

DK 666.1.053.4

Experimentelle Untersuchungen beim kontinuierlichen Walzen von Glas

Von ETIENNE LEMAIRE ^{*}), Douai (Frankreich)

(Eingegangen am 21. November 1967)

Die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen beim kontinuierlichen Walzen von Glas, die sich nicht nur auf thermische Vorgänge beim Walzen, d. h. in der Maschine, beschränken, sondern auch die Temperatur- und Strömungsverteilung des Glases, im Zulauf und die Deformation des Glases während des Walzens im Zulauf enthalten, sind: 1. Der Teil des Glases der den Kern des Blattes bildet, durchquert die Walze praktisch ohne verformt zu werden. 2. Die beiden benachbarten Zonen, welche die Blattseite bilden, sind während des Walzens sowohl einer Verformung durch Scherkraft als auch durch Zug unterworfen. 3. Der auf die Flächeneinheit bezogene Wärmestrom im Kontakt Glas/Walze ist proportional der Quadratwurzel aus dem Quotienten von Walzenumfangsgeschwindigkeit und dem Produkt aus Walzendurchmesser und Kontaktwinkel und damit unabhängig von der Glasbanddicke.

1. Beschreibung der Anlage

Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche wurden von 1952 bis 1956 in einem Werk für Spezialglas eines nordfranzösischen Glashüttenwerkes an einer Gußglasanlage durchgeführt, auf der Ornamentglas, Eisblumenglas und Drahtglas hergestellt wurden. Erschmolzen wurde das Glas in einer stirnbeheizten, ölgefeuerten Glasschmelzwanne mit einer Glasbadtiefe von 1,5 m und einem Fassungsvermögen von 270 t (U-Flammenwanne).

Nach Durchströmen eines horizontalen Durchlasses, der 0,6 m tief in das Glasbad eintauchte, gelangte das Glas über einen vertikalen Kanal und einem Abschäumer in die Zulaufrinne der Maschine. Diese Zulaufrinne ist am Eintritt 0,8 m breit und erweitert sich kurz vor der Walzmaschine auf 1,55 m. Hinter dem Abschlußstein strömte das Glas mit einer Tiefe von 90 bis 50 mm etwa 0,4 m in einer offenen Rinne, bevor es in die Walzmaschine eintrat (Bilder 1 und 2). Erschmolzen wurde ein Glas der Zusammensetzung in Gew.-%: 72,9 SiO₂, 0,03 Fe₂O₃, 0,2 Al₂O₃, 13,0 CaO, 0,06 MgO, 13,3 Na₂O, 0,5 SO₃. Charakteristisch für das erschmolzene halbweiße

Glas war der relativ hohe Blasengehalt und die starke Inhomogenität. Erst nach Inbetriebnahme einer Querbrennerwanne mit vier Brennerpaaren gelang es, das Glas mit guter Qualität zu erschmelzen.

Die Walzmaschine selbst bestand aus zwei wassergekühlten Walzen mit 130 mm Durchmesser. Die Länge der Walzen betrug 1700 bzw. 1400 mm je nachdem, ob Ornament- oder Drahtglas oder Eisblumenglas gefertigt wurde. Im Gegensatz zur Unterwalze, die das Ornament trägt, war die Oberfläche der Oberwalze glatt und poliert. Die Achsen der beiden Walzen waren vertikal um 40 mm gegeneinander verschoben.

Hinter der eigentlichen Walzmaschine befand sich eine Rollenbahn, auch „Walztisch“ genannt, die aus elf z. T. austauschbaren und abgedeckten Walzen von 90 mm Durchmesser bestand. Diese Rollen dienten dazu, das noch plastische Glasband in den Kühlöfen zu führen (Bild 1).

^{*}) Vormaliges Mitglied des Forschungs- und technischen Entwicklungsdienstes der Société Boussois Souchon Neuvesel in Paris.

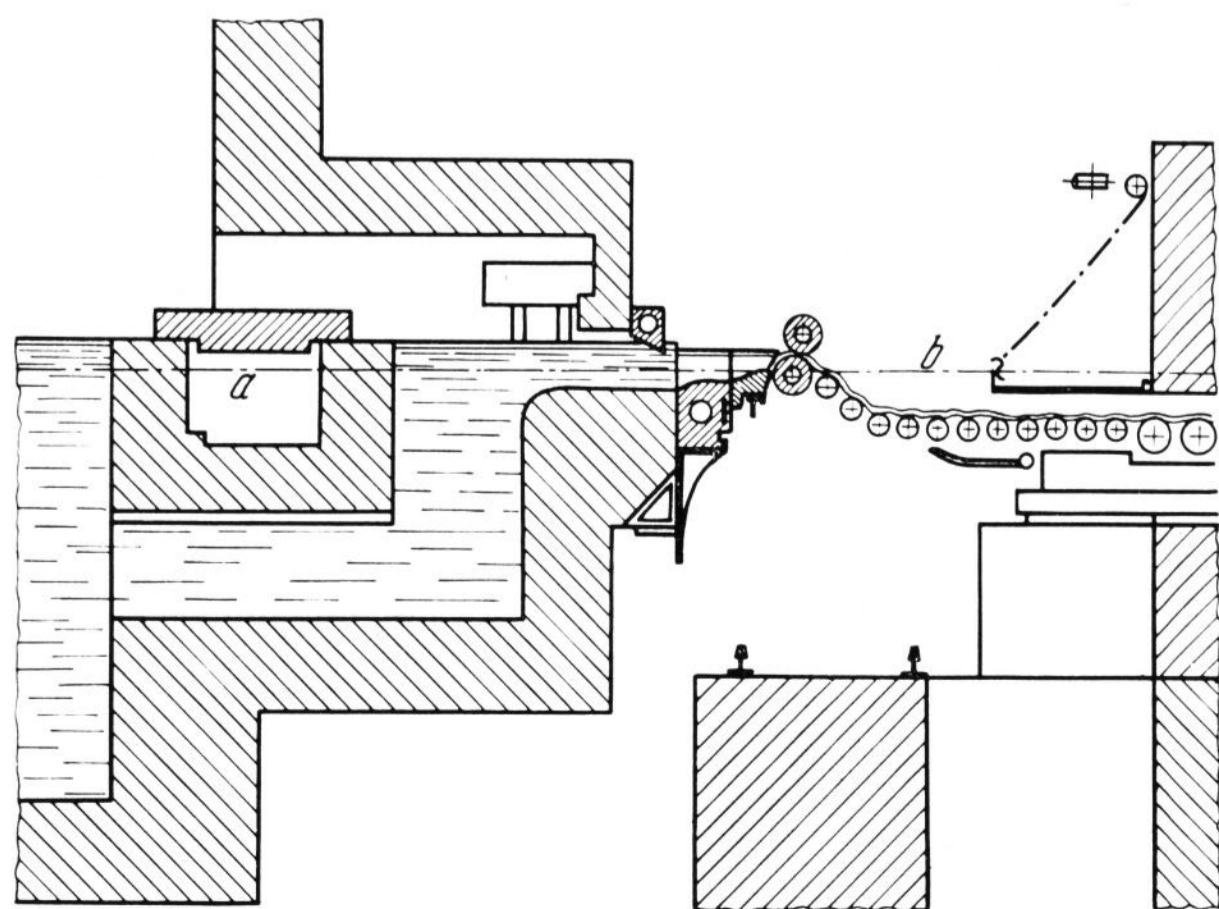


Bild 1. Längsschnitt durch den Durchlaß, die Arbeitswanne und den Zulauf zur Walzmaschine (Schnitt c—d).

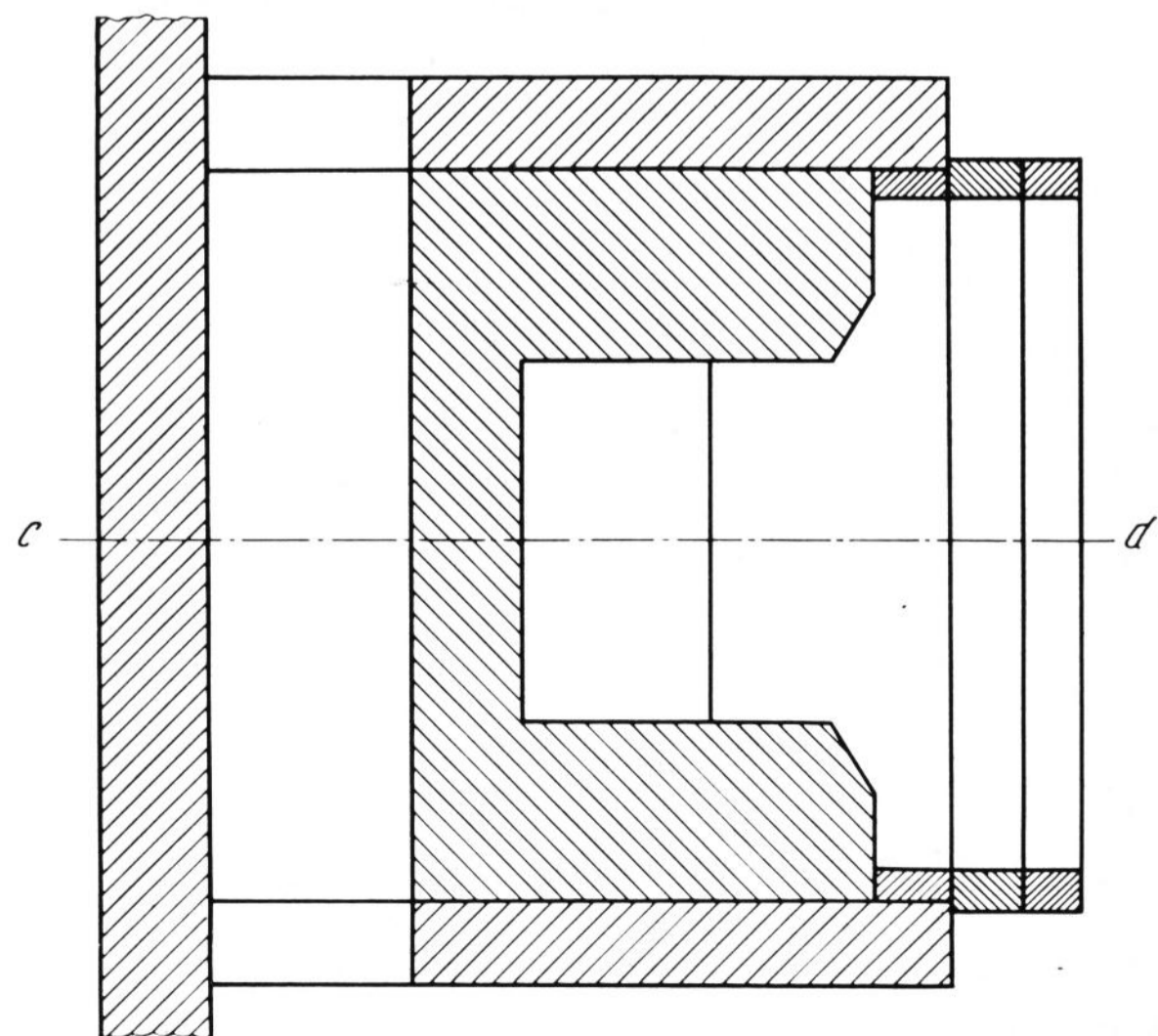


Bild 2. Querschnitt durch die Arbeitswanne und den Zulauf zur Walzmaschine (Schnitt a—b).

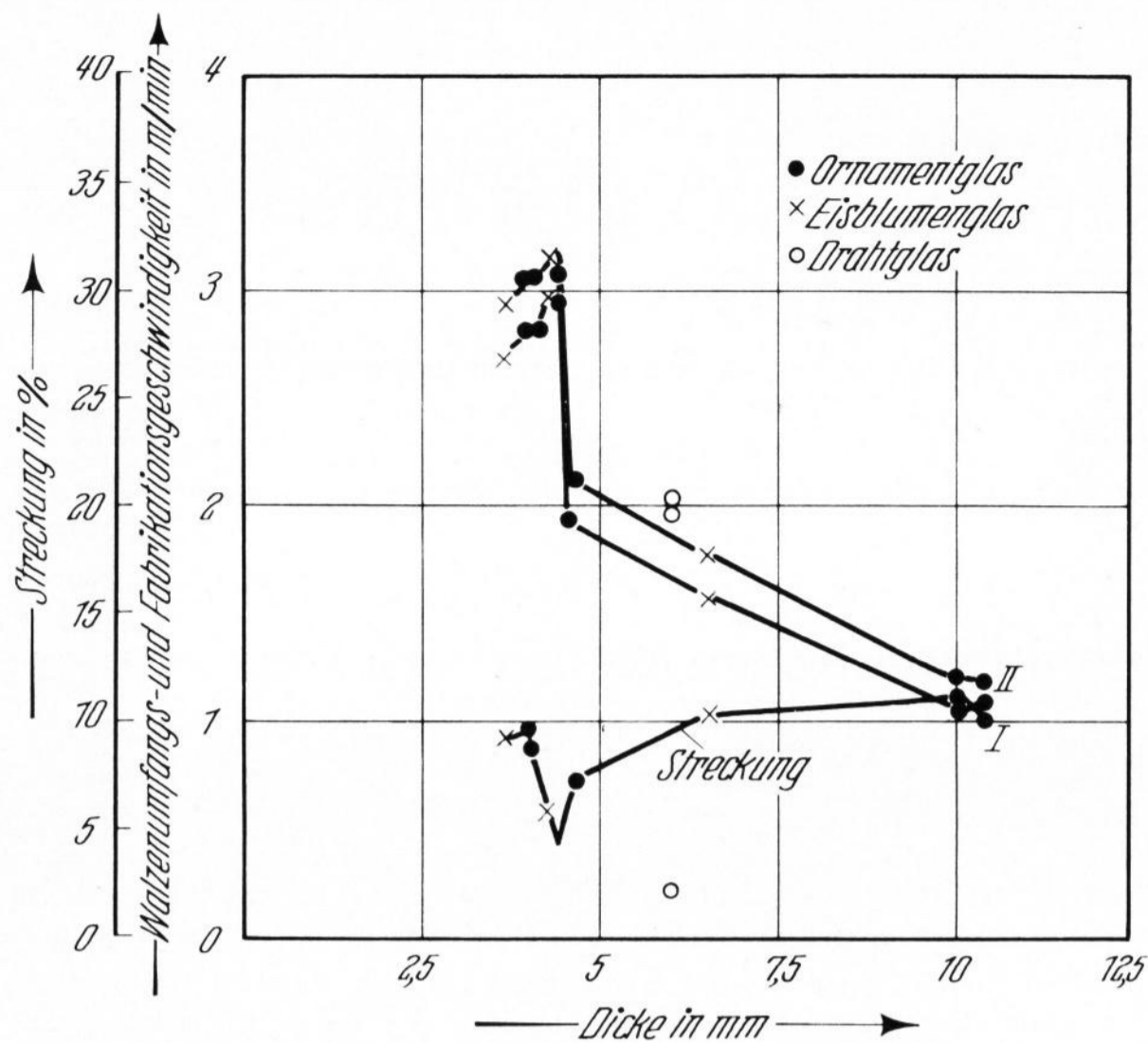


Bild 3. Walzenumfangsgeschwindigkeit, Fabrikationsgeschwindigkeit und Streckung in Abhängigkeit von der Dicke. Kurve I: Walzenumfangsgeschwindigkeit, Kurve II: Fabrikationsgeschwindigkeit.

