

DK 666.1.031.2:666.17:65.012.66:666.11.019.2:666.76:658.562.6

**Verhalten von Tageswannen für Hohlglas. Ergebnisse einer Vergleichsuntersuchung\***

Von DIETRICH STARZINSKY, Frankfurt (Main)

(Vortrag auf der 42. Glastechnischen Tagung am 15. Mai 1968 in Würzburg)

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 23. September 1968)

Nach einem umfassenden Plan wurden sechs Tageswannen in konstruktiver und betriebstechnischer Hinsicht überprüft. Glasproben zur genauen Identifizierung auftretender Glasfehler und vor allem zur Einstufung der in den einzelnen Öfen erschmolzenen Gläser nach einem geeigneten Qualitätsmaßstab wurden entnommen. Das bei allen untersuchten Wannn für das Wannnbecken eingesetzte Feuerfestmaterial ist starker Ribbildung unterworfen. Durch diese Risse besteht die Gefahr, daß sich Primärschmelzen, ungeläutertes Glas und Kontaktglas darin ansammeln und bei höherer Temperatur bzw. im Verlauf des Ausarbeitens auslaufen und die Schmelze verunreinigen.

Als Hauptquelle für die Glasfehler stellt sich das aus dem Oberofen zur Schmelze abfließende Schlackenglas heraus, dessen Menge von der temperaturbedingten Kondensation verdampfender Komponenten der Schmelze, durch Ablagerung von Gemengestaub, Schmelzen überhitzter feuerfester Steine, auslaufende Schmelzphasen, Kontaktreaktionen zwischen verschiedenen Feuerfestmaterialien und vermutlich auch von der Porosität der Silikasteine abhängig ist.

Im Hinblick auf die Feuerführung sind bei größeren Anlagen die Längsbrennerwannen und die Doppeldeckenwannen gegenüber Wannn mit stehenden U-Flammen im Vorteil.

Neben dem Hafenofen und der kontinuierlich betriebenen Schmelzwanne stellt die Tageswanne einen eigenständigen Ofentyp dar, der eine Sonderstellung einnimmt. Über die Besonderheiten dieses Ofentyps und seinen Anwendungsgrenzen gegenüber den beiden anderen Ofensystemen bestehen noch Unklarheiten. Es wurde daher die Aufgabe gestellt, verschiedene Tageswannen zu überprüfen, die Betriebsergebnisse und Erfahrungen zu sammeln und kritisch auszuwerten.

Die Tageswanne steht mit ihrer periodischen Betriebsweise dem Hafenofen nahe, während sie in konstruktiver Hinsicht der kontinuierlich betriebenen Schmelzwannen gleicht. Durch die Verwendung eines Schmelzbeckens, das von außen gekühlt wird, entfällt die für den Hafenofen gültige Begrenzung der Schmelztemperatur. Das Schmelzbecken kann aus einzelnen Blöcken aufgebaut werden, was eine freiere Materialauswahl ermöglicht. Es besteht somit die Möglichkeit, mit höheren Temperaturen zu fahren, was die Schmelze und Läuterung des Glases erleichtert, außerdem können schwer zu erschmelzende Gläser, für die der Hafenofen nicht geeignet ist, hergestellt werden.

Gegenüber dem Hafenofen besteht weiterhin der Vorteil, daß die Erneuerung und Behandlung der Häfen und alle damit verbundenen betrieblichen Schwierigkeiten entfallen. Eine Mechanisierung der Gemengeeinlage ist bei Tageswannen leichter möglich als bei Hafenöfen. Gegenüber der kontinuierlich arbeitenden Wanne hat die Tageswanne den Vorteil, daß auch kleine Glasmengen wirtschaftlich erschmolzen werden können und es nicht notwendig ist, beim Ausarbeiten auf Schichtarbeit überzugehen. Die Entnahme und Weiterverarbeitung des Glases kann manuell geschehen, was für kleinere Serien von Spezialartikeln vorteilhaft ist.

Diesen Vorteilen stehen allerdings auch Nachteile gegenüber. Gegenüber manchen Hafenofensystemen ist die Anzahl der Arbeitsstellen begrenzt, auch kann nur eine Glasart erschmolzen werden, wenn auch relativ leicht von einer auf eine andere Glasart übergegangen werden kann. Ein sehr wichtiger Punkt, über den noch nicht genügend Klarheit besteht, ist die Frage der Glasqualität. Es wird häufig bestritten, daß mit Tageswannen die im Hafenofen erzielbare Glasqualität erreicht werden kann.

Über die betrieblich wirtschaftliche Seite der Tageswanne im Vergleich zum Hafenofen hat SORG [1] berichtet, so daß dieser Punkt hier nicht mehr eingehend behandelt werden muß.

**1. Umfang und Art der Untersuchung**

Die Untersuchung war darauf abgestellt, Tageswannen unterschiedlicher Konstruktion und mit unterschiedlichen Produktionsprogrammen und Qualitätsansprüchen zu überprüfen. Neben der wärmetechnischen Seite galt es vor allem, Zusammenhänge zwischen Ofenkonstruktion, feuerfestem Material und Betriebsweise auf der einen Seite und der Glasqualität und auftretenden Glasfehlern auf der anderen Seite aufzudecken.

**1.1. Bauarten und Abmessungen der untersuchten Wannn**

Die Untersuchung umfaßte sechs Anlagen mit einer Herdfläche zwischen 1,5 und 9 m<sup>2</sup> und Schmelzleistungen bzw. Glasentnahme zwischen 1,0 und 5,4 t/24 h. Als Brennstoff diente in allen Fällen Heizöl EL. Das Herstellungsprogramm umfaßte Preßgläser aus Natron-, Kali- und Bleiglas und mundgeblasene Beleuchtungsgläser aus Opalglas bzw. halbautomatisch hergestellte Flakons aus Farbgläsern. Die Bauarten der untersuchten Anlagen sind schematisch in den Bildern 1 a bis d dargestellt. Die wichtigsten konstruktiven und betrieblichen Daten der Anlage sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Die untersuchten rekuperativ beheizten Tageswannentypen können alle unter die Bezeichnung Stirnbrennerwannen eingereiht werden. Nach der Form des Flammenweges im Herdraum sind die im Untersuchungsprogramm aufgenommenen Stirnbrennerwannen zu unterteilen: in Wannn, bei denen die Flamme in Ofenlängsrichtung brennt und an der der Stirnwand gegenüber liegenden Rückwand abzieht, also in ‚Längsbrennerwannen‘, und solche mit einer nach oben umschlagenden U-förmigen Flamme.

Bei den U-Flammenwannen ist eine weitere Unterteilung vorzunehmen, und zwar in Wannn mit geführ-

\*) In der Untersuchung wurden die Tageswannen zur Flachglasherstellung nicht erfaßt, da sie fast ausschließlich zum Erschmelzen von Trübgläsern eingesetzt werden und somit eine Auswertung der Glasqualität in bezug auf Homogenität und Glasfehler nicht gegeben war.

ter U-förmiger Flamme durch Einbau eines Zwischengewölbes, in sogenannte Doppeldeckenwannen, und solche mit frei nach oben umschlagender U-förmiger Flamme mit Abzug durch Öffnungen in der Stirnwand über den Brennern oder durch Öffnungen in den Seitenwänden in Nähe der Stirnwand. Bei den Doppeldeckenwannen ziehen die Flammengase zwischen den Gewölben entweder durch Öffnungen in der Stirnwand oder durch Öffnungen in den Seitenwänden in Nähe der Stirnwand ab.

Die Bilder 1 a bis d zeigen schematisch den Seiten- und Grundriß der untersuchten vier Wannentypen. Die Richtung des Flammenweges ist durch einen Pfeil dargestellt.

### 1.1.1. Längsbrennerwanne

Die in Bild 1 a schematisch dargestellte Wanne I wird über eine Brennstoff-Luftverhältnis- und eine Herdraumdruckregelung gefahren. Zwei Keramik-Rekuperatoren sind liegend unter dem Schmelzbecken angeordnet. Die vorgewärmte Luft strömt durch einen senkrecht aufsteigenden Luftschacht und wird dann durch einen Verteilungskegel auf die Brenner aufgeteilt. Der Grundriß der Wanne ist trapezförmig. Die beiden Brenner mit je einem Winkelzerstäuber befinden sich in der schmalen Stirnwand, die beiden Abzüge und das dazwischen liegende Einlegeloch in der breiteren Rückwand der Wanne. Die Winkelzerstäuber werden waagrecht von außen durch die äußere Seitenwand der Brennerschächte eingeführt. Die Wanne besitzt an ihren beiden Längsseiten je zwei symmetrisch angeordnete Arbeitsöffnungen.

Gemenge und Scherben werden mit einer fahrbar aufgehängten großen Kelle durch das Einlegeloch eingebracht und in Form eines in Ofenlängsrichtung verlaufenden Gemengehaufens aufgeschüttet.

### 1.1.2. Doppeldeckenwanne

Zu dem in Bild 1 b schematisch dargestellten Typ der Doppeldeckenwanne zählen die im Untersuchungsprogramm aufgenommenen Wannen II, III und IV verschiedener Größe und mit konstruktiven Unterschieden. Der Grundriß der drei Wannen ist rechteckig. Jede Wanne besitzt zwei Brenner mit je einem Zweistufen-ölzerstäuber. Die Luft wird für jeden Brenner getrennt von den Rekuperatoren von oben dem Mischraum der Brenner zugeführt. Luft und zerstäubtes Öl treffen unter einem Winkel von 60° aufeinander.

