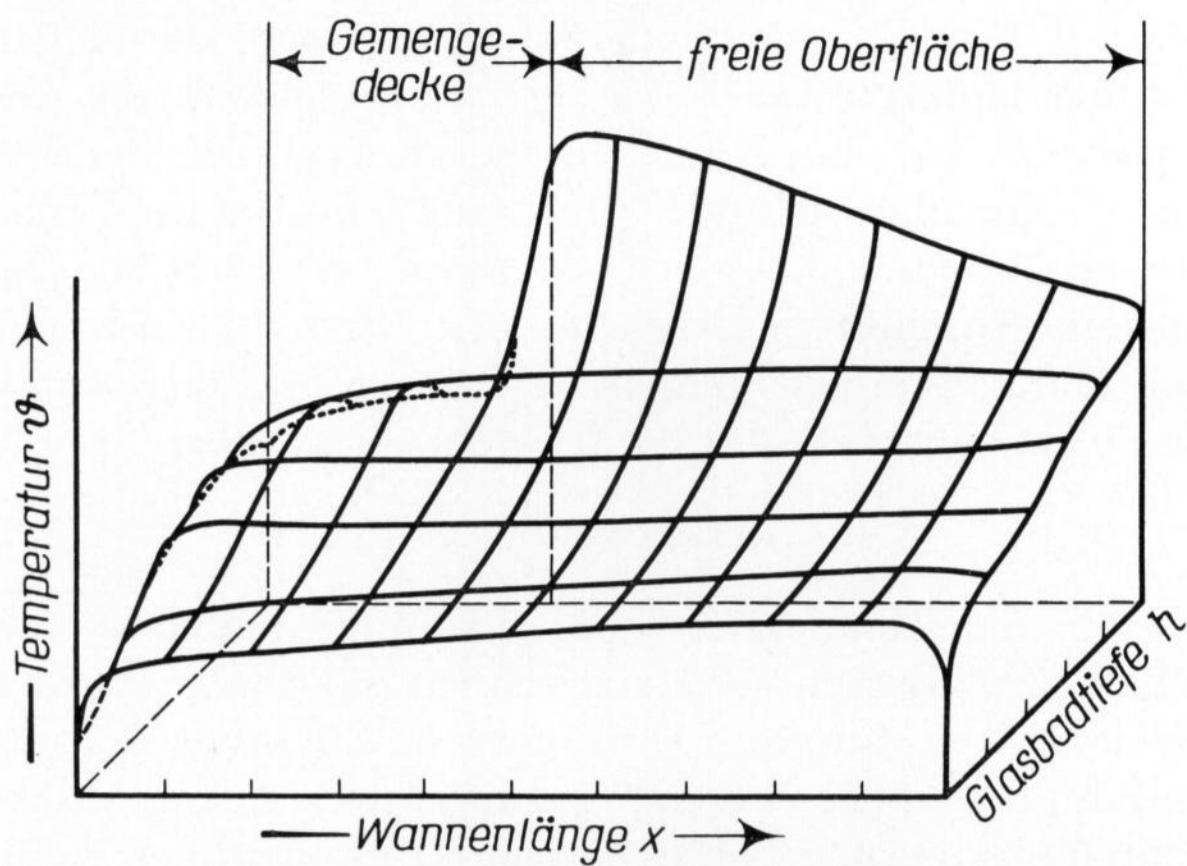


Bild 8. Temperaturverteilung über dem Wannenschnitt.

dort herrschenden höchsten Geschwindigkeiten in der Wanne. Die Ursachen dieser Geschwindigkeitssteigerungen liegen im Temperaturfeld begründet:

1. Die Temperaturgradienten im Übergangsbereich zwischen der geschlossenen Gemengedecke und der freien Oberfläche sind auf Grund ihrer Steilheit maßgebend für die erhebliche Beschleunigung der Strömung.
2. Für die Dauer der Beschleunigung und damit für die gesamte Geschwindigkeitserhöhung ist der Temperaturunterschied zwischen der maximalen Oberflächentemperatur und der Temperatur am Ende der geschlossenen Gemengedecke entscheidend. Dieser Temperaturunterschied wird im folgenden als „charakteristische Temperaturdifferenz an der Oberfläche“ bezeichnet.

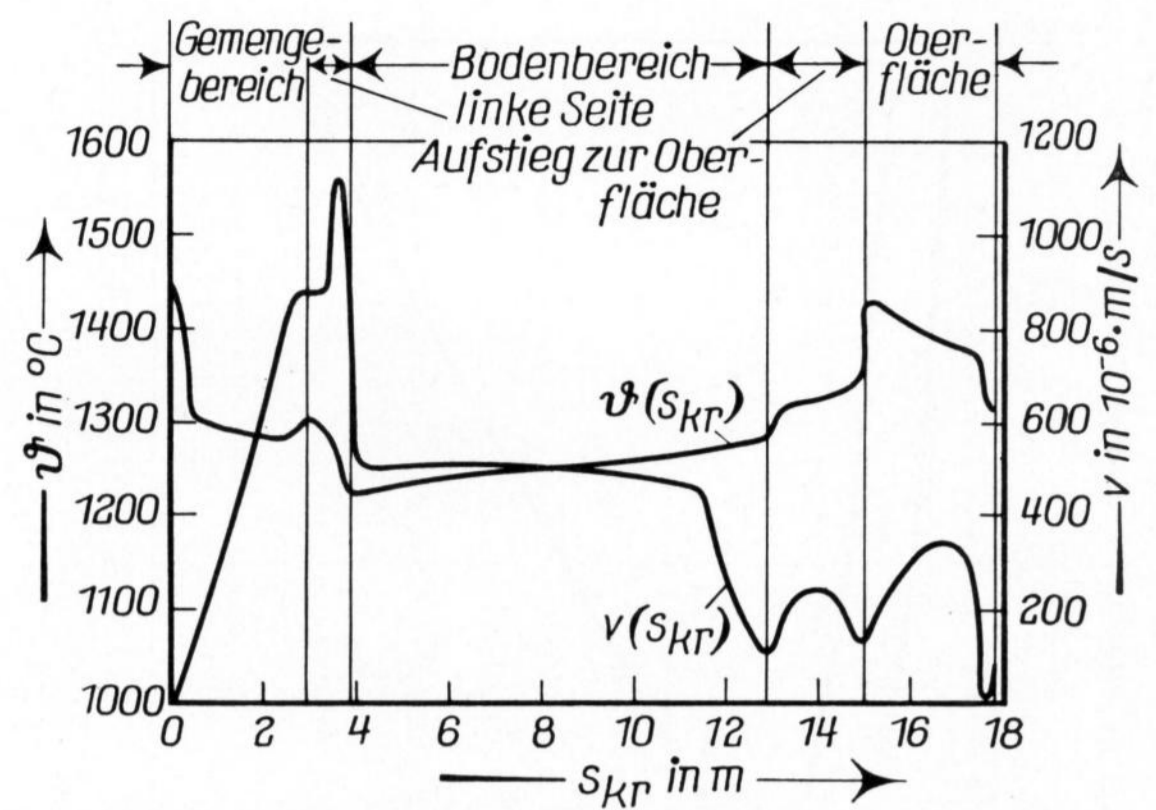
Ausgehend von der Stelle  $x \approx 8,5$  m in Richtung des Durchlasses wird eine sehr schwache Gegenwalzenströmung wirksam. Der thermische Quellpunkt liegt zwischen den beiden gegensinnig drehenden Walzenströmungen, die für die Homogenisierungsprozesse in der Glasschmelze von besonderer Bedeutung sind, wie in den folgenden Abschnitten noch gezeigt wird.

## 6.2. Kritische Partikelbahn in bezug auf Homogenisierungsprozesse

Von der Gemengedecke ausgehend führt eine Vielzahl von Stromlinien zum Durchlaß, die als Bahnen erschmolzener Partikeln durch die Glasschmelzwanne angesehen werden können. In Bild 6 wurden der Übersichtlichkeit halber nur zwei Stromlinien ( $\psi = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  und  $\psi = 8,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \approx 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) eingezeichnet. Die am weitesten von den Wannenzwänden entfernte Stromlinie ( $\psi = 8,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) soll im folgenden genauer betrachtet werden, weil sie in bezug auf Homogenisierungsprozesse als besonders kritisch anzusehen ist.

Je nach Rotationsstärke der Haupt- und der Gegenwalze ändert sich der Verlauf dieser Stromlinie am stärksten. Sie wird zur Beurteilung der Strömung als besonders kritisch erachtet, weil eine Verkürzung ihres Verlaufs mit einer Steigerung der Geschwindigkeit und einem Absinken der Temperaturen auf ihrer Bahn und den benachbarten Stromlinien verknüpft ist. Je nach Wanneneinstellung besteht deshalb die Gefahr, daß die Homogenisierung der Partikeln auf ihrem Weg vom Gemenge zum Durchlaß nicht in ausreichendem Maße gewährleistet wird.

Bei „normalem“ Betriebszustand (siehe Abschnitt 6.1.) werden die Partikeln auf der „kritischen“ Stromlinie

Bild 9. Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung auf der „kritischen“ Stromlinie ( $s_{kr}$  = Wegkoordinate der „kritischen“ Stromlinie).

zunächst von der dominierenden linksdrehenden Auftriebswalze erfaßt, zur linken Wannenseite transportiert und schließlich an dieser Seite entlang bis in den Bodenbereich geführt. In diesen Gebieten herrschen Temperaturen von maximal  $\vartheta_{\text{max}} = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und minimal  $\vartheta_{\text{min}} = 1220 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Bilder 6 und 9). Die „kritische“ Stromlinie führt dann mit kaum merklichem Anstieg am Boden entlang. Gegen Ende dieses Abschnittes ( $x \approx 8,0$  m) erreichen die Partikeln Temperaturen von nur etwa  $\vartheta \approx 1270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . In der sich anschließenden Aufwärtsbewegung zur Oberfläche hin steigt die Temperatur stark an und nimmt an der freien Oberfläche Werte um  $\vartheta \approx 1425 \text{ }^{\circ}\text{C}$  an.

Nur im Bereich vom letztgenannten Aufstiegsunkt bis zum Durchlaß werden die Diffusionsvorgänge in besonderem Maße begünstigt, weil dort zwei Einflüsse gleichzeitig wirksam werden (Bild 9):

1. hier liegen die höchsten Temperaturwerte auf der gesamten Stromlinienbahn vor;
2. die Strömungsgeschwindigkeiten hingegen sind mit Werten  $v < 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  die niedrigsten auf der gesamten „kritischen“ Bahn.

