

DK 666.1.031.13:532.5:666.1.031.2.001.57

Glasströmungsuntersuchungen in einer Modellwanne*)

Teil I: Entwicklung und Aufbau des Strömungsmodells, Nachprüfung zweidimensional berechneter Strömungsfelder im Modell

Von MOHAMMAD-REZA SAFAIEH, Aachen

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

(Eingegangen am 20. Dezember 1967)

In einer kleinen aus durchsichtigem Material erbauten Modellwanne, die zur sicheren Fixierung der thermischen Randbedingungen mit einem doppelten Boden und doppelten Seitenwänden versehen war, wurden Strömungsverhältnisse des Glasbades untersucht. Als Modellflüssigkeit wurde ein geeigneter flüssiger Kunststoff gewählt. Die Versuchseinrichtung wurde entwickelt und aufgebaut. Die Abmessungen und Temperaturverhältnisse des Modells sind so festgelegt, daß die Ähnlichkeitsbedingungen zwischen Modell und Prototyp erfüllt waren. In Teil I werden die experimentell bestimmten, rein thermisch bedingten Konvektionsströmungen mit den von VON PESCHKE und TRIER [10, 11] veröffentlichten zweidimensional berechneten Konvektionsströmungen verglichen. Es gelang, bei übereinstimmenden Rand- und Ausgangsbedingungen zufriedenstellende Übereinstimmung zu erzielen.

In Teil II werden die dreidimensionalen Konvektionsströmungen behandelt und dabei die Beeinflussung der thermischen Konvektionsströmung durch das Luftenblasen in die Glasschmelze (Bubbling) beschrieben. Einflüsse weiterer Faktoren, wie Entnahmestromung, Einlegetechnik, Geometrie des Wannenbeckens, Durchlaß u. dgl., wurden bewußt ausgeschaltet, um übersichtliche Verhältnisse zu schaffen. Diese Einflüsse sollen in weiteren Arbeiten untersucht werden.

Das Einschmelzen der Rohstoffe und die Homogenisierung und Läuterung der Glasschmelze ist für die erzielbare Glasqualität von großer Bedeutung. Die Leistungsfähigkeit einer Glaswanne hängt stark vom Ablauf dieser Prozesse und damit von den Glasströmungen ab. Da Messungen in der Wanne nur bedingt möglich und sehr kostspielig sind, kommt sowohl den Analogmethoden als auch den Modelluntersuchungen und der Rechnung große Bedeutung zu, obwohl die komplizierten wirklichen Verhältnisse nur sehr bedingt nachgeahmt werden können.

Modelluntersuchungen über Glasströmungen sind von vielen Stellen durchgeführt und in reicher Zahl veröffentlicht worden. Leider wurde fast in allen Fällen eine weitgehende Erfassung aller Einflußgrößen der Praxis angestrebt, was den großen Nachteil hat, daß bei der Vielzahl der Einflüsse die Grundzusammenhänge nicht mehr erkannt werden können. Hinzu kommt, daß damit der Anschluß an die rein rechnerische Behandlung der Aufgabe verloren geht, da die Rechnung sich auch bei Einsatz von Rechenmaschinen auf Grundzusammenhänge beschränken muß. Ziel der vorliegenden Aufgabe war es daher, sich auf die Grundzusammenhänge von Glasströmungen zu beschränken, und von der experimentellen Seite her Anschluß an die rechnerischen Ergebnisse von VON PESCHKE und TRIER [10, 11] zu gewinnen.

1. Modellflüssigkeit

Eine sinnvolle Durchführung der Modellversuche hängt in erster Linie von den physikalischen Eigenschaften der Modellflüssigkeit ab. Eine ähnliche Wiedergabe der Strömungsvorgänge in der Glasschmelze durch ein Modell ist dann gegeben, wenn der Modellstoff im Meßbereich ein ähnliches Fließverhalten aufweist wie die Glasschmelze. Die Forderung setzt eine Modellflüssigkeit mit passenden thermischen und dynamischen Eigenschaften voraus. Für die Gleichheit der Ähnlichkeitskennzahlen, die die Voraussetzung der Modelltheorie sind, müssen die physikalischen Stoffwerte der Modellflüssigkeit den Stoffwerten des Glasbades weitgehend entsprechen.

Der Modellstoff soll in seinen rheologischen Eigenschaften der Glasschmelze entsprechen, d. h. eine rein-

viskose NEWTONSche Flüssigkeit, genauer gesagt: ein linearelastoviskoser Stoff mit vernachlässigbar kleinen Relaxationszeiten, sein. Ist diese Voraussetzung gegeben, dann besteht erfahrungsgemäß bei vergleichbaren Viskositäts-Temperaturverhalten eine gute Modellähnlichkeit.

Modellstoffe sollen, um die Strömung beobachten und fixieren zu können, außerdem durchsichtig und nicht flüchtig, leicht zu behandeln und billig sein. Für eine der Wirklichkeit entsprechende Nachahmung des Gemengeeinschmelzens ist es erforderlich, daß die Flüssigkeit bei niedrigen Temperaturen in fester körniger Form vorliegt.

Die Wahl der Modellflüssigkeit spielt bei den Modellstudien eine große Rolle, da die Erfüllung der Ähnlichkeitsprozesse, soweit sie sinnvoll abgeleitet werden können, von der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte des Modellstoffes abhängt.

Einige Verfasser haben bei ihren Untersuchungen wäßrige Glycerinlösungen benutzt, die je nach dem gewählten Modellmaßstab mit bestimmten Mengen von Zucker oder anderen passenden Substanzen gemischt wurden, um das erforderliche Viskositätsverhalten der Flüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zu erhalten. SPITZ [1] nahm eine Mischung von Glycerin und Sirup im Verhältnis 1:1, SCHILD [2] benutzte durchsichtige Öle, SAWAI und Mitarbeiter [3 bis 5] verwendeten eine 88%ige und 82%ige Glycerinlösung, VELEV [6] zog 96%iges technisches Glycerin und NARUSE [7] eine 83%ige Lösung vor. Einen phenolischen polymeren Stoff wählte KRUSZEWSKI [8] in seinem Modell, und GREENE [9] schlug viskose Flüssigkeiten vor, genannt „Vistac Nr. 2“ (ein Polyisobuthylen) und „Corn Syrup Code 14“ (eine glukose Lösung), die eine passende kinematische Viskosität bei Raumtemperatur haben, um bei Modellen im Maßstab 1:1 hartes Borosilicatglas wiederzugeben. Bei Modellen größeren Maßstabes waren relativ hohe Temperaturen notwendig, um das gleiche Glas nachzuahmen.

Für die Durchführung der Modelluntersuchungen in dieser Arbeit wurde als Modellflüssigkeit ein flüssiger

*) Auszug aus einer von der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen genehmigten Dissertation (1967).

Kunststoff, Clophen A 60, gewählt, der zwischen 40 und 70 °C eine Zähigkeitskurve hat, die der von Kalk-Natron-Glas zwischen 1050 und 1500 °C ähnlich ist. Clophen A 60 ist eine wasserklare, auf Grund ihres chemischen Aufbaues flammwidrige Flüssigkeit von dünnflüssiger bis viskoser Konsistenz. Es handelt sich um Chlordiphenyle mit einem Chlorgehalt um 54%, die für Kondensatoren und Transformatoren gebraucht werden. Dieser Kunststoff ist für die Nachahmung der Glasschmelze sehr gut geeignet, er ist wahrscheinlich eine Modellflüssigkeit, die unter den gegebenen Bedingungen mit ihren physikalischen Stoffwerten denen der Glasschmelze am nächsten kommt.

Für die richtige Wahl der Modellbetriebsbedingungen benötigt man die Kenntnis der Temperaturabhängigkeit einiger Modellstoffwerte. Diese Stoffwerte sind Dichte, Wärmeausdehnungskoeffizient, Viskosität, die spezifische Wärme und die Wärmeleitfähigkeit. Die Dichte wurde in einer umgebauten Analysenwaage hydrostatisch bestimmt. In Tabelle 1 und Bild 1 ist die Dichte als Funktion der Temperatur aufgetragen.

Aus der Messung geht hervor, daß die Dichte sich im Bereich von 40 bis 70 °C linear um den Betrag $0,001036 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{grad}$ ändert. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ($\beta = 6,92 \cdot 10^{-4}/\text{grad}$) wurde mit Hilfe einer hydrostatischen Waage bestimmt.

Die Viskositätsbestimmungen wurden mit einem Rotationsviskosimeter nach Hatschek-Couette durchgeführt. Das zur Messung benutzte Gerät erlaubte Untersuchungen über einen sehr breiten Viskositätsbereich. In Bild 2 ist die Viskositätsabhängigkeit der Modellflüssigkeit von der Temperatur dargestellt.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, bestimmt. Bei dem benutzten Untersuchungsverfahren wird die Wärmeleitfähigkeit einer dünnen ebenen Flüssigkeitsschicht mit breitem Randschutz im stationären Zustand gemessen (Lamellenverfahren). Die Abhängigkeit der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit als Funktion der Temperatur ist in Bild 3 dargestellt.

2. Ähnlichkeitsbetrachtung

Für die Konstruktion einer Modellwanne ist es erforderlich, in Form einer Ähnlichkeitsbetrachtung die Abmessungen und Temperaturverhältnisse des Modells so zu wählen, daß die Ähnlichkeitsbedingungen im Modell und im Prototyp erfüllt sind. Bei der Durchführung einer solchen Ähnlichkeitsbetrachtung kommen

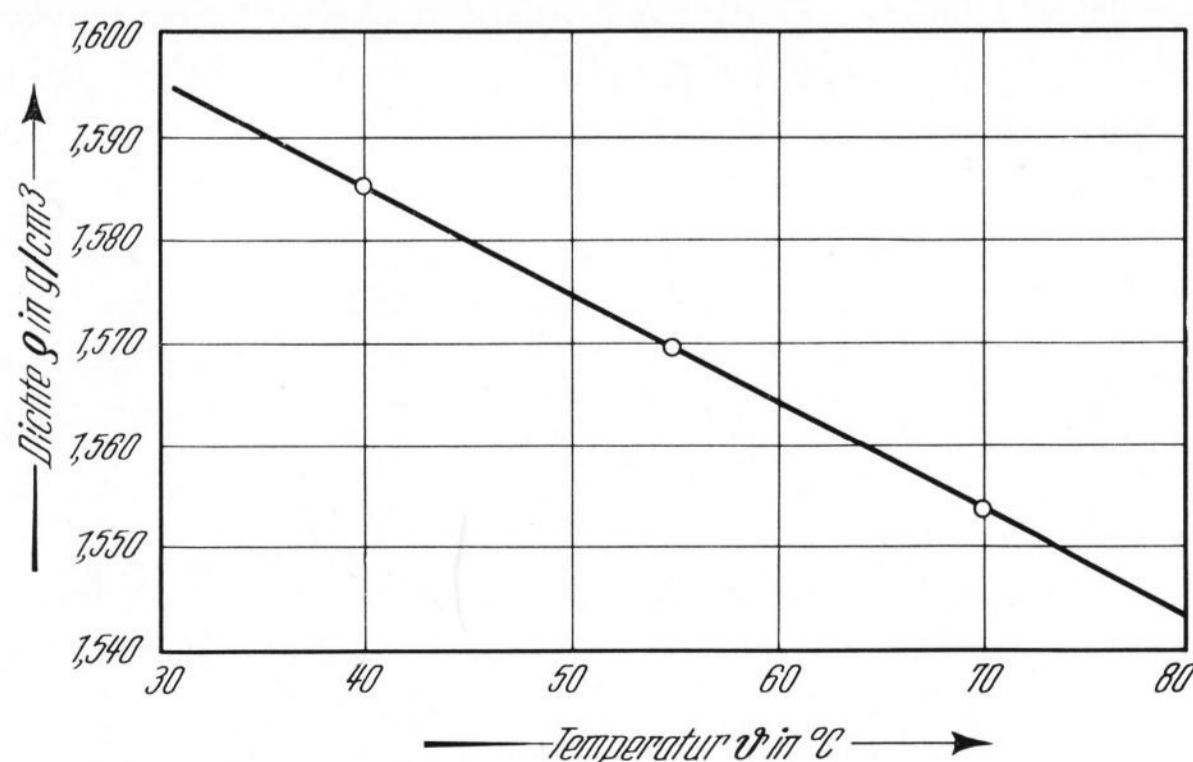


Bild 1. Temperaturabhängigkeit der Dichte ρ von Clophen A 60.

Bezeichnung der Probe	Temp. ϑ in °C	Dichte ρ in g/cm ³
Clophen A 60	40	1,58502
	55	1,56947
	70	1,55392

vorerst zahlreiche Faktoren in Frage, wie z. B. die Art der Wärmezufuhr und -abfuhr, der nicht gleichbleibende Zustand der Wanne, die Wärmeentwicklung durch chemische Reaktionen, der Gemengeeinfluß auf die Wärmeübertragung, die Energieverluste durch innere Reibung, die Größe der mechanischen Wechselwirkung zwischen dem heißen Gas und der Flüssigkeitsoberfläche und andere Faktoren, die die Verwendung von Modellen so komplizieren, daß es nicht mehr gelingen würde, derartige Untersuchungen sinnvoll durchzuführen. Daher ist es empfehlenswert, die Modellstudien über die Strömungsvorgänge in einer Glaswanne unter der Annahme zu beginnen, daß die Flüssigkeitseigenschaften des Glases sich weder mit der Zeit ändern noch von dem Ort in der Wanne abhängig sind.

