die mittleren, als auch die örtlichen Strömungsrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten können schnell und einfach bestimmt werden. Die Glasstab-Verfahren sollten ohne Schwierigkeiten auf Tafelglaswannen übertragbar sein, die nach dem Libbey-Owens- oder Pittsburgh-Verfahren arbeiten.

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen zeigen, daß die Lage einer Ziehmaschine in Relation zur Wanne außerordentlich stark das Strömungsbild dieser Maschine beeinflußt. Weiter konnte gezeigt werden, daß sich das Strömungsfeld vor einer Fourcault-Ziehmaschine, die asymmetrisch zur Wanne angeordnet ist, im Laufe einer Hochfahrt stark ändert.

Die Anregung, Einzelheiten der Glasströmung in Fensterglaswannen zu ermitteln, verdanke ich Herrn Dr. KILIAN, Vorsitzender des Vorstandes der Deutschen Tafelglas AG. Herr Dr. KILIAN ermöglichte die Messungen an den Wannen der Detag. Darüber hinaus verhalf er dem Autor in vielen Diskussionen zusammen mit den Herren des Hauptlaboratoriums der Detag in Witten zu einer klareren Bewertung der Meßergebnisse.

Herr Direktor THUM, Herr Obering. SCHALK und Herr Direktor FLESSA unterstützten die praktischen Versuche in den von ihnen geleiteten Fensterglaswannen in Witten und Weiden.

Herrn Prof. KRISCHER und insbesondere Herrn Prof. SCHEUBEL, Darmstadt, dankt der Autor für die Hilfe bei der Deutung und Zusammenfassung der Meßergebnisse und für die Diskussionen über alle Grundsatzfragen.

6. Schrifttum

[1] TRIER, W.: Glasströmungen: Bedeutung und Meßmethoden. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 401–411.

[2] BISHOP, F. L.: Tracing flow in glass tank furnace. J. Amer. ceram. Soc. **28** (1945) S. 308–310. [Ref. Glastechn. Ber. **22** (1948/49) S. 370.]
BISHOP, F. L.: Comparative tracer tests on container and window glass tanks. Glass Ind. **37** (1956) S. 71–76, 99, 142–145. [Ref. Glastechn. Ber. **31** (1958) S. 147.]

[3] UNGER, L.: Anwendung radioaktiver Isotope zu Strömungsuntersuchungen in Glasschmelzwannen. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 416–421.

[4] BECKER, H.: Eine neue Methode zur Erforschung der Strömung in Flachglaswannen. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 411–416.

[5] CZERNY, M. und GENZEL, L.: Zur Berechnung des Strahlungsstromes im Glasbad von Schmelzwannen. Glastechn. Ber. **30** (1957) S. 1–7.

[6] CZERNY, M. und GENZEL, L.: Energiefluß und Temperaturverlauf im Glasbad von Glasschmelzwannen als Folge von Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Glastechn. Ber. **25** (1952) S. 387–392.

[7] GEFFCKEN, W.: Zur Fortleitung der Wärme in Glas bei hohen Temperaturen I. Glastechn. Ber. **25** (1952) S. 392 bis 396.

[8] WALTHER, A., DÖRR, J. und ELLER, E.: Mathematische Berechnung der Temperaturverteilung in der Glasschmelze mit Berücksichtigung von Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 133–140.

[9] CZERNY, M. und GENZEL, L.: Über die Eindringtiefe räumlich diffuser Strahlung in Glas. Glastechn. Ber. **25** (1952) S. 134–139.

[10] TRIER, W.: Temperaturmessungen im Glasbad von Wannenöfen. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 5–12.

(40648)

DK 532.5:666.1.031.13:666.1.031.71:666.1.031.2:666.15

Neuere Untersuchungen über die Strömung in den Zieharmen einer Fourcaultwanne

Von HANS BECKER, Witten (Ruhr)

(Mitteilung aus dem Hauptlaboratorium der Deutschen Tafelglas Aktiengesellschaft)

(Vortrag auf der 38. Glastechnischen Tagung am 13. Mai in Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 2. September 1964)

Steckt man in den Zieharm einer Fourcaultwanne mit Cerdioxyd markierte Stäbe, so kann man aus der Beobachtung des markierten Glases, später im Querschnitt der gezogenen Glastafel, zu Erkenntnissen über die Strömung kommen. Es läßt sich auf diese Weise auch die Geschwindigkeitsverteilung von der Oberfläche zur Tiefe ermitteln. Als Beispiel wird die Strömung im Zieharm vor einer Randmaschine untersucht und das Ergebnis diskutiert.

Wenn man verfolgt, was über Strömungen in Glasschmelzwannen veröffentlicht wurde, so stellt man fest, daß sich der überwiegende Teil mit theoretischen Abhandlungen und Untersuchungen an Modellwannen befaßt. Dies liegt daran, daß noch zu wenig experimentelle Methoden bekannt sind, um die Strömung in dem 1000 bis 1500 °C heißen Glas zu studieren.

Gut erforschen lassen sich die Strömungen an der Oberfläche von Glasschmelzwannen durch Schwimmkörper. Geschwindigkeit und Richtung können auf diese Weise exakt ermittelt werden. Doch über die Strömungen in den tieferen Bereichen des Glasbades weiß man bisher nur sehr wenig. Für den Glastechnologen ist die Kenntnis des Geschwindigkeitsverlaufes von der Oberfläche zur Tiefe besonders wichtig. So z. B. hängt hiervon die Homogenisierung der Schlieren ab, die bekanntlich um so besser ist, je steiler der Gradient ist. Weiter lassen sich die äußerst wichtigen Zusammenhänge zwischen Entnahmeströmung und Konvektionsströmung nur aufklären, wenn man die Möglichkeit hat, die Geschwindigkeitsverteilung an bestimmten Stellen in den Wannen zu messen. Dies gilt insbesondere für die Bereiche vor den Entnahmestellen, wo sich die Änderung der Entnahme z. B. beim Ausfall einer Maschine besonders bemerkbar machen muß.