Damit die „kritische“ Stromlinie überhaupt so günstig verlaufen kann, muß die rechtsdrehende Gegenwalze eine bestimmte Rotationsstärke überschreiten. Sind die Auswirkungen dieser Gegenwalze zu schwach, so wird die „kritische“ Stromlinie vom Wannensboden her direkt zum Durchlaß führen, ohne daß der wichtige „Umweg“ zur Oberfläche ausgenutzt werden kann.

Für Homogenisierungsbestrebungen ist es also bedeutsam, Variationen der verschiedenen Betriebsparameter immer in Hinblick auf den günstigen Verlauf der „kritischen“ Stromlinie zu untersuchen und zu beurteilen.

## 6.3. Vergleich der Ergebnisse der Teilgebietsmethode mit denen der „upwind-difference“-Technik

Die Temperatur- und Strömungsfelder zur Beschreibung eines sogenannten „normalen“ Betriebszustandes sind sowohl nach der Teilgebietsmethode als auch mittels der „upwind-difference“-Technik berechnet worden. In beiden Fällen waren die vorgegebenen Randbedingungen gleich, so daß beide Methoden unmittelbar an dem Verlauf der Isothermen und Stromlinien verglichen werden können. In bezug auf die Isothermen stimmen die Ergebnisse beider Methoden fast überein.

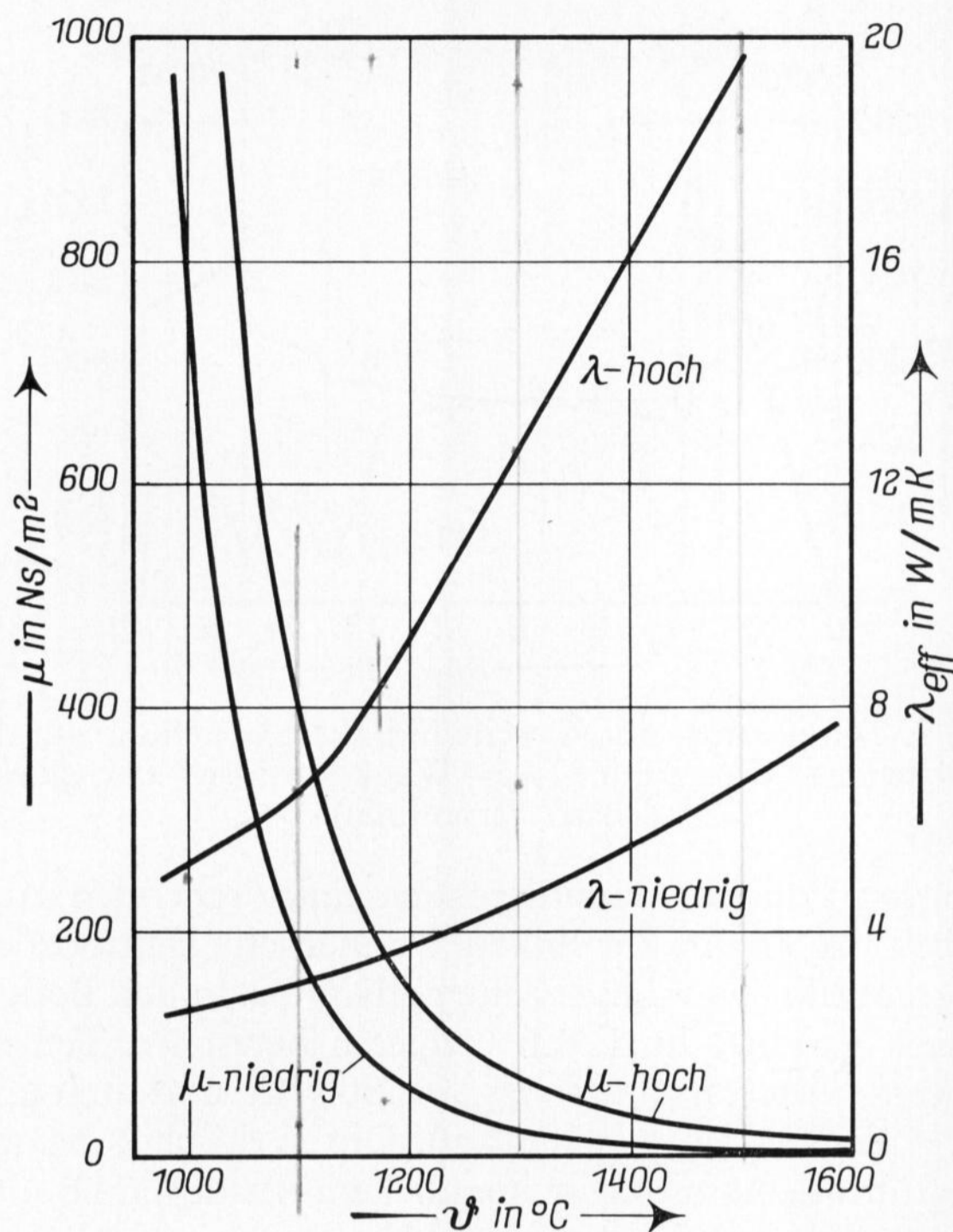


Bild 10. Dynamische Viskosität und effektive Wärmeleitfähigkeit von Glasschmelzen.

Die größten Temperaturunterschiede betragen nur maximal 6 °C und treten im Zentrum der dominierenden linksdrehenden Walze sowie in der linken unteren Wannenecke auf. Zum rechten Rand hin gleichen sich die mit der Teilgebietslösung („TG-Methode“) ermittelten Temperaturwerte jedoch immer mehr denjenigen an, die mit den „upwind differences“ („UD-Methode“) berechnet worden sind.

Die entscheidenden Unterschiede beider Methoden werden erst sichtbar, wenn die aus den Temperaturfeldern berechneten Strömungsfelder, die man mittels der „UD-Methode“ gewonnen hat, mit denen aus der „TG-Methode“ verglichen werden:

1. Der Mittelpunkt der linksdrehenden Hauptwalze ist bei der „UD-Methode“ weiter nach rechts verschoben.
2. Die „kritische“ Stromlinie strebt bei der „UD-Methode“ weiter nach rechts zum Durchlaß hin, bevor sie zur Oberfläche hin abbiegt.
3. Die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten erhöhen sich im Bereich der Strömungswalzen bei der „UD-Methode“ z. T. bis um 24%.

Die durch die „upwind difference“-Methode und das „Teilgebietsverfahren“ berechneten Temperatur- und Strömungsfelder können durch Messungen der Temperatur nur sehr schwer überprüft werden, da die auftretenden Meßungenauigkeiten üblicherweise die aus der Gegenüberstellung der beiden Methoden bereits deutlich gewordenen Temperaturunterschiede überschreiten.

Selbst aus Modellversuchen kann keine Entscheidung über die größere Genauigkeit der einen oder der anderen Methode abgeleitet werden. Denn auch hier wären die Fehlerquellen, die durch unvollständige Modellähnlichkeit mit der Hauptausführung hervorgerufen würden, größer als diejenigen, die durch die beiden genannten Rechenmethoden entstanden sind.

Man ist deshalb vorerst darauf angewiesen, derjenigen Rechenmethode den Vorrang zuzugestehen, die die physikalischen Vorgänge möglichst exakt wiedergibt. Die „Teilgebietsmethode“ erfüllt diese Forderung besser als die „upwind difference“-Methode, weil sie (wie bereits in Abschnitt 3.4. beschrieben) Partikulärlösungen der Differentialgleichungen verwendet und sich somit den physikalischen Vorgängen genauer anpaßt.

#### 6.4. Einflüsse der Glasart

Um die Temperatur- und Strömungsfelder in verschiedenen Glasschmelzen berechnen zu können, wurden zwei aus der Literatur entnommene effektive Wärmeleitfähigkeiten [21 und 22] und zwei dynamische Viskositäten [23] vorgegeben. Alle vier Kombinationen dieser temperaturabhängigen Stoffwertfunktionen (Bild 10) wurden berücksichtigt.

Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeiten, die den Berechnungen des „normalen“ Betriebszustandes der Wanne zugrunde liegen (siehe Tabelle 2), treten steile Temperaturgradienten nur in der Nähe der Wärmequellen, also unmittelbar unterhalb der freien Oberfläche auf. Wegen der ebenfalls vorausgesetzten hohen Viskosität reicht die maximale Geschwindigkeit in der Schmelze nur bis zu Werten von  $v_{\max} = 2,1$  mm/s.

Aus dem Vergleich der für die vier Stoffwertkombinationen errechneten Isothermen und Stromlinien wird deutlich:

1. Die Temperaturfelder sind einander sehr ähnlich, wenn gleiche Wärmeleitfähigkeitsfunktionen eingesetzt werden.
2. Die Strömungsfelder, denen gleiche Viskositätsfunktionen zugrunde liegen, weisen ähnliche Stromlinienbilder auf:

Die höchsten Geschwindigkeiten sind von gleicher Größenordnung.

Die „kritischen“ Stromlinien knicken etwa an den gleichen Stellen zur Oberfläche hin ab.

Die Abschnitte der „kritischen“ Stromlinie an der freien Oberfläche sind ungefähr gleich lang.

3. Eine Beeinflussung der Strömung durch die Wärmeleitfähigkeit ist allein bei den Glasschmelzen mit geringerer Viskosität zu beobachten. Sie unterscheiden sich allerdings nur in Hinblick auf die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten. In bezug auf die Geschwindigkeitsrichtungen bleiben die Ähnlichkeiten dieser Strömungsbilder jedoch erhalten.