Die Grundlage der ähnlich verlaufenden Vorgänge beruht auf der Tatsache, daß die Kräfte, die auf alle entsprechenden flüssigen Massenteile im Modell und im Prototyp einwirken, in bestimmten Verhältnissen aufrecht erhalten werden müssen. Besteht geometrische Ähnlichkeit, dann lassen sich diese Kräfte aus den physikalischen Eigenschaften und den Verhältnissen der dynamischen und kinematischen Eigenschaften der strömenden Massen bestimmen. Hierbei werden dimensionslose Verhältnisse als Kriterien für die Ähnlichkeit verwendet.

Die dimensionslosen Kennzahlen, die für die Wiedergabe der Strömungsvorgänge in der Glasschmelze notwendig sind, können mit Hilfe von zwei Überlegungsmethoden ermittelt werden. Bei einer Methode

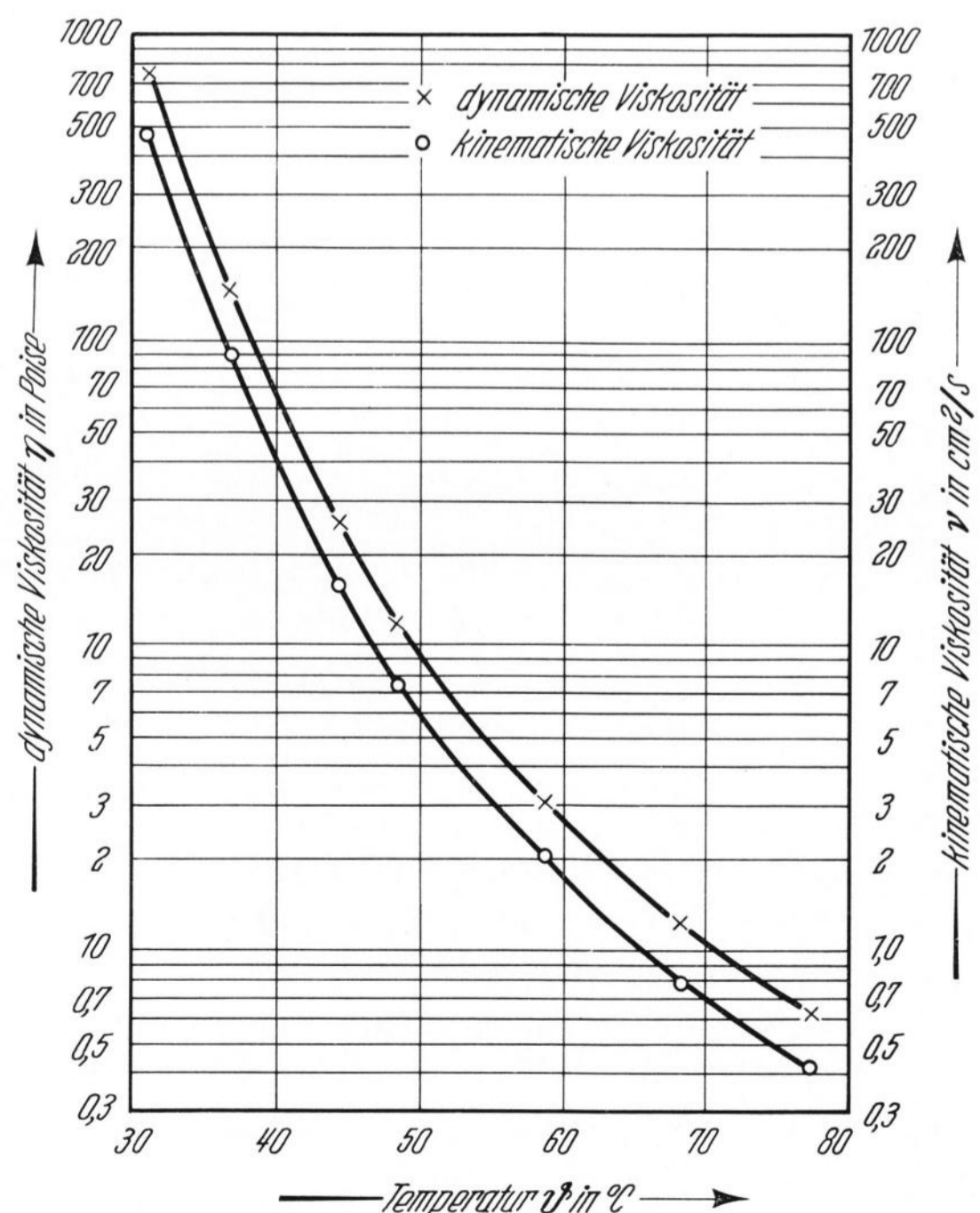


Bild 2. Dynamische und kinematische Zähigkeit der Modellflüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur.

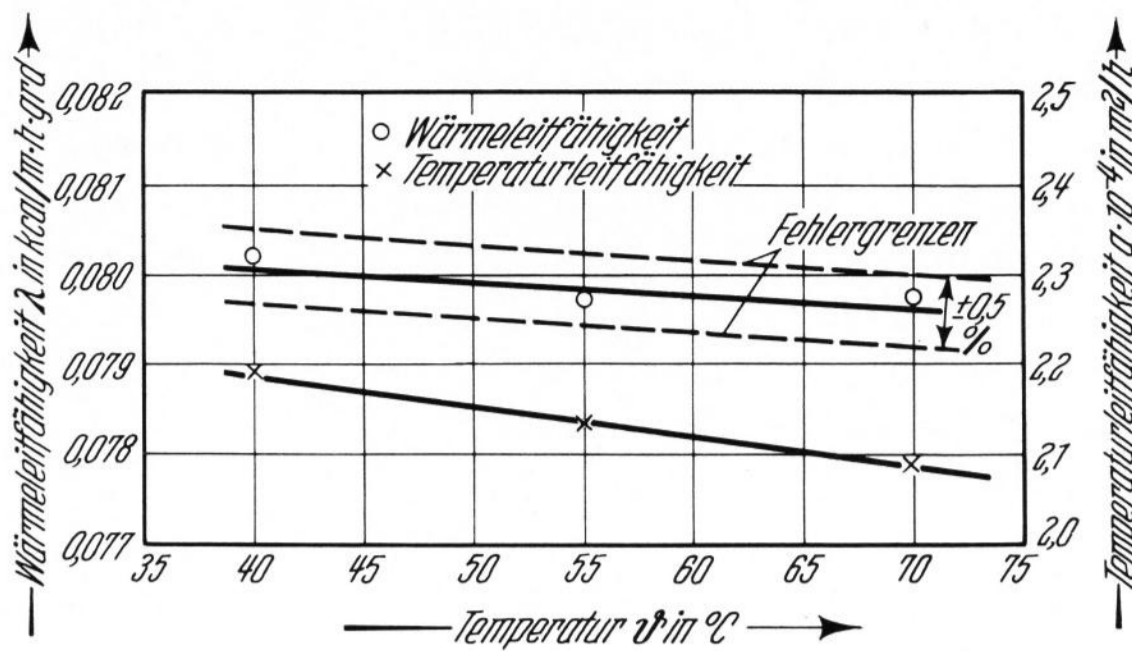


Bild 3. Wärmeleitfähigkeit von Clophen A 60 als Funktion der Temperatur.

werden die Navier-Stokessche Gleichung und die Energiegleichung zugrunde gelegt. Mit der Einführung von Verhältniskonstanten in die Modell- und Prototypgleichungen werden die eingesetzten Koeffizienten gleich 1 gesetzt, um die dimensionslosen Kennzahlen erfassen zu können.

Die andere allgemeine Art, die dimensionslosen Kennzahlen zu ermitteln, ist die Zusammenfassung der sogenannten „unabhängigen Variablen“. Die dimensionslose Kennzahl, in der die Stoffwerte des Prototyps und Modells ausgedrückt werden sollen, ist eine Funktion von diesen Stoffwerten. Die Zähigkeit und Dichte des Glases sind temperaturabhängig, und sie werden nach der Festlegung der dimensionslosen Kennzahl örtlich in dem Glasbad berücksichtigt. Wenn m das Modell und p den Prototyp bezeichnen soll, erhält man für die Nachahmung der Viskosität die folgende Gleichung:

$$\left(\frac{g \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\eta^2}\right)_p = \left(\frac{g \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\eta^2}\right)_m \quad (1)$$

oder wenn die Erdbeschleunigung für das Modell und den Prototyp gleich ist:

$$\frac{\nu_m}{\nu_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{3/2} \quad (2)$$

Für diese und die folgenden Beziehungen bedeuten: ρ = Dichte, η = dynamische Zähigkeit, ν = kinematische Zähigkeit, g = Erdbeschleunigung, L = Länge, v = Geschwindigkeit des Glases, β = Wärmeausdehnungskoeffizient, $\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz und a = Temperaturleitfähigkeit.

Setzt man nun das geometrische Verhältnis der Modellwanne fest und legt die Temperaturverteilung der Glasschmelze für die Berechnung der Modelltemperaturen zugrunde, so werden die Modellflüssigkeitsviskositäten aus den Glasviskositäten, die den Temperaturwerten im Glasbad entsprechen, ermittelt. Die Modelltemperaturen, die den Modellviskositäten entsprechen, werden aus der Viskositäts-Temperaturkurve des Modellstoffs bestimmt.

Die Ursache der Konvektionsströmungen beruht auf den Dichteunterschieden des Glases in gleichen horizontalen Ebenen. Gleichung (1) umfaßt die Nachahmung der Viskosität. Nachdem diese Gleichung für das Modell und den Prototyp genau gleich gehalten wird, kann man die Konvektionsströmungen so berücksichtigen, indem man die Gleichung (1) durch die Gay-Lussac-Zahl, die die Wärmedehnungsvorgänge charakterisiert, dividiert. Damit erhält man die Grashof-Zahl, die gleich dem

Quadrat der Reynolds-Zahl dividiert durch die Froudezahl und Gay-Lussac-Zahl ist.

Gay-Lussac-Zahl:

$$G_a = \frac{1}{\beta \cdot \Delta\vartheta}$$

Grashof-Zahl:

$$\left(\frac{g \cdot L^3 \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta}{\eta^2}\right)_p = \left(\frac{g \cdot L^3 \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta}{\eta^2}\right)_m \quad (3)$$

Inwieweit die thermisch bedingte Konvektionsströmungen im Modell nachgeahmt werden können, hängt von der Übereinstimmung dieser Zahl für das Modell und den Prototyp ab.

An Hand der Energiegleichung läßt sich die Wärmeleitung in strömenden Medien in der dimensionslosen Prandtl-Zahl ausdrücken. Mit der Gleichheit dieser Kennzahl wird die Wärmeleitung im Modell nachgeahmt:

Prandtl-Zahl:

$$\left(\frac{\nu}{a}\right)_p = \left(\frac{\nu}{a}\right)_m \quad (4)$$

TRIER [10] drückt unter Anwendung der Energiegleichung, Kontinuitätsgleichung und NAVIER-STOCKESchen Gleichung die dimensionslose Rayleigh-Zahl Ra , die die charakteristischen Werte der Glasschmelze beinhaltet und für die Nachahmung der Auftriebswirkungen in Strömungsmitteln geeignet ist, aus. Die Rayleigh-Zahl ist andererseits das Produkt aus Grashof-Zahl und Prandtl-Zahl. Also gilt weiterhin:

$$\begin{aligned} Ra &= \left(g \left|\frac{d\rho}{d\vartheta}\right| \cdot (\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}) \cdot \frac{1}{\eta_0 a_0} \cdot B \cdot H^2\right)_p \\ &= \left(g \left|\frac{d\rho}{d\vartheta}\right| \cdot (\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}) \cdot \frac{1}{\eta_0 a_0} \cdot B \cdot H^2\right)_m \end{aligned} \quad (5)$$

wenn für L^3 das Produkt $B \cdot H^2$ (B = Wannenbreite und H = Badtiefe) gesetzt wird.