Einige Arbeiten über Geschwindigkeitsmessungen in tieferen Bereichen sind inzwischen bekannt geworden. So hat TRIER [1] den Geschwindigkeitsverlauf vor dem Ziehherd einer Libbey-Owens-Wanne aus Temperaturmessungen berechnet. Es ist dies eine Methode, bei der Theorie und Messung miteinander kombiniert werden. DJERTJEFF und GOROCHOWSKI [2] erhielten die Geschwindigkeitsverteilung vor dem Ziehherd einer Fourcaultmaschine, indem sie an einer bestimmten Stelle in verschiedenen Tiefen nacheinander markiertes Glas gaben und die Zeit zwischen dem Einstecken und der Ankunft an der Maschine bestimmten. Sie bekamen dadurch eine durchschnittliche Geschwindigkeitsverteilung zwischen der Eintauchstelle und der Maschine. Diese durchschnittliche Geschwindigkeitsverteilung kann man, wie GRÄFF [3] zeigen konnte, einfacher erhalten, indem man Glasstäbe in das Glasbad eintaucht und die

Bewegung der Stäbe im aufsteigenden Glasband verfolgt. Die Stäbe erzeugen beim Eintauchen in das Glas, durch die an der Oberfläche adsorbierten Gase eine große Anzahl von Blasen, deren Lage im Glasband untersucht wird. Diese Methode ist sehr elegant und erlaubt es auch, örtliche Geschwindigkeiten zu bestimmen. Sie hat aber den Nachteil, daß sie nur da anwendbar ist, wo das Glas schon so zäh ist, daß die erzeugten Blasen keinen Auftrieb mehr erleiden. Will man diese Schwierigkeit vermeiden, so muß man ein markiertes Glas nehmen, dessen spezifisches Gewicht sich von dem des umgebenden Glases nicht unterscheidet, aber im Querschnitt des Glasbandes leicht zu erkennen ist. Geeignet hierzu ist ein mit Cerodixyd angefärbter Glasstab, der sich durch seine Fluoreszenz beim Bestrahlen mit ultraviolettem Licht verrät. Taucht man einen solchen Stab in das Glasbad ein, so kommt dieser stets in Schichten an, die parallel zu den beiden feuerpolierten Oberflächen liegen. Diese Schichten werden als blaue Linien sichtbar, wenn man die Schnittkante betrachtet und gleichzeitig die Scheibe mit langwelligem UV-Licht anstrahlt.

Über das Verfahren, wie man die Lage dieser Schichten im Querschnitt der Glastafeln ausmißt, wurde in den Glastechnischen Berichten bereits berichtet [4]. Die Untersuchungen, über die im folgenden berichtet wird, wurden mit solchen Cerstäben durchgeführt und zwar in einem der drei Zieharme einer 9-Maschinen-Kreuzwanne für Fourcaultglas. Dort liegt, wie schon aus früheren Versuchen mit Cerstäben her bekannt ist [4], eine übersichtliche „Fächerströmung" vor. Bild 1 zeigt die Aufsicht eines Zieharmes mit den drei Maschinen und den Fächern. Im Bild 1 sind weiterhin eingezeichnet: Die Brükke, unter die das Glas tauchen muß, um in die Ziehkammer zu gelangen und die Ziehdüsen. — Für diesen Bereich der Wanne ist nun wesentlich, daß zu den Maschinen nur das Glas kommt, das in den schraffiert gezeichneten Fächern strömt. Von diesen wird das Oberflächenglas als Glastafel entnommen und das übrige Glas verläßt als Rückströmung wieder den Zieharm. In den weißen Fächern strömt das Glas direkt an die Wand. Dort sinkt es ab und verläßt dann ebenfalls mit der Rückströmung den Zieharm.

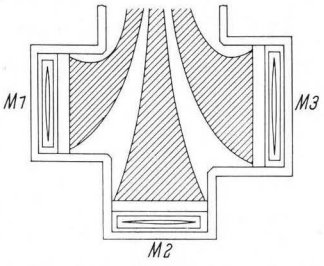

Bild 1. Zieharm einer 9-Maschinen-Fourcault-Kreuzwanne mit eingezeichneten Entnahmefächern (Aufsicht). M_1-, M_2-, M_3-Maschinen.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war nun, Beziehungen zwischen der „Fächerströmung" und der Schichtung aufzudecken, sowie Anhaltspunkte über Größe und Form des Geschwindigkeitsgradienten in den Fächern zu erhalten.

1. Versuchsanordnung

Wie Bild 2 zeigt, wurden an zwei Stellen im Zieharm gleichzeitig zwei Stäbe in den Fächer zur Maschine 1 eingetaucht. Der eine Stab wurde etwa 90 cm von der Brücke entfernt in das Glasbad eingesteckt, der andere in der Mitte des Zieharmes auf die Glasbadoberfläche gelegt. Der gesteckte Stab tauchte etwa 30 cm tief in das Glasbad ein, der gelegte Stab etwa 10 cm.

In Bild 3 ist dargestellt, wo das Glas des gesteckten Cerstabes 1 beim Betrachten der Schnittkante der Glastafelproben zu den verschiedenen Zeiten zu sehen war. Bild 4 zeigt dasselbe für den etwa 30 Minuten später auftauchenden gelegten Stab 2. Wie man sieht, kommt der Stab 1 in Form von kurzen Cerschichten an, die zu den beiden Oberflächen und gleichzeitig zu den Borden hin wandern. Bei dem gelegten Stab 2, von dem der ganze Entnahmefächer überdeckt wurde, erscheint, wie zu erwarten, die Cerfluoreszenz über das ganze Glasband, zuerst in Form eines wandernden Keiles (genauer: zweier Keile) dann in Linien, die zeitweise vom linken

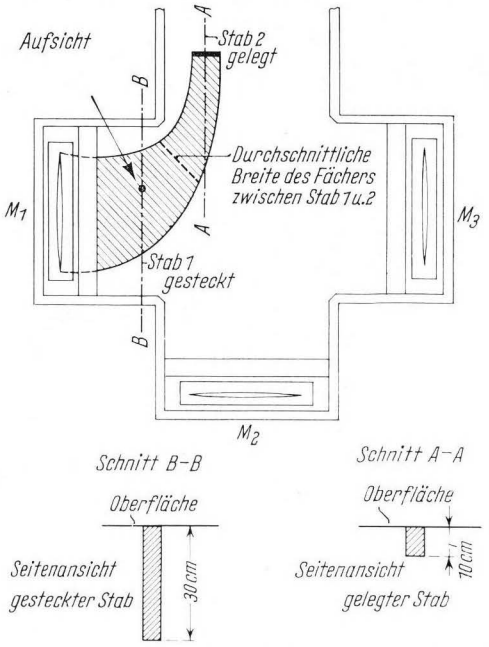

Bild 2. Eintauchstelle der Cerstäbe im Fächer zur Maschine 1.

bis zum rechten Bord ohne Unterbrechung durchlaufen. Diese wandern, wie bei dem gesteckten Stab 1, ebenfalls zu den beiden Oberflächen.