Die Rollen des schrägen Teils der Rollenbahn drehten sich mit gleicher Umfangsgeschwindigkeit wie die Walzen; der horizontale Teil der Rollenbahn hatte dagegen die höhere Umfangsgeschwindigkeit der Rollen der Kühlbahn. Dadurch wurde auf diesem letzten Teil der Rollenbahn das Glasband bis zum Eintritt in den Kühllofen beschleunigt, und damit gestreckt. Die Rollen der Kühlbahn hatten einen Durchmesser von 130 mm. Die Walzen selbst waren aus halbhartem Stahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt oder aus Spezialstahl (Imphy). Die Kühlbohrung hatte 80 bzw. 82 mm Durchmesser und die Wasseraus- und -eintrittsöffnungen eine lichte Weite von 40 mm.

Hergestellt wurde auf dieser Maschine Ornamentglas mit einer Gesamtbreite von 1,63 m, Eisblumenglas mit 1,53 m und Drahtglas mit einer Gesamtbreite, die zwischen diesen beiden Werten lag. Die Dicke des Bandes variierte zwischen 3,5 und 10 mm; die Walzgeschwindigkeit bewegte sich entsprechend zwischen 1 m/min und 3 m/min. Die Streckung des Glasbandes

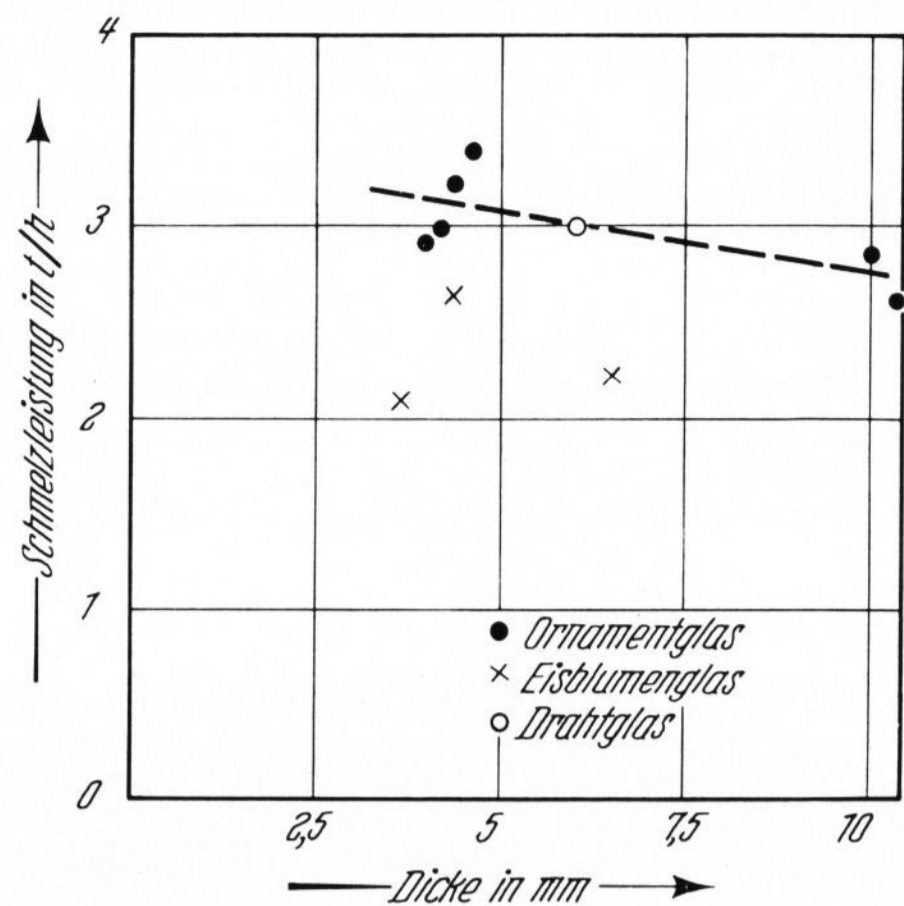


Bild 4. Schmelzleistung in Abhängigkeit von der Glasbanddicke.

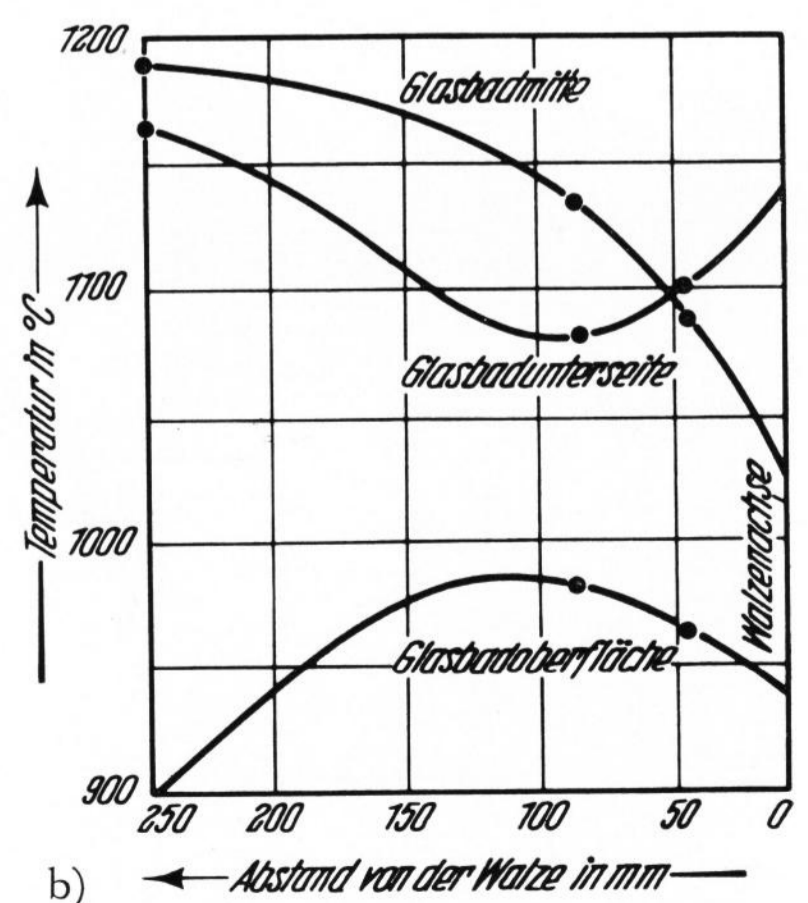
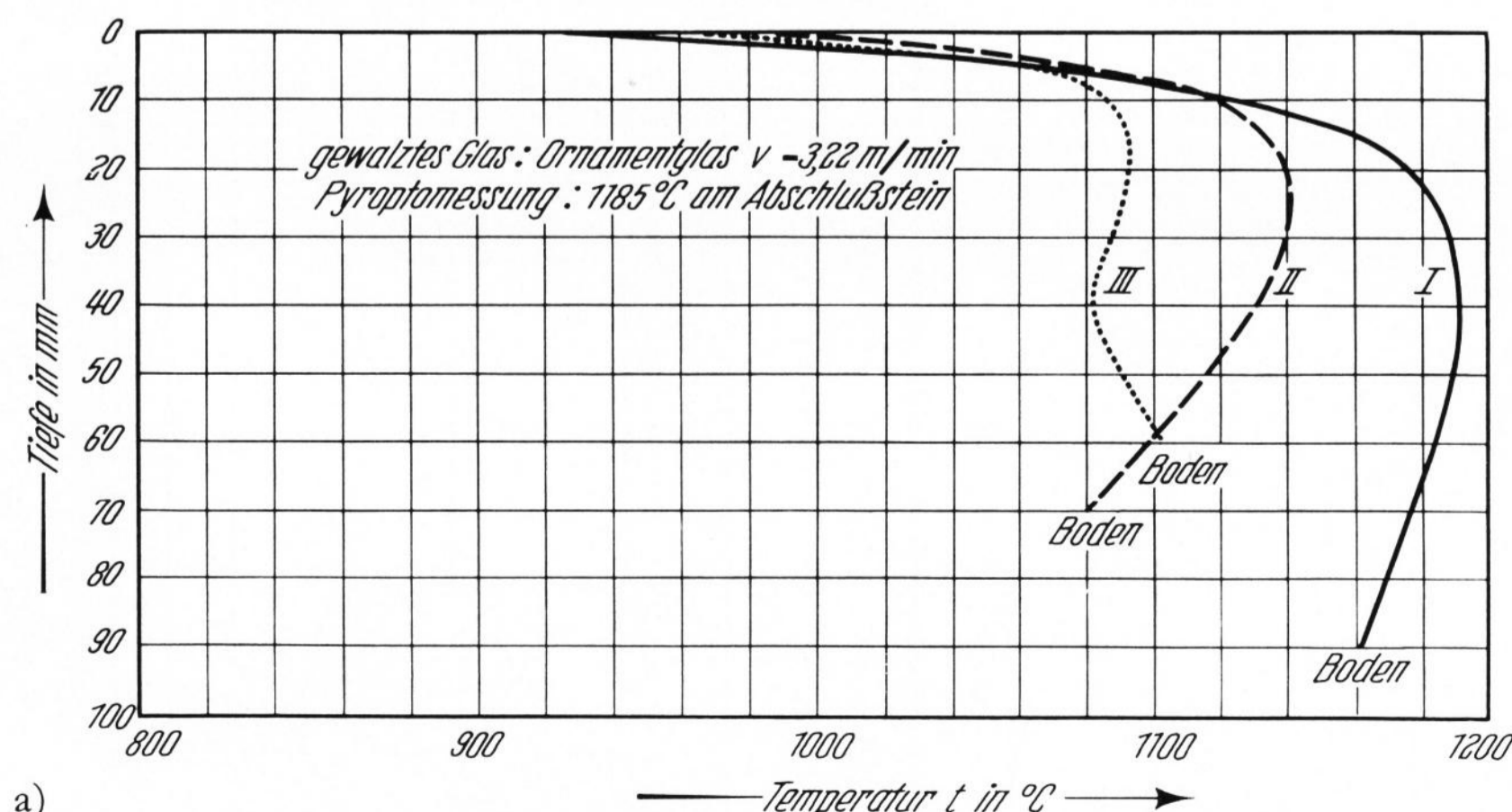
betrug, bezogen auf die Walzgeschwindigkeit, 2,5 bis 12%. Je nach Dicke des Glasbandes und Walzgeschwindigkeit variierte die Schmelzleistung des Ofens zwischen 2 und 3,4 t/h (Bilder 3 und 4). Durch diese wechselnde Belastung war die Ofenführung sehr schwierig, was z. T. die unterschiedliche Glasqualität im Auslauf erklärt.

An der beschriebenen Anlage wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

1. Temperaturverteilung im Glas in der Zulaufrinne zur Walzmaschine ermittelt,
2. Strömung des Glases im Zulauf zur Maschine untersucht,
3. die Blasen im fertigen Glasband (Anzahl — Ort der Auftretens — Deformation) bestimmt und
4. kalorimetrische Untersuchungen an der Walzmaschine bei verschiedenen Betriebszuständen vorgenommen.

2. Temperaturverteilung im Glas in der Zulaufrinne zur Walzmaschine

Während des Betriebes wurde die Glastemperatur normalerweise vor den Walzen nur optisch mittels eines Pyroptos im Walzenzulauf gemessen. Bei diesen Versuchen wurde außerdem die Temperaturverteilung im Glasbad in der Mittelachse der Zulaufrinne an drei verschiedenen Stellen (Bild 5) bestimmt. Diese Messungen



Bilder 5 a und b. Temperaturverteilung im Glas im Zulauf zur Maschine,

a) in Abhängigkeit von der Tiefe des Glasbades, b) in Abhängigkeit vom Abstand von der Walze.

