

DK 666.1.031.2:666.1.031.153:666.1.031.13:532.5

Beitrag zur Berechnung der Läutervorgänge in Glasschmelzwannen*)

Von Franz Ferdinand Rhiel, Dormagen

(Vortrag auf dem HVG-Kolloquium „Glasströmungen in Wannenöfen“ am 30. Oktober 1975 in Frankfurt (Main))

(Mitteilung aus dem Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik im Hüttenwesen der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen)

(Eingegangen am 3. August 1976)

Es wird von einem mathematischen Modell zur Berechnung der Strömungs- und Temperaturfelder in Glasschmelzwannen ausgegangen. Diese Felder sind die Eingabedaten für ein auf der substantiellen Betrachtungsweise beruhendes mathematisches Modell, mit dem die Läutervorgänge in der Schmelze erfaßt werden können.

Bei der Berechnung des Blasenauftiegs werden die Abhängigkeit des hydrodynamischen Widerstands von der Viskosität und damit von der Temperatur sowie der Einfluß

des Sauerstoffpartialdrucks auf die Blasengröße berücksichtigt.

Eine Kennzahl gibt die Läuterbedingungen entlang den von der Gemengedecke bis zum Durchlaß führenden Strömungsbahnen wieder. Bei Variation der Wannenparameter lassen sich aus dem Verlauf dieser Kennzahl Tendenzen hinsichtlich der Läuterung ablesen, wodurch Hinweise für eine Verbesserung der Wannenführung gewonnen werden können.

Contribution to calculation of the refining process in glass tanks

A mathematical model for the calculation of the flow and temperature distributions in glass tanks is set out. These distributions then provide input data for a mathematical model to calculate the progress of refining in the melt.

Bubble rise is calculated taking into account the hydrodynamic resistance which depends on viscosity, hence temperature, and bubble size, also the oxygen partial pressure.

A characteristic number can be derived to describe refining conditions along various flow paths from the batch cover to the throat. By varying tank parameters the refining process can be predicted by changes in this refining number and information helpful in improving tank operation can be obtained.

Contribution au calcul des processus d'affinage dans les bassins de verrerie

On part d'un modèle mathématique au calcul des champs de courants et de température dans les bassins de verrerie. Ces champs fournissent les données de base d'un modèle mathématique qui repose sur l'analyse de la substance et qui permet d'appréhender les processus d'affinage intervenant dans la fonte.

Pour le calcul du mouvement ascensionnel des bulles, on tient compte du fait que la résistance hydrodynamique est fonction de la viscosité et, par conséquent, de la température

et l'on prend en considération l'influence de la pression partielle d'oxygène sur la grosseur des bulles.

Un nombre caractéristique est fournie par les conditions d'affinage le long des lignes de courants qui partent du tapis de composition pour atteindre la gorge. Lorsque les paramètres du four varient, l'évolution de ce nombre caractéristique permet de discerner les tendances du processus d'affinage et d'obtenir des indications en vue d'optimiser la conduite du four.

Von Leyens [1] ist ein mathematisches Modell entwickelt worden, mit dem das Strömungsfeld und das Temperaturfeld in der Symmetrieebene der Glasschmelzwanne berechnet werden können. Auf diese Felder baut ein auf der substantiellen Betrachtungsweise beruhendes mathematisches Modell auf, das die Berechnung der Homogenisierungs- und Läutervorgänge in der Schmelzwanne ermöglicht [2].

In einem vorhergehenden Bericht [3] wurde das zuletztgenannte Modell vorgestellt und auf die Erfassung der Homogenisierungsvorgänge eingegangen. Als Fortsetzung zu diesem Bericht werden im folgenden die Läutervorgänge behandelt.

1. Vorgänge bei der Läuterung

Die Entgasung einer Schmelze erfolgt durch Blasenauftieg und Auflösung der Gase in der Schmelze. Während Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Wasserdampfblasen durch Auflösung und Aufsteigen entfernt werden können, kommt für Stickstoff nur der Aufstieg in Betracht [4]. Sowohl die für die verschiedenen Gase unterschiedliche Löslichkeit in der Schmelze als auch der Blasenauftieg sind sehr stark temperaturabhängig.

Eine Temperaturerhöhung verringert die Viskosität im Glasbad und damit den hydrodynamischen Widerstand beim Aufsteigen der Gasblasen. Bei steigender Temperatur nimmt die Löslichkeit der genannten Gase in der Schmelze ab [5 und 6]. Die Partialdrücke der Gase, die in der Schmelze gelöst sind, wachsen an und werden somit größer als die Drücke der Gase, die sich im Innern der in der Schmelze vorhandenen Blasen befinden. Es wird deshalb Gas in diese Blasen so lange eindringen, bis das Gleichgewicht der Partialdrücke wiederhergestellt ist. Bei der Sauerstoffläuterung macht man sich diesen Vorgang zunutze, indem man dem Gemenge sogenannte Läutermittel beimischt, die in einem bestimmten Temperaturintervall Sauerstoff abspalten. Sowohl die bei steigender Temperatur sinkende Löslichkeit als auch die Freisetzung von chemisch gebundenem Sauerstoff führen zu einem starken Anwachsen des Sauerstoffpartialdrucks in der Schmelze (Bild 1). Die Stickstoff-, Kohlendioxid-

*) Auszug aus der unter dem Titel „Beitrag zur Berechnung der Homogenisierungs- und Läutervorgänge in Glasschmelzwannen“ von der Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen genehmigten Dissertation des Autors 1976.

