

DK 666.1.031.13:532.5:666.1.031.8:536.16:666.1.031.21:666.1.031.841:666.1.033.9

Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Speiserkanal von Hohlglasmaschinen¹⁾**Teil 1. Temperaturmessungen in der Glasschmelze eines Grünglasspeiserkanals und Transformation dieser Temperaturfelder in ein Modell**Von Hans Franzel, Krefeld²⁾

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

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

(Eingegangen am 3. September 1974)

In einem in Betrieb befindlichen Grünglasspeiser (Flaschenherstellung) wurde bei drei verschiedenen Durchsätzen die Temperaturverteilung in der Glasschmelze gemessen. Die Durchsätze umfassen den gesamten Einsatzbereich des Speisers. Die ermittelten Temperaturfelder über die Badquerschnitte und den Kanallängsschnitt zeigen die Einflüsse von

Kühlung oder Heizung mit Hilfe der Kanalbrenner. Deutlich kommt die für Farbgläser typische große optische Dicke in den starken Temperaturgradienten im Oberflächenbereich des Glasbades zum Ausdruck. Die gemessenen Grünglas-temperaturfelder werden mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie in Modelltemperaturfelder umgewandelt.

Flow and temperature distributions in forehearth for container machines. Part 1. Temperature measurements in a green glass forehearth and modelling of the temperature fields

Temperature distributions were measured in an operating green glass forehearth making container gobs at three different loads. The measurements included the whole of the forehearth. The data for longitudinal and cross-sections of the forehearth show the effects of cooling or heating with the

forehearth burners. The behaviour typical of coloured glasses of large optical thickness, namely large temperature gradients near to surface of the glass, was clearly shown. The measured temperature fields were modelled using similarity theory.

Conditions d'écoulement et de température dans le canal de distribution des machines à verre creux. 1^{re} partie. Mesures de la température du verre fondu dans un canal de distribution pour verre vert et transformation des champs de température en un modèle

Dans un distributeur à verre vert pour bouteilles en fonctionnement, on mesure la distribution des températures dans le verre fondu pour trois tirées différentes. Ces tirées concernent tout le domaine d'utilisation du distributeur. Les champs de température calculés sur la section transversale du bain et la section longitudinale du canal mettent en évidence les effets du refroidissement ou du chauffage réalisé à l'aide

du brûleur situé sur le canal. L'importante densité optique qui caractérise les verres colorés apparaît clairement sous forme de gradients de température élevés dans la zone superficielle du bain de verre. Les champs de température du verre vert mesurés sont transformés en champs de température modèles à l'aide de la théorie des similitudes.

Steigende Ansprüche an die Produktionsmenge bei der Flaschenherstellung, verbunden mit besserer Maßhaltigkeit und Gleichmäßigkeit der Glasverteilung (Leichtgewichtsflaschen), stellen immer höhere Ansprüche an die Beschaffenheit des Glastropfens am Speiserkopf. Form, Gewicht und Viskosität des Schmelztropfens, in erster Linie abhängig von der Tropfentemperatur, müssen daher in ständig engeren Toleranzen eingehalten werden.

Eine moderne Hohlglaschmelzwanne beliefert mehrere Speiserkanäle mit Schmelze. Die Speiser wiederum beschicken die Formmaschinen mit einer jeweils unterschiedlichen Anzahl von Tropfen mit unterschiedlichem Gewicht. Da dem Glastropfen in der Maschine vornehmlich durch direkten Kontakt mit den kalten Formwerkzeugen Wärme entzogen wird und die Endtemperatur des Glasartikels nach Verlassen der Maschine aus fertigungstechnischen Gründen vorgegeben ist, sind bei unterschiedlicher Tropfengröße verschieden hohe Temperaturen erforderlich. Kleine Tropfen mit geringem Volumen/Flächenverhältnis müssen am Speiserkopf wesentlich heißer sein als Tropfen mit großem Volumen/Flächenverhältnis. Andernfalls ist eine zufriedenstellende Verarbeitung in der Form nicht gewährleistet. Da die Schmelzwanne jedoch nur Glasschmelze derselben Temperatur liefern kann, fällt dem Speiserkanal neben

den reinen Transportaufgaben die Einstellung des geforderten Temperaturniveaus zu.

Die Tropfentemperaturen der einzelnen Speiser können sich bis etwa 100 K unterscheiden. Dabei muß die Temperatur mit einer Toleranz unter ± 1 K bei einer Mitteltemperatur von etwa 1100 °C konstant gehalten werden. Berücksichtigt man den Massendurchsatz je Speiserkanal von 0,3 bis etwa 1,2 kg Glas/s, so ist die schwierige Aufgabe zu erkennen, die im Speiserkanal zu bewältigen ist.

Die Konstruktion der Speiserkanäle in der Praxis hat sich in den letzten Jahrzehnten nicht mehr wesentlich geändert. Nur empirische Maßnahmen erlaubten eine Verbesserung der Glasqualität und eine Erhöhung des Durchsatzes. Um die Frage zu klären, ob die gegenwärtigen Speiserkonstruktionen den wachsenden Ansprüchen in Zukunft noch genügen oder ob grundsätzlich neue Konstruktionen gefunden werden müssen, sind eingehende Untersuchungen über die Temperatur- und Strömungsverhältnisse im Schmelzbad eines Speiserkanals erforderlich.

¹⁾ Auszug in zwei Teilen aus der von der Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen genehmigten Dissertation des Autors (1974).

²⁾ Jetzt: Bayer AG, Krefeld-Uerdingen.

1. Stand der Technik

Im Speiserkanal liegt die Glasschmelze im allgemeinen als homogene, viskose Flüssigkeit vor, deren Läuterung von Verunreinigungen und Gasblasen schon am Ausgang der Arbeitswanne abgeschlossen ist. Ein Skimmer am Eintritt in den Speiserkanal verhindert den Weitertransport einer eventuellen Schaumschicht aus der Arbeitswanne. Somit können chemische Reaktionen und mechanische Absetzvorgänge im Speiserkanal außer acht gelassen werden. Nur die Kanalgeometrie und die Eigenschaften der homogenen Schmelze bei Heizung oder Kühlung beeinflussen das Temperatur- und das Strömungsfeld.

Temperaturfeld und Strömungsfeld sind über die Viskosität der Schmelze und den Auftrieb miteinander gekoppelt. Trier [1] hat den Zusammenhang dieser beiden Felder bei freier Konvektion in einer Glasschmelze auf Grund der Dichteunterschiede aufgezeigt und berechnet. Besonders bei Farbgläsern treten bei Wärmezufuhr oder Wärmeabgabe sehr große Temperaturgradienten auf. Dies ist auf die große optische Dicke und die damit verbundene geringe freie Weglänge der Strahlung bei farbigen Gläsern zurückzuführen.

Mit den Stoffwerten nach Czerny und Genzel [2] beträgt die optische Dicke τ_λ für den ungünstigsten Absorptionskoeffizienten κ_λ bei einer Schmelzbathöhe $h = 15$ cm

für Fensterglas: $\tau_{FG} = 2,29$,

für Grünglas³⁾: $\tau_{GG} = 23,7$.

Hier ist zu erkennen, daß die optische Dicke von Grünglas um einen Faktor 10 größer ist als die von Fensterglas. Berücksichtigt man die damit verbundene exponentielle Abnahme der Strahlungsintensität in der Schmelze, so wird deutlich, daß bei den üblichen Abmessungen eines Speiserkanals bei Grünglas den inneren Schichten das Bades nur sehr schwer Energie zuzuführen oder zu entziehen ist.

In der Literatur sind keine Angaben über Strömungsmessungen im Speiser zu finden. Auf Grund der wesentlich geringeren Geometrie im Gegensatz zur Schmelzwanne können Geräte, wie Schwimmkörper und Pendel [3], nicht zum Einsatz kommen. Andere Meßmethoden, wie radioaktive Zusätze oder Testsubstanzen, ergeben nur ungenaue Aussagen und können vor der Formmaschine nicht mehr entfernt werden.

Wie schon erwähnt, wird je nach Tropfengröße im Speiserkanal mit den Brennern die Badoberfläche geheizt oder gekühlt. Dadurch treten in der Schmelze große Temperaturgradienten auf, die in erster Linie zu Schwierigkeiten bei der Einhaltung der geforderten Toleranzwerte am Speiserkopf führen. Inwieweit sich die Temperaturfelder auf die Strömung auswirken und wie sie die Transportströmung beeinflussen, konnte bisher noch nicht nachgewiesen werden.