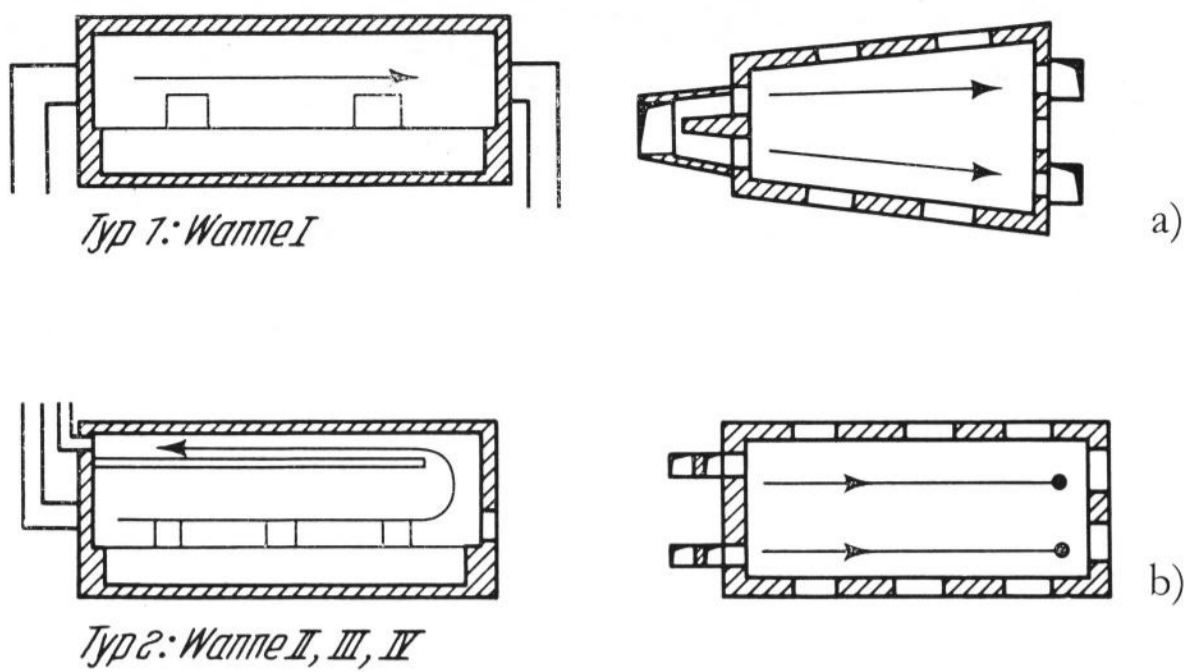
Bei den Wannen III und IV sind die beiden Stahlrekuperatoren stehend seitlich neben dem Ofen an der Stirnwand angebracht, bei Wanne II dagegen stehend über dem Wannengewölbe an der Stirnwand. Die Abgase werden über den Raum zwischen den Gewölben bei Wanne II und Wanne III durch zwei, bei Wanne IV dagegen durch vier in der Stirnwand angebrachte Abzugsöffnungen abgesaugt.

Bei Wanne II und IV werden Scherben und Gemenge durch die Einlegeöffnung zwischen den Brennern und der Stirnwand und bei Wanne III durch ein Einlegeloch zwischen den Arbeitsöffnungen in der Rückwand der Wanne mit Einlegemaschinen über eine Förderrinne eingelegt.

Tabelle 1. Daten der untersuchten Anlagen

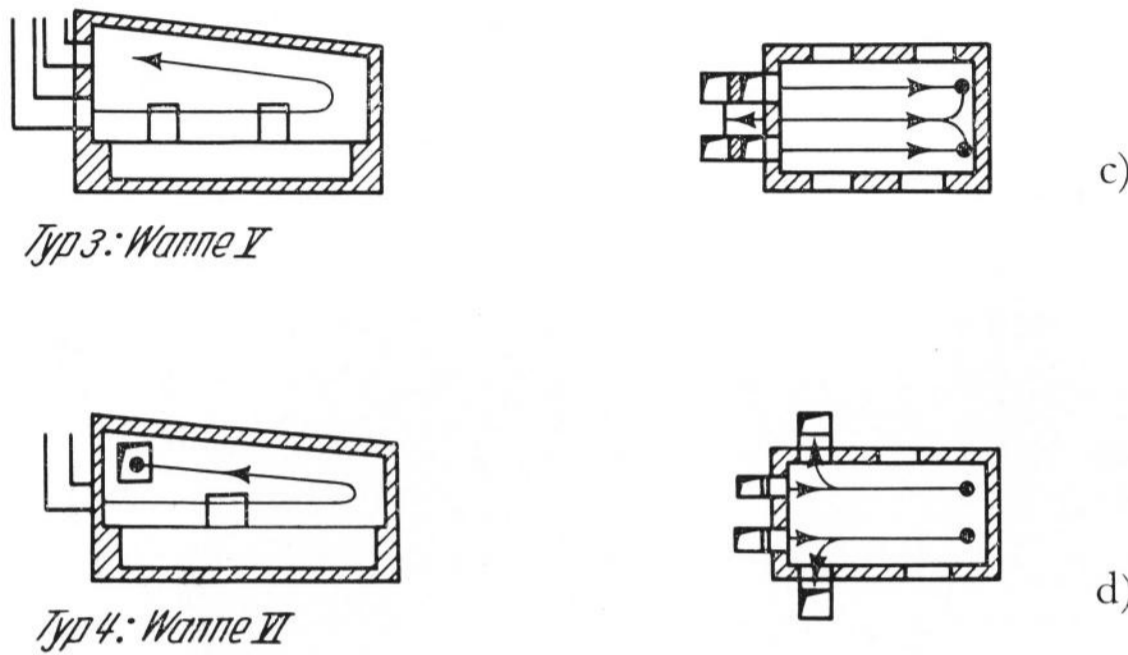
Beschreibung	Wanne I	Wanne II	Wanne III	Wanne IV	Wanne V	Wanne VI	Grenzwerte
Länge in m	3,2	2,85	3,0	3,6	1,8	2,0	1,8 — 3,6
Breite in m	1,6—2,6	2,4	4,4	2,5	1,3	1,2	1,2 — 2,5
Verhältnis Länge/Breite	1,52:1	1,19:1	1,3:1	1,44:1	1,38:1	1,66:1	1,19—1,66
Schmelzfläche in m <sup>2</sup>	6,72	6,62	6,9	9,0	2,34	2,4	2,34—9,0
Badtiefe in m	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4 — 0,5
Abstand der Zwischen- gewölbe in m	—	0,26	0,4	0,25	—	—	0,25—0,4
Querschnittsfläche des Flammenraumes in m <sup>2</sup>	1,04—1,84	1,85	1,79	1,32	1,34—0,95	0,91—1,3	0,91—1,85
Flammenraum in m <sup>3</sup>	4,61	5,26	5,38	4,77	2,33	1,88	1,88—5,38
mittl. Gewölbehöhe in m*)	0,65	0,79	0,77	0,53	1,0	0,78	0,53—1,0
Abstand der Brenner- achsen in m							
a) horizontal	0,7	1,2	1,4	1,6	0,35/0,35	0,46	0,35—1,6
b) vom Gewölbe	0,45	0,19	0,63	0,3	0,9—0,7	0,72	0,19—0,9
c) vom Glasspiegel	0,3	0,5	0,3	0,3	0,35	0,3	0,3 — 0,5
d) von Außenwänden	0,45	0,6	0,44	0,45	0,45	0,41	0,41—0,6
Neigung der Achsen zum Bad	—	—	—	6°	—	—	—
Verstellung der Achsen zur Mitte	—	—	—	8°	—	—	—
Brennerzahl	2	2	2	2	3	2	2—3
Brennstoffart	Öl „EL“	Öl „EL“	Öl „EL“	Öl „EL“	Öl „EL“ Leuna	Öl „EL“	—
Brennstoffverbrauch in kg Öl/24 h	1937	2150	1930	2134	1290	1377	1290—2150
Wärmeverbrauch · 10 <sup>6</sup> in kcal/24 h	20,91	22,04	19,78	21,87	13,2	11,0	11,0—22,04
spez. Wärmeverbrauch in kcal/kg Glas	5101	6580	3690	5360	12 355	11 000	3 690—12 355
Schmelzleistung in t/24 h	4,09	3,35	5,36	4,08	1,07	1,0	1,0 — 5,36
spez. Schmelzleistung in t/m <sup>2</sup> 24 h	0,61	0,5	0,77	0,53	0,54	0,41	0,41—0,77
Luftvorwärmung	rekup.	rekup.	rekup.	rekup.	rekup.	rekup.	—
Rekuperator: Lage	lieg./unt.	steh./oben	steh./unt.	steh./unt.	steh./oben	steh./oben	—
Material	Stein	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	—

\*) Mittlere Gewölbehöhe: mittlere Höhe vom Gewölbescheitel bis zur Wannensteinoberkante, errechnet aus dem Flammenraumvolumen.



Typ 1: Wanne I

Typ 2: Wanne II, III, IV



Typ 3: Wanne V

Typ 4: Wanne VI

Bilder 1a bis d. Untersuchte Wannentypen,

- a) Wanne I, Längsbrennerwanne,
- b) Wannen II bis IV, Doppeldeckenwannen,
- c) Wanne V, Stirnbrennerwanne mit U-Flamme, Abzug in der Stirnwand,
- d) Wanne VI, Stirnbrennerwanne mit U-Flamme, Abzüge in den Seitenwänden.

Dadurch, daß bei Doppeldeckenwannen Brenner und Abzüge in der Stirnwand untergebracht sind, bietet dieser Wannentyp die Möglichkeit, auch an der Rückwand Arbeitsöffnungen anzubringen; man kann somit an drei Seiten der Wanne Werkstellen errichten.

### 1.1.3. Stirnbrennerwanne mit U-Flamme — Abzug in der Stirnwand

Bei der in Bild 1c schematisch dargestellten Wanne V wird die vorgewärmte Luft über einen gemeinsamen Luftkanal zugeführt und gleichmäßig auf drei Brenner verteilt. Die drei Zweistufenölzerstäuber sind zentrisch in den Anschlußquerschnitten der Luftzuführung an den Brennern angeordnet.

Das Abgas der frei nach oben umschlagenden U-förmigen Flamme wird durch eine Abzugsöffnung in der Stirnwand abgezogen und über einen senkrechten Kanal in den über dem Gewölbe stehend installierten Stahlrekuperator geführt. Der im Anschluß an die Abzugsöffnung in der Stirnwand folgende kurze waagerechte Teil des Abgaskanals weist ein nach außen führendes Gefälle auf. Somit können aus dem Rekuperator auslaufende Schlacken nicht über die Stirnwand zur Glasschmelze zurückfließen. In dem von der höheren Stirnwand zur tieferen Rückwand abfallenden Gewölbe sind parallel zu den Gewölbewiderlagern Tropfkanten eingebaut. Scherben und Gemenge werden manuell durch je zwei auf den Ofenlängsseiten symmetrisch angeordnete Arbeitsöffnungen eingelegt.