Das Strömungsfeld hängt in seinen charakteristischen Merkmalen, abgesehen von den Geschwindigkeitsbeträgen, kaum von der Wärmeleitfähigkeit, wohl aber — wie durch die eben genannten Vergleiche deutlich geworden ist — in entscheidendem Maße von der Viskosität ab. Deshalb erhebt sich die Frage, ob die bei Modellversuchen bisher für die Ähnlichkeit der Strömungen als ausschlaggebend angesehene Rayleigh-Zahl das Temperatur- und Strömungsfeld genau genug wiedergeben kann. Wie bereits unter Punkt 2. erwähnt worden ist, wird das Strömungsbild wesentlich von der Größe der Viskositätswerte bestimmt. Dieses Übergewicht der Viskosität gegenüber der Wärmeleitfähigkeit könnte darauf zurückgeführt werden, daß die Viskosität von Glasschmelzen in weitaus stärkerem Maße von der Temperatur abhängt, als dies bei anderen Stoffen der Fall ist. Deshalb könnten die Grashof-Zahlen, die den

Tabelle 3. Berechnete dimensionslose Kennzahlen bei verschiedenen Stoffwertkombinationen

Stoffwertkombination	1 „Normalfall“	2	3	4
Eff. Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{eff}}$	hoch	niedrig	hoch	niedrig
Dyn. Viskosität $\mu$	hoch	hoch	niedrig	niedrig
$Pr_{\text{max}} = \left(\frac{\nu}{a}\right)_{\text{max}}$	$44,1 \cdot 10^3$	$1370 \cdot 10^3$	$16,1 \cdot 10^3$	$64,1 \cdot 10^3$
$Pr_{\text{min}} = \left(\frac{\nu}{a}\right)_{\text{min}}$	$0,985 \cdot 10^3$	$2,33 \cdot 10^3$	$0,284 \cdot 10^3$	$0,602 \cdot 10^3$
$Pe_{\text{max}} = \left(\frac{v \cdot H}{a}\right)_{\text{max}}$	435	1480	1210	5580
$Gr_{\text{max}} = \left(\frac{g \cdot \beta \cdot (\vartheta_{\text{max}} - \vartheta_{\text{min}}) \cdot H^3}{\nu^2}\right)_{\text{max}}$	$6,36 \cdot 10^3$	$13,5 \cdot 10^3$	$74,9 \cdot 10^3$	$153 \cdot 10^3$
$Ra_{\text{max}} = (Gr \cdot Pr)_{\text{max}}$	$6,27 \cdot 10^6$	$31,6 \cdot 10^6$	$21,3 \cdot 10^6$	$92,1 \cdot 10^6$

Viskositätseinfluß im Quadrat berücksichtigen, die Ähnlichkeit der Strömungsfelder besser wiedergeben als die Rayleigh-Zahlen. Der Vergleich der für die Stoffwertkombinationen berechneten dimensionslosen Kenngrößen scheint diese Überlegungen zu bestätigen, da die Grashof-Zahlen im Gegensatz zu den Rayleigh-Zahlen für die jeweilig einander ähnlichen Strömungsfelder größenordnungsmäßig übereinstimmen (Tabelle 3).

6.5. Einflüsse der Glasbadhöhe

Temperatur- und Strömungsfelder wurden für folgende Glasbadhöhen berechnet:  $H = 0,8; 1,0$  und  $1,2$  m. Die Höhe  $H = 1,0$  m wurde zur Berechnung des in Abschnitt 6.1. genannten „normalen“ Betriebszustandes benutzt (Bild 6).

Trägt man für die eben erwähnten Höhenwerte die Badtiefe  $h$  über der Temperatur  $\vartheta$  auf (Bild 11), so stellt man fest, daß unterhalb der freien Oberfläche ( $x \approx 6$  m) alle drei Kurven sich fast überdecken. Lediglich die Temperaturkurve für  $H = 0,8$  m ist um etwa  $20^\circ\text{C}$  zu höheren Temperaturen hin verschoben. Im Bereich unterhalb der Gemengedecke ( $x \approx 1,1$  m) verlaufen die genannten Temperaturkurven um so steiler, je höher das Schmelzbad ist. Aus dem steileren Verlauf der Kurve für  $H = 1,2$  m im Schmelzbereich darf nicht auf eine allgemein bessere thermische Homogenität in der gesamten Schmelzwanne geschlossen werden, da unterhalb der freien Oberfläche die Temperaturen für alle Badhöhen wieder annähernd gleiche Werte annehmen.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den drei untersuchten Fällen ergeben sich erst aus dem Vergleich der Stromlinienbilder:

1. Die höchsten Geschwindigkeiten treten bei der Wanne mit der größten Badhöhe auf (Tabelle 4).
2. Die thermische Quellströmung wird um so weiter zum Durchlaß hin verschoben, je höher der Glasstand ist.
3. Bei großen Badhöhen legen die Partikeln auf der für die Homogenisierung wichtigen „kritischen“ Stromlinie eine kürzere Strecke mit höherer Geschwindigkeit zurück als bei einer niedrigeren Schmelzbadhöhe.

Wie bereits in Abschnitt 3.1. erwähnt, beziehen sich diese Ergebnisse auf Glasschmelzen mit großen optischen Dicken. Somit ist die hier festgestellte leichte Verbesse-

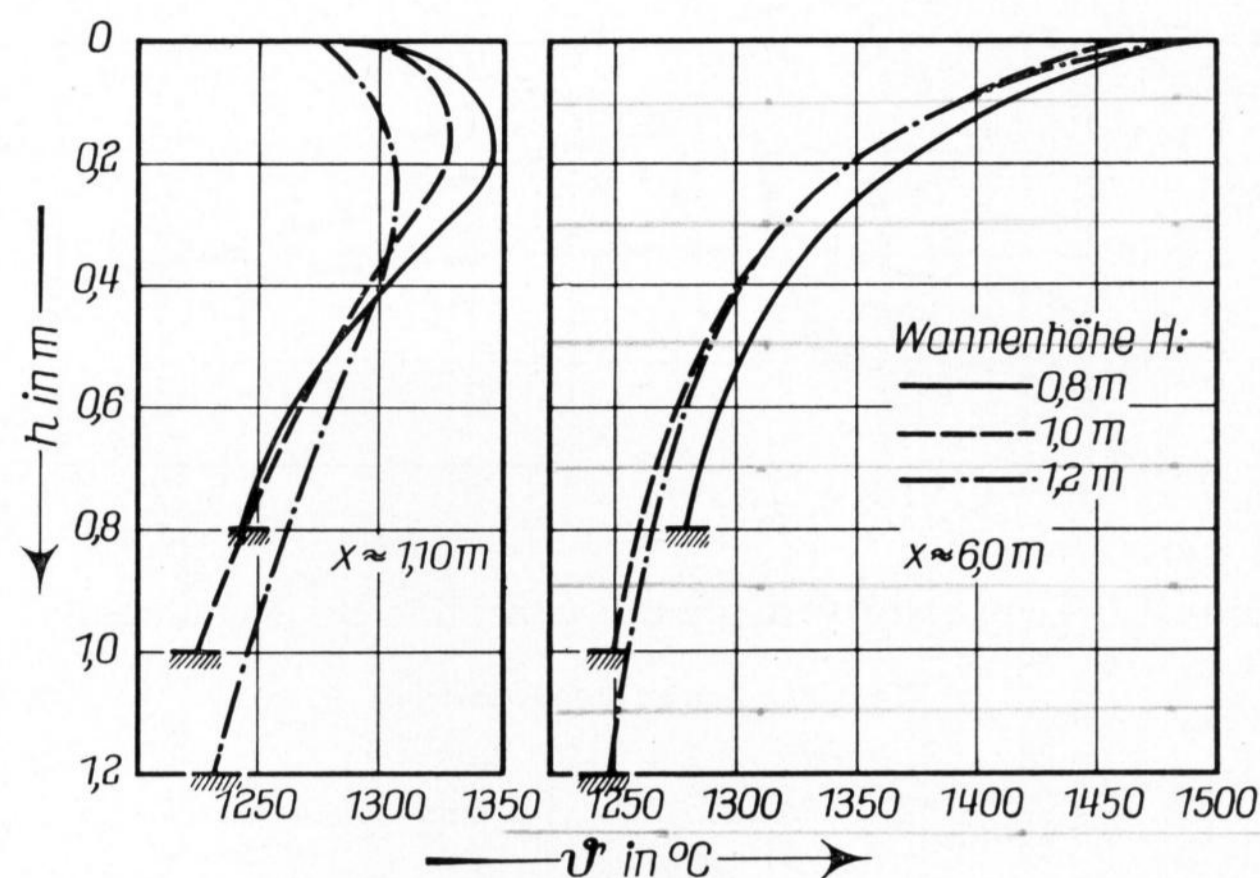


Bild 11. Temperaturverläufe bei verschiedenen Wannenhöhen unterhalb des Gemenges ( $x = 1,1$  m) und der freien Oberfläche ( $x = 6,0$  m).

rung der Homogenisierungsvorgänge bei der geringeren Glasbadhöhe von  $H = 0,8$  m nur für Glasschmelzen mit großer optischer Dicke eindeutig, weil in diesen Fällen die Eindringtiefe der Strahlung in die Glasschmelze gering ist.

6.6. Einflüsse einer Boden- oder Seitenwandisolierung

Eine Isolierung des Wannensbodens erscheint zunächst zweckmäßig, um die zugeführte Wärmeenergie besser ausnutzen und eine bessere thermische Homogenität in der Schmelze erzielen zu können.

Das bei vollständiger Bodenisolierung ( $\dot{q}_u = 0$ ) berechnete Temperaturfeld zeigt erwartungsgemäß gegenüber dem „normalen“ Betriebszustand mit Wärmedurchgang am Boden (Tabelle 2) eine Temperaturzunahme im Bodenbereich um etwa  $40^\circ\text{C}$ , in den unteren Wannenecken sogar um etwa  $70^\circ\text{C}$ . An der freien Oberfläche dagegen steigt die Temperatur lediglich um maximal  $9^\circ\text{C}$  an. Durch die vollständige Bodenisolierung wird also einerseits ein besserer Temperatenausgleich in senkrechter Richtung erreicht, andererseits fließen die Wärmeströme nun aber stärker als im „Normalfall“ in waagerechter Richtung. Die vor allem unterhalb der Gemengedecke erhöhte Temperatur (Bild 12) hat ein Absinken der Viskosität und somit auch eine Verminderung der die Strömung abbremsenden Zähigkeitskräfte zur Folge. Dadurch werden vor allem die Rotation der Hauptströmungswalze verstärkt und der thermische Quellpunkt in Richtung des Durchlasses hin verschoben.