Hierbei sind a_{0p} und η_{0p} konstante Werte bei den entsprechenden Bezugstemperaturen, die für den Prototyp sinnvoll gewählt werden. Für die Modellseite werden

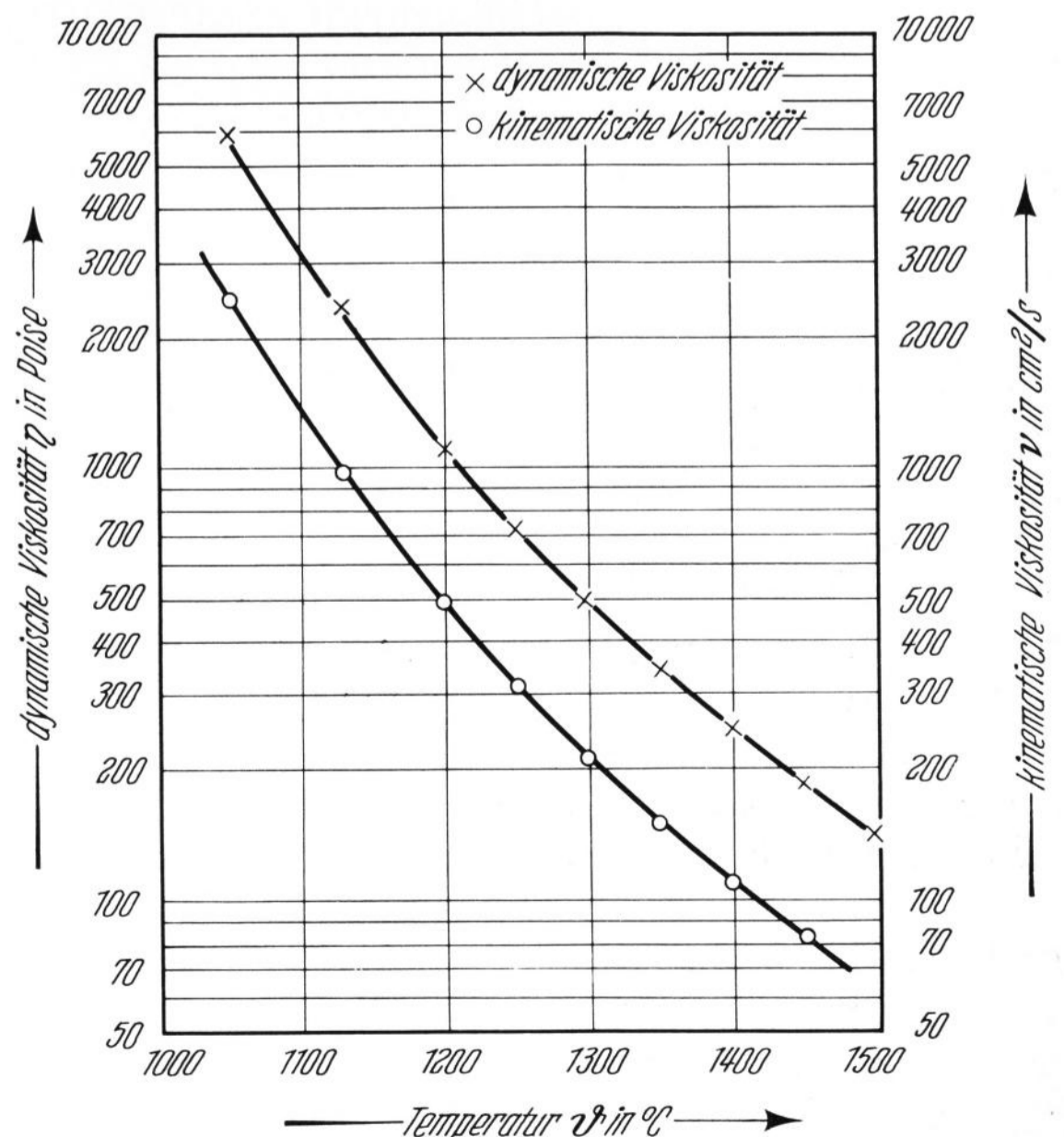


Bild 4. Dynamische und kinematische Viskosität von grünem Flaschenglas.

aus diesen Bezugstemperaturen nach Gleichung (2) die Modelltemperaturen ausgerechnet und demnach die Werte a_{0m} und ρ_{0m} festgelegt.

Den Zeit- und Geschwindigkeitsmaßstab zwischen Modell und Prototyp erhält man aus der Reynolds-Zahl und Froude-Zahl:

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$\frac{t_m}{t_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2}. \quad (7)$$

Die Temperaturwerte des Prototyps, aus denen mit Hilfe der Ähnlichkeitskennzahlen die Modelltemperaturen hervorgehen, bestehen in dieser Arbeit aus theoretisch berechneten Werten. Die Zulässigkeit der in der Ähnlichkeitsbetrachtung zugrunde gelegten Vereinfachungen wurde so geprüft, daß einige, entsprechend experimentellen Untersuchungen an verschiedenen Prototypen, angenommene Prototemperaturfelder, die in die mathematische Berechnung der Glasströmung eingesetzt wurden, in Modelltemperaturen umgerechnet und die hierbei am Modell beobachteten Strömungen mit den mathematisch berechneten verglichen wurden.

Für die Durchführung der Ähnlichkeitsberechnung benötigt man neben den Stoffwerten der Modellflüssigkeit auch die Stoffwerte des geschmolzenen Glases. Die Abhängigkeit der Viskosität, Dichte und Temperaturleitfähigkeit vom grünen Flaschenglas als Funktion der Temperatur ist von TRIER [10] veröffentlicht worden. Diese Stoffwerte werden in dieser Arbeit in der Ähnlichkeitsbetrachtung zugrunde gelegt. Die Temperaturabhängigkeit der dynamischen und kinematischen Viskosität von grünem Flaschenglas ist in Bild 4 wiedergegeben.

Für die theoretische Berechnung der zweidimensionalen Glasströmung sind die Temperaturfelder und Ergebnisse der mathematischen Berechnungen einiger einfacher Fälle von VON PESCHKE [11] zugrunde gelegt worden, die mit Hilfe des Differenzverfahrens numerisch durchgerechnet sind.

Seine Methode beschränkt sich auf stationäre, zweidimensionale Strömungen; eine dieser beiden Dimensionen ist die Schwererichtung und die zweite die von der Mitte der Wanne zu den Seitenwänden. Die Flüssigkeit wird als quasi-inkompressibel angenommen, das heißt, bei der Massen- und Energiebilanz wird die Dichte als Konstante behandelt, in der Gleichung für die Volumenkräfte jedoch der Auftrieb berücksichtigt (ähnlich wie bei der Ähnlichkeitsbetrachtung in dieser Arbeit). Alle anderen Materialgrößen seien von der Temperatur unabhängig. Die Bewegung sei schleichend, und von der Wärmeerzeugung durch Strömungsreibung wird abgesehen. Außer der Wärmeübertragung durch Konvektion und Leitung im Glasbad spielt die Wärmestrahlung im Schmelzbad selbst zwischen den wärmeren und kälteren Schichten eine Rolle; sie wird aber vernachlässigt. Diese Vernachlässigung gilt nur bedingt, da die Temperaturleitfähigkeitswerte des Glases unter Berücksichtigung der Strahlung zwischen den wärmeren und kälteren Schichten des Glasbades gemessen worden sind. Die Verwendung dieser Werte in der Modellähnlichkeit bedeutet eine indirekte Berücksichtigung dieser Wärmestrahlung. Diese Vereinfachungen stimmen mit denen bei der Ähnlichkeitsberechnung überein.

VON PESCHKE untersuchte fünf Fälle, die mit der Rayleigh-Zahl charakterisiert werden. Es wurden drei dieser Fälle für die Nachahmung im Modell ausgesucht. Die Größe der Wanne, die Stoffwerte des Glases und das Temperaturfeld des Bades setzen jeweils bestimmte Rayleigh-Zahlen fest. In dieser Arbeit wurden drei Rayleigh-Zahlen mit den entsprechenden Temperaturfeldern nachgeahmt. Diese sind in

Fall 3:

$$Ra = 10^6 \quad \text{und} \quad d = \frac{\text{Beckenhöhe } H}{\text{halbe Beckenbreite } \frac{B}{2}} = 0,25,$$

$$H = 50 \text{ cm}, B = 400 \text{ cm};$$

Fall 4:

$$Ra = 4 \cdot 10^5 \quad \text{und} \quad d = \frac{\text{Beckenhöhe } H}{\text{halbe Beckenbreite } \frac{B}{2}} = 1,00,$$

$$H = 58,49 \text{ cm}, B = 116,98 \text{ cm};$$

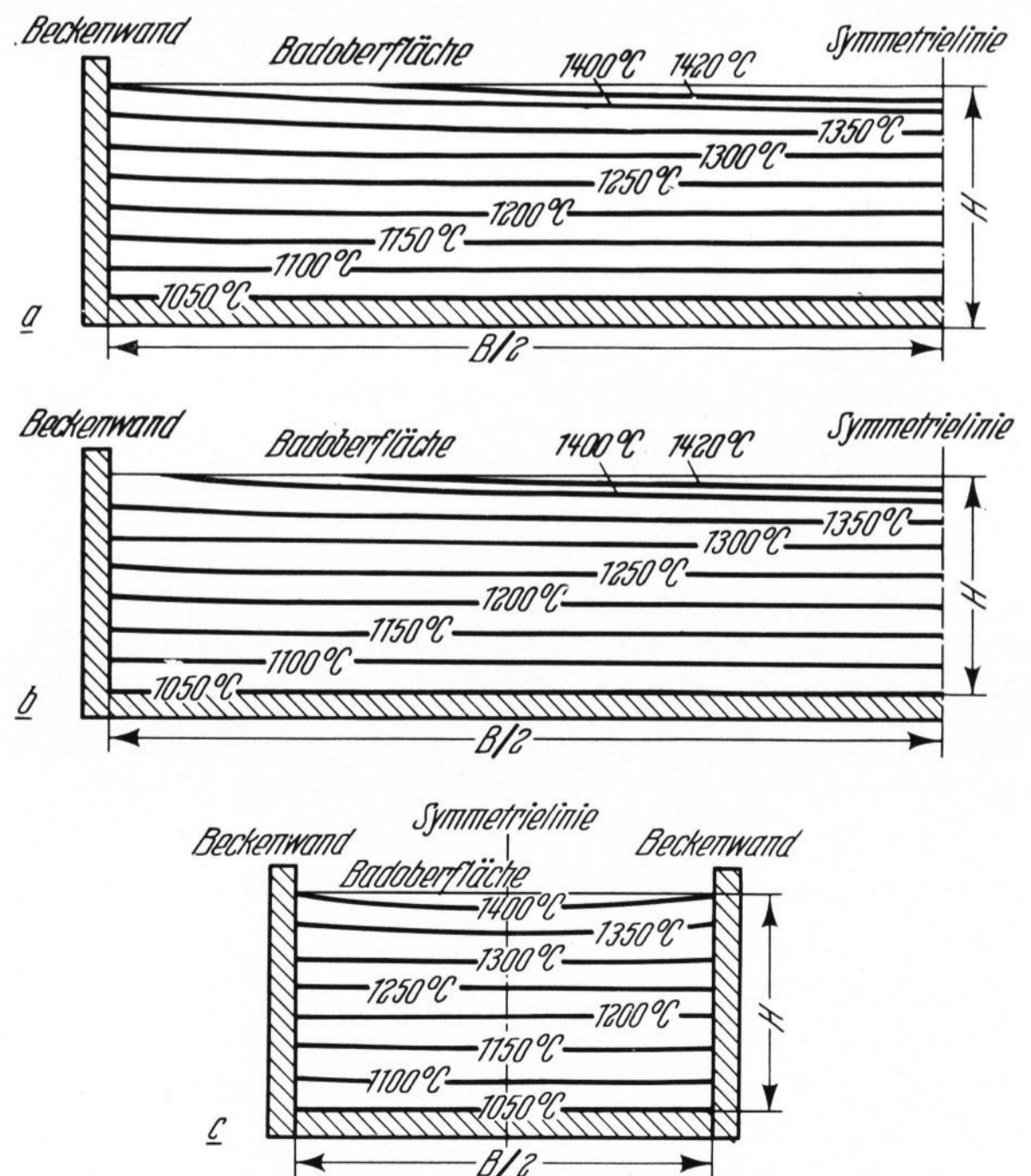
Fall 5:

$$Ra = 8 \cdot 10^6 \quad \text{und} \quad d = \frac{\text{Beckenhöhe } H}{\text{halbe Beckenbreite } \frac{B}{2}} = 0,25,$$

$$H = 100 \text{ cm}, B = 800 \text{ cm}.$$

In den Bildern 5a bis c sind die zugehörigen Temperaturfelder zu den ausgesuchten Fällen dargestellt.

Die gewählten Abmessungen der Modellwanne sind für die Fälle 3 und 5: $B = 35 \text{ cm}, H = \frac{B}{8} = 4,375 \text{ cm}$ ($d = 0,25$). Das entspricht für den Fall 3 einem Maßstab von 1:11,428 und für den Fall 5 einem Maßstab von 1:22,857.



Bilder 5a bis c. Theoretische Temperaturfelder nach Berechnung von VON PESCHKE [11],
 a) Fall 3: $Ra = 10^6, d = H/(B/2) = 0,25,$
 b) Fall 5: $Ra = 8 \cdot 10^6, d = H/(B/2) = 0,25,$
 c) Fall 4: $Ra = 4 \cdot 10^5, d = H/(B/2) = 1,0.$
 Diese Temperaturfelder wurden entsprechend den Temperaturmessungen in Glaswannen berechnet.