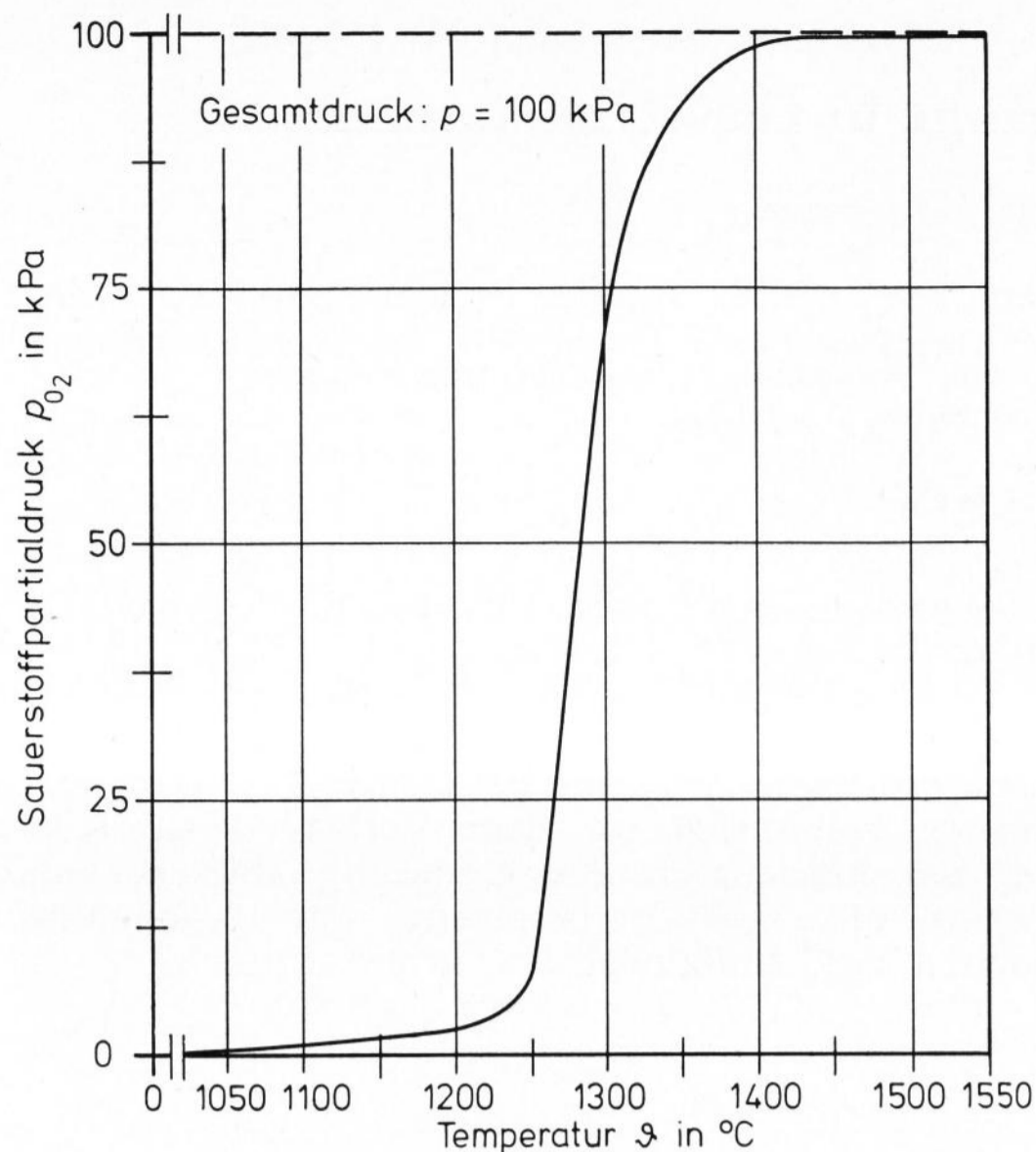


Bild 1. Sauerstoffpartialdruck in der Schmelze bei der ersten Erwärmung (100 kPa = 1 bar).

und Wasserdampfblasen in der Schmelze werden hierdurch aufgebläht und steigen schneller an die Glasbadoberfläche. Beim Eintritt der Glasschmelze in die Arbeitswanne, die der Schmelzwanne nachgeschaltet ist, nimmt infolge sinkender Temperatur die Löslichkeit zu. Dabei werden die noch vorhandenen Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Wasserdampfblasen von der Schmelze resorbiert [5].

Neben dem beschriebenen Gastransport in der Schmelze findet ein Gasaustausch durch Diffusion zwischen der Atmosphäre des Oberofens und dem Glasbad statt. Mulfinger [4] hat gezeigt, daß dieser Austausch sehr langsam verläuft und ein Gleichgewicht der Partialdrücke hierbei nur selten erreicht wird. Dagegen findet der Ausgleichvorgang zwischen Blase und Schmelze in sehr viel kürzerer Zeit statt. Dies gilt insbesondere für den Sauerstoff, bei dem bereits nach weniger als 5 min das Gleichgewicht der Partialdrücke zwischen Blase und Schmelze eingestellt ist. Die Einstellzeit für die anderen Gaskomponenten ist allerdings erheblich höher und liegt teilweise in der Größenordnung von mehreren Stunden.

2. Theoretische Grundlagen des mathematischen Modells

2.1. Blasenauftstieg

Die Aufstiegsgeschwindigkeit v_{By} der Blase setzt sich zusammen aus der vertikalen Komponente v_y der Strömungsgeschwindigkeit, die an der betrachteten Stelle herrscht, und aus der zur Strömung relativen Aufstiegsgeschwindigkeit v_{Bry} (Bild 2).

$$v_{By} = v_y + v_{Bry}. \quad (1)$$

Für die relative Aufstiegsgeschwindigkeit ergibt sich nach Hadamard [7]:

$$v_{Bry} = \frac{\Delta \rho_{Gl, Ga} \cdot g}{12 \eta} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot d^2. \quad (2)$$

An Stelle des Dichteunterschiedes $\Delta \rho_{Gl, Ga}$ zwischen der Glasschmelze und dem Gas in der Blase kann in guter Näherung die mittlere Dichte ρ_{Gl} der Glasschmelze ein-

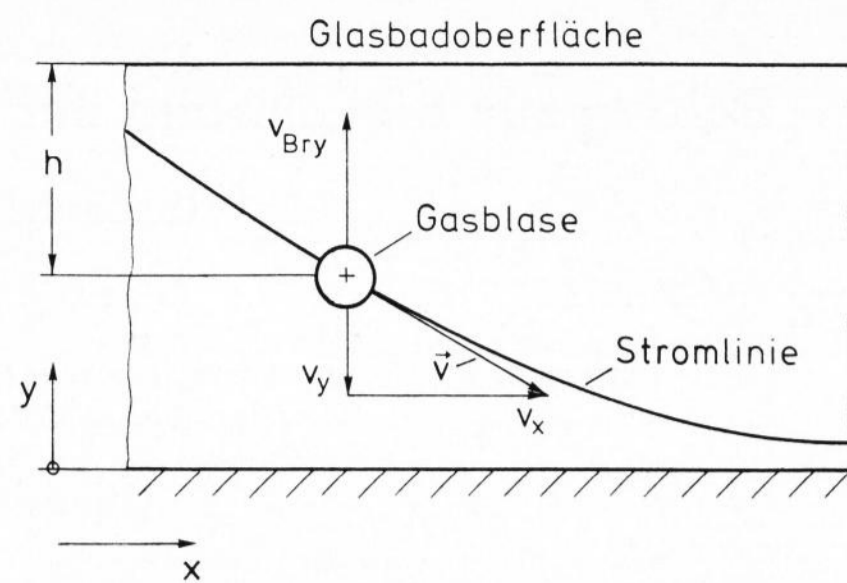


Bild 2. Blasenauftstieg in der Schmelze.

gesetzt werden, da diese Dichte weitaus größer ist als die Dichte des Gases und sich im Vergleich zu den anderen, den Blasenauftstieg bestimmenden Größen nur sehr wenig ändert. In Gleichung (2) bedeutet g die Erdbeschleunigung.