Die Berechnung der Einflüsse, die a) durch eine Seitenwandisolierung und b) durch eine kombinierte Seitenwand- und Bodenisolierung hervorgerufen wer-

Tabelle 4. Vergleich der maximalen Geschwindigkeiten, der maximalen Reynolds-Zahlen und der Längen der „kritischen“ Stromlinien an der freien Oberfläche bei verschiedenen Glasbadhöhen

H in m	0,8	1,0	1,2
$v_{\text{max}}$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$
$Re_{\text{max}} = \left(\frac{\rho \cdot v \cdot H}{\mu}\right)_{\text{max}}$	0,0997	0,117	0,160
$s_{\text{kr}, 0}$ in m	2,87	2,45	1,41

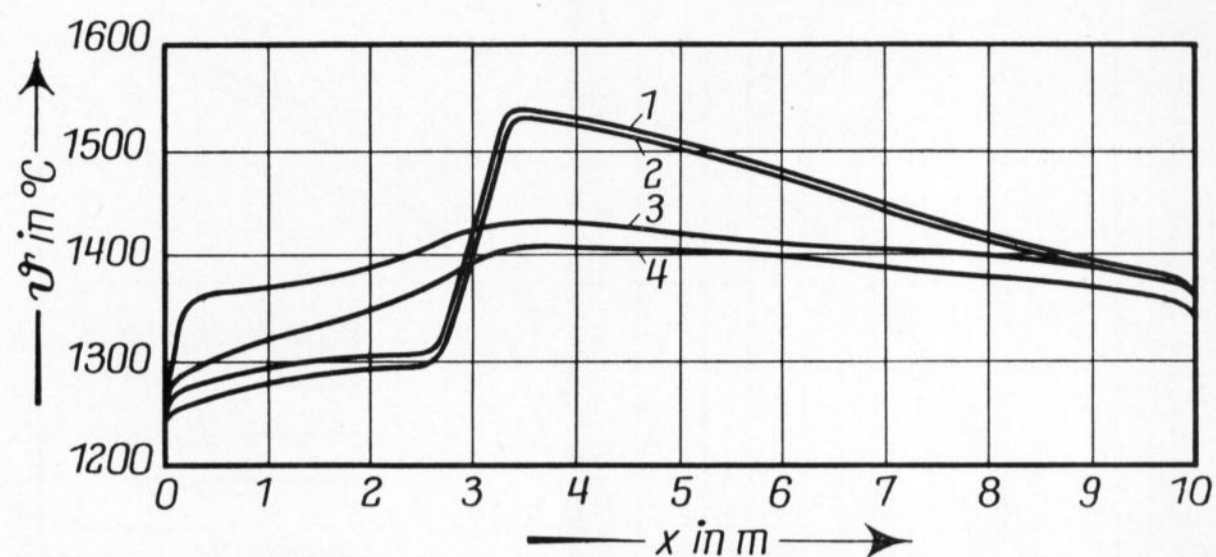


Bild 12. Temperaturverläufe mit und ohne Bodenisolierung.

- 1:  $k_u = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - 2:  $k_u = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - 3:  $k_u = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - 4:  $k_u = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Temperaturen an der Oberfläche;  
Temperaturen etwa 0,1 m unter der Oberfläche.

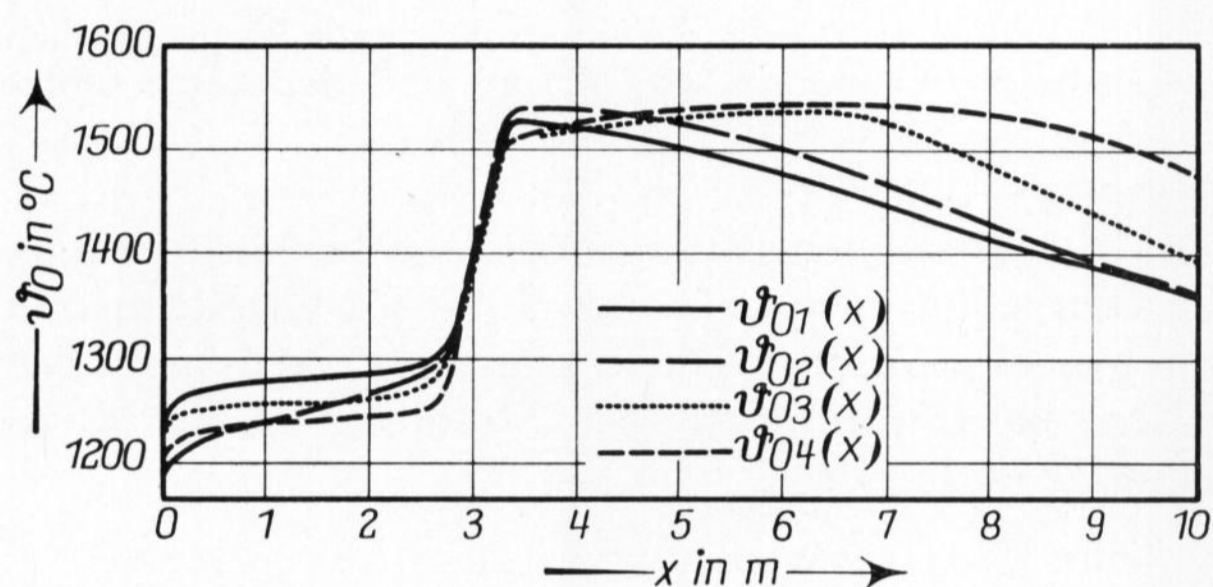


Bild 14. Oberflächentemperaturen zu verschiedenen Heizgastemperaturen.

den, zeigen eine noch ungünstigere Betriebsweise auf: Die „kritische“ Stromlinie führt in diesen beiden Fällen nicht an der Oberfläche entlang, sondern vom Bodenbereich her sofort zum Durchlaß hin.

Der berechnete „Normalfall“ mit einem Verhältnis der Wärmedurchgangskoeffizienten an den Seitenwänden zu denen am Boden von 4:1 zeigt hingegen einen längeren Verlauf der „kritischen“ Stromlinie an der Oberfläche. Außerdem herrschen hier geringere Geschwindigkeiten als im Fall der Bodenisolierung vor. In bezug auf die stoffliche Homogenisierung ist der „normale“ Betriebszustand also günstiger als die Betriebszustände mit über das übliche Maß hinausgehender Boden- oder Seitenwandisolierung.

### 6.7. Einflüsse der Umgebungstemperaturen

Den Berechnungen der Temperatur- und Strömungsfelder wurden verschiedene Heizgas-Temperaturverläufe vorgegeben, um rückschließen zu können, wie sich die Heizleistungen auf die verschiedenen Brenner verteilen sollten. Insbesondere wurde die Lage des Temperaturmaximums in den Heizgasen verschoben (Bild 13).

Die größte thermische Homogenität und gleichzeitig auch der längste Verlauf der „kritischen“ Stromlinie an der freien Oberfläche wurden dann erzielt, wenn das Temperaturmaximum in den Heizgasen über dem Gemenge (bei etwa  $x \approx 2,50 \text{ m}$ ) lag. Verschiebt man das Temperaturmaximum weiter zur Wannennmitte hin (Bild 13:  $v_{b2}$ ), so verschlechtert sich die thermische Homogenität in der Schmelze. Auf Grund des dort hervorgerufenen erhöhten Wärmeübergangs steigen die Temperaturen in der von der Gemengedecke nicht mehr bedeckten Oberflächenschmelze so an, daß die „charakteristische Temperaturdifferenz an der Oberfläche“ (siehe Abschnitt 6.1.) vergrößert wird (Bild 14:  $v_{02}$ ). Im Vergleich zum „normalen“ Betriebszustand werden da-

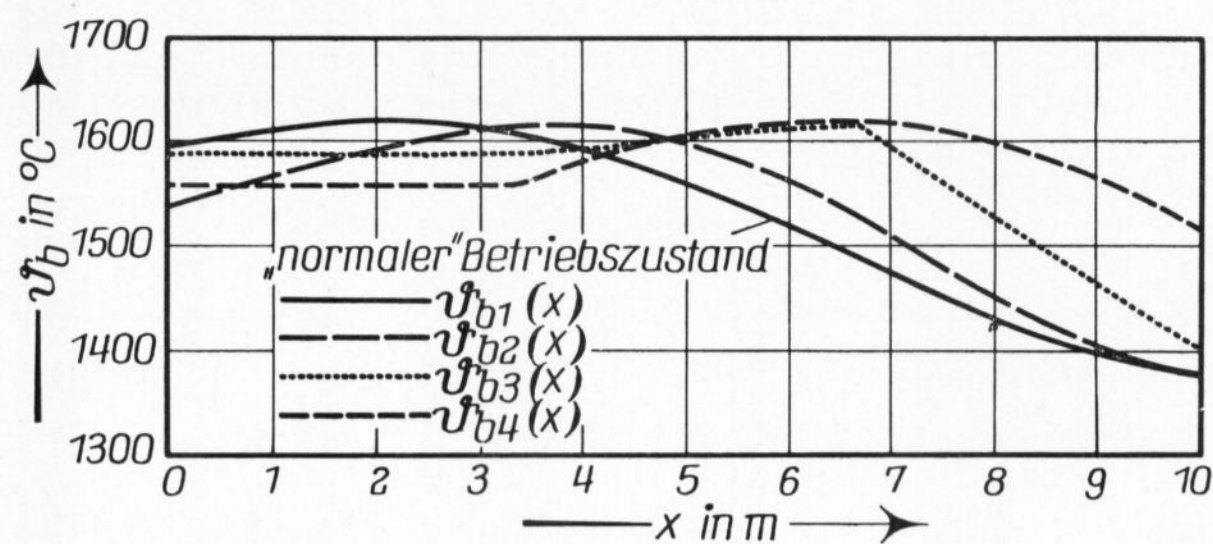


Bild 13. Heizgastemperatur im Oberofen.

