

minimale 2,00 mm. Die Abweichungen von dem mittleren Wert hielten sich demnach in den Grenzen von $+ 0,11$ bis $- 0,17$ mm. Die einzelnen Stäbchen wiesen nur mehr geringe Unterschiede auf, mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% überschritten diese nicht 0,15 mm. Ein merklicher Einfluß durch den Grad der Abnutzung des Fräskopfes konnte nicht nachgewiesen werden.

Für die Untersuchung des Einflusses der Schliffdicke wurden aus zwei Glasproben, aus unmittelbar übereinanderliegenden Schichten, Schlierenstäbchen verschiedener Dicke, abgestuft von 0,7 mm, 1,25 mm, 1,6 mm, 2,05 mm, 3,1 mm, 4,15 mm bis 6,15 mm, vorbereitet. Die Schlierenbilder bestätigen die Zweckmäßigkeit einer Schliffdicke von etwa 2 mm. Abweichungen der Schliffdicke von $\pm 0,3$ mm beeinträchtigen die Auswertung praktisch noch nicht.

Um einen Einfluß einer statistischen Glasproben-Entnahme mit einer Begrenzung des der Untersuchung zugeführten Anteiles zu prüfen, wurden drei Glasstreifen mit abgestufter optischer Qualität ausgewählt und über die ganze Breite des Glasbandes Schlierenstäbchen angefertigt. Von diesen wurden von Zentimeter zu Zentimeter Schlierenbilder abgebildet und ausgewertet. Diesem richtigen Ergebnis für eine Einstufung eines jeden Glasstreifens wurden jene von 17 Varianten einer begrenzten Glasproben-Entnahme gegenübergestellt. Eine statistische Glasproben-Entnahme, beispielsweise mit einer Begrenzung des Anteiles der der Untersuchung zugeführten Glasbandbreite von

23 bis 24%, bedingt eine statistische durchschnittliche Abweichung vom richtigen Ergebnis von etwa $\pm 1,7\%$, bei maximalen Abweichungen bis etwa 6,4%. Bedenkt man, daß der Arbeitsaufwand für die Vorbereitung der Schlierenstäbchen durch diese Art der Glasproben-Entnahme auf weniger als ein Viertel verringert wird, sind angeführte, geringe Abweichungen vom richtigen Ergebnis in Kauf zu nehmen.

Auch bei respektvoller Berücksichtigung der physikalischen Grundlagen der Entstehung eines Schlierenbildes und der dabei auftretenden Fehlermöglichkeiten, lassen die durchgeführten Untersuchungen die Folgerung zu, daß es mit dem SCHARDINSchen Farbschlierenmikroskop durchaus möglich ist, für eine routinemäßig durchgeführte Kennzeichnung des Homogenitätszustandes des Tafelglases Schlierenbilder abzubilden, deren Auswertung und Einstufung nach einer empirischen, allerdings recht groben Skala den Anforderungen der betrieblichen Praxis genügt. Die bei einer sorgfältigen Vorbereitung einer großen Anzahl von Schlierenstäbchen auftretenden Abweichungen von der exakten Quaderform und von der festgelegten Dicke verzeichnen das Ergebnis nicht merklich. Die durch eine entsprechend begrenzte, statistische Glasproben-Entnahme bedingten Abweichungen vom richtigen Ergebnis sind nicht groß und im Hinblick auf die bedeutende Verringerung des Arbeitsaufwandes vollauf gerechtfertigt.

Der Autor dankt Fräulein K. HORMANN für die Durchführung der schlierenoptischen Untersuchungen.

6. Literatur

- [1] SPITZ, T. und GOERK, H.: Methode zur Kennzeichnung der technologischen Bedingungen der Herstellung einer Glastafel. In: O. Verf.: VII^e Congrès International du Verre, Bruxelles 28 Juin—3 Juillet 1965. Comptes Rendus. Charleroi: Institut National du Verre 1965. II/3/85. S. 1 bis 10. [Ref. Glastechn. Ber. 41 (1968) S. 214.]
- [2] SPITZ, T.: Die Bedeutung der Glasmassenhomogenität für die Flachglaserzeugung. Sprechsaal 100 (1967) S. 372 bis 384.
- [3] SCHARDIN, H.: Das Schlierenmikroskop und seine Anwendung in der Glastechnik. Glastechn. Ber. 27 (1954) S. 70—79.
- [4] RAMSAUER, R.: Anwendung des Schlierenmikroskopes zur Untersuchung der Schichtung von Tafelglas. Glastechn. Ber. 27 (1954) S. 374—381.
- [5] LÖFFLER, J.: Über die Messung der Homogenität von Glas, insbesondere zum Zwecke der Kennzeichnung der Schmelzleistung von Wannen. Glastechn. Ber. 38 (1965) S. 269—276.
- [6] GOERK, H.: Über die Schichtstruktur des Tafelglases und ihre Störungen. Glastechn. Ber. 41 (1968) Nr. 12, S. 475 bis 488.
- [7] BECKER, H.: Zur Problematik des SCHARDINSchen Schlierenmikroskopes. Interner Bericht des Hauptlabors der Deutschen Tafelglas AG vom 10. 1. 1966. S. 1—20.
- [8] HANNES, H.: Über die Empfindlichkeit der Interferenz- und Schlierenverfahren zur Untersuchung der Schichtung des Tafelglases. Glastechn. Ber. 29 (1956) S. 83 bis 89.
- [9] BECKER, H.: Eine neue Methode zur Erforschung der Strömung in Flachglaswannen. Glastechn. Ber. 33 (1960) S. 411—416.
- [10] BECKER, H.: Über die Rolle der Strömung bei der Homogenisierung des Glases in Flachglaswannen. Ein Beitrag zum Problem der Schichtung, erläutert am Beispiel einer Tafelglaswanne. Glastechn. Ber. 40 (1967) S. 124—136. (48392)

DK 670.171.5:539.319:666.15

Über den flächenhaften Eigenspannungszustand gezogener Tafelgläser

VON VIKTOR CAIMANN, Weiden (Opf.)