Die Viskosität η hängt von der Temperatur ab und kann mit Hilfe der Vogel-Fulcher-Tammann-Gleichung [8] berechnet werden. Nach einer Vorschrift von Lakatos u. a. [9] lassen sich die Koeffizienten dieser Gleichung aus der Glaszusammensetzung bestimmen. Die Gleichung zur Berechnung der Viskosität von Weißhohlglas ist in dem Bericht über die Homogenisierung enthalten [3].

Während des Aufstiegs ändert sich das Volumen und damit auch der Durchmesser d der Blase von Ort zu Ort. Die Volumenänderung kann wegen der relativ geringen Drücke (maximal 1,3 bar) im Blaseninnern mit Hilfe der idealen Gasgleichung beschrieben werden. Legt man als Blasenform die Kugelgestalt zugrunde, so ergibt sich:

$$d = d_0 \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

In Gleichung (3) bedeuten d_0 und die Größen mit dem Index 0 den Blasendurchmesser und die Zustandsgrößen an einem vorgegebenen Ausgangsort, von dem aus der Aufstieg der Blase verfolgt werden soll. Sowohl der Anfangsblasendurchmesser d_0 als auch der Ausgangsort können beliebig gewählt werden und hängen vom Ziel der jeweiligen Untersuchung ab. Bei den Größen ohne Index in Gleichung (3) handelt es sich um die aktuellen Werte an der betrachteten Stelle. Mit dem Ausdruck $\left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/3}$ wird die thermische Ausdehnung der Blase erfaßt.

Der Druck p im Blaseninnern setzt sich zusammen aus dem atmosphärischen Druck p_{at} im Oberofen, dem hydrostatischen Druck $\rho_{Gl} \cdot g \cdot h$ und dem Druck p_G durch Grenzflächenspannung.

$$p = p_{at} + \rho_{Gl} \cdot g \cdot h + p_G. \quad (4)$$

Nach Truckenbrodt [10] gilt:

$$p_G = \frac{4 \cdot \sigma}{d}. \quad (5)$$

Die Grenzflächenspannung σ hängt von der Glasart und der Temperatur ab. Giegerich und Trier [8] geben ein Verfahren an, nach dem bei Kenntnis der Glaszusammensetzung die Beziehung zwischen der Grenzflächenspannung und der Temperatur hergeleitet werden kann.

Der Ausdruck $\left(\frac{N}{N_0} \right)^{1/3}$ gibt die Änderung der Stoff-

menge in der Blase wieder. Die Ausführungen in Abschnitt 1. und die starke Temperaturabhängigkeit des Sauerstoffpartialdrucks in der Schmelze (Bild 1) weisen darauf hin, daß die Änderung der Stoffmenge in der Blase im wesentlichen auf dem Sauerstoffaustausch zwischen Blase und Schmelze beruht. Aus diesem Grunde kann der Austausch der übrigen Gaskomponenten vernachlässigt werden. Zudem berechtigt die sehr geringe Einstellzeit des Sauerstoffgleichgewichts zwischen Blase und Schmelze dazu, bei der Berechnung den quasistationären Zustand zugrunde zu legen. Zu jedem Zeitpunkt ist demnach die Sauerstoffmenge in der Blase gerade so groß, daß die Sauerstoffpartialdrücke in der Blase und der die Blase umgebenden Schmelze gleich sind. Die genannten Annahmen führen zu der Beziehung:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1 - \psi_{O_2|_0}}{1 - \psi_{O_2}} \quad (6)$$

Für den Sauerstoffmolanteil in der Blase gilt:

$$\psi_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p} \quad (7)$$

Der Sauerstoffpartialdruck p_{O_2} in der die Blase umgebenden Schmelze ist nur mit der Temperatur abhängig und wird aus dem Diagramm des Bildes 1 bestimmt. Dieses Diagramm ist aus Labormessungen entstanden, denen ein Gesamtdruck von 1 bar zugrunde liegt. Demzufolge beträgt auch der gemessene maximale Sauerstoffpartialdruck nur 1 bar. Bei der Bestimmung des Sauerstoffmolanteils ψ_{O_2} mit Hilfe der Gleichung (7) wird also nicht berücksichtigt, daß bei einem höheren Gesamtdruck auch der Sauerstoffpartialdruck größer als 1 bar werden kann. Der hierbei entstehende Fehler kann aber als gering angesehen werden, da der Gesamtdruck in der Blase maximal 1,3 bar und im Mittel 1,1 bar beträgt.

Der in Bild 1 dargestellte Verlauf des Sauerstoffpartialdruckes mit der Temperatur hängt von der Vorgeschichte des Glases ab und gilt nur für die erste Erwärmung. Demnach darf die vorliegende Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes von der Temperatur nur auf die Durchsatzströmung, nicht aber auf die Walzenströmung angewendet werden, da das Glas in den Strömungswalzen einer ständigen Erwärmung und Abkühlung unterliegt. Bei der Berechnung der Blasenwege wird deshalb davon ausgegangen, daß die Stoffmengen in den Blasen nach dem Eintritt der Blasen in die Walzenströmung konstant bleiben und eine Volumenänderung nur auf Grund der Temperatur- und Druckänderung erfolgt. Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, daß nach einer gewissen Einstellzeit kein Sauerstoff zwischen der Schmelze, die sich nicht in der Durchsatzströmung befindet, und den Blasen, die die Durchsatzströmung verlassen, ausgetauscht wird.