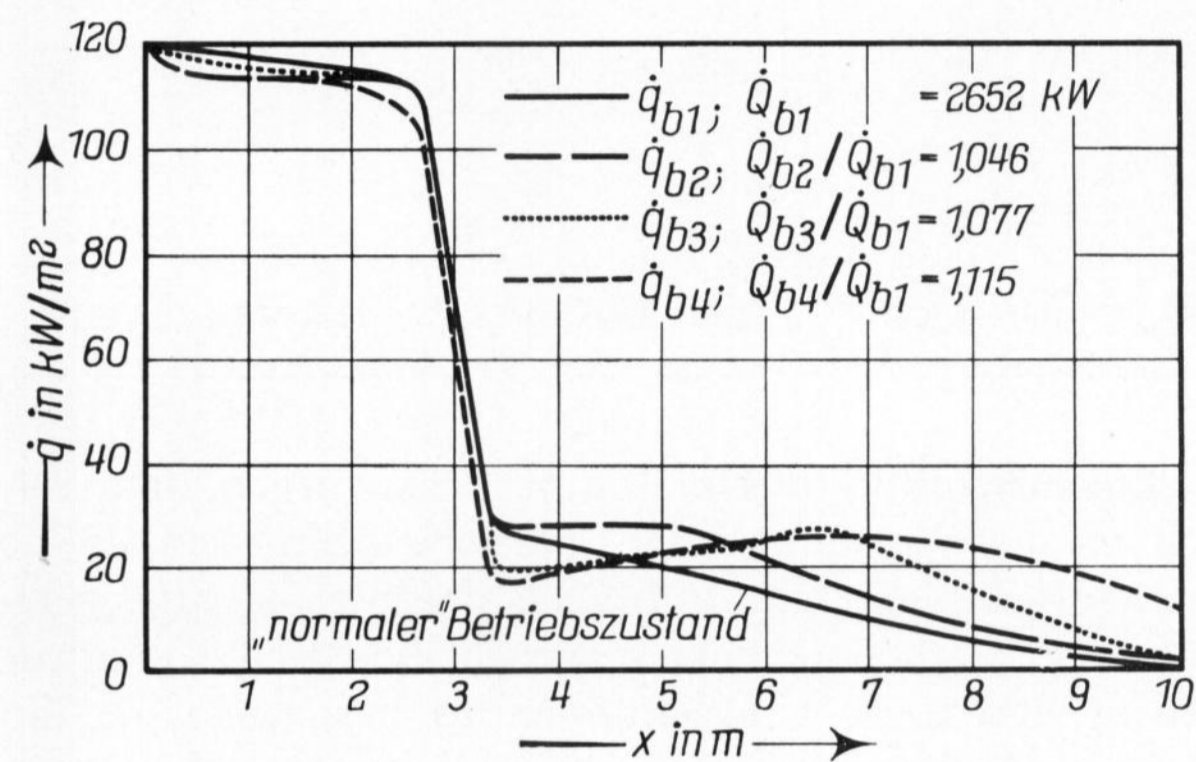


Bild 15. Wärmestromdichten an der Glasbadoberfläche für verschiedene Heizgastemperaturen.

durch die Hauptströmungswalze stärker beschleunigt und der Verlauf der „kritischen“ Stromlinie an der Oberfläche verkürzt. Diese negativen Effekte werden verstärkt, wenn gleichzeitig mit der Verschiebung des Temperaturmaximums die Heizgastemperaturen und somit auch die Wärmestromdichten (Bild 15) im Bereich der freien Oberfläche erheblich erhöht werden.

Bezogen auf die Lage des Temperaturmaximums ergibt sich also dann eine um so günstigere Betriebsweise, je weiter das Temperaturmaximum der Heizgase in Richtung des Gemengebereichs verschoben wird. Aus den hier berechneten Ergebnissen läßt sich folgern, daß von den üblicherweise über Glasschmelzwannen in gleichen Abständen nebeneinander angebrachten 5 bis 6 Brennern die beiden ersten Brenner über dem Gemenge so ausgelegt sein sollten, daß sie die größte Energie zuführen. Alle folgenden sollten eine von Brenner zu Brenner verminderte Leistung abgeben.

### 6.8. Einflüsse der Länge der Gemengedecke

Unterschiedliche Längen der Gemengedecke bei konstantem Durchsatz können durch unterschiedliche Brennereinstellungen hervorgerufen werden. So kann man durch höhere Wärmezufuhr den Schmelzablauf beschleunigen und dadurch eine kürzere Gemengedecke erzielen. Die sich auf Grund eines solchen intensiveren Abschmelzens (Bild 16) einstellenden Temperatur- und Strömungsfelder sind für die Länge der Gemengedecke  $S = 1/5 L$  berechnet worden; alle anderen Parameter des Normalfalles, also auch der Durchsatz (Tabelle 2), sind beibehalten worden. Die Massenstromdichte wird durch die Verkürzung der Gemengedecke gesteigert, weil nun mehr Gemenge je Fläche und Zeit abschmilzt. Infolgedessen vergrößert sich auch die durch die Gemengeerschmelzung hervorgerufene Wärmesenke pro Fläche, so daß die Temperatur in diesem Bereich ab-

sinkt (Bild 17). Die so vergrößerte „charakteristische Temperaturdifferenz an der Oberfläche“ beschleunigt die Rotation der Hauptströmungswalze so stark, daß der thermische Quellpunkt in Richtung des Durchlasses verschoben und die schwache Gegenwalze in die obere rechte Wannenecke verdrängt werden.

Ein solcher Betriebszustand widerspricht den Bestrebungen nach immer größerer Glashomogenität,

1. weil die Temperaturunterschiede vergrößert werden und sich dadurch die thermische Homogenität der Schmelze verschlechtert,

2. weil die „kritische“ Stromlinie nicht durch die für die stoffliche Homogenisierung wichtigen wärmeren Bereiche der Oberflächenschmelze führt.

Diese Nachteile lassen sich vermeiden, wenn das Gemenge stärker verteilt und langsamer abgeschmolzen wird. Bei einer Gemengeauflage von  $S = 1/2 L$  sind folgende Veränderungen gegenüber dem „Normalfall“ erkennbar:

a) Die Temperatur im Bereich Gemenge/Schmelze steigt an, da die durch die Gemengeerschmelzung verursachte Wärmesenke je Fläche auf Grund der geringeren Massenstromdichte verkleinert wird.

b) Infolge der Temperaturzunahme im Gemengebereich sind die Temperatur und die vom Oberofen in die Schmelze eindringenden Wärmeströme gleichmäßiger verteilt (Bilder 16 u. 17). Dadurch nehmen die Geschwindigkeiten in der Schmelze ab.

c) Der thermische Quellpunkt wird zur Gemengeseite hin verschoben, so daß die „kritische“ Stromlinie länger im heißen Oberflächenbereich verläuft.

Diese in bezug auf die Homogenisierung günstige Betriebsweise läßt sich also erzielen, wenn die Gemengedecke dünn aufgetragen und langsam abgeschmolzen wird. Darüber hinaus erweist es sich als vorteilhaft, eine Auflockerung der Gemengedecke durch die Bildung vieler (dünner) Gemengeinseln anzustreben, um die durch den Schmelzprozeß entstandenen Wärmesenken besser über die Schmelzoberfläche zu verteilen.

### 6.9. Einflüsse von Durchsatzänderungen

Eine Änderung der Entnahmestromung unter Beibehaltung der Gemengedeckenlänge könnte dadurch verwirklicht werden, daß gleichzeitig Gemengezufuhr und Brennerleistung erhöht oder gesenkt werden. Es

wurden folgende Durchsätze berechnet:  $\frac{\dot{M}}{A_0} = 1,0; 1,6;$

$2,0; 2,4; 3,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$ . Die Massenstromdichte

$\frac{\dot{M}}{A_0} = 2,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$  entspricht dem in Bild 6 dargestellten „Normalfall“.

Wird die Entnahmestromung auf den Wert  $\frac{\dot{M}}{A_0} =$

$10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$  oder  $\frac{\dot{M}}{A_0} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$  erniedrigt, so

verringert sich auch die Wärmesenke an der Grenzfläche Gemenge/Schmelze, da nun weniger Gemenge erschmolzen wird. Die Temperatur steigt infolgedessen in der gesamten Schmelze, insbesondere aber unterhalb der Gemengedecke an, so daß die Temperaturgradienten ebenso wie die „charakteristische Temperaturdiffe-

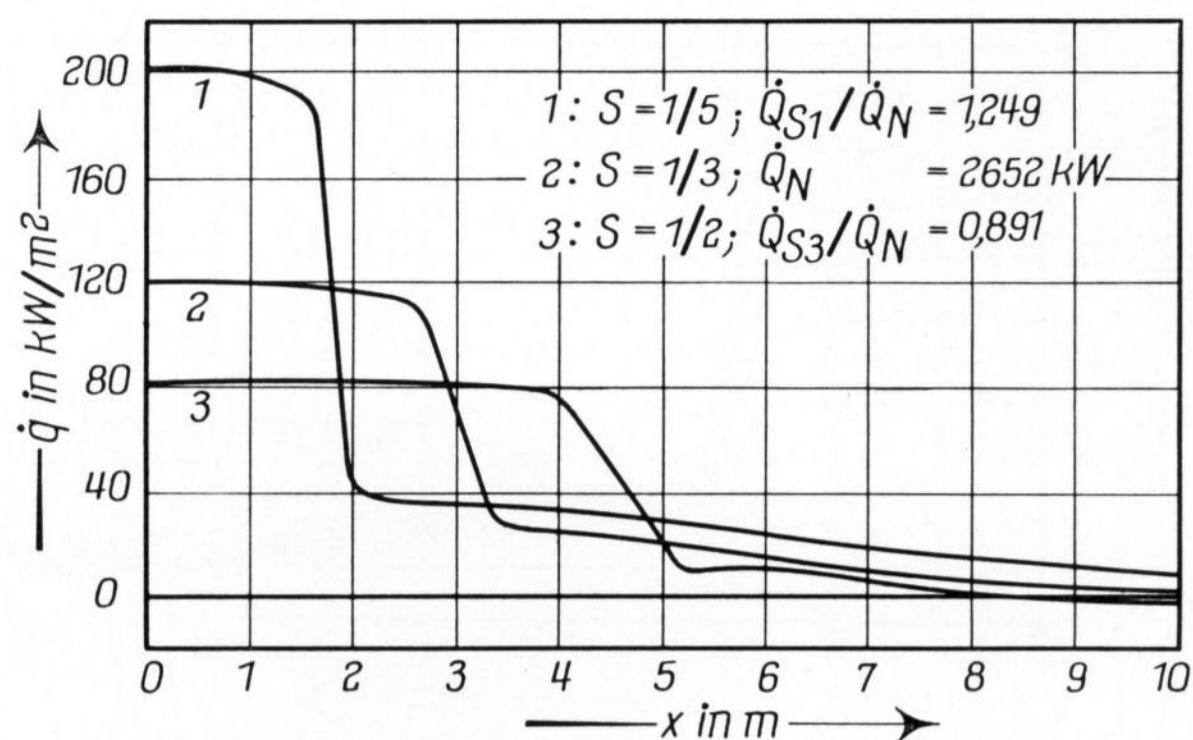


Bild 16. Wärmestromdichten an der Glasbadoberfläche für verschiedene Längen der Gemengeauflage.