Tabelle 2. Feuerfeste Baustoffe für das Schmelzbecken

Bauteil	Steinart			
	Korund-Zirkonoxid	Schamotte, gepflastert mit Korund-Zirkonoxidsteinen	Schamotte 21,7% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	Schamotte 40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>
Seitenwand	alle Wannen	—	—	—
Boden	Wanne I	Wanne II bis VI	Wanne V	Wanne II bis IV, VI

### 1.1.4. Stirnbrennerwanne mit U-Flamme — Abzüge in den Seitenwänden

Der Unterschied der in Bild 1d schematisch dargestellten Wanne VI zu der in Bild 1c dargestellten und in Abschnitt 1.1.3. beschriebenen Wanne V besteht hauptsächlich in der Anordnung der Abzugsöffnungen. Sie liegen in den Seitenwänden nahe der Stirnwand. Die Oberkante der Abzugsöffnungen liegt direkt unter den Widerlagersteinen, der Abstand zwischen Unterkante Abzug und Oberkante Wannenstein beträgt 0,45 m. Die Kanäle dieser Abzüge werden zu einem gemeinsamen senkrechten Sammelkanal in der Mitte der Wanne über dem Gewölbe zusammengefaßt; im Anschluß hieran folgt ein stehender Stahlrekuperator. Mit Schlackentaschen am Ende des ersten, waagrecht verlaufenden Teils der Abzugskanäle und durch eine zusätzliche Neigung der Sohle desselben wird ein Zurückfließen der aus dem Rekuperator über die senkrechten Teile der Abzugskanäle ablaufenden Schlacken zur Wanne verhindert.

Tabelle 3. Feuerfeste Baustoffe für den Oberbau

Bauteil	Feuerfeste Baustoffe				
	Silika	Korund-Zirkonoxid (schmelzgegossen)	Magnesit 86–88% MgO	Silika-Stampfmassen	Schamotte 44% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Gewölbe bzw. Zwischengewölbe)	I, II, III, IV, V, VI				
Seitenwand	I, II, III, IV, V, VI				
Rückwand	II, III, IV, V, VI	I			
Stirnwand	I, II, III, IV, VI	V			
Einfassung	Einlegeöffnung		I, II, III, IV		
	Arbeitsöffnung				I, II, III, IV, V, VI
	Abzugsöffnung Brenneröffnung	II, III, IV, I	I, V, VI, II, III, IV, V, V, VI		
Abzug	Gewölbe			I, II, III, IV	
	Seitenwand	VI		I, II, III, IV, V	
	Boden		V, VI	I, II, III, IV	
Brenner	Gewölbe		III, V, VI	II, IV	I
	Seitenwand		III, V, VI	II, IV	I
	Bankplatte		I, II, III, IV, V, VI		I
Bodenplatte der Arbeitsöffnung		III, V, VI			

Tabelle 4. Schmelztemperaturen und -zeiten

Bezeichnung	Wanne					
	I	II	III	IV	V	VI
Hochheizen:						
T in °C	1400	1450	1420	1400	1380	1340
t in h	1,0	1,6	1,6	1,6	1,0	0,6
Schmelzen:						
T in °C	1500	1530	1500	1460	1550	1520
t in h	12,0	9,1	7,8	8,8	10,7	12,9
Kaltschüren:						
T in °C	1190	1100	1120	1120	1200	1180
t in h	3,0	5,3	6,6	5,6	4,3	2,5

Zur Zeit der Durchführung der Untersuchung war die Wanne VI neben der Wanne I die einzige, die mit einer Brennstoff-Luft-Verhältnis- und einer Herdraumregelung betrieben wurde. Die rekuperativ vorgewärmte Luft wird von oben in den Mischraum der Brenner eingeführt. Das von der höheren Stirnwand zur tieferen Rückwand abfallende Gewölbe endet in Form einer Tropfkante. Tropfkanten am Gewölbeauslauf an den Widerlagersteinen sind nicht vorhanden. Gemenge und Scherben werden auch bei dieser Wanne manuell durch die Arbeitsöffnungen eingelegt.

## 1.2. Verwendete feuerfeste Baustoffe

Die für den Aufbau der untersuchten Tageswannen eingesetzten feuerfesten Materialien sind in Tabelle 2 und 3 aufgeführt.

## 1.3. Ofenbetriebsweise

### 1.3.1. Brennstoffverbrauch

Alle untersuchten Wannen wurden mit Heizöl EL beheizt. Der festgestellte Brennstoffverbrauch in kg Öl pro 24 h, der sich damit ergebende Wärmebedarf und der sich aus der Entnahmeleistung ergebende spezifische auf die Gewichtseinheit der entnommenen Glasmenge bezogene Wärmeverbrauch sind in Tabelle 1 mit ange-

geben. Der mittlere Brennstoffbedarf der Anlagen liegt bei 1800 kg Öl/24 h.

### 1.3.2. Temperaturführung

Der bei den einzelnen Anlagen festgestellte zeitliche Temperaturverlauf ist aus Bild 2 zu ersehen. Die wichtigsten Daten sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Beim Vergleich der Temperaturen und Schmelzzeiten ist zu berücksichtigen, daß bei Wanne III Bleiglas und bei Wanne VI Borosilicatglas, sonst Natron- bzw. Kaliglas geschmolzen wurde.

### 1.3.3. Produktion und Glasqualität

Die Art der Produkte und der Produktion sind aus Tabelle 5 zu ersehen. Bei der Beurteilung der Produktion wurde nach folgenden Gesichtspunkten vorgegangen:

a) Einsicht in die Betriebsaufzeichnungen der letzten Monate mit dem Ziel, quantitative Angaben über die Art und Menge der auftretenden Fehler und Ausschüßzahlen zu gewinnen. Leider waren die Betriebsaufzeichnungen nicht in allen Fällen eindeutig genug.

b) Überprüfung der Qualität und besonders der aussortierten Ware während der Zeit des Aufenthaltes im Betrieb. Da die Ansprüche der einzelnen Hütten, bedingt durch die Art des Produktes und evtl. spätere Veredelung, von Fall zu Fall unterschiedlich sind, ist für einen objektiven Vergleich der Ausschüßzahlen eine Fixierung der ausgeübten Qualitätskontrolle notwendig. Falls möglich, wurden Grenzmuster entnommen. Probestücke der aussortierten Ware wurden entnommen, um die Art der beobachteten Glasfehler (Schlieren, Steinchen, Blasen) später genau untersuchen zu können. Diese Untersuchungen wurden an der Technischen Universität Clausthal (Prof. Dr. H. W. HENNICKE) durchgeführt.

c) Aus verschiedenen Bereichen der Wanne und zu verschiedenen Zeiten während des Ausarbeitens wurden Glasproben aus der Schmelze entnommen und daraus durch Blasen Kugeln oder durch Ziehen Zapfen hergestellt. Die Qualität dieser Proben wurde ebenfalls nach

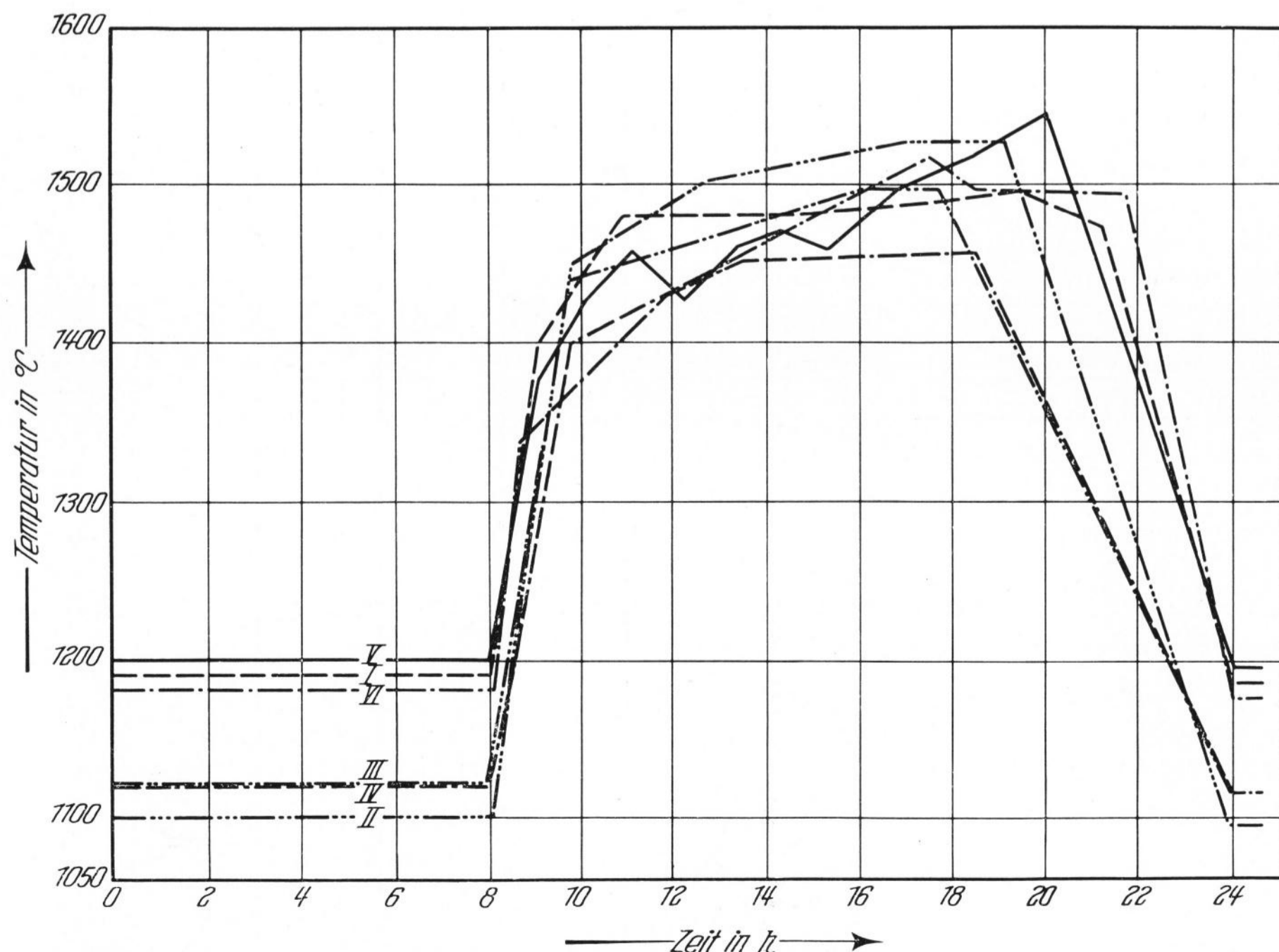


Bild 2. Temperaturführung der untersuchten Wannen.