(Mitteilung aus dem Physikalischen Laboratorium Weiden der Deutschen Tafelglas AG, Weiden)

(Eingegangen am 2. Oktober 1968)

Zum Nachweis und zur quantitativen Messung von flächenhaften Eigenspannungen in Tafelgläsern wurde ein Gerät entwickelt. Mit seiner Hilfe werden Aussagen über die Entstehung, den Charakter, die Größe und die Lage dieser Spannungen gemacht.

Die Herstellung von Tafelglas — gleich nach welchem Verfahren — ist bekanntlich immer mit dem Auftreten von Spannungen im erzeugten Glasband verbunden. Beim Abkühlen des Bandes im Ziehschacht entstehen im Glas sowohl temporäre als auch bleibende Spannungen.

Während die temporären Spannungen mit abnehmender Glasbandtemperatur immer kleiner werden, um schließlich ganz zu verschwinden, frieren die bleibenden Spannungen als sogenannte „Eigenspannungen I. Art“ [1] im Glase ein. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich

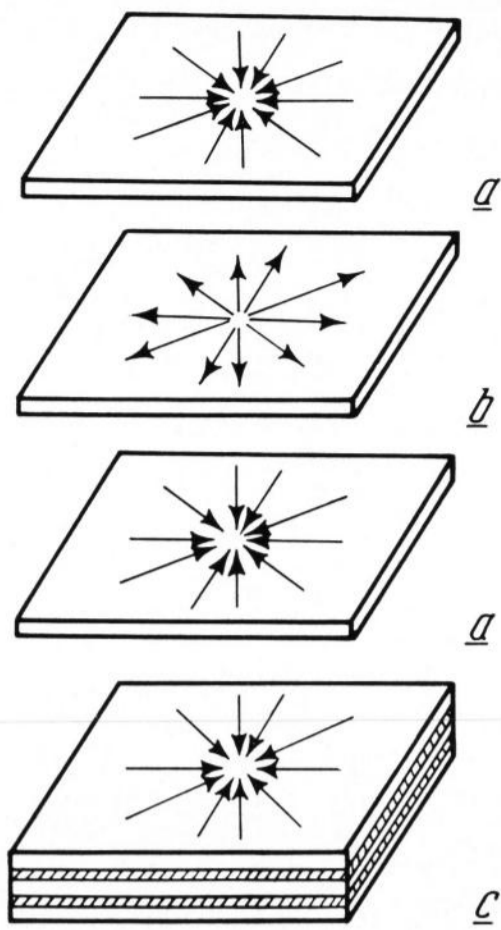


Bild 1. Schematische Darstellung der Spannungen über die Dicke einer gezogenen Glastafel.
 a = Druckspannungsschicht,
 b = Zugspannungsschicht,
 c = Lage der Schichten in der Glastafel.

ausschließlich mit der Untersuchung dieser Spannungen.

Bei einigen Arten der Flachglaserzeugung entstehen während des ungehinderten Abkühlens der Gläser so große Eigenspannungen, daß die Grenzen der Bruchfestigkeit überschritten werden. Bei diesen Verfahren läßt man das Glas unmittelbar nach seiner Formung durch einen temperaturgesteuerten Kühllofen laufen. Dies ist aber bei dem vertikal ziehenden Fourcault- bzw. Pittsburgh-Verfahren nicht möglich. Es ist daher eine der wichtigsten Aufgaben dieser Glaserzeugungsbetriebe, dafür zu sorgen, daß die Spannungen in den fertigen Tafeln eine gewisse obere Grenze nicht überschreiten, damit es weder während des Ziehens noch beim späteren Bearbeiten der Blätter zum Bruch kommt. Alle Messungen, über die in dieser Arbeit berichtet wird, wurden an Fourcault-Gläsern gemacht. Die dabei gewonnenen Schlußfolgerungen und Ergebnisse können aber sinngemäß auf jedes Vertikal-Ziehverfahren angewendet werden.

1. Beim Ziehen von Tafelglas auftretende Spannungssysteme

Jede gezogene Glastafel wird geometrisch charakterisiert durch ihre Länge, ihre Breite und ihre Dicke. Man kann daher einer solchen Tafel ein rechtwinkliges Koordinatensystem so zuordnen, daß die x-Achse senkrecht zu den Oberflächen, die y-Achse parallel zu den Oberflächen, aber senkrecht zur Ziehrichtung, und die z-Achse in der Ziehrichtung zu liegen kommen. Je nachdem, ob man bei der Untersuchung in der x- oder in der y- oder in der z-Richtung auf das Glasblatt blickt, kann man zwei voneinander verschiedene Spannungssysteme unterscheiden. Betrachtet man das Glas zwischen gekreuzten Polarisatoren senkrecht zur x,y- bzw. x,z-Ebene, so erhält man in beiden Fällen ein gleichartiges Spannungsbild. Die so sichtbar werdenden Spannungen sollen die „Spannungen über die Dicke“ der Glastafel genannt werden. Blickt man hingegen in der x-Richtung, also senkrecht zu den Oberflächen, auf das Glas, so ergibt sich ein vollkommen anderes Spannungsbild. Dieses wird hervorgerufen durch die flächenhaften Spannungen, über die in dieser Arbeit hauptsächlich berichtet werden soll.