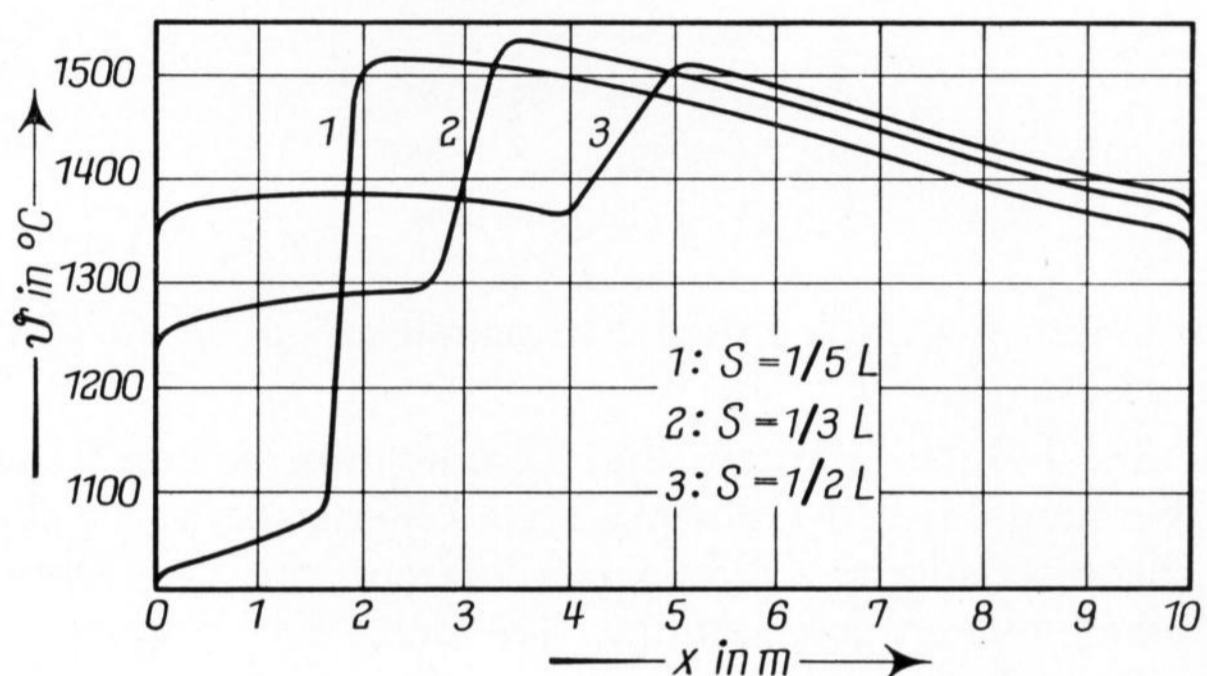


Bild 17. Oberflächentemperaturen bei verschiedenen langen Gemengedecken.

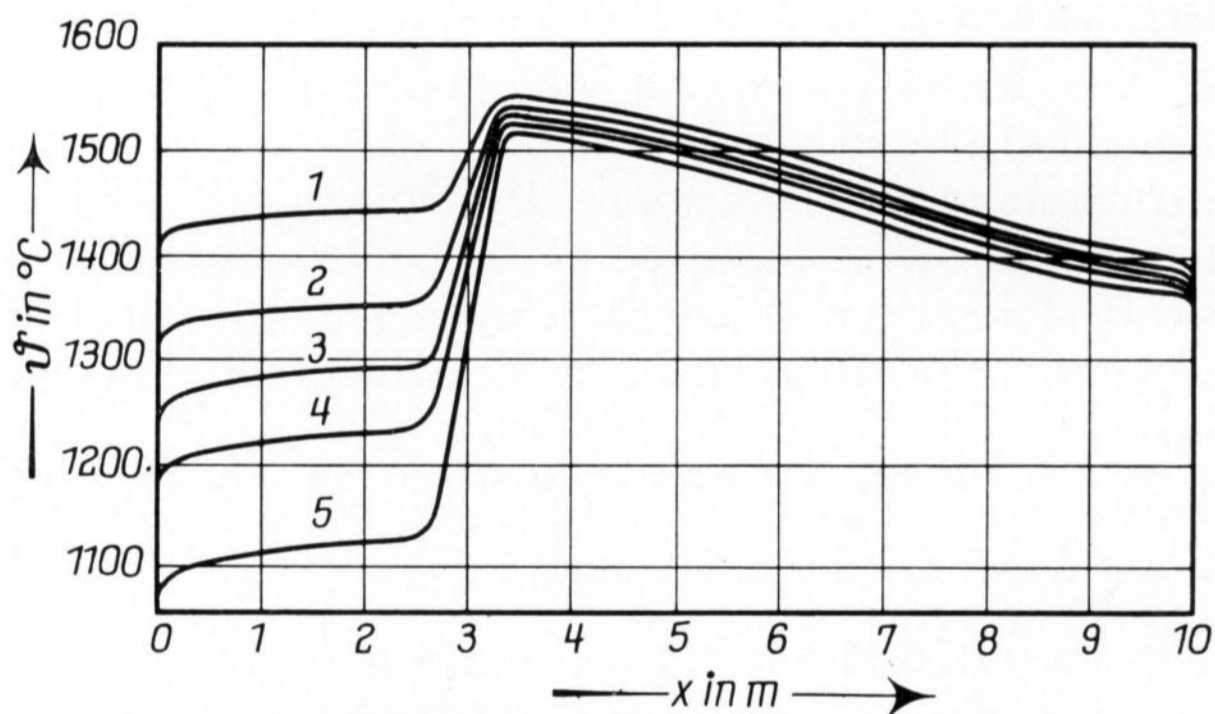


Bild 18. Oberflächentemperaturen für verschiedene Durchsätze.

$\dot{M}/A_0$  in  $10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$ : 1  $\cong$  1,0; 2  $\cong$  1,6; 3  $\cong$  2,0; 4  $\cong$  2,4; 5  $\cong$  3,0.

renz“ im Bereich Gemenge/freie Oberfläche stark vermindert werden (Bild 18). Auf diese Weise werden die Hauptströmungswalze abgeschwächt und die Gegenwalze in der linken oberen Wannenecke so verstärkt, daß der thermische Quellpunkt in Richtung der Gemengezufuhr rückt.

Ein solcher Betriebszustand scheint sich sehr günstig auf die Qualität des zu gewinnenden Glases auszuwirken, da die „kritische“ Stromlinie lange an der heißen Oberfläche entlangführt und so die Homogenisierungsprozesse gefördert werden. Dieser, bei kleineren Durchsatzmengen günstigen Betriebsweise steht aber der Wunsch nach höheren Schmelzleistungen entgegen. Wird der Glasdurchsatz um 50% erhöht, treten jedoch nachteilige Effekte auf:

1. Die Temperaturen an der Grenzfläche Gemenge/Schmelze sinken trotz erhöhter Energiezufuhr von den

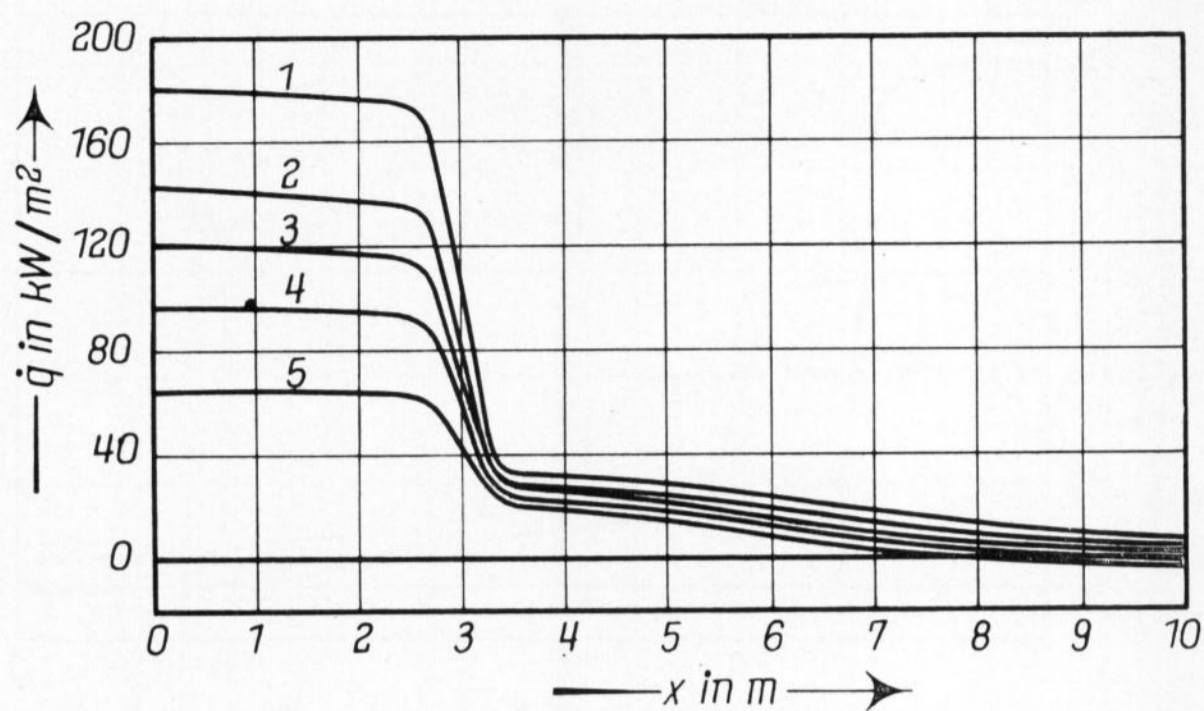


Bild 19. Wärmestromdichten an der Glasbadoberfläche für verschiedene Durchsätze.

$\dot{M}/A_0$  in  $10^3$  kg/m<sup>2</sup>d: 1  $\hat{=}$  1,0 mit  $\dot{Q}_1/\dot{Q}_N = 0,530$ ;  
 2  $\hat{=}$  1,6 mit  $\dot{Q}_2/\dot{Q}_N = 0,792$ ;  
 3  $\hat{=}$  2,0 mit  $\dot{Q}_N = 2652$  kW;  
 4  $\hat{=}$  2,4 mit  $\dot{Q}_4/\dot{Q}_N = 1,188$ ;  
 5  $\hat{=}$  3,0 mit  $\dot{Q}_5/\dot{Q}_N = 1,495$ .

Brennern gegenüber dem Normalfall erheblich ab (Bild 18 u. 19).