Tabelle 2. Modelltemperaturwerte für die Fälle 3, 4 und 5

	Badhöhe Boden → Oberfl.	Glastemperatur ϑ in °C			Glasviskosität ν in cm ² /s			Modellviskosität ν in cm ² /s			Modelltemperatur ϑ in °C		
		Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Wand- temperatur	Boden	1050	1050	1050	2452,6	2452,6	2452,6	63,49	50,61	22,445	38,0	39,0	42,5
	H/5	1120	1120	1120	1068,5	1068,5	1068,5	27,64	22,05	9,777	41,5	42,6	46,9
	2 H/5	1190	1188	1190	529,0	539,0	529,0	13,69	11,12	4,841	45,0	46,2	51,5
	3 H/5	1260	1257	1260	289,0	300,0	289,0	7,48	6,19	2,644	48,3	50,0	56,3
	4 H/5	1330	1328	1330	172,0	174,6	172,0	4,452	3,60	1,574	51,8	53,5	61,0
	Oberfl.	1400	1400	1400	109,0	109,0	109,0	2,821	2,25	0,997	55,3	57,5	65,5
Mitte d. halben Wannenbreite	Boden	1050	1050	1050	2452,6	2452,6	2452,6	63,49	50,61	22,445	38,0	39,0	42,5
	H/5	1123	1120	1122	1034,1	1068,5	1045,50	26,76	22,05	9,567	41,7	42,6	47,0
	2 H/5	1196	1190	1196	500,59	529,0	500,29	12,95	10,91	4,578	45,3	46,3	51,7
	3 H/5	1270	1262	1267	267,33	289,3	274,19	6,919	5,88	2,509	48,8	50,0	56,5
	4 H/5	1348	1340	1346	152,29	160,85	154,36	3,941	3,31	1,412	52,7	54,2	62,0
	Oberfl.	1428	1428	1428	93,00	92,37	92,37	2,407	1,90	0,845	57,0	59,2	67,5
Mitte der Wanne	Boden	1050	1050	1050	2452,6	2452,6	2452,6	63,49	50,61	22,445	38,0	39,0	42,5
	H/5	1123	1120	1122	1034,1	1068,5	1045,50	26,76	22,05	9,567	41,7	42,6	47,0
	2 H/5	1196	1192	1194	500,59	519,3	509,90	12,95	10,71	4,666	45,3	46,3	51,5
	3 H/5	1270	1262	1267	267,33	285,3	274,19	6,919	5,88	2,509	48,8	50,0	56,5
	4 H/5	1354	1340	1348	146,3	160,85	152,29	3,786	3,31	1,393	53,3	54,2	62,3
	Oberfl.	1450	1450	1450	81,66	81,66	81,66	2,113	1,68	0,747	58,2	60,3	69,0

Für den Fall 4 ist eine kleinere Modellwanne mit den Abmessungen von $B = 8,8 \text{ cm}$ und $H = \frac{B}{2} = 4,4 \text{ cm}$ ($d = 1,0$) gewählt worden. Das entspricht einem Maßstab von 1:13,29. Die Modelltemperaturwerte lassen sich mit Hilfe der Gleichung (2) bestimmen. Nach der Festlegung der Temperaturwerte des Prototyps werden die den Temperaturen entsprechenden Viskositätswerte aus dem Bild 4 bestimmt und die Gleichung (2) eingesetzt. So erhält man die Modellviskositätswerte, und aus dem Bild 2 lassen sich dann die Modelltemperaturen bestimmen. In der Tabelle 2 und Bild 6 sind die nach Gleichung (2) ausgerechneten Modelltemperaturwerte für jeweils fünf gleiche Abstände vom Boden der Wanne zur Glasoberfläche zu entnehmen.

Nach Bestimmung der Modelltemperaturwerte folgt die Überprüfung der Rayleigh-Zahlen der einzelnen Fälle. Da die theoretisch berechneten Strömungsverhältnisse ausschließlich mit der Rayleigh-Zahl charakterisiert werden, scheint es sinnvoll zu sein, die Modellfähigkeit unter Anwendung der Gleichungen (1) und (5) zu prüfen, wobei in Teil II dieser Veröffentlichung, die die dreidimensionale Strömung unter Zugrundelegung der in der Praxis gemessenen Temperaturwerte enthält, auch die Gleichungen (3) und (4) verwendet werden.

Ein Maß für die Genauigkeit der Ähnlichkeitsberechnung bei der Nachahmung solcher Fälle, ist die Übereinstimmung der Rayleigh-Zahlen zwischen Modell und Prototyp.

Für die Fälle 3 und 4 ist als Bezugstemperatur der Zähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit $\vartheta_{\eta 0} = 1200 \text{ °C}$, $\vartheta_{a 0} = 1120 \text{ °C}$ und im Fall 5 $\vartheta_{\eta 0} = 1270 \text{ °C}$, $\vartheta_{a 0} = 1290 \text{ °C}$ gewählt worden. Zunächst werden die diesen Bezugswerten entsprechenden Modelltemperaturen nach der Gleichung (2) ausgerechnet. Die notwendigen Stoffwerte der Modellflüssigkeit für die Rayleighzahl werden aus diesen Modelltemperaturen analog entnommen.

2.1. Fall 3

$$Ra_p = 1 \cdot 10^6,$$

$$Ra = g \cdot \left| \frac{d\rho}{d\vartheta} \right| \cdot \Delta\vartheta_{\max} \frac{1}{\eta_0 \cdot a_0} B \cdot H^2,$$

$$\vartheta_{\eta 0p} = 1200 \text{ °C} \cong \eta_{0p} = 1100 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cong \eta_{0m}$$

$$= 22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cong \vartheta_{\eta 0m} = 45 \text{ °C},$$

$$\vartheta_{a 0p} = 1120 \text{ °C} \cong \eta_{0p} = 0,727 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cong a_{0m}$$

$$= 42 \text{ °C} \cong a_{0m} = 6,05 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1},$$

$$g = 1000 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2},$$

$$\left| \frac{d\rho}{d\vartheta} \right|_m = 1,036 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} \text{ grad}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_{\max} = 20,2 \text{ °C},$$

$$Ra_m = 1,05 \cdot 10^6 \cong \text{Fehler} = 5\%.$$

2.2. Fall 4

$$Ra_p = 4 \cdot 10^5,$$

$$\vartheta_{\eta 0p} = 1200 \text{ °C} \cong \eta_{0p} = 1100 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cong \eta_{0m}$$

$$= 16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cong \vartheta_{\eta 0m} = 47 \text{ °C},$$

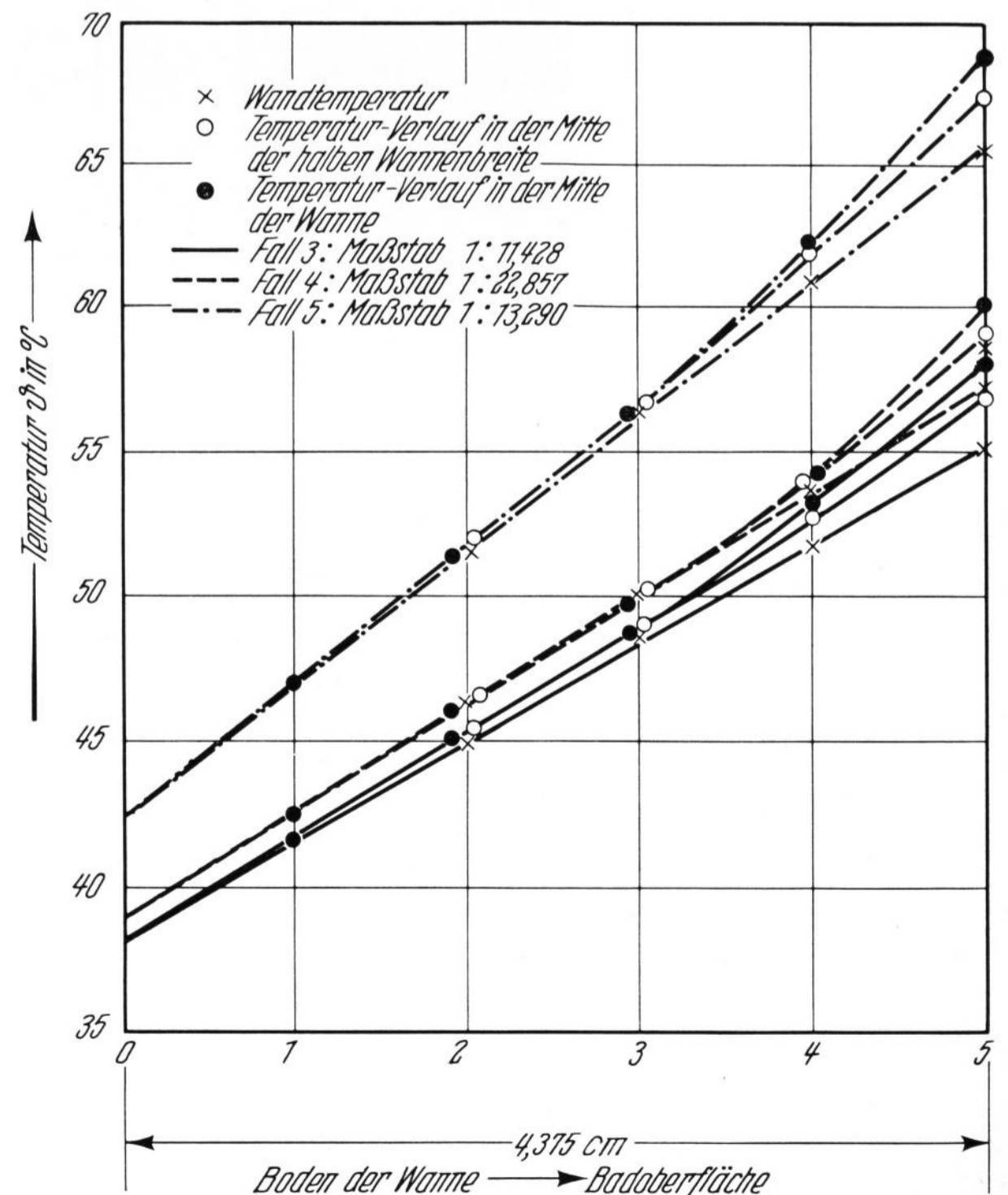


Bild 6. Modelltemperaturwerte in Abhängigkeit von der Badhöhe.

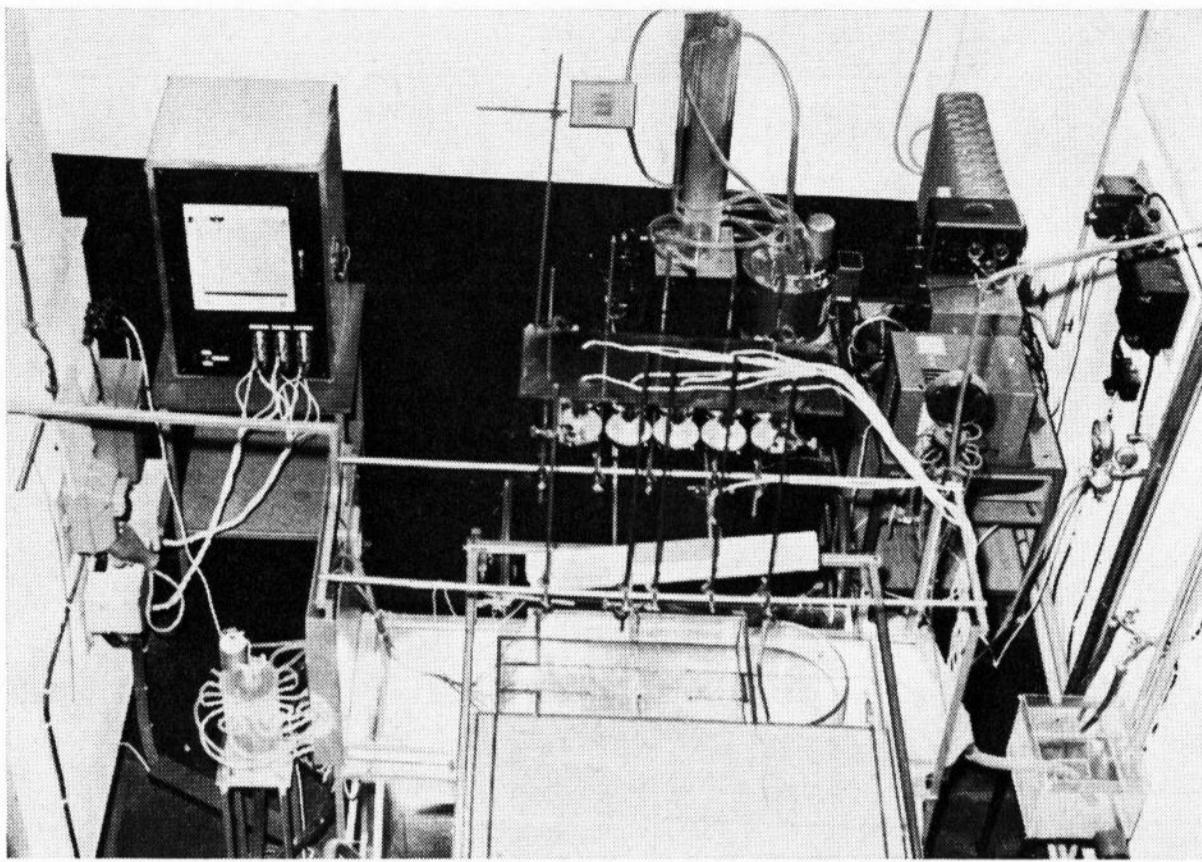


Bild 7. Gesamtübersicht der Versuchsanlage.