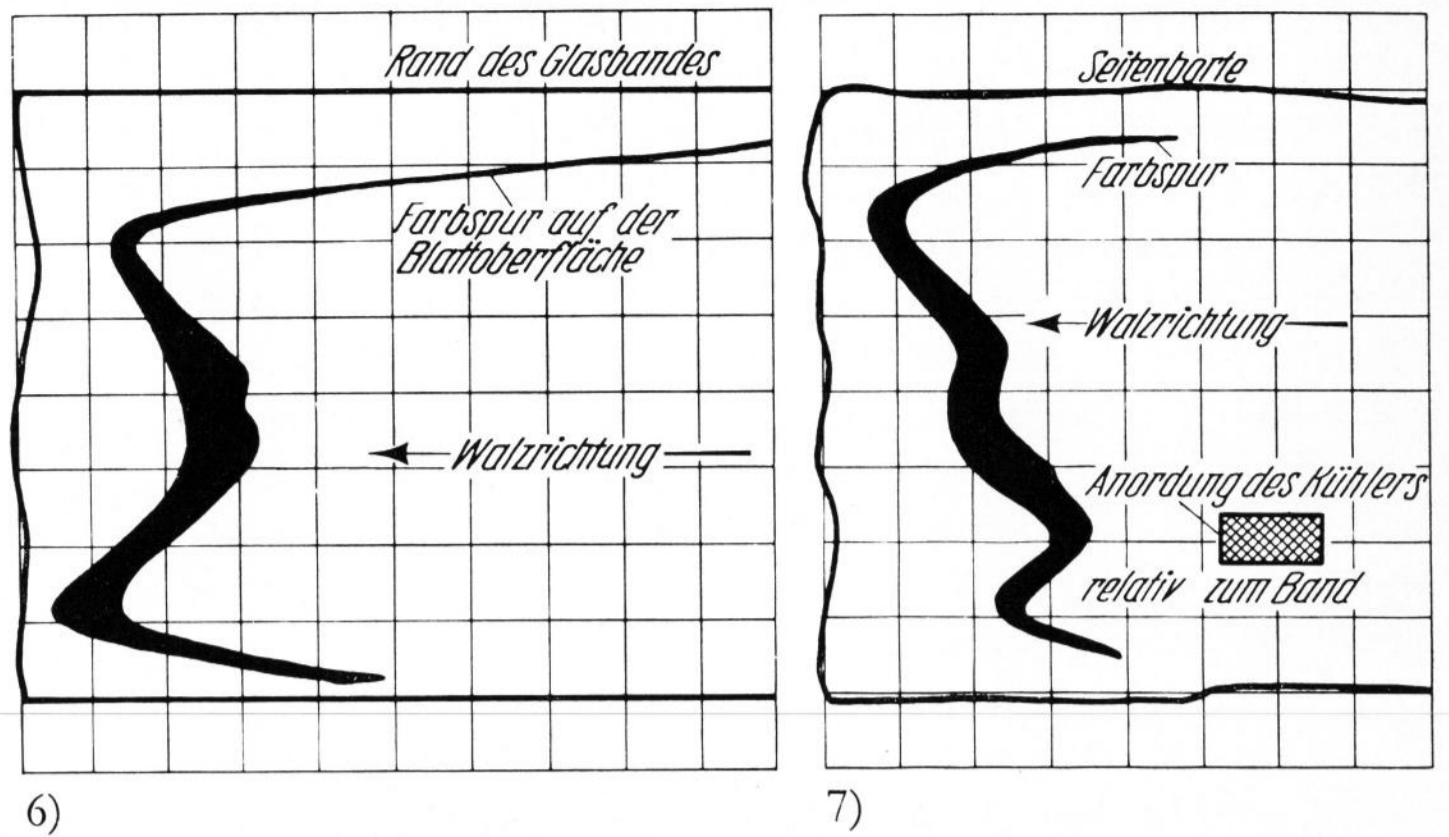
Kurve I: Entfernung 250 mm von der Walze, Kurve II: Entfernung 75 mm von der Walze, Kurve III: Entfernung 30 mm von der Walze.

Bild 6. Farbspur eines senkrecht zur Walzrichtung auf das Glas aufgelegten Farbglasfadens nach dem Walzen.

Kein Kühlkasten über dem Glas.

Bild 7. Farbspur eines senkrecht zur Walzrichtung auf das Glas aufgelegten Farbglasfadens nach dem Walzen.

Wasserkühlkasten 10 mm über der Glasoberfläche im Abstand von 50 mm von der Oberwalze.



wurden mit einem Pt-PtRh-Thermoelement durchgeführt, das unterschiedlich tief in das Glas eingetaucht wurde.

Die Temperaturmessungen zeigten, daß die mit dem Pyropto gemessene Temperatur nicht mit der Oberflächentemperatur des Glases übereinstimmt, sondern einer Temperatur entspricht, die in 30 bis 50 mm Tiefe unter der Oberfläche herrscht und die maximale Glas-temperatur des Vorstromes in der Zulaufrinne ist. Zur Oberfläche hin (Bild 5) findet ein sehr starker Temperaturabfall statt, was zu erwarten ist, da das Oberflächen-glas starke Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion aufweist. Zum Rinnenboden hin ist erwartungsgemäß der Temperaturgradient wesentlich kleiner. Nach dem Abschlußstein tritt eine Rückerhitzung des Oberflächen-glases ein, die etwa 75 mm vor Eintritt in die Walzen ein Maximum erreicht, worauf die Oberflächen-temperatur bis zum Eintritt in die Walzmaschine wieder abfällt. 30 mm vor Eintritt in die Walzen ergab sich ein Temperaturprofil, das in 40 mm Tiefe ein Minimum aufweist, was wahrscheinlich auf die im nächsten Kapitel näher erläuterte Rückströmung zurückzuführen ist.

Der unteren Walze (Ornamentwalze) strömt ein Glas zu, das im allgemeinen etwa 150 grd heißer ist als das der Oberwalze. Diese immer bestehende Temperaturdifferenz muß durch entsprechende Kühlung der beiden Blattflächen ausgeglichen werden.

Es ist aus diesem Grunde vorteilhaft, die Glastemperatur vor Eintritt in die Walzmaschine laufend zu überwachen, um Fehler — insbesondere Kaltrisse — beim Walzen zu vermeiden. Die Verwendung eines Strahlungsmeßgerätes genügt, wie gezeigt wurde, zur Überwachung der Fertigung nicht. Mit Hilfe des Pyroptos kann zwar der zeitliche Temperaturverlauf im Glas zur Steuerung der Kühlung der Unterwalze, nicht jedoch die Oberflächentemperatur des Glases und damit die Kühlung der Oberwalze erfaßt werden.

3. Strömung des Glases im Zulauf

Diese Untersuchungen wurden beim Walzen eines Glasbandes von 3,9 mm Dicke durchgeführt. Die Fertigungsgeschwindigkeit betrug 3,22 m/min, die Streckung 10%. Zur Bestimmung der Strömung wurde quer zur Strömungsrichtung ein 2 mm dicker mit 20/100 Kobalt eingefärbter Kristallglasfaden auf das Glas aufgelegt. Der sehr schnell schmelzende Faden erlaubte es, die Oberflächenströmung des Glases vor der Walzmaschine zu bestimmen. Das gekühlte mit einer blauen Spur durchgezogene Band, das nach Verlassen des Kühllofens heraus-

geschnitten wurde, ließ die gesamte Oberflächendeformation, die während des Durchströmens der Zulaufrinne und beim Walzen stattfindet, erkennen. Auf dieselbe Weise wurde durch rasches Eintauchen eines 6 bis 7 mm starken Kristallglasstabes derselben Zusammensetzung auf der Mittelachse der Zulaufrinne die Strömung des Glases in der Tiefe bis zum Eintritt in die Walzmaschine verfolgt.

Durch den auf die Oberfläche aufgelegten Kristallglasfaden wurde festgestellt, daß im Zulauf an der Oberfläche bis zum Eintritt in die Maschine eine über die Breite nahezu konstante Geschwindigkeit vorliegt. Eine Verzögerung der Strömung konnte nur in unmittelbarer Nähe der Seitenbegrenzung der Rinne festgestellt werden. Die Oberflächengeschwindigkeit stieg von 0,263 m/min in der Mitte der Rinne nach Durchströmen des Abschlußsteines auf 0,404 m/min vor Eintritt in die Walzen.

Bild 6 gibt die Fadenspur des am Kühlkanalende herausgeschnittenen Bandes wieder. Es zeigt die Geschwindigkeitsänderungen an der Oberfläche während des Walzens vom Augenblick kurz vor Eintritt in die Walzen an. Man erkennt, daß das Glasband in der Blattmitte verzögert wird. Die maximale Geschwindigkeit tritt 120 bzw. 200 mm von den Seitenborten entfernt auf. Zu beiden Seiten hin ist die Verzögerung im Vergleich zum übrigen Glasblatt sehr groß.

Der senkrecht in das Glasbad eingesteckte Kristallglasstab ließ eine Maximalgeschwindigkeit einige Zentimeter unter der Oberfläche erkennen. Sowohl zur Oberfläche, wie auch zum Rinnenboden hin war ein sehr großer Geschwindigkeitsabfall feststellbar. Im Eintritt

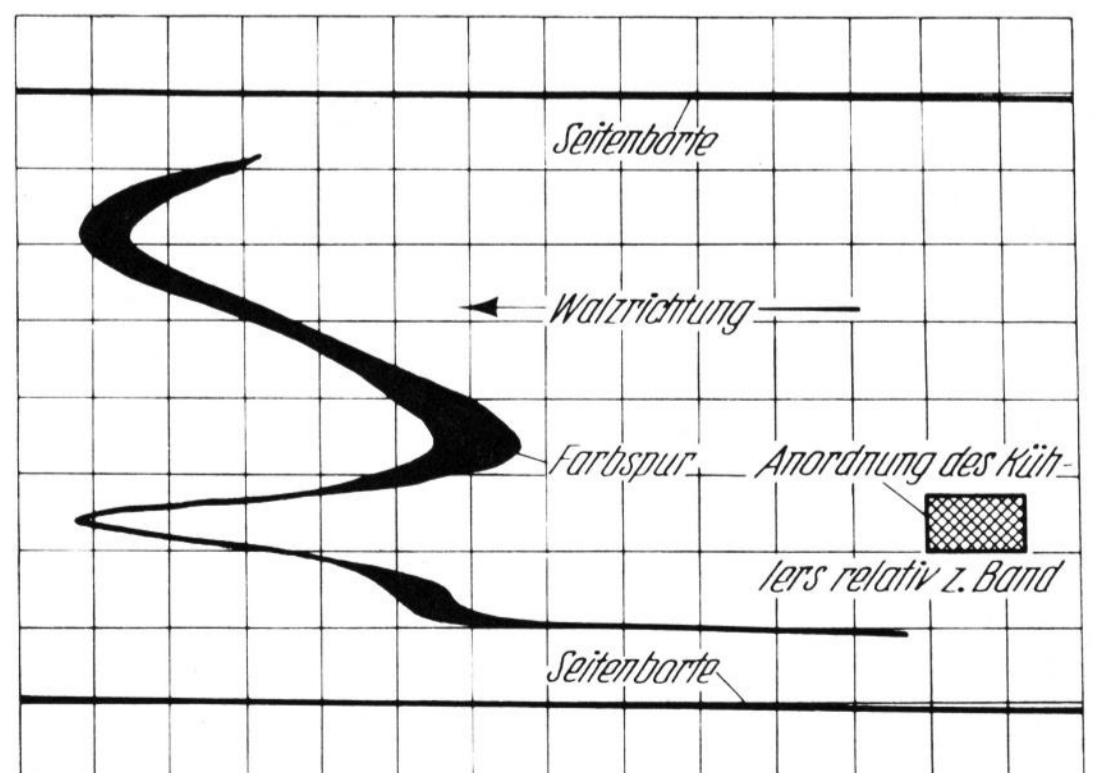


Bild 8. Farbspur eines senkrecht zur Walzrichtung auf das Glas aufgelegten Farbglasfadens nach dem Walzen. Wasserkühlkasten 10 mm über der Glasoberfläche und 2 mm von der Oberwalze entfernt.

in den Zulauf konnte keine vagabundierende Strömung beobachtet werden. Bringt man in 10 mm Höhe über der Glasoberfläche im Abstand von etwa 50 mm von der Oberwalze einen Wasserkasten von 250×120 mm und 50 mm Höhe aus schwarzem Stahlblech (2 mm Dicke) an, so beobachtet man, daß das Oberflächenglas, das unter diesem Kühler durchläuft, im Vergleich zum übrigen Glas verzögert wird. Bringt man denselben Kühler bei demselben Abstand von der Glasoberfläche jedoch nur 2 mm von der Oberwalze entfernt an, so wird beobachtet, daß sich die Oberflächengeschwindigkeit an dieser Stelle im Vergleich zur übrigen Glasmasse vergrößert. Die Bilder 7 und 8 lassen dies an Hand der blauen Fadenspur deutlich erkennen.

Im ersten Fall (Bild 7) führte die örtlich begrenzte Oberflächenkühlung zu einer Verzögerung, die wahrscheinlich auf die Viskositätszunahme zurückzuführen ist. Im zweiten Fall bedingte die örtliche Oberflächenkühlung eine Geschwindigkeitsvergrößerung, d. h. eine größere Glasmasse wurde in den Walzenspalt gezogen (Bild 8).

Diese Versuche zeigen, daß die mechanische Zugwirkung der Walzen auf die Glasoberflächenschicht sich auf einen engen Bereich vor den Walzen beschränkt und sich nur dann bemerkbar macht, wenn die Oberflächentemperatur des Glases unter 950°C liegt.