Deshalb versucht man zumindest qualitativ, die Strömungen in einem kalten Modell nachzuahmen. Mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie [4 und 5] können Kennzahlen ermittelt werden, die ein Maß für die im Problem auftretenden physikalischen Größen sind. Untersuchungen

der Strömungen in einem Schmelzwannenmodell wurden u. a. mit Erfolg von Safaieh [6], Lennertz [7] und Tober [8] durchgeführt. Voraussetzung für solche Modelluntersuchungen sind gemessene oder berechnete Temperaturfelder, die auf Grund der Ähnlichkeitskennzahlen in Modelltemperaturfelder umgewandelt werden. Einen umfassenden Überblick des gegenwärtigen Standes der Modelltechnik gibt Süßer [9].

An einem Speisermodell wurden von Nishioka u. a. [10] Untersuchungen durchgeführt. Hier werden allerdings nur Glasdurchsätze von etwa 0,095 kg Glas/s und darunter betrachtet, die um den Faktor 10 unter den heute möglichen Durchsätzen liegen. Die Verfasser erhalten parabolische Strömungsprofile mit ausgeprägten Maxima in der Mitte der Badoberfläche. Sie stellen bei isothermer Strömung ausschließlich zur Speiserlängsachse parallele Geschwindigkeiten fest. Ein von den Begrenzungsflächen des Flüssigkeitsbades aufgezweigter Temperaturgradient ergab ein Abwandern der Strömung von der Oberfläche zu den Kanalwänden hin, dort ein Absinken zum Boden und anschließend wieder zurück zur Badoberfläche und zur Kanalmitte.

Der Versuch, gemessene Temperaturfelder eines kleinen Speiserabschnittes mit einem mathematischen Modell anzunähern, wird von Duffin [11] unternommen. Der Verfasser stellt keine Verknüpfung mit dem Geschwindigkeitsfeld her, sondern setzt eine parabolische Verteilung der Geschwindigkeit unabhängig von der Viskosität voraus.

In einem weiteren mathematischen Modell sind gekoppelte Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder aufgeführt [12]. Da durch das Zusammenwirken von Strahlung, Leitung und Konvektion im Glasbad einer offenen Speiserrinne eine Berechnung nur schwer zu verwirklichen ist, werden hier die Verhältnisse auf eine Rohrströmung (Rohrdurchmesser 5 cm) vereinfacht. Der Verfasser geht daher von wesentlich vereinfachten Bedingungen, wie konzentrischen Temperatur- und Strömungsfeldern sowie ohne freie Badoberfläche, aus.

Keine Angaben sind in der Literatur über systematische Temperaturmessungen in einem Speiserkanal zu finden. Andeutungsweise können vereinzelte Angaben bei Thate [13], Marchini [14] und in den schon erwähnten Arbeiten [10 und 11] entnommen werden. Umfangreichere Messungen wurden von Greschat [15] angegeben. Alle diese Quellen reichen jedoch nicht aus, um als Grundlage für die Untersuchungen in einem Modell zu dienen.

Ähnliche Experimente am Modell einer viereckigen, offenen Wasserrinne erfolgten durch Bernhauer [16]. Der Verfasser zeigt, daß bei strömendem Wasser außer der reinen Transportströmung in Richtung der Kanallängsachse auch Sekundärströmungen auftreten. Hier ist allerdings die Richtung der Sekundärströmung der von Nishioka [10] beobachteten Querbewegung bei der Modellflüssigkeit für Glas entgegengesetzt gerichtet. Der Verfasser begründet die Sekundärströmung mit einem in der Flüssigkeit auftretenden Druckfeld. Turbulente Schwankungen der örtlichen Transportströmung werden an den festen Begrenzungsflächen der Rinne gleich Null. Dadurch wird ein örtlich verschieden großer Druck aufgebaut, der die Querbewegung hervorruft. Im Gegensatz zur Glasschmelze ist Wasser eine Flüssigkeit mit vernachlässigbarer Viskositätsänderung. Außerdem tre-

³⁾ Bei Czerny und Genzel handelt es sich um Grünglas, das nur mit Eisenoxid gefärbt wurde. Heute verwendet man Eisenoxid zusammen mit Chromoxid.

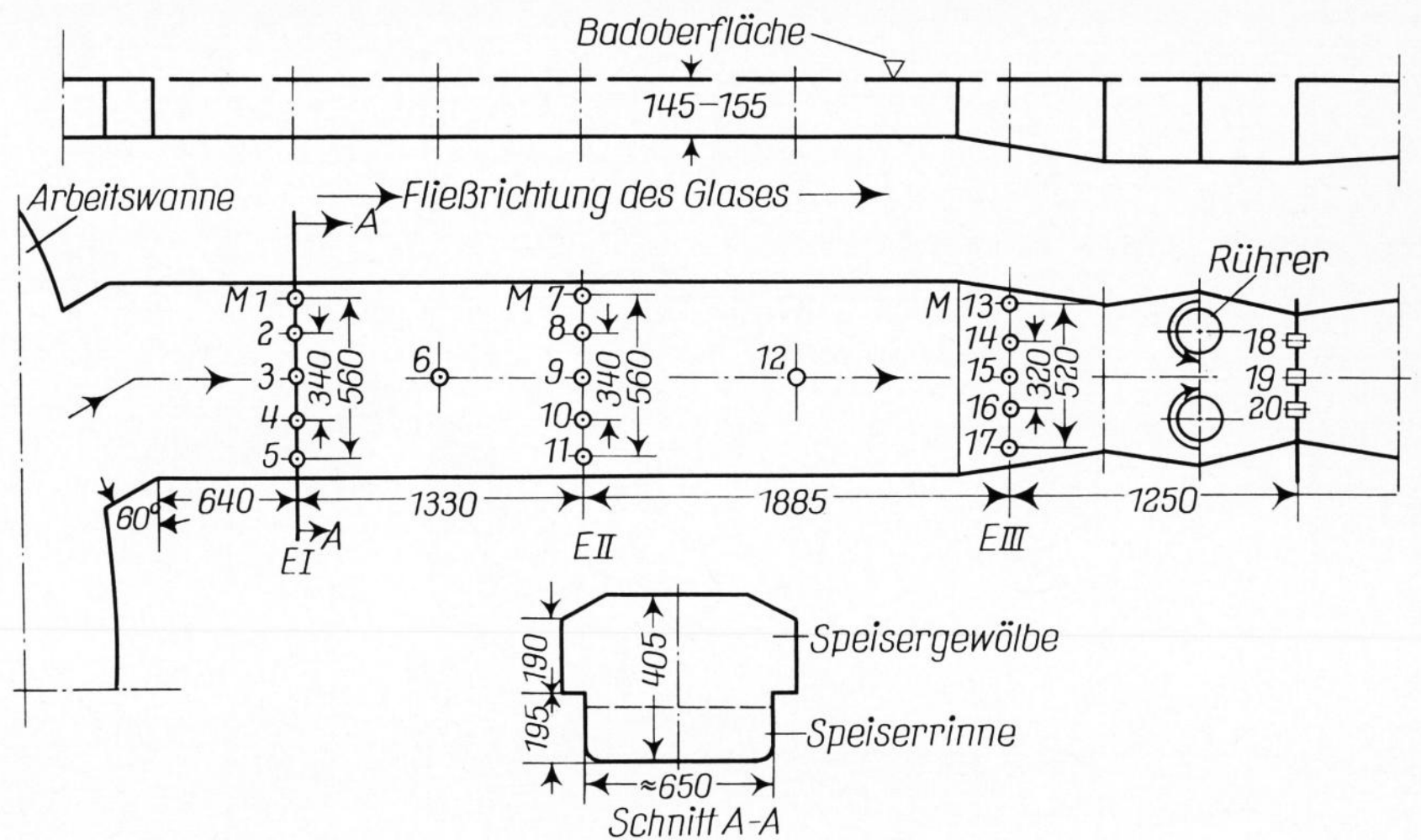


Bild 1. Schema des Grünglasspeiserkanals mit der Anordnung der Meßstellen M 1 bis M 20.

ten im Glasbad auf Grund des hohen Viskositätsniveaus keine Turbulenzen auf, so daß eine stabile laminare Strömung angenommen werden kann. Die im Glasspeiserkanal eventuell auftretenden Sekundärbewegungen müssen daher eine andere Ursache haben.

