

## Einfluß der Badtiefe und des Durchsatzes auf die Strömungen in der Glasschmelzwanne

Von Gerd Leyens, Aachen, und Josef Smrček, Prag

(Mitteilung aus der Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen, und der Sklo Union, Forschungsinstitut für Industrielles Glas, Teplice, Prag)

(Eingegangen am 2. Juli 1981)

Es wird das Ziel angestrebt, den Wannenraum von Glasschmelzöfen dadurch möglichst gut auszunutzen, daß strömungsarme Gebiete vermieden werden. Die Untersuchung stützt sich auf ein mathematisches Modell, das die zweidimensionale Temperatur- und Strömungsverteilung im Symmetrie-Längsschnitt durch die Glasschmelzwanne berechnet und dessen Genauigkeit durch Isotopenmessungen bereits früher überprüft worden ist. Das

Temperatur- und das Strömungsfeld sowie die Verweilzeitverteilung und die Übergangsfunktion für die Durchsatzströmung werden für Variationen der Badtiefe und des Durchsatzes ermittelt.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse wird die Empfehlung abgeleitet, die Badtiefe abzusenken und gleichzeitig zusätzliche Energie dem Gemengebereich zuzuführen.

### Influence of tank depth and throughput on flow in glass tank furnaces

To use the tank of a glass furnace as efficiently as possible regions of poor flow should be avoided. This investigation is based on a mathematical model for the two dimensional temperature and velocity distributions along the longitudinal plane of symmetry of the tank, the accuracy of which had earlier been established by isotope measurements. The temperature and velocity fields and

also the residence time distribution and transfer function for the throughput flow were determined for variations in tank depth and throughput.

Examination of the results leads to the recommendation that tank depth should be decreased and additional energy introduced in the batch-melting region.

### Influence de la profondeur du bassin et de la tirée sur les courants dans le bassin d'un four de fusion du verre

Le but recherché est d'exploiter au mieux l'espace du bassin des fours de fusion du verre afin d'éviter les zones où il y a peu de courants. L'étude s'appuie sur un modèle mathématique qui permet de calculer la distribution bidimensionnelle de la température et des courants dans la coupe longitudinale du plan de symétrie du four à bassin, et dont la précision a déjà été vérifiée par des mesures isotopiques. Le champ de température et le champ des

courants, ainsi que la distribution des temps de séjour et la fonction de transfert de masse pour le courant de tirée, sont obtenus pour différentes hauteurs du bain et différentes tirées.

De la comparaison des résultats on en déduit qu'il faut abaisser la hauteur du bain et en même temps fournir une énergie supplémentaire à la zone de composition.

In einem ersten Bericht [1] wurde bereits dargelegt, wie die Anwendung der Isotopen-Meßtechnik und eines mathematischen Modells zur Bestimmung der Strömungsverteilung in einer Schmelzwanne dienen kann. Die Meßwerte wurden mit den theoretischen Ergebnissen verglichen und die Genauigkeit des mathematischen Modells erläutert.

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf denselben Glasschmelzofen mit vier Einlegemaschinen, sieben Brennerpaaren und einer Arbeitswanne hinter dem Durchlaß. Es wird die aktuelle Frage untersucht, wie in dieser Wanne die auf den Schmelzraum bezogene Schmelzleistung durch Geometrieänderungen des Schmelzbades erhöht werden könnte. Bei Variationen der Glasentnahme sind die Strömungsänderungen nicht nur dadurch gekennzeichnet, daß die Schmelzpartikeln auf den Stromlinien beschleunigt oder verlangsamt werden; es werden darüber hinaus die Stromlinien im Schmelzbad verlagert oder umverteilt.

Diese Strömungs- und die hiermit gekoppelten Temperaturänderungen lassen sich mit Hilfe eines mathematischen Modells verfolgen. Aus den berechneten Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern können die Lage der Strömungsbahnen (Stromlinien), der zeitliche Temperaturverlauf auf den Stromlinien und die „Altersverteilung“ (Verweilzeitverteilung) des Glases in der Durchsatzströmung berechnet werden.

### 1. Beschreibung des mathematischen Modells

Das verwendete mathematische Modell berechnet die Stromlinien- und Isothermenverteilung innerhalb der Schmelze [2]. Es ist zweidimensional und bezieht sich auf einen Längsschnitt durch die Symmetrieebene der Schmelzwanne. Die berechneten Felder sind im stationären Zustand und vernachlässigen den Einfluß von Querströmungen. Die berechneten Temperaturen und Strömungsgeschwindigkei-