2.2. Läuterkennzahl

Analog zu der im letzten Bericht [3] entwickelten Homogenisierungskennzahl wird im folgenden eine Kennzahl hergeleitet, die die unterschiedlichen Läuterbedingungen entlang den von der Gemengedecke bis zum Durchlaß führenden Strömungsbahnen wiedergibt. Diese Kennzahl soll neben den berechneten Aufstiegswegen der Blasen dazu dienen, Tendenzen hinsichtlich der Läuterung bei Variation der Wannenparameter aufzuzeigen.

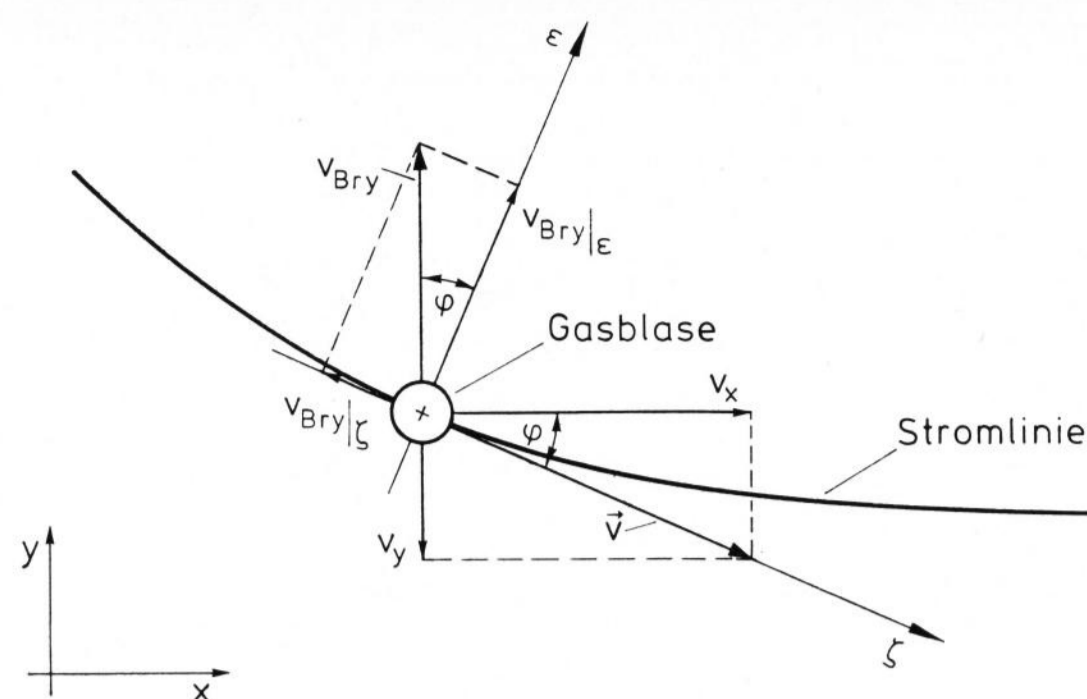


Bild 3. Relative Aufstiegs- und Strömungsgeschwindigkeit v_{Bry} der Blase und Strömungsgeschwindigkeit \vec{v} der Schmelze.

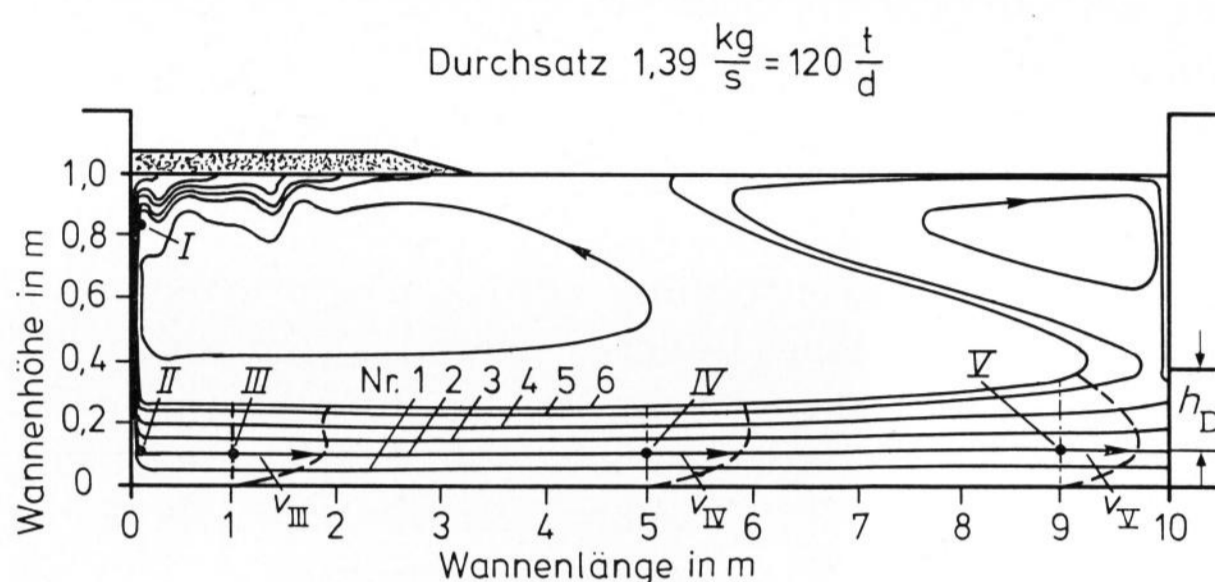


Bild 4. Stromlinien in der Symmetrieebene der Glasschmelzwanne.

Um verschiedene Wannenzustände miteinander vergleichen zu können, wird von einer Blase mit den folgenden Bezugsgrößen ausgegangen:

$$\begin{aligned} \text{Blasendurchmesser: } d_0 &= 1 \text{ mm,} \\ \text{Temperatur: } \vartheta_0 &= 1200 \text{ }^\circ\text{C,} \\ \text{Druck: } p_0 &= 1 \text{ bar.} \end{aligned}$$

Aus diesen Größen und den entlang der betrachteten Strömungsbahn herrschenden Temperaturen und Drücken werden der Blasendurchmesser und daraus die relative Aufstiegs- und Strömungsgeschwindigkeit v_{Bry} der Blase berechnet.