1.1. Spannungen über die Dicke einer gezogenen Glastafel

Die Entstehung der Spannungen über die Dicke wird verständlich, wenn man sich überlegt, daß das plastische Glasband zunächst an seinen beiden Oberflächen erstarrt. Der noch plastische Kern wird erst später fest und ist bestrebt, sich dabei zusammenzuziehen. Dies gelingt ihm aber nicht, weil er mit den schon starren Oberflächen verbunden ist. Beim Erstarren wird er daher zugverspannt. Demzufolge müssen die schon starren Oberflächen des Glases gleichzeitig unter Druckbelastung kommen. Eine solche Glastafel besteht also aus zwei Druckspannungs-, einer Zugspannungs- und aus zwei neutralen Schichten. In Bild 1 sind diese Verhältnisse schematisch dargestellt. Die Spannungen innerhalb jeder dieser Schichten sind isotrop; d. h. auf jeden Punkt in einer Spannungsschicht wirken parallel zu den Glasoberflächen aus allen Richtungen gleich große Spannungen ein. Der Spannungsverlauf über die Dicke entlang einer Geraden senkrecht zu den Oberflächen ist eine Parabel. Aus Gleichgewichtsgründen müssen die Spannungsintegrale entlang dieser Geraden Null ergeben. Man nennt ein Spannungssystem der soeben beschriebenen Art geschichtet, isotrop und in der Dicke ausgeglichen [2]. Für die Schneidbarkeit des Glases spielen diese Spannungen nur eine untergeordnete Rolle [3, 4], während sie — nach den Erfahrungen des Autors — für die Ebenflächigkeit des gezogenen Glasbandes von ausschlaggebender Bedeutung sind. Die Spannungen über die Dicke entziehen sich der Beobachtung, wenn man eine Glastafel senkrecht zu den Oberflächen mit polarisiertem Licht durchstrahlt.

1.2. Flächenhafte Spannungen einer gezogenen Glastafel

Die Spannungen über die Fläche des gezogenen Bandes haben ähnliche Entstehungsursachen. Die Spannungskurve einer gleichmäßig dicken, überall gleich

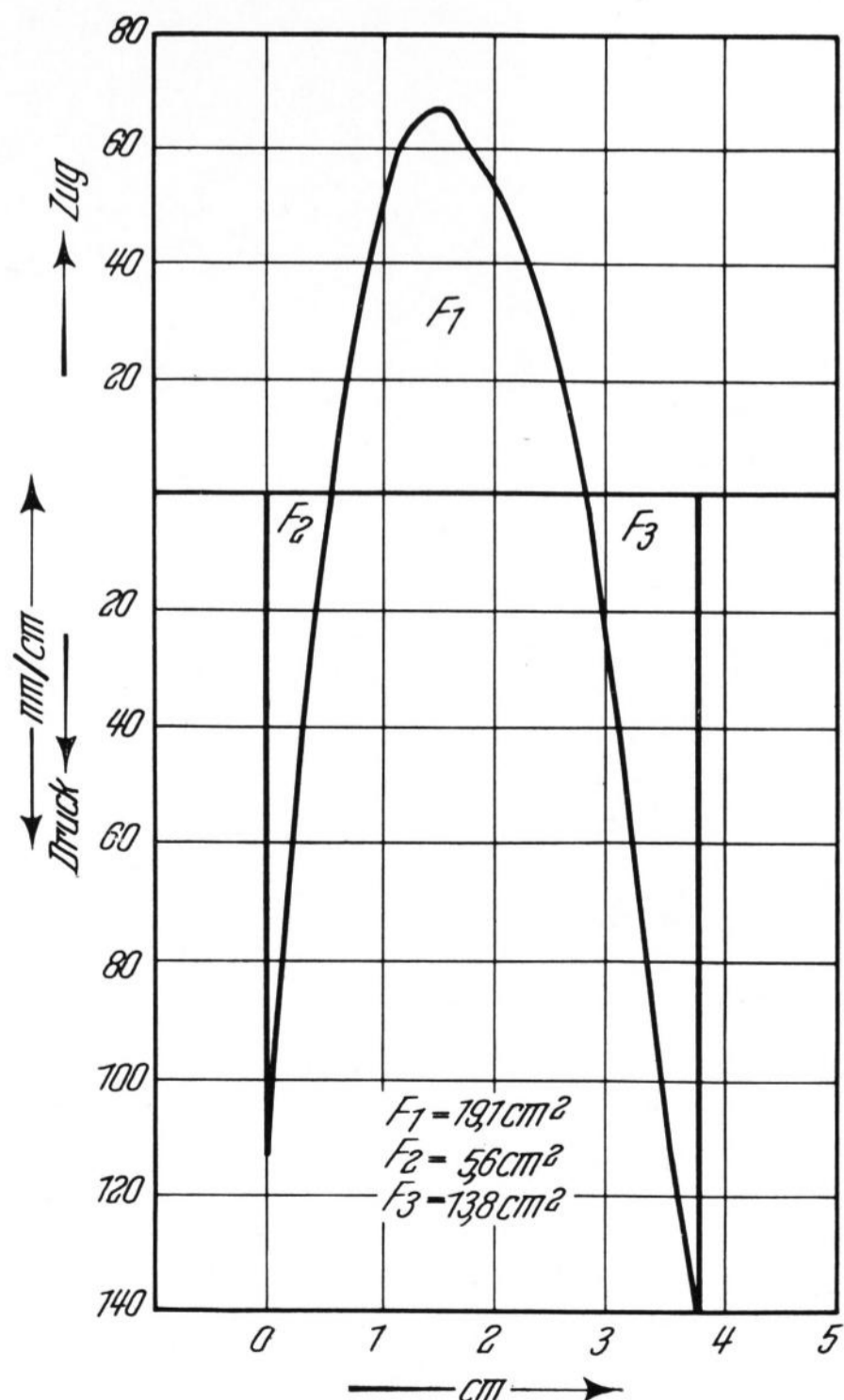


Bild 2. Flächenhafter Spannungsverlauf an einer Glastafel.