Das Glas scheint also in erster Linie in die Walzmaschine zu fließen und wird nicht im großen Umfang hineingezogen. Die Glasoberfläche des Zulaufes hat ein eindeutiges Gefälle zu der Walzmaschine hin, wie es

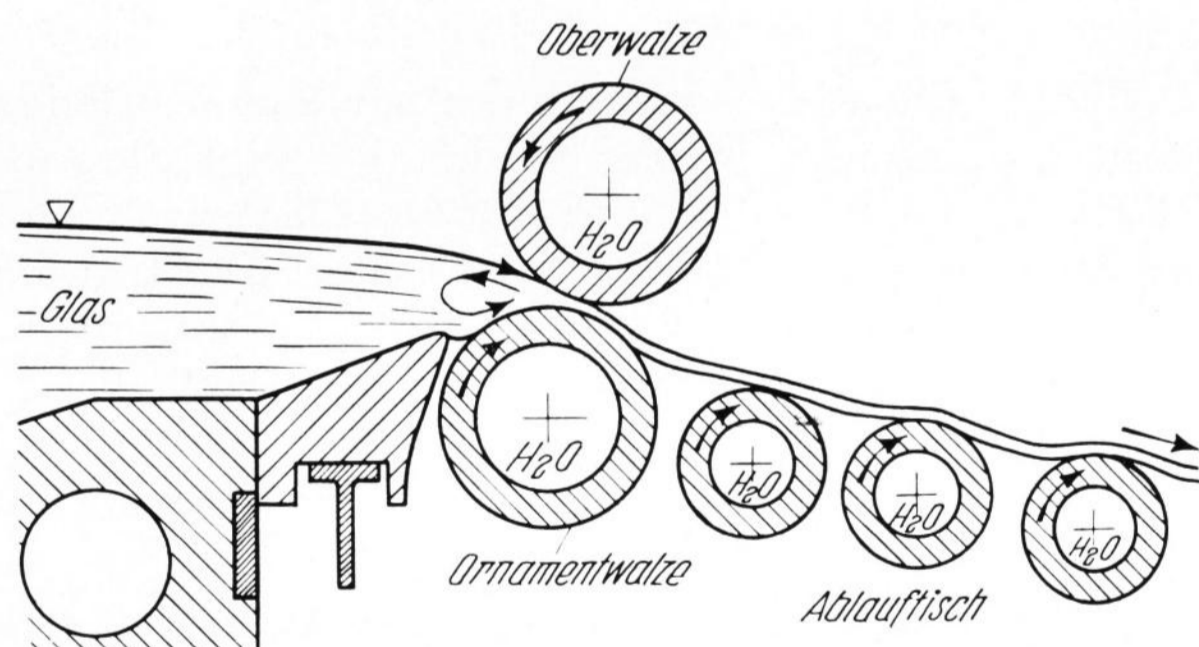


Bild 9. Strömung vor dem Walzenspalt beim Walzen von Ornamentglas (Versuch 6).

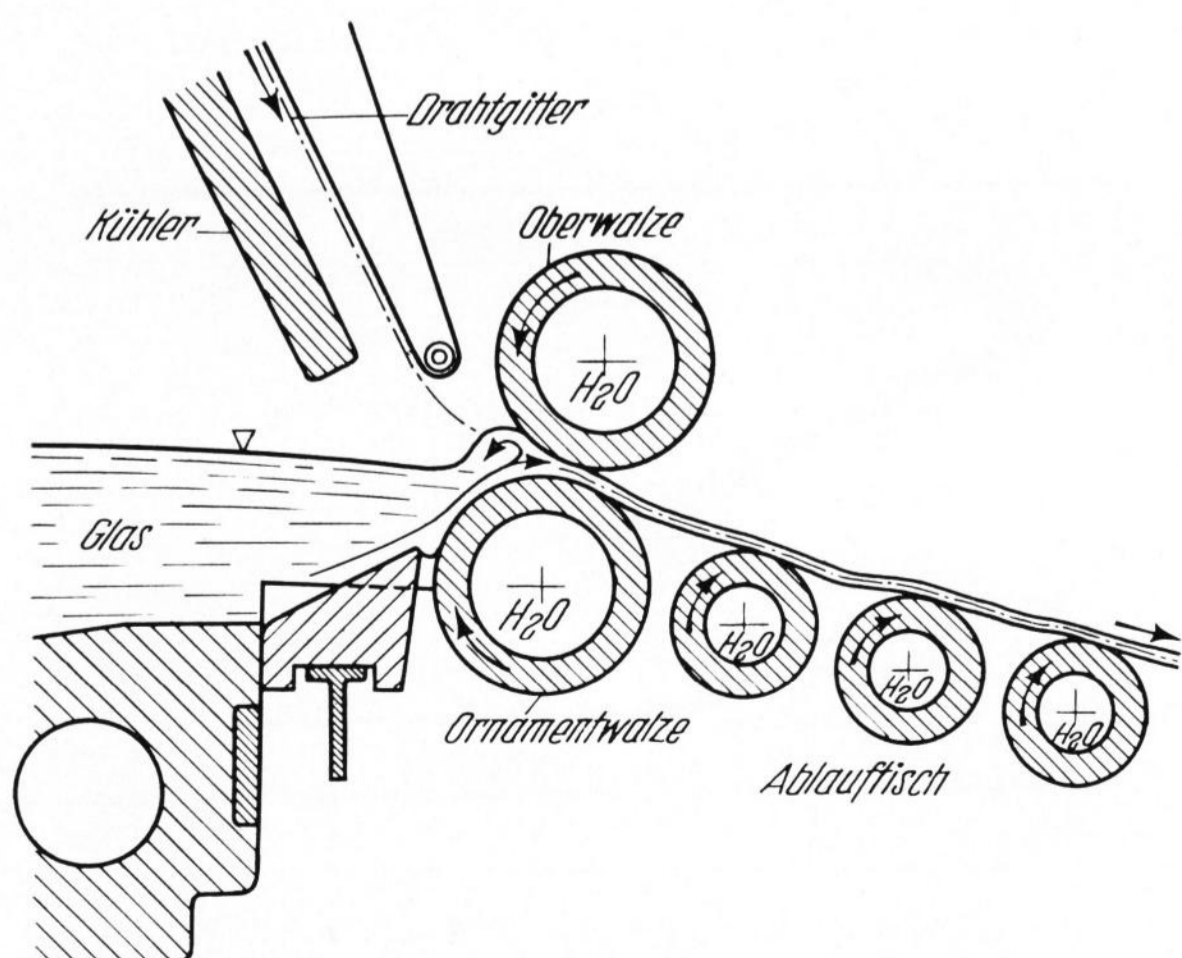


Bild 10. Walzen von Drahtglas (Versuch 3).
Alle Walzen sind wassergekühlt.

Flüssigkeiten, die in einem offenen Gerinne fließen, zeigen. Die vom aufgelegten blauen Faden angezeigte Strömungsverteilung zeigt, daß die Strömung sich der „turbulenten“ Strömung nähert.

Die in Blattmitte beobachtete Verzögerung der Strömung scheint auf einen Aufstau bzw. einen Rückstrom zurückzuführen zu sein, der von der kälteren und im Kontakt mit den zwei Walzen fortgerissenen Glasmasse herrührt, einer Masse, die sehr wahrscheinlich größer ist als der Maschinendurchsatz. Diese überschüssige Menge muß auf irgendeine Weise zurückströmen und bildet einen Rückstrom, der das ankommende heiße Glas aufstaut bzw. verzögert.

Ist der Kontaktwinkel einer der beiden Walzen größer als der der anderen, so bildet die überschüssige Masse Glas eine Strömungswalze, die parallel zu dieser Walze liegt, sich jedoch entgegengesetzt dreht. Auf das Vorhandensein dieser Strömungswalze läßt sich aus der Bewegung der Blasen und anderer Einschlüsse wie Entglasungen bzw. ungeschmolzenem Gemenge, die im Glas enthalten sind, schließen (Bild 9). Bei der Drahtglasherstellung begünstigt man die Ausbildung dieser Strömungswalze, indem man den Kontaktwinkelunterschied zwischen beiden Walzen vergrößert. Es bildet sich dadurch ein großer Wulst aus relativ kaltem Glas, in den das Drahtgitter eingeführt wird (Bild 10).

4. Untersuchung der im fertigen Glasblatt eingeschlossenen Blasen

Die Untersuchung wurde an einer Glasprobe von 10 mm Dicke durchgeführt, die mit einer Walzenumfangsgeschwindigkeit von 1,080 m/min und einer Blattgeschwindigkeit von 1,20 m/min (gemessen am Eintritt in den Kühllofen) — das entspricht einer Streckung von 11,1% oder 0,12 m/min — gefertigt wurde. Die untersuchte Scheibe hatte die gleiche Breite wie das gewalzte Glasband (1,60 m) und war 0,20 m lang.

4.1. Zahl der Blasen

Die visuelle Betrachtung in einer Dunkelkammer im Durchlicht ergab insgesamt 799 Blasen, das sind 250 Blasen/dm³. Diese Zahl ist sehr hoch; normal sind 20 bis 70 Bläschen/dm³ bei Libbey-Owens-Glas.

4.2. Örtliche Verteilung der Blasen

Die Blasenverteilung wurde sowohl über die Fläche, als auch über den Querschnitt ermittelt. Zu diesem

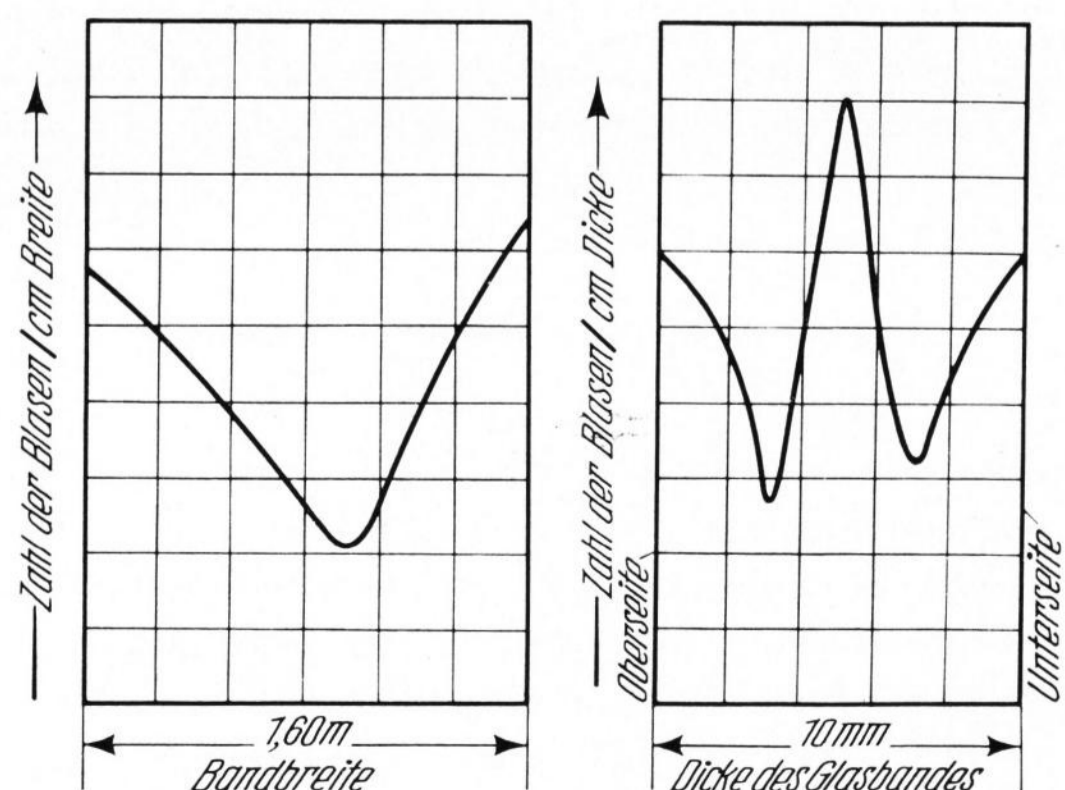


Bild 11. Verteilung der Blasen in der untersuchten Glasprobe, über der Breite und dem Querschnitt des Glasbandes aufgetragen.

Tabelle 1. Verteilung der Blasen nach Anzahl und Größe

(Ornamentglas, Dicke 10 mm, Zonendicke 2 mm, Größe der Probe 0,2 x 1,6 m, Streifenbreite 0,266 m.)

Zone	Streifen						Bemerkung	Summe	Anteil in %
	1	2	3	4	5	6			
1 (0 bis 2 mm) Oberseite	32	20	35	14	26	48	insgesamt	175	21,9
	3	1	2	0	0	3	Blasengröße:	9	22,3
	28	19	33	12	26	44	0 bis 0,1 mm	162	23,4
	1	0	0	2	0	1	0,1 bis 0,5 mm	4	0,1
2 (2 bis 4 mm)	2	22	17	14	31	39	insgesamt	125	15,6
	0	1	2	1	1	2	Blasengröße:	7	17,8
	2	21	15	12	30	37	0 bis 0,1 mm	117	16,9
	0	0	0	1	0	0	0,1 bis 0,5 mm	1	1,5
3 (4 bis 6 mm)	24	66	24	28	36	24	insgesamt	202	25,2
	0	5	1	1	1	1	Blasengröße:	10	25,0
	24	61	22	25	34	22	0 bis 0,1 mm	188	27,0
	0	0	1	2	1	0	0,1 bis 0,5 mm	4	6,1
4 (6 bis 8 mm)	41	19	14	6	17	27	insgesamt	124	15,5
	4	2	1	1	0	2	Blasengröße:	10	25,0
	37	17	13	5	17	24	0 bis 0,1 mm	113	16,3
	0	0	0	0	0	1	0,1 bis 0,5 mm	1	1,5
5 (8 bis 10 mm) Unterseite	69	6	19	14	17	48	insgesamt	173	21,6
	3	0	0	0	0	1	Blasengröße:	4	10,0
	45	3	18	6	13	28	0 bis 0,1 mm	113	16,3
	21	3	1	8	4	19	0,1 bis 0,5 mm	56	84,8
Summe	168	133	109	76	124	186	insgesamt	799	100,0
	10	9	6	3	2	10	Blasengröße:	40	5,0
	136	121	101	60	120	155	0 bis 0,1 mm	693	86,7
	22	3	2	13	5	21	0,1 bis 0,5 mm	66	8,3
Anteil in %	21,0	16,6	13,6	9,5	15,9	23,2	Blasengröße:		
	25,0	22,3	15,0	7,4	5,0	25,0	0 bis 0,1 mm		
	19,6	17,5	14,5	8,6	17,3	22,4	0,1 bis 0,5 mm		
	33,3	4,5	3,0	19,7	7,6	31,8	> 0,5 mm		

Zweck wurde die Platte in sechs 0,266 m breite und 0,20 m lange Streifen eingeteilt. Auch die Querschnittsfläche wurde unterteilt, und zwar in fünf 2 mm breite Streifen, die von oben nach unten durchnummeriert wurden. Oben entspricht dabei der glatten, unten der ornamentierten Scheibenoberfläche. Die Bestimmung der Tiefe der Blasen wurde mit einem für diesen Zweck geeigneten Mikroskop vorgenommen. Mit demselben Mikroskop wurden auch die Blasen vermessen und deren Länge und Breite auf 1/1000 mm genau bestimmt; die Dicke der Blasen wurde nur in einigen besonderen Fällen gemessen. Tabelle 1 und die Bilder 11 und 12 geben die Ergebnisse dieser Untersuchung wieder. 5% der Bläschen waren zwischen 0 und 0,100 mm lang (Gispfen), 86,7% der Bläschen waren zwischen 0,1 und 0,5 mm, und 8,3% waren Blasen, die über 0,5 mm lang waren. Über die Blattfläche gesehen, war die Bläschendichte zu den Seiten hin wesentlich höher als in der Mitte (Bild 11).