Wie aus Bild 3 hervorgeht, stellt die senkrecht zur Strömungsrichtung stehende Komponente $v_{Bry|_epsilon}$ der relativen Aufstiegs- und Strömungsgeschwindigkeit die Geschwindigkeit dar, mit der sich die Blase von der Strömungsbahn entfernt. Das Produkt aus $v_{Bry|_epsilon}$ und der von der Schmelze für einen Streckenabschnitt benötigten Zeit dt gibt demnach den Teil der Wegstrecke wieder, den die Blase zurücklegt, um die Durchsatzströmung zu verlassen. Das Integral

$$I_L = \int_0^{t_v} v_{Bry|_epsilon} \cdot dt \quad (8)$$

für eine von der Gemengedecke bis zum Durchlaß führende Strömungsbahn kann daher als ein Maß für die Wahrscheinlichkeit gedeutet werden, mit der Blasen die betrachtete Strömungsbahn verlassen. Nach Bild 3 gilt:

$$v_{Bry|_epsilon} = \frac{v_x}{|\vec{v}|} \cdot v_{Bry} \quad (9)$$

Ein weiterer Gesichtspunkt, der bei der Beurteilung der Läuterbedingungen zu beachten ist, sind die unterschiedlich langen Aufstiegswege, die die Blasen von den verschiedenen Strömungsbahnen aus bis zum Austritt

Blasenweg Nr.	Anfangs-Blasendurchmesser im Punkt (A) in mm	Blasendurchmesser beim Verlassen der Wanne in mm
1	2,0	2,65
2	1,5	2,10
3	1,0	1,50
4	0,5	0,73
5	0,2	0,23

I, II, III: Eintrittsstellen der Blasen in die Walzenströmung

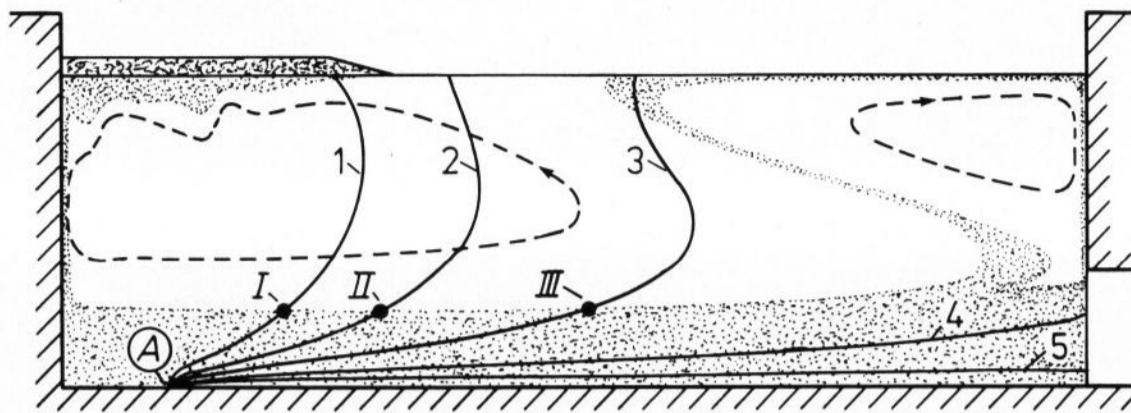


Bild 5. Einfluß des Anfangs-Blasendurchmessers auf den Blasenweg (Punkt A $\hat{=}$ Wannenhoden).

aus der Durchsatzströmung zurückzulegen haben. Wie Rechnungen zeigen (Bilder 5, 6 und 7), gelangen diejenigen Blasen nicht mehr in den Durchlaß, die die Walzenströmung erreicht haben. Aus Bild 4 geht hervor, daß der Abstand h_D zwischen der Durchlaßoberkante und der jeweils betrachteten Strömungsbahn dem zurückzulegenden Aufstiegsweg der Blasen innerhalb der Durchsatzströmung näherungsweise entspricht.

Als Läuterkennzahl wird deshalb definiert:

$$Lk = \frac{h_D}{I_L} \quad (10)$$

Wie bei der Homogenisierungskennzahl weist auch hier ein hoher Wert der Läuterkennzahl auf schlechte und ein niedriger Wert auf gute Läuterbedingungen hin.

3. Ergebnisse

Die Ausgangsdaten zur Berechnung des Temperatur- und Strömungsfeldes in der Wanne sind dem Bericht über die Homogenisierung zu entnehmen [3]. Als Ergänzung hierzu gibt die folgende Gleichung den Einfluß der Temperatur ϑ auf die Grenzflächenspannung σ bei Weißhohlglas wieder.

$$\frac{\sigma}{\text{N}} = 0,3 - 0,4 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} - 1000 \right) \quad (11)$$

Bild 4, das einen Teil der Stromlinien des Strömungsfeldes enthält, sowie die Bilder 5, 6 und 7 sind im verzerrten Maßstab gezeichnet, um die Charakteristik der Strömung und den Verlauf der Blasen aufstiegswege besser erkennen zu können. Bei einer maßstabgetreuen Wiedergabe würde die Wannenhöhe nur ein Drittel des gezeichneten Wertes betragen.

3.1. Blasen aufstiegswege

In Bild 5 wird der Einfluß des Anfangs-Blasendurchmessers auf den Blasenweg dargestellt. Zu diesem Zweck werden am Wannenhoden in einem Abstand von 1 m von der Einlegeseite Blasen mit verschiedenen Durchmessern angenommen. Solange sich die Blasen in der durch die Grauzone gekennzeichneten Durchsatz-

Blasenweg Nr.	Anfangs-Blasendurchmesser im Punkt (B) in mm	Blasendurchmesser beim Verlassen der Wanne in mm
1	2,0	2,20
2	1,5	1,77
3	1,0	1,15
4	0,5	0,58
5	0,2	0,26

(C: Austritt der Blasen aus dem Glasbad bei Blasenweg Nr.5)

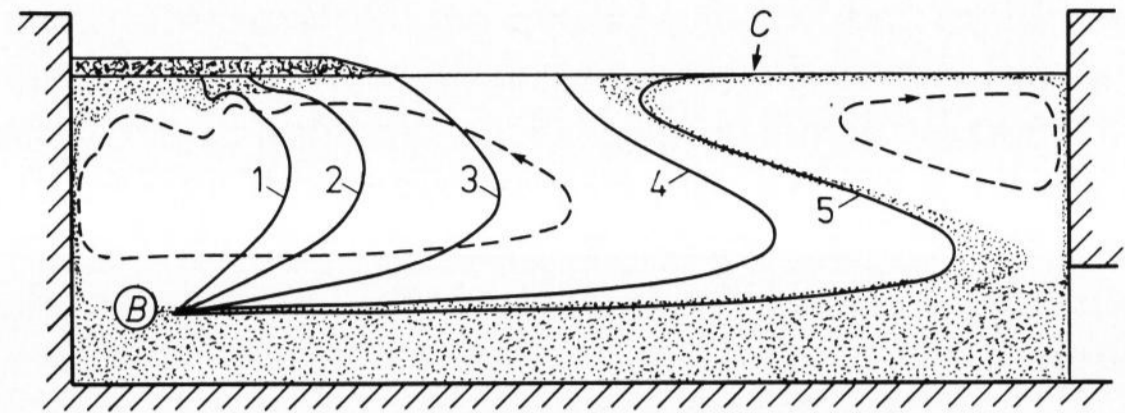


Bild 6. Einfluß des Anfangs-Blasendurchmessers auf den Blasenweg (Punkt B liegt dicht unterhalb der Walzenströmung).