2. Erklärung des Erscheinungsbildes im Glasband

Es soll zunächst versucht werden, das Erscheinungsbild der beiden Stäbe in den Bildern 3 und 4 und seine zeitliche Änderung zu deuten. Bei dem gesteckten Stab 1 handelt es sich im Prinzip um die gleiche Versuchsanordnung, wie sie von GRÄFF [3] beschrieben wurde, infolgedessen ist die Deutung auch die gleiche.

Man setzt voraus, daß der Cerstab 4-kantig war, nach dem Einstecken mit der Glasbadoberfläche abschnitt und daß er so tief in das Glasbad eingetaucht war, daß der Entnahmestromquerschnitt „durchstoßen" wurde. Wesentlich ist nun die Annahme, daß die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen Cerstab und Düse nicht an der Oberfläche liegt, sondern unterhalb. Das ist schon deshalb sehr wahrscheinlich, weil das Oberflächenglas unter die Brücke tauchen muß und dort durch die Reibung an der Brückenunterseite stark abgebremst wird.

Durch diese besondere Form des Geschwindigkeitsverlaufes zur Tiefe mit der maximalen Geschwindigkeit unterhalb der Oberfläche (Bild 5, Seitenansicht) wird nun der Stab auf dem Weg zur Ziehdüse parabelförmig deformiert. An der Düse, wo das Glas steif wird

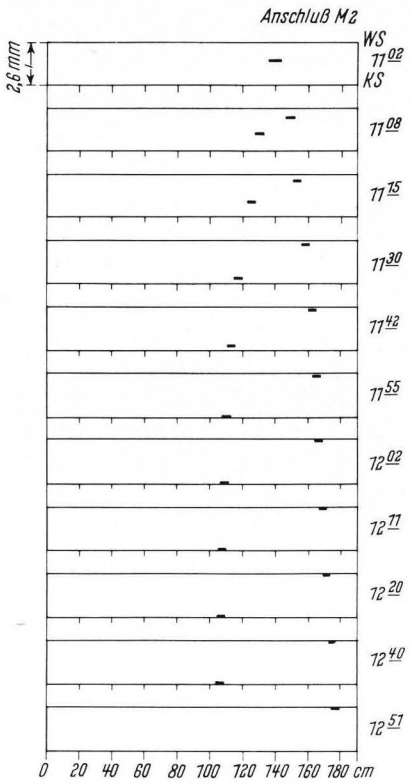

Bild 3. Auftreten der Cerfluoreszenz des gesteckten Stabes 1 im Querschnitt der Glasproben.

WS: „Warme Seite", d. h. die der Wanne zugekehrte Oberfläche der Glastafel.

KS: „Kalte Seite", d. h. die der Wanne abgekehrte Oberfläche der Glastafel. Die Zahlen 11^{02} bis 12^{51} geben die Uhrzeit an, bei der die Probe auf der Ziehbühne abgeschnitten wurde.

Der Stab 1 wurde um 9^{02} eingesteckt.

Die Zahlen 20, 40 ... 180 cm bedeuten die Breite der Glastafel.

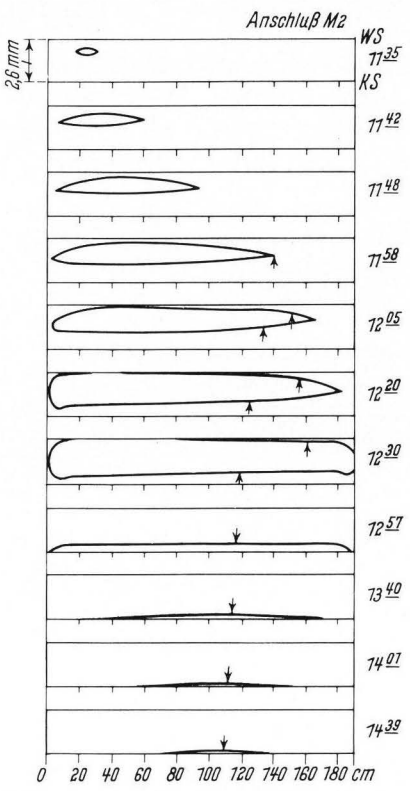

Bild 4. Auftreten der Cerfluoreszenz des gelegten Stabes 2 im Querschnitt der Glasproben.

Die Pfeile markieren die Fluoreszenzstellen des gelegten Stabes 2, an denen vorher der gesteckte Stab 1 erschienen ist.

Die Zahlen 11^{35} bis 14^{39} geben die Uhrzeit an, bei der die Probe genommen wurde.

Die Zahlen 20, 40 ... 180 cm bedeuten die Breite der Glastafel.