2. Temperaturmessungen in der Glasschmelze

2.1. Beschreibung des Speisers und der Meßanordnung

Beim Bau eines in der Praxis üblichen Speiserkanals an einer Grünglaswanne wurden 20 Löcher in die Speiserdeckensteine gebohrt. Der geringe Lochdurchmesser von 45 mm ließ keine wesentliche Störung der automatischen Regelung erwarten. Die Meßstellen waren wie folgt aufgeteilt (Bild 1):

M 1 bis M 5: Diese Bohrungen werden im weiteren Verlauf Speiserquerschnitt „Ebene I“ bezeichnet. Die Meßstellen befinden sich unmittelbar hinter dem in die Glasschmelze eintauchenden Skimmer am Beginn der ersten Brennerzone.

M 7 bis M 11: Die „Ebene II“ befindet sich am Ende der ersten Brennerzone.

M 13 bis M 17: Die „Ebene III“ wurde am Ende der zweiten Brennerzone angeordnet. Hier beginnt sich der Speiserkanal zu verengen, und der Boden fällt ab, d. h. die Tiefe des Glasschmelzbades wird größer.

M 6 und M 12: Um den Temperaturverlauf in der Mittelachsebene des Speisers genauer bestimmen zu können, wurden diese beiden Bohrungen jeweils in der Mitte zwischen den Querschnittsebenen E I — E II und E II — E III angeordnet.

In der Hauptausführung war zwischen den Brennerzonen 1 und 2 keine Trennung des Gasraumes vorhanden. Dagegen wurde die zweite von der dritten Brennerzone hinter der Ebene III durch einen Gewölbestein getrennt. Dadurch sollte ein direkter Einfluß der ersten beiden Brennerzonen auf die letzte Regelzone vor dem Speiserkopf vermieden werden. Die Zonen 1 und 2 können als Strecke zur Grobeinstellung der notwendigen Tropfentemperatur angesehen werden, während die dritte Zone der Feinregulierung dient. Messungen in der dritten Zone hätten erhebliche Umbauten der im

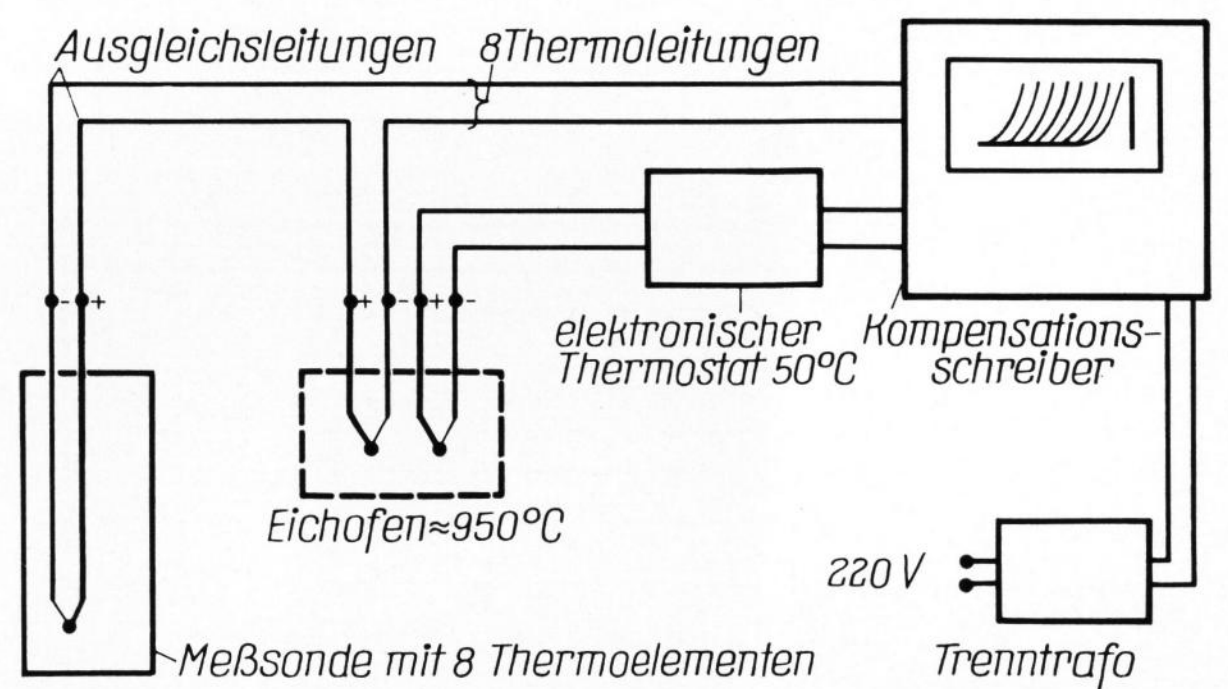
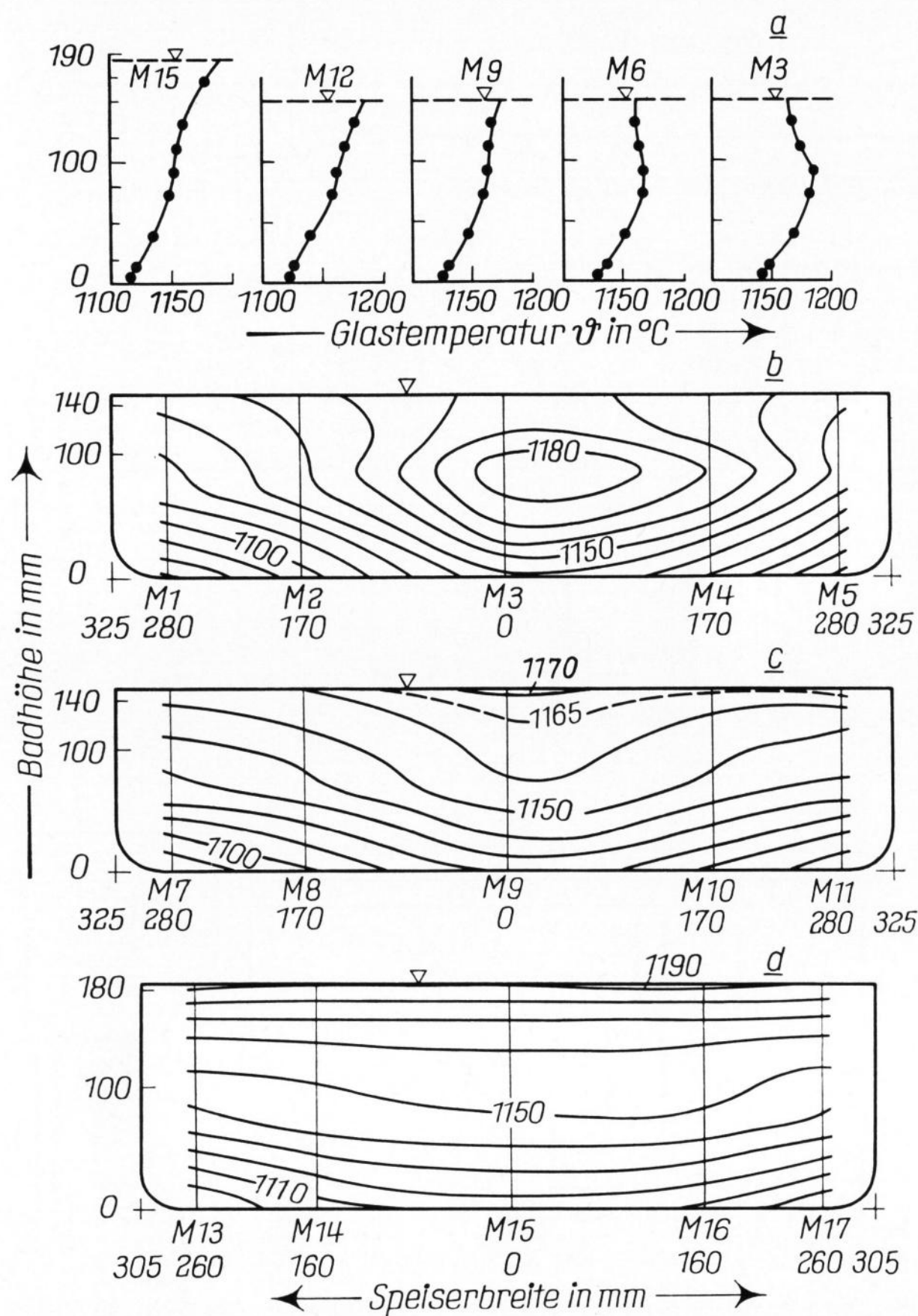


Bild 2. Meßanordnung für die Temperaturmessungen im Grünglasspeiserkanal (Schema).