Blasenweg Nr.	Anfangs-Blasendurchmesser am Ausgangsort in mm	Blasendurchmesser beim Verlassen der Wanne in mm
1	0,5	0,80
2	0,5	0,73
3	0,5	0,78
4	0,5	0,66

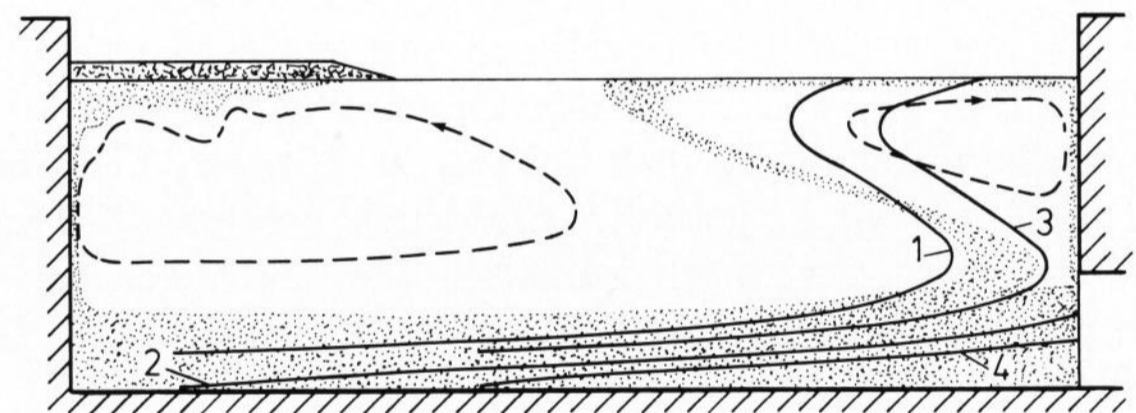


Bild 7. Blasenwege für verschiedene Ausgangsorte.

strömung befinden, ändert sich die Sauerstoffmenge in der Blase gemäß dem Kurvenverlauf des Sauerstoffpartialdrucks in Bild 1 und gemäß der in der Schmelze herrschenden Temperatur. Nach dem Eintritt der Blasen in die Walzenströmung bei den Punkten I, II und III bleibt, wie in Abschnitt 2.1. begründet, die Stoffmenge in der Blase konstant. In diesem Bereich tragen nur noch die thermische Ausdehnung und die Druckabnahme zu einer Vergrößerung des Blasendurchmessers bei.

Der Weg, den die Blasen in der Schmelze nehmen, hängt davon ab, in welchem Verhältnis die relative Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen zur Strömungsgeschwindigkeit der Durchsatzströmung steht. Die Strömungsgeschwindigkeit steigt vom Wannenhoden ausgehend zunächst stark an (Bild 4). Etwa von der Mitte zwischen Wannenhoden und Beginn der Walzenströmung an ändert sie sich nur noch wenig. Die relative Aufstiegs geschwindigkeit der Blase ist in der Nähe des Wannenhodens wegen der dort herrschenden niedrigen Temperatur am geringsten. Dennoch ist in unmittelbarer Bodennähe die Aufstiegs geschwindigkeit der Blase im Verhältnis zur Strömungsgeschwindigkeit infolge der Wandhaftung groß. Dies ist deutlich am Blasenweg Nr. 1 (Bild 5) zu erkennen, bei dem die Blase in Bodennähe fast senkrecht aufsteigt. Mit zunehmendem Abstand vom

Boden wird die Blase stärker in Durchlaßrichtung abgetrieben, da wegen des geringen Temperaturanstiegs im Bodenbereich die Aufstiegs geschwindigkeit nicht in dem Maße anwächst wie die Geschwindigkeit der Durchsatzströmung. Nach etwa einem Viertel des bis zur Walzenströmung zurückgelegten Weges weist die Bahnkurve der Blase einen Wendepunkt auf. Dort wird die Blase am stärksten in Durchlaßrichtung abgetrieben. Weiter aufwärts wird das Verhältnis der Aufstiegs geschwindigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit wieder günstiger, wie aus den Krümmungen der Blasenwege zu erkennen ist. Je weiter die Blase nach oben steigt, desto größer wird infolge zunehmender Temperatur die relative Aufstiegs geschwindigkeit und desto weniger stark werden die Blasen von der Walzenströmung abgetrieben. Die Blasen erreichen die Glasbadoberfläche also an Stellen, die etwas weiter vom Einlegerand entfernt liegen als die Austrittsstellen aus der Durchsatzströmung. Bei Blasenweg Nr. 3 ist die Zunahme des Blasendurchmessers am größten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Blasen auf diesem Blasenweg den größten Temperaturanstieg in der Durchsatzströmung erfahren und dadurch mit Sauerstoff am stärksten aufgebläht werden.