2. Als Folgen werden die Temperaturgradienten im Übergangsbereich Gemenge/freie Oberfläche sowie die „charakteristische Temperaturdifferenz an der Oberfläche“ wesentlich erhöht, so daß die Hauptströmungswalze beschleunigt wird.

3. Bei so hohen Durchsätzen führt die „kritische“ Stromlinie direkt zum Durchlaß, ohne die heißere Oberflächenschmelze zu durchqueren.

Aus den beschriebenen Variationen der Durchsatzmengen ergibt sich als Forderung, daß die „kritische“ Stromlinie zur Verbesserung der Homogenität auf jeden Fall an der Oberfläche entlang führen sollte. Aus den Berechnungen ist jedoch deutlich geworden, daß die genannten Forderungen bei einer Schmelzleistung von  $\frac{\dot{M}}{A_0} = 2,4 \cdot 10^3$  kg/m<sup>2</sup> d gerade noch und bei  $\frac{\dot{M}}{A_0} = 3,0 \cdot 10^3$  kg/m<sup>2</sup> d nicht mehr erfüllt sind.

#### 6.10. Variationen der Durchsatzströmung in Verknüpfung mit Längenänderungen der Gemengeauflage

Durchsatzänderungen unter Beibehaltung der Gemengeauflagenlänge sind ebenso wie Abwandlungen der Gemengedeckenlänge bei gleichem Durchsatz immer mit einer Variation der Gemengeschichtdicke verknüpft. Falls aber die Einlegemaschinen die Dicke der Gemengeauflage konstant halten könnten, so müßte sich die Länge der Gemengeauflage etwa im gleichen Verhältnis wie der Durchsatz verändern. (Eine thermische Volumenausdehnung wird hier vernachlässigt.) Diese These scheint durch die Realität bestätigt zu sein, wenn man sich vergegenwärtigt, daß die Gemengezufuhr durch eine Niveaumessung gesteuert wird und dadurch auch die Einlegemaschinen nahezu kontinuierlich betrieben werden. Werden die Schmelzentnahmen gesteigert, so schieben die Einlegemaschinen mehr Gemenge nach, so daß der Gemenge Teppich verlängert wird. Umgekehrt verkürzt sich der Gemenge Teppich durch Abschmelzen, wenn die Glasentnahme gedrosselt und weniger Gemenge nachgeschoben wird. Die hier berechneten Durchsatzänderungen sind in der Praxis

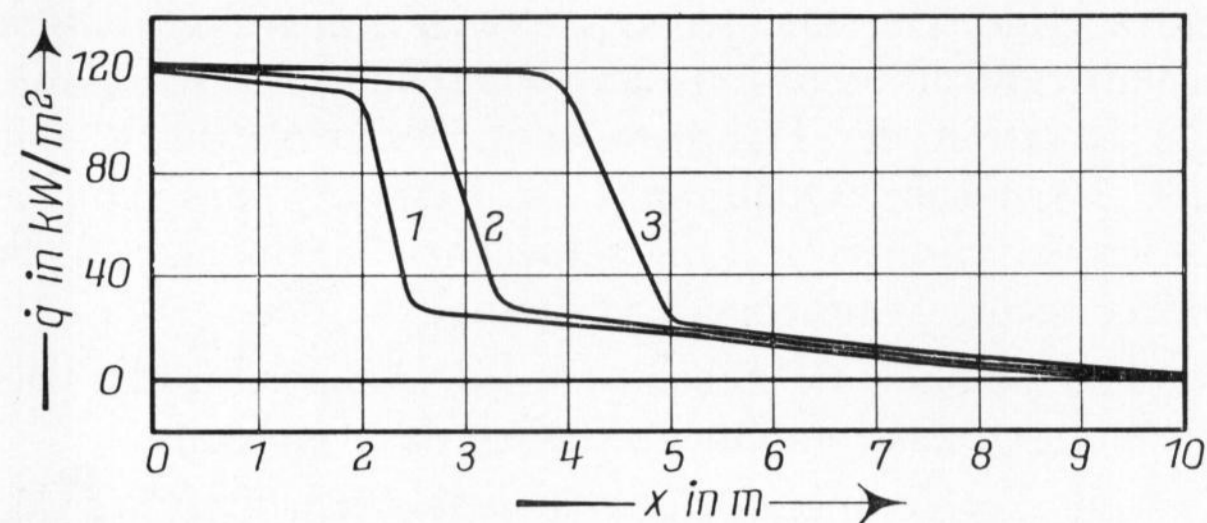


Bild 20. Wärmestromdichten an der Glasbadoberfläche für verschiedene Durchsätze und Gemengedeckenlängen.

$\dot{M}/A_0$  in  $10^3$  kg/m<sup>2</sup> d: 1  $\hat{=}$  1,5 und SL = 1/4 L mit  $\dot{Q}_1/\dot{Q}_N = 1,348$ ;  
 2  $\hat{=}$  2,0 und SL = 1/3 L mit  $\dot{Q}_N = 2652$  kW;  
 3  $\hat{=}$  3,0 und SL = 1/3 L mit  $\dot{Q}_3/\dot{Q}_N = 0,815$ .

meistens geringfügig klein. In der theoretischen Betrachtung aber werden sie stärker variiert, um die auftretenden Effekte klarer hervorzuheben.

So ist der Grenzfall der auf Null reduzierten Entnahmestromung ( $\frac{\dot{M}}{A_0} = 0$  kg/m<sup>2</sup> d) und Gemengedeckenlänge (S = 0 m) zwar in der linearen Verknüpfung S(m) enthalten, gewinnt aber nur für die theoretische Betrachtung an Bedeutung. Das Isothermen- und Stromlinienbild verdeutlicht gerade in diesem Sonderfall die Abhängigkeit des Strömungsbildes vom Temperaturfeld. Da kein Gemenge erschmolzen wird, stellt sich dort die heißeste Oberflächentemperatur in der Schmelze ein, wo die Umgebungstemperatur im Oberofen am heißesten ist (x  $\approx$  2,5 m). Überdies entfallen die großen Temperaturgradienten am Übergang der Gemengedecke zur freien Oberfläche. Die Temperaturgradienten in x-Richtung sind also sowohl an der freien Oberfläche als auch innerhalb der Schmelze sehr gering. Lediglich in der rechten oberen Wannenecke macht sich der verminderte Wärmestrom vom Oberofen her in den zur Oberfläche hin abgelenkten Isothermen bemerkbar. Diese Störung in der fast thermisch geschichteten Schmelze ist die Ursache für die Verstärkung der beinahe über die ganze Wannenzuglänge ausgedehnten Gegenwalze. Die im „normalen“ Betriebszustand dominierende Hauptwalze ist so stark abgeschwächt, daß sie nur noch im linken unteren Wannenzugbereich wirksam wird.

Über den theoretischen Grenzfall fehlender Gemengezufuhr hinaus wurden die Temperatur- und Strömungsfelder für eine gegenüber dem „normalen“ Betriebszustand um 50% erhöhte und für eine um 25% verminderte Gemengezufuhr berechnet.

Die jeweiligen Längen der Gemengeauflagen wurden — gemäß der eingangs in diesem Abschnitt genannten These — im gleichen Verhältnis geändert. Die um 50% erhöhte Gemengezufuhr verursacht eine Temperaturabsenkung in der Schmelze,

1. weil mehr Gemenge erschmolzen werden muß,
2. weil ein zusätzlicher Teil der freien Schmelzoberfläche nunmehr vom Gemenge abgedeckt wird und für den Wärmeübergang vom Oberofen her nicht mehr zur Verfügung steht (Bild 20).

Demzufolge steigt die Temperatur in der Schmelze bei der um 25% verminderten Gemengezufuhr, da hier weniger Gemenge erschmolzen wird und weniger Schmelzoberfläche vom Gemenge bedeckt ist. Trotz der in beiden Fällen stark voneinander abweichenden

Schmelzleistungen unterscheiden sich die Temperaturen im Gemengebereich für die erhöhte und die verringerte Gemengezufuhr lediglich um etwa  $\Delta\vartheta \approx 22 \text{ K}$  ( $x \approx 1,6 \text{ m}$ ) (Bild 21).

Eine geringe Temperaturabsenkung im Gemengebereich ist deshalb wünschenswert, weil — wie in den vorhergehenden Abschnitten bereits erwähnt — die „charakteristische Temperaturdifferenz an der Oberfläche“ dann nicht allzu stark vergrößert und infolgedessen auch die Hauptströmungswalze nicht erheblich verstärkt werden (Bild 21). Hätte sich die Gemengedeckenlänge nicht gleichzeitig mit dem Durchsatz geändert, so wäre diese Temperaturdifferenz um ein Vielfaches angewachsen (Bild 21). Auch der Betriebszustand hätte sich verschlechtert, weil die Geschwindigkeiten in der Wanne erheblich gestiegen wären und die „kritische“ Stromlinie nicht zur Oberfläche hin geführt hätte.

Wird also die Gemengedecke möglichst gleichmäßig dünn auf die Schmelze aufgelegt und entstehen durch den diskontinuierlichen Betrieb der Einlegemaschinen keine Änderungen in der Dicke der Gemengedecke, so sind Steigerungen der Schmelzleistung möglich, ohne daß der günstige Verlauf der „kritischen“ Stromlinie empfindlich gestört wird und demzufolge eine wesentliche Verschlechterung der Homogenisierungsprozesse eintritt.