heißen Tafel, die nur von den Borten her abgekühlt wird, muß ebenfalls eine Parabel sein. Das ungestörte Glasband wird zuerst von den Borten her nach innen abkühlen und fest werden. Die Glasbandmitte erstarrt erst später und ist natürlich dabei ebenfalls bestrebt, sich nach allen Richtungen gleichmäßig zusammenzuziehen. In der Richtung parallel zur Ziehöse kann das Glasband diesem Bestreben noch nachgeben und sich ziemlich ungehindert zusammenziehen, wobei lediglich die Bandbreite etwas abnimmt und entweder keine meßbaren oder nur sehr geringe Spannungen auftreten. Anders liegen die Verhältnisse aber in der Ziehrichtung. Ein Zusammenziehen beim Abkühlen ist hier nicht mehr möglich, da das Band praktisch als unendlich lang angesehen werden kann. Es muß sich also, wie im oben geschilderten Fall der geschichteten Spannungen, in der Mitte des Glasbandes eine Zugspannung in Ziehrichtung ausbilden. Und auch hier wird, um die Gleichgewichtsbedingungen zu erfüllen, zu beiden Seiten des Zugspannungsbereiches je eine Druckspannungszone auftreten. Diese Spannungen sind nur zu sehen und zu messen, wenn man senkrecht auf die Oberfläche blickt, nicht aber, wenn man das Glas über die Dicke betrachtet. In Bild 2 ist der Spannungsverlauf an einer etwa 4 cm breiten, 25 cm langen und 0,5 cm dicken, gezogenen Glastafel dargestellt.

Die Erfahrung lehrt, daß diesen flächenhaften Spannungen für die Schneidbarkeit eine große Bedeutung zukommt [3, 4]. Im Realfall ist der Spannungsverlauf von Borte zu Borte — wie noch ausführlich gezeigt werden wird — je nach Art und Zustand des Ziehschachtes unterschiedlich.

2. Messung von Eigenspannungen in Tafelgläsern

Für die Messung der in Tafelgläsern auftretenden Spannungen kommen praktisch nur optische Methoden in Frage. Der Schlüssel dazu ist die sogenannte Hauptgleichung der ebenen Spannungsoptik [5, 7]. Sie sagt folgendes aus: Befindet sich ein spannungsdoppel-

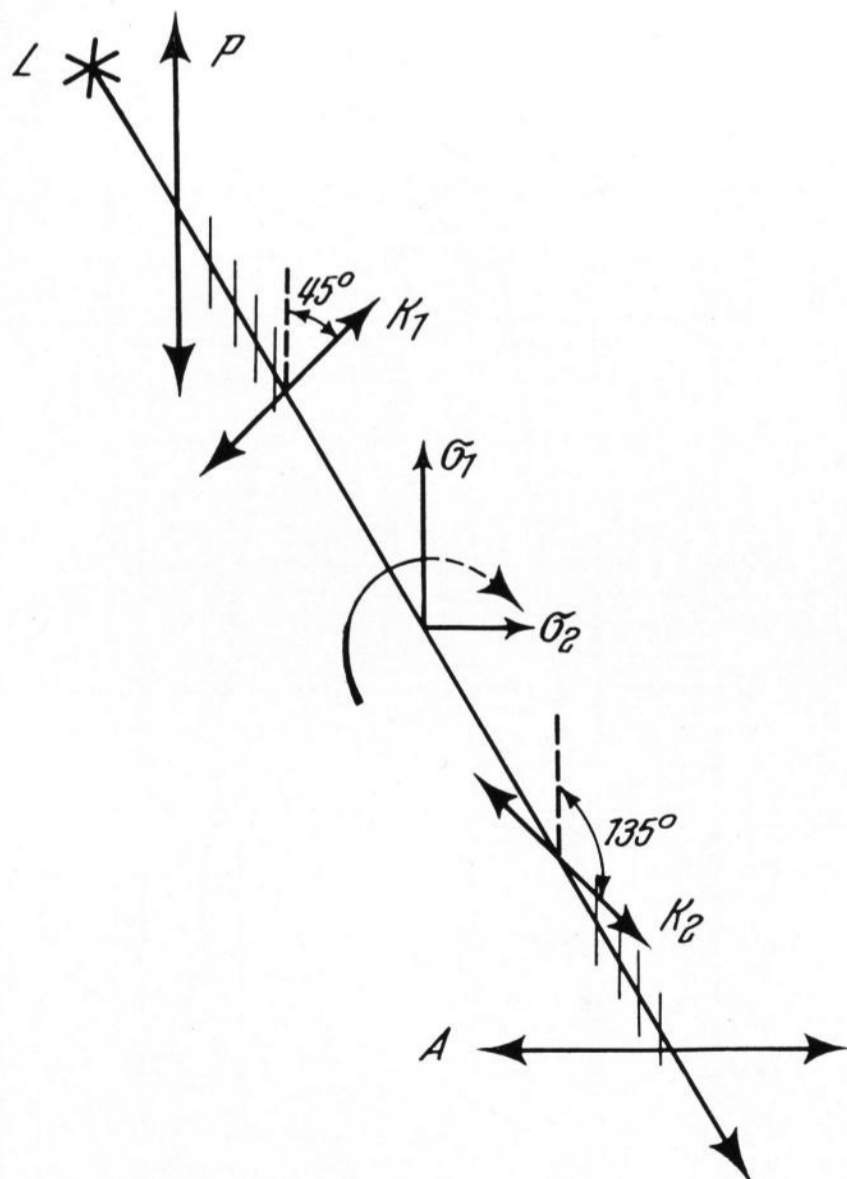


Bild 3. Anordnung zur Spannungsmessung mit zwei Kompensatoren nach TARDY [6].