Speiserkanal eingebauten Armaturen (Rührer, Tonrohr, Plunger und zugehörige Gestänge und Motoren) erfordert. Diese hätten die Produktion empfindlich gestört. Zur Kontrolle wurden daher nur noch die Meßstellen M 18 bis M 20 betrachtet. Sie liegen an der Stelle der größten Glasbadtiefe hinter den eingebauten Rührern. Damit sollte nachgeprüft werden, ob die Rührer den gewünschten Effekt der besseren Homogenisierung des Temperaturfeldes in der Glasschmelze erreichen.

Erste Versuche mit Pt-PtRh-Thermoelementen in Sillimanit-Kapillarrohren, die von einem Thermax-Schutzrohr umgeben waren, führten nicht zum Erfolg. Die Meßstellen der Thermoelemente (Schweißstellen) waren nach kurzen Einsatzzeiten zerstört. Nach Angaben des Herstellers treten diese Schädigungen bei Pt-PtRh-Thermopaaren in reduzierender Atmosphäre und in Anwesenheit von silicatischen Stoffen oder Metaldämpfen auf [17]. Da im Schutzrohr eine reduzierende Atmosphäre nachgewiesen werden konnte, mußte eine neue Meßanordnung unter Verwendung von Ni-NiCr-Mantelthermoelementen entwickelt werden (Bild 2).

Die eigentliche Meßsonde bestand aus einem Bündel von acht Mantelthermoelementen (Durchmesser 3 mm), das sich aus Gründen der mechanischen Stabilität in einem dünnen Thermax-Schutzrohr befand. Auf den Wert der Temperaturanzeige hatte dieses Rohr keinen Einfluß. Nur die Einstellzeit verlängerte sich von etwa 3 min (ungeschützte Mantelelemente) auf etwa 6 bis 8 min (mit Schutzrohr). Die eigentliche Meßzeit wurde



Bilder 3a bis d. Temperaturverteilung im Grünglasspeiser, Durchsatz 0,242 kg Glas/s; ($\nabla \triangleq$ Glasbadoberfläche);
a) über die Badhöhe,
b) bis d) über den Badquerschnitt (b) Ebene I, c) Ebene II, d) Ebene III).

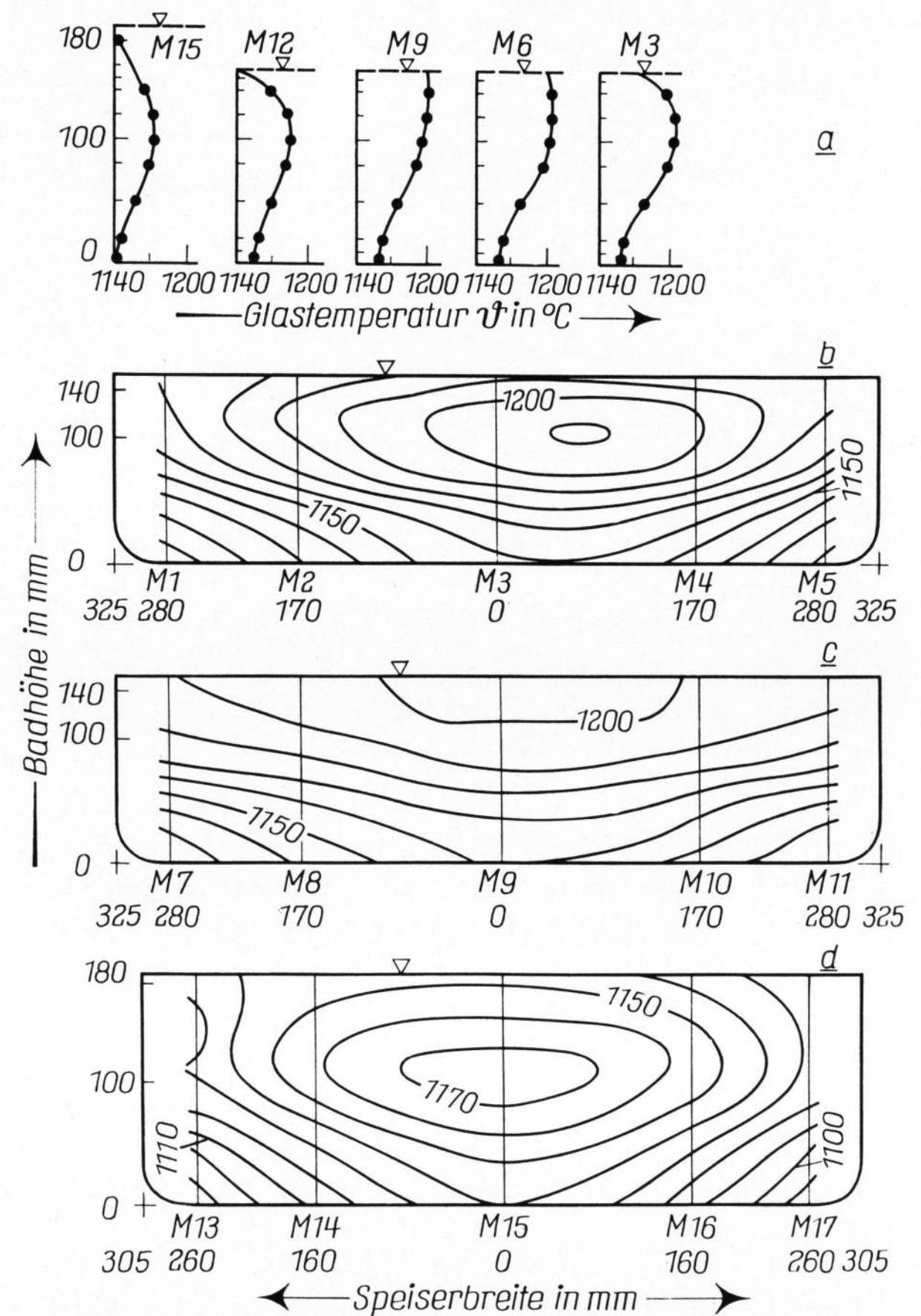
daher auf jeweils 15 min festgelegt. Jedes der acht Thermolemente war in einer bestimmten Höhe über dem Sondenende fixiert, so daß mit dem Boden der Speiserrinne als Bezugsnullpunkt Temperaturprofile über die Badhöhe aufgenommen werden konnten, wie sie z. B. in Bild 3a dargestellt sind. Mit dieser Meßanordnung konnten je drei reproduzierbare Temperaturmeßreihen je Durchsatz an verschiedenen Tagen durchgeführt werden. Die maximalen Abweichungen der Meßwerte einer Meßstelle betragen am Anzeigegerät etwa $\pm 2,5$ K. Im allgemeinen stimmten die Meßwerte der verschiedenen Meßreihen bei gleichem Glasdurchsatz sehr gut überein.

2.2. Charakterisierung der Glasdurchsätze

Die Durchsatzmasse in einem Speiserkanal ist im allgemeinen durch seine Baugröße und die vorhandenen Regelmöglichkeiten beschränkt. Hier werden drei Durchsätze betrachtet, die den gesamten Einsatzbereich des Grünglasspeisers umfassen.

2.2.1. 0,242 kg Glas/s

Dieser Durchsatz liegt an der unteren Grenze der möglichen Speiserregelung. Die Brenner aller drei Zonen werden nahezu mit Vollast betrieben. Die Glasschmelze muß bis zum Speiserkopf soweit aufgeheizt werden, daß der geforderte kleine Tropfen die in der Formmaschine notwendige Verarbeitungstemperatur erhält.



Bilder 4a bis d. Temperaturverteilung im Grünglasspeiser, Durchsatz 0,402 kg Glas/s; ($\nabla \triangleq$ Glasbadoberfläche);
a) über die Badhöhe,
b) bis d) über den Badquerschnitt (b) Ebene I, c) Ebene II, d) Ebene III).