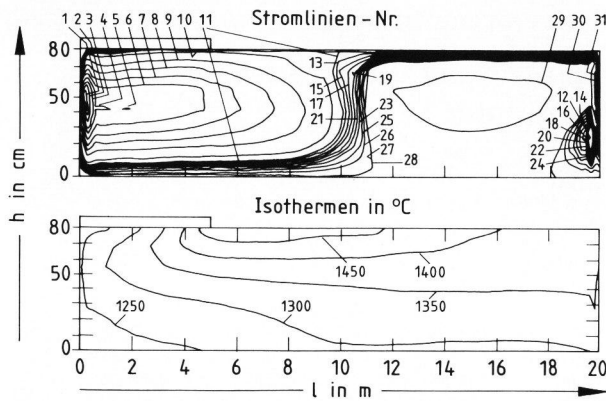


Bild 1. Berechnete Stromlinien und Isothermen in der Symmetrieebene der Glasschmelzwanne im „Standardzustand“. Durchsatz: 700 kg Glas/(m<sup>2</sup> d).

Tabelle 1. Umlaufzeiten bei den geschlossenen Stromlinien und Durchlaufzeiten (mit \* gekennzeichnet) bei den offenen Stromlinien der Durchsatzströmung

Stromlinie Nr.	Bezug zu Bild				
	1	2	3	4	5
	Umlauf- und Durchlaufzeiten in h				
1	0,055	4,09	2,17	0,093	0,095
2	0,134	* 8,67	* 7,54	0,135	0,172
3	0,189	* 7,36	* 7,82	0,157	0,246
4	0,692	* 7,37	7,55	0,181	0,301
5	0,295	1,07	* 9,53	0,120	0,481
6	2,47	* 7,51	4,04	1,41	0,089
7	2,32	1,61	*11,63	1,18	0,366
8	3,46	* 8,34	* 9,46	1,85	0,667
9	4,42	1,98	* 9,57	2,48	3,61
10	6,62	* 8,22	10,8	3,25	0,466
11	*11,7	2,35	1,99	* 9,80	5,75
12	0,72	* 9,01	*13,07	1,03	0,24
13	*11,31	2,75	3,46	* 9,72	*19,56
14	0,79	*10,61	*18,75	1,07	3,26
15	11,02	5,0	7,29	* 9,28	*19,56
16	0,87	*20,98	*36,11	1,36	3,58
17	* 9,90	12,51	*37,80	* 8,78	*15,0
18	1,35	*26,77	4,36	1,86	4,36
19	* 9,59	*27,33		* 8,38	*13,43
20	1,67	0,71		2,36	4,67
21	* 9,67			* 8,08	*14,28
22	1,91			2,51	4,80
23	*11,19			* 9,34	*15,59
24	2,26			2,89	5,22
25	*15,6			*14,33	*22,31
26	*18,3			0,47	*25,52
27	*32,6			*13,33	*32,31
28	*34,3			0,42	*72,95
29	13,7			*18,54	*75,25
30	0,19			0,36	
31	0,055			*82,1	
32				0,31	
33				*63,1	

ten stellen sich als Folge der vorgegebenen Randbedingungen für die Geometrie der Schmelzwanne, der Stoffeigenschaften der Schmelze, der zu- und abfließenden Wärmeströme und der Glasentnahme

(Durchsatz) ein. Die spezifische Belastung der Schmelzfläche betrug 700 kg Glas/(m<sup>2</sup> d). Im Bereich des Durchlasses wurde keine Rückströmung zugelassen.

## 2. Strömungs- und Temperaturverhältnisse im „Standardzustand“

In Bild 1 ist der berechnete Strömungszustand in dem 80 cm tiefen Glasbad dargestellt. Die unter dem Gemenge entstehende Schmelze fließt zunächst an der Einlegeseite in den Bodenbereich der Wanne und bildet dort bis zu einer Dicke von etwa 10 cm die zum Durchlaß hin gerichtete Durchsatzströmung. Nach etwa 10 m Wannenlänge steigt diese Durchsatzströmung steil aufwärts und bildet an der Oberfläche den bekannten Quellpunkt. Vom Quellpunkt aus fließt die Durchsatzströmung bis zum Ende der Wanne im Bereich der Oberfläche, bevor sie zum Durchlaß hin absinkt.

In den durchsatzströmungsfreien Bereichen bilden sich unterschiedlich starke Rotationsströmungen (geschlossene Stromlinien) aus. Die stärkste Rotationsströmung befindet sich zwischen der Einlegeseite und dem Quellpunkt. Sie bewirkt im Bereich der Oberfläche die zum Durchlaß hin gerichtete Rückströmung, die bei der hier betrachteten Wanne den Gemengeteppich örtlich stabilisiert. Die Umlaufzeit dieser Rotationswalze beträgt etwa 4 bis 6 h (Stromlinien Nr. 9 und 10 in Bild 1 und Tabelle 1). Zwischen dem Quellpunkt und dem Durchlaß befindet sich unterhalb der Oberfläche eine verhältnismäßig schwache Rotationsströmung (Gegenwalze) mit einer Umlaufzeit von etwa 13,7 h (Stromlinie Nr. 29 in Bild 1 und Tabelle 1). Unmittelbar vor dem Durchlaß entsteht eine weitere Rotationsströmung mit einer sehr kurzen Umlaufzeit von ungefähr 1 bis 2 h (Stromlinien Nr. 12, 14, 16, 18, 20, 22 und 24 in Bild 1 und Tabelle 1). Diese mit Hilfe des mathematischen Modells ermittelten Strömungswalzen wurden auch experimentell mit Hilfe der Isotopen-Meßtechnik bestätigt. Aus dieser guten Übereinstimmung des mathematischen Modells mit der Realanlage leitet sich die Berechtigung ab, die berechneten Betriebsverhältnisse auf reale zu übertragen.