L = Lichtquelle, σ_2 = 2. Hauptspannung,
 P = Polarisator, K_2 = Kompensator 2,
 K_1 = Kompensator 1, A = Analysator,
 σ_1 = 1. Hauptspannung,

brechendes Medium im Strahlengang zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren, so wird wegen der dabei auftretenden relativen Phasenverschiebung γ das Gesichtsfeld aufgehellt. Diese Aufhellung ist proportional der Differenz der senkrecht aufeinanderstehenden Hauptspannungen σ_1 und σ_2 , der Dicke d des Mediums, seinem spannungsoptischen Koeffizienten C und umgekehrt proportional der Wellenlänge λ des verwendeten Lichtes. Mathematisch ausgedrückt ist das:

$$\gamma = (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{Cd}{\lambda}. \quad (1)$$

Durch diese Gleichung wird die sogenannte relative Phasenverschiebung oder Isochromaten-Ordnung γ definiert. Sie ist die eigentliche Meßgröße, die man bestimmen muß. Dafür gibt es grundsätzlich mehrere Methoden. Die genaueste dürfte die Kompensationsmethode sein. Hierbei bedient man sich zur Messung von Gangunterschieden sogenannter Kompensatoren. Dies sind optische Geräte, mit denen eine meßbare, veränderliche Phasenverschiebung erzeugt werden kann. Bringt man ein solches Gerät vor oder hinter das Medium in den Strahlengang, so findet eine Überlagerung der Phasenverschiebung von Medium und Kompensator statt. Durch Veränderung der Phasenverschiebung des Kompensators kann die Resultierende zu Null gemacht werden. Die Anzeige am Kompensator ist dann direkt ein Maß für die Phasenverschiebung im Medium, nach der Hauptgleichung der Spannungsoptik also auch direkt ein Maß für die gesuchte Spannung. Bei einer derartigen Kompensation im Polarisationsmikroskop muß immer das Achsenkreuz Polarisator—Analysator unter 45° und der Kompensator parallel zu einer Hauptspannungsrichtung im Medium gerichtet sein.

Manchmal ist es von Vorteil, statt des einen Kompensators zwei zu verwenden. In Bild 3 ist die Aufstellung nach TARDY [6] schematisch dargestellt. Das Licht von der Lichtquelle L passiert zunächst den Polarisator, wird linear polarisiert und trifft auf den ersten Kompensator in Form eines $\lambda/4$ -Plättchens. Nach dem Durchgang durch den Kompensator ist es in zirkular polarisiertes Licht umgewandelt. Dieses trifft jetzt — wenn sich im Strahlengang keine Probe befindet — auf den zweiten, um 90° gegenüber dem ersten gedrehten Kompensator, der ebenfalls ein $\lambda/4$ -Plättchen ist, und es wird nach Durchgang durch diesen wieder linear polarisiert. Da die Schwingungsrichtung dieses linear polarisierten Lichtes senkrecht zur Durchlaßrichtung des Analysators liegt, wird der Raum hinter dem Analysator dunkel bleiben. Gibt man nun zwischen den beiden $\lambda/4$ -Plättchen ein doppelbrechendes Medium in den Strahlengang, so wird die Schwingungsrichtung des linear polarisierten Lichtes nach dem zweiten $\lambda/4$ -Plättchen nicht mehr senkrecht zur Durchlaßrichtung des Analysators stehen. Der Raum hinter dem Analysator ist aufgehellt. Der Analysator wird nun so lange gedreht, bis sein Gesichtsfeld wieder dunkel ist. Es läßt sich leicht zeigen [7], daß der zur Kompensation notwendige Drehwinkel proportional zur Differenz der zu messenden Hauptspannungen ist.

3. Gerät zur automatischen Messung ebener Spannungssysteme

Die geschilderte Anordnung hat den großen Vorteil, daß sie sich in Verbindung mit sogenannten Halb-

schattenplatten vorzüglich zur automatischen Spannungsmessung eignet. Halbschattenplatten bestehen aus zwei gleich dicken Quarzplatten. Die beiden Platten unterscheiden sich dadurch voneinander, daß die eine aus einem Rechtsquarz und die andere aus einem Linksquarz geschnitten ist [8]. Bringt man diese Halbschattenplatten in den Raum zwischen dem zweiten Kompensator und dem Analysator, so erscheinen bei abgeglicherer Anordnung die Platten halbdunkel, und ihre Trennlinie verschwindet. Stört man den Abgleich der Anordnung durch Einbringen eines doppelbrechenden Mediums in den Strahlengang, so wird, je nach Art der Doppelbrechung, entweder der rechtsdrehende Quarz dunkel und der linksdrehende hell oder umgekehrt.

In Bild 4 ist das Schema der vom Autor verwendeten Anordnung zur automatischen Spannungsmessung angegeben. Die Lichtquelle wird dabei durch das erste Objektiv in die Öffnung des ersten $\lambda/4$ -Plättchens abgebildet. Zwischen dem ersten Objektiv und der Lichtquelle befindet sich ein Wärmeschutzfilter und vor dem Polarisator ein Interferenzfilter für die Wellenlänge 540 nm. Der Polarisator ist drehbar und mit der Achse eines Motors verbunden. Mit dem zweiten Objektiv wird durch die Öffnung des zweiten $\lambda/4$ -Plättchens und durch die Probe hindurch die Öffnung des ersten $\lambda/4$ -Plättchens scharf auf die beiden Halbschattenplatten abgebildet. Unmittelbar hinter den Halbschattenplatten ist der feststehende Analysator angebracht. Hinter diesem befindet sich ein Differentialfotoelement. Das Element ist so angeordnet, daß die eine Zelle nur Licht durch den linksdrehenden und die andere nur Licht durch den rechtsdrehenden Quarz erhalten kann. Die Minuspole der Selenelemente sind kurzgeschlossen. Der Fotostrom gelangt über zwei Symmetrierungspotentiometer zu einem Kompensationsverstärker, der mit dem Motor des Polarisators verbunden ist.