Als Ergebnis aus allen bisher gerechneten Beispielen kann festgestellt werden, daß Blasen, die die Durchsatzströmung verlassen haben und in die Walzenströmung eingetreten sind, nicht mehr in den Durchlaß gelangen. In diesem Zusammenhang soll deshalb überlegt werden, inwieweit ein Walleinbau, durch den die Durchsatzströmung an die Glasbadoberfläche geführt wird, die Läuterung begünstigt. Die dominierende Rolle der Temperatur bei der Läuterung weist darauf hin, daß ein Walleinbau nur dann einen Sinn hat, wenn die Temperatur dabei gleichzeitig ansteigt. Eine Umlenkung der Durchsatzströmung an die Oberfläche ohne Temperaturerhöhung kann den Läutervorgang nur geringfügig begünstigen. Auch eine Einschnürung der Durchsatzströmung, wie sie bei einem Walleinbau auftreten kann, trägt alleine nicht zur Beschleunigung des Läutervorganges bei. Der Weg, den die Blasen bis zum Verlassen der Durchsatzströmung zurückzulegen haben, ist hierbei zwar kürzer, aus Kontinuitätsgründen nimmt aber gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeit zu, so daß den Blasen weniger Zeit zum Verlassen der Durchsatzströmung bleibt. Eine Einschnürung verbessert die Läuterung nur dann, wenn die Temperatur in der unteren Schicht der Durchsatzströmung erhöht wird. Ein beheizter Wall wird deshalb zu wesentlich besseren Läuterbedingungen führen als ein gekühlter Wall. Ein weiterer Grund, der für eine Wallbeheizung spricht, ist der Umstand, daß Schlieren, die durch Verdampfung an der Glasbadoberfläche entstehen, hierbei wegen der ausgeglicheneren Temperaturverteilung nicht in dem Maße gebildet werden wie bei einem gekühlten Wall.

Im Vergleich zu Bild 5 liegt in Bild 6 der Ausgangsort der Blasen nicht am Wannensboden, sondern dicht unterhalb der Walzenströmung. Mit Ausnahme des Blasenwegs Nr. 5 sind die in der Durchsatzströmung zurückgelegten Wege der Blasen kürzer als die in Bild 5. Die Blasen werden also nicht mehr so stark mit Sauerstoff aufgebläht.

In Bild 7 wird bei gleichen Anfangs-Blasendurchmessern der Ausgangsort der Blasen variiert. Damit soll

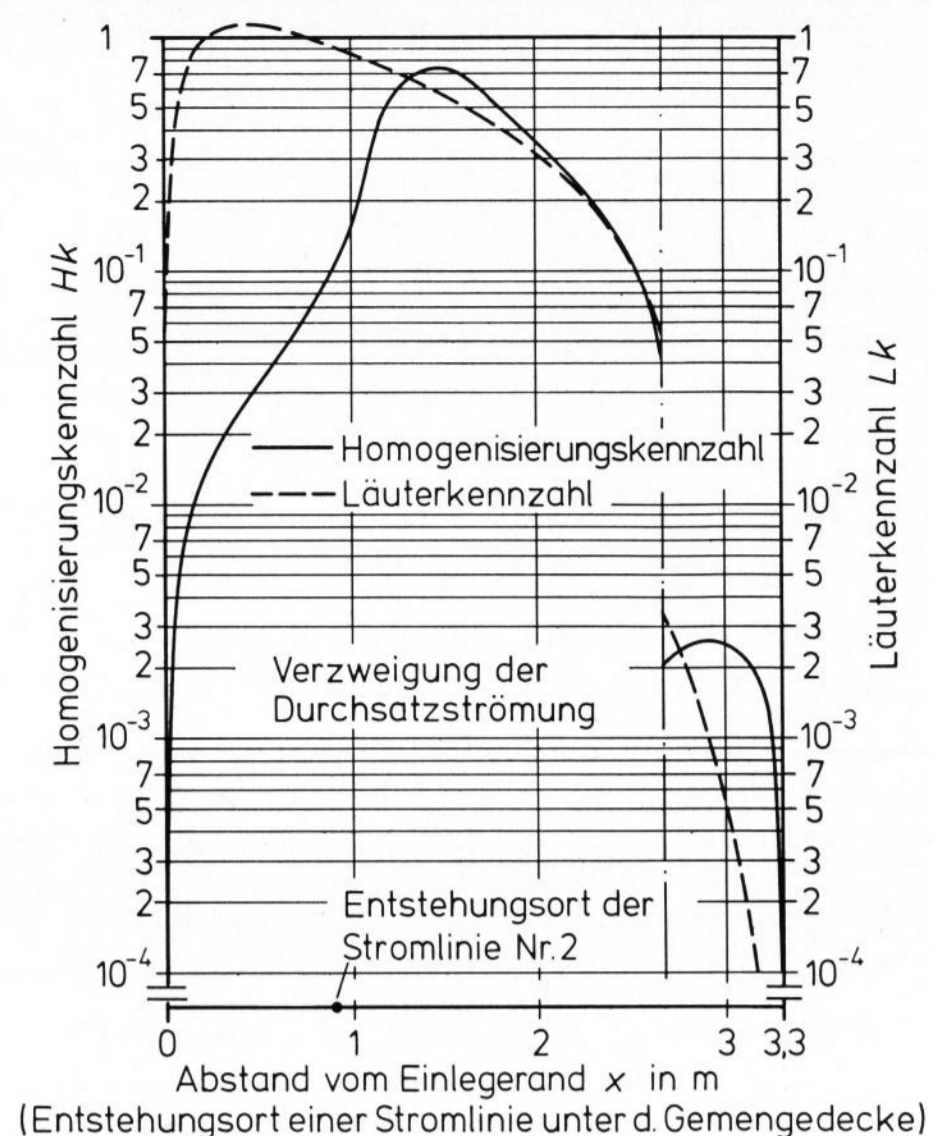


Bild 8. Läuterkennzahl und Homogenisierungskennzahl.

gezeigt werden, daß es mit Hilfe des mathematischen Modells möglich ist, Bereiche in der Wanne zu ermitteln, aus denen Blasen mit vorgegebenen Anfangs-Blasendurchmessern die Glasbadoberfläche erreichen oder aber in den Durchlaß gelangen.

3.2. Läuterkennzahl

Bild 8 gibt Auskunft über die Läuterbedingungen entlang den von der Gemengedecke bis zum Durchlaß führenden Strömungsbahnen. Der Entstehungsort der Stromlinien ist durch den Abstand vom Einlegerand gegeben. Eine Begründung für die Darstellungsweise der Läuterkennzahl ist in dem Bericht über die Homogenisierung [3] enthalten. Dieser Bericht geht auch auf die Homogenisierungskennzahl ein, deren Verlauf in Bild 8 zum Vergleich wiedergegeben ist. In Bild 8 weist das Maximum der Läuterkennzahl auf die Strömungsbahnen mit den ungünstigsten Läuterbedingungen hin. Auf diesen Bahnen werden Blasen von der Strömung am stärksten abgetrieben und können deshalb dort am ehesten in den Durchlaß gelangen. Die Wendepunkte der Blasenwege in Bild 5 geben ebenfalls einen Hinweis auf diese Strömungsbahnen.