Die beschriebenen rotatorischen Strömungen in der Schmelze beeinflussen die Durchsatzströmung in unterschiedlicher Weise. Die Hauptströmungswalze zwischen der Einlegeseite und dem Quellpunkt stabilisiert nicht nur durch die Rückströmung im Oberflächenbereich die Ausbildung des Gemengeteppichs, sondern sorgt zusätzlich für einen konvektiven Energietransport von warmer Schmelze aus dem Quellbereich zur kalten Einlegeseite (Isothermenbild in Bild 1) und fördert strömungsmechanisch das Aufsteigen der Durchsatzströmung zur Oberfläche hin. Der Bereich der Gegenwalze zwischen Quellpunkt und Durchlaß kann im Hinblick auf die Ausnutzung des Wannenraumes als „tot“ angesehen

werden. Die in diesem Gebiet befindliche Schmelze trägt lediglich zu Wärmeverlusten bei. Ihr einziger Vorteil besteht darin, daß sie ein gewisses „Polster“ bildet, über das die Entnahmestromung fließt und hier in Bereiche hoher Temperaturen gedrängt wird. Da dieses tote Gebiet rund ein Drittel bis ein Viertel des Wanneninhaltes einnimmt, erscheint es sinnvoll, eine bessere Ausnutzung des Wanneninhaltes durch eine gezielte Verminderung dieses Totraumes anzustreben. Die dritte Rotationswalze wird wegen ihrer geringen räumlichen Ausdehnung und ihrer kurzen Umlaufzeit hier nicht weiter berücksichtigt.

### 3. Strömungs- und Temperaturverhältnisse in extremen Wannenzuständen

#### 3.1. Verminderung der Badtiefe auf 40 cm

Geht man davon aus, daß die Ausbildung der rotatorischen Strömungen am günstigsten ist, wenn der Schmelzraum groß und der Einfluß der Wände vernachlässigbar ist, so muß umgekehrt eine Herabsetzung der Badtiefe den bremsenden Einfluß der Wände auf die Strömung stärker hervorheben und die Ausbildung der Strömungswalzen und der Toträume vermindern. Bild 2 zeigt die Temperatur- und Strömungsverteilung in einer auf 40 cm herabgesetzten Badtiefe. Im Unterschied zum „Standardzustand“ haben die Isothermen einen wesentlich steileren Verlauf, der auf einen höheren Einfluß der Wärmeleitung und Wärmestrahlung gegenüber der Wärmekonvektion hinweist. Wegen des verminderten Energietransports durch Konvektion, insbesondere unterhalb des Gemenges, mußte die Länge des Gemengeteppichs auf das 1,6fache vergrößert, d. h. die für das Abschmelzen des Gemenges benötigte Wärme auf eine größere Fläche verteilt werden (Tabelle 2).

Der prinzipielle Verlauf der Durchsatzströmung ist der gleiche wie in Bild 1 geblieben. Sieht man von einer kleinen Rotationswalze in der Nähe der Einlegewand ab, so gelangt die Schmelze vom Gemengeteppich zunächst in den Bodenbereich der Wanne, steigt bei etwa 10 m Wannlänge steil zur Oberfläche hinauf und fließt vom Quellpunkt aus weiter an

der Oberfläche entlang, bevor sie zum Durchlaß hin absinkt. Gegenüber dem „Standardzustand“ ist die schnellste Durchsatzzeit um 23 % verkürzt (Stromlinie Nr. 3 in Bild 2 gegenüber Stromlinie Nr. 19 in Bild 1; siehe auch Tabelle 2). Die Hauptströmungswalze ist wesentlich schwächer ausgebildet. Ihre Umlaufbahn ist nur noch halb so groß, wenn auch ihre Umlaufzeit etwa gleich geblieben ist (vergleiche Stromlinie Nr. 1 aus Bild 2 mit Stromlinie Nr. 9 aus Bild 1). Die kleine Strömungswalze unmittelbar vor dem Durchlaß tritt bei der verminderten Badtiefe nicht mehr auf. Das tote Gebiet im Bereich der Gegenwalze zwischen Quellpunkt und Durchlaßwand ist jedoch trotz verminderter Badtiefe noch vorhanden. Die Geschwindigkeiten in diesem Bereich sind sehr niedrig (Stromlinien konnten in gewähltem Maßstab nicht eingetragen werden), vermögen dennoch die Durchsatzströmung in den Oberflächenbereich zu drängen.