Wenn die eingebrachte Probe doppelbrechend ist, wird das eine Element mehr Licht bekommen als das andere. Zum Beispiel wird bei einer positiven Doppelbrechung immer das obere Element hell und das untere dunkel, bei einer negativen Doppelbrechung aber das obere dunkel und das untere hell. Das Gleichgewicht der Verstärkerbrücke wird also gestört, und der Motor erhält den Befehl, sich und den mit ihm gekoppelten Polarisator so lange nach der einen oder anderen Richtung zu drehen, bis die Verstärkerbrücke wieder abgeglichen ist. Die Drehung des Motors wird über einen Präzisionsmillivoltgeber auf einem Schreiber registriert. Die so entstandenen Kurven sind direkt proportional der zu messenden Hauptspannungsdifferenzen. Da bei dieser Aufstellung eine Drehung des Polarisators um 180° einer Isochromaten-Ordnung entspricht, ist das Gerät in der Lage, mindestens den 360sten Teil einer Ordnung zu registrieren. Spannungsdoppelbrechungen hingegen, die größer als eine Ordnung sind, kann es nicht mehr messen.

In Bild 5 ist die Apparatur zu sehen. Das Gerät wird ausschließlich für die Messung der flächenhaften Spannungen in Glastafeln verwendet. Es ist in einem großen Spannungsmesswagen montiert. Die Spannungsmessung wird an stehenden Glastafeln durchgeführt. Der Antrieb für das Gerät erfolgt über einen Drehstrommotor mit Hilfe zweier Ketten. Das Meßgerät selbst, das aus zwei Teilen besteht, wird durch die

Ketten über zwei optische Schienen gezogen. Der Spannungsmesswagen kann Tafeln bis zu einer Länge von 240 cm und einer Breite von 270 cm aufnehmen. Er ist so konstruiert, daß die Proben in jeder beliebigen Höhe zwischen 0 und 240 cm gemessen werden können. Beide Teile des Gerätes lassen sich um ihre optischen Achsen drehen. Daher eignet sich die Apparatur vorzüglich zur Auffindung und Festlegung der Hauptspannungsrichtungen eines ebenen Spannungsfeldes¹⁾.

4. Gesetzmäßigkeiten von Eigenspannungen in gezogenen Tafelgläsern

Die Theorie der Eigenspannungen verlangt, daß diese immer eine räumliche Verteilung aufweisen müssen [1]. Dies wird damit begründet, daß sie ausschließlich durch eine Veränderung des spezifischen Volumens hervorgerufen werden. Die vollständige Auswertung eines räumlichen Eigenspannungszustandes stößt sowohl in der Theorie als auch in der Praxis auf große Schwierigkeiten. Es gibt aber einige Sonderfälle, bei denen sich unter bestimmten Voraussetzungen das räumliche Problem auf ein zweidimensionales reduzieren läßt. Zu diesen Sonderfällen gehören verspannte Schei-

¹⁾ Ein im Prinzip ähnliches Gerät wurde in letzter Zeit von ACLOQUE und GUILLEMET angegeben [9, 10].

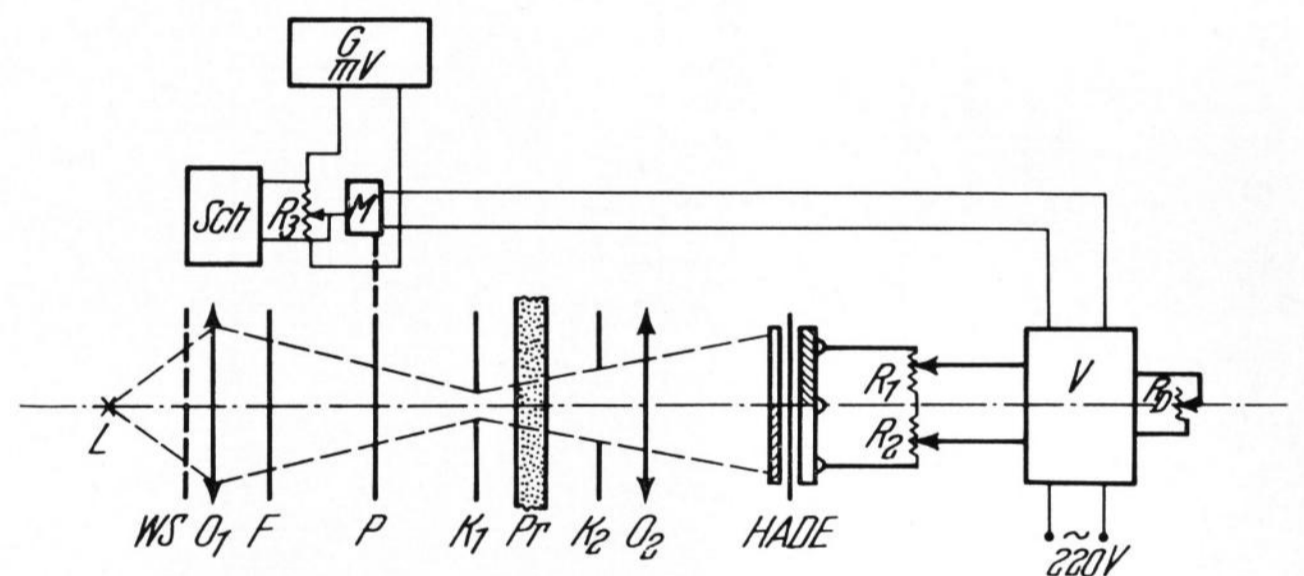


Bild 4. Schema der verwendeten Anordnung zur automatischen Spannungsmessung.