Augenschein und nach einer selbst aufgebauten Skala nach Schlierigkeit beurteilt. Außerdem wurden von diesen Stücken in Clausthal Probeschleife hergestellt. Durch Überprüfung der Schlierigkeit nach schlierenoptischen Methoden wurde ein Vergleichsmaßstab für die Homogenität gewonnen. Glasproben, die an einem gutgehenden Hafenofer in gleicher Weise entnommen wurden, stellten den Anschluß an den Hafenoferstandard her.

**2. Ergebnisse der Untersuchung**

**2.1. Wärmetechnik**

**2.1.1. Schmelzleistung und Wärmeverbrauch**

Bei kontinuierlich betriebenen Wannen ist es üblich und zweckmäßig, die Schmelzleistung auf die Herdfläche und den Wärmeverbrauch auf die erschmolzene Glasmenge zu beziehen.

Errechnet man die spezifische Schmelzleistung, dann ergeben sich die in Zeile 19 der Tabelle 1 eingetragenen Werte. Sie liegen zwischen 0,4 und 0,8 t/m<sup>2</sup> 24 h und entsprechen damit den bei Hafenofer [2] üblichen Werten. Die höheren Schmelztemperaturen bei Tageswannen werden vermutlich, was die Schmelzleistung anbelangt, bei Hafenofer durch die zusätzliche Wärmezufuhr durch die Hafenwände kompensiert. Der spezifische Wärmeverbrauch (kcal/kg Glas) entspricht größenordnungsmäßig und streuungsmäßig ebenfalls dem von Hafenofer her gewohnten Bild [1].

Bei beiden Kenndaten wirkt sich der Ausarbeitungsgrad aus. Er wird — streng genommen — nicht auf die erschmolzene Glasmenge, sondern auf die entnommene Glasmenge bezogen. Die Ausarbeitungsgrade liegen bei 50 bis 70%. Sie sind meist vom Produktionsumfang und nicht, wie oft vermutet wird, von der abnehmenden Glasqualität bei größerer Ausarbeitung bedingt. Um den Einfluß des Ausarbeitungsgrades zu vermindern, empfiehlt es sich, den Brennstoffbedarf auf die Herdfläche und nicht auf die entnommene Glasmenge zu beziehen. Dies ist in Bild 3 geschehen. Zum Vergleich ist der spezifische auf die entnommene Glasmenge bezogene Wärmeverbrauch mit eingetragen. Man erkennt die starke Verminderung der Streuung beim Bezug des Brennstoffverbrauchs auf die Herdfläche. Bei dem spezifischen Wärmeverbrauch, bezogen auf die Gewichtseinheit der entnommenen Glasmenge, kommt neben den Unterschieden im Ausarbeitungsgrad noch das unterschiedliche spezifische Gewicht des Glases (Bleiglas bei Wanne III) zur Auswirkung. Der auf die Schmelzfläche bezogene Brennstoffverbrauch läßt sich in erster Nähe-

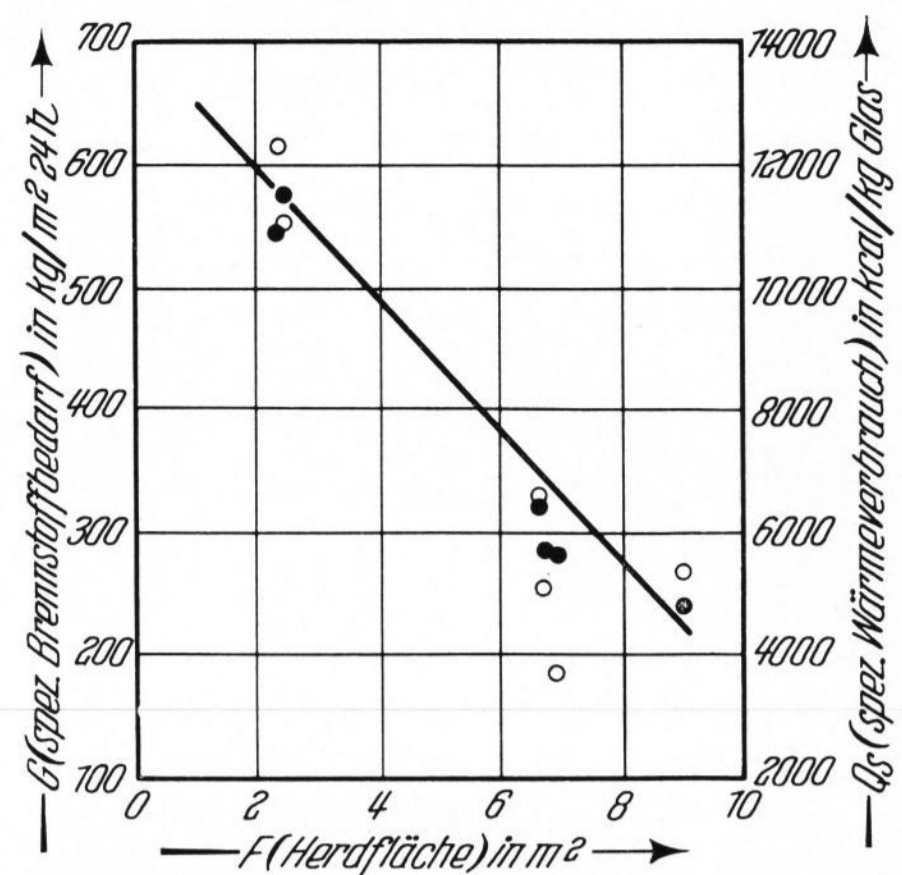


Bild 3. Zusammenhang zwischen spezifischem Brennstoffbedarf, spezifischem Wärmeverbrauch und Herdfläche.

rung im Bereich zwischen 2 und 9 m<sup>2</sup> Schmelzfläche durch eine Gerade darstellen. Aus den Daten der untersuchten Anlagen ergibt sich damit zwischen dem Gesamtbrennstoffbedarf G in kg Heizöl/24 h und der Herdfläche F in m<sup>2</sup> der Zusammenhang

$$G = F (700 - 58 F) \text{ kg Heizöl/24 h.}$$

Es besteht somit ein großer Einfluß der Herdfläche F.

Die hohen spezifischen Wärmeverbrauchsdaten sind teilweise auf die zusätzlich aufzubringende Wärme bei der Schmelze zum Aufheizen der großen Restglasmenge zurückzuführen, hauptsächlich aber auf die in den Stahlrekuperatoren erzielte geringe Luftvorwärmung auf maximal 450 °C, den durch den periodischen Betrieb bedingten Mehrverbrauch an Brennstoff zum Aufheizen der Wanne auf Schmelztemperatur sowie den beim Ausarbeiten benötigten zum Warmhalten der Schmelze. Bei Wanne V ist der hohe spezifische Wärmeverbrauch neben den bereits erwähnten Gründen vor allem auf die durch die Konstruktion bedingte kurze Flamme zurückzuführen (siehe Abschnitt 2.1.2.).

Aus Aufzeichnungen über Ölverbrauch und Schmelzleistung eines ganzen Jahres konnte der günstigste spezifische Wärmeverbrauch von 4800 kcal/kg Glas bei Kaliglasschmelzen ermittelt werden. — In Wanne VI wurde Borosilicatglas geschmolzen.

**2.1.2. Flammenlage und Flammenform**

Die Bemessung des Feuerungsraumes und die Einstellung der Flammen sind bei der Tageswanne schwieriger als beim Hafenofer und der kontinuierlich arbeiten-

Tabelle 5. In den einzelnen Wannn erschmolzene Glasarten und Herstellungsverfahren

Bezeichnung	Wanne					
	I	II	III	IV	V	VI
Glasart	Kaliglas	Kaliglas	Bleiglas 25%	Natronglas	Natronglas	—
Art der Produkte	Hohlglas	Beleuchtungs- glas	Beleuchtungs- glas	Beleuchtungs- glas	Flaschen und Flakons	Röhren
Herstellungsverfahren	Pressen	Pressen	Pressen	Blasen	Blasen halbautomatisch	Blasen
mittleres Artikelgewicht in g	950	2765	1250	1010	156	—
mittleres Glasvolumen in cm <sup>3</sup>	388	1129	417	412	64	—
Ausarbeitungsgrad in %	70	50	50	55	60	—

den Wanne. Die Hauptschwierigkeiten resultieren aus dem sich ändernden Niveau der Glasschmelze in Verbindung mit der Gemengeeinlage und der durch die Betriebsweise vorgegebenen Belastungsänderung der Brenner und Zerstäuber. Die Zeiten der höchsten Brennstoffbelastung fallen mit einem hohen Stand des Glasspiegels, der in Verbindung mit dem einschmelzenden Gemengehaufen den Verbrennungsraum und damit den Strömungsquerschnitt einengt, zusammen. Umgekehrt stehen bei geringer Brennstoffbelastung die größten Strömungsquerschnitte zu Verfügung. Hinzu kommt, daß eine starke Verdampfung des Glases und Verstaubung des Gemenges besonders während der Einschmelzperiode verhindert werden muß. Während der Ausarbeitung gilt es, bei geringer Belastung und großen Querschnitten eine gleichmäßige Beheizung der Anlage zu erreichen. Es ist verständlich, daß es unter solchen Bedingungen keine ideale Beheizung und Flammenausbildung geben kann.

Bei größeren Wannen bietet die Beheizung als Längsbrennerwanne Vorteile, da damit auch bei schwankender Belastung eine befriedigende Gleichmäßigkeit der Beheizung gewährleistet werden kann. Die Höhe des Feuerraumes und damit der beim Einschmelzen und Läutern zur Verfügung stehende Strömungsquerschnitt muß so gewählt werden, daß keine lokalen Überhitzungen und keine starke Verstaubung des einschmelzenden Gemenges entsteht. Beispiel für eine gute Anlage dieser Art ist Wanne I. Nachteilig ist bei der Längsbrennerbauart aber, daß nur die beiden Längsseiten für Arbeitsöffnungen zur Verfügung stehen.