#### 3.2. Verminderung der Badtiefe auf 25 cm

Da es durch die Herabsetzung der Badtiefe von 80 auf 40 cm nicht gelang, die Toträume zu vermindern, wurde ein weiteres Herabsetzen der Badtiefe auf 25 cm untersucht (Bild 3). Die Isothermenverteilung in der Schmelze ist bei der Badtiefe von 25 gegenüber 40 oder 80 cm am steilsten ausgebildet.

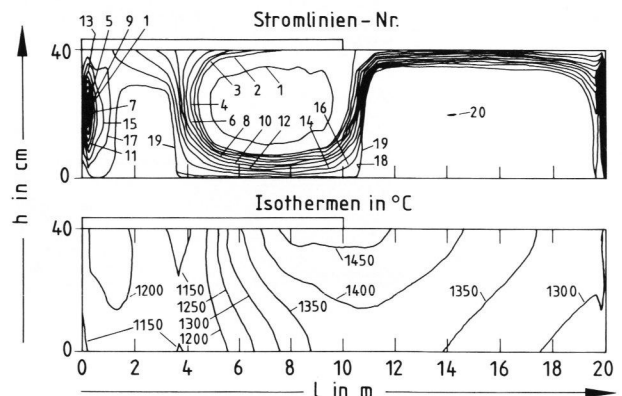


Bild 2. Stromlinien und Isothermen bei einer auf 40 cm herabgesetzten Badtiefe. Durchsatz: 700 kg Glas/(m<sup>2</sup> d).

Tabelle 2. Vergleich von verschiedenen berechneten Betriebszuständen mit einem gemessenen Betriebszustand im Glasschmelzofen

Betriebszustand wie beschrieben in Abschnitt	Energiezufuhr	Glasentnahme in kg/s	Badtiefe (Glasstand) in cm	Länge des Gemengeteppichs in m	Durchlaufzeit der schnellsten Strömungslinie		mittlere Verweilzeit bei Kolbenströmung t <sub>m</sub> /h	Bezug zu Bild
	in %				t <sub>p</sub> /h	t <sub>p</sub> /t <sub>m</sub>		
2. gemessen	100	1,10	78	3 bis 5	6,0 bis 7,5	0,10 bis 0,13	60	
2. berechnet	100	1,10	80	5	9,6	0,16	60	1
3.1. berechnet	100	1,10	40	8	7,4	0,25	30	2
3.2. berechnet	100	1,10	25	10	7,5	0,39	18,6	3
3.3. berechnet	75	0,55	80	5	13,4	0,11	120,0	4
3.4. berechnet	150	2,20	80	5	8,1	0,27	30,0	5

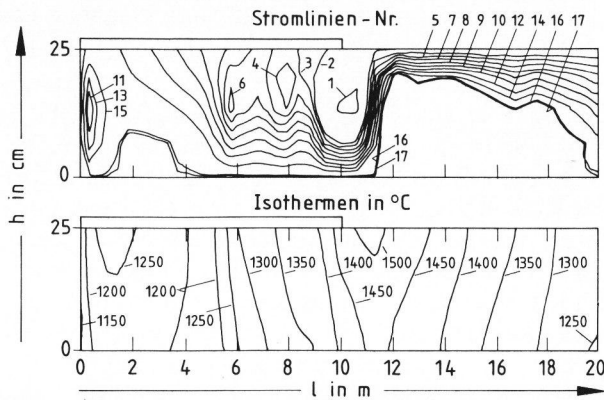


Bild 3. Stromlinien und Isothermen bei einer auf 25 cm reduzierten Badtiefe. Durchsatz: 700 kg Glas/(m<sup>2</sup> d).

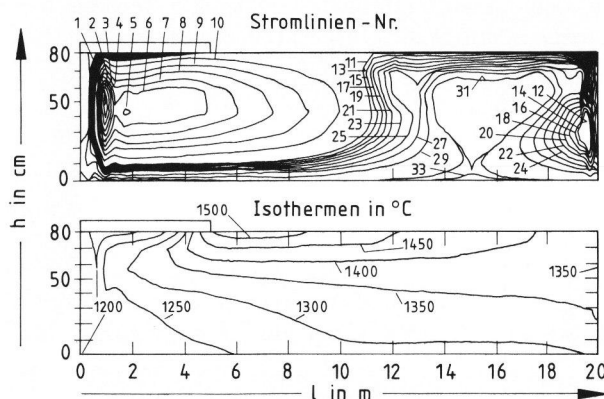


Bild 4. Stromlinien und Isothermen bei einer Erhöhung der Schmelzleistung um 100 %.