Maschine Teile des Oberflächenglases nach rechts (Bild 3, Streifen, die nach oben abwandern) und Glaspartien aus den tieferen Bereichen nach links (Streifen, die nach unten abwandern). An der Oberfläche überlagert sich also der Vorströmung noch eine Komponente, deren Vektor parallel zur Oberfläche gerichtet ist und beim Betrachten des Bildes 3 nach rechts zeigt, bei den unteren Glaspartien überlagert sich dieselbe Komponente nur mit dem Unterschied, daß diesmal der Vektor nach links zeigt. Man kann diese Bewegung des Glases am besten deuten, wenn man annimmt, daß die Querkomponenten einer Kreisströmung angehören. (Bild 6.) Diese Kreisströmung kann nur eine Konvektionsströmung sein und muß durch ein Temperaturgefälle hervorgerufen werden, das sich vor der Maschine 1, parallel zur Brücke über das Glasbad erstreckt (Bild 7.) Dieses Temperaturgefälle ist tatsächlich vorhanden und läßt sich durch thermoelektrische Messungen leicht nachweisen. Es ist eine Folge der Fächerkrümmung. Das Glas zu dem einen Bord (Strecke a—b, Bild 7) hat einen kürzeren Weg und wird daher nicht so stark abgekühlt wie das Glas, das zu dem anderen Bord (Strecke c — d) strömt.

und jede Strömung aufhört, kommt nicht das Oberflächenglas zuerst an, sondern Glaspartien aus den tieferen Schichten. Das oberflächennahe Cerglas und das Cerglas, das unterhalb der Bereiche mit den größten Geschwindigkeiten strömt, folgt nach. Beim Betrachten des Querschnittes der gezogenen Glastafeln wird aus diesem Grund im zeitlichen Ablauf eine „Schichtwanderung" zu den beiden Oberflächen zu beobachten sein. Sie äußert sich darin, daß zuerst ein Streifen etwa in der Mitte des Querschnittes erscheint, der sich dann in zwei Streifen aufspaltet, die beide zu den beiden Oberflächen abwandern. Bild 5 verdeutlicht diesen Vorgang.

Diese Schichtwanderung ist eine charakteristische Erscheinung auch bei der inhomogenen Schichtung. Sie wurde von RAMSAUER [5] entdeckt und beschrieben. Man darf annehmen, daß sie genau so wie die Schichtwanderung der Cerlinien zustande kommt, wenn Glasposten abweichender Zusammensetzung in den Zieharm gelangen.

Nun unterliegt der Stab in Richtung der Ziehdüse aber nicht nur einem Strömungsgradienten zur Tiefe, sondern, da die Strömung räumlich ist, auch noch Strömungsgradienten parallel zur Oberfläche. Wie aus Bild 3 hervorgeht, strömen in der Heizkammer der

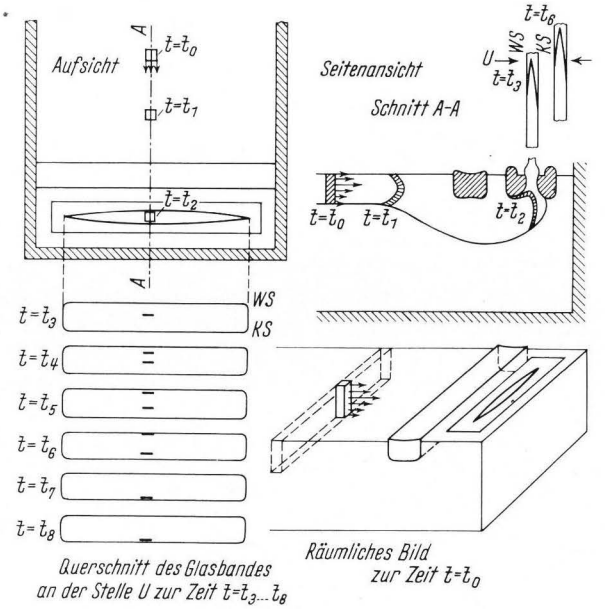

Bild 5. Verformung eines quaderförmigen Glaspostens unter der Einwirkung einer Strömung mit maximaler Geschwindigkeit unterhalb der Oberfläche.

WS: „Warme Seite", d. h. die der Wanne zugekehrte Oberfläche der Glastafel.

KS: „Kalte Seite", d. h. die der Wanne abgekehrte Oberfläche der Glastafel.

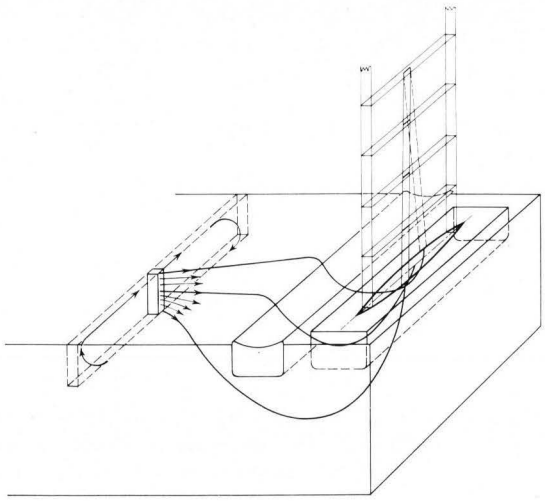

Bild 6. Räumliches Bild.

Verformung eines quaderförmigen Glaspostens unter der Einwirkung einer Vorströmung mit maximaler Geschwindigkeit unterhalb der Oberfläche und einer senkrecht hierzu gerichteten Kreisströmung.

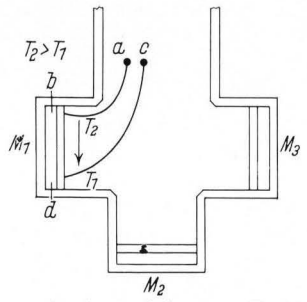

Bild 7. Zieharm mit eingezeichnetem Entnahmefächer der Maschine 1 und Darstellung des Temperaturgefälles vor der Brücke.

ab und cd sind Glasströmungen.
T_1, T_2 den Glasströmungen zugeordnete Temperaturen.
M_1-, M_2-, M_3-Maschinen.

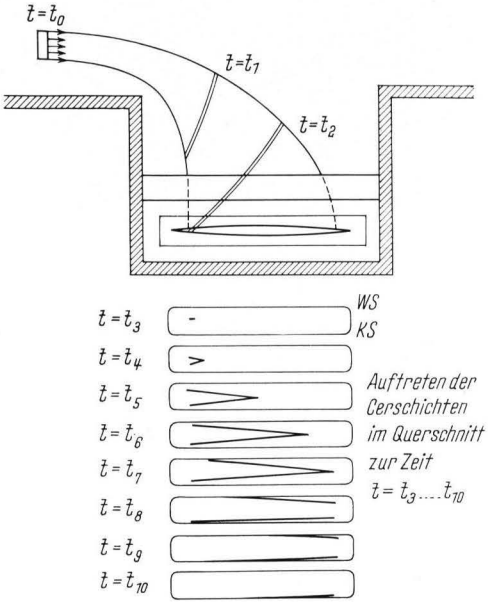

Bild 8. Verformung eines quaderförmigen Glaspostens in einem gekrümmten Entnahmefächer unter der Einwirkung einer Vorströmung mit maximaler Geschwindigkeit unterhalb der Oberfläche.