Doppeldeckenwannen gestatten, eine Stirnseite der Wanne für Arbeitsöffnungen freizuhalten und auch bei Teillast eine stabile Flammenführung zu erreichen. Bei hoher Belastung und durch Glasschmelze und Gemenge eingegengtem Strömungsquerschnitt verhindert die Doppeldecke eine gegenseitige Behinderung von Flamme und abziehendem Abgas. Über die zweckmäßige Länge der Doppeldecke bestehen unterschiedliche Auffassungen. Während man früher  $\frac{3}{4}$  der Länge des Hauptgewölbes als zweckmäßig ansah, geht man heute mehr auf  $\frac{2}{3}$  oder  $\frac{1}{2}$  über. Nachteilig bei einer Doppeldeckenkonstruktion ist der höhere Zugbedarf der Anlage, bedingt durch die notwendige Umlenkung der Abgase. Diese Besonderheit wird bei seitlicher Anordnung der Abzüge über der Doppeldecke durch die damit bedingten zusätzlichen Umlenkungen noch ausgeprägter. In diesem Bereich wird auch oft eine starke, auf Wirbelbildung im Abgasstrom beruhende Steinkorrosion beobachtet. Die Oberflächen der Doppeldecken, verbunden mit der Abkühlung der Abgase im Bereich zwischen Hauptgewölbe und Doppeldecke, führen zu einer zusätzlichen zu Glasfehlern führenden Kondensation, auf die in Abschnitt 2.4.1. besonders hingewiesen wird. Die Abkühlung kann nur sehr beschränkt durch eine Wärmeisolation des Hauptgewölbes vermindert werden, da durch den periodischen Betrieb der Anlage die Doppeldecke beim Hochschüren als Wärmesenke wirkt. Den ohne Zweifel vorhandenen feuerungstechnischen Vorteilen der Doppeldecke stehen somit Nachteile gegenüber, die bei der Entscheidung nicht unberücksichtigt bleiben dürfen.

Bei kleineren Anlagen reicht der Flammenimpuls auch bei Teilbelastung (Kaltschüren) für eine stabile Flammenlage und gleichmäßige Beheizung der Anlage

aus. Die Vorteile der Doppeldecke kommen damit nicht zum Tragen, während die Nachteile bestehen bleiben. Es empfiehlt sich hier, mit einer frei nach oben umschlagenden U-Flamme zu arbeiten (Wanne V und VI). Vorteilhaft ist hier, das Gewölbe von der Stirnwand mit den Brennern zur Rückwand hin zuneigen.

## 2.2. Temperaturführung

Bei der Überprüfung und Beurteilung der Glasqualität und der auftretenden Glasfehler (siehe Abschnitt 2.4.) ergab sich bei den Wannen I, III und IV ein relativ hoher Blasengehalt des Glases. Diese Wannen weisen gegenüber den anderen relativ niedrige Läutertemperaturen  $\leq 1500^\circ\text{C}$  auf. Bei Wanne III ist zudem die Läuterzeit relativ kurz. Es besteht die berechnete Vermutung, daß für das Erschmelzen blasenarmer Gläser die Ofenraumtemperaturen über  $1500^\circ\text{C}$  liegen müssen bei einer Haltedauer von 10 bis 12 h.

## 2.3. Konstruktion und feuerfestes Material

### 2.3.1. Gewölbe

Was die Bemessung des Ofenraumes und die Lage der Flammenachse anbelangt, so bestand bei Wanne III wegen des geringen Abstandes der Flammenachse von 0,19 m zur Doppeldecke die Gefahr der Überhitzung des Gewölbes unter Schmelzbildung und damit eine Vermehrung des ablaufenden Schlackenglases. Als zweckmäßig ist ein Abstand von 0,4 bis 0,45 m anzusehen. Der Abstand Flamme—Glasspiegel bei gefüllter Wanne sollte gering sein, um einen guten Wärmeübergang zu erreichen, ohne allerdings zu starke lokale Überhitzungen des Glases und der damit verbundenen Verdampfung sowie eine starke Verstaubung des eingelegten Gemenges befürchten zu müssen. Ein Abstand von 0,3 bis 0,35 m ist als optimal anzusehen. Es ergibt sich somit ein optimaler Abstand von 0,7 bis 0,8 m zwischen Gewölbe und Glasspiegel.

Die Gewölbe aller untersuchten Wannen waren am Ende der Ofenreise in gutem Zustand, wenn man von



Bild 4. An den Ofenwänden ablaufende Schlacken.

der Verschlackung absieht. Die sich am Gewölbe und an den Wänden des Oberofens bildende und zum Teil in das Glasbad laufende Schlacke entsteht durch Kondensation verdampfter Glas- und Aufnahme verstaubter Gemengebestandteile (Bild 4).

Die Porosität des Silikamaterials hat einen Einfluß auf die Menge und Art der entstehenden Schlacke. Es ist damit zu rechnen, daß bei dichten Steinen weniger Schlacke mit dünnflüssiger Konsistenz ( $\text{SiO}_2$ -Gehalt gering), bei porösen Steinen mehr Schlacke mit zähflüssiger Konsistenz entsteht.

Der periodische Betrieb der Tageswannen bedingt vorübergehend niedrige Gewölbe- und Wandtemperaturen, starke Kondensationen lassen sich dadurch nicht vermeiden. Aus diesem Grunde erweisen sich auch die Gewölbe der Doppeldeckenwannen im Tageswannenbetrieb störungsanfälliger als bei kontinuierlichen Wannen, da über dem Zwischengewölbe anfallende Kondensate den Angriff auf beide Seiten des Gewölbes ausdehnen und die Menge der ablaufenden Schlacke vermehren.

Gegenüber dem Hafenofen besteht bei der Tageswanne der Nachteil, daß sich die im Oberofen bildende Schlacke fast vollständig in die Glasschmelze gelangt, während beim Hafenofen nur das im inneren oberen Bereich der Häfen ablaufende Kontaktglas zu Störungen der Qualität führt.

Bei Wanne II sammelt sich die durch anfallende Kondensate gebildeten Schlacken im Bereich der Widerlagersteine über dem Zwischengewölbe. Da keine Abflußmöglichkeit wie bei den Wannen III und IV — ebenfalls Doppeldeckenwannen — gegeben war, kam es zu verstärkter Korrosion mit später folgendem Durchbruch im Bereich der Fugen zwischen Widerlager- und Zwischengewölbe. Die Schlacke fließt bei dieser Konstruktion in die Schmelze ab und führt zu Glasfehlern. Besonders begünstigt wird der Verschleiß an dieser Stelle, wenn größere Fugen vorhanden sind, wie sie bei starrer Verankerung der Widerlagersteine, die sich den Bewegungen des Gewölbes beim Tempern schlecht anpassen, entstehen können. Unabhängig von dem Vorhandensein von Abflußöffnungen dürften sich bei allen Doppeldeckenwannen Kondensate an den Widerlagern ansammeln und, wenn auch verzögert und in geringem Ausmaß, doch zur gleichen Erscheinung führen.

Die Verwendung schmelzgegossener Korund-Zirkonoxid-Steine wurde versucht, allerdings ohne Erfolg. Es kam zur stärkeren Rißbildung, ohne daß die Schlackenbildung verhindert werden konnte (Bild 5). Am besten bewährt hat sich trotz mancher Schwächen das Gewölbe aus Silika in Verbindung mit Tropfkanten. Man erreicht auf diese Weise ein Abtropfen der Schlacke noch während der Läuterung des Glases, also zu einem Zeitpunkt, zu dem die Lösungsfähigkeit der Glasschmelze Silikaschlacke gegenüber noch gegeben ist. Der Einbau einer Zwischendecke verstärkt den Schlackenansturm stark. Sie ist nur zu rechtfertigen, wenn von der Feuerführung her eine Notwendigkeit besteht.

### 2.3.2. Arbeitsöffnungen

Eine besonders ausgeprägte Schwachstelle bei allen Tageswannen bilden die Arbeitsöffnungen. Wird von Hand durch diese Öffnungen eingelegt, wie dies bei den

Wannen V und VI der Fall war, dann läßt sich eine stärkere Verstaubung und die damit verbundene Korrosion nicht vermeiden. Auch die Verwendung einer großen, fahrbar aufgehängten Schippe zum Einbringen des Gemenges, wie dies bei Wanne I geschah, führt durch Verstaubung des Gemenges zu starkem Angriff im Oberofen und an den Arbeitsöffnungen. Die Verwendung von Einlegemaschinen, die das Gemenge ohne stärkere Staubentwicklung über längere Zeit verteilt einführen, vermindert die Korrosion im Oberofen, besonders im Bereich der Arbeitsöffnungen stark.

Begünstigt wird die Korrosion des feuerfesten Materials der Arbeitsöffnungen neben dem Angriff durch die Alkalien bei Spezialglassorten durch Borsäure- und Fluorverbindungen, durch das Aufschlagen und Auspitzen der Flamme an den während der Schmelze zugeetzten Arbeitsöffnungen infolge des oft zu hoch liegenden Herdraumdruckes bzw. wie bei Wanne I infolge der konstruktiv bedingten Lage der Einlegeöffnung in der Rückwand. Die Entstehung des hohen Herdraumdruckes beruht bei einigen der untersuchten Wannen auf der schwierigen Einstellbarkeit des Abzugschiebers, der direkt hinter dem Stahlrekuperator lag und durch starke Wärmebeanspruchung verklemmt oder durch Schlacken verklebt und somit während der Schmelze nur mühsam bedient werden konnte. Bei dem Tageswannentyp, dem die Wanne VI zuzuordnen ist, ist man durch die ungünstigen Abzugsverhältnisse, bedingt durch mehrfache Umlenkung der Abgase, gezwungen, mit einem hohen Herdraumdruck zu fahren.