## 7. Aus den Berechnungen resultierende Verbesserungsmöglichkeiten des Betriebszustandes

Aus der Variation der einzelnen Parameter wurden Verbesserungsmöglichkeiten für den Wannbetrieb in bezug auf thermische und stoffliche Homogenität ermittelt. Die Ergebnisse gelten streng genommen nur in Verbindung mit den in den Abschnitten 3.1. und 3.2. erläuterten Annahmen für die Eigenschaften des Glases und für die vorausgesetzten Randbedingungen. Insbesondere könnten die Ergebnisse von den tatsächlich herrschenden Temperaturen und Geschwindigkeiten in der Wanne stärker abweichen, falls der Transmissionsgrad der Strahlung zunehmen würde. Falls aber die optische Dicke groß gegen 1 ist (Abschnitt 3.1.), sind günstige Betriebsweisen unmittelbar aus folgenden Ergebnissen ableitbar:

1. Der Glasstand  $H = 0,8 \text{ m}$  erweist sich im Verhältnis zu den größeren Glasbadhöhen  $H = 1,0 \text{ m}$  und  $H = 1,2 \text{ m}$  als günstiger. Das Temperaturfeld ist ausgeglichener und der Verlauf der „kritischen“ Stromlinie an der Oberfläche etwas länger als in den beiden anderen Fällen.
2. Eine über das übliche Maß hinausgehende Bodenisolierung steigert zwar die thermische Homogenität der Schmelze, verkürzt aber leicht die „kritische“ Stromlinie an der freien Oberfläche.
3. Je weiter das Maximum der Heizgastemperaturen in Richtung der Gemengeauflage gerückt wird, desto günstiger sind Temperaturengleich und Strömungsverlauf.
4. Die Gemengedecke sollte lang, dünn und durch Inselbildungen aufgelockert sein, so daß die durch den Schmelzprozeß entstandenen Wärmesenken besser verteilt werden.
5. Falls Durchsatz und Brennerleistung gleichzeitig erhöht werden, ohne daß sich die Länge der Gemengeauflage ändert, entstehen große Temperaturdifferenzen

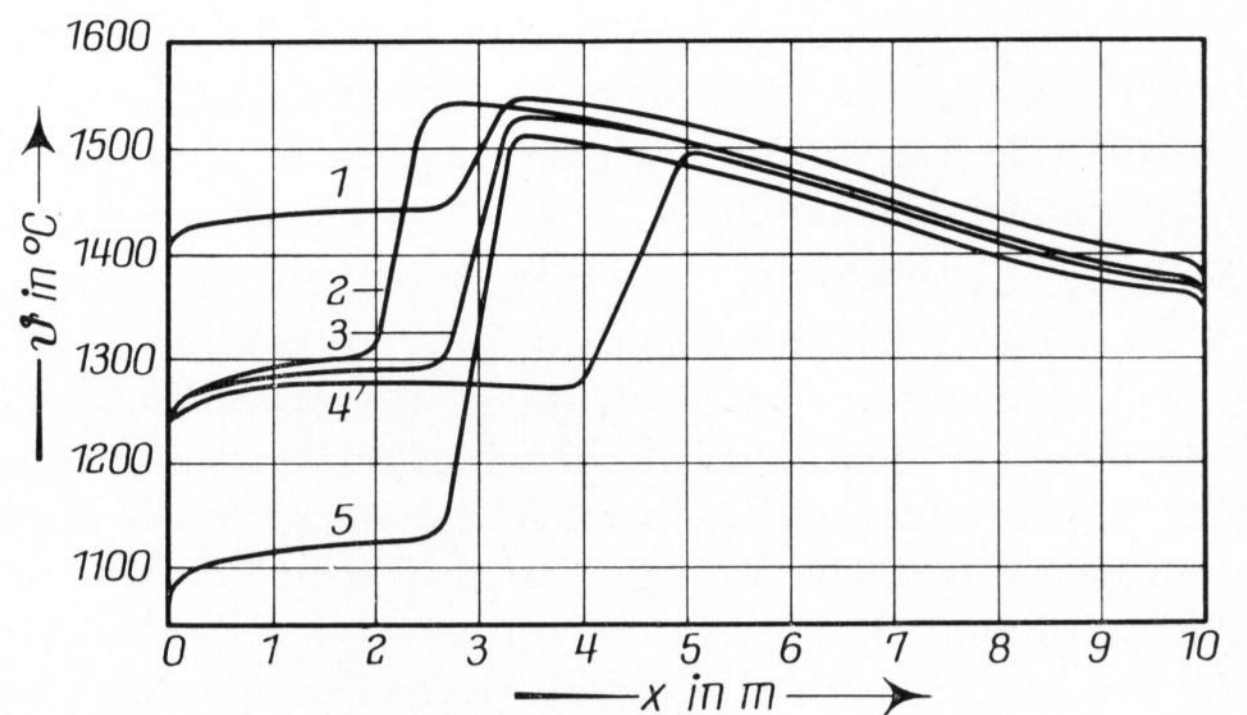


Bild 21. Oberflächentemperaturen für verschiedene Durchsätze und Gemengedeckenlängen.

$\dot{M}/A_0$  in  $10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$ : 1  $\hat{=} 1,0$  und  $S = 1/3 \text{ L}$ ;  
2  $\hat{=} 1,5$  und  $S = 1/4 \text{ L}$ ; 3  $\hat{=} 2,0$  und  $S = 1/3 \text{ L}$ ;  
4  $\hat{=} 3,0$  und  $S = 1/2 \text{ L}$ ; 5  $\hat{=} 3,0$  und  $S = 1/3 \text{ L}$ .

in der Schmelze und eine beträchtliche Verkürzung der „kritischen“ Stromlinie im Oberflächenbereich. Somit wird die thermische und stoffliche Homogenität der Schmelze erheblich verschlechtert

Während die unter 1., 2. und 3. genannten Einflüsse die jeweiligen Strömungsbilder nur mäßig verändern, reagiert die Strömung wesentlich stärker auf Durchsatzänderungen und Variationen der Gemengeverteilung an der Schmelzoberfläche (4. und 5.).

Um gleichzeitig mit den Steigerungen der Schmelzleistung eine günstige Strömung in der Schmelze erzielen zu können, ist es notwendig, Durchsatzmenge und Gemengedeckenlänge miteinander zu verknüpfen. Es zeigte sich, daß die Durchsatzmenge bei nur geringen Verkürzungen der „kritischen“ Stromlinie an der freien Oberfläche wesentlich (um etwa 50%) gesteigert werden konnte, falls die Gemengedeckenlänge gleichzeitig in demselben Verhältnis zunahm.

## 8. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte ein zweidimensionales Modell erstellt werden, das auf dem Bild eines Längsschnitts durch die Glasschmelzwanne (Symmetrieebene) basiert und die wesentlichen Einflüsse des Gemengeabschmelzens und der Durchsatzströmung berücksichtigt (Abschnitt 2.).

Den Ausgangspunkt der Berechnungen bildete ein System von vier gekoppelten Differentialgleichungen (für die Kontinuität, die Energie und den Impuls in den zwei betrachteten Dimensionen), das auf zwei miteinander verknüpfte partielle Differentialgleichungen reduziert und mittels umfassender Randbedingungen gelöst wurde (Abschnitte 3.1. und 3.2.).

Zur numerischen Berechnung des Differentialgleichungssystems ist ein explizites, instationäres Differenzenverfahren gewählt worden (Abschnitt 3.3.). Bei dem hier gewählten Lösungsweg war es notwendig, für die Ermittlung der Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder solche speziellen Interpolationsfunktionen zu entwickeln, die Partikulärlösungen der Differentialgleichungen sind. Eine zusätzliche Erschwernis ergab sich für die Energiegleichung dadurch, daß die Interpolationsfunktion für den zweidimensionalen Fall alle Kombinationsmöglichkeiten zwischen dem Grenzfall der reinen Wärmeleitung und dem der reinen Wärmekonvektion physikalisch richtig wiedergeben mußte (Abschnitt 3.4.).

Dieses als „Teilgebietmethode“ bezeichnete numerische Lösungsverfahren wurde sowohl in bezug auf die theoretische Entwicklung als auch auf die Rechenergebnisse mit der sogenannten „upwind difference“-Technik verglichen (Abschnitte 3.4. und 6.3.).

Aus den Rechenergebnissen für verschiedene Stoffwertkombinationen wurde deutlich, daß das Strömungsfeld in seinen charakteristischen Merkmalen kaum von der Wärmeleitfähigkeit, in entscheidendem Maße aber von der Viskosität abhängt. Es stellt sich deshalb die Frage, ob die Ähnlichkeit der Strömung bei Modellversuchen nicht genauer durch die Grashof-Zahl, statt wie bisher üblich, durch die Rayleigh-Zahl wiedergegeben werden könnte (Abschnitt 6.4.).

Die Temperatur- und Strömungsfelder wurden überdies für verschiedene Boden- und Wandisolierungen, Heizgastemperaturverteilungen, Gemengedeckenlängen und Durchsätze berechnet und im Hinblick auf eine qualitative Begünstigung oder Verschlechterung der Homogenisierungsprozesse untersucht (Abschnitte 6.5. bis 6.10.). Es zeigte sich, daß eine von der Gemengedecke zum Durchlaß führende Stromlinie für die Homogenisierung besonders kritisch ist, weil je nach Wanneneinstellung die Gefahr besteht, daß die Partikeln auf die

ser Bahn ihren Weg durch die Glaswanne zu schnell zurücklegen und die sowohl temperatur- als auch geschwindigkeitsabhängigen Diffusionsvorgänge nicht in ausreichendem Maße gewährleistet sind (Abschnitte 6.1. und 6.2.). Ein örtlich langer Verlauf der „kritischen“ Stromlinie an der freien Oberfläche wurde als besonders günstig erkannt, da in allen untersuchten Fällen, in denen dieser örtlich ausgedehnte Verlauf auftrat, gleichzeitig geringe Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Gebiet deutlich wurden. Deshalb sind die Variationen der verschiedenen Wannensparameter mit dem Verlauf der „kritischen“ Stromlinie in Beziehung gesetzt und beurteilt worden (Abschnitt 7.).

Aus den daraus gewonnenen Ergebnissen wurden qualitativ günstige Wanneneinstellungen ermittelt und eine Möglichkeit aufgezeigt, den Durchsatz zu erhöhen, ohne die Homogenisierungsprozesse wesentlich zu beeinträchtigen.

Die Durchführung der Arbeit wurde durch finanzielle Unterstützung seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, und der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt (Main), ermöglicht. Für diese Hilfe sei an dieser Stelle nochmals bestens gedankt.

#### 9. Literatur

- [19] TRIER, W.: Temperaturmessungen im Glasbad von Wanneneöfen. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 5 – 12.
- [20] SCHULZ, E. O.: Maximale spezifische Schmelzleistung der Hohlglaswannen. Sprechsaal **84** (1951) S. 198 – 203, 221, 241 – 242, 264 – 266. [Ref. Glastechn. Ber. **25** (1952) S. 31.]
- [21] KINGERY, W. D.: Heat-conductivity processes in glass. J. Amer. ceram. Soc. **44** (1961) S. 302 – 304.
- [22] KRÖGER, C. und ELIGEHAUSEN, H.: Über das Wärmeleitvermögen des einschmelzenden Glasgemenges. Glastechn. Ber. **32** (1959) S. 362 – 373.
- [23] BRAUN-ANGOTT, P.: Über den Energietransport in glasdurchströmten zylindrischen Kanälen. Glastechn. Ber. **45** (1972) S. 261 – 270.