Das Maximum der Läuterkennzahl und das der Homogenisierungskennzahl treten an verschiedenen Stellen auf. Damit kommt zum Ausdruck, daß die Läuterung und die Homogenisierung von verschiedenen Einflußgrößen abhängen. Während der Vorgang der Läuterung von der Temperatur und der Verweilzeit bestimmt wird, tritt bei der Homogenisierung noch die Deformationswirkung der Strömung hinzu. Die Scherströmung in der Nähe des Wannensbodens trägt maßgeblich zur Homogenisierung bei. Aus dem Abstand zwischen den beiden Stellen, an denen die Maxima der Kennzahlen auftreten, läßt sich die Homogenisierungswirkung der Strömung näherungsweise ablesen.

Die Läuterkennzahl nimmt am Ende der Gemengedecke niedrige Werte an, da die entsprechenden Stromlinien zur freien Glasbadoberfläche führen, wo hohe Temperaturen die Entgasung beschleunigen.

4. Zusammenfassung

Es wird von den Ergebnissen eines mathematischen Modells zur Berechnung der Strömungs- und Temperaturfelder in Glasschmelzwannen ausgegangen. Diese Felder sind die Eingabedaten für ein auf der substantiellen Betrachtungsweise beruhendes mathematisches Modell, das die Berechnung der Läutervorgänge ermöglicht.

Neben der Viskosität spielt der Sauerstoffpartialdruck in der Schmelze eine wesentliche Rolle bei der (Sauerstoff-) Läuterung. Dieser Druck nimmt bei steigender Temperatur zu. Die Blasen in der Schmelze werden hierdurch aufgebläht und steigen schneller an die Glasbadoberfläche. Die in Laborversuchen ermittelte Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdrucks von der Temperatur gilt nur für die erste Erwärmung. Im mathematischen Modell wird deshalb der gemessene Verlauf des Sauerstoffpartialdrucks nur im Bereich der Durchsatzströmung berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Temperatur die dominierende Rolle bei der Läuterung spielt und daß Blasen, die die Durchsatzströmung verlassen haben und in die Walzenströmung eingetreten sind, nicht mehr in den Durchlaß gelangen. Hieraus leitet sich die Erkenntnis ab, daß ein beheizter Wall die Läuterung wirksamer verbessert als ein gekühlter Wall.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit hergeleiteten Läutererkennzahl ist es möglich, die Läuterbedingungen entlang den von der Gemengedecke bis zum Durchlaß führenden Strömungsbahnen miteinander zu vergleichen. Bei Variation der Wannenparameter lassen sich aus dem Verlauf dieser Kennzahl Tendenzen hinsichtlich der Läuterbedingungen ablesen, wodurch Hinweise für eine Verbesserung der Wannenführung gewonnen werden können.

5. Symbolsammlung

5.1. Formelzeichen und Einheiten

d	= Blasendurchmesser in mm
g	= Erdbeschleunigung in $m\ s^{-2}$
h	= Abstand von der Glasbadoberfläche in m
h_D	= Abstand zwischen Durchlaßoberkante und Strömungsbahn in m
H_k	= Homogenisierungskennzahl
L_k	= Läutererkennzahl
N	= Stoffmenge im Blaseninnern in kmol
p	= Gesamtdruck im Blaseninnern in bar
p_{at}	= atmosphärischer Druck im Oberofen in bar
p_G	= Druck durch Grenzflächenspannung in bar
p_{O_2}	= Partialdruck des Sauerstoffs in bar
T	= Temperatur in K
t	= Zeit in s
t_v	= Verweilzeit in s

\vec{v}	= Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze in $m\ s^{-1}$
v_{By}	= absolute Blasenauftiegeschwindigkeit in $m\ s^{-1}$
v_{Bry}	= relative Blasenauftiegeschwindigkeit in $m\ s^{-1}$
x	= Ortskoordinate für die Wannenlänge in m
y	= Ortskoordinate für die Wannenhöhe in m
ε	= Ortskoordinate senkrecht zur Strömungsrichtung in m
ζ	= Ortskoordinate in Strömungsrichtung in m
η	= dynamische Viskosität in $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
θ	= Temperatur in $^{\circ}C$
ρ_{Gl}	= mittlere Dichte der Glasschmelze in $kg\ m^{-3}$
$\Delta\rho_{Gl,Ga}$	= Dichteunterschied in $kg\ m^{-3}$ zwischen der Glasschmelze und dem Gas im Blaseninnern
σ	= Grenzflächenspannung in $N\ m^{-1}$
ψ_{O_2}	= Sauerstoffmolanteil im Blaseninnern

5.2. Indizes

x	= x-Richtung
y	= y-Richtung
ε	= ε -Richtung
ζ	= ζ -Richtung
0	= Zeitpunkt $t = 0$ (Start)

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.

6. Literatur

- [1] 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.
- [2] Rhiel, F. F.: Beitrag zur Berechnung der Homogenisierungs- und Läutervorgänge in Glasschmelzwannen. Fak. f. Bergbau u. Hüttenwes. d. Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen, Dr.-Ing.-Diss. 1976.
- [3] Rhiel, F. F.: Beitrag zur Berechnung der Homogenisierungsvorgänge in Glasschmelzwannen. Glastechn. Ber. **49** (1976) Nr. 10, S. 217 – 226.
- [4] Mulfinger, H. O.: Zum Verhalten von Blasen in Glasschmelzen. Glastechn. Ber. **45** (1972) S. 238 – 243.
- [5] Mulfinger, H. O.: Gasanalytische Verfolgung des Läutervorganges im Tiegel und in der Schmelzwanne. Glastechn. Ber. **49** (1976) Nr. 10, S. 232 – 245.
- [6] Grassmann, P. und Widmer, F.: Einführung in die thermische Verfahrenstechnik. 2. Aufl. Berlin, New York: de Gruyter 1974.
- [7] Grassmann, P.: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik. 2. Aufl. Aarau: Sauerländer 1970.
- [8] Giegerich, W. und Trier, W.: Glasmaschinen. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1964. [Ref. Glastechn. Ber. **37** (1964) S. 225.]
- [9] Lakatos, T.; Johansson, L.-G. und Simmingsköld, B.: Viscosity-temperature relations in the glass system $SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-K_2O-CaO-MgO$ in the compositional range of technical glasses. Glass Technol. **13** (1972) S. 88 bis 95. [Ref. Glastechn. Ber. **46** (1973) 73R1326.]
- [10] Truckenbrodt, E.: Strömungsmechanik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1968.

76R1564