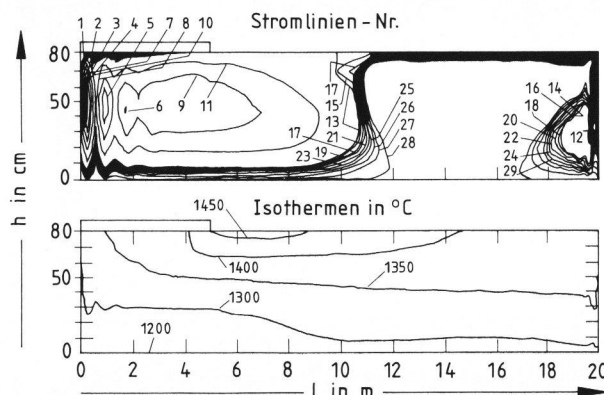


Bild 5. Stromlinien und Isothermen bei einer Absenkung der Schmelzleistung um 50 %.

Der Energietransport in dem niedrigen Schmelzbad findet praktisch nur noch durch Wärmeleitung und Strahlung und nur erheblich vermindert durch Konvektion statt. Wie im Beispiel mit 40 cm Badtiefe, mußte auch in diesem Fall wegen der verminderten Konvektion die Gemengedecke bis kurz vor den Quellpunkt verlängert werden (Tabelle 2).

Trotz der sehr einschneidenden Reduzierung der Badtiefe auf nur noch 25 cm konnten die Rotations-

strömungen nicht vollständig unterdrückt werden. Die Hauptströmungswalze ist jedoch so schwach, daß die unter dem Gemenge entstehende Glasschmelze direkt zum Wannensboden absinkt. Eine Verdrängung der Strömungsbahnen zur Einlegewand hin findet nicht statt. Die Aufwärtsströmung im Bereich des Quellpunktes besteht auch bei der verminderten Badtiefe. Vom Quellpunkt aus tritt jedoch eine stärkere Verteilung der Strömungsbahnen zum Durchlaß hin ein als bei den größeren Badtiefen. Das tote Gebiet hinter dem Quellpunkt läßt sich dennoch nur unwesentlich reduzieren. Die Durchlaufzeit auf der schnellsten Strömungsbahn ist gegenüber dem „Standardzustand“ nur um 21 % herabgesetzt, obwohl der Wanneninhalte um 69 % verringert wurde (Tabelle 2).

### 3.3. Erhöhung der Glasentnahme um 100 %

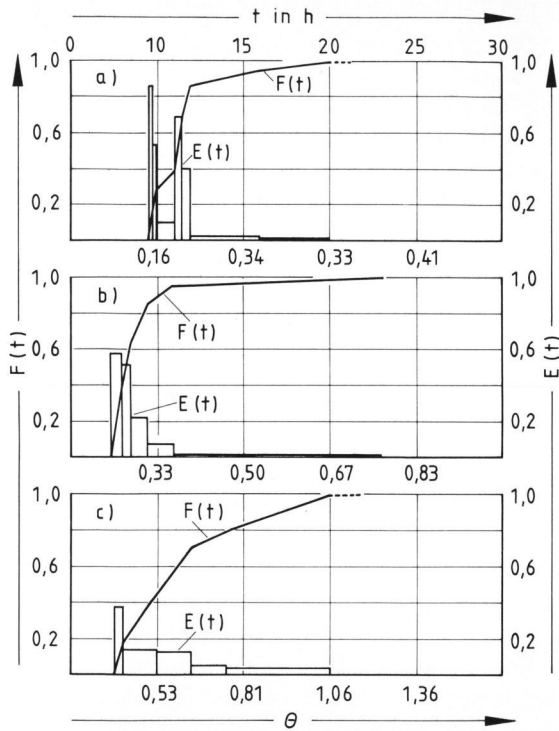
Die Energieverteilung und infolgedessen auch die Strömungsverteilung im Schmelzbad sind nicht nur durch die genannte Badabsenkung, sondern vor allem durch Durchsatzänderungen beeinflussbar. Die bei einer doppelten Glasentnahme sich einstellenden Temperatur- und Strömungsfelder sind in Bild 4 dargestellt. Unter der Voraussetzung, daß die gesamten Wannenverluste sich auf etwa 50 % der zugeführten Energie belaufen, wurde die für die Durchsatzerhöhung erforderliche Energiezufuhr auf 150 % erhöht. Im Vergleich zum „Standardzustand“ ergeben sich folgende Änderungen:

- Es bildet sich ein größeres Temperaturgefälle zwischen der heißesten Stelle und dem Einlegebereich aus.
- Die Durchlaufzeit der Partikeln auf der schnellsten Strömungslinie ist um 16 % geringer (Stromlinie Nr. 21 in Bild 4 gegenüber Stromlinie Nr. 19 in Bild 1; siehe auch Tabelle 1).
- Wegen des größeren Temperaturgefälles sind die Umlaufzeiten der Rotationströmungen etwas geringer (Stromlinie Nr. 11 in Bild 4 gegenüber Stromlinie Nr. 10 in Bild 1; siehe auch Tabelle 1).
- Das etwa 7 bis 8 m (in Bild 1) lange tote Gebiet ist durch die Durchsatzerhöhung auf rund 3 bis 4 m (Bild 4) reduziert worden.