Über die Querschnittsfläche aufgetragen, ergab sich die höchste Bläschendichte in der Blattmitte; auch in den Randgebieten zur Ober- und Unterseite hin ergaben sich hohe Blasendichten, während in den dazwischen liegenden Gebieten (Zone 2 und 4) relativ wenig Bläschen auftraten.

Diese Feststellungen dürften für manchen Glasproduzenten von Interesse sein. Die sehr hohe Zahl kleiner Bläschen bis 0,5 mm Länge (230/dm³) deutet auf eine mangelhafte Läuterung der Schmelze hin. Die starke Blasenhäufung an den Borten läßt dagegen auf eine Blasenbildung an den Seitenwänden des Ofens, die aus Schamottesteinen bestehen, schließen. Andererseits läßt die sehr hohe Blasendichte von Blasen über 0,5 mm Länge auf der Unterseite und an den Seiten des Glasbandes (85%) vermuten, daß die Bodensteine der Arbeitswanne und die Zulauftrinne diese Blasenbildung bewirken. Schließlich läßt die hohe Blasendichte in der Blattmitte die Vermutung aufkommen, daß durch die Rückströmung in der Zulauftrinne vor den Walzen die am Boden entstandenen Blasen in den Blattkern hineingerissen

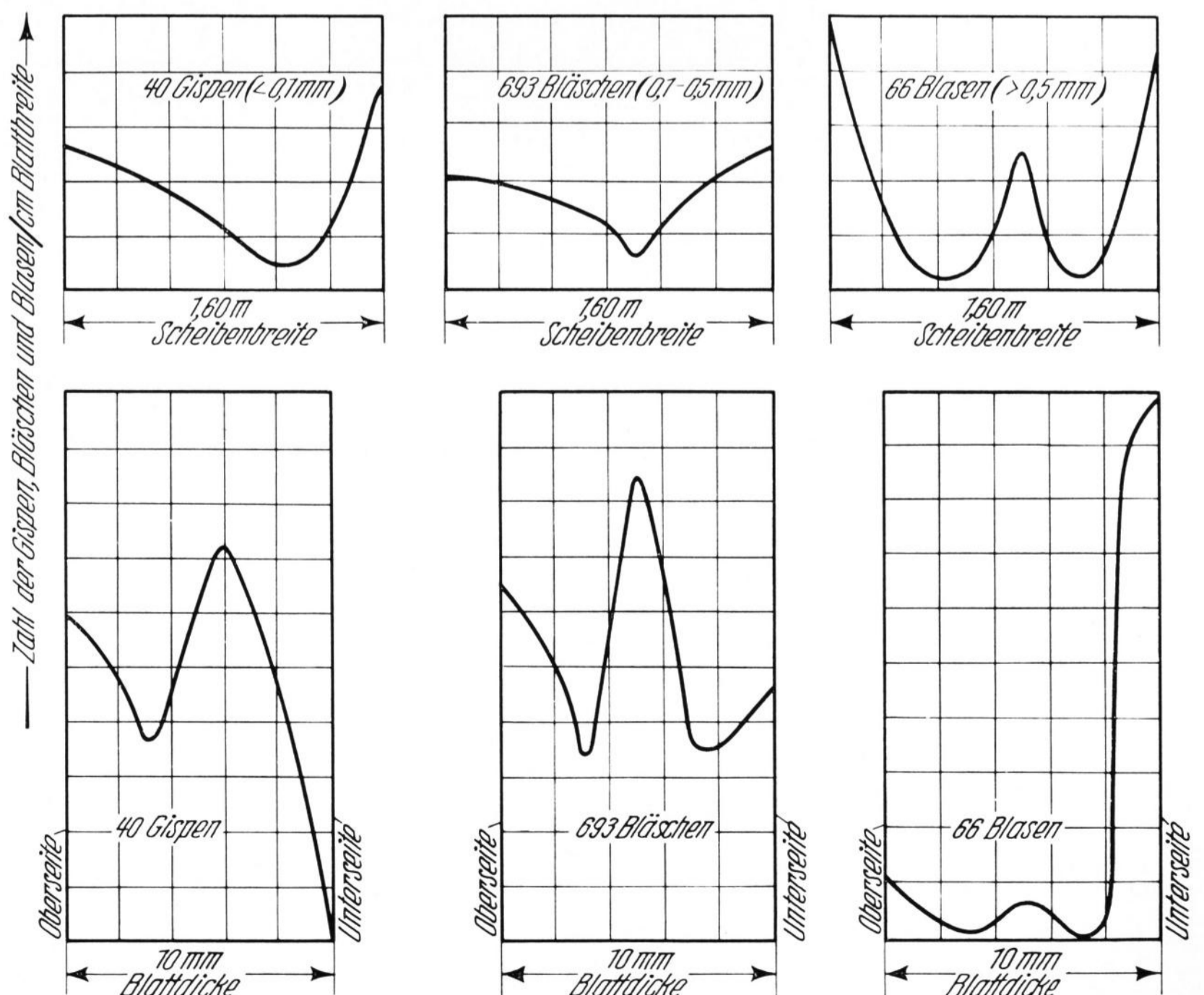


Bild 12. Verteilung der Gispfen, Bläschen und Blasen.

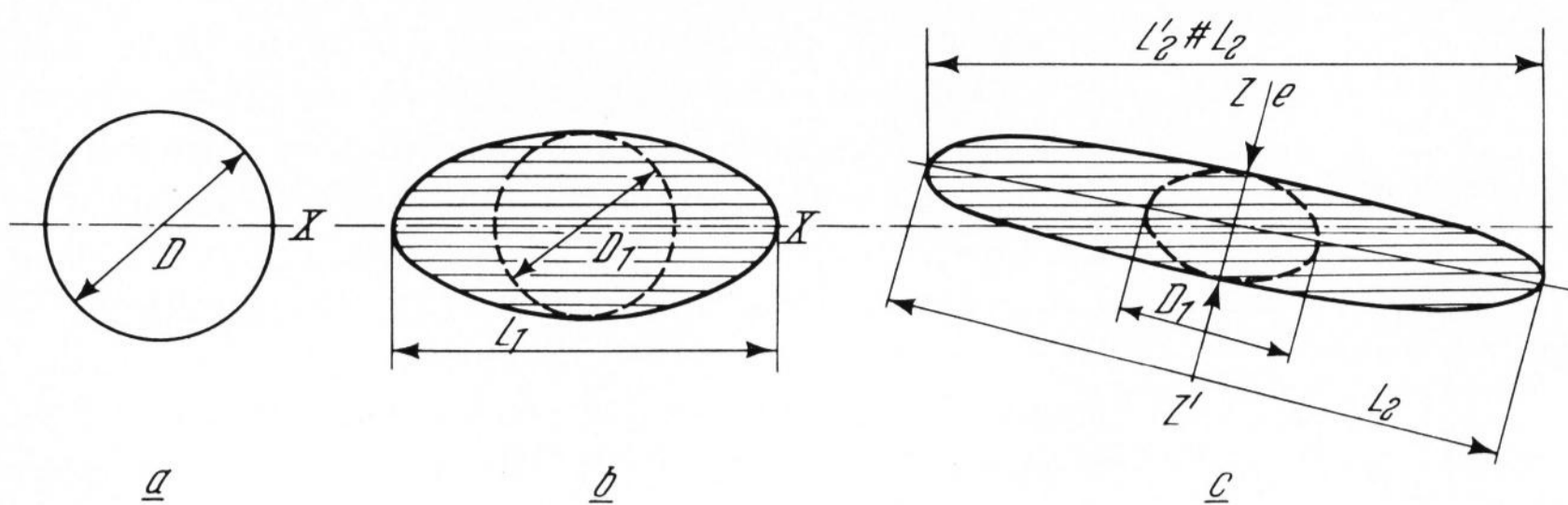


Bild 13. Verformung einer Blase beim Walzprozeß, a) Blase vor der Verformung, b) Blase nach der Streckung in XX'-Richtung, c) nach einer Scherbeanspruchung (Ellipsoid mit drei verschiedenen Achsen), Einfluß des Temperaturgradienten in ZZ'-Richtung.

werden. Sollte sich diese Hypothese als richtig erweisen, muß beim Walzen die Bildung eines großen Wulstes vor den Walzen, d. h. ein großer Kontaktwinkel zwischen Glas und Walze vermieden werden, oder man muß durch Auswahl geeigneter nicht blasenbildenden Materials die Blasenentstehung vermeiden.

4.3. Deformation der Bläschen — Mechanismus des Walzens

Die im flüssigen Glas befindlichen Bläschen haben praktisch Kugelform. Auch diejenigen, die man im nichtverformten, erkalteten Glas findet, sind gleichfalls nahezu als Kugeln zu betrachten. Die folgenden Ausführungen basieren auf zwei Annahmen: 1. Das Blasenvolumen in einem von 950 auf 600 °C schnell abgekühlten Glas bleibt infolge der sehr starken Viskositätszunahme des Glases konstant. 2. Die Blase, ist sie groß genug — größer als 0,025 mm Durchmesser —, folgt den Deformationen des Glases. Unter diesen Voraussetzungen lassen sich alle irgend möglichen Deformationen unter Krafteinwirkung auf zwei elementare Deformationsvorgänge zurückführen: auf eine Längung und eine Verformung durch innere Reibung.

Eine kugelige Blase im Glas hat vor der Deformation bei 950 °C den Durchmesser D. Nach der Längung, d. h. bei reiner Zugbeanspruchung wird aus der Kugel ein Ellipsoid mit den Hauptachsen L_1 und D_1 (Bild 13), das dasselbe Volumen hat, wie die Kugel mit dem Durchmesser D. Durch eine überlagerte einachsige Scher- oder Schubbeanspruchung wird aus dem Rotationsellipsoid ein Ellipsoid mit drei verschiedenen Achsen, deren eine D_1 erhalten bleibt, die beiden anderen Achsen sind L_2 und e (Bild 13). Nach der Deformation des Glases, bei der es sich auf 650 °C abgekühlt hat, wurde

Tabelle 2. Verteilung der Blasen und Mittelwerte der gemessenen relativen Längung (Ornamentglas Dicke 10 mm, Zonendicke 2 mm, Größe der Probe $0,2 \times 1,60$ m, Streifenbreite 0,266 m.)

Zone	Streifen						
	1	2	3	4	5	6	
1 (0 bis 2 mm) Oberseite	32 1,22	20 1,12	35 1,13	14 1,22	26 1,11	48 1,18	Blasenzahl \bar{A}_m^*
2 (2 bis 4 mm)	2 1,06	22 1,11	17 1,134	34 1,068	31 1,085	39 1,063	Blasenzahl \bar{A}_m
3 (4 bis 6 mm)	24 1,027	66 1,23	24 1,059	28 1,102	36 1,051	24 1,121	Blasenzahl \bar{A}_m
4 (6 bis 8 mm)	41 1,082	19 1,098	14 1,109	0 1,09	17 1,097	27 1,192	Blasenzahl \bar{A}_m
5 (8 bis 10 mm) Unterseite	69 2,866	6 4,08	19 1,508	14 3,887	17 2,168	48 4,126	Blasenzahl \bar{A}_m

*) \bar{A}_m = Mittelwert der einzelnen Werte A_m .