In zweiter Linie werden Arbeitsöffnungen und die darunterliegenden Wannensteine zu Schwachstellen, wenn durch Unterdruck im Herdraum während des Ausarbeitens Kaltluft einzieht. Der damit bedingte Temperaturwechsel führt bei den sehr empfindlichen schmelzflüssig gegossenen Palisadensteinen des Wannenbeckens aus Korund-Zirkonoxid zu starker Rißbildung. Einen guten Schutz gegen diese Art der Zerstörung bilden leicht auswechselbare Bankplatten aus kontaktindifferenten Massen wie Zirkonoxid, die bis über die Beckenseitensteine ragen.

### 2.3.3. Seitenwände

Stärkere Korrosionserscheinungen an den Seitenwänden aus Silika waren nur in zwei Fällen zu finden. Die Zerstörungen an der Seitenlängswand unter dem Abzug und an der Stirnwand über den Brennern bei



Bild 5. Gerissenes Wannenbecken aus schmelzflüssig gegossenen Korund-Zirkonoxid-Steinen.

Wanne VI in Form von runden Auswaschungen werden wohl kaum allein durch ablaufende Schlacken in diesen Bereichen hervorgerufen. Die aus dem Rekuperator und den senkrechten Abzugkanälen fließenden Schlacken werden am Ende des unteren, waagrecht laufenden Teils der Abzugkanäle in Schlackentaschen aufgefangen und regelmäßig abgezogen. Durch die zusätzlich nach außen geneigte Sohle dieser waagerechten Abschnitte wird ein Zurückfließen der Schlacken zur Wanne verhindert. Es ist anzunehmen, daß diese Korrosionserscheinungen durch Wirbel im Abgasstrom, der mit Gemengestaub und aus der Schmelze verdampfenden Komponenten angereichert ist, verursacht werden.

Infolge der Anordnung der Abzüge in den Seitenwänden in Nähe der Brennerwand und der dadurch bedingten mehrfachen Umlenkung der Flamme und des Abgases ergeben sich unter den Abzügen vertikal und über den Brennern horizontal kreisende, walzenförmig ausgebildete Strömungswirbel.

Bei den Doppeldeckenwannen waren Korrosionserscheinungen in der Seitenwand nur an den Stellen zu erkennen, an denen die durch die Abflußöffnungen oder Durchbrüche im Zwischengewölbe dringende Schlacke zur Glasschmelze zurückfließt.

#### 2.3.4. Wannenbecken

Wie bei Tageswannen mehrfach beobachtet, sind bei allen im Untersuchungsprogramm aufgenommenen Wannen die schmelzflüssig gegossenen Korund-Zirkonoxid-Steine des Wannenbeckens sowie die der Stirnwand bei Wanne V und die der Rückwand bei Wanne I starker Rißbildung unterworfen. Sie wird durch die Temperaturwechselbeanspruchung des periodischen Betriebs in einem für dieses Feuerfestmaterial kritischen Temperaturbereich zwischen 1100 und 1300 °C hervorgerufen. Diese Zerklüftungen lassen bei kleinen Rißbreiten nur zu einem geringen Teil Glasfehler erwarten. Bei breiten und tiefen Rissen, wie sie vielfach unter den Arbeitsöffnungen festzustellen waren, besteht jedoch die Gefahr, daß sich Primärschmelzen und ungeläutertes Glas darin sammeln und bei höherer Temperatur bzw. erst im Verlauf des Ausarbeitens austreten und neben mitgeführtem, abgeplatzttem Feuerfestmaterial die Glasschmelze verunreinigen.

Die geschilderte Rißbildung läßt sich durch sorgfältiges Einlegen und Regelung des Herdraumdruckes vermindern. Es ist darauf zu achten, daß das kalte Gemenge nicht mit den Wannensteinen in Berührung kommt und Kaltlufteinfall durch die Ofenöffnungen

vermieden wird. Eine sorgfältige Wärmeisolierung der Wannensteine ist notwendig, um zu starke mechanische Spannungen zu vermeiden.

#### 2.4. Glasqualität

Der Fixierung der Glasqualität kam bei der Untersuchung eine große Bedeutung zu, da die Güte des erschmolzenen Glases im Vordergrund jeder Beurteilung steht. Um einen ausreichenden Überblick zu gewinnen, war es notwendig, auf die Betriebsaufzeichnungen der einzelnen Hütten zurückzugreifen und die Methoden der jeweiligen Sortierung mit zu berücksichtigen.

Darüber hinaus wurden zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Stellen Glasproben entnommen und diese auf Glasfehler und Homogenitätsgrad hin untersucht.

##### 2.4.1. Glasfehler

Um aus den Betriebsaufzeichnungen gültige Vergleiche zwischen den Angaben der einzelnen Hütten zu gewinnen, war es notwendig, die Qualitätsansprüche der einzelnen Werke und die Prüfmethode kennenzulernen und zu berücksichtigen.

Die Überprüfung der Qualität und vor allem die Fixierung der Qualitätsansprüche an Hand von Grenzmustern ergab, daß durch Steinchen gebildete Glasfehler bei den Produkten aller Wannen ausgeschieden wurden. Dagegen wurden Schlieren und einzelne Blasen von 3 bis 4 mm Durchmesser im und bis 2 mm Durchmesser außerhalb des Dekors zum Teil nicht aussortiert. Lediglich bei Wanne V wird sehr streng sortiert und Glasgegenstände mit kleinen Schlieren und Blasen, soweit sie erkennbar sind, ausgeschieden.

Für die Wanne VI können keine Glasfehler angegeben werden, da eine Beurteilung der Glasqualität auf Grund der Besonderheit des Produktes durch nachträgliches Sortieren von seiten der Hütte nicht vorgenommen wird. In diesem Glas dürfen Steinchen, viele kleine Blasen und eine größere Schlierigkeit nicht auftreten. Einzelne größere Blasen und Steinchen werden schon bei der Fertigung ausgeschieden. Die Glasmacher sind angehalten, den angefangenen Posten nur dann zu verarbeiten, wenn dieser keine der zuvor erwähnten Glasfehler aufweist.

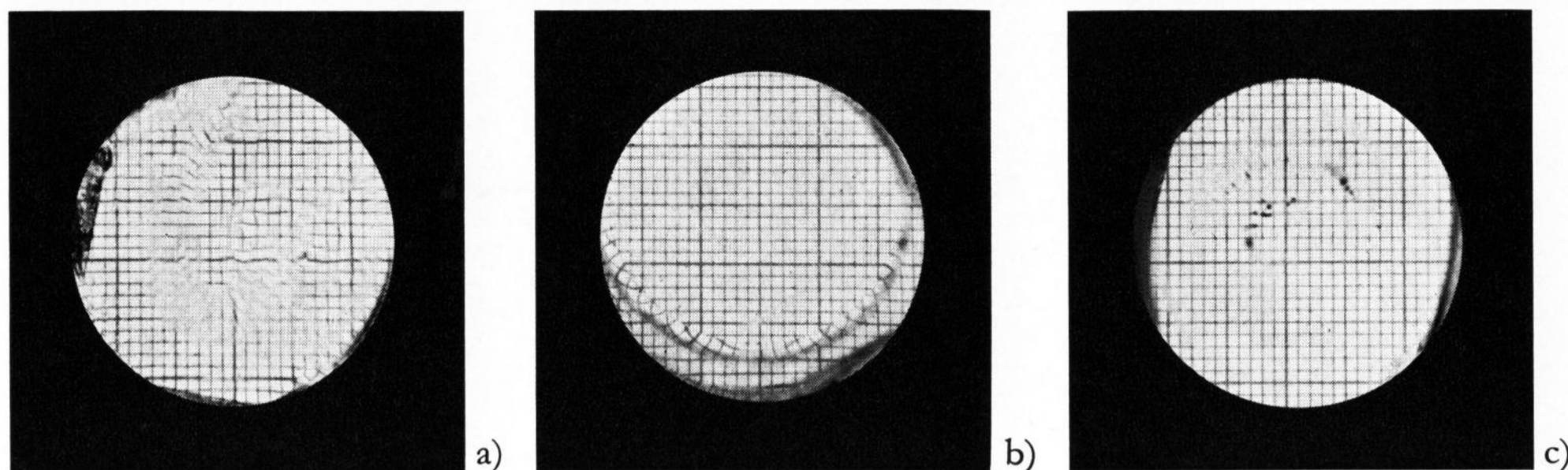
In Tabelle 6 sind Art und Umfang der beobachteten Glasfehler übersichtlich zusammengestellt. Die beobachteten fehlerhaften Stücke in % der Gesamtproduktion sind unter a eingetragen. Man erkennt deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Wannen, wobei allerdings berücksichtigt werden muß, daß die unterschiedlichen Artikelgewichte bzw. -volumina mit in das Ergeb-

Tabelle 6. Art und Umfang der beobachteten Glasfehler

Glasfehler	Wanne														
	I			II			III			IV			V		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
gesamt	4,0	100	0,103	14,0	100	0,125	8,0	100	0,192	11,5	100	0,279	4,1	100	0,652
Blasen	3,12	78,0	0,80	0,56	4,0	0,005	5,6	70	0,135	3,46	30,2	0,084	0,41	10	0,064
Steinchen	0,44	11	0,011	4,34	31,0	0,039	0,8	10	0,019	3,10	27,0	0,076	3,69	90	0,588
Knoten und Schlieren	0,44	11	0,011	9,10	65,0	0,081	1,6	20	0,038	4,94	43,8	0,119	1)	—	—

Erläuterungen: a = in % der Gesamtproduktion, b = in % der fehlerhaften Produktion, c = Fehler/mittleres Glasvolumen in dm<sup>3</sup> (bei der Berechnung wurde davon ausgegangen, daß bei jedem fehlerhaften aussortierten Glasgegenstand nur eine Fehlerart auftritt und diese Fehlerart bei 90% der Glasgegenstände einmal, bei 10% zweimal vorkommt),

1) = wurden nicht bestimmt, da hier Knoten und Schlieren keine gravierenden Fehler bedeuteten.



Bilder 6a bis c. Glasproben zur Beurteilung der Homogenität,  
 a) Maßzahl 28,  
 b) Maßzahl 55,  
 c) Maßzahl 82.

nis eingehen. Die drei Doppeldeckenwannen schneiden deutlich schlechter ab, wobei besonders der relativ hohe Knoten- und Schlierenanteil auffällt. Die Verteilung der einzelnen Fehlerarten auf die fehlerhafte Produktion geht aus den Angaben unter b hervor. Hier wird der jeweilige Fehleranteil in % der fehlerhaften Produktion angegeben.