Die hier berechnete erhebliche Durchsatzerhöhung führt zwar nicht zum gänzlichen Vermeiden des toten Gebietes, hat aber eine deutlich bessere Ausnutzung des Wanneninhaltes zur Folge. Allerdings ergibt sich gleichzeitig eine kürzere Verweilzeit für die Durchsatzströmung.

### 3.4. Verminderung der Glasentnahme um 50 %

Um das ermittelte Ergebnis der besseren Wannenausnutzung durch Erhöhung der Glasentnahme auch indirekt zu bestätigen, wurde ein Wannenbetrieb mit halber Glasentnahme im Vergleich zum „Standardzustand“ berechnet. Die zugeführte Wär-



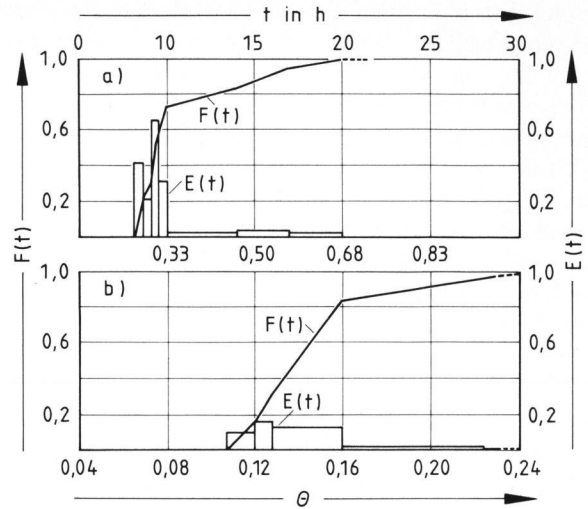
Bilder 6a bis c. Berechnete Verweilzeitverteilungen E(t) und Übergangsfunktionen F(t) für verschiedene Betriebszustände. Zeit t in h; dimensionslose Zeit  $\tau = \text{Zeit } t \text{ auf mittlere Kolbenströmungszeit } t_m \text{ bezogen}$ ;  
 a) „Standardzustand“, b) auf 40 cm herabgesetzte Badtiefe, c) auf 25 cm herabgesetzte Badtiefe.

meenergie wurde auf 75 % reduziert. Bild 5 zeigt die Temperatur- und Strömungsverteilung. Die im Vergleich zum „Standardzustand“ ermittelten Ergebnisse sind im wesentlichen:

- a) größere Temperaturhomogenität;
- b) Verlängerung der Verweilzeit auf der schnellsten Strömungslinie um 40 % (Stromlinie Nr. 19 in Bild 5 gegenüber Stromlinie Nr. 19 in Bild 1; siehe auch Tabelle 1);
- c) Reduzierung der Umlaufzeit für die Hauptrotationswalze um 18 % (Stromlinie Nr. 9 in Bild 5 gegenüber Stromlinie Nr. 9 in Bild 1);
- d) erhebliche Verzögerung der kleinen Umlaufwalze unmittelbar vor dem Durchlaß;
- e) keine Änderung des Strömungsverhaltens im toten Gebiet zwischen dem Quellpunkt und dem Durchlaß.

#### 4. Berechnete Verweilzeitverteilungen und Übergangsfunktionen

Zu allen Variationen der Badtiefe und des Durchsatzes wurden auch die Verweilzeitverteilungen und die Übergangsfunktionen berechnet (Bilder 6a bis c, 7a und b). Die Verweilzeitverteilung E(t) ist in Form eines Histogramms angegeben und gibt den Anteil der Durchsatzströmung wieder, der zwischen



Bilder 7a und b. Berechnete Verweilzeitverteilungen E(t) und Übergangsfunktionen F(t) für verschiedene Betriebszustände. Zeit t in h; dimensionslose Zeit  $\tau = \text{Zeit } t \text{ auf mittlere Kolbenströmungszeit } t_m \text{ bezogen}$ ;  
 a) um 100 % erhöhte Durchsatzströmung, b) um 50 % verminderte Durchsatzströmung.