WS: „Warme Seite", d. h. die der Wanne zugekehrte Oberfläche der Glastafel.

KS: „Kalte Seite", d. h. die der Wanne abgekehrte Oberfläche der Glastafel.

Dieser ungleiche Weg, den Glasteile von der Mitte des Zieharmes bis zur Düse zurücklegen müssen, bedeutet nun für den gelegten Stab 2 eine weitere Defor-

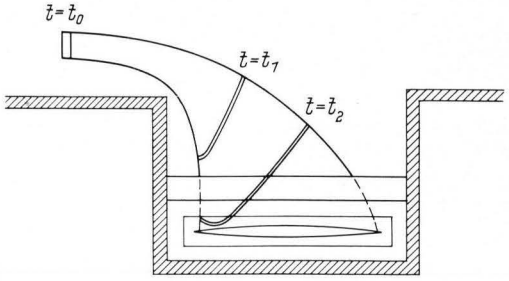

Bild 9. Deformation des gelegten Stabes in der Horizontalebene durch die Reibung an der Bassinwand.

mation, die zu der Deformationdurch die beiden erwähnten Strömungsgradienten hinzukommt. Wie in Bild 8 zu erkennen ist, verursacht sie das Entstehen eines wandernden Keiles. Die Spitze des Keiles enthält jeweils das Glas des Entnahmestromes, das unterhalb der Oberfläche mit der größten Geschwindigkeit strömt; das Glas der beiden Schenkel kommt aus den oberhalb und unterhalb gelegenen Schichten. Von der Aufsicht aus betrachtet, erscheint zuerst das Glas des Stabes, das sich im Bild 8 beim Betrachten der Aufsicht links befindet, weil dort der Weg von der Auflegestelle des Stabes bis zur Düse am kürzesten ist. Wenn rechts das Glas, das unterhalb der

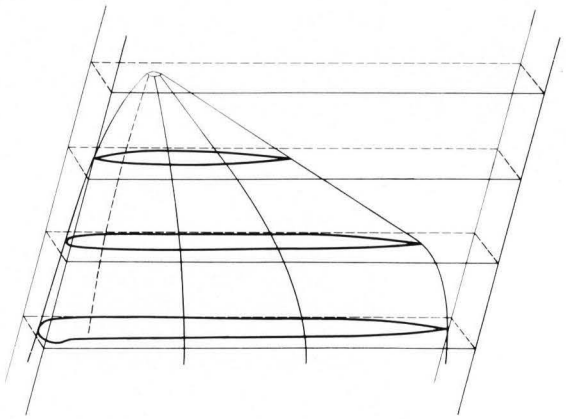

Bild 10. Räumliche Darstellung der Lage des gelegten Stabes im Glasband.

Oberfläche mit der maximalen Geschwindigkeit strömt, im Querschnitt des Glasbades ankommt, hat in den Bereichen links davon, wo die Wege kürzer sind, die Schichtwanderung schon begonnen und zwar je weiter links um so eher. Diese zeitlich unterschiedlich einsetzende Wanderung, infolge des nach rechts stetig größer werdenden Weges, ist die Ursache dafür, daß die Schichten im Querschnitt nicht parallel zur Oberfläche der Tafel erscheinen, sondern keilförmig auslaufen.

In der Nähe des Bassinrandes wird die Strömung sehr kompliziert, wie man an der Bewegung der Cerschichten in den Borden erkennt (Bild 4). Hier machen sich schon die Reibungseinflüsse der Wand bemerkbar. Diese verursachen, daß die horizontalen Geschwindigkeiten zum Bassinrand hin wieder abnehmen. Dadurch wird der Stab geknickt, wie es Bild 9 zeigt. Diese zusätzliche Deformation mit der ausgeprägten Spitze des Stabes in der Horizontalebene hat zur Folge, daß der Stab in das Glasband wie eine Tüte eindringt (Bild 10).

3. Die Ermittlung des Strömungsgradienten

Um den Strömungsgradienten im Bereich zwischen den beiden Stäben zu ermitteln, kann man sich des Prinzips bedienen, das von GRÄFF als „Zwei-Stab-Verfahren" bezeichnet wurde.

Dazu betrachte man eine Versuchsanordnung gemäß Bild 11. Die dort eingezeichneten Stäbe erscheinen nacheinander als Parabeln im aufsteigenden Glasband. Aus der Zeit, die zwischen dem Erscheinen der beiden Parabeln verstreicht, kann man schließen, wie lange der dem Ziehherd entferntere Stab für den Weg zwischen den beiden Eintauchpunkten A und B braucht. Diese Zeit ist selbstverständlich für jede Tiefe anders; das bedeutet, daß sich für jede Querschnittslage zwischen zwei senkrechten übereinanderliegenden Parabelpunkten eine verschiedene Zeitdifferenz ergibt. Voraussetzung bei diesem „Zwei-Stab-Verfahren" ist nun allerdings, daß der entferntere Stab auch an dem Einsteckort des ersten Stabes vorbeikommt. In einem gekrümmten Fächer, wie im vorliegenden Beispiel, gelingt dies aber in der Regel nicht, weil die Fächerströmung im Ablauf der Zeit schwankt, der Weg also, den ein Glasposten von einem bestimmten Punkt im Entnahmefächer bis zur Düse zurücklegt, jedesmal etwas anders ist. Aus diesem Grunde wurde das Verfahren abgewandelt und der entferntere Stab nicht in das Glasbad eingesteckt, sondern auf die Glasoberfläche gelegt, so daß er den ganzen Fächer an der Auflegestelle mit Cerglas überdeckte. In diesem Fall müssen Teile dieses Stabes an der Eintauchstelle des gesteckten Stabes vorbeiströmen.