- | | |
|---------------------------------|--|
| L = Lichtquelle, | A = Analysator, |
| WS = Wärmeschutzfilter, | DE = Selen-Differential-Element, |
| O ₁ = Objektiv 1, | R ₁ = Abgleich-Widerstand 1, |
| F = Interferenzfilter, | R ₂ = Abgleich-Widerstand 2, |
| = 540 nm, | V = Verstärker, |
| P = Polarisator, | M = Meßmotor, |
| K ₁ = Kompensator 1, | Sch = Schreiber, |
| Pr = Probe | R ₃ = Meßwiderstand, |
| K ₂ = Kompensator 2, | G = Gleichspannungsgeber, |
| O ₂ = Objektiv 2, | R _D = Empfindlichkeits-Regler des |
| H = Halbschattenplatte, | Verstärkers. |

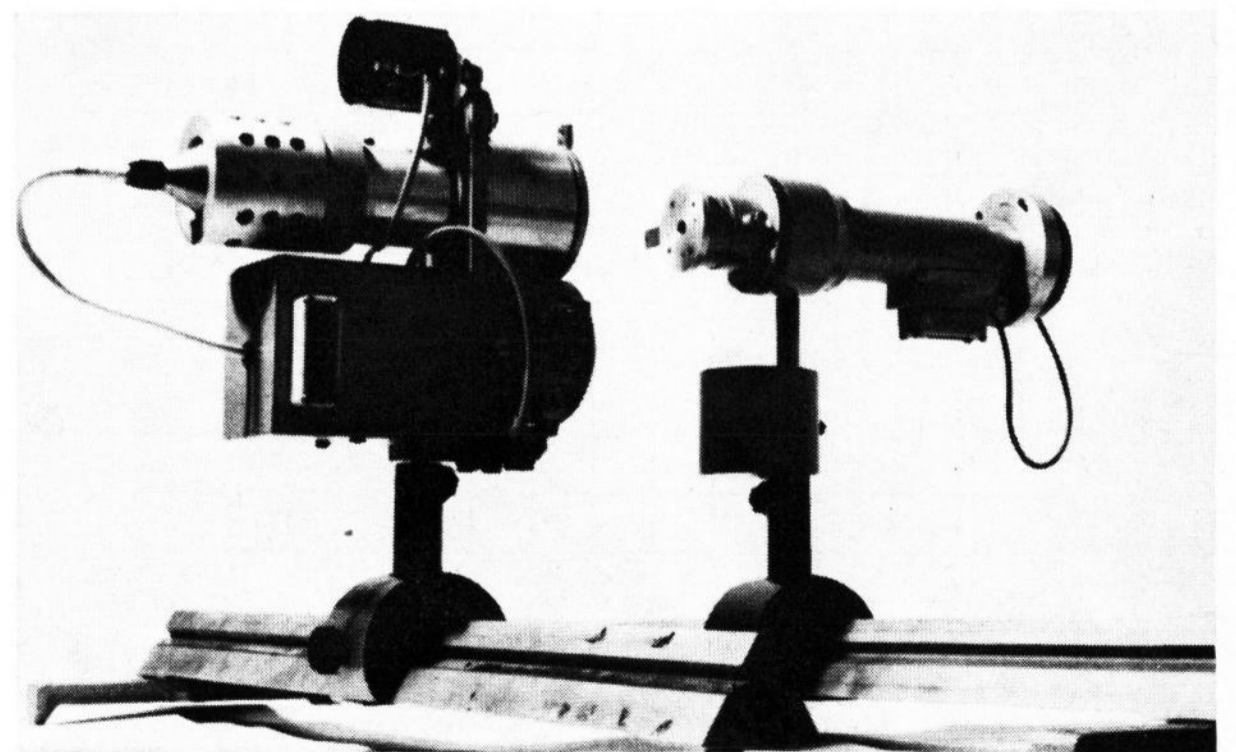


Bild 5. Ansicht des Meßgerätes.

ben, bei denen die Scheibendicke klein gegenüber ihren anderen Abmessungen ist. Man sieht ohne weiteres ein, daß alle gezogenen Tafelgläser diese Bedingung erfüllen, und es ist somit auch gerechtfertigt, daß man in diesem Sinne von ihren „flächenhaften Eigenspannungen“ spricht.

Aber selbst wenn man bei den hier betrachteten Gläsern einen ebenen Spannungszustand zugrundelegt, lehrt ein Blick auf die Hauptgleichung der ebenen Spannungsoptik (Gleichung (1)), daß man für zwei Unbekannte — nämlich σ_1 und σ_2 — nur eine Gleichung zur Verfügung hat; d. h., daß man bei senkrechter Durchstrahlung eines ebenen Spannungszustandes nur

die Hauptspannungsdifferenz erhält und nicht die einzelnen Hauptspannungen selbst.