Die beste Vergleichbarkeit erzielt man, wenn das auf einen Fehler entfallende mittlere Glasvolumen angegeben wird (c). Es zeigt sich hier eine deutliche Überlegenheit der Längsbrennerwanne I gegenüber den Doppeldeckenwannen. Wanne II und V nehmen eine Sonderstellung ein, da es sich hier um neue, erst wenige Monate in Betrieb befindliche Anlagen handelt. Die übrigen Wannen sind annähernd gleich alt.

Der Ausarbeitungsgrad hat auf die Glasfehler einen geringen, aber doch spürbaren Einfluß. An Hand der Betriebsaufzeichnungen ist zu vermuten, daß bei Ausarbeitungsgraden von 0 bis  $\approx 70\%$  die Häufigkeit der von Schmelz- und Läuterfehler herrührenden Schlieren, Blasen und Steinchen in Form von Entglasungen abnahm, während die durch das feuerfeste Material bedingten Glasfehler in ihrer Häufigkeit zunahmen. Bei Ausarbeitungsgraden über  $70\%$  nahmen die aus der Schmelze stammenden Glasfehler wieder zu.

Die Häufigkeit der durch Blasen im Glas gebildeten Glasfehler steht sehr wahrscheinlich in Verbindung mit der Schmelztemperatur. Bei Wannen mit hohen Ofenraumtemperaturen ( $> 1500^\circ\text{C}$ ) während der Läuterung und einem einigermaßen konstanten Temperaturverlauf über die gesamte Schmelzzeit treten in der Schmelze weit weniger Blasen auf. Der trotz hoher Ofenraumtemperatur bei der Läuterung entstehende hohe Blasengehalt in der Bleiglasschmelze der Wanne III ist vermutlich auf die kurze Läuterzeit zurückzuführen.

Die Analyse der in den Proben gefundenen Steinchen ergab folgende Ergebnisse: Bei den Proben aus Doppel-

deckenwannen wurden  $86\%$  der Steinchen als Entglasungen in Form von Cristobalit und Tridymit und  $14\%$  durch korrodiertes Feuerfestmaterial in Form von Leucit ( $\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ) gebildet, das nachweislich aus dem Material der schmelzgegossenen Beckensteine kommt; bei den Proben aus den Wannen ohne Zwischengewölbe dagegen nur zu  $12\%$  durch Entglasungen gleicher Form, aber zu  $86\%$  durch korrodiertes Feuerfestmaterial in Form von Baddeleyit, Korund und Leucit. In einem Fall traten auch Steinchen auf, die als Reaktionsprodukt von Schamotte und Korund-Zirkonoxid in Form von Mullit und Cristobalit identifiziert wurden und vermutlich durch die stark zerstörten Einfassungen der Arbeitsöffnungen, die bei dieser Wanne auch gleichzeitig als Einlegeöffnungen dienten, hervorgerufen wurden.

Diese Ergebnisse lassen erkennen, daß bei Doppeldeckenwannen der Anteil der durch Entglasungen zustandekommenden Glasfehler größer ist als bei Wannen ohne Zwischengewölbe.

Die subjektive Beurteilung der Musterkugeln, hergestellt aus Glas, das aus verschiedenen Bereichen der Wanne entnommen wurde, ergab bei einer Klassifikation in den Stufen 1 bis 5 — von schlierenfrei (1) bis stark schlierig (5) — bei den untersuchten Wannan eine Streuung des Schlierigkeitsgrades in allen Stufen, wobei im einzelnen kein deutlicher Unterschied zwischen dem Zustand zu Arbeitsbeginn und -ende anzugeben ist, wohl aber zwischen Rand-, Arbeits- und Mittenbereich der Wannan. Der Schlierigkeitsgrad im Randbereich der Wannan lag durchschnittlich zwei bis vier Stufen höher als der im Arbeits- oder Mittenbereich. Bessere Ergebnisse als diese subjektive Beurteilung ergaben die schlierenoptischen Untersuchungen der einzelnen Proben.

#### 2.4.2. Homogenität des Glases

Zur Beurteilung der Homogenität des Glases wurden Glasproben entnommen und in Form von Zapfen ge-

Tabelle 7. Homogenität des Glases

Entnahme	Kaliglas									Bleiglas			
	Hafenofen		Tageswanne						Hafenofen		Tageswanne mit Zwischengewölbe Wanne III		
			ohne Zwischengewölbe			mit Zwischengewölbe							
	A	B	Wanne I			Wanne IV		Wanne II		A	B	A	B
vor Arbeitsbeginn	5	32	39	28	35	52	43	51	82	46	76	11	41
3 h später	36	84	12	33	19	13	52	76	59	21	75	31	46
6 h später	76	54	83	90	86	43	45	78	75	27	20	72	67
Mittelwert	39	56,6	44,7	50,3	46,7	36	46,7	68,3	72	31,3	57	38	51,3

Erläuterungen: A = Entnahme im Randbereich (bzw. beim Hafenofen außerhalb des Ringes),  
 B = Entnahme im Arbeitsbereich (bzw. beim Hafenofen innerhalb des Ringes),  
 C = Entnahme in Wannennitte.

sammelt. Von den Zapfen wurden Scheiben abgeschnitten. Die Proben wurden in PVC-Rohrabschnitte von 40 mm Außen- und 30 mm Innendurchmesser mit Araldit weitgehend koaxial eingebettet und mit Schleifkörnungen bis zu 8  $\mu\text{m}$  nach dem Schneiden der Endflächen feingeschliffen. Es ergibt sich eine durchschnittliche Höhe der nahezu planparallelen Probezylinder von 31 bis 33 mm einschließlich der beidseitig mit Kanadabalsam aufgeklebten mikroskopischen Objektträger von jeweils 1 mm Stärke. Auf einem mit Millimeterpapier belegten Lichtkasten wurden die Proben nach beidseitiger Abdeckung mit Lochschablonen im Durchlicht aufgenommen. Das Vorhandensein von Schlieren führte hierbei zu Verwaschungen bzw. im Extremfall zu Verzerrungen des Rasters des unterlegten Millimeterpapiers (Bilder 6a bis c). Durch Auszählen der Kästchen des Rasters wurde aus dem Verhältnis der durch Schlieren nicht verwischten Fläche zu der gesamten durchstrahlten Glasfläche eine Maßzahl für die Homogenität bestimmt. Ein im Gesamtbereich homogenes Glas erhält dabei den Wert 100, ein vollkommen inhomogenes Glas den Wert 0. In Tabelle 7 sind die Zahlenwerte für die Homogenität angegeben.

Da nahezu alle untersuchten Wannen eine Laufzeit von nicht ganz zwei Jahren aufwiesen, wurden, um reale Vergleichsdaten zum Hafenofernbetrieb zu erhalten, die Proben für Kaliglas aus einem 12 Wochen alten Hafen (maximale Standzeit 16 Wochen) bzw. für Bleiglas aus 6 Wochen alten (maximale Standzeit 8 Wochen) entnommen. Bei der Aufstellung der Tabelle 7 für die Werte der Homogenität von Wannen mit und ohne Zwischengewölbe und dem Hafenofer wurde vor allem darauf geachtet, daß nur Wannen gleicher Schmelzleistung und gleicher Laufzeit gegenübergestellt werden, so z. B. bei Glasart 1, Kaliglas, Wanne I und Wanne IV. Wanne II, die zur Zeit der Untersuchung erst wenige Monate in Betrieb war, zeigt im Vergleich zu den anderen beiden Wannen den Einfluß des Alters einer Wanne auf die Homogenität der Schmelze.

Es scheint wichtig, darauf hinzuweisen, daß die hier aufgeführten Werte zwar ein gutes Maß für den homogenen Glasteil darstellen, aber nur bedingt Aufschluß über den Grad der Inhomogenität des inhomogenen Glasteils geben. Da man bei der Auswertung der Schlierenaufnahmen keinen Unterschied zwischen leichten Verwaschungen und extremen Verzerrungen des Rasters machte, ergaben sich für die Wanne I, deren Schlierenproben hauptsächlich leichte Verwaschungen zeigten, etwas ungünstigere Werte als für die anderen Wannen, deren Schlierenproben starke Verzerrungen des Rasters aufwiesen.

Bei der Gegenüberstellung von Wannen, die für die Bleiglasschmelze eingesetzt werden, war ein Vergleich nach den oben angeführten Maßstäben nicht möglich. Da nur eine der untersuchten Wannen zur Bleiglasschmelze eingesetzt wurde, konnte nur der Vergleich Hafenofer—Tageswanne durchgeführt werden.

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse zeigt im einzelnen, daß es möglich ist, den Nachweis für den Einfluß der Konstruktion der Tageswanne auf die Glasqualität zu erbringen und ebenso den für die Homogenitätsunterschiede zwischen Tageswannen und Hafenofer. Die Homogenität von Kaliglasproben aus dem Arbeitsbereich ist bei Tageswannen ohne Zwischengewölbe um 6,3% bzw. bei denen mit Zwischengewölbe

um 9,9% und bei Bleiglas um 5,7% schlechter als die Homogenität der Glasproben aus einem Hafen.

Die Auswertung läßt weiterhin die allgemein bekannte Tatsache des Homogenitätsverlaufes von in Häfen erschmolzenen Gläsern erkennen. Bei Kaliglas zeigt sich, daß im Arbeitsbereich, d. h. innerhalb des Ringes, zu Anfang von einem schlechten Zustand ein ziemlich schneller Anstieg der Homogenität bis zu einem nach 3 bis 4 h erreichten Maximalwert erfolgt, danach ist wieder ein Absinken der Homogenität feststellbar. Im Randbereich, zwischen Ring- und Hafenanwand, tritt dagegen eine ständig steigende Tendenz auf. Diese im Verlauf des Ausarbeitens bei Erreichen tieferer Regionen eintretende Erscheinung des Homogenitätsverlaufes im Arbeits- und Randbereich ist vermutlich mit der Entnahmestromung und durch eine thermisch bedingte Strömung im Hafen zu erklären. Das stark mit Tonerde angereicherte kältere Kontaktglas der Randzone wird durch die thermisch bedingte und abwärts gerichtete Strömung im Randbereich des Hafens mitgeführt und steigt im Mittenbereich durch eine aufwärts gerichtete Strömung, hervorgerufen durch Entnahme und höhere Temperatur im Innern der Glasschmelze, wieder auf.

