

der Wärmetransport durch die Walze hindurch, der den Wärmeaustausch beeinflusst, konnte jedoch leider bei diesen Versuchen nicht erfaßt werden, was die als aus der Reihe fallend betrachteten Werte beweisen. Daß die genaue Bestimmung der Wärmeübertragung sehr viel Schwierigkeiten bereitet, zeigte sich bei der Auswertung der Ergebnisse. Neuere Veröffentlichungen von TRIER und STAATSMANN und TRIER und BEINE [6] haben in dieser Richtung einen sehr wichtigen Beitrag zum

besseren Verständnis der Vorgänge und Probleme beim Walzen von Glas geliefert.

Der Autor dankt Herrn DENERI, dem technischen Direktor des Fachglassektors bei der Société Boussois Souchon, Neuvesel, für die Freigabe dieser Ergebnisse zur Veröffentlichung. Auch Herrn Dr. TRIER, dem Geschäftsführer von HVG und DGG, sei für die Möglichkeit zur Veröffentlichung dieser Arbeit und Herrn STAATSMANN für die Übersetzung und Bearbeitung des Manuskriptes gedankt.

## 6. Literatur

- [1] McADAMS, W. H.: Heat transmission. New York, Toronto, London: McGraw Hill 1954. [Ref. Glastechn. Ber. 32 (1959) S. 213.]
- [2] FABRY, CH.: Propagation de la chaleur. Paris: Colin 1949.
- [3] BIARD, E. Technique de l'utilisation du gaz. Paris: Sennac 1950.
- [4] LONG, B.: Propriétés physiques et fusion du verre. Paris: Dunod 1933. [Ref. Glastechn. Ber. 11 (1933) S. 355.]
- [5] MOREY, G. W.: The properties of glass. New York: Reinhold 1954. [Ref. Glastechn. Ber. 29 (1956) S. 104.]
- [6] TRIER, W. und BEINE, H.: Temperaturmessung in der Oberwalze einer Gußglasmaschine. Glastechn. Ber. 38 (1965) S. 433—437.  
TRIER, W. und STAATSMANN, H.: Berechnung der Temperaturverteilung und der Wärmeströme in der Oberwalze einer Gußglasmaschine. Glastechn. Ber. 38 (1965) S. 438—450. (47316)

DK 666.1.031.13:532.5:666.1.031.2.001.57:66.069.82

## Glasströmungsuntersuchungen in einer Modellwanne\*)

### Teil II: Untersuchung der rein thermisch bedingten Konvektionsströmung und ihre Beeinflussung durch Lufteinblasen (Bubbling)

VON MOHAMMAD-REZA SAFAIEH, Aachen

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

(Eingegangen am 19. Januar 1968)

In einer Modellwanne wurde im Maßstab 1:20 die in einer Glasschmelzwanne auftretenden Konvektionsströmungen nachgeahmt, und es wurde die Strömungsbildung bei Überlagerung von thermisch bedingten und durch Einblasen von Luft (Bubbling) erzeugten mechanischen Strömungen untersucht. Die Lage des thermischen und des mechanischen Quellpunktes wurde gegeneinander verschoben und der Einfluß auf die Ausbildung der Strömungswalzen diskutiert.

Entwicklung und Aufbau des Modells wurde in Teil I dieser Arbeit beschrieben und die Übereinstimmung der Ergebnisse, die am Modell erhalten wurden, mit einigen theoretisch bestimmten Strömungsfeldern nachgewiesen.

In den letzten Jahren wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem Gase oder Flüssigkeiten in die Glasschmelze eingeblasen werden (Bubbling), um mit verhältnismäßig geringem Aufwand die Leistungsfähigkeit der Wannen zu steigern. Das Verfahren beruht im wesentlichen darauf, die Strömung der Glasschmelze in der Wanne zu beeinflussen und damit die Läuterung und Homogenisierung des Glases zu beschleunigen. Obwohl in der letzten Zeit eine Reihe von Arbeiten, die sich mit der Untersuchung der Strömungen in Glasschmelzwannen befassen, erschienen sind, ist die Frage der Beeinflussung der Glasströmung durch Einblasen von Luft durch den Wannenboden noch nicht erschöpfend behandelt worden.

Es war daher das Ziel dieser Arbeit, in einer kleinen, durchsichtigen Modellwanne, die mit einem als Modellflüssigkeit geeigneten Kunststoff (Clophen A 60) gefüllt war, die Wirkung des Einblasens von Luft auf den Strömungskreislauf zu untersuchen. Die Überlegungen bei der Ähnlichkeitsbetrachtung von Modellflüssigkeit und Glasschmelze und die Festlegung der dimensionslosen Kennzahlen sowie Aufbau und Entwicklung des Modells wurden im Teil I dieser Arbeit [2] ausführlich dargelegt. Bei den Ähnlichkeitsüberlegungen werden für die weiteren Untersuchungen freie Konvektionsvorgänge, Auftriebswirkungen in Strömungsmitteln und Wärmeleitung in strömenden Mitteln ebenfalls in Form von dimensionslosen Kennzahlen berücksichtigt.

### 1. Temperaturfeld im Modell

Zur Untersuchung der Strömung in einem Modell muß zunächst die Temperaturverteilung in einer Glasschmelze bekannt sein. Die in der Literatur vorhandenen Angaben über experimentell bestimmte Temperaturfelder in Glasschmelzen sind leider nicht vollständig, und die Daten hängen stark von der Bauart der Glasschmelzwanne ab, in der die Untersuchungen durchgeführt wurden. Für die in dieser Arbeit beschriebene Nachahmung der dreidimensionalen thermisch bedingten Konvektionsströmung und der durch Einblasen von Luft in die Schmelze entstehenden mechanischen und konvektiven Strömungen sind die von TRIER [1] gemessenen Temperaturen in einer Wanne mit grünem Flaschenglas zugrundegelegt worden. Eine genaue Übertragung dieser Temperaturwerte auf das Modell ist für die Nachahmung der rein thermisch bedingten Konvektionsströmung nicht zweckmäßig, da bei TRIER [1] der Versuchswanne kontinuierlich Glas entnommen und durch das nachfolgende kalte Gemenge die Temperaturverteilung in der Glasschmelze beeinflusst wurde. Die vorliegenden Untersuchungen am Modell wurden jedoch ohne Berücksichtigung der Glasentnahme durchgeführt,

\*) Teil I: Entwicklung und Aufbau des Strömungsmodells, Nachprüfung zweidimensional berechneter Strömungsfelder im Modell. Glastechn. Ber. 41 (1968) H. 3, S. 87—96.

und es wurde eine der Konvektionsströmung entsprechende optimale Übertragung der Temperaturwerte angestrebt.

Die durch die Brenner bedingten Temperaturunterschiede in der Glasschmelze an den Ofenwänden wurden im Modell vernachlässigt, es wurde eine gleichmäßige Temperaturverteilung der ganzen Schmelze, auch in der Nähe der Wand, angenommen. Die Temperaturen im Modell werden jeweils in der Mitte der ganzen und in der Mitte der halben Wannenzlänge sowie an der Wand für vier gleiche Abstände ausgerechnet.

## 2. Versuchsdurchführung

### 2.1. Blasenbildung in der Modellflüssigkeit durch Einblasen von Luft

Es wurde das Luftblasenbild in Kunststoff Clophen A 60 als Modellflüssigkeit untersucht, wobei die Anzahl der an der Düse entstehenden Luftblasen, die Geschwindigkeit und die Größe der aufsteigenden Blasen in Abhängigkeit von der Höhe der Modellflüssigkeit, dem Düsendurchmesser, der Temperatur der Modellflüssigkeit und der Lufttemperatur bestimmt wurden. Die Blasenbildung wurde zuerst bei einer Höhe der Modellflüssigkeit von 500 mm untersucht. Die Anzahl der Blasen wurde durch Zählen und die Blasengeschwindigkeit durch Messen der Zeit, die die Blasen zum Durchlaufen einer bestimmten markierten Strecke benötigen, bestimmt. Zum Vergleich wurden die Messungen bei einer Höhe der Modellflüssigkeit von 250 mm wiederholt. Bei dieser Höhe wurde zur Ermittlung der Blasengröße jede Einstellung fotografiert, und es wurden aus den Aufnahmen Blasenabstand, Blasenvereinigung und Anzahl der Blasen ermittelt.

Die Modellwanne hat eine Flüssigkeitshöhe von 35 mm, zum Vergleich wurde die Blasenbildung auch in einem Glasrohr bei einer Höhe der Modellflüssigkeit von 35 mm beobachtet, wobei im Glasrohr von oben nach unten ein Temperaturgefälle von 70 auf 35 °C eingestellt wurde.

Die Luftblasen wurden durch acht auswechselbare Düsen mit folgenden Durchmessern erzeugt: 0,12; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0 mm. Die Untersuchungen wurden auch bei verschiedenen Viskositäten der Modellflüssigkeit, d. h. bei verschiedenen Temperaturen, durchgeführt, wobei zur Temperatureinstellung 18 Infrarotstrahler benutzt wurden.

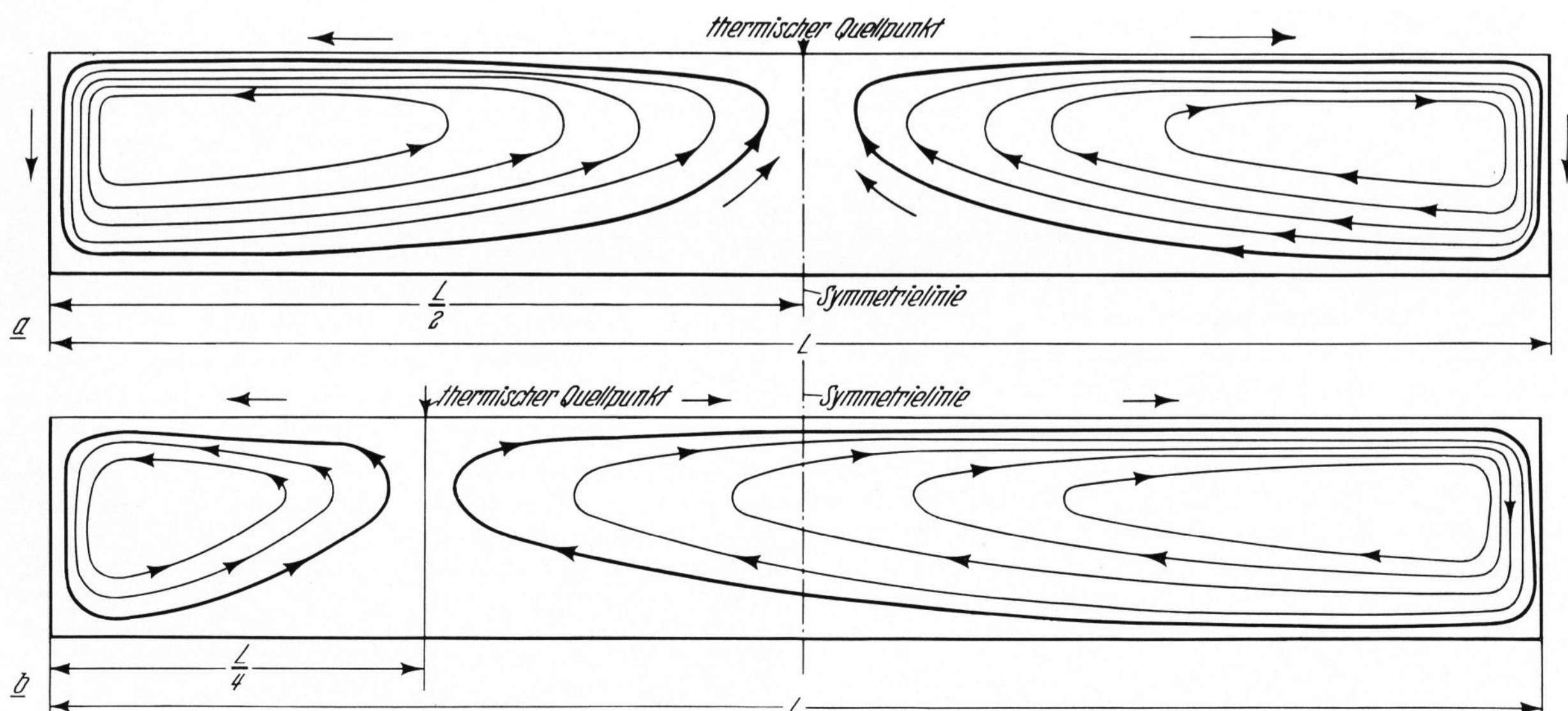
### 2.2. Thermisch und mechanisch bedingte Konvektionsströmung