Tabelle 3. Vergleich der berechneten Verweilzeiten verschiedener Betriebszustände

Betriebszustand	Verweilzeit in h für vorgegebene Übergangsfunktionswerte in %				Bezug zu Bild	
	25 %	50 %	75 %	90 %		
Durchsatz in %						
Badtiefe in cm						
100	80	10,2	11,3	11,7	14	6a
100	40	7,8	8,3	9,1	10,3	6b
100	25	8,5	10,4	13,2	17,3	6c
200	80	8,8	9,4	10,6	15,8	7a
50	80	15,6	17,4	19,4	24	7b

der Zeit t bis t +  $\Delta t$  die Wanne von der Gemengedecke bis zum Durchlaß durchströmt. Ein Austausch der in den Rotationswalzen zirkulierenden Schmelze kann wegen der Zweidimensionalität des Modells nicht berücksichtigt werden. Die Übergangsfunktion F(t), auch Spülungskurve genannt, entspricht dem Integral der Verweilzeitverteilung über der Zeit und gibt den gesamten Anteil der Schmelze an, die bis zur Zeit t die Wanne verläßt.

Bild 6a bezieht sich auf den „Standardzustand“. Bemerkenswerterweise besitzt die Verweilzeitverteilung zwei Maxima. Die schnellste Schmelze gelangt mit einem Gesamtanteil von F(t) = 30 % schon nach einer Verweilzeit von etwa 10 h in den Durchlaß. Der Hauptstrom erreicht den Durchlaß erst nach etwa 12 h (Tabelle 3).

Bei der Absenkung der Badtiefe auf 40 cm (Bild 6b) und 25 cm (Bild 6c) wird die Verweilzeit der

schnellsten Schmelze verkürzt, vor allem weil die Schmelzpartikeln kürzere Wege in der Durchsatzströmung zurücklegen. Die Übergangsfunktionen nähern sich insbesondere bei der Badtiefe von 25 cm der theoretisch bei Systemen ohne natürliche Konvektion vorliegenden exponentiellen Kurve. Solche Übergangsfunktionen weisen darauf hin, daß die Entnahmestromung kaum durch natürliche Konvektionswalzen verdrängt wird und daß sie eine bessere Verteilung im Wannenraum einnimmt. Dieses auf den ersten Blick überraschende Ergebnis wird verständlich, wenn man berücksichtigt, daß die Strömungsbahnen auch von der Länge des Gemengetepichs abhängen, die bei den geringeren Badtiefen vergrößert wurde (siehe Tabelle 2).

Beim Verdoppeln der Schmelzleistung (Bild 7a) tritt eine Verkürzung der Verweilzeit ein. Die im „Standardzustand“ festgestellten beiden Maxima sind ebenfalls zu kürzeren Zeiten hin verschoben, bleiben jedoch in ähnlicher Weise erhalten. Der Gesamtanteil der schnellsten Schmelze beträgt nur 20 (Bild 7a) gegenüber 30 % im „Standardzustand“ (Bild 6a).

Das Halbieren der Glasentnahme führt ebenso wie das Reduzieren der Badtiefe zu einer ausgeglichenen Verweilzeit- und Übergangsfunktion (Bild 7b). Eine Unterscheidung verschiedener Durchsatzmaxima ist praktisch nicht möglich.

## 5. Diskussion der Ergebnisse

Bei der Variation der Glasentnahme von 50, 100 und 200 %, die Gesamtbelastungen der Wanne von 350 bis 1400 kg Glas/(m<sup>2</sup> d) entsprechen, konnte keine prinzipielle Änderung im Strömungsverlauf festgestellt werden.

Der Entnahmeeinfluß wird beim Vergleich der Durchlaufzeit für die schnellsten Strömungsbahnen deutlich (Tabelle 2). Er stellt sich jedoch erheblich schwächer ein, als von der drastischen Entnahmeänderung zu erwarten wäre. Reserven für höhere Glasentnahmen sind somit im genannten Bereich der Wannenbelastung zu finden. Erfahrungen der Praxis bestätigen dieses Ergebnis. In Tabelle 2 sind die kürzesten Verweilzeiten für die verschiedenen Betriebszustände zusammengefaßt. Die beim höchsten Durchsatz von 2,2 kg/s ermittelte kürzeste Verweilzeit von  $t_p = 8,1$  h ist nur wenig kleiner als die kürzeste Verweilzeit von  $t_p = 9,6$  h für die halbe Glasentnahme. Bezieht man die kürzeste Verweilzeit auf die theoretisch sich ergebende mittlere Verweilzeit (für Kolbenströmung), so stellt man fest, daß die Leistungssteigerung die dimensionslose Zeit praktisch im gleichen Verhältnis wie die Glasentnahme erhöht. Somit ist die Ausnutzung des Wanneninhaltes bei den geänderten Glasentnahmen unverändert geblieben.