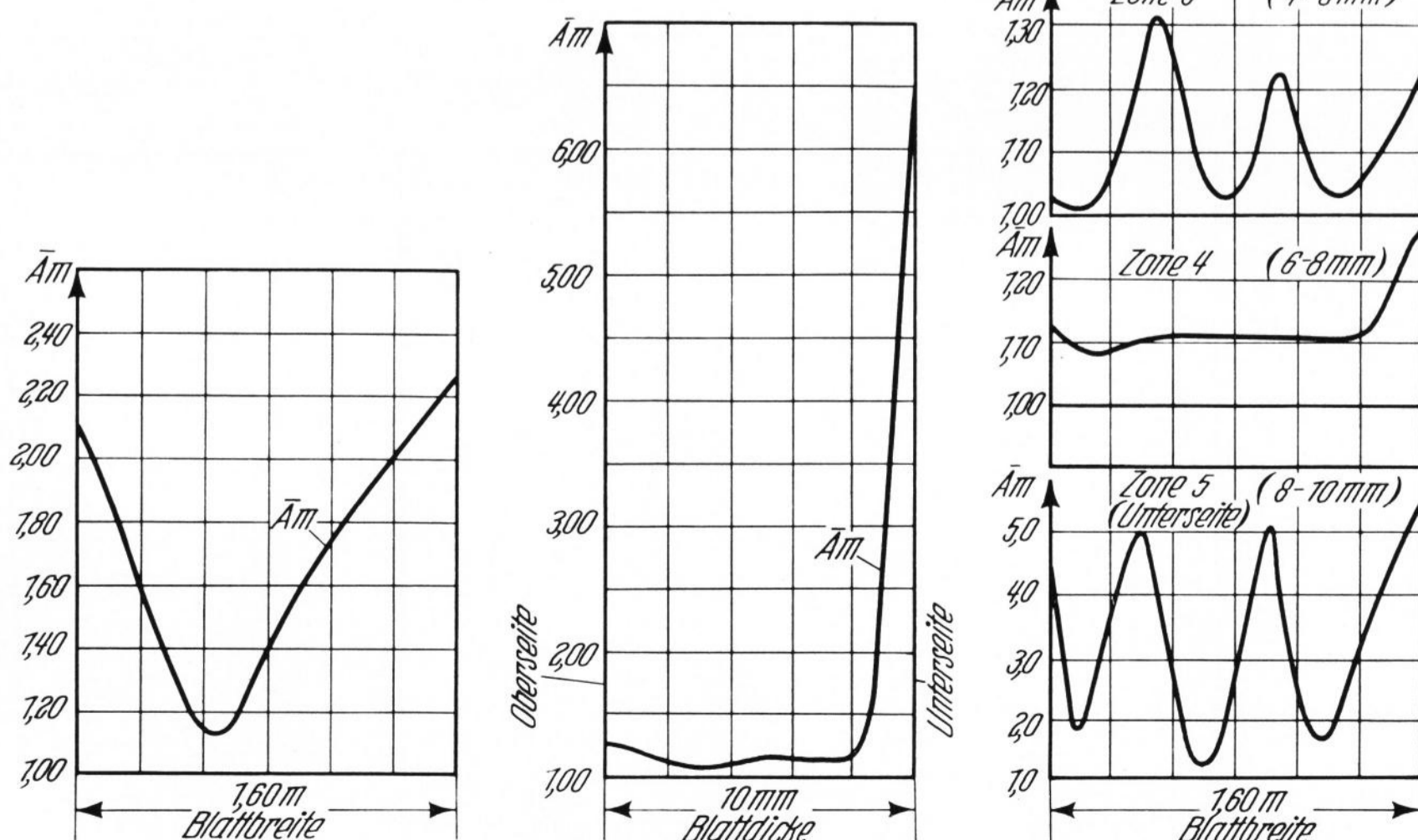


Bild 14. Mittelwerte der gemessenen relativen Längung A_m , aufgetragen über der Blattbreite, Blattdicke und für die einzelnen Zonen.

aus der Kugelblase also ein Ellipsoid mit den Hauptachsen L_2 , D_1 und e , das dasselbe Volumen besitzt wie die ursprüngliche Kugel.

Zwischen dem ursprünglichen Kugeldurchmesser D , den Achsen des Rotationsellipsoids D_1 und L_1 und denen des daraus entstehenden Ellipsoids bestehen folgende Beziehungen:

relative Längung durch Zugbeanspruchung:

$$E = \frac{L_1}{D} = \left(\frac{A_m \cdot e}{L_2} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

relative Längung durch eine überlagerte Scherbeanspruchung:

$$A_{cis} = \frac{L_2 - L_1}{D} = \frac{L_2 - A_m \cdot e}{\sqrt[3]{L_2 D_1 \cdot e}}, \quad (2)$$

relative Gesamtlängung:

$$A_t = \frac{L_2}{D} = E + A_{cis}. \quad (3)$$

Gemessen wurden die Längen L_2 , D_1 und e der Blasen. Die gemessene bzw. scheinbare relative Längung A_m ($A_m > A_t$) ist definiert als L_2/D_1 . Unter den genannten Voraussetzungen kann aus den Abmessungen die Deformation des Glases während der Verarbeitung, d. h. beim Walzen bzw. beim Ziehen ermittelt werden.

Die Werte A_m wurden für sämtliche Blasen der Probe bestimmt. Sie sind in Tabelle 2 und Bild 14 zusammengestellt. Der Wert der meßbaren scheinbaren Längung, der theoretisch größer ist als die wirkliche Gesamtlängung, erlaubt dennoch, die Deformation des Glases beim Walzprozeß in erster Näherung zu bestimmen. Bild 14 zeigt die mittlere Änderung von A_m , über der Blattbreite und über der Blattdicke aufgetragen. An beiden Borten des Glasbandes und an der Blattunterseite wurden die größten Deformationen festgestellt.

Die genaue Ausmessung einiger Blasen — es wurden die Werte für die Hauptachsen L_2 , D_1 und e bestimmt — erlaubt es, die Deformation des Glases in der Umgebung dieser Blasen zu bestimmen. Tabelle 3 gibt die an drei charakteristischen Blasen ermittelten Werte wieder. Außer der Blase, die sich, auf die Blattstärke bezogen, in Blattmitte befindet, ist in der relativen Längung die Streckung des Bandes auf dem Rollentisch, die rd. 11,1% beträgt mit enthalten. Was den Koeffizienten für die Scherbeanspruchung (A_{cis}) betrifft, so nimmt dieser, über die Dicke gesehen, von innen nach außen zur Unterseite hin zu.

4.4. Beginn der Verformung des Glases

Allgemein kann jeder Walzvorgang durch folgende Beziehung beschrieben werden:

$$\frac{\text{Gesamtwalzgeschwindigkeit oder Fabrikationsgeschwindigkeit}}{\text{Zulaufgeschwindigkeit des Glases}} = A_t (\text{relative Gesamtlängung}). \quad (4)$$

Bei dem beschriebenen Versuch lag die Produktion bei 2880 kg/h. Die Zulaufrinne vor den Walzen war

Tabelle 3. Meßdaten von drei charakteristischen Blasen

Zone	Tiefe unter der Oberfläche in mm	Abmessungen der Blasen in mm			$A_m =$ gemessene rel. Längenänderung	$E =$ rel. Längenänderung durch reine Zugbeanspruchung	$A_{cis} =$ rel. Längung durch überlagerte Scherbeanspruchung	$A_t =$ rel. Gesamtlängung
		L_1	D_1	e				
3	5,00	0,125	0,115	0,110	1,085	1,012	0,059	1,071
5	8,73	0,204	0,160	0,145	1,275	1,100	0,132	1,232
5	10,00	0,430	0,190	0,110	2,265	1,125	0,940	2,065

Tabelle 4. Relative Gesamtstreckung in verschiedenen Tiefen des Blattes

Tiefe in mm	Fertigungsgeschwindigkeit in m/min	A_t (berechnet)	Zulaufgeschwindigkeit in m/min
5	1,20	1,071	1,12
8,75	1,20	1,232	0,975
10,0	1,20	2,065	0,582

1,3 m breit, der Glasstand betrug 0,050 m. Hieraus ergibt sich eine mittlere Zulaufgeschwindigkeit in die Walzen von 0,315 m/min. Die Walzenaustrittsgeschwindigkeit an der Oberfläche betrug 1,08 m/min, während die Bandgeschwindigkeit 1,20 m/min betrug. Auf die Werte von den drei Blasen in Tabelle 3 angewandt, ergibt Gleichung (4) die in Tabelle 4 eingetragenen Daten.

Die Berechnungen zeigen, daß die in Blattmitte liegende Blase praktisch erst nach dem Passieren der Walzmaschine vor Eintritt in den Kühlöfen gestreckt wird. Die in 8,75 mm Tiefe liegende Blase wird schon während des Walzens gelängt, während die auf der Unterseite liegende Blase (10 mm tief) sich schon vor Berührung mit der Walze längt, d. h. im Eintritt in die Walzen. Zu bemerken ist noch, daß Blasen an der Oberseite (Tiefe = 0 mm) an derselben Stelle einer ähnlichen Deformation wie an der Unterseite, die jedoch fünf- bis sechsmal schwächer ist, unterworfen sind.

Die Verformung der Blasen läßt unter den beschriebenen Voraussetzungen, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden kann, Schlußfolgerungen zu, wie die Glasmasse über die Dicke hinweg während des Walzprozesses deformiert wird. Das Glas im Kern des Blattes durchquert die Walzmaschine praktisch ohne Verformung, d. h. ist keinen Kräften unterworfen. Es ist nur einer leichten Scherbeanspruchung und einem leichten Zug am Ende des Rollentisches vor Eintritt in den Kühlöfen ausgesetzt. Dieser Teil des Glasblattes kann als durch die Walze „fließend“ betrachtet werden.

Im Gegensatz dazu sind die beiden Randzonen oben und unten, sowohl einer Verformung durch Scherkräfte als auch einer Verformung durch Zug während des Durchganges durch die Walzmaschine unterworfen; diese Verformung wird zur Oberfläche hin größer. Der Teil des Glases, der die beiden Oberflächen bildet, wird schon vor Berührung der Walzen verformt. Das Walzen ist also vor allem eine Deformation durch innere

Tabelle 5. Zusammenstellung der Versuchsdaten

Versuch	Glasart	Dicke in mm	Gewicht in kg/m ²	gesamte Blatt- breite in m	Produk- tions- leistung in t/h	Umfangs- geschwindigkeit der Walzen Kühllofen- rollen in m/min		Geschwin- digkeit des Glas- blattes in m/min	Schlupf im Kühl- kanal in %	Streckg. des Glas- blattes in %	Walzmaschine
						Walzen	Kühllofen- rollen				
1	Ornamentglas (mit Kaltrissen)	4,35	10,870	1,625	3,230	2,93	3,06	—	—	4,44	neue Walzmaschine mit axial versetzten Walzen
2	Ornamentglas (ohne Kaltrisse)	4,6	11,490	1,600	3,395	2,907	3,12	—	—	7,34	dto.
3	Drahtglas (ohne Kaltrisse)	5—7	15,000	1,640	3,000	1,99	2,04	—	—	2,51	dto.
4	Ornamentglas (ohne Kaltrisse)	4,05	10,120	1,610	2,992	2,83	3,078	—	—	8,78	dto.
5	Dickes Ornament- glas (ohne Kaltrisse)	10,41	26,020	1,430	2,610	1,065	1,173	—	—	10,8	dto.
6	Ornamentglas (m. vereinzelt Kaltrissen)	4,32	10,800	1,315	2,663	2,97	3,14	—	—	5,73	dto.
7	Eisblumenglas (ohne Kaltrisse)	3,65	9,210	1,310	2,042	2,69	2,94	—	—	9,29	dto.
8	Dickes Eisblumen- glas (ohne Kaltrisse)	6,5	16,250	1,330	2,240	1,576	1,738	1,731	0,40	10,28	alte Maschine mit übereinander- liegenden Walzen
9	Ornamentglas (ohne Kaltrisse)	3,98	9,94	1,630	2,920	2,81	3,08	3,00	2,59	9,62	neue Walzmaschine
10	Ornamentglas dick (ohne Kaltrisse)	10	25	1,600	2,880	1,08	1,20	1,20	0,00	11,1	dto.

Reibung (Scherbeanspruchung). Die Zugbeanspruchung des Bandes rührt von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Walzmaschine und dem Kühlband her. Der starke Einfluß der inneren Reibung auf die untere Oberfläche sowohl in die Tiefe als in die Länge ist auf den sehr viel größeren Viskositätsgradienten dieser Seite verglichen mit der Oberseite zurückzuführen. Einen Beweis für diese Überlegung erbringt die im Abschnitt 5. gegebene thermische Untersuchung des Walzvorganges.

5. Kalorimetrische Messungen beim Walzen von Glas (Walzmaschine für Spezialglas)

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Temperaturen der Walzen während des Betriebes zu bestimmen. Tem-

peraturmessungen auf der Kühlwasserseite sind insofern interessant, als sie Aufschluß über eine mögliche Kalkablagerung in der Bohrung und damit eine Verschlechterung der Kühlungswirkung geben. Auf der Glasseite möchte man die Temperaturen im Kontakt Glas—Metall beim Walzen kennen, um die Bildung von Kaltrissen zu vermeiden.

Zu diesem Zweck wurden verschiedenartige Messungen bei zehn industriellen Fertigungen von unterschiedlichen Flachgläsern vorgenommen. Untersucht wurde die Fertigung von normalem und dickem Ornamentglas, normalem und dickem Eisblumenglas und Drahtglas. Die wichtigsten Größen, die gemessen wurden, sind wie folgt:

Tabelle 6. Zusammenstellung der Glas- und Walzentemperaturen

Versuch	Temperatur des Glases (Pyropto) in °C in der Zulauftrinne				Walzenmaterial Abmessungen der Walzen (D _a —D _i) in mm		Kontaktwinkel in °		Kalorimetrische Daten			
	vor dem Durchlaß (Ofen)	nach dem Abschl.-Stein	vor der Walze	auf dem Rollentisch	Oberwalze	Unterwalze	Oberwalze	Unterwalze	Oberwalze Kühlwasser in l/h	Oberwalze Temp.-diff. in grd	Unterwalze Kühlwasser in l/h	Unterwalze Temp.-diff. in grd
1	1368	—	1184	—	GG*) Nr. 5 129,5-82	Stahl Nr. 6 128,7-80	54	92	16630	6,78	15300	8,5
2	1385	—	1223	—	GG*) Nr. 6 129,1-82	Stahl Nr. 5 129,5-80	54	92	20000	5,8	18400	7,2
3	1395	—	1181	—	GG*) Nr. 5 128,5-82	Stahl Nr. 4 128,3-82	50	98—118	20120	4,1	12384	7,95
4	1392	1223	—	—	GG*) Nr. 5 128,3-82	Stahl Nr. 4 128,3-82	47	90	19040	5,4	17905	7,25
5	1360	—	1185	922	GG*) Nr. 6 129,1-82	Stahl Nr. 5 129,5-80	48	91	18600	3,0	16750	4,75
6	1360	1220	1185	847	GG*) Nr. 6 129,1-82	Stahl Nr. 5 129,5-80	40	91	19000	4,3	17100	5,53
7	1348	1223	1166	830	Imphy Nr. 6 128,1-75	Stahl Nr. 21 B 129,3-60	51,3	78	15100	4,4	15100	4,7
8	Keine Temperaturmessung				—	—	50	90	Wiederanfahren einer alten Maschine			
9	1350	1217	1160	785	GG*) Nr. 8 129-82	Stahl Nr. 6 128,7-80	52	82	20186	5,14	19095	6,26
10	—	1210	—	—	Versuch zur Bestimmung der Blasenahl — keine Temperaturmessungen							

*) GG = Grauguß

1. Messung der Glastemperatur vor Eintritt in die Walzmaschine mit Hilfe eines Teilstrahlungs-pyrometers (Pyropto),

2. Messung der Walzentemperatur an einem zugänglichen Punkt der Walzenoberfläche mit Hilfe eines Kontaktthermoelements,

3. Messung der Walzenumfangsgeschwindigkeit,

4. Messung der Umfangsgeschwindigkeit der Kühl-
ofenrollen, der Geschwindigkeit der Rollen des Walz-
tisches und des Glasblattes (Berechnung des Schlupfes
zwischen Glasblatt und Kühlbandrollen),

5. Bestimmung des Glasausstoßes der Walzmaschine
(durch Wiegen des Glases),

6. Bestimmung des Kontaktwinkels zwischen Glas
und Walze für beide Walzen,

7. Bestimmung der die einzelnen Walzen durchströ-
menden Kühlwassermengen mit Hilfe eines 2000 l fassen-
den Auffangkastens,

8. Kühlwassereintritts- und -austrittstemperatur (auf
1/100 grd genau),

9. Qualität des gefertigten Glases (unter besonderer
Beachtung von Kaltrissen).

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den Ta-
bellen 5 und 6 zusammengestellt.