2.2.2. 0,402 kg Glas/s

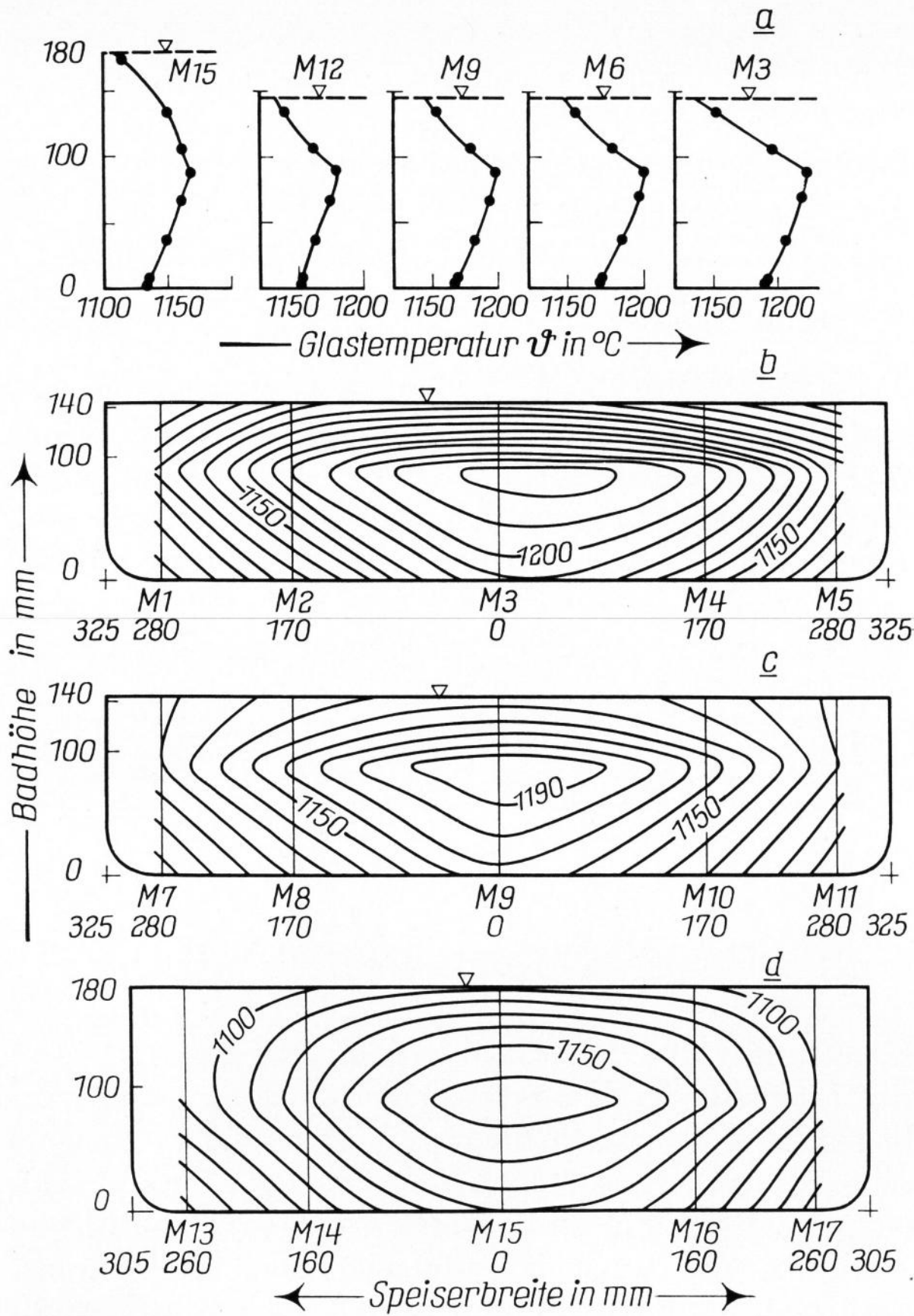
Der mittlere Durchsatz zeichnet sich durch besonders gute Regelbarkeit des Speiserkanals aus. Die Stellglieder der Brenner arbeiten hier in ihrem mittleren Regelbereich und können so auftretende Abweichungen vom Sollwert durch optimale Änderungen der Regelgrößen ausgleichen.

2.2.3. 0,538 kg Glas/s

Beim größten Durchsatz werden am Speiserkopf große Tropfen zur Produktion schwerer Artikel gefordert. Durch das hierbei auftretende große Verhältnis von Volumen zur Fläche des Glastropfens muß dieser eine wesentlich niedrigere Temperatur besitzen, als es bei den vorgenannten Durchsätzen erforderlich war. Die Brenner wurden daher mit großem Luftüberschuß betrieben und wirkten auf diese Weise als Oberflächenkühler. Dieser Durchsatz lag an der oberen Regelgrenze des Speiserkanals.

2.3. Temperaturfelder

Die mit der Meßsonde aufgenommenen Temperaturverteilungen (Bilder 3a, 4a und 5a) sind in Isothermendarstellung in den Bildern 3b bis d, 4b bis d und 5b bis d für die Speiserkanalquerschnitte sowie in den Bildern 6a bis c für die Mittelachsenebene aufgeführt. Die Isothermenverläufe wurden durch grafische Interpolation ermittelt. Deutlich ist beim kleinsten Durchsatz (Bilder 3a bis d) der sich immer mehr verstärkende Brenner einfluß im örtlichen Verlauf von E I nach E III hin zu



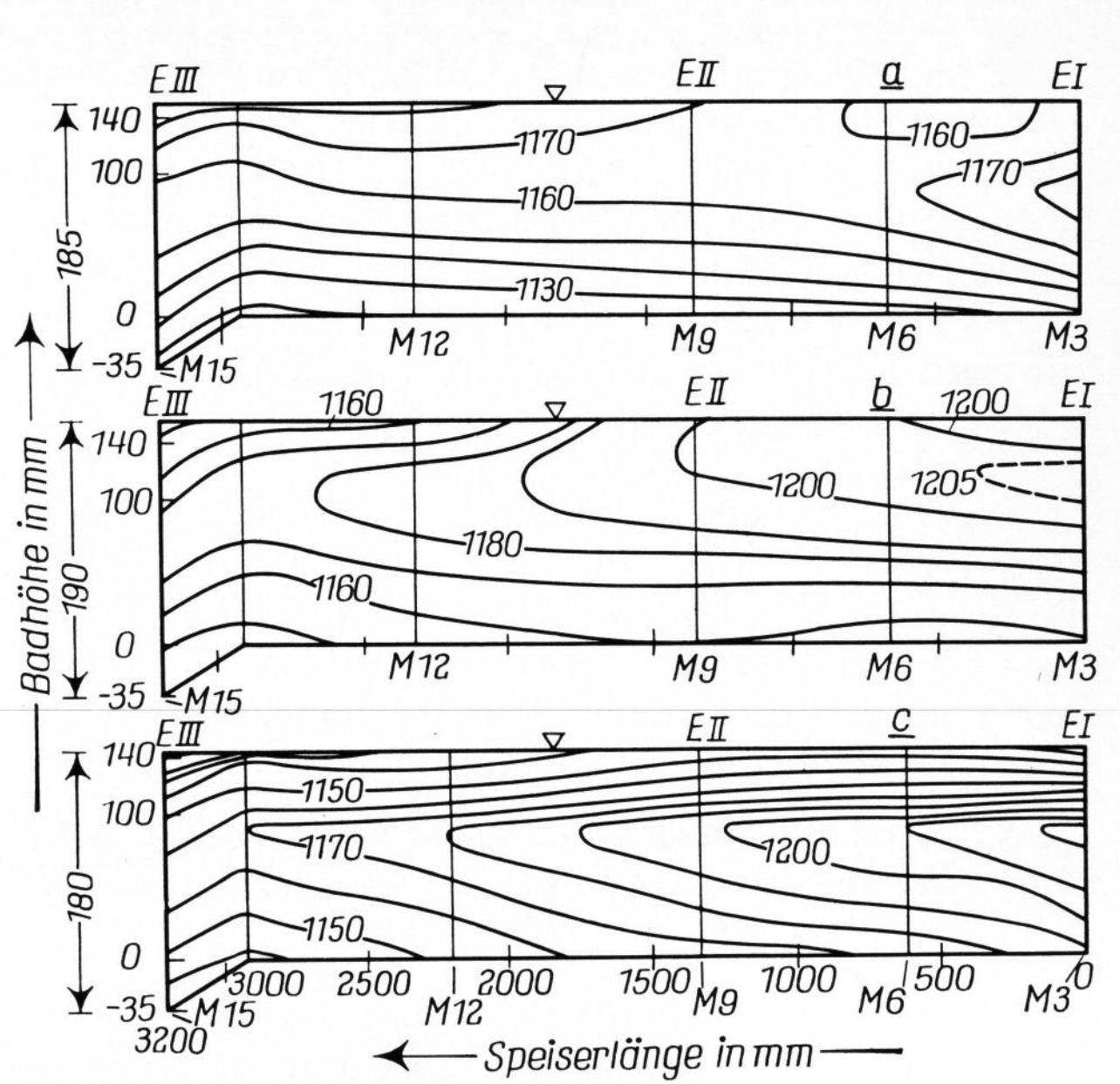
Bilder 5a bis d. Temperaturverteilung im Grünlasspeiser, Durchsatz 0,538 kg Glas/s; ($\nabla \triangleq$ Glasbadoberfläche);
 a) über die Badhöhe,
 b) bis d) über den Badquerschnitt (b) Ebene I, c) Ebene II, d) Ebene III).

erkennen. Die geschlossenen Isothermen (Temperaturmaximum unter der Badoberfläche) bei E I verschwinden. In E III (Temperaturmaximum stets an der Oberfläche) ist infolge der starken Brennerheizung ein Ansteigen des Temperaturgradienten im Oberflächenbereich der Schmelze zu beobachten (siehe optische Dicke, Abschnitt 1).