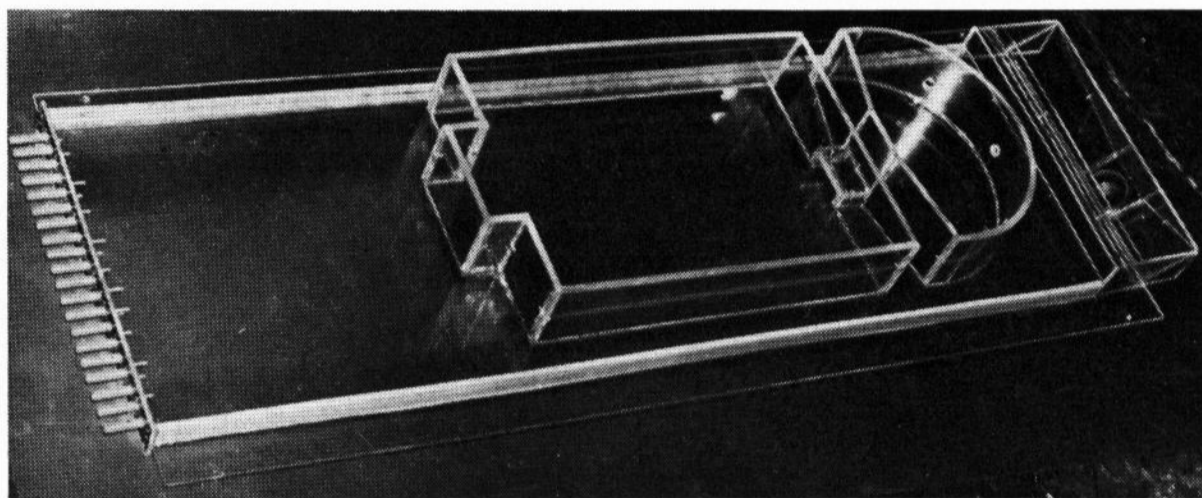


Bild 8. Durchsichtige Modellwanne aus Plexiglas.

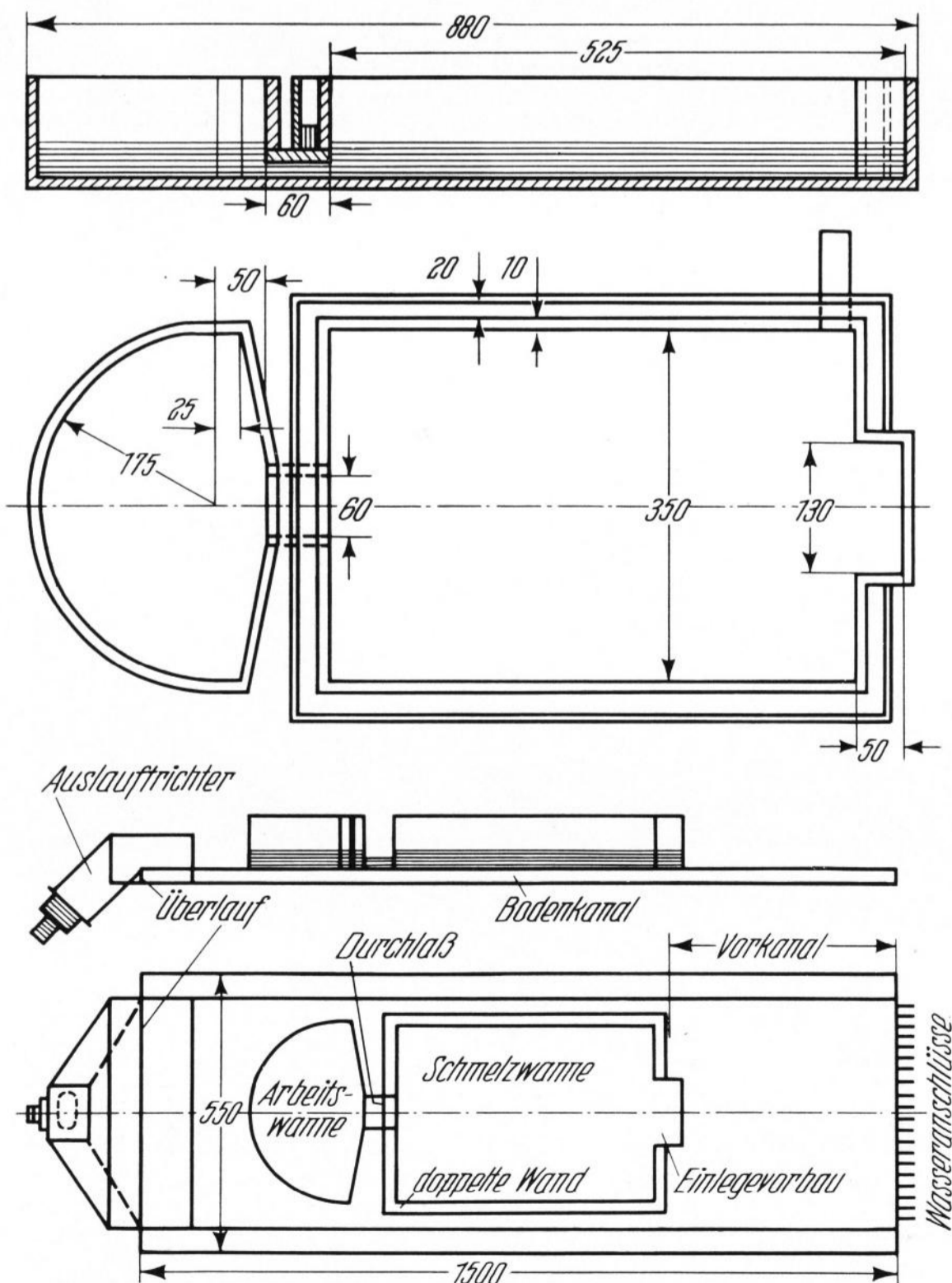


Bild 9. Schematische Darstellung der Modellwanne.

Maßangaben in mm.

Obwohl sich die Modelluntersuchungen in dieser Arbeit nur mit den Strömungsverhältnissen in der Schmelzwanne befassen, wurde das Modell zusätzlich mit Arbeitswanne und Durchlaß versehen, da bei der Fortsetzung der Untersuchungen auch die Entnahmestromung berücksichtigt wird.

$$\vartheta_{a0p} = 1120^\circ\text{C} \cong a_{0p} = 0,727 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cong \vartheta_{a0m} \\ = 43^\circ\text{C} \cong a_{0m} = 6,04 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1},$$

$$g = 1000 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2},$$

$$\left| \frac{d\varrho}{d\vartheta} \right|_m = 1,036 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} \text{ grd}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_{\max} = 21,3^\circ\text{C},$$

$$\text{Ra}_m = 3,89 \cdot 10^5 \cong \text{Fehler} = 2,75\%.$$

2.3. Fall 5

$$\text{Ra}_p = 8 \cdot 10^6,$$

$$\vartheta_{\eta 0p} = 1270^\circ\text{C} \cong \eta_{0p} = 620 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \eta_{0m} \\ = 3,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \vartheta_{\eta 0m} = 56,5^\circ\text{C},$$

$$\vartheta_{a0p} = 1290^\circ\text{C} \cong a_{0p} = 1,29 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cong \vartheta_{a0m} \\ = 59^\circ\text{C} \cong a_{0m} = 5,9 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1},$$

$$g = 1000 \text{ cm s}^{-2},$$

$$\left| \frac{d\varrho}{d\vartheta} \right|_m = 1,036 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} \text{ grd}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_{\max} = 26,5^\circ\text{C},$$

$$\text{Ra}_m = 8,2 \cdot 10^6 \cong \text{Fehler} = 2,5\%.$$

Diese Fehlerabweichungen sind gering und stellen eine sehr gute Näherung des Modells zum Prototyp dar.

3. Versuchsaufbau

In Bild 7 ist die gesamte Versuchsanlage zu sehen. Die Anlage setzt sich aus mehreren Teilapparaturen zusammen, die nach ihrer Art und Funktionen wie folgt beschrieben werden.

3.1. Modellwannenaufbau

Auf Grund der Ähnlichkeitsbetrachtung ist ein Modell aus Plexiglas im Maßstab 1:20 hergestellt worden, das aus Schmelzwanne, Arbeitswanne, Durchlaß und Speisern besteht. Bild 8 zeigt die Modellwanne. Die Abmessungen der Wanne sind aus Bild 9 zu ersehen.

Boden und Seitenwände der Wanne sind doppelwandig ausgeführt. Der entstehende Zwischenraum wird von Wasser durchströmt, dessen Temperatur unabhängig voneinander eingestellt werden kann. Damit ist es möglich, das Temperaturfeld in der Modellflüssigkeit den Erfordernissen der Modellähnlichkeit entsprechend einzustellen. Eine gleichmäßige Strömung des Wassers im Boden wird dadurch erreicht, daß das Wasser durch 20 gleich große und in gleichen Abständen angebrachte Anschlüsse in den Bodenkanal fließt. Eine Vorstrecke mit einer Länge von etwa 50 cm dient zur Ausbildung einer laminaren Wasserströmung. Der Bodenkanal ist breiter als die eigentliche Modellwanne gebaut worden, um den Einfluß der sich ausbildenden Grenzschicht auf die Kühlung der Wanne zu beseitigen.

Weiterhin fließt das Wasser nach der Kühlung des Wannenbodens über einen Überlauf, der zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Ablaufniveaus dient, in einen Auslauftrichter.

3.2. Temperaturmeßprinzip

Die Temperaturmessung in der Modellflüssigkeit ist von besonderem Interesse, da die Einhaltung der Ähnlichkeit der Großausführung und des Modells von der Einstellung der erforderlichen Temperaturwerte des Modells abhängt. Die Temperaturmessung in der Mo-

dellflüssigkeit ist andererseits mit gewissen Störungen der Strömung verbunden. Die Temperaturmessung in den zahlreichen Kontrollpunkten mit einem beweglichen Thermolement erfordert langwierige Messungen und beeinflusst den Strömungsverlauf der Schmelze. Aus diesen Gründen wurde die Temperaturmessung im Modell mit fest eingebauten Thermolementen vorgezogen. Hierfür dienten 48 Fe-Konst.-Miniaturthermolemente mit je einem Gesamtdurchmesser von 0,8 mm, die an verschiedenen Stellen des Bades fest angebracht wurden. Die Thermolemente verursachten keine nennenswerten Störungen des Strömungskreislaufes. Mit Hilfe von drei Thermolementen-Meßstellenumschaltern wurden die Modelltemperaturen kontinuierlich über zwei Vergleichsstellen-Korrektoren mit der Thermostatentemperatur von 50 °C auf einem Kompensationsschreiber registriert. Die Thermolemente wurden vor dem Einbau in einem Eichofen auf ihre Anzeigegenauigkeit geprüft. Es ist hier zu erwähnen, daß die Fehlerquellen, die gewöhnlich bei Temperaturmessungen mit Thermolementen vorhanden sind, auch hier auftreten.

3.3. Einrichtung zur Temperatureinstellung im Modell

Die Ergebnisse der Ähnlichkeitsbetrachtung erscheinen in Form von Temperaturfeldern für das Modell. Eine wichtige Forderung an eine sinnvolle Wiedergabe der Großausführung beruht auf der möglichst genauen Einstellung dieser Temperaturfelder. In Bild 10 ist die gesamte Versuchsanlage schematisch aufgezeichnet.