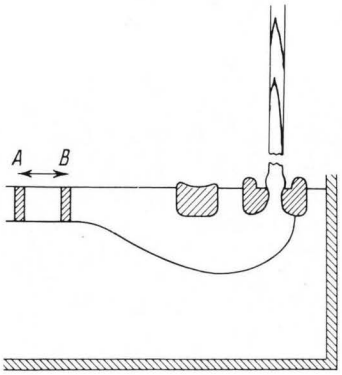

Bild 11. Auftreten von zwei hintereinander gesteckten Glasstäben im Glasband.
A und B sind Eintauchpunkte der Glasstäbe.

In Bild 4 sind im Querschnitt mit einem Pfeil die Stellen gekennzeichnet, die von dem Cerglas des Stabes 1 überwandert wurden. Man findet diese Stellen leicht, wenn man die von dem gesteckten Stab 1 angekommenen Cerlinien in eine Querschnittszeichnung einträgt, durch eine Kurve ergänzt (Bild 12) und feststellt, wo die Kurve sich mit den Cerlinien des gelegten Stabes schneidet. Das Cerglas nun, das vor dem gelegten Stab an der Eintauchstelle des gesteckten Stabes 1 vorbeiströmt, ist von da ab denselben Strömungen unterworfen wie das Cerglas des vorher eingesteckten Cerstabes 1. Es muß also an denselben Stellen im Glasband erscheinen, nur später. Die mit dem Pfeil bezeichneten Stellen in Bild 4 sind demnach jene Teile des gelegten Stabes, die über der Eintauchstelle des gesteckten Stabes weggeströmt sind.

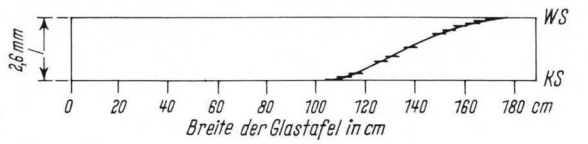

Bild 12. Wanderweg der Cerschichten des gesteckten Stabes 1 im Querschnitt der Glastafel.
WS: „Warme Seite", d. h. die der Wanne zugekehrte Oberfläche der Glastafel.
KS: „Kalte Seite", d. h. die der Wanne abgekehrte Oberfläche der Glastafel. Die Zahlen 20, 40 . . . 180 cm bezeichnen die Länge der Glastafel.

Nun kann man für diese Stellen die Zeiten zwischen dem Auftreten der Fluoreszenz beider Stäbe für jede Querschnittslage ermitteln. Dazu trägt man die Entfernung der Cerlinien des gesteckten Stabes 1 von den beiden feuerpolierten Oberflächen in Abhängigkeit von der Zeit auf (Bild 13) und in dasselbe Diagramm gleichzeitig die Lage der mit Pfeilen markierten Stellen des gelegten Stabes 2 in Bild 4. Man erhält so zwei übereinanderliegende Parabeln, entsprechend der Versuchsanordnung in Bild 11. Die Differenzen zwischen jeweils zwei senkrecht übereinanderliegenden Parabelpunkten

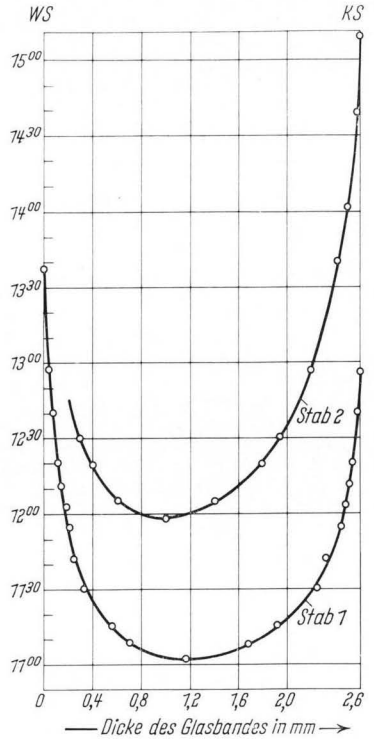

Bild 13. Ankunft der cerhaltigen Schichten im Querschnitt des Glasbandes in Abhängigkeit von der Entfernung von den feuerpolierten Oberflächen.
(Stab 2 entlang der Kurve in Bild 12)

ergeben dann die Zeiten, die das Glas braucht, um von dem Auflegeort des Stabes 2 bis zu dem Einsteckort des Stabes 1 zu gelangen. Man erhält diese Zeiten in Abhängigkeit von der Lage, in der das Cerglas im Glasband aus den verschiedenen, vorerst noch unbekannten Tiefen erscheint. Wenn man nun die Entfernung zwischen den Startpunkten der Stäbe (sie wurde zu 3,64 m ermittelt), durch diese Zeiten dividiert, so erhält man schließlich die Geschwindigkeiten der Strömung zwischen den beiden Eintauchstellen der Stäbe (Bild 14).

Die Kurve in Bild 14 hat mit der wirklichen Geschwindigkeitsverteilung im Glasbad noch nichts zu tun; sie ist mit dieser — trotz des gleichen Ordinatenmaßstabes — auch nicht ähnlich. Das sieht man leicht ein, wenn man sich klar macht, daß alles Glas, in welcher Tiefe und mit welcher Geschwindigkeit es auch zur

Düse strömt, bei der Formung zum festen Glasband auf eine gemeinsame Endgeschwindigkeit, der Ziehgeschwindigkeit, beschleunigt wird. Der Abszissenmaßstab der Kurve in Bild 14 ist daher gegenüber der

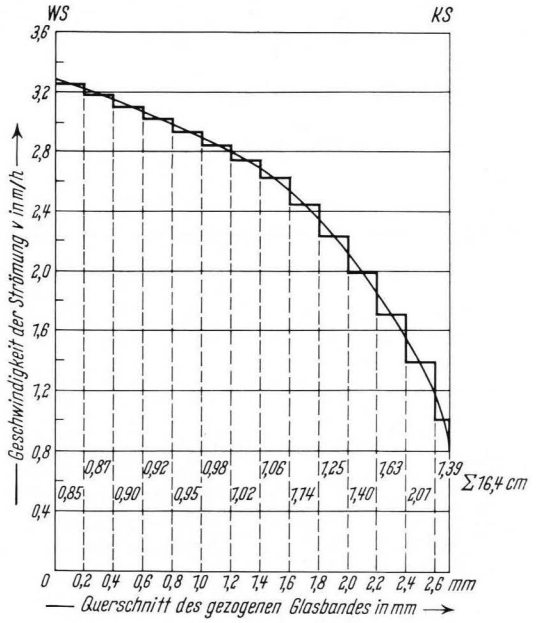

Bild 14. Geschwindigkeit und Schichtdicke zwischem gestecktem und gelegtem Stab.