Beim mittleren Durchsatz (Bilder 4a bis d) sind die Temperaturgradienten in der oberen Badhälfte wesentlich geringer. Hier findet ein besserer Temperatureausgleich statt als bei dem kleinsten und dem größten Durchsatz (Bilder 5a bis d). In Ebene II sind infolge der Wärmeabgabe vom Temperaturmaximum unterhalb der Badoberfläche her (E I) und auf Grund der Brennerheizung keine geschlossenen Isothermen mehr vorhanden. Dagegen ist in der dritten Querschnittsebene wieder eine Kühlung der Badoberfläche zu erkennen.

Die Temperaturfelder des höchsten Durchsatzes (Bilder 5a bis d) zeigen im gesamten betrachteten Speiserabschnitt eine starke Kühlung der Oberfläche. Das Temperaturmaximum liegt stets bei etwa $\frac{2}{3}$ Glasbadhöhe. Die Temperaturgradienten zur Badoberfläche hin sind erheblich größer als im Boden- und Wandbereich und erreichen Werte bis etwa 18 K/cm Badhöhe (E I).

Um den örtlichen Temperaturverlauf in Strömungsrichtung zu verdeutlichen, werden die Isothermen in der Mittelachsenebene des Kanals bei den verschiedenen Durchsätzen in den Bildern 6a bis c einander gegenübergestellt.



Bilder 6a bis c. Temperaturverteilung in der Mittelachsenebene des Grünlasspeisers; ($\nabla \triangleq$ Glasbadoberfläche);
 a) Durchsatz 0,242 kg Glas/s;
 b) Durchsatz 0,402 kg Glas/s;
 c) Durchsatz 0,538 kg Glas/s.

Die Meßwerte der Meßstellen M 18 bis M 20 können nicht quantitativ angegeben werden. Infolge der größeren Badtiefe im Bereich dieser Meßstellen (etwa 220 mm) war die Stabilität der Thermoelementsonde nicht mehr gewährleistet, so daß nur einige Informationsmessungen durchgeführt werden konnten. Sie bestätigten die in der dritten Ebene erkennbare Verschlechterung der Temperaturhomogenität infolge der größeren Badtiefe. Ein Einfluß der vorgeschalteten Rührer konnte nicht festgestellt werden.

Allgemein gilt für alle Durchsätze:

1. Die Arbeitswannentemperatur war bei allen Durchsätzen konstant.
2. Die Badhöhe schwankt bei konstantem Durchsatz nicht meßbar.
3. Die Badhöhen im Speiserkanal betragen (Teil mit konstanter Badgeometrie):
 Durchsatz 0,242 kg Glas/s: $h = 150$ mm,
 Durchsatz 0,402 kg Glas/s: $h = 155$ mm,
 Durchsatz 0,538 kg Glas/s: $h = 145$ mm.

Somit konnte eine Gesetzmäßigkeit der Badhöhe in Abhängigkeit vom Durchsatz nicht festgestellt werden.

4. Bei allen Durchsätzen ist das Temperaturfeld über den Speiserquerschnitt nicht völlig symmetrisch, sondern leicht zur rechten Seite hin verschoben. Die Asymmetrie kann andeutungsweise bis zur Ebene III verfolgt werden. Diese Erscheinung ist in der Hauptsache auf den nicht-radialen Anschluß des Speisers an die Arbeitswanne zurückzuführen (Bild 1). Außerdem waren drei weitere Speiserkanäle mit wesentlich höherem Durchsatz rechts vom untersuchten Kanal an die Wanne angeschlossen. Dadurch kann schon in der Arbeitswanne selbst eine Verschiebung der Strömung nach rechts erfolgen, die sich im Speiserkanal noch fortsetzt.

5. In der Querschnittsebene I sind bei allen Durchsätzen geschlossene Isothermen zu erkennen. Dies ist auf den Einfluß des Skimmers zurückzuführen, der sich unmittelbar vor den Meßstellen der Ebene I befindet. Der Gewölbstein taucht etwa 1 bis 3 cm in die Glasschmelze ein. Der direkte Kontakt mit der Schmelze führt zu einer starken Abkühlung der Badoberfläche, die in ihrer Größe von der gesamten Temperatur des Gewölbes abhängt. Bei starker Heizung im Speiserkanal (kleiner Durchsatz) ist auch das Gewölbe sehr heiß, und der Skimmer kühlt die Oberfläche relativ wenig ab. Werden die Brenner dagegen mit großem Luftüberschuß betrieben (großer Durchsatz), so bewirkt die kühle Speiserdecke über den Skimmer den genannten maximalen Temperaturgradienten in der Glasschmelze.

6. Das Temperaturmaximum in der Ebene I hängt vom Durchsatz ab:

Durchsatz 0,242 kg Glas/s: $\vartheta_{\max} = 1180 \text{ }^\circ\text{C}$,

Durchsatz 0,402 kg Glas/s: $\vartheta_{\max} = 1205 \text{ }^\circ\text{C}$,

Durchsatz 0,538 kg Glas/s: $\vartheta_{\max} = 1220 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dies ist auf die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bei wachsendem Durchsatz zurückzuführen. Die Verweilzeit der Schmelze ist kürzer, und es wird bei gleichbleibender Arbeitswannentemperatur durch die strömende Glasmasse mehr Energie zugeführt, als an die Umgebung (Badgrenzen) abgeführt werden kann. Dies führt zur Erhöhung der Badinnentemperatur trotz kälterer Badgrenzen. Die Abhängigkeit der Maximaltemperatur vom Durchsatz ist nahezu linear.

7. Die Temperaturgradienten zum Kanalboden hin unterscheiden sich bei allen Durchsätzen nicht wesentlich. Wie es auf Grund der Ausführungen über die optische Dicke zu erwarten war (siehe Abschnitt 1.), sind diese Bereiche durch Heizung oder Kühlung von der Badoberfläche her kaum zu beeinflussen.

8. Die Temperaturverteilungen bei den untersuchten Durchsätzen weisen erhebliche Unterschiede auf. Ob diese Unterschiede die Strömung der Glasschmelze im Speiserkanal beeinflussen und welcher Art diese Einflüsse sein können, ist aus den Temperaturfeldern nicht direkt abzuleiten. Die vorliegenden Meßwerte werden durch Teilergebnisse anderer Verfasser [15 und 18] bestätigt. Sie können zum Vergleich mit mathematischen Modellen oder zu praktischen Untersuchungen an einem physikalischen Modell herangezogen werden.

3. Ähnlichkeitstheorie — Ermittlung der Kennzahlen

Für die Glasschmelzwanne verwendet Safaieh [6] die Rayleigh-Zahl als Maß für die auftretende Konvektionsströmung. Im Speiserkanal herrscht dagegen eine ausgeprägte erzwungene Transportströmung vor. Die Rayleigh-Zahl kann daher bei dem vorliegenden Problem zumindest nicht allein maßgebend für die Bewegung in der Schmelze sein.

Die Ähnlichkeitsbetrachtung wurde mit Hilfe der Dimensionsanalyse durchgeführt. Folgende Referenzgrößen wurden dabei berücksichtigt:

Badhöhe der Schmelze	= h,
Erdbeschleunigung	= g,
Temperatur	= ϑ ,

Wärmeleitfähigkeit	= λ ,
kinematische Viskosität	= ν ,
mittlere Strömungsgeschwindigkeit	= \bar{v}
spez. Wärmekapazität	= c,
Dichte	= ρ ,
Dichteänderung	= $\partial\rho/\partial\vartheta$,
Wärmeübergangskoeffizient	= α .