Durch einen doppelten, mit Warmwasser durchströmten Boden wird die Temperaturverteilung in der Modellschmelze von unten, durch Infrarotstrahlen von oben in der gewünschten Weise verändert. Die Strahlung der Infrarotstrahler kann durch einen Stelltransformator gesteuert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Heizwirkung der Strahler durch Veränderung ihrer Entfernung von der Badoberfläche zu variieren. Ein Spannungskonstanthalter gleicht eventuelle Netzspannungsschwankungen während des Versuches aus. Zusätzlich wurde die Raumtemperatur in dem Versuchszeitraum möglichst konstant gehalten. Aus Bild 10 ist

die schematische Darstellung der Wärmezufuhr auf das Schmelzbad ersichtlich. Die Wassertemperatur im Bodenkanaal kann beliebig eingestellt und automatisch geregelt werden. Aus einem Wassersammelbehälter (s. Bild 10) strömt das Warmwasser mit Hilfe einer selbstansaugenden Kreiselpumpe durch einen Durchlauferhitzer, ein Dosiergerät und einen Wasserverteiler in den Bodenkanaal. Nach der Kühlung des Bodens der Modellwanne fließt das Wasser über einen Überlauf wieder zurück in den Wassersammelbehälter (geschlossener Kreislauf). Das Wasser wird mit einem Durchlauferhitzer erwärmt, der an einem Säulen-Stelltransformator angeschlossen ist. Zur automatischen Regelung der Wassertemperatur dient ein Kontaktthermometer, das über ein Relais und ein Schütz den Transformator und damit auch den Durchlauferhitzer in Betrieb setzt. Ein Rückschlagventil verhindert das Zurückfließen des Wassers. Bei niedrigen Wassertemperaturen steigt die Wassertemperatur durch innere Reibungsverluste in der Pumpe. Ein hinter dem Sammelbehälter angebrachter Wasserkühler erlaubt, diese Wirkung auszuschalten. Die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers wird durch einen mit einem Rotameter und einem Schieber versehenen Nebenkreislauf geregelt. Das Dosiergerät dient zur Entkalkung des Wassers. Außerdem sind die Seitenwände der Modellwanne auch mit einer doppelten, mit Warmwasser durchströmten Wand versehen, die es gestattet, die Wasserisolation der Seitenwände und damit die notwendige Randtemperaturen nachzuahmen. Da die Wassertemperaturen in diesem Kreislauf wesentlich höher als im Bodenkanaal sein müssen, ist ein Ultrathermostat eingeschaltet, der die Regelung der erforderlichen Warmwassertemperaturen ermöglicht. Dadurch kann die Wärmezufuhr so gewählt werden, daß beliebige Temperaturverteilungen in senkrechter und waagerechter Richtung eingestellt werden können, und damit eine der Wirklichkeit entsprechende Temperaturverteilung in der Modellwanne erzielt wird.

3.4. Fotografische Aufnahmetechnik

Zur Sichtbarmachung der Strömung in der Modellflüssigkeit wird eine Farbspur gesetzt. Mit einer Spezialkamera, die einen Elektromotor zum Transport des Films und einen Auslösemagneten besitzt, ist die Mög-

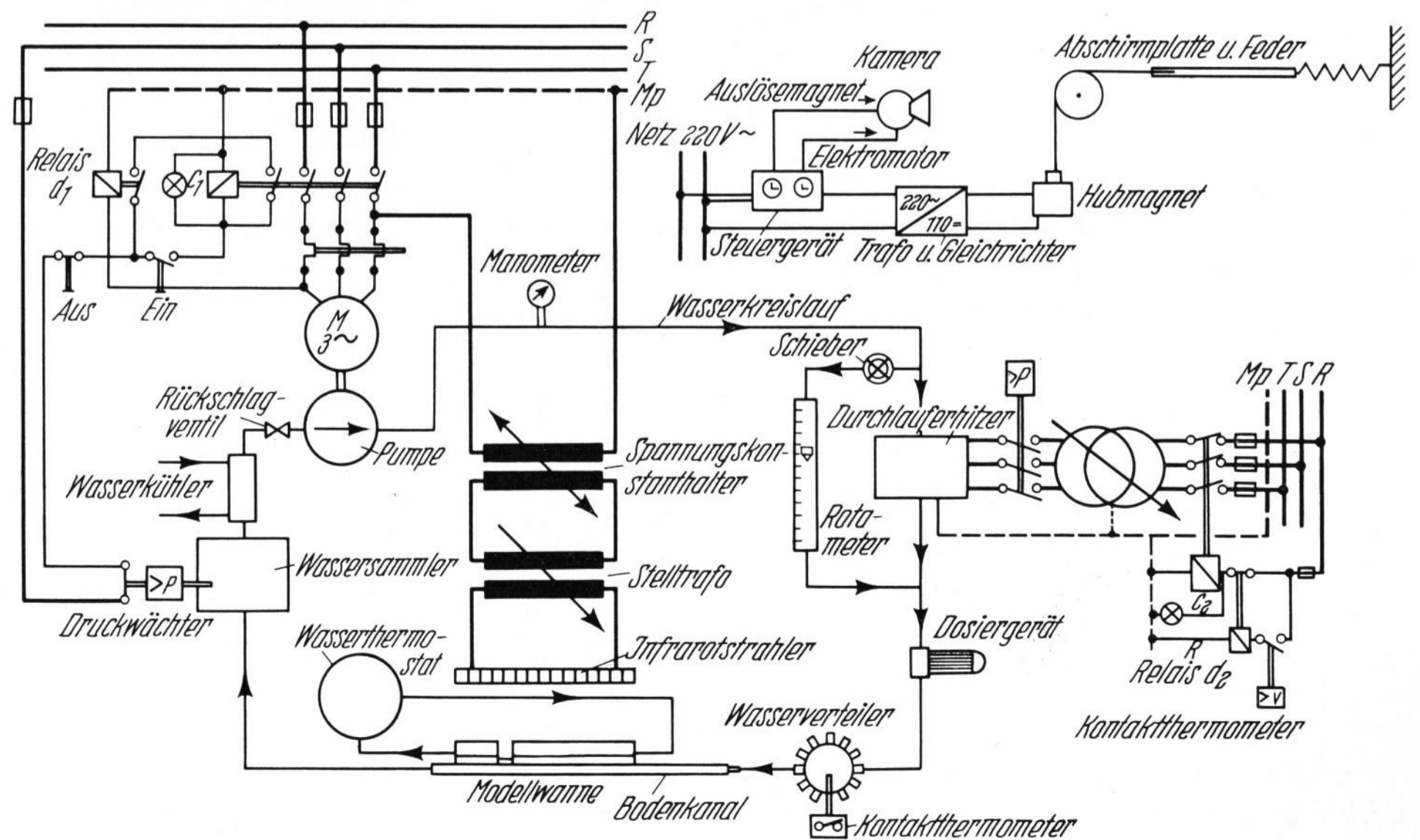
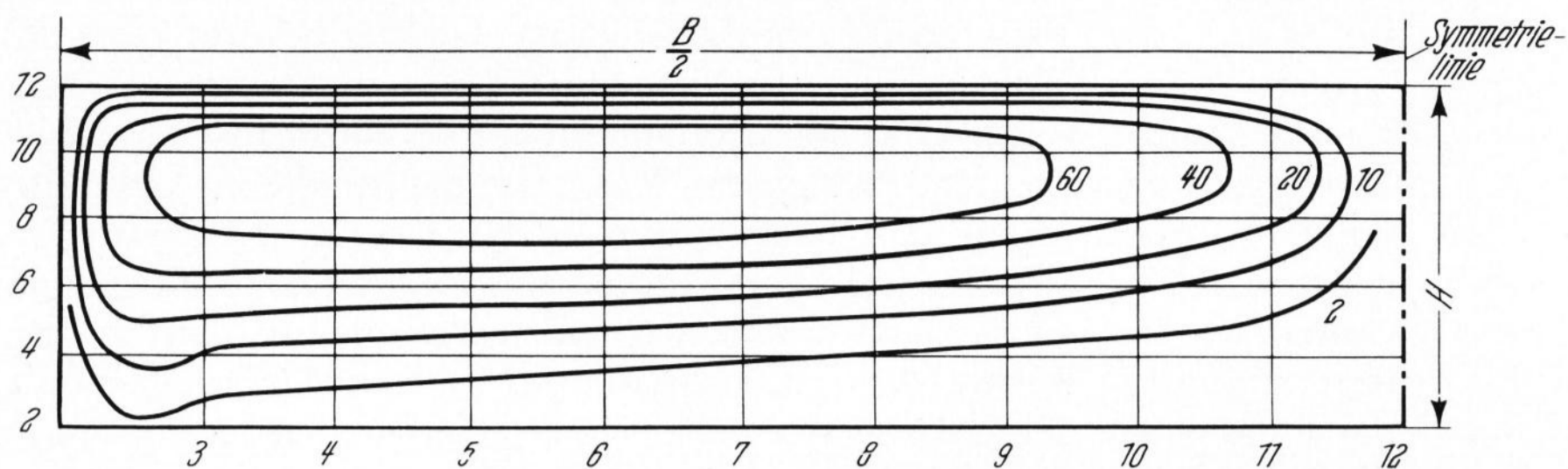
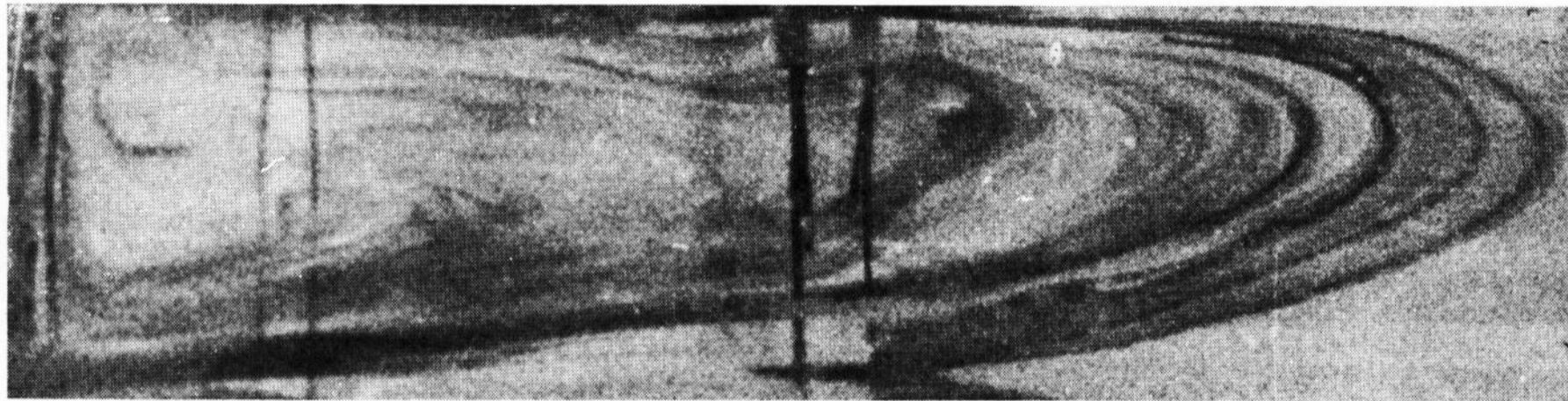


Bild 10. Schematische Darstellung der Versuchsanlage.

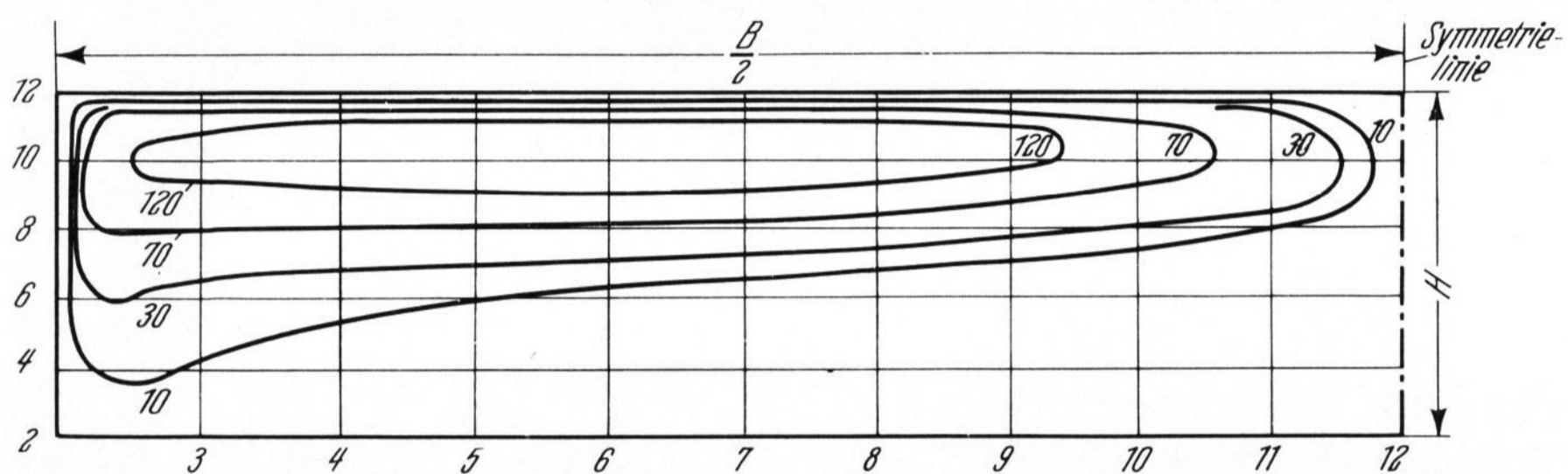


Bilder 11 a und b. Zweidimensionale Potentiallinienfelder (Stromlinienfelder) für Fall 3: $Ra = 10^6$, $d = H/(B/2) = 0,25$, $H = 50$ cm, $B = 400$ cm,