Geschwindigkeitsverlauf im Zieharm zwischen der Eintauchstelle des gelegten und des gesteckten Stabes in Abhängigkeit von der Lage, in der das Glas aus den verschiedenen Tiefen im Querschnitt des gezogenen Glasbandes ankommt, — dargestellt in Form einer stetigen und einer Treppenkurve. In den unteren Feldern ist für jede Treppenstufe angegeben, wie dick die durch die Stufe eingeteilte Schicht im Glasbad zwischen den beiden Eintauchstellen der Stäbe war.

wirklichen Geschwindigkeitsverteilung nicht nur verkürzt, sondern auch verzerrt. — Man kann die Kurve in Bild 14 aber verhältnismäßig leicht entzerren und den wahren Strömungsgradienten zur Tiefe im Glasbad erhalten, indem man das Kontinuitätsgesetz zu Hilfe nimmt. Gräff [3] hat den Weg gezeigt, wie man das Kontinuitätsgesetz auf den Fall einer sich stetig ändernden Geschwindigkeit am zweckmäßigsten anwendet:

Man teilt dazu den Querschnitt des Glasbandes in kleine Abschnitte ein und wählt für jeden Abschnitt eine mittlere Geschwindigkeit. Man formt also die in Bild 14 dargestellte stetige Kurve in eine Treppenkurve um. Jetzt läßt sich für jeden dieser gewählten Abschnitte (Treppen) das Kontinuitätsgesetz benutzen.

Bezeichnet man mit

d_1 die Dicke des gewählten Abschnittes im Querschnitt des Glasbandes (Breite der Stufe, nach Bild 14: 0,2 mm).

v_2 die Geschwindigkeit des Glases in dem gewählten Abschnitt d_1 nach der Formung zur Glastafel. Sie ist für alle Abschnitte gleich und identisch mit der Ziehgeschwindigkeit. Bei dem Versuch betrug sie 57,6 m/h.

d_2 die Dicke, welche die Schicht d_1 im Glasbad zwischen den beiden eingetauchten Stäben einnimmt.

v_2 die durchschnittliche Geschwindigkeit in der Schicht d_2 zwischen den beiden eingetauchten Stäben. Für die unmittelbare Oberflächenschicht (1. Abschnitt in Bild 14: 3,25 m/h).

b_1 die Breite des Entnahmefächers an der Düse (Glasbandbreite). Für die Maschine 1 = 1,80 m.

b_2 die durchschnittliche Breite des Entnahmefächers zwischen den Eintauchstellen der Stäbe, (nach Bild 2: 0,80 m).

s_1 Dichte des Glases der erkalteten Glastafel,

s_2 Dichte des flüssigen Glases im Zieharm,

so gilt nach dem Kontinuitätsgesetz:

$$s_1 \, d_1 \, b_1 \, v_1 = s_2 \, d_2 \, b_2 \, v_2.$$

Die gesuchte Dicke d_2 ergibt sich zu:

$$d_2 = \frac{d_1 \, b_1 \, v_1}{b_2 \, v_2} \cdot \frac{s_1}{s_2}.$$

Für den Fall der unmittelbaren Oberflächenschicht erhält man so z. B.

$$d_2 = \frac{0{,}02 \cdot 180 \cdot 57{,}6}{3{,}25 \cdot 80} \cdot \frac{s_1}{s_2} = 0{,}80 \, \frac{s_1}{s_2} \text{ cm}.$$

Der Wert von 0,80 cm ist bei Tafelglas der üblichen Zusammensetzung um 7% zu erhöhen, weil die Dichte des flüssigen Glases im Zieharm um etwa 7% kleiner ist als die des erkalteten Glases der Tafel.

$$(d_2 = 0{,}80 \text{ cm} + 7\% = 0{,}85 \text{ cm}).$$

Für die einzelnen Abschnitte sind in Bild 14 die berechneten d_2-Werte (zuzüglich 7%) eingetragen. Trägt man jetzt die Dicken der errechneten Schichten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit nacheinander auf, so erhält man schließlich den gesuchten Strömungsgradienten im Glasbad, zunächst in Form einer Treppenkurve, die man in eine stetige Kurve zurückverwandelt (Bild 15).

4. Diskussion der Geschwindigkeitsverteilungskurve

Aus der Kurve in Bild 15 ist zu erkennen, daß die Strömung an der Oberfläche am schnellsten ist und zur Tiefe zu allmählich langsamer wird. Dieses Ergebnis steht zu den Erklärungen über die Schichtwanderung, die bekanntlich so gedeutet wurde, daß unterhalb der Oberfläche die maximale Geschwindigkeit liegt, natürlich nicht im Widerspruch. Nur für den gesamten Bereich zwischen Stab und Düse muß im Durchschnitt zwar eine Geschwindigkeitsverteilung herauskommen, bei der die maximale Geschwindigkeit unterhalb der Oberfläche liegt; für einen Teil des Abschnittes z. B. dem zwischen den beiden Stäben braucht dies aber nicht zu gelten. Man kann aus diesen Befunden aber andererseits zwingend folgern, daß sich die maximale Geschwindigkeit erst mit dem Untertauchen unter die Brücke in tiefere Bereiche verlagert. Die Reibung an der Brückenunterseite und im Düseneinlauf ist demnach die wirkliche und einzige Ursache für das Zustandekommen der beobachteten Schichtwanderung bei Tafelglas.