Auf Grund der in diesen 10 Referenzgrößen enthaltenen fünf Grunddimensionen (Länge, Zeit, Temperatur, Masse, Energie) ergeben sich fünf Kennzahlen [4 und 5]. Können alle Kennzahlen der Hauptausführung auch in einem Modell eingehalten werden, so besteht in bezug auf die gewählten Referenzgrößen völlige Ähnlichkeit:

$$\text{Re} = \frac{h\bar{v}}{\nu} (1); \text{Nu} = \frac{h\alpha}{\lambda} (2); \text{Sto} = \frac{\nu\bar{v}}{h^2g} (3);$$

$$\text{Pe} = \frac{h\bar{v}}{a} (4); \text{Ra} = \frac{\partial\rho}{\partial\vartheta} \frac{g h^3 \Delta\vartheta}{\rho\nu a} (5)$$

$$\text{mit } a = \frac{\lambda}{c\rho} \text{ (Temperaturleitfähigkeit).}$$

Gleichung (1): Die Reynolds-Zahl gibt das Verhältnis der Trägheits- zu den Viskositätskräften an. Da im vorliegenden Fall extrem niedrige Geschwindigkeiten bei sehr hohen Viskositäten herrschen, kann eine absolut laminare Strömung vorausgesetzt werden. Daraus ist zu schließen, daß auch bei unterschiedlichen Reynolds-Zahlen in Hauptausführung und Modell keine grundsätzlichen Änderungen der Strömungsverhältnisse auftreten werden.

Gleichung (2): Eine genaue rechnerische Bestimmung der Nusselt-Zahl in der Hauptausführung ist nicht möglich. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist hier eine unbekannte Größe, die aus Leitungs-, Konvektions- und Strahlungsanteilen besteht [12]. Im Modell soll versucht werden, mit Hilfe der Randbedingungen (Heizung oder Kühlung der Badgrenzen) die mit den anderen Kennzahlen ermittelten Modelltemperaturfelder einzustellen. Damit ist eine experimentelle Annäherung der Nusselt-Zahl der Hauptausführung im Modell möglich, ohne sie explizit auszudrücken.

Gleichung (3): Die Stokes-Zahl ist ein Maß für die Strömung in einem offenen Gerinne unter Berücksichtigung der Viskositätskräfte in der Flüssigkeit. Sie wird hier zur Ermittlung der Modelltemperaturfelder benutzt, ebenso wie die Péclet-Zahl.

Gleichung (4): Die Péclet-Zahl berücksichtigt den gesamten Energietransport durch Leitung bei erzwungener Strömung. Sie entsteht aus dem Produkt Reynolds-Zahl mit der Prandtl-Zahl. Bei der Grünlasschmelze wird für die Wärmeleitfähigkeit λ eine von Trier [19] verwendete sogenannte „Strahlungsleitfähigkeit“ eingesetzt, die den Leitungs- und Strahlungsanteil beim Energieaustausch beinhaltet.

Gleichung (5): Wie schon erwähnt, ist in früheren Arbeiten [6 und 7] die Rayleigh-Zahl als maßgebende Größe für die Auftriebsströmungen bei freier Konvektion in der Schmelzwanne benutzt worden. Sie wird hier größenordnungsmäßig für Hauptausführung und Modell berechnet. Die Modelluntersuchungen sollen nachweisen, inwieweit die Konvektion im Vergleich zur Transportströmung im Speiserkanal eine Rolle spielt.

In den folgenden Ausführungen werden alle Größen, die sich auf die Hauptausführung (Grünglasspeiser) beziehen, mit dem Index „H“ und die Größen bezogen auf das Modell mit „M“ versehen.

4. Kriterien für den Modellbau

4.1. Modellflüssigkeiten und ihre Abhängigkeit vom Modellmaßstab

Der Verkleinerungsmaßstab für ein Modell ist aus bau- und meßtechnischen Gründen begrenzt. Im Speiserkanal ist die kritische Länge die Flüssigkeitsbadhöhe „h“. Um im Modell eindeutige Temperaturmessungen und Strömungsaufnahmen durchführen zu können, darf eine Mindestbadhöhe nicht wesentlich unterschritten werden. Aus diesen Gründen ist ein ähnlicher Maßstab (M = 1:20), wie er bei Safaieh [6] und Lennertz [7] gewählt wurde, in diesem Falle nicht möglich. Dagegen hat sich die in den genannten Arbeiten ausgeführte Modellgröße meßtechnisch sehr gut bewährt, so daß eine Modellbadtiefe von etwa $h_M = 30$ mm gefordert wurde. Dadurch ist der Maßstab von Modell zur Hauptausführung mit etwa M = 1:5 festgelegt. Die Auswahl geeigneter Modellflüssigkeiten ist sehr stark vom Modellmaßstab abhängig. Benutzt man die Péclet-Zahl und die Stokes-Zahl zur Ermittlung der Modelltemperaturfelder, so erhält man:

$$\bar{v}_H = \text{Sto}_H \frac{h_H^2 g}{\nu_H} \tag{6a}$$

$$\text{und } \bar{v}_H = \text{Pe}_H \frac{a_H}{h_H} \tag{6b}$$

Daraus folgt:

$$\nu_H = \left(\frac{\text{Sto}}{\text{Pe}} \right)_H \frac{h_H^3 g}{a_H} \tag{7}$$

$$\text{und analog } \nu_M = \left(\frac{\text{Sto}}{\text{Pe}} \right)_M \frac{h_M^3 g}{a_M} \tag{8}$$

Durch die Ähnlichkeitsbedingung zwischen Hauptausführung und Modell gilt:

$$\left(\frac{\text{Sto}}{\text{Pe}} \right)_H = \left(\frac{\text{Sto}}{\text{Pe}} \right)_M \tag{9}$$

Aus den Gleichungen (7) bis (9) ist zu erkennen, daß die Temperaturfelder des Modells mit denen der Hauptausführung über die Viskositäten der Glasschmelze und der Modellflüssigkeit gekoppelt sind. Die früher eingesetzte Modellflüssigkeit „Clophen A 60“ [6 und 7] ist für den vorliegenden Fall ungeeignet. Infolge der Temperaturtransformation würden im Modell nur Temperaturdifferenzen der Größenordnung von $1/10$ K auftreten.

Folgende Forderungen schränken die Eignung weiterer bekannter Modellflüssigkeiten [8, 10 und 18] ein:

1. sie muß, wie auch die Glasschmelze, das Verhalten einer Newtonschen Flüssigkeit besitzen;
2. es ist eine glasklare Beschaffenheit erforderlich, um einwandfreie Strömungsaufnahmen durchführen zu können;
3. sie muß eine kinematische Viskosität von $\nu = 300$ bis 1500 cm^2/s bei genügend großem Temperaturintervall aufweisen;
4. die Temperatur der unteren Viskositätsgrenze soll möglichst nicht über 100 °C liegen (bedingt durch den

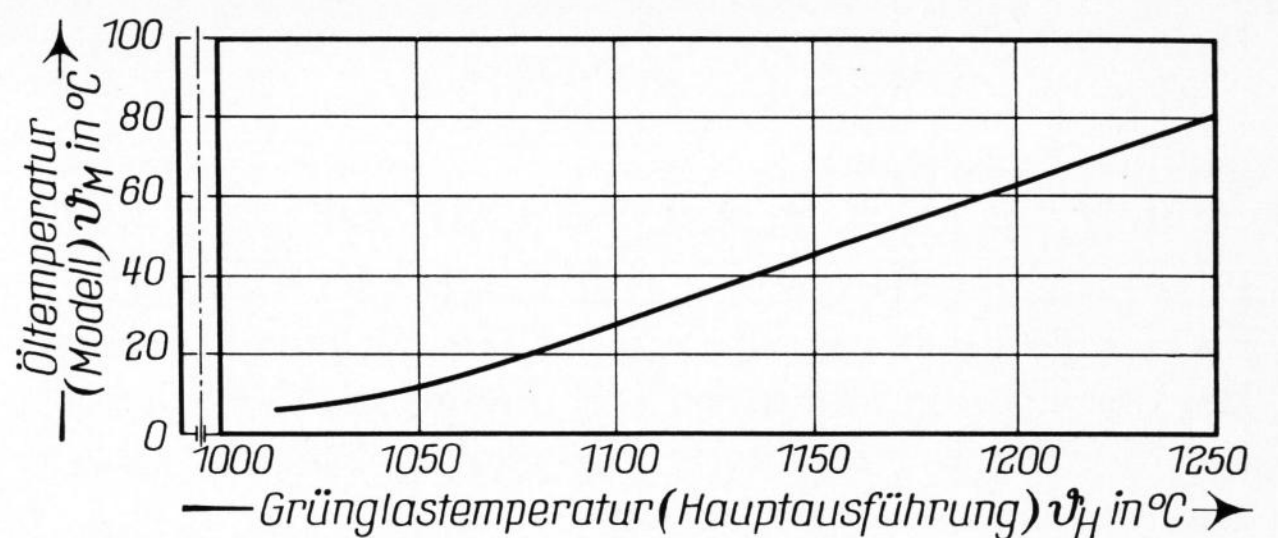


Bild 7. Modellflüssigkeitstemperatur (Siliconöl AK 100 000) in Abhängigkeit von der Grünglastemperatur bei einem Maßstab Modell zur Hauptausführung M = 1:4,5.