Im folgenden sollen nun die dreidimensionalen Strömungen im Modell, entsprechend den in Glasschmelzwannen auftretenden Strömungen, behandelt werden. Es wurden zunächst die rein thermisch bedingte Konvektionsströmung und dann die Überlagerung der thermischen und mechanischen Strömungen untersucht.

Durch Regelung der Heizleistung der Strahler und der Wassertemperatur im Bodenkanal (31,5 °C) wurde der Temperaturgradient der Modellflüssigkeit entsprechend den am Prototyp experimentell ermittelten Temperaturwerten eingestellt, und es wurde der Einfluß der Lage des thermischen Quellpunktes auf die Konvektionsströmung ohne Einblasen von Luft untersucht.

Die mechanische Strömung (mechanischer Quellpunkt) wurde in diesem Versuch durch acht Blasdüsen mit einem Durchmesser von jeweils 0,12 mm, die in gleichen Abständen quer über die Wannenzbreite in neun verschiedenen Lagen angebracht werden konnten, erzeugt, wobei der Luftdruck unmittelbar vor jeder Düse 0,1 atü betrug. Die Druckanzeige wurde stets nach dem jeweiligen Barometerstand korrigiert.

In weiteren umfangreichen Versuchen wurde die Ausbildung der Strömung bei Überlagerung der rein thermisch bedingten und der mechanischen Konvektionsströmung untersucht. Die Lage des thermischen und mechanischen Quellpunktes wurde dabei gegeneinander verschoben. Die Ausbildung der Strömungswalzen bei Zusammenfallen und Verschiebung beider Quellpunkte war ebenfalls Gegenstand eingehender Unter-



Bilder 1 a und b. Stromlinienbild bei rein thermischer Konvektion, a) thermischer Quellpunkt in der Mitte der Wanne, b) thermischer Quellpunkt um  $\frac{1}{4}$  der Wannenlänge verschoben.



2a)

suchungen, die Ergebnisse wurden auch hier durch Wiederholen des Versuches auf ihre Reproduzierbarkeit überprüft.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Untersuchung der rein thermisch bedingten Konvektionsströmung

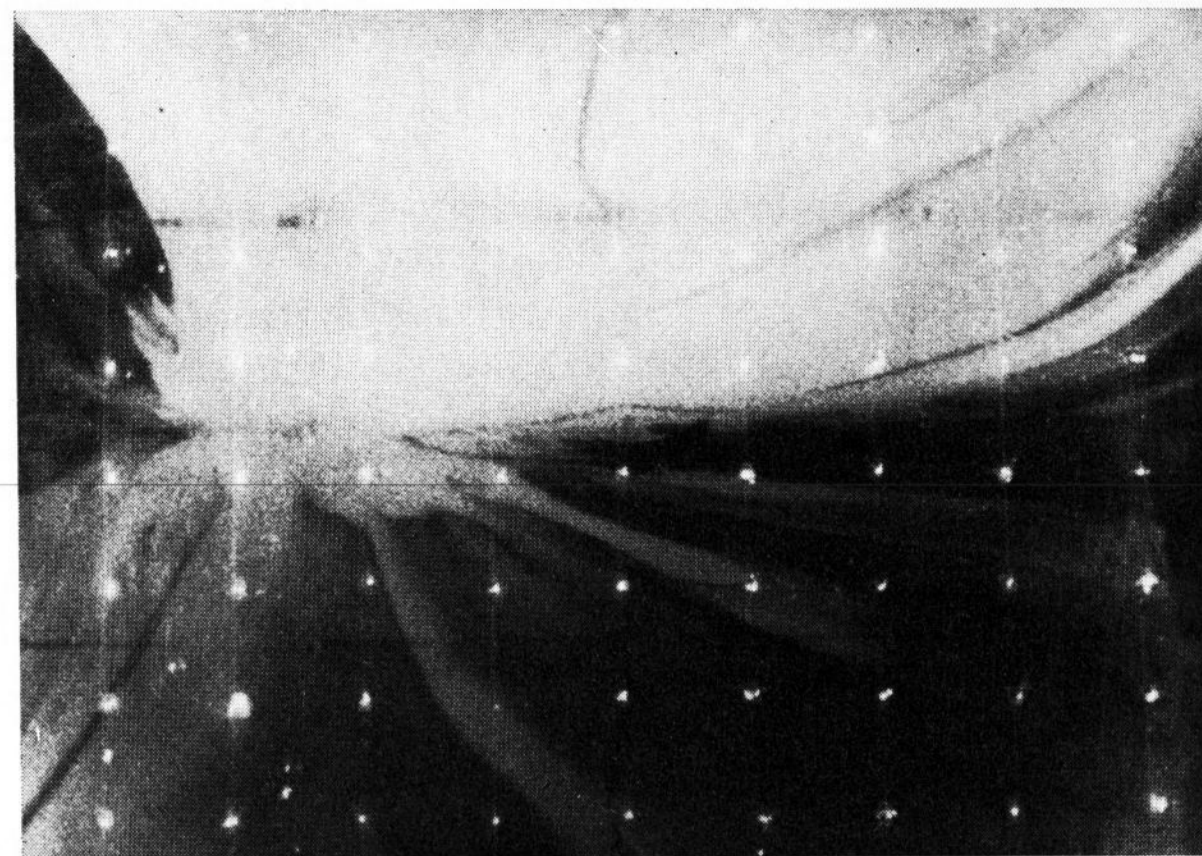
Zur Untersuchung der rein thermisch bedingten Konvektionsströmung ohne mechanische Beeinflussung wurde der thermische Quellpunkt in der Mitte der Wanne und in der Mitte der halben Wannenzlänge eingestellt. Die sich hier ausbildenden Strömungswalzen sind in den Bildern 1 und 2 zu erkennen. Bei Bild 1 wurde der Maßstab für die Badtiefe verdoppelt, um den Strömungsverlauf übersichtlich darstellen zu können. Aus den Bildern sieht man, daß die Modellflüssigkeit bzw. Schmelze mit zunehmender Geschwindigkeit zu den Seitenwänden abfließt und nach Erreichen der Seitenwand mit abnehmender Geschwindigkeit zum Quellpunkt zurückfließt. Diese Art der Strömung ist auch in Glasschmelzwannen unmittelbar beobachtet worden. Die Schichtdicke der Oberflächenströmung beträgt bei einer Badtiefe von etwa 70 cm ungefähr 23 cm.

Der Mittelpunkt der Strömungswalzen liegt in der Nähe der Wand, etwa 23 bis 25 cm unterhalb der Oberfläche. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Schichtdicke der Oberflächenströmung ab. Auf Grund der relativ geringen Wärmeübertragung und der schnellen Abkühlung der Schmelze durch die Wand fallen in unmittelbarer Wandnähe die Stromlinien sehr dicht zusammen.

In Bild 3 ist das Fortschreiten der Strömungsfront auf beiden Seiten des thermischen Quellpunktes aufgetragen. Aus der Zeit im Modell läßt sich nach der folgenden Beziehung die Zeit für die Großausführung in einer Glasschmelzwanne berechnen:

$$t_p = t_m \cdot 20^{1/2}$$

(1)



2b)

Bilder 2 a und b. Stromlinien bei rein thermischer Konvektion, a) Aufnahme nach 3 h, b) Aufnahme nach 16,5 h mit Hilfe eines Spiegels, von unten durch den Wannenzboden.