Durchstrahlt man aber die gleiche Scheibe unter einem Winkel α zu der einen Hauptspannungsrichtung, z. B. zur Richtung von σ_2 , wobei der Lichtstrahl aber zur σ_1 -Richtung weiterhin senkrecht steht, so ändert sich neben der wirksamen Scheibendicke auch die Hauptspannungsdifferenz [5, 7]. Der Lichtweg im Glas wird $d/\cos \alpha$, und aus der Hauptspannung σ_2 wird nun $\sigma_2 \cos^2 \alpha$. Damit nimmt Gleichung (1) folgende Form an:

$$\gamma_\alpha = (\sigma_1 - \sigma_2 \cos^2 \alpha) \frac{Cd/\cos \alpha}{\lambda} \quad (2)$$

Aus den beiden Gleichungen (1) und (2) lassen sich die Hauptspannungen getrennt angeben. Geht man von dem Begriff der relativen Phasenverschiebung γ über zum Gangunterschied, $\Gamma = \gamma \lambda$, so erhält man nach einer leichten Rechnung für die beiden Hauptspannungen die folgenden Ausdrücke:

$$\sigma_1 = \frac{1}{Cd} \cdot \frac{\cos \alpha (\Gamma_\alpha - \Gamma \cos \alpha)}{\sin^2 \alpha} \quad (3)$$

und

$$\sigma_2 = \frac{1}{Cd} \cdot \frac{\Gamma_\alpha \cos \alpha - \Gamma}{\sin^2 \alpha} \quad (4)$$

Bei der genauen Bestimmung des Einfallswinkels α ist, wenn man nicht in Immersion arbeitet, das Brechungsgesetz zu berücksichtigen. Aus den FRESNELSchen Formeln für die Amplituden der reflektierten und gebrochenen, linear polarisierten Wellen geht hervor, daß zwischen dem in das Glas eintretenden und dem aus dem Glase austretenden Strahl keine Azimutverschiebung eintritt [11].

Bei dem in der Praxis in Frage kommenden Einfallswinkel besteht auch nicht die Gefahr einer Verfälschung der Meßwerte durch den von ACLOQUE bei geschichteten Spannungssystemen gefundenen residualen Gangunterschied [2].

Mit Hilfe des oben beschriebenen automatischen Spannungsmessers und unter Verwendung der Gleichungen (3) und (4) wurde an über hundert, zumeist 140 cm langen Tafeln, mit und ohne Borte, folgendes festgestellt:

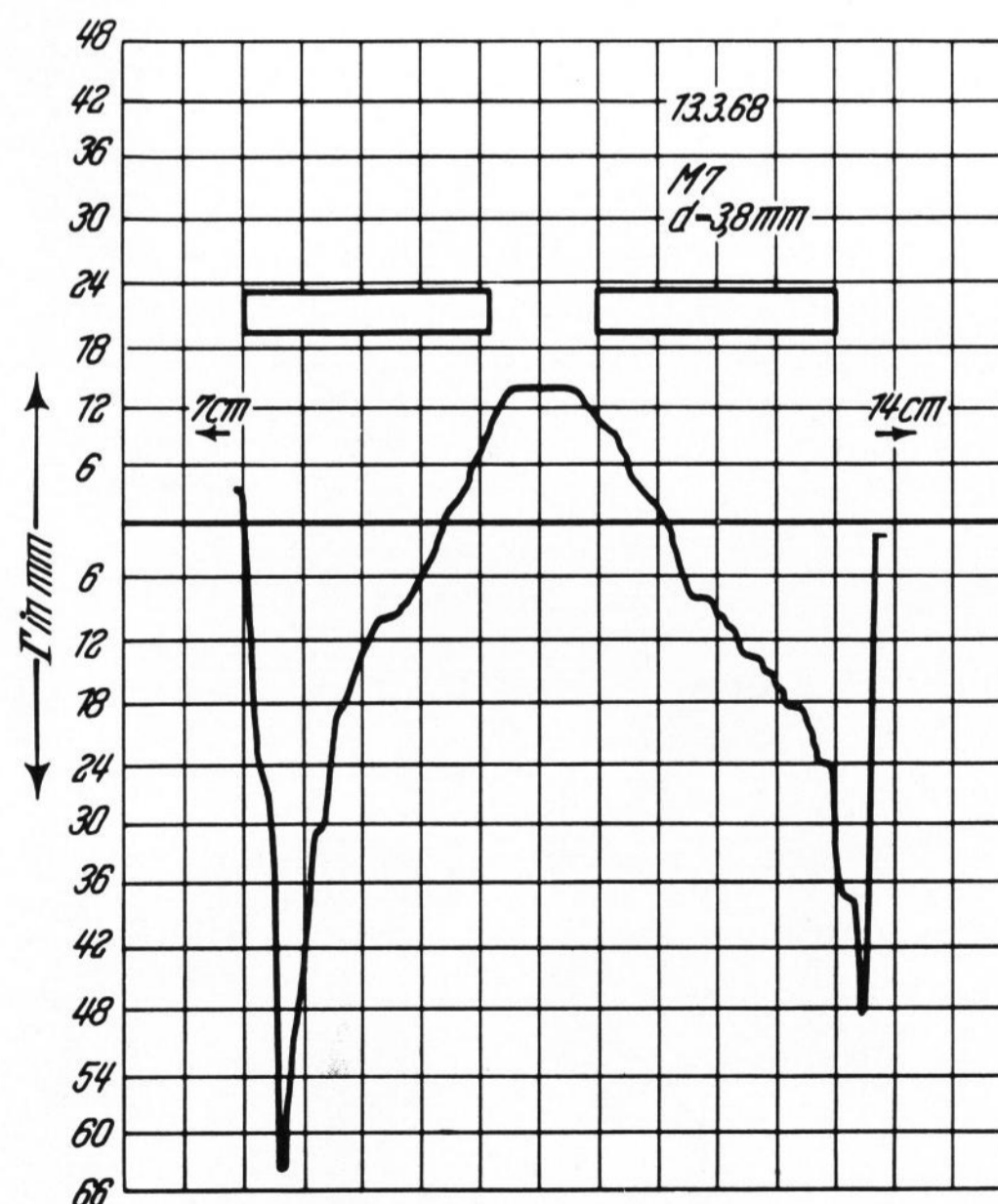