Der Homogenitätsverlauf der Glasschmelze weist in der Tageswanne gegenüber dem im Hafenofer eine völlig andere Tendenz auf. Hier erreichte die Homogenität nach langsamem Anstieg im Arbeitsbereich nach 6 h Maximalwerte, die bei Wannen ohne Zwischengewölbe über denen des Hafenoferns und bei Wannen mit Zwischengewölbe darunter lagen. Im Randbereich des Wannenbeckens trat nach 3 h nach einem anfangs hohen Wert eine deutliche Verschlechterung der Homogenität ein. Auf Grund des geringer werdenden hydrostatischen Druckes bei Absinken des Glasspiegels scheinen sich zu diesem Zeitpunkt die aus den im Bereich der Arbeitsöffnungen stark zerklüfteten Wannenbeckensteinen ausfließenden Schmelzflüsse und Schlacken besonders intensiv auszuwirken. Bei Wanne IV scheint sich diese Störung auch gegen Ende des Ausarbeitens auf den Mittenbereich auszudehnen, wie die kleinere Homogenitätszahl zeigt.

Die Auswertung der Homogenitätsuntersuchung erbrachte weiterhin, daß bei Tageswannen ohne Zwischengewölbe zu Anfang eine wesentlich schlechtere Homogenität als bei Wannen mit Zwischengewölbe bestand. Demnach scheint die Zwischendecke einen Teil der zwischen den Gewölben durch anfallende Kondensate gebildeten Schlacken aufzuhalten und verzögert an die Schmelze abzugeben.

Um das schlechte Oberflächenglas von der Entnahmestelle fernzuhalten, erscheint es allgemein empfehlenswert, aus Ringen, ähnlich wie beim Hafenofer, zu arbeiten. Das kann vorläufig aber noch nicht durchgeführt werden, da bis jetzt noch kein Material zur Verfügung steht, das über längere Zeit widerstandsfähig genug gegenüber der Korrosion des Glases und der in Tageswannen herrschenden höheren Temperatureinwirkung ist. Übliche Schamotterringe sintern schnell so stark, daß die notwendige Schwimmfähigkeit bei Kali- und Natrongläsern nicht mehr gegeben ist. Diese Tatsache, daß die Verwendung von Ringen in Tageswannen gegenüber Hafenofern vielfach nicht möglich ist, erklärt zum Teil die Schwierigkeiten, dünnwandige auf Schlieren empfindliche Glasgegenstände auf der Tageswanne zu fertigen. In bestimmten Fällen kann die Verwendung

von Ringkammern, in welche die Ringe während der Schmelze und Läuterung gelegt werden, Abhilfe bringen.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß zwar in bezug auf die Homogenität kein allzu großer Unterschied zwischen der Glasqualität der im Hafenofer und in Tageswannen erschmolzenen Gläsern besteht, daß sogar in Tageswannen zu bestimmten Zeiten teilweise höhere Homogenitätsmaßzahlen erzielt wurden. In bezug auf den zeitlichen Verlustwert der Glasqualität ist die Tageswanne durch die erhöhte Zahl der Glasfehler, wie Steinchen und Schlieren, gebildet durch Feuerfestmaterial, im Nachteil.

### 3. Zusammenfassung

Im Hinblick auf Betriebsverhalten, Konstruktion und Glasqualität wurden sechs Wannen überprüft. Die dabei gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Schmelzleistung und Wärmeverbrauch liegen nur in Einzelfällen günstiger als bei Hafenofern. Der Ausarbeitungsgrad, der meist von der Art der Produktion her bestimmt ist, übt einen großen Einfluß darauf aus. Der spezifische Brennstoffverbrauch kann durch die Beziehung  $G = F (700 - 58 F)$  ermittelt werden. Der spezifische Wärmeverbrauch gibt keine gute Vergleichsbasis für Tageswannen, da Ausarbeitungsgrad und Glasart (Bleiglas) einen großen Einfluß ausüben.

2. Die Feuerführung ist, bedingt durch den sich ändernden Strömungsquerschnitt und die periodische Betriebsweise, schwierig. Vor- und Nachteile müssen im Einzelfall sorgfältig abgewogen werden.

3. Die Temperaturführung, insbesondere die maximalen Schmelz- und Läutertemperaturen, hängen von der Glasart ab. Werden 1500 °C nicht überschritten, dann ist bei normalen Gläsern mit erhöhtem Blasen- gehalt des Glases zu rechnen.

4. U-Flammenwannen mit nach oben überschlagender Flamme mit und ohne Zwischengewölbe werden viel verwendet. Zwischengewölbe erleichtern die Feuerführung, bringen aber durch verstärkte Kondensation und Schlackenbildung zusätzliche Glasfehler.

Längsbrennerwannen sind vorteilhaft für größere Anlagen.

5. Die Gemengeeinlage kann bei Tageswannen leichter mechanisiert werden als bei Hafenofern. Von dieser Möglichkeit ist unbedingt Gebrauch zu machen, und es ist darauf zu achten, daß über einen längeren Zeitraum in kleineren Portionen staubarm eingelegt wird. Eine zu starke Abkühlung der benachbarten Steine ist zu vermeiden.

6. Für das Gewölbe und die Seitenwände empfiehlt sich Silika, für die Brenner, Abzüge und das Wannenbecken schmelzgegossenes Material. Ein verstärktes Reißen der Wannensteine entsteht durch lokalen Kaltlufteinfall (Arbeitsöffnungen) und Randlage des kalten Gemenges. Abdeckplatten über den Wannensteinen, sorgfältige Ofendruckeinstellung und Gemengeeinlage halten das Reißen der Wannensteine in erträglichen Grenzen.

7. Die ablaufende Schlacke des Oberofens führt bei Tageswannen zu einem relativ hohen Anteil an Glasfehlern. Dies gilt besonders bei Gläsern, deren spezifisches Gewicht größer ist als das des Schlackenglases (Bleiglas). Tropfkanten im Gewölbe bringen Besserung.

8. Die Homogenität des erschmolzenen Glases ist der von Hafenofern annähernd gleichzusetzen und in Sonderfällen sogar besser. Die Schwierigkeiten, mit Ringen zu arbeiten, zwingen bei Tageswannen zu besonders sorgfältigem Arbeiten.

Bei der Herstellung dünnwandiger Artikel (Kelchgläser) wird die Qualität des Hafenoferns nicht erreicht.

Für die Offenlegung der Betriebsaufzeichnungen und Erfahrungen und zahlreiche Diskussionen sei an dieser Stelle den beteiligten Glashütten nochmals bestens gedankt. Besonderer Dank gebührt auch Herrn Professor H. W. HENNICKE, Clausthal, und seinen Mitarbeitern für die Identifizierung von Glasfehlern und Untersuchung der Homogenität zahlreicher Glasproben. Der Autor dankt Herrn Ing. H. BEINE, Frankfurt (Main), der mit den Untersuchungen begonnen hatte, diese dann krankheitshalber aber abgeben mußte.

Zur Finanzierung der Arbeit stellte die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, Mittel des Bundeswirtschaftsministeriums, Bonn, zur Verfügung. Beiden Institutionen gebührt Dank für die gewährte Hilfestellung.

### 4. Literatur

[1] SORG, K.: Konstruktion und Betriebsweise von Tageswannen für die Glasschmelze. *Glastechn. Ber.* **37** (1964) S. 292—295.

[2] GÜNTHER, R., TRIER, W. und THEISSL, K. H.: Die Entwicklung der Glasschmelzhafenofer. *Glastechn. Ber.* **30** (1957) S. 308—318. (48444)

DK 662.612.31:533.6.011:666.1.031.2:66.042.875

## Verweilzeitverhalten der Brenngase im Oberofen von Glasschmelzwannen

VON WOLFGANG TRIER und HEINZ STAATSMANN, Frankfurt (Main)

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 26. September 1968)

Nach einer kurzen Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen des Verweilzeitverhaltens werden die Möglichkeiten zur Messung der Verweilzeit der Gase im Oberofen einer Glasschmelzwanne diskutiert, und es wird die Meßapparatur beschrieben.

Die Analyse der gemessenen Verweilzeitverteilungen, die sich als unabhängig vom Ort des Eintritts in den Oberofen erwiesen, ergab, daß der Oberofen zum Teil in Form einer Kolbenströmung mit Längsmischung durchströmt wird und zum Teil als Mischer wirkt, dem sich eine Rückströmung überlagert. Während über die Längsmischung abhängig von der Ofenkonstruktion nichts Näheres ausgesagt werden kann, ergab sich für den Mischgrad, der für die Kolbenströmung gleich Null und für die ideale Vermischung unendlich ist, daß dieser bei stirnbeheizten Wannen am größten ist, d. h. die Vermischung des frisch eintretenden Brennstoff-Luft-Gemisches mit dem Ofeninhalte ist bei diesen Wannen sehr intensiv, was vor allem auf den sehr langen Mischweg zurückzuführen sein dürfte.

Mit Hilfe des beschriebenen Meßverfahrens gelang es auch, den Stoffaustausch zwischen den einzelnen Brennern, der impulsabhängig ist, und dessen Einfluß auf das Zeitverhalten zu ermitteln.

Da die Fläche unter den gemessenen Verteilungen dem Gasstrom proportional ist, läßt sich für den Anteil des Stoffstroms, der ohne Queraustausch den Oberofen durchströmt, eine Aufteilung in Haupt- und Rückstrom durchführen. Je nach Zerstäuberdurchsatz und Brennraumhöhe variiert die Rückstrommenge, die mit der nach einem modifizierten Craya-Curtet-Berechnungsverfahren ermittelten übereinstimmt, zwischen 10 und 25% des gesamten eintretenden Stoffstromes.

Eine wichtige Größe für die Auslegung kontinuierlich arbeitender Glasschmelzwannen ist die Zeit, wäh-

rend Brennstoff, Verbrennungsluft und Abgas im Oberofen verweilen, die sogenannte Verweilzeit. Zusammen