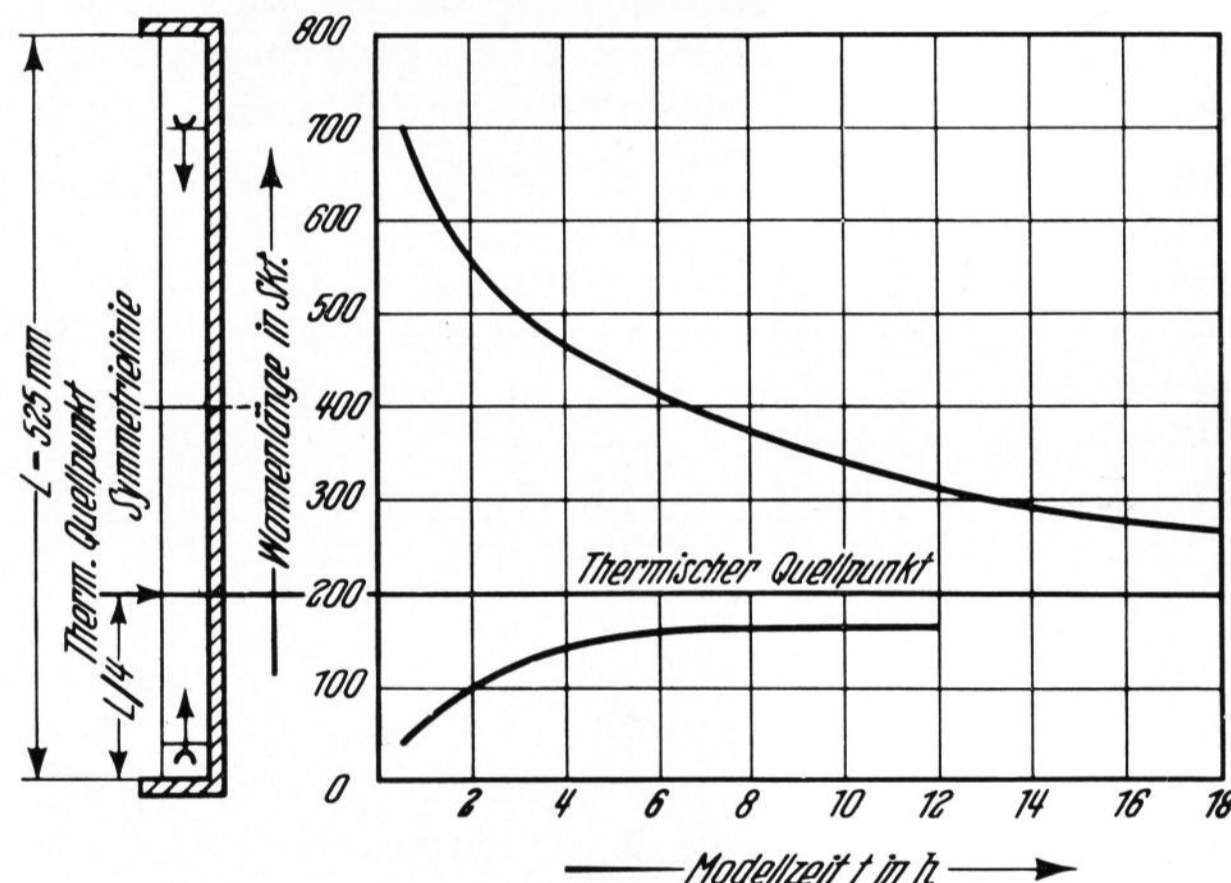
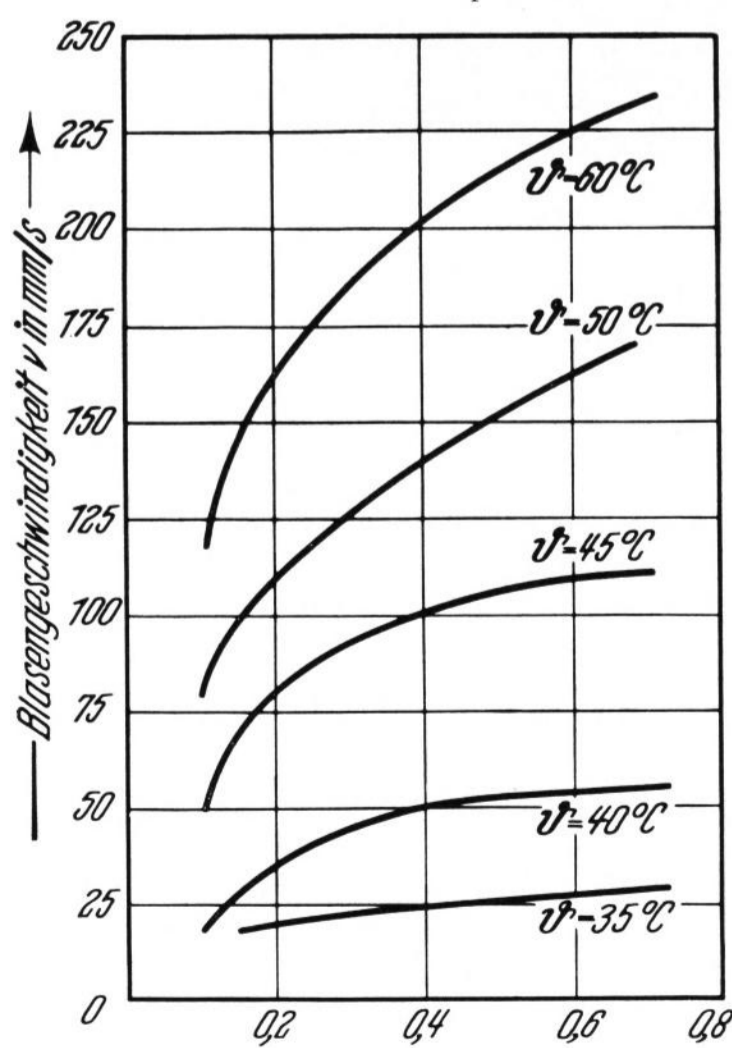
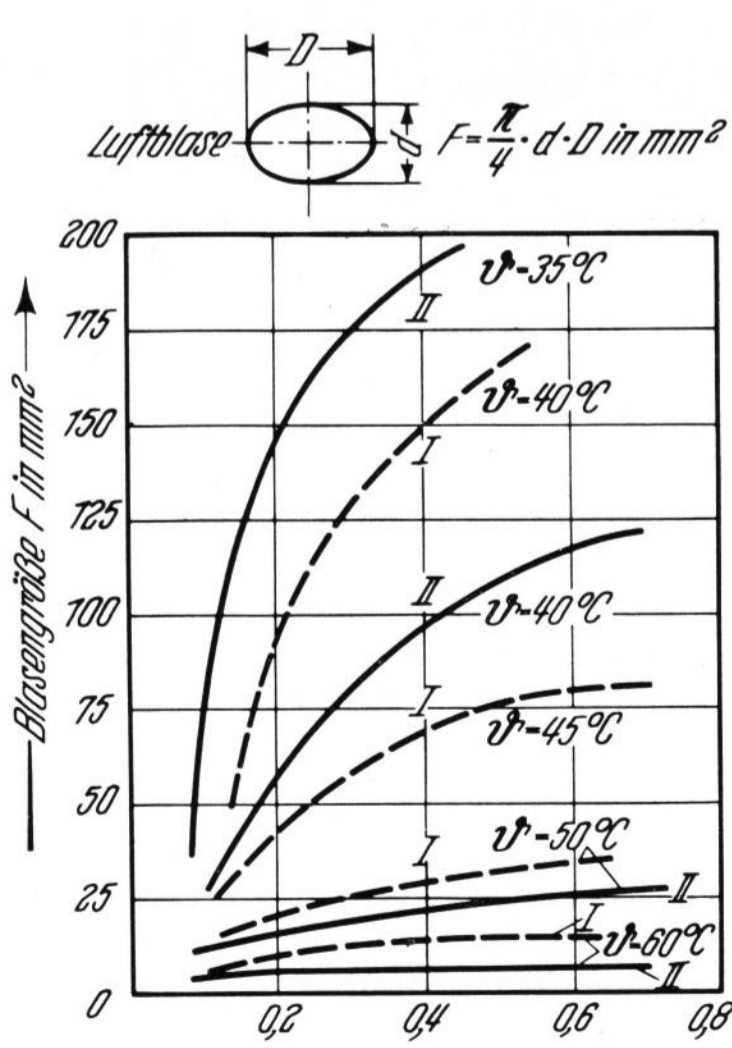


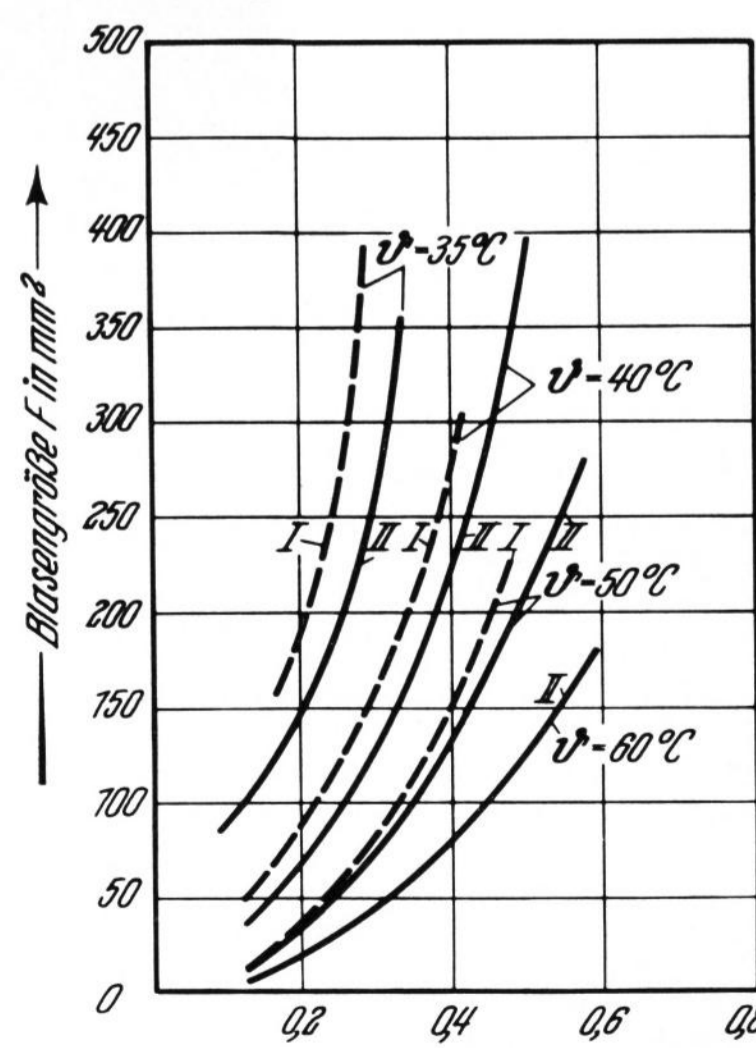
Bild 3. Fortschreiten der Strömungsfront beiderseits des thermischen Quellpunktes.



4) — Luftdruck p in atü —>



5) — Luftdruck p in atü —>



6) — Düsendurchmesser D in mm —>

Bild 4. Blasengeschwindigkeit bei einer Höhe der Modellflüssigkeit von 500 mm und einem Düsendurchmesser von 0,12 mm.

Bild 5. Blasengröße bei einem Düsendurchmesser von 0,12 mm. Kurven I: Flüssigkeitshöhe 35 mm, Kurven II: Flüssigkeitshöhe 250 mm.

Bild 6. Blasengröße bei einem Luftdruck von 0,1 atü. Kurven I: Flüssigkeitshöhe 35 mm, Kurven II: Flüssigkeitshöhe 250 mm.

### 3.2. Blasenbildung in der Modellflüssigkeit

Die Abhängigkeit der Blasenbildung und -größe wurde von der Temperatur der Modellflüssigkeit, dem Düsendurchmesser, dem Druck der eingeblasenen Luft und von der Flüssigkeitshöhe eingehend untersucht. Es wurde festgestellt, daß mit steigendem Luftdruck und wachsendem Düsendurchmesser die Blasenanzahl, die Bildungsgeschwindigkeit der Blasen und die Blasengröße zunimmt. Eine Erhöhung der Temperatur der Modellflüssigkeit bewirkte eine Abnahme der Blasengröße, die Anzahl der Blasen nahm jedoch zu. Erhöhte man den Druck der eingeblasenen Luft, so nahm die Geschwindigkeit der aufsteigenden Blasen bei einem bestimmten Düsendurchmesser und konstanter Temperatur ab. Bild 4 zeigt die Abhängigkeit der Blasengeschwindigkeit vom Luftdruck bei einem Düsendurchmesser von 0,12 mm.