5.1. Berechnung des Wärmeaustausches
zwischen Glas, Walzen und Kühlwasser
und der einzelnen Wärmeströme

Gemessen wurde — wie schon erwähnt — die von
der Walze ans Kühlwasser abgegebene Wärmemenge.
Mit der Anordnung nach Bild 9 setzt sich die Wärme-
bilanz für eine Walze mit \dot{Q} der in der Zeiteinheit (1 h)
im stationären Zustand übertragene Wärmemenge aus
folgenden Gliedern zusammen:

$$\dot{Q}_G + \dot{Q}_{SR} + \dot{Q}_{ST} = \dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_O + \dot{Q}_{H_2O} = \dot{Q}_{ab} \quad (5)$$

Es sind: \dot{Q}_G der im Kontakt zwischen Glas und
Metall an die Walze übergehende Wärmestrom (Lei-
tung), \dot{Q}_{SR} die von der Zulauftrinne an die Walze stünd-
lich abgestrahlte Wärmemenge, \dot{Q}_{ST} die Strahlungswär-
me, die in einer Stunde vom Walzentisch an die Walze
übertragen wird, \dot{Q}_{zu} der gesamte der Walze zugeführte
Wärmestrom, \dot{Q}_O der von der Walzenoberfläche abge-
strahlte und durch Leitung abgegebene Wärmestrom,
 \dot{Q}_{H_2O} der vom Kühlwasser aufgenommene Wärmestrom
und \dot{Q}_{ab} der gesamte abgegebene Wärmestrom.

Die von den Walzen an die Lager durch Leitung
abgegebene Wärmemenge wurde vernachlässigt, zumal
diese infolge der sehr intensiven Wasserkühlung der

Walzen klein ist. Aus Gleichung (5) folgt:

$$\dot{Q}_G = \dot{Q}_O + \dot{Q}_{H_2O} - (\dot{Q}_{SR} + \dot{Q}_{ST}) \quad (6)$$

In Gleichung (6) ist nur der Term \dot{Q}_{H_2O} bekannt, der
bei den Versuchen auf etwa 2% genau bestimmt werden
konnte. Die anderen Glieder in Gleichung (6) müssen
rechnerisch festgelegt werden. Der Term \dot{Q}_O ist positiv.
Er entspricht der in einer Stunde von der freien Ober-
fläche der Walze an die umgebende ruhende Luft durch
Leitung und Strahlung abgegebenen Wärmemenge. \dot{Q}_{SR}
ist negativ und ist gleich der in einer Stunde durch
Strahlung von der Glasbadoberfläche der Zulauftrinne
an eine rechtwinklig dazu angeordnete Fläche von
130 mm Höhe — das entspricht dem Walzendurch-
messer — übertragenen Wärmemenge. Der Term \dot{Q}_{ST} ist
gleichfalls negativ und gibt die Wärmemenge wieder,
die in einer Stunde durch Strahlung von dem auf dem
Rollentisch liegenden Glasblatt an eine rechtwinklig
dazu angeordnete Fläche von 130 mm Höhe übertragen
wird.

Die einzelnen Wärmemengen wurden für die Ver-
suche 5, 6, 7, 9 einzeln nach McADAMS [1] abgeschätzt.
Durch Einbeziehen dieser errechneten Werte war es
möglich, eine genauere Wärmebilanz zu erstellen. Wenn
diese errechneten Wärmemengen — wie zu erwarten war
— auch von untergeordneter Bedeutung sind, so sollten
sie doch nicht von vornherein vernachlässigt werden.

In der Bilanzgleichung der Versuche 5, 6, 7 und 9
wurden die entsprechenden errechneten Werte eingesetzt,
während in den Versuchen 1, 2, 3 und 4 die Mittelwerte
der entsprechenden Terme eingesetzt wurden.

Aus den über die Wärmebilanz errechneten Werten
für die stündlich im Kontakt Glas — Metall abgegebenen
Wärmemengen läßt sich der Wärmestrom \dot{Q}_G der auf
die Flächeneinheit bezogen ist, bestimmen. Es gilt:

$$\frac{Q_G}{\tau \cdot F} = \frac{\dot{Q}_G}{F} = \dot{q}_G \text{ in kcal/h} \cdot \text{m}^2 \quad (7)$$

τ ist die Kontaktzeit, die beim kontinuierlichen Wal-
zen gleich einer Stunde zu setzen ist. (Im Gegensatz zu
 \dot{Q}_G — einem Wärmestrom — ist Q_G die in der Zeit τ
übertragene Wärmemenge $\frac{Q_G}{\tau} = \dot{Q}_G$). F ist die Kon-
taktfläche zwischen Glas und Metall, die sich aus Walzen-
länge, Walzendurchmesser und Kontaktwinkel errech-
nen läßt. Auch der an das Kühlwasser abgegebene
Wärmestrom \dot{q}_{H_2O} in kcal/h·m² der einzelnen Walzen
läßt sich auf diese Art errechnen, nur ist F hier die vom
Wasser benetzte Fläche der inneren Bohrung. Die Ergeb-
nisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 7 für acht der
Versuche zusammengestellt.

Tabelle 7. Zusammenstellung der Wärmeströme

Ver- such	Oberwalze						Unterwalze					
	\dot{Q}_{H_2O} in kcal/h	\dot{q}_{H_2O} in kcal/h m ²	+ \dot{Q}_O in kcal/h	-(\dot{Q}_{SR} + \dot{Q}_{ST}) in kcal/h	\dot{Q}_G in kcal/h	\dot{q}_G in kcal/h m ²	\dot{Q}_{H_2O} in kcal/h	\dot{q}_{H_2O} in kcal/h m ²	+ \dot{Q}_O in kcal/h	-(\dot{Q}_{SR} + \dot{Q}_{ST}) in kcal/h	\dot{Q}_G in kcal/h	\dot{q}_G in kcal/h m ²
1	113000	258000		7300	105700	1085000	124600	291000	1900		122700	744000
2	116000	265000		7300	108700	1096000	132500	310500	1900		130600	772500
3	82500	188700		2500	80000	889000	98400	225000	1900		96500	452000
4	102900	209500		7300	95600	1105000	129800	304000	1900		127900	767000
5	55800	127500	9930	17710	48020	618000	79500	210000	2260	4745	77015	512500
6	81800	220500	6000	14705	73095	1206000	94500	263000	2300	3302	93498	677000
7	66400	196500	8000	13895	60505	783000	72250	268000	1210	3395	69665	590000
9	103500	239000	6720	13450	96770	994000	119000	280500	2040	3295	117445	767000

Tabelle 8. Mittlere Temperatur Θ der Walzenbohrung in °C

Versuch	Glatte Walze (Oberwalze)		Ornamentwalze (Unterwalze)	
	Flußwasser	Reines Wasser	Flußwasser	Reines Wasser
1	243	130,5	276	149
2	236	118	277	138
3	166	86	241	145
4	213	98	273	139
5	134	64	196	108
6	206	115	246	124
7	187	95,2	209	87
8	207	106	238	120

5.2. Berechnung der mittleren Walzentemperatur in der Bohrung

Während der Versuche variierte die Zeit für eine Walzenumdrehung zwischen 8 und 23 s, die Kontaktzeit zwischen Glas und Walze zwischen 1 und 6 s. Durch diesen kurzzeitigen Kontakt ergaben sich starke und schnelle Wärmeschwingungen an der Walzenoberfläche. Die mathematische Untersuchung der Ausbreitung von Wärmeschwingungen in einfachen Körpern [2] ergab, daß diese mit zunehmender Eindringtiefe und zunehmender Schwingungsperiode sehr schnell nach einer e-Funktion abnehmen. Eine einfache Berechnung zeigte, daß unter Bedingungen, die denen des Walzens nahe kommen, eine plötzliche Wärmeflußänderung sich in 24 mm Tiefe — das entspricht der Wandstärke der Walzen — erst nach 130 s Kontakt bemerkbar macht. Wenn auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Hohlzylinder etwas größer sein dürfte, so kann doch aus diesen Überlegungen heraus die Ausbreitung eines „Wärmestoßes“, der periodisch einem bestimmten Teil am Umfang der Walze aufgeprägt wird, ermittelt werden. Die Wärme läuft beim Walzen von Glas auf einer Spiralbahn, die entgegen der Walzendrehung läuft, in die Walze hinein und kommt nach 5 bis 15 Umdrehungen je nach Walzengeschwindigkeit an der inneren Walzenoberfläche an. Auf dem Weg in die Walze hinein werden die Wärmeschwingungen stark gedämpft, so daß man annehmen kann, daß durch die innere Walzenoberfläche ein konstanter Wärmestrom fließt. Man kann daher auf den Wärmeübergang an der Innenbohrung die Gleichung für den konstanten, stationären Wärmeübergang anwenden. Es gilt die klassische Beziehung:

$$Q = 2\pi \cdot RL (\Theta - t) \cdot \tau \cdot k', \quad (8)$$

wobei Q die in der Zeit τ (1 h) von der Innenbohrung mit Radius R und der Länge L ans Kühlmedium übertragene Wärmemenge, Θ die Temperatur der mit dem Kühlwasser in Kontakt stehenden Walzenflächen der Innenbohrung in °C, t die Wassertemperatur in °C (Mitteltemperatur zwischen Kühlwassereintritt und -austritt) und k' die Wärmeübergangszahl bedeuten. Der Koeffizient k' für erzwungene Konvektion wurde für die bei der Walzenkühlung vorliegenden Bedingungen McADAMS [1] entnommen.

Über Gleichung (8) läßt sich, da alle anderen Größen bekannt sind, die Temperatur der Walzeninnenbohrung berechnen. Je nach Kühlwasserbeschaffenheit — reines Wasser oder Schmutzwasser — ändert sich jedoch die Wärmeübergangszahl k' um nahezu 100%. Da zur Küh-

lung z.T. ungereinigtes Flußwasser verwendet wurde, sind in Tabelle 8 die Werte für Θ , die man für beide Arten von Kühlwasser (ungereinigtes Flußwasser und kalkfreies, reines Wasser) erhält, aufgenommen worden. Die tatsächliche Wandtemperatur dürfte zwischen den beiden theoretischen Werten liegen.

5.3. Bestimmung der mittleren Kontakttemperatur beim Walzen

Die mittlere Kontakttemperatur zwischen Glas und Metall wurde näherungsweise nach der vereinfachten Theorie der Wärmeausbreitung in zeitlich veränderlichen Temperaturfeldern [3] bestimmt und mit den Meßwerten verglichen. Bringt man eine bestimmte Menge Glas, die zur Zeit $t = 0$ die Temperatur Θ_G hat, mit einer kalten ebenen Metallfläche (in vorliegendem Fall mit der Walze) der konstanten Temperatur Θ_W zur Zeit $t = 0$ in Kontakt, so ergibt sich als mittlerer Wärmestrom für die Zeit $t = 0$ bis $t = T$ (nur Wärmeleitung) von:

$$\dot{q}_{G(0 \rightarrow T)} = 2 \cdot \lambda (\Theta_G - \Theta_W) \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot h \cdot T}} \text{ in kcal/h} \cdot \text{m}^2 \quad (9)$$

mit λ , der Wärmeleitfähigkeit des heißen Körpers, d. h. hier des Glases, und h der Temperaturleitfähigkeit des Glases bei den Versuchsbedingungen. Im Augenblick des Kontaktes fällt die Temperatur Θ_G an der Kontaktfläche des Glases plötzlich auf Θ_W ; auch die Temperatur der übrigen Glasmasse fällt während der Kontaktzeit ab, wobei sich zur Kontaktfläche parallele Isothermen ergeben. Die Temperatur des kalten Körpers wird dabei als zeitlich konstant gleich Θ_W angenommen. Diese idealisierten Voraussetzungen weichen von den tatsächlichen Vorgängen beim Walzen ab, denn erstens ist die Kontaktfläche nicht eben, und zweitens ändert sich die Oberflächentemperatur der Walze durch die Berührung mit dem heißen Glas. Trotz dieser Einschränkungen wurde Gleichung (9) auf den Walzvorgang angewandt¹⁾. Für die einzelnen Stoffwerte wurde angenommen:

$$\lambda = 1,58 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{grad}$$

und

$$h = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = 0,00245 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Die mittleren Werte für λ , c und ρ entsprechen denen des Gußglases bei Walztemperatur, d. h. zwischen 1100 und 800 °C [4, 5]. Da der mittlere Wärmefluß \dot{q}_G aus den Versuchswerten ermittelt werden kann und die Kontaktzeiten bekannt sind, kann aus Gleichung (9) die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta_m$ errechnet werden; es gilt:

$$\Delta\Theta_m = \Theta_G - \Theta_W = \dot{q}_{G(0 \rightarrow T)} \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot h \cdot T}}{2 \lambda} \quad (10)$$

Aus den Temperaturmessungen im Glas vor Eintritt in die Walzmaschine sind die Glastemperaturen Θ_G bekannt, und zwar ist die Glastemperatur der glatten

¹⁾ Bringt man zwei einseitig, unendlich ausgedehnte Körper mit in sich konstanter, voneinander aber abweichenden Temperaturen zur Zeit $t = 0$ in idealen Wärmekontakt, dann stellt sich in der Berührungsebene eine Kontakttemperatur ein, die zwischen den beiden Ausgangstemperaturen liegt und während der gesamten Kontaktzeit konstant ist. Die der Gleichung (9) zugrunde liegende Temperaturkonstanz von Θ_W ist, da die Wärmeeindringzahl $b = \sqrt{c \cdot \lambda \cdot \rho}$ von Metall wesentlich größer ist als die von Glas, in erster Näherung zutreffend. Die wirkliche Kontakttemperatur unterscheidet sich aber von Θ_W nur einem konstanten Faktor. Insofern ist Gleichung (9) nur bedingt richtig. [Anm. des Übers.]