a) Rechnerisches Potentiallinienfeld (Stromlinienbild),

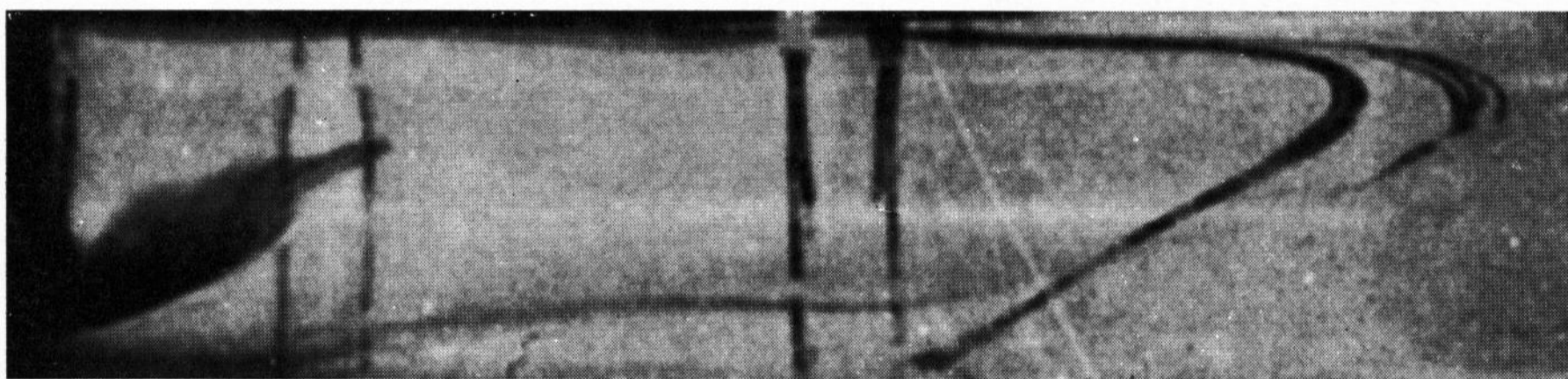


b) Modell-Stromlinienbild. Aufnahme nach 10,5 h, Modellmaßstab 1:11,428,



Bilder 12 a bis c. Zweidimensionale Potentiallinienfelder (Stromlinienfelder) für Fall 5: $Ra = 8 \cdot 10^6$, $d = H/(B/2) = 0,25$, $H = 100$ cm, $B = 800$ cm,

a) Rechnerisches Potentiallinienfeld (Stromlinienbild),



b) Modell-Stromlinienbild, Aufnahme nach 2,5 h, Modellmaßstab 1:22,857,



c) Modell-Stromlinienbild, Aufnahme nach 7,5 h, Modellmaßstab 1:22,857.

lichkeit gegeben, die Stromlinien über ein Steuergerät in beliebigen Zeitabständen aufzunehmen. Zwei Spiegel, die unter dem Modell und an der Seite des Modells angebracht sind, gestatten es, gleichzeitig senkrecht und waagrecht durch die Wanne zu sehen und damit die Strömung dreidimensional beobachten und fotografieren zu können.

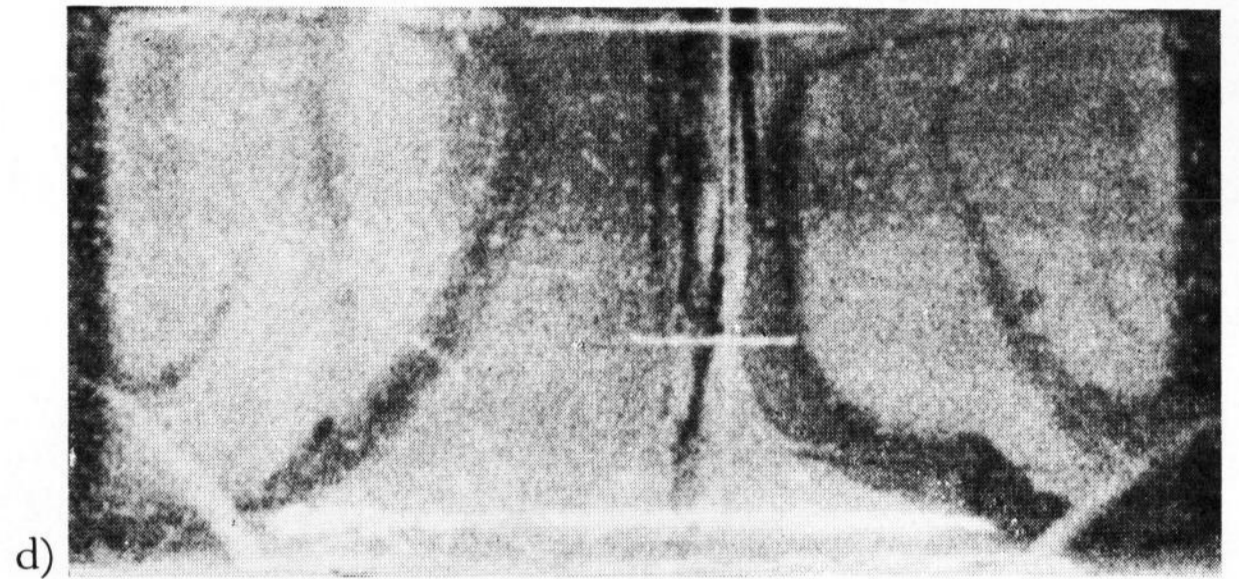
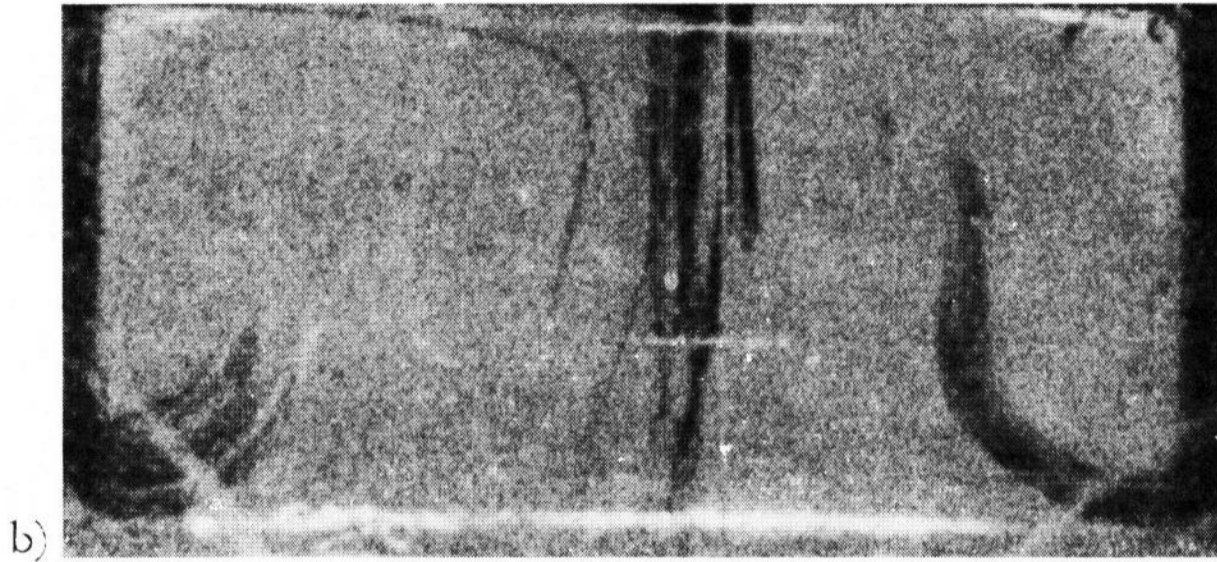
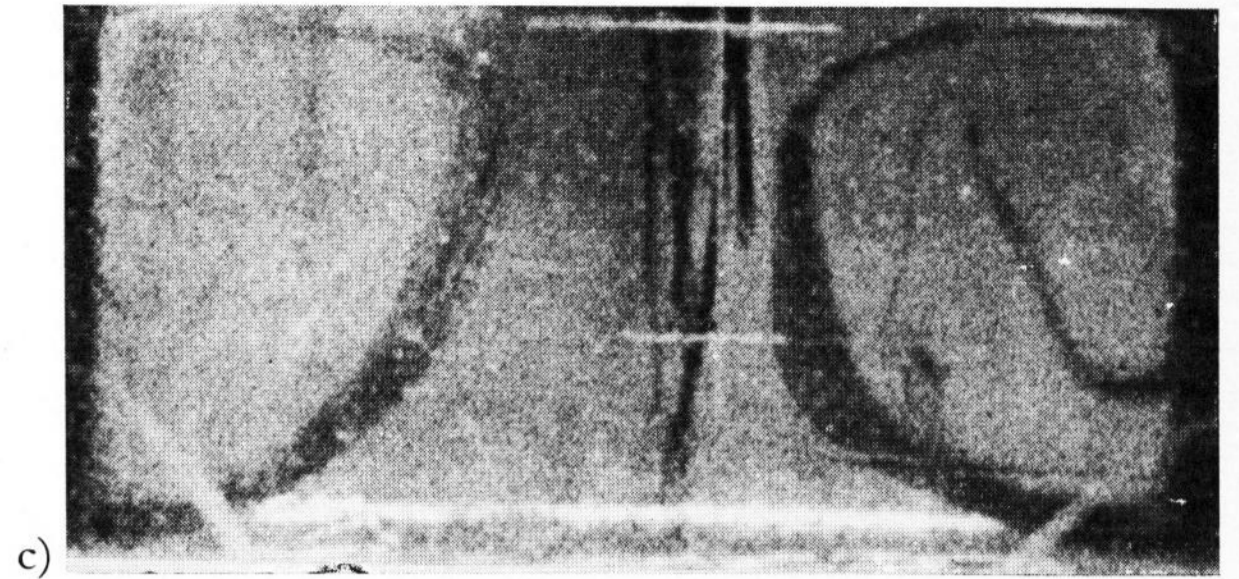
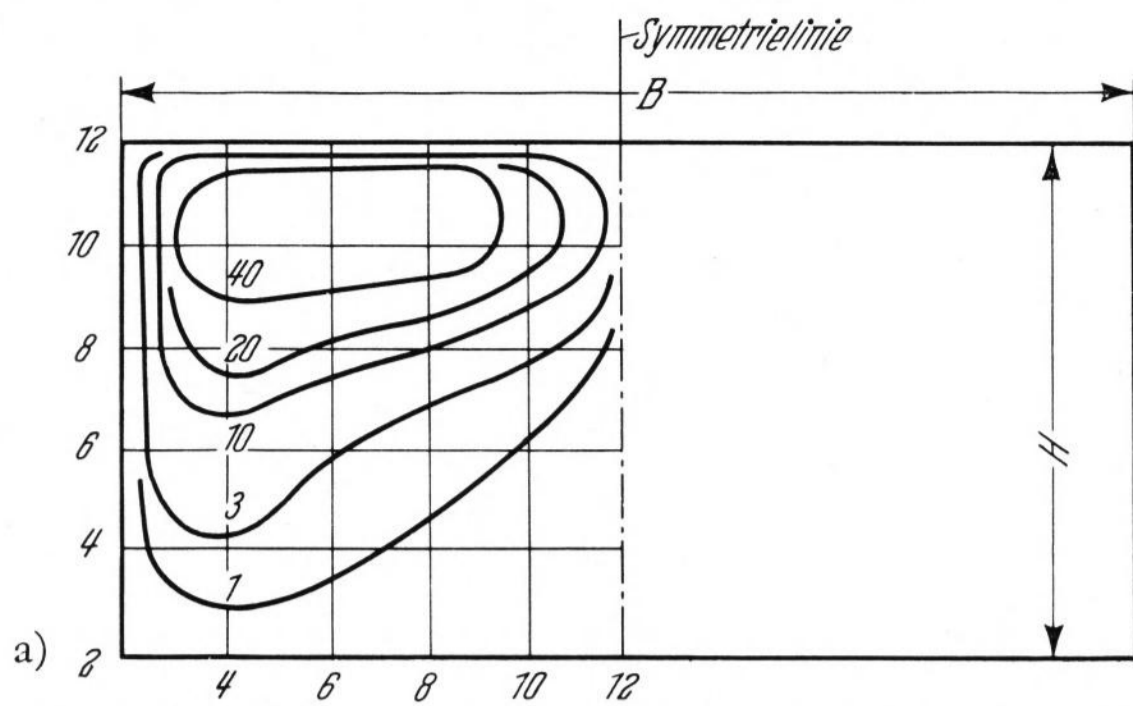
Zur Abschirmung der Strahlerreflektion durch den Spiegel in die Kamera wird eine Abschirmplatte benutzt, die außerhalb des Strahlbereiches der Strahler liegt und mit Hilfe eines Hubmagneten kurz vor der Aufnahme automatisch zwischen Strahler und Modellwanne vorgezogen wird und eine einwandfreie Aufnahme durch den Spiegel ermöglicht. Der 10 cm lange Hubweg des Magneten wird über drei eingebaute Räder auf 50 cm übersetzt. Ein Gleichrichter und ein Transformator liefern über das Steuergerät den notwendigen Gleichstrom des Hubmagneten 1,3 s vor Beginn der Aufnahme.