Außerdem wurde die Abhängigkeit der Blasengröße — d. h. die Projektionsfläche der Blasen auf den fotografischen Aufnahmen — für verschiedene Düsendurchmesser und verschiedene Temperaturen vom Druck der eingeblasenen Luft bestimmt. Die Zunahme der Blasengröße für einen bestimmten Düsendurchmesser und bei konstanter Temperatur wird mit ansteigendem Druck geringer. Bei abnehmender Temperatur werden die Blasen bei einem konstanten Düsendurchmesser größer, während mit anwachsendem Düsendurchmesser und konstanter Temperatur auch eine Zunahme der Blasengröße zu sehen ist. In den Bildern 5 und 6 ist die Abhängigkeit der Blasengröße vom Luftdruck und vom Düsendurchmesser bei einer Flüssigkeitshöhe von 35 und 250 mm dargestellt. Ein Vergleich der Blasengröße bei diesen Flüssigkeitshöhen zeigt, daß bei 35 mm Flüssigkeitshöhe die Blasen größer sind als bei 250 mm.

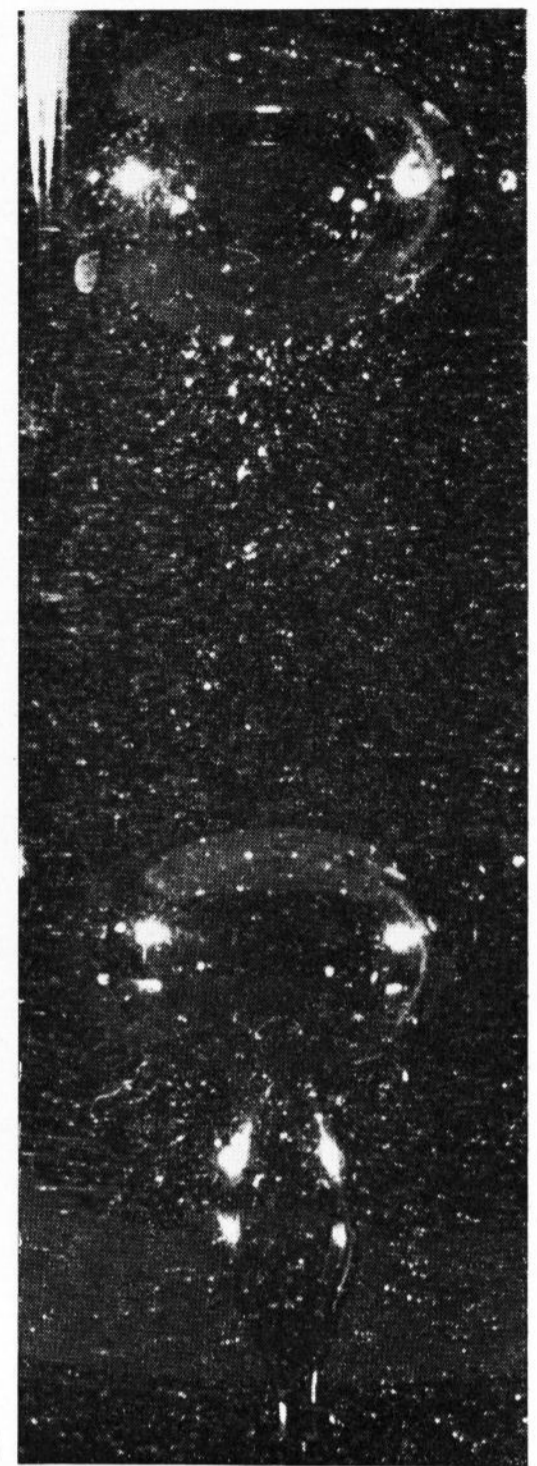
Die Temperatur in der Flüssigkeit konnte auf  $\pm 1$  grad genau eingestellt werden. Die Blasen entstehen unmittelbar nach der Düse pilzförmig, entwickeln sich aber dann meistens zu Kugeln oder Ellipsoiden (Bild 7). Häufig vereinigen sich die Blasen direkt hinter den Düsen, was auf einen ungleichmäßigen Entstehungsvorgang zurückzuführen ist, wobei Temperatur- und damit auch Viskositätsschwankungen hinter der Düse eine gleichmäßige Luftzufuhr verhindern (Bild 8). Bei niedrigen Temperaturen und großen Düsendurchmessern wurde die Blasenbildung ungleichmäßiger, es bildete sich oft eine kleinere Zwischenblase, die jeweils direkt nach einer normalen Blase entstand und von dieser aufgesogen wurde. Dadurch entstand eine neue Blase, der wiederum eine kleinere Zwischenblase folgte. Die Blasen, die sich direkt hinter den Düsen vereinigten, waren größer als die anderen Blasen, erreichten dadurch eine größere Geschwindigkeit und holten die anderen Blasen ein, um sich dann mit ihnen zu vereinigen. Der neue Blasenkomplex war noch größer und schneller. Der Vorgang wiederholte sich. Bei höheren Drücken und größeren Durchmessern entstanden während des Platzens der Blasen sehr kleine sekundäre Blasen, die in die Schmelze zurückflossen. Daher sollte vor dem Einblasen von Luft in eine Glasschmelze sorgfältig darauf geachtet werden, daß der richtige Düsendurchmesser verwendet und der Luftdruck genau eingestellt wird.

Aus den Untersuchungen ergab sich, daß für eine einwandfreie Einführung der Blasenketten in die Modellflüssigkeit ein Düsendurchmesser von 0,12 mm und ein Luftdruck von 0,1 atü zweckmäßig war.



Bild 7. Luftblasenbildung in der Modellflüssigkeit im Glasrohr.

Temperaturgefälle 70 bis 35 °C, Flüssigkeitshöhe 35 mm, Luftdruck 0,11 atü, Düsendurchmesser 0,12 mm.



8)

Bild 8. Luftblasenbildung in der Modellflüssigkeit im Glasrohr.

Temperatur 35 °C, Flüssigkeitshöhe 250 mm, Luftdruck 0,34 atü, Düsendurchmesser 0,6 mm.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können bei Anwendung in Glasschmelzwannen nur qualitativ und nicht quantitativ gewertet werden. Die Auswahl der Düsen und des Luftdruckes hängen von der Bauart der Wanne, den jeweiligen Betriebsbedingungen und von der Art des zu erschmelzenden Glases ab.

### 3.3. Überlagerung von thermischer und mechanischer Strömung

Zur Untersuchung der Beeinflussung der thermischen durch die mechanische Strömung wurde eine Blasenkette aus acht Düsen verwendet. Die Lage des mechanischen und des thermischen Quellpunktes wurde gegeneinander verschoben und die überlagerten Strömungen auf ihre Struktur untersucht.

#### 3.3.1. Zusammenfallen von mechanischem und thermischem Quellpunkt

##### 3.3.1.1. Strömungsbildung allein durch Einblasen von Luft

Bei einem Düsendurchmesser von 0,12 mm, einem Luftdruck von 0,1 atü und einem Temperaturgradienten von 67 grad haben die Blasen einen Durchmesser von etwa 10 mm. Die Blasen bewegen sich vom Boden der Wanne zur Oberfläche, wobei sich um die Blasen die Schmelze aufwärts bewegt, da sie durch die Blasenbewegung mitgerissen wird. Durch diese Aufwärtsbewegung bilden sich zunächst schnell rotierende Strömungswalzen unmittelbar an jeder Düse (Bild 9). Diese Walzen bringen die kältere Schmelze aus den unteren und mittleren Bereichen an die Oberfläche. Die Rotationsströmung, die durch die einzelnen Düsen hervorgerufen wird, wirkt wie eine Art Grenzschicht, die ein

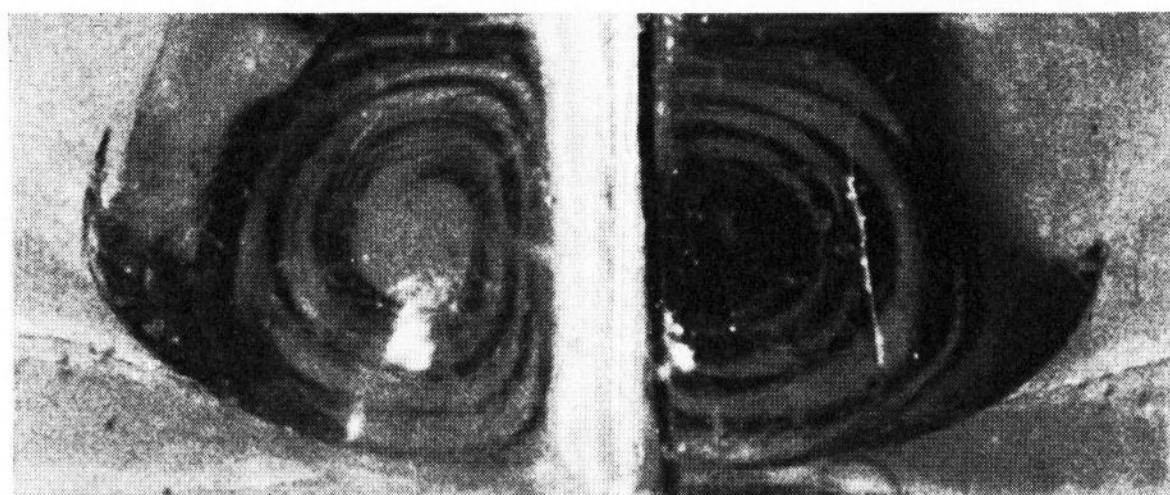


Bild 9. Strömungswalzen nach 40 s.

direktes Überfließen des mechanischen Quellpunktes durch oberflächennahe Schmelze verhindert. Diese Grenzschicht ist in Bild 10, das schräg zur Badoberfläche aufgenommen wurde, deutlich zu erkennen. Bild 10 gibt sehr gut die Ausbildung, das Aufsteigen und das Platzen einer Blase wieder.

Durch die Strömungswalzen wird eine zusätzliche Durchmischung der Schmelze erzielt, wodurch die Homogenisierung und die Läuterung des Glases beschleunigt wird. Durch den Temperatenausgleich in dieser Zone wird die Temperatur in den tieferen Schichten erhöht, und die Temperatur der Schmelze stieg daher in der Nähe des Bodens von 1040 auf 1200 °C. Die Strömungswalzen erstrecken sich über 14% des gesamten Wanneninhaltes.

Die schnell rotierende Strömung um die Blasenketten erzeugt im angrenzenden Bereich durch die Zähigkeitskräfte zwei weitere zirkulierende Strömungen mit umgekehrter Drehrichtung. Diese Strömung wird im folgenden Abschnitt ausführlich behandelt. Je nach Lage der Blasenketten betrug die an einer Düse entstandene Blasenanzahl zwischen 45 und 55/min.