Einsatz von Modellwerkstoffen und die Verwendung von Wasser als Kühl- oder Heizmedium der Modellbadwände);

5. keine Veränderung der Stoffeigenschaften durch längere Temperaturbelastung oder Feuchtigkeitsaufnahme.

Die angeführten Forderungen erfüllte ein hochviskoses synthetisches Polysiloxan: Siliconöl AK 100 000 (Wacker Chemie, München).

Für dieses Öl wurden folgende Stoffwerte ermittelt (gültig für den Temperaturbereich $\vartheta = 10$ bis 90 °C):

Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W}/\text{cm K}$:

$$\lambda = - 1,2 \cdot 10^{-6} \vartheta + 1,662 \cdot 10^{-3};$$

spezifische Wärmekapazität c_p in $\text{J}/\text{g K}$:

$$c_p = 1,5 \cdot 10^{-3} \vartheta + 1,555;$$

Temperaturleitfähigkeit a in cm^2/s :

$$a = - 8,14 \cdot 10^{-7} \vartheta + 1,076 \cdot 10^{-3};$$

Dichte ρ in g/cm^3 :

$$\rho = - 8,5 \cdot 10^{-4} \vartheta + 0,993.$$

4.2. Modellmaßstab, Temperaturfelder und Durchsätze im Modell

Die Stokes- und Péclet-Zahlen der Hauptausführung wurden mit den Stoffwerten für Grünglas [6] berechnet. Bei einem Modellmaßstab von M = 1:4,5 und einer Verwendung der Gleichungen (7) bis (9) ergibt sich die Abhängigkeit der Modelltemperatur von der Grünglastemperatur in Bild 7. Die Asymmetrie der gemessenen Grünglastemperaturfelder wurde im Modell nicht berücksichtigt.

Aus der Péclet- oder der Stokes-Zahl wurden folgende Öldurchsätze für das Modell errechnet:

- a) 18 ml Siliconöl/min (entspricht 0,242 kg Glas/s),
 - b) 30 ml Siliconöl/min (entspricht 0,402 kg Glas/s),
 - c) 40 ml Siliconöl/min (entspricht 0,538 kg Glas/s).
- (Die Volumenströme des Siliconöles beziehen sich auf eine Raumtemperatur von 20 °C.)

4.3. Vergleich der Kennzahlen von Reynolds und Rayleigh in Hauptausführung und Modell

Die Reynolds- und Rayleigh-Zahlen können bei Verwendung von Pe und Sto zur Ermittlung der Modelltemperaturfelder und der Modelldurchsätze in Hauptausführung und Modell nicht eingehalten werden.

1. Die mittlere Reynolds-Zahl ist im Modell größer als im Grünglasspeiser. Die Werte, bezogen auf die berechneten mittleren Durchsatzgeschwindigkeiten, betragen beim

kleinsten Durchsatz:

$$\text{Re}_{H_{\min}} = 3 \cdot 10^{-5}; \text{Re}_{M_{\min}} = 1,5 \cdot 10^{-3};$$

größten Durchsatz:

$$\text{Re}_{H_{\max}} = 1,5 \cdot 10^{-4}; \text{Re}_{M_{\max}} = 1,25 \cdot 10^{-2}.$$

Dies bedeutet, daß im untersuchten Modell das Verhältnis der Trägheits- zu den Viskositätskräften zu groß ist. Bei der stabilen laminaren Strömung kann jedoch auch im Modellkanal qualitativ die gleiche Strömungsform wie im Glasspeiser angenommen werden.

2. Die Rayleigh-Zahl als Maß für die auftretende Konvektionsströmung kann ebenfalls nicht ganz eingehalten werden. Folgende mittlere Werte lassen sich für die Rayleigh-Zahl angeben:

$$\text{Ra}_{H_{1150\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,9 \cdot 10^2; \text{Ra}_{M_{50\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,3 \cdot 10^3.$$

Daraus ist zu schließen, daß die Auftriebskräfte im Modell, die eine Konvektion hervorrufen, etwas größer sind als im wirklichen Speiserkanal.

5. Literatur

- [1] Trier, W.: Zusammenhang zwischen Temperaturfeld und Strömungsfeld bei freier Konvektion in Glasschmelzen. *Glastechn. Ber.* **38** (1965) S. 282 – 292.
- [2] Czerny, M. und Genzel, L.: Über die Eindringtiefe räumlich diffuser Strahlung in Glas. *Glastechn. Ber.* **25** (1952) S. 134 – 139.
- [3] Trier, W.: Glasströmungen: Bedeutung und Meßmethoden. *Glastechn. Ber.* **33** (1960) S. 401 – 411.
- [4] Kattanek, S.; Gröger, R. und Bode, C.: Ähnlichkeitstheorie. Leipzig: VEB Dt. Verl. f. Grundstoffind. 1967.
- [5] Pawlowski, J.: Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1971. [Ref. *Glastechn. Ber.* **45** (1972) R72-1070.]
- [6] Safaieh, M.-R.: Glasströmungsuntersuchungen in einer Modellwanne. Teil 1 und 2. *Glastechn. Ber.* **41** (1968) S. 87 – 96, 129 – 137.
- [7] Lennertz, H.-E.: Glasströmungsuntersuchungen in einer Modellwanne unter besonderer Berücksichtigung der Transportströmung. Teil 1 und 2. *Glastechn. Ber.* **44** (1971) S. 141 – 151, 177 – 186.
- [8] Tober, H.: Konvektionsströmungen in elektrisch beheizten Wannen. Modellversuche. *Glastechn. Ber.* **45** (1972) S. 41 – 53.
- [9] Süsser, V.; Bostik, V. und Auerbeck, J.: Modelluntersuchungen an Glasschmelzwannen. (Orig. tschech.) Informativní přehled SVÚS (Staatl. Glasforschungsinstit. Hradec Králové, ČSSR) **12** (1970) Nr. 3/4. [Ref. *Glastechn. Ber.* **45** (1972) R72-1050.]
- [10] Nishioka, T.; Okano, K.; Okamura, T. u. a.: Flow pattern and temperature distribution of molten glass in a forehearth. *Rep. Res. Lab. Asahi Glass* **21** (1971) S. 1 – 17. [Ref. *Glastechn. Ber.* **46** (1973) 73R0663.]
- [11] Duffin, J. H.: Model of heat transfer in molten flowing glass. *Amer. ceram. Soc. Bull.* **49** (1970) S. 180 – 187. [Ref. *Glastechn. Ber.* **45** (1972) R72-0216.]
- [12] Braun-Angott, P.: Über den Energietransport in glasdurchströmten zylindrischen Kanälen. Techn. Hochschule Aachen, Diss. 1971. Auszugsweise veröffentlicht in: *Glastechn. Ber.* **45** (1972) S. 261 – 270.
- [13] Thate, H.: Möglichkeiten der Temperatur-Messung und Regelung an einem Speiser (Feeder) für Hohlglasmaschinen. Techn. Hochschule Karlsruhe, Dipl.-Arb. 1968.
- [14] Marchini, F.: Dimensionierung und Betrieb von Speiser und Vorherd. *Glastechn. Ber.* **36** (1963) S. 249 – 253.
- [15] Greschat, K.-H.: Tauchtemperaturmessungen im Glasbad eines Speiserkanals für Flaschenglas. Vortrag auf der 45. *Glastechn. Tagung* am 12. Mai 1971 in Bremen. [Ref. *Glastechn. Ber.* **44** (1971) R71-0783.]
- [16] Bernhauer, W.: Die Sekundärströmung im geraden offenen Gerinne. Technische Hochschule München, Dr. rer. nat.-Diss. 1969.
- [17] Obrowski, W.: Thermolemente und ihre Anwendung. *Elektr. Ausrüstung* H. 1, 1964, S. 28 – 32.
- [18] Staněk, J.; Sašek, L. und Meissnerová, H.: Flow of glass in furnaces heated by electricity. *Glass Technol.* **10** (1969) S. 43 – 49. [Ref. *Glastechn. Ber.* **43** (1970) S. 154.]
- [19] Trier, W. und Straub, F.: Wärmeabgabe des Glases in der Vorform. *Glastechn. Ber.* **36** (1963) S. 253 – 258.

75R0251