Zwei gespannte Federn sorgen für die Rückführung der Abschirmplatte nach der Beendigung der Aufnahme. In Bild 10 sind die Abschirmplatte, der Hubmagnet und die Übersetzungsräder zu erkennen.

3.5. Sicherheitsmaßnahmen

Um eine Zerstörung der Modellwanne durch Störungen zu verhindern, wurden einige Sicherheitsmaßnahmen getroffen. Unter anderem galt es, eine Überhitzung des Modells, insbesondere des Bodens, zu vermeiden, da sonst die zulässige Temperaturgrenze des Plexiglasses überschritten wird. Ein Druckwächter, der in dem Wassersammelbehälter eingebaut war (siehe Bild 10), schaltete bei auftretendem Wassermangel im Kühlkreislauf die Anlage automatisch über ein Relais aus.

Im Falle einer Stromunterbrechung wurde ebenfalls die gesamte Anlage abgeschaltet und bei erneuter



Bilder 13a bis d. Zweidimensionale Potentiallinienfelder (Stromlinienfelder) für Fall 4:

$$Ra = 4 \cdot 10^5, d = H/(B/2) = 1, B = 116,98 \text{ cm}, H = 58,49 \text{ cm},$$

a) Rechnerisches Potentiallinienfeld (Stromlinienbild),

b) Modell-Stromlinienbild, Aufnahme nach 1,5 h, Modellmaßstab 1:13,3,

c) Modell-Stromlinienbild, Aufnahme nach 3,0 h, Modellmaßstab 1:13,3,

d) Modell-Stromlinienbild, Aufnahme nach 3,5 h, Modellmaßstab 1:13,3.

Stromzufuhr blieb dies weiterhin abgeschaltet, da sonst durch die zwischenzeitliche Abkühlung die Weiterführung des Versuches nicht sinnvoll ist.

4. Versuchsdurchführung

Nach der Berechnung der entsprechenden Modelltemperaturfelder aus den Glasschmelztemperaturen von VON PESCHKE (s. Bild 6) bestand die erste Aufgabe darin, die Modellwanne, die mit der Clophen A 60 gefüllt war, die Modelltemperaturwerte möglichst genau einzustellen. Mit der Regelung der Heizleistung der Infrarotlampen und Wassertemperatur im Bodenkanal und in den Seitenwänden konnten die Modelltemperaturfelder der Fälle 3, 4 und 5 (s. Tabelle 2) gut eingestellt werden. Auf dem Kompensationsschreiber wurden die eingestellten Temperaturen ständig auf ihre Konstanz hin geprüft. Nach dem Erreichen des Temperaturbeharrungszustandes wurde stark rot gefärbtes Clophen mit einer Injektionspritze in verschiedene Bereiche des Modellbades eingegeben und der Strömungsverlauf der Farbspuren fotografiert. Der Dichteunterschied des gefärbten und nicht gefärbten Clophens konnte mit Hilfe der Temperatur der eingespritzten Masse weitgehend angeglichen werden.

Durch das Wiederholen der Versuche unter gleichen Bedingungen wurden die Strömungsergebnisse auf ihre Reproduzierbarkeit geprüft. Die Versuchsdauer einer solchen Untersuchung betrug etwa 10 bis 15 h. Die zweidimensionale Strömung im Modell senkrecht zu dessen Längsachse konnte dadurch erzielt werden, daß infolge entsprechender Beheizung und Randkühlung des Bades parallel zur Längsachse überall Isothermen verliefen. Die Konvektionsströmung ergibt sich also

durch das Wärmegefälle in Schwerkraft und von der Mitte her zu den Wannenseiten. Durch einen an der Seite der Wanne angebrachten Spiegel werden die Strömungsbilder aufgenommen.

5. Versuchsergebnisse

Die Modellwanne wurde zunächst so eingestellt, daß die drei in Abschnitt 2. genannten Fälle von der experimentellen Seite her geprüft werden konnten. Dabei wurde die eingestellte Querströmung erfaßt und mit den rechnerischen Ergebnissen verglichen. Hierbei ist es gelungen, eine gute Übereinstimmung der erzielten Modellergebnisse mit den rechnerischen Ergebnissen zu finden, woraus hervorgeht, daß das Modell der Wirklichkeit, soweit diese durch die Rechnung von VON PESCHKE wiedergegeben wird, befriedigend ähnlich ist und die in der Ähnlichkeitsbetrachtung zugrunde gelegten Vereinfachungen zulässig sind.

Das Ergebnis der Nachahmung des Falles 3 erhält man aus den Bildern 11a und b. Hierbei beträgt die Rayleigh-Zahl $Ra = 10^6$ und $d = 0,25$; das entspricht bei Annahme der Stoffwerte des grünen Flaschglases einer Wannbreite von 400 cm und Badtiefe von 50 cm. Der Modellmaßstab ist dabei 1:11,428.

Die Schichtdicke der Oberflächenströmung beträgt nach den rechnerischen Werten 27% und nach den Modellergebnissen 30% der Badtiefe. Die Flüssigkeit fließt auf Grund des Wärmegefälles von der Mitte der Wanne zu den Seitenwänden. Nach dem Erreichen der Seitenwände strömt die Schmelze nach unten zum Wannboden und dann zurück zu der Mitte der Wanne. Auf diese Weise ergeben sich die Stromwalzen beiderseits des Quellpunktes. Den 10,5 Modellstunden ent-

sprechen nach der Gleichung (7) etwa 35,5 Betriebsstunden der Großausführung.

Die Auswirkung einer Verdoppelung der Wannendimensionen auf die Strömungsstruktur ist den Bildern 12 a bis c (S. 94) zu entnehmen. Hierbei ist eine Verkleinerung der Schichtdicke der Oberflächenströmung zu erkennen. Bei der Rayleigh-Zahl $Ra = 8 \cdot 10^6$ und $d = 0,25$ — d. h. $H = 100$ cm, $B = 800$ cm — beträgt die rechnerische Schichtdicke der Oberflächenströmung 20% und die experimentell im Modell erhaltene 22% der Badtiefe. Den 2,5 und 7,5 Modellstunden entsprechen etwa den 12 und 36 Betriebsstunden der Großausführung.

In dem Extremfall 4 ist $Ra = 4 \cdot 10^5$ und $d = 1$; das bedeutet $H = 58,49$ und $B = 116,98$ cm. Es ist aus den Bildern 13 a bis d (S. 95) zu ersehen, daß eine gute Ähnlichkeit zwischen Modell und Prototyp vorhanden ist. Aus dem Modellmaßstab von 1:13,3 läßt sich entnehmen, daß den 1,5; 3,0 und 3,5 Modellstunden etwa 5,5; 11 und 11,8 Betriebsstunden der Großausführung entsprechen.

Es ist zu erwähnen, daß auf Grund der für die Nachahmung dieser zweidimensionalen Fälle relativ niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Modellflüssigkeit und der speziellen Temperaturverhältnisse in den rechnerischen Fällen sich die Lage des maximalen Potentials im Modell zu der Seitenwand hin verschiebt. Geringe Abweichungen der Ähnlichkeit beruhen zum Teil auch auf der schwierigen Einstellung der erforderlichen Temperaturverhältnisse im Modell.

Nach dem Vergleich der rechnerischen Ergebnisse mit den aus den Modellversuchen erhaltenen ist anzunehmen, daß das Modell für die Durchführung der weiteren Untersuchungen unter Anwendung der in der Praxis gemessenen Temperaturen geeignet ist und die

erzielten Ergebnisse im Modell auf den Prototyp übertragen werden können.

6. Zusammenfassung

Es wurde ein Modell mit einem mit Warmwasser durchströmten doppelten Boden und einer ebenfalls mit Warmwasser durchströmten doppelten Wand aus Plexiglas hergestellt. Als eine passende Modellflüssigkeit, die den Forderungen der Ähnlichkeitsbetrachtung entspricht, erwies sich ein flüssiger Kunststoff, Clophen A 60, der zwischen 40 und 70 °C eine Zähigkeitskurve besitzt, welche der von grünem Flaschenglas zwischen 1050 °C und 1500 °C ähnlich ist.

In Form einer Ähnlichkeitsbetrachtung wurden die Abmessungen und die Temperaturverhältnisse der Modellwanne entsprechend der Glasschmelze festgelegt.

Es wurde eine gute Übereinstimmung der rechnerischen zweidimensionalen Strömungen mit den Modellergebnissen erzielt, was vermuten läßt, daß das Modell der Wirklichkeit befriedigend ähnlich war und die in der Ähnlichkeitsbetrachtung zugrunde gelegten Vereinfachungen zulässig waren.

In einem folgenden Teil II werden neben der thermisch bedingten dreidimensionalen Konvektionsströmung (analog den experimentell gemessenen Temperaturwerten die Überlagerung der thermischen und mechanischen Konvektionsströmung behandelt.

Die Arbeit wurde mit finanzieller Unterstützung der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt (Main), und der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, durchgeführt. Beiden Vereinigungen sei hier für die gewährte Hilfe bestens gedankt.

7. Literatur

- [1] SPITZ, T. und HLINKOVA, J.: Blasen von geschmolzenem Glas. (Orig. tschech.) *Věda výzkum prum. sklárském* **8** (1963) S. 111—126. [Ref. Glastechn. Ber. **39** (1966) S. 27.]
- [2] SCHILD, A.: Studien über thermische Wannenströmungen an Hand von Modellversuchen. *Glastechn. Ber.* **11** (1933) S. 305—314.
- [3] SAWAI, I.: Homogenization of glass in a tank furnace. *Proc. Internat. Comm. Glass* **1** (1954) S. 96—109. [Ref. Glastechn. Ber. **29** (1956) S. 368.]
- [4] SAWAI, I., TAKAHASHI, K. und JINNO, H.: Studies on glass tank furnaces: role of the convection currents. *Symposium sur l'affinage du verre, Paris 1955. Compte rendu.* S. 512—556. [Ref. Glastechn. Ber. **31** (1958) S. 63.]
- [5] KUNUGI, M., TAKAHASHI, K. und SAWAI, I.: Studies on flow and mixing of glass in tank furnaces by model techniques. In: *Advances in glass technology.* New York: Plenum Press 1962. S. 165—174. [Ref. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 197.]
- [6] VELEV, D. S.: Modellmäßige Untersuchung der Gasrührung in der Glaswanne. (Orig. russ.) *Steklo i Keram.* **16** (1959) Nr. 8, S. 13—16. [Ref. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 429.]
- [7] NARUSE, A.: Studies on throat current of bridge-wall tank by tracer tests with a model. *Glastechn. Ber.* **32 K** (1959) S. IV/20—29.
- [8] KRUSZEWSKI, S.: A study on models of the effects of operation and design on the glass flow in tank furnaces. *J. Soc. Glass Technol.* **41** (1957) S. 259 T—275 T. [Ref. Glastechn. Ber. **31** (1958) S. 444.]
- [9] GREENE, C. H.: Dimensional analysis. *Glass Ind.* **42** (1961) S. 632—635, 663—664. [Ref. Glastechn. Ber. **35** (1962) S. 438.]
- [10] TRIER, W.: Zusammenhang zwischen Temperaturfeld und Strömungsfeld bei freier Konvektion in Glaschmelzen. *Glastechn. Ber.* **38** (1965) S. 282—292.
- [11] PESCHKE, J. VON: Berechnung von Konvektionsströmungen, die beim Schmelzen von Glas auftreten. *Glastechn. Ber.* **38** (1965) S. 276—281.
- [12] BUCKINGHAM, E.: The use of models for studying the circulation in glass tanks. *J. Amer. ceram. Soc.* **20** (1937) S. 1—10. [Ref. Glastechn. Ber. **16** (1938) S. 400.]
- [13] PEYCHÈS, I.: Convection currents in a glass tank. *Glass Ind.* **29** (1948) S. 19—22, 42—44. [Ref. Glastechn. Ber. **24** (1951) S. 161.]
- [14] ANDREASEN, A. H. M.: Two model laws on highly viscous fluids. *J. Soc. Glass Technol.* **33** (1949) S. 163 bis 166.
- [15] MICHAELS, P. A.: Representation of currents in continuous tank furnaces by means of small-scale models. *J. Soc. Glass Technol.* **40** (1956) S. 470 T—481 T. [Ref. Glastechn. Ber. **31** (1958) S. 401.]
- [16] VELEV, D. S.: Einfluß der Konstruktion von Einbauten auf Glasströmungen. (Orig. russ.) *Steklo i Keram.* **16** (1959) Nr. 9, S. 11—16. [Ref. Glastechn. Ber. **35** (1962) S. 109.]
- [17] HAMILTON, J. C., ROUGH, R. R. und SILVERMAN, W. B.: Improved techniques for studying the design and operation of glass melting furnaces by means of models. In: *Advances in glass technology.* New York: Plenum Press 1962. S. 190—195. [Ref. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 197.]
- [18] SHIMADA, H.: Glasströmungen in elektrisch beheizten Modellwannen. *Glastechn. Ber.* **27** (1954) S. 151—159. (47008)