### 3.3.1.2. Überlagerung von thermischer und mechanischer Strömung

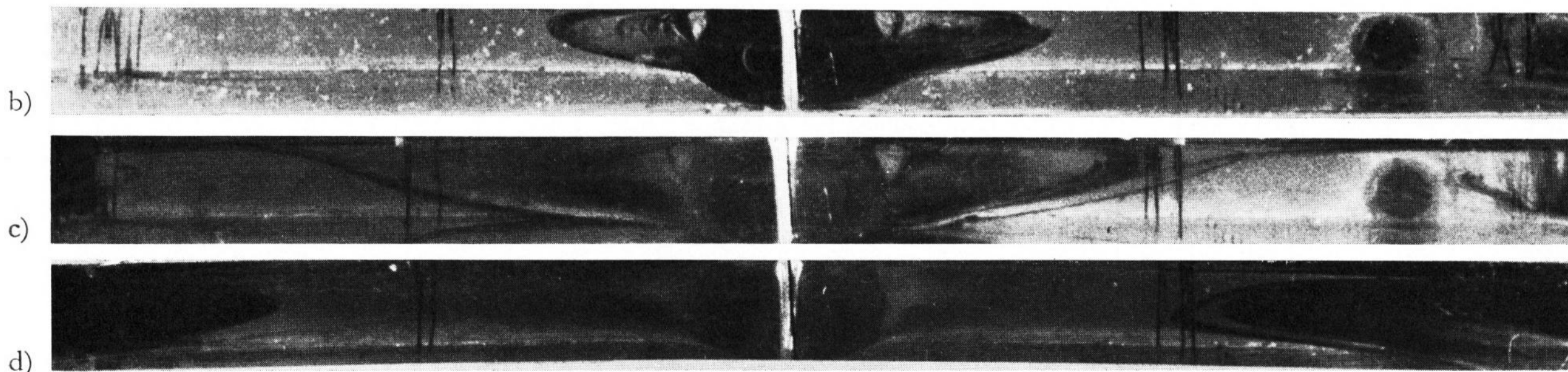
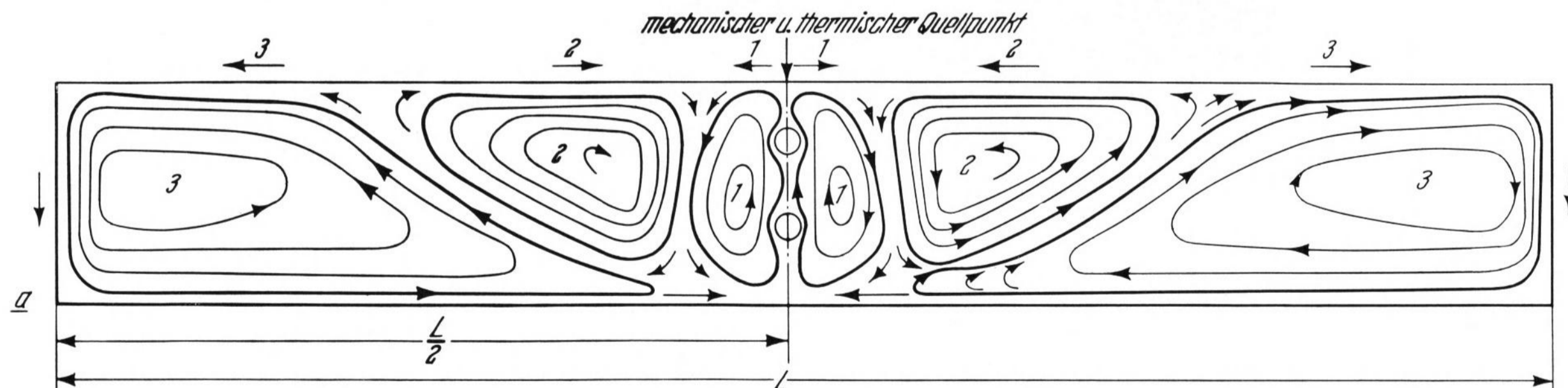
Bild 11 zeigt die Überlagerung von thermischer und mechanischer Strömung, wobei thermischer und mechanischer Quellpunkt zusammenfallen. Die durch das

Aufsteigen der Blasen bewirkten Strömungswalzen sind mit ①, die sich an die Strömungswalzen anschließenden Zirkulationsströmungen, die durch die Zähigkeitskräfte in der Schmelze verursacht werden, sind mit ② gekennzeichnet. Die Strömung ② fließt an der Oberfläche in entgegengesetzter Richtung der Konvektionsströmung zum mechanischen Quellpunkt, wobei die Schichtdicke der Strömung zunimmt. Bild 12 zeigt die Veränderung der Strömungsschichtdicke an der Oberfläche in Abhängigkeit von der Zeit und das Fortschreiten der Nebenströmungsfront in Kurve 2.

Die Strömungswalzen ① und die zirkulierenden Nebenströmungen ② mischen sich an der Oberfläche in ihrer Grenzzone. In der Nähe des Wannensbodens teilt sich die Strömung, wobei die eine Strömung um die



Bild 10. Bildung und Vereinigung von Strömungen in unmittelbarer Nähe der Blasenketten.



Bilder 11 a bis d. Überlagerung von thermischer und mechanischer Strömung (thermischer und mechanischer Quellpunkt fallen zusammen),

a) Stromlinienbild, b) Aufnahme nach 14 min, c) Aufnahme nach 2 h, 38 min, d) Aufnahme nach 5 h.

1 = Strömungswalzen, 2 = zirkulierende Nebenströmungen, 3 = thermische Konvektionsströmungen.

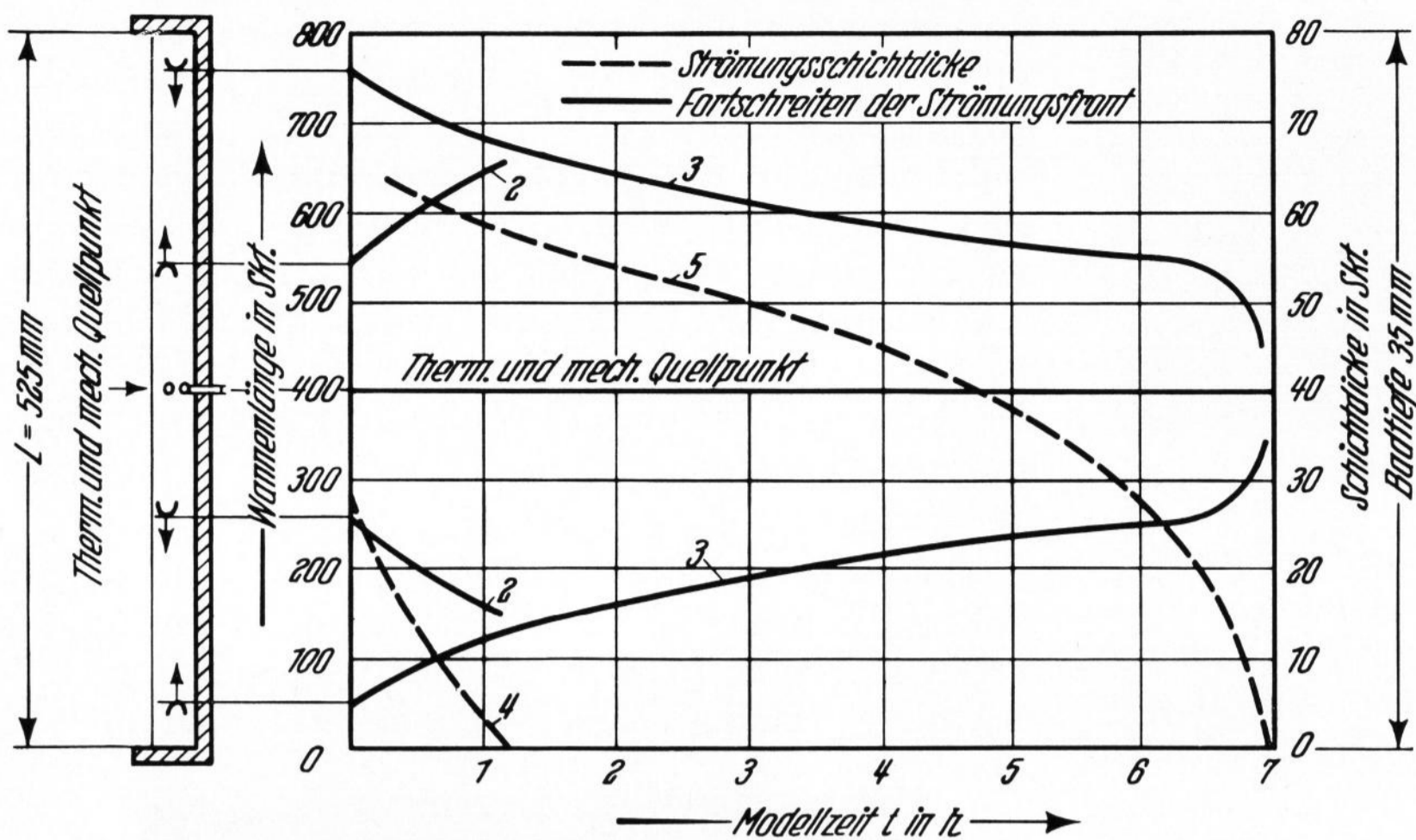


Bild 12. Fortschreiten der Strömungsfront und Abnahme der Schichtdicke.

Düsen herum fließt und die andere Strömung wieder in die zirkulierende Nebenströmung gelangt. In Bild 11 b sind die Strömungswalzen ① und die Nebenströmungen ② durch Anfärben der Modellflüssigkeit deutlich zu erkennen. Der im Modell benötigten Zeit von 14,0 min entsprechen im Prototyp 62,3 min.

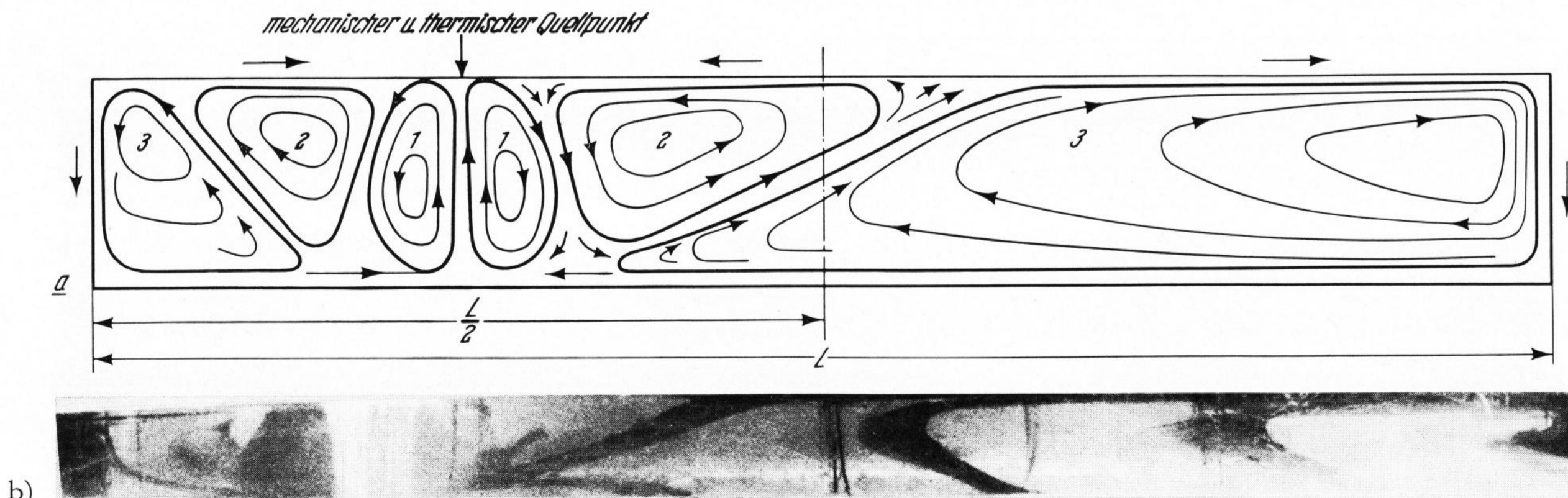
Bei der Überlagerung von thermischer und mechanischer Strömung werden die rein thermisch bedingten Strömungen durch die mechanischen Strömungen abgedrängt, da die mechanischen Kräfte im Vergleich zu den thermischen verhältnismäßig groß sind. Der Bereich der Konvektionsströmungen wird somit eingeeengt. In der Nähe der Wand bleibt der Charakter der reinen Konvektionsströmung erhalten. Die Strömungsfront wird zur Mitte zu nach unten gedrängt. Gleichzeitig nimmt die Schichtdicke der zirkulierenden Nebenströmung zu. Die Bilder 11c und d zeigen die Konvektionsströmungen und die durch Überlagerung entstandenen Strömungen. Durch den relativ starken Sog der Blasdüsen gelangt ein geringer Teil der konvektiven Strömung in die durch die Blaskette erzeugten Strömungswalzen. Die gleiche Menge kehrt aus der Nebenströmung über die angrenzende Schicht in die Konvektionsströmung zurück.