Erwähnt werden muß in diesem Zusammenhang auch folgendes: Nach Temperaturmessungen, die von Trier [6] in Tafelglaswannen durchgeführt wurden, liegen die höchsten Temperaturen und damit die niedrigsten Viskositäten in der Abstehwanne in Tiefen von 10 bis 20 cm, eine Folge des rascheren Auskühlens der nicht mehr beheizten Oberfläche. Würde nun in erster Linie der Viskositätsverlauf bei dem 1000 bis 1400 °C

heißen Glas die Form des Strömungsgradienten bestimmen, so müßte die maximale Geschwindigkeit auch vor der Brücke schon unterhalb der Oberfläche liegen. Es zeigt sich aber, daß bei den Viskositäten des 1000 bis 1100 °C heißen Glases der geschwindigkeitsfördernde Einfluß einer freien Oberfläche, bzw. der geschwindigkeitshemmende Einfluß einer Wand gegenüber dem Einfluß der Viskosität noch überwiegen kann. — Durch Extrapolation der Kurve nach größeren Tiefen erhält man den Punkt, bei dem die Vorströmung in die Rückströmung übergeht. Wie man aus dem Bild 15 erkennt, liegt dieser Punkt bei etwa 22 cm.

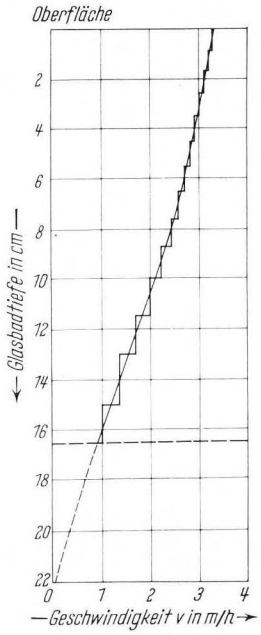

Bild 15. Durchschnittliche Geschwindigkeitsverteilung zwischen den Stäben 1 und 2, dargestellt in Form einer stetigen und einer Treppenkurve.

Nimmt man nun an, daß das so ermittelte Geschwindigkeitsprofil der Vorströmung in Bild 15 in großen Zügen für die ganze Breite des Zieharmes in dem gewählten Entfernungsbereich vor den Ziehmaschinen gilt, dann läßt sich die im Zieharm vorströmende Gesamtmenge des Glases abschätzen. Subtrahiert man hiervon den Teil, der von den Maschinen gezogen wird, so bekommt man als Differenz den Anteil der Rückströmung.

Für die Annahme, daß die Geschwindigkeiten über der ganzen Breite des Zieharmes in etwa gleich sind, sprechen die in Bild 16 dargestellten Kugelströmversuche. Aus ihnen geht hervor, daß die Strömung an der Oberfläche gegenüber der Längsachse systematisch und (von den Wandpartien abgesehen) in etwa auch gleich schnell ist.

Führt man die Rechnung durch, so erhält man bei einer angenommenen Breite von 3 m für die Vorströmung nach der Kurve in Bild 15 etwa 1,6 m³/h. Wenn alle drei Maschinen in Betrieb sind, beträgt die Entnahmemenge bei Ziehgeschwindigkeiten um 100 m/h: 1,0 m³/h, somit verbleiben für die Rückströmung 0,6 m³/h. Man sieht also daraus, daß in den Zieharmen schon weitgehend die Entnahmeströmung den Hauptteil der Vorströmung ausmacht, etwa $^2/_3$ der Gesamtströmung.

Die Tiefe des Entnahmestromes liest man aus der Kurve unmittelbar ab: 16,4 cm. Dabei ist allerdings zu beachten, daß es sich bei dieser Zahl um einen Durchschnittswert handelt. An der Eintauchstelle des Stabes 2 ist der Entnahmestrom kleiner, das folgt daraus, daß der dort aufgelegte Stab nicht tiefer als 10 cm ins Glas eingetaucht wurde und dennoch ganz bis zur kalten Seite hin zu beobachten war. Der Entnahmestrom kann daher an dieser Stelle nicht tiefer als 10 cm gewesen sein. Man sieht daraus, daß der Entnahmestrom mit Annäherung an die Brücke — als Folge einer langsamer werdenden Vorströmung — zunimmt.

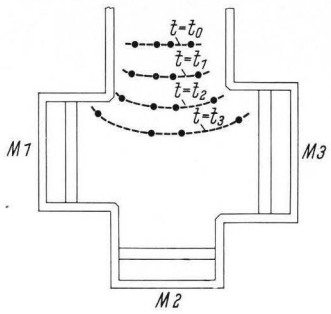

Bild 16. Oberflächenströmung im Zieharm, dargestellt durch schwimmende Schamottekugeln.

5. Zusammenfassung

Der Strömungsgradient im Zieharm einer 9-Maschinen-Fourcault-Kreuzwanne wurde für den Bereich zwischen Zieharmmitte und der Heizkammer einer Randmaschine ermittelt. — Bis zum Untertauchen des Entnahmestromes unter die Brücke bleibt die Geschwindigkeit an der Oberfläche die größte. Sie nimmt zur Tiefe hin ständig ab und erreicht bei etwa 22 cm den Wert 0. Durch das Untertauchen unter die Brücke verlagert sich die maximale Geschwindigkeit in tiefere Bereiche. — Eine Überschlagsrechnung, bei der vorausgesetzt wurde, daß das ermittelte Geschwindigkeitsprofil über der ganzen Breite des Zieharmes gilt, ergibt, daß im Zieharm von der gesamten Vorströmung etwa $^2/_3$ Entnahmestrom ist.

6. Schrifttum

[1] Trier, W.: Glasströmungen: Bedeutung und Meßmethoden. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 401—411.

[2] Dertev, J. K. und Gorohovskij, V. A.: Die Strömung der Glasschmelze im Kanal bei hintereinander angeordneten Ziehmaschinen. Steklo i Keram. **16** (1959) S. 3—8. [Ref. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 312.]

[3] Gräff, R. W.: Verfahren zur Bestimmung von Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit des Glases in Heiz- und Ziehkammern von Tafelglas-Wannen. Glastechn. Ber. **38** (1965) H. 1, S. 1—12.

[4] Becker, H.: Eine neue Methode zur Erforschung der Strömung in Flachglaswannen. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 411—416.

[5] Ramsauer, R.: Anwendung des Schlierenmikroskops zur Untersuchung der Schichtung von Tafelglas. Glastechn. Ber. **27** (1954) S. 374—381.

[6] Trier, W.: Temperaturmessungen im Glasbad von Wannenöfen. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 5—12.

(41157)