Oft wird die Schmelzleistung durch die Geschwindigkeit der Formmaschinen begrenzt. Beim Auslegen

der Schmelzwanne ist dann ein solcher Rauminhalt des Wannenbeckens zu wählen, der ein optimales Ausnutzen gewährt. Ein Vermindern der Wannengröße bietet mehrfache Vorteile: Der Preis für das Feuerfestmaterial kann niedrig gehalten werden; die Energieverluste sind gering; bei Rezepturänderungen tritt der Schmelzwechsel in kurzer Zeit ein. Das Reduzieren der Badtiefe auf die Hälfte bis auf ein Drittel der ursprünglichen Tiefe scheint nach den bisherigen Ergebnissen die geeignete Maßnahme zu sein, die strömungsarmen Räume zu vermindern. Zwar werden bei den berechneten Badabsenkungen die kürzesten Verweilzeiten um 20 bis 25 % herabgesetzt, die Ausnutzung des Ofeninhaltes steigt jedoch, ausgedrückt durch die kürzeste dimensionslose Verweilzeit, um bis zu 200 % an. Bei 25 cm Badtiefe erreicht die dimensionslose Verweilzeit von 0,39 die theoretisch bei Kolbenströmung vorliegende Größenordnung von 0,48 bis 0,75. Da gleichzeitig mit dem Badabsenken eine bessere Durchwärmung erfolgt, erhöht sich die Temperatur der Schmelze auf den Stromlinien der Durchsatzströmung, so daß die Schmelzleistung möglicherweise nicht herabgesetzt werden muß, sondern sogar gesteigert werden kann. Der Wannenraum kann nicht optimal ausgenutzt werden, weil es nicht gelingt, ein Bündel von parallelen Strömungslinien zu schaffen, wie sie bei isothermen Strömungen vorliegen. Bei der niedrigen Badtiefe von 25 cm nähert man sich aber deutlich einer solchen Strömung.

Die hier interpretierten Ergebnisse stammen zwar aus einem zweidimensionalen mathematischen Modell, stimmen aber durchaus mit vielen Einzelerfahrungen der Wannenbetreiber überein. So gilt beispielsweise als Erfahrungssatz, daß die Durchlaufzeit bei einfachem Behälterglas nicht unter 2 und bei höherwertigen Hohlgläsern nicht unter 4 h sinken darf [3]. An der untersuchten Wanne wurden innerhalb von drei Jahren drei verschiedene Isotopenmessungen durchgeführt, die Durchlaufzeiten von 5,5 bis 7,5 h ergaben. Mit der errechneten Durchlaufzeit von 9,6 h wurde somit keine völlige Übereinstimmung des Modells mit der Glasanlage – zumindest nicht in der „ersten“ Berechnung – erzielt. Eine bessere Anpassung ist aus der genaueren Messung der zu- und abfließenden Wärmeströme zu erreichen. Doch ist die Abweichung nicht so groß, daß sie den Vergleich relativer Änderungen der Betriebsverhältnisse nicht gestatten könnte. Selbst beim Absenken der Badtiefe auf 25 und 40 cm verringerte sich die Durchlaufzeit auf 4,6 bzw. 5,8 h, auf Zeiten also, die immer noch oberhalb der 4-h-Grenze liegen und die den Erfahrungswerten entsprechen.

Die im Modell nicht berücksichtigte Querströmung bewirkt generell eine Verlängerung der Durchlaufzeiten. Im Fall der Badabsenkung läßt sie eine weniger markante Durchlaufzeitreduzierung erwarten als die Rechenwerte zeigen, so daß die bisher als

notwendig angesehene Zeit von 4 h sicher erreicht wird. Überdies vermindern herabgesetzte Querströmungen die Korrosion des Feuerfestmaterials an den Seitenwänden.

Bereits aus den Rechenergebnissen sind Probleme beim Gemengeeinlegen und -schmelzen erkennbar. So mußten die durch das Gemenge verursachten Wärmesenken auf große Flächen verteilt werden,

weil der Energietransport durch Konvektion aus den heißen Wannenbereichen teilweise unterbunden war. Bei niedrigen Badtiefen werden daher im Gemengebereich zusätzliche Energiezufuhren nützlich sein, die sich durch bekannte Technologien, wie die Vorwärmung des Gemenges vor der Einlage oder die elektrische Zusatzheizung in der Schmelze, realisieren lassen.

## 6. Literatur

- [1] Leyens, G.; Smrček, J. und Thyn, J.: Anwendung der Isotopen-Meßtechnik und eines mathematischen Modells zur Bestimmung der Strömungsverteilung in einer Schmelzwanne. *Glastechn. Ber.* **53** (1980) S. 124–129.
- [2] 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.
- [3] Smrček, J.: Theoretische und praktische Gesetzmäßigkeiten in kontinuierlich betriebenen Glasschmelzwannen. (Orig. tschech.) In: Konferenz CVTS, Usti n/Labem April 1979. Sammelbd.

82R0989