Die in der Nähe des Wannensbodens befindliche Strömungsschicht nimmt in ihrer Dicke durch die zu den Seitenwänden abfließende Schmelze in Richtung Quellpunkt ab, was in Bild 12 in den Kurven 5 und 3 dargestellt ist. Der Vergleich des Verlaufes der Kurven 2

und 3 zeigt deutlich, daß die thermische Konvektionsströmung wesentlich langsamer fließt als die mechanische Konvektionsströmung. Im Modell sind etwa 80 min erforderlich, um die zirkulierenden Nebenströmungen durch Farbspuren voll sichtbar zu machen, für die Sichtbarmachung der konvektiven Strömungen dagegen etwa 7 h. Aus dem Verlauf von Kurve 5 geht hervor, daß die Schichtdicke der konvektiven Strömung von der Wand zum Quellpunkt mit Annäherung an den Quellpunkt immer stärker abnimmt. Ähnliches gilt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Strömungsfront.

Die Ausbildung der konvektiven Strömung ist darauf zurückzuführen, daß die mechanischen Kräfte der Nebenströmungen in Richtung der Beckenwände abnehmen und schließlich kleiner als die durch die Temperaturdifferenz in der Wanne verursachten Konvektionsströmung werden. Bei rein thermisch bedingten Konvektionsströmungen verlaufen die Stromlinien vom thermischen Quellpunkt aus sternförmig zu den Wänden, nach Einführung der Blaskette verlaufen die Stromlinien der Hauptströmung nahezu parallel in Richtung der Beckenwände.

Verschiebt man die Quellpunkte um ein Viertel der Wannenslänge, so ändern sich die Strömungen nicht wesentlich, wie Bild 13 zeigt. Ein Vergleich mit dem Strömungsverlauf in Bild 11 macht deutlich, daß die linke Nebenströmung etwas schwächer ausgeprägt ist. Dagegen wirkt sich die rechte Nebenströmung über



Bilder 13a und b. Überlagerung von thermischer und mechanischer Strömung (thermischer und mechanischer Quellpunkt fallen zusammen),  
a) Stromlinienbild, b) Aufnahme.

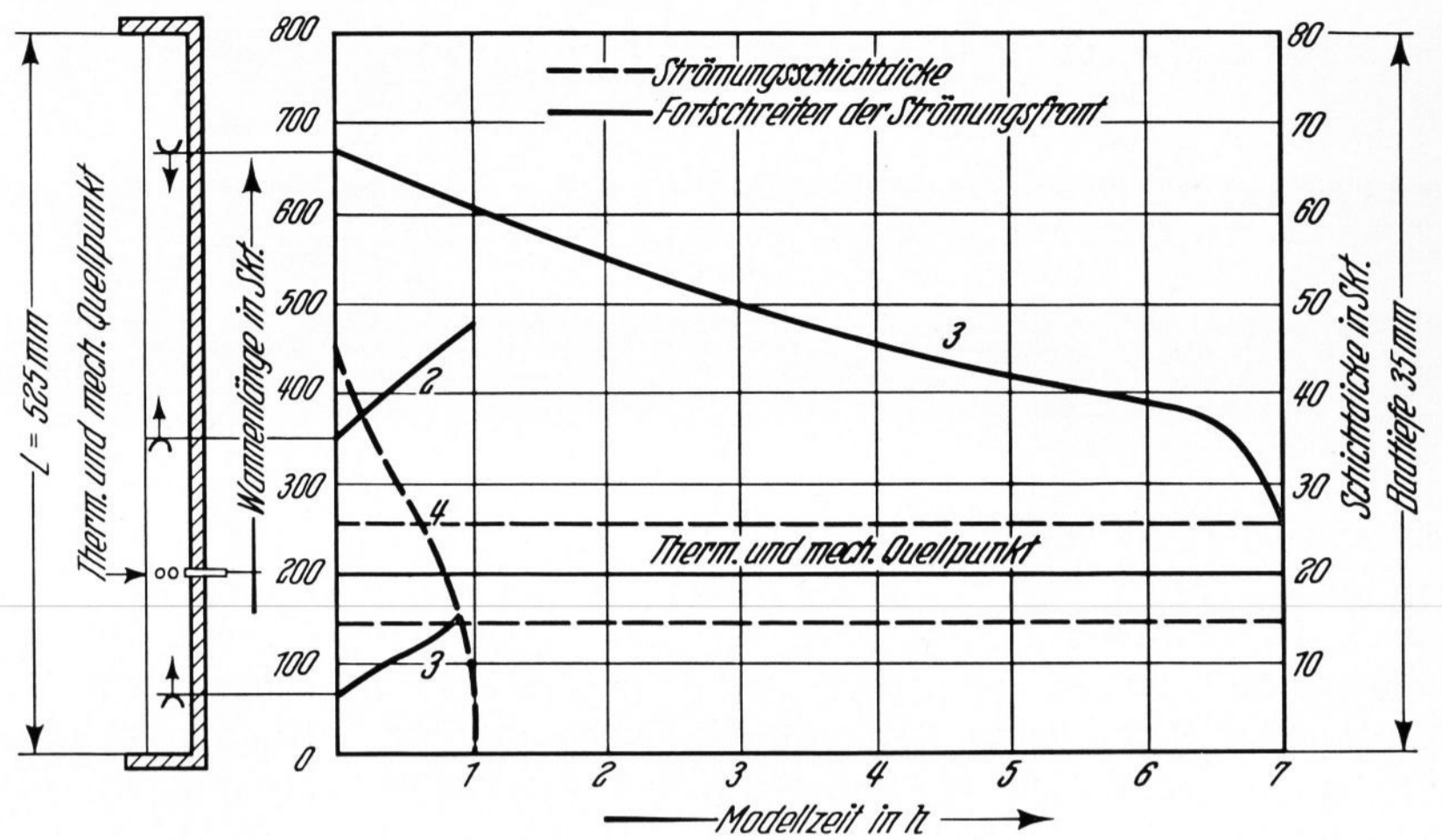


Bild 14. Fortschreiten der Strömungsfront und Abnahme der Schichtdicke.

einen größeren Bereich aus. In der an die Strömungen ① und ② angrenzenden Zone ist der gleiche Strömungsverlauf wie vorher zu sehen. In Bild 14 ist die Abnahme der Schichtdicke der rechten Nebenströmung in Kurve 4 dargestellt, Kurve 2 zeigt den Verlauf der Ausbreitungsgeschwindigkeit der rechten Nebenströmung.

Durch die Verschiebung der Quellpunkte in Richtung der Beckenwand wird der Teil der resultierenden konvektiven Strömung verkürzt, in dessen Richtung die Quellpunkte verschoben werden. Aus Bild 14 ist zu erkennen, daß die linke Strömung sehr rasch die Strömungswalzen erreicht, die rechte Strömung dagegen benötigt eine wesentlich längere Zeit. Hieraus geht hervor, daß sich die resultierende thermische Konvektionsströmung zunächst relativ langsam, im Bereich der Nebenströmungen dann schneller ausbreitet. Durch die Nebenströmungen wird — wie schon erwähnt wurde — eine Temperaturänderung in der Modellflüssigkeit hervorgerufen. Bild 15 zeigt die Isothermen nach Einstellung des stationären Temperaturfeldes vor und nach Einblasen von Luft. Im Wirkungsbereich der Nebenströmungen ist die Temperaturerhöhung besonders ausgeprägt, die auf den zusätzlichen konvektiven Wärmetransport von der Oberfläche zu den tieferen Schichten zurückzuführen ist. Dadurch fällt die Temperatur im mittleren Wannenbereich in der Nähe der Oberfläche und steigt in den tieferen Schichten an.

Bei der Überlagerung von rein thermischer und mechanischer Strömung bilden sich an der Oberfläche der Modellflüssigkeit Quellen und Senken aus<sup>1)</sup>, die je nach Lage des mechanischen und des thermischen Quellpunktes an der Oberfläche verschoben sind. Bei den Quellen fließt die Schmelze ähnlich wie bei einem thermischen Quellpunkt von den tieferen Schichten zur Oberfläche, während bei den Senken die Strömungsrichtung umgekehrt ist, so daß die heißere Oberflächenschicht in die tieferen Schichten fließt. In Bild 11a sind drei Quellen und zwei Senken zu erkennen. In der Mitte der Wanne befindet sich eine Quelle, die durch den Einfluß des mechanischen Quellpunktes relativ stark ist. Beiderseits der Quelle bilden sich zwei Senken, die durch Vereinigung von Rotations- und zirkulierender Nebenströmung zustandekommen. Durch die Vereinigung von Nebenströmungen und den am Rande auftretenden konvektiven Strömungen bilden sich zwei

weitere Quellen, die auf Grund der Symmetrie beiderseits des mechanischen Quellpunktes liegen. Bei einer Verschiebung von thermischem und mechanischem Quellpunkt ändert sich die Verteilung von Quellen und Senken nicht wesentlich (Bild 13a).

### 3.3.2. Verschiebung von mechanischem und thermischem Quellpunkt gegeneinander

Das Strömungsbild bei gegenseitiger Verschiebung von mechanischem und thermischem Quellpunkt ist für die Praxis von besonderer Bedeutung. Im folgenden wird der Einfluß der Verschiebung der Blaskette auf die Strömungsvorgänge in einer Schmelze untersucht. Der thermische Quellpunkt lag einmal in der Mitte der Wanne und einmal im ersten Viertel der Wannenlänge. Der Einfluß der Blaskette auf das Strömungsbild wird in neun verschiedenen Lagen des mechanischen Quellpunktes, der parallel zu den Stirnwänden verschoben wurde, für beide Lagen des thermischen Quellpunktes untersucht. Ein Vergleich der Strömungsbilder bei Zusammenfallen von mechanischem und thermischem Quellpunkt und deren gegenseitige Verschiebung zeigt keine wesentlichen Veränderungen des Strömungsverlaufes. Es ergaben sich ähnliche Verhältnisse, wobei sich der thermische Quellpunkt verlagerte. Nur bei großem Abstand der beiden Quellpunkte voneinander war keine Verlagerung des thermischen Quellpunktes festzustellen.