Tabelle 9. Mittlere Kontakttemperaturen der Walzen in °C

Versuch	Glasart	mittlere Kontakttemperatur in °C						Kontaktwinkel in °		Kontaktzeit in 10 ⁻³ h	
		Oberwalze			Unterwalze			Oberwalze	Unterwalze	Oberwalze	Unterwalze
		θ _G	Δθ	θ _w	θ _G	Δθ	θ _w				
1	Ornamentglas 4,35 mm	951	566	385	1101	505	596	54	92	0,349	0,595
2	Ornamentglas 4,6 mm	990	570	420	1140	523	617	54	92	0,351	0,598
3	Drahtglas 6 mm	948	753	195	1098	418	680	50	98 bis 118	0,930	1,119
4	Ornamentglas 4,05 mm	948	542	406	1098	522	576	47	90	0,314	0,602
5	Dickglas 10,41 mm	952	501	451	1102	572	530	48	91	0,854	1,619
6	Ornamentglas 4,32 mm	952	535	417	1101	402	700	40	91	0,254	0,580
7	Eisblumenglas 21 B — 3,65	933	412	521	1083	383	700	51,3	78	0,360	0,547
9	Ornamentglas 3,98 mm	917	517	400	1067	502	565	52	82	0,350	0,553

Oberwalze θ_G gleich der gemessenen Glasoberflächen-temperaturen vor der Walze und die der unteren Ornamentwalze gleich der über dem Auslaufstein gemessenen Glastemperatur. Mit diesen Temperaturen errechnet man die mittlere Kontakttemperatur aus Gleichung (10) zu:

$$\theta_w = \theta_G - \Delta\theta_m \quad (11)$$

Die so errechneten Temperaturen sind für die acht Versuche in Tabelle 9 zusammengestellt. Wie man der Tabelle entnehmen kann, sind — von fünf Werten abgesehen — alle entsprechenden Werte größenordnungsmäßig gleich. Diesen berechneten Werten stehen die mit Hilfe eines Anlegethermometers in Walzenmitte — bei der Oberwalze auf der obersten und bei der Unterwalze auf der untersten Mantellinie — gemessenen Temperaturen gegenüber. Es ergab sich bei Versuch 5: Oberwalze 424 °C, Unterwalze 192 °C; Versuch 6: Oberwalze 324 °C, Unterwalze 202 °C; Versuch 7: Oberwalze 396 °C, Unterwalze 130 °C. Diese mit einem Anlegethermometer gemessenen Temperaturen sind jedoch unsicher, besonders bei der gravierten Unterwalze.

5.4. Berechnung der Temperatur des Glases nach dem Walzen

Die klassische Gleichung für den Wärmeaustausch bei zeitlich veränderlichen Temperaturfeldern lautet:

$$\frac{\theta - \theta_w}{\theta_G - \theta_w} = \Psi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du, \quad (12)$$

mit $u = \frac{x}{2\sqrt{hT}}$.

Sie gilt unter den in 5.3. erwähnten Voraussetzungen und Bedingungen. Die Werte der Fehlerfunktion Ψ(u) sind in physikalischen und mathematischen Handbüchern [2] für die verschiedenen Werte von u tabelliert und können dort entnommen werden. x in der Funktion für u ist dabei der Abstand von der Oberfläche, in dem zur Zeit T die Temperatur θ herrscht. Für die Versuche 5 und 9, bei denen die Walzgeschwindigkeit sehr unterschiedlich war, errechneten sich die in Tabelle 10 angegebenen Temperaturen in der Blattmitte vor Eintritt in die Walze und nach dem Kontakt mit den Walzen.

Die sehr einfachen Berechnungen bestätigen größenordnungsmäßig die Pyroptomessungen. Diese Werte zeigen, daß das Blattinnere sich beim Walzen, selbst bei geringen Blattdicken, nur wenig abkühlt. Nur die Außen-

schichten werden stark abgekühlt. Die Berechnungen zeigen außerdem, daß Gleichung (12), ohne einen zu großen Fehler zu machen, auf die Vorgänge beim Walzen angewandt werden kann, obwohl die Dicke des heißen Körpers (Glas) nicht unendlich ist, wie es die Theorie fordert. Die Gründe hierfür sind: Erstens ist die Temperaturleitfähigkeit des Glases sehr gering, zweitens sind die Kontaktzeiten sehr klein und drittens ist die Blattdicke relativ groß; sie liegt in der Praxis über 3 mm.

5.5. Aufstellung einer Wärmebilanzgleichung für das Walzen

Setzt man in Gleichung (9), die die mittlere abgeführte Wärmemenge/h wiedergibt, für die Kontaktzeit eines Walzenoberflächenelementes T ihre Funktion vom Kontaktwinkel α, dem Walzendurchmesser D und der Walzenumfangsgeschwindigkeit v ein, so erhält man nach Umformung

$$\dot{q} = 1,596 (\theta_G - \theta_w) \frac{\lambda}{\sqrt{h}} \sqrt{\frac{v}{\alpha D}} \text{ in kcal/h} \cdot \text{m}^2, \quad (13)$$

eine Gleichung, die den mittleren Wärmestrom, bezogen auf die Flächeneinheit beim Kontakt Glas/Walze, wiedergibt (Bild 14).

Tabelle 10. Temperaturen in der Blattmitte vor Eintritt in die Walzen und nach Kontakt mit den Walzen

Versuch*)	Temperatur in °C					
	Oberwalzenseite			Unterwalzenseite		
	Vor dem Walzen	Nach Kontakt mit den Walzen	Temp.-Abfall	Vor dem Walzen	Nach Kontakt mit den Walzen	Temp.-Abfall
5	952	946 (5,2 mm Tiefe)	6 grd	1102	1074 (5,2 mm Tiefe)	28 grd
9	917	852 (2 mm Tiefe)	65 grd	1067	957	110 grd

*) Versuchsdaten: Versuch 5: d = 10,41 mm, v = 1,065 m/min, Temperatur nach dem Walzendurchgang 922 °C (Pyropto), Versuch 9: d = 3,98 mm, v = 2,8 m/min, Temperatur nach dem Walzendurchgang: 847 °C (Pyropto).

Der Unterschied der Temperaturen in Blattmitte je nachdem, ob von der Ober- oder Unterseite aus gerechnet wird, ist darin begründet, daß bei beiden Berechnungen ein einseitig unendlich ausgedehnter Glaskörper betrachtet wird, dessen Anfangstemperatur konstant ist und den gemessenen Oberflächentemperaturen entspricht. [Anm. d. Übers.]

Auf eine Walze, die auf der Länge L in Kontakt mit Glas ist, bezogen, ergibt sich aus obiger Gleichung ein Wärmestrom

$$\dot{Q} = 0,798 (\theta_G - \theta_W) \frac{\lambda}{\sqrt{h}} \cdot L \sqrt{\alpha \cdot D \cdot v} \text{ in kcal/h.} \quad (14)$$

Diese beiden Gleichungen wurden auf ihre Übereinstimmung mit den Meßwerten untersucht. Da die Untersuchungen an nur einer Walzmaschine und einem Glas durchgeführt wurden (D , λ und h waren also in etwa konstant), wurden auch konstante Temperaturen θ_G und θ_W angenommen; d. h. es wurden für alle Versuche die gleichen Bedingungen vorausgesetzt. Unter diesen Voraussetzungen genügt es, das Verhältnis $\frac{\dot{q}}{\sqrt{\frac{v}{\alpha}}}$ für die einzelnen Versuche und Walzen zu bestimmen. Die errechneten Werte sind in Tabelle 11 angeordnet, nach zunehmender Walzenumfangsgeschwindigkeit zusammengestellt.

Wie man der Tabelle entnehmen kann, ergaben sich für die Versuche 3, 7 und 6 Werte für obiges Verhältnis, die z. T. stark von den übrigen Werten abweichen. Vier von 16 Verhältniswerten entsprechen genau dem Mittelwert. Bei Versuch 3, der während der Drahtglasherstellung durchgeführt wurde, ist die Abweichung dieses Verhältniswertes für die Unterwalze wahrscheinlich auf die Drahteinführung nahe der Unterwalze und die Wärmeaufnahme des Drahtnetzes zurückzuführen. Außerdem wurden Ablagerungen aus dem Kühlwasser in dieser Walze festgestellt. Die Abweichung dieses Verhältniswertes bei Versuch 6 für die Unterwalze ist ebenfalls auf Ablagerungen in der Kühlbohrung zurückzuführen.

Ganz anderer Natur sind die Abweichungen bei Versuch 7. Bei diesem Versuch wurden Walzen größerer Wanddicke verwendet, die außerdem die Wärme schlechter leiteten, was den Abfall des Wärmeflusses erklärt. Sehr gut übereinstimmende Werte ergaben sich bei

den Versuchen 1, 2, 4, 5 und 9. Obwohl diese Versuche unter industriellen Bedingungen durchgeführt wurden, scheinen bei ihnen die angenommenen Voraussetzungen gegeben zu sein. Zu bemerken ist noch, daß die maximale Abweichung der Verhältniswerte — ausgenommen die vier sehr stark abweichenden Werte der Versuche 3, 7 und 6 — nur 15% beträgt.

Wie man weiter sieht, hat die Glasblattdicke, zumindest bei Dicken zwischen 3,6 und 10,4 mm, keinen systematischen Einfluß auf den Wärmestrom. Die aufgestellte Gleichung scheint also den Wärmeaustausch mit genügender Genauigkeit wiederzugeben, was durch noch genauere Messungen bestätigt werden sollte.

Zusammenfassend kann man nach den vorliegenden Messungen sagen:

1. Der vom Kühlwasser der Walzen aufgenommene Wärmestrom ist proportional der Quadratwurzel aus dem Produkt von Kontaktwinkel, Walzenaußendurchmesser und Walzenumfangsgeschwindigkeit, d. h. der Walzengeschwindigkeit, da alle anderen Größen wie die Glaszusammensetzung, die Glas-temperatur im Zulauf, das Walzenmaterial, die Walzenkühlung und die Glasblattbreite, die im Kontakt mit den Walzen steht, sich nicht ändern.
2. Der auf die Flächeneinheit bezogene Wärmefluß im Kontakt Glas/Walze ist proportional der Quadratwurzel aus dem Quotienten von Walzenumfangsgeschwindigkeit und dem Produkt von dem Walzendurchmesser und Kontaktwinkel; alle anderen Einflußgrößen bleiben, wie schon erwähnt, konstant.

Diese beiden Ergebnisse und die Tatsache, daß die Blattdicke zwischen 3,6 und 10,4 mm nicht von Einfluß auf den Wärmestrom ist, erlauben, die entsprechenden Einstellungen bei Produktionsänderungen und bei Neukonstruktionen von Walzmaschinen vorauszusagen. Ein wichtiger Vorgang beim Walzen von Glas, nämlich

Tabelle 11. Vergleich der spezifischen Wärmeströme durch Ober- und Unterwalze

Daten	Versuch							
	5	3	7	9	4	2	1	6
Walzenumfangsgeschwindigkeit in m/min	1,065	1,99	2,69	2,81	2,83	2,907	2,93	2,97
Glasblattdicke in mm	10,4	6,0	3,65	3,98	4,05	4,6	4,35	4,32
Oberwalze (glatt): Durchmesser in mm Bohrungsdurchmesser in mm	129,1 82	128,5 82	128,1 75	129,0 82	128,5 82	129,1 82	128,5 82	129,1 82
Material	Guß Nr. 6	Guß Nr. 5	Imphy Nr. 8	Guß Nr. 8	Guß Nr. 5	Guß Nr. 6	Guß Nr. 5	Guß Nr. 6
$\frac{\dot{q} \cdot 10^{-6}}{\sqrt{\frac{v}{\alpha}}}$	4,16	4,47	3,31	4,27	4,52	4,73	4,88	4,43
Unterwalze: Durchmesser in mm Bohrungsdurchmesser in mm	129,5 80	128,3 82	129,3 60	128,7 80	129,5 80	129,5 80	128,7 80	129,5 80
Material	Stahl Nr. 5	Stahl Nr. 4	Stahl Nr. 21 B	Stahl Nr. 6	Stahl Nr. 5	Stahl Nr. 5	Stahl Nr. 6	Stahl Nr. 5
$\frac{\dot{q} \cdot 10^{-6}}{\sqrt{\frac{v}{\alpha}}}$	4,72	3,35	3,17	4,15	4,32	4,36	4,18	3,75

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.