Bild 16 zeigt den Strömungsverlauf, wenn der mechanische Quellpunkt gegenüber dem thermischen Quell-

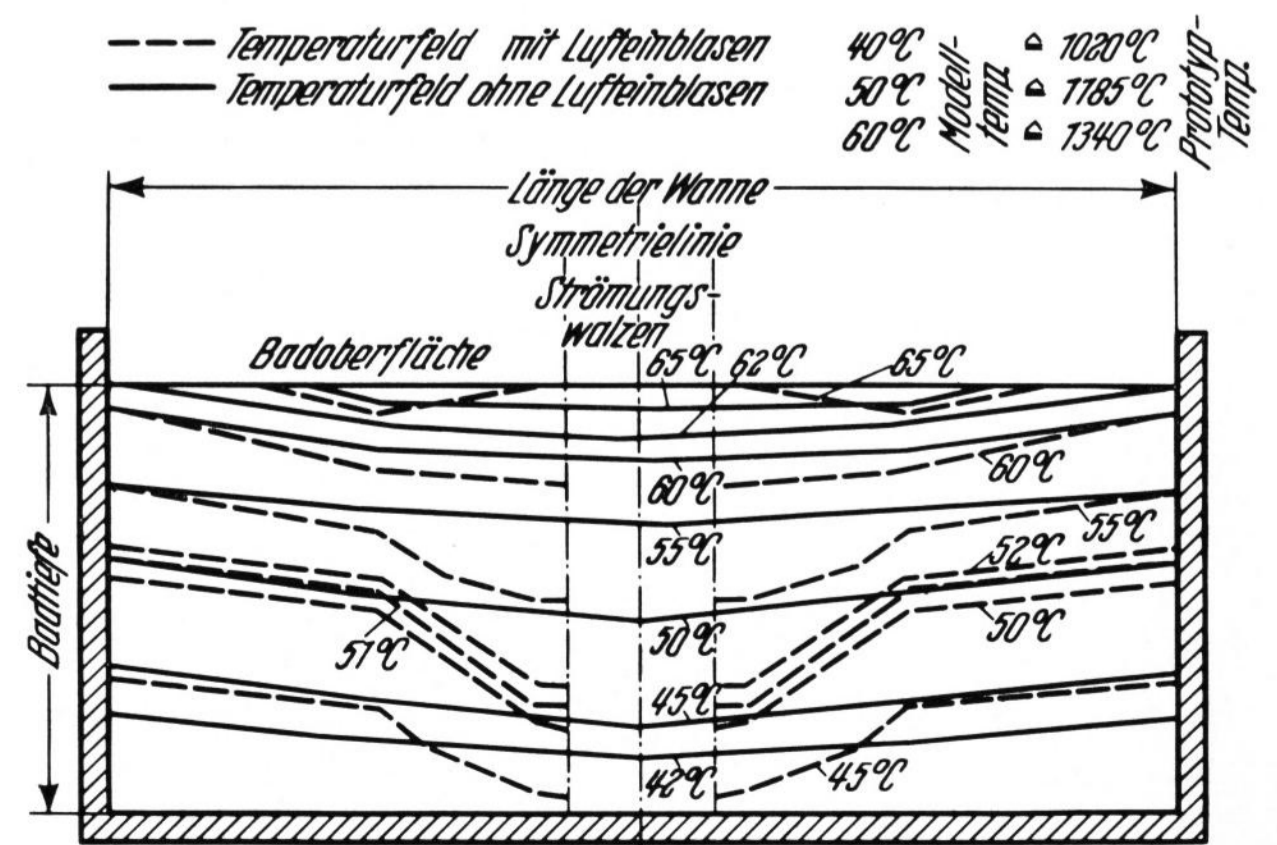


Bild 15. Isothermen nach Temperatúrausgleich der Schmelze vor und nach dem Lufteinblasen.

<sup>1)</sup> Als „Quellen“ werden positive und als „Senken“ negative Quellen bezeichnet.

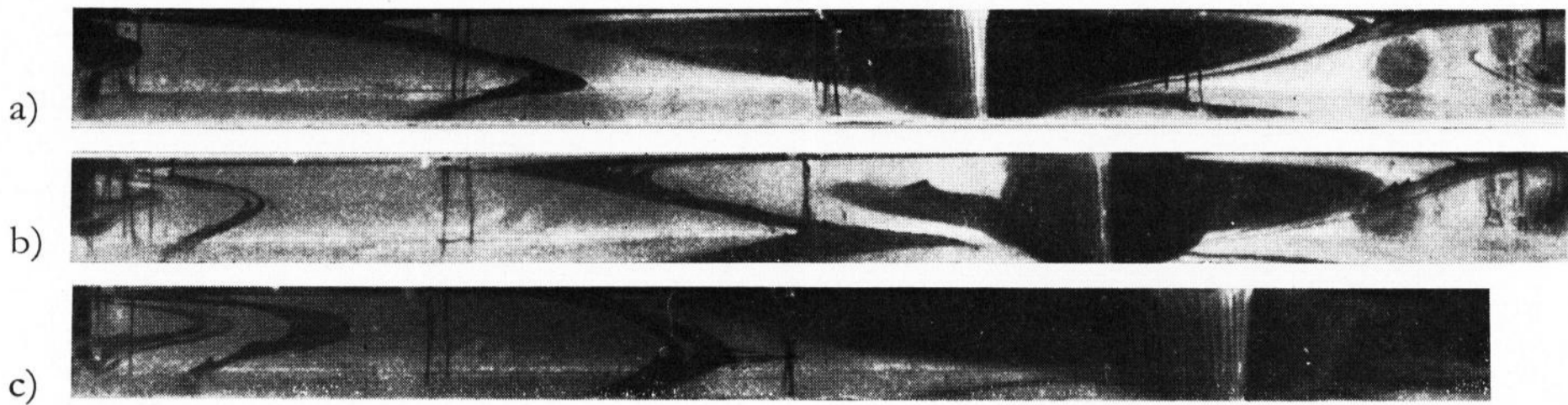


Bild 16. Verschiebung des thermischen Quellpunktes durch Verlagerung des mechanischen Quellpunktes (das Temperaturmaximum lag in der Mitte der Wanne).

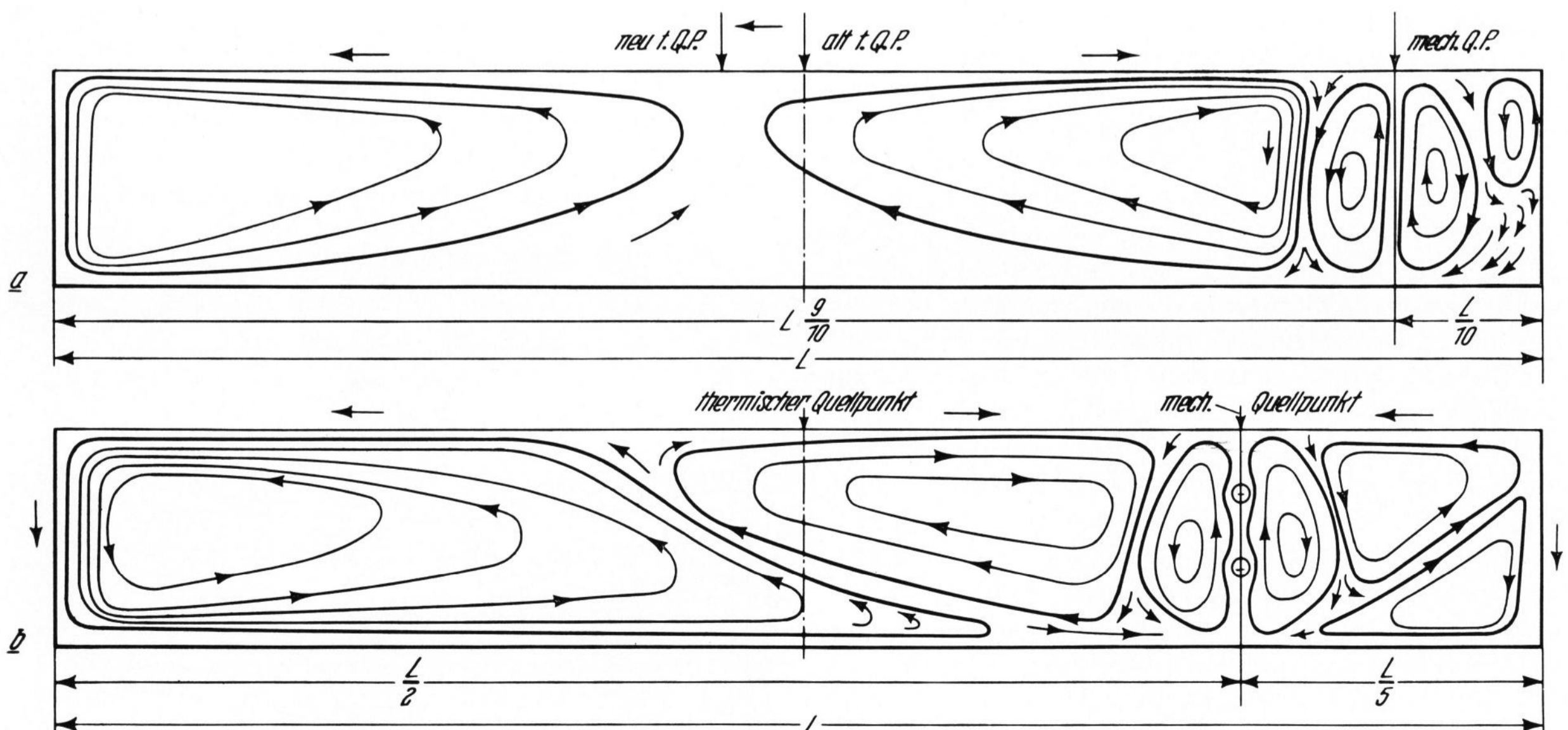
punkt (in Wannenmitte) jeweils um  $\frac{1}{10}$  Wannenlänge verschoben wird, wobei die Veränderung des thermischen Quellpunktes durch den mechanischen deutlich beobachtet werden kann. Bei einem Abstand von  $\frac{4}{10}$  Wannenlänge bleibt der thermische Quellpunkt auf Grund der mit der Entfernung schwächer werdenden mechanischen Kräfte erhalten. Dabei muß erwähnt werden, daß die Nebenströmungen in Richtung des thermischen Quellpunktes fließen und dabei eine größere Rotationsgeschwindigkeit aufweisen als die durch die thermischen Kräfte auf der anderen Seite des thermischen Quellpunktes auftretenden Konvektionsströmungen, so daß ein größerer Transport kälterer Schmelze an die Oberfläche erfolgt.

Aus Bild 17a ist zu erkennen, daß der thermische Quellpunkt vom mechanischen durch die Kühlwirkung der kälteren Schmelze an der Oberfläche verschoben wird. Die Ausbildung der Strömungswalzen ist genau so, wie in Abschnitt 3.3.1. beschrieben wurde. Durch Aufsteigen der Luftblasen und die kurze Entfernung zur Beckenwand wird die durch die Strömungswalzen bewirkte Nebenströmung stark behindert, eine thermische Konvektionsströmung entsteht überhaupt nicht mehr. Es entsteht eine kleine schnell rotierende Nebenwalze an der Beckenwand, die eine starke Korrosion der feuerfesten Steine der Wand bewirken würde. Ein Teil der Schmelze strömt in die Blasenkette zurück. Dieser Teil der Strömung fließt zur Nebenwalze und dann weiter in seine ursprüngliche Lage.

Wie schon erwähnt wurde, wird der thermische Quellpunkt bei einer Verschiebung des mechanischen Quellpunktes bis zu  $\frac{3}{10}$  der Wannenlänge verlagert. Neben der Ausbildung der Nebenströmungen durch die Blasenkette entsteht auch eine ausgedehnte konvektive Strömung, wie Bild 17b zeigt.

In Bild 18 ist der Strömungsverlauf bei Verschiebung des thermischen Quellpunktes um  $\frac{1}{4}$  der Wannenlänge zur Beckenwand zu sehen. Auch hier wirkt sich eine zu nahe Lage der Blasenkette an den Stirnwänden der Wanne nicht günstig aus. Der thermische Quellpunkt wird teilweise verschoben und bleibt erst bei einem Abstand des mechanischen Quellpunktes von  $\frac{4}{10}$  Wannenlänge erhalten. Das Verhalten der Strömungsfront und die Abnahme der Schichtdicken waren in diesem Versuch gleich, so daß auf eine eingehendere Behandlung hier verzichtet werden kann. Auch die Struktur der Strömungen änderte sich nicht wesentlich, so lange die gegenseitige Verschiebung der Quellpunkte nicht zu groß war. Erst bei noch größerer Entfernung entsteht ein separater thermischer und ein separater mechanischer Quellpunkt.

Liegt der mechanische Quellpunkt in der Nähe der Stirnwand, z. B. bei  $\frac{1}{4}$  der Wannenlänge, und fällt er mit dem thermischen Quellpunkt zusammen, so breitet sich die im größeren Wannenbereich liegende Nebenströmung in Richtung der gegenüberliegenden Wand nicht so weit aus, als wenn der thermische Quellpunkt in dieselbe Richtung zur Blasenkette verschoben wäre.



Bilder 17a und b. Überlagerung und Verschiebung der thermischen und mechanischen Strömung (thermischer und mechanischer Quellpunkt fallen nicht zusammen),

a) thermischer Quellpunkt bleibt erhalten, b) thermischer Quellpunkt bleibt nicht erhalten.

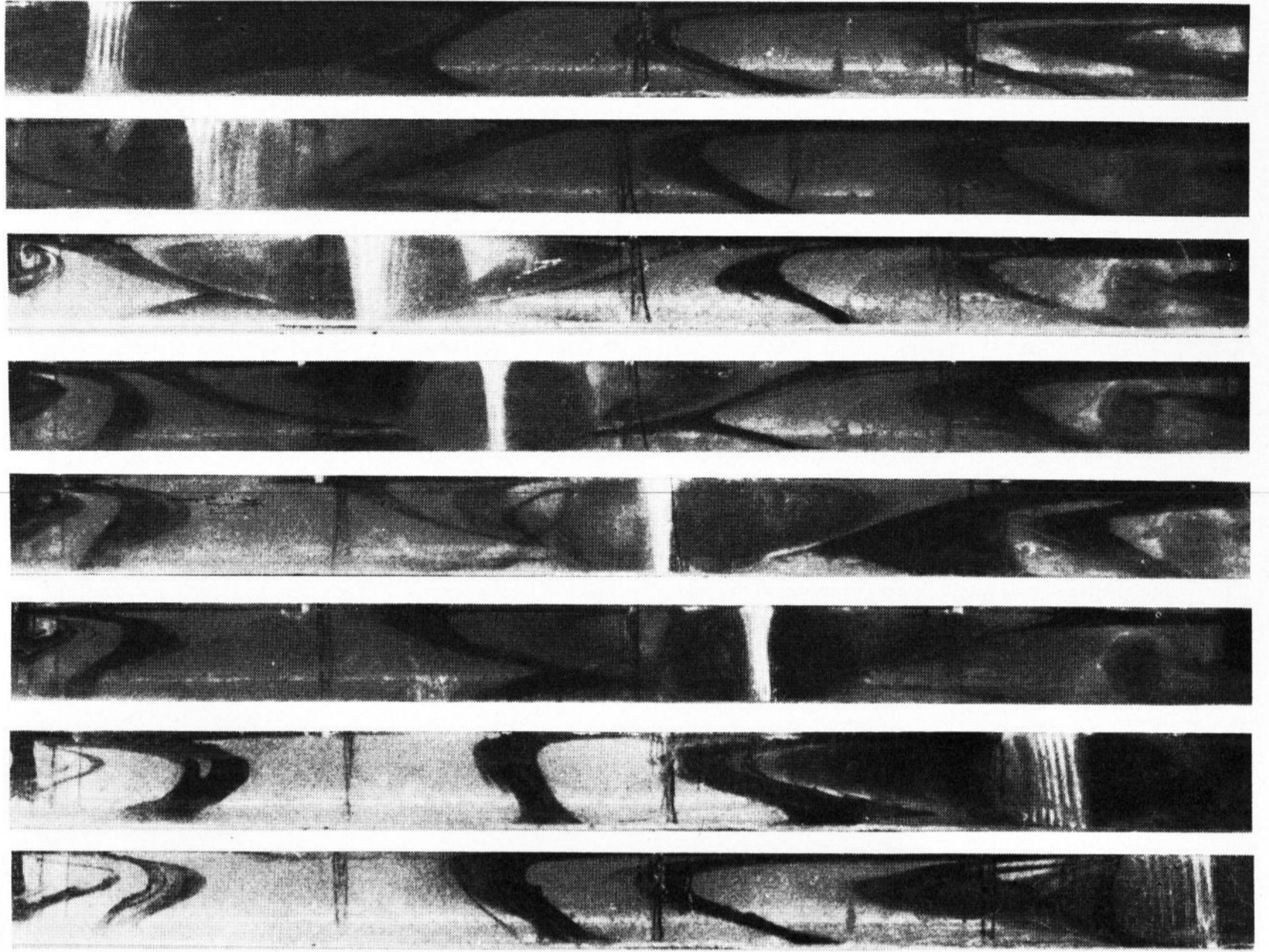


Bild 18. Verschiebung des mechanischen Quellpunktes gegen einen in der Mitte der linken halben Wannennlänge liegenden thermischen Quellpunkt.

Die Ursache dafür ist darin zu suchen, daß mit Verschiebung des thermischen Quellpunktes die Temperatur in diesem Teil der Schmelze erhöht wird.

Allgemein hat es sich gezeigt, daß eine gute Durchmischung der Modellflüssigkeit bei reiner Konvektionsströmung erst nach etwa 17 h eintrat, diese Zeit verringerte sich bei Einblasen von Luft in die Schmelze auf etwa 5 h, wie ein Vergleich der Bilder 2 und 11 zeigt.

Bei zunehmendem Abstand des mechanischen vom thermischen Quellpunkt (Bild 17) läßt der Sog der Rotationsströmung auf die konvektive Strömung nach. Bei einer bestimmten Entfernung beeinflußt die Rotationsströmung die thermische Konvektionsströmung nicht mehr, die auf der Seite des thermischen Quellpunktes ausgeprägt ist, so daß die zum mechanischen Quellpunkt fließende Konvektionsströmung abgetrennt wird. Es bildet sich dann in dem vom mechanischen Quellpunkt freien Bereich der Wanne eine thermisch bedingte Konvektionsströmung aus, die nicht vom mechanischen Quellpunkt beeinflusst wird. Die Nebenströmung in dem anderen Bereich der Wanne wird durch die Wirkung der thermisch bedingten Konvektionsströmung zusätzlich verstärkt.

#### 4. Zusammenfassung

Es wurde in einer Modellwanne aus Plexiglas mit einem doppelten Boden und doppelten Wänden, die von warmem Wasser durchströmt waren, die rein thermisch bedingten Konvektionsströmungen analog zu den experimentell in einer Glasschmelzwanne gemessenen Temperaturen untersucht. Als Modellflüssigkeit diente ein flüssiger Kunststoff, Clophen A 60, der zwischen 40 und 70 °C eine dem grünen Flaschenglas entsprechende Zähigkeit aufweist.

Weiter wurden die Strömungen unter Einfluß eines mechanischen Quellpunktes, der mit Hilfe von acht Blasen-

düsen erzeugt wurde, untersucht. Es wurde zunächst die Abhängigkeit der Blasenbildung und -größe von der Temperatur der Modellflüssigkeit, dem Düsendurchmesser, dem Luftdruck und der Flüssigkeitshöhe bestimmt. Mit einer Blasenreihe aus acht Düsen wurde die Überlagerung der mechanischen und thermischen Strömungen betrachtet und der Einfluß der gegenseitigen Lage von mechanischem und thermischem Quellpunkt auf die Ausbildung und die Struktur der Strömungen untersucht.

Durch die Einwirkung der Blasenreihe entstanden zunächst schnell rotierende Strömungswalzen, die auf Grund der Zähigkeitskräfte an ihren Grenzschichten zwei weitere zirkulierende Nebenströmungen verursachen. Da die mechanischen Kräfte stärker als die Konvektionskräfte waren, wurde die ursprüngliche Konvektionsströmung abgedrängt.

Bei der Überlagerung von thermischer und mechanischer Strömung bildeten sich an der Oberfläche der Modellflüssigkeit Quellen und Senken aus, die sich je nach Lage des mechanischen und thermischen Quellpunktes verschieben. Es wurden drei Quellen und zwei Senken beobachtet. Bei einer Verschiebung des thermischen und mechanischen Quellpunktes gegeneinander ändern sich die Quellen und Senken nicht grundlegend.

Durch die Blasenreihe und die dadurch entstandenen Strömungen wird in den tieferen Schichten der Schmelze eine Temperaturerhöhung hervorgerufen, die Ursache hierfür liegt im zusätzlichen konvektiven Wärmetransport.

Die Arbeit wurde mit finanzieller Unterstützung der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) und dem Bundeswirtschaftsministerium durchgeführt. Allen sei an dieser Stelle bestens für die gewährte Unterstützung gedankt.

#### 5. Literatur

- [1] TRIER, W.: Temperaturmessung im Glasbad von Wannentöpfen. *Glastechn. Ber.* **26** (1953) S. 5–12.  
 [2] SAFAIEH, M.-R.: Glasströmungsuntersuchungen in einer Modellwanne. Teil I: Entwicklung und Aufbau des Strömungs-

modells, Nachprüfung zweidimensional berechneter Strömungsfelder im Modell. *Glastechn. Ber.* **41** (1968) H. 3, S. 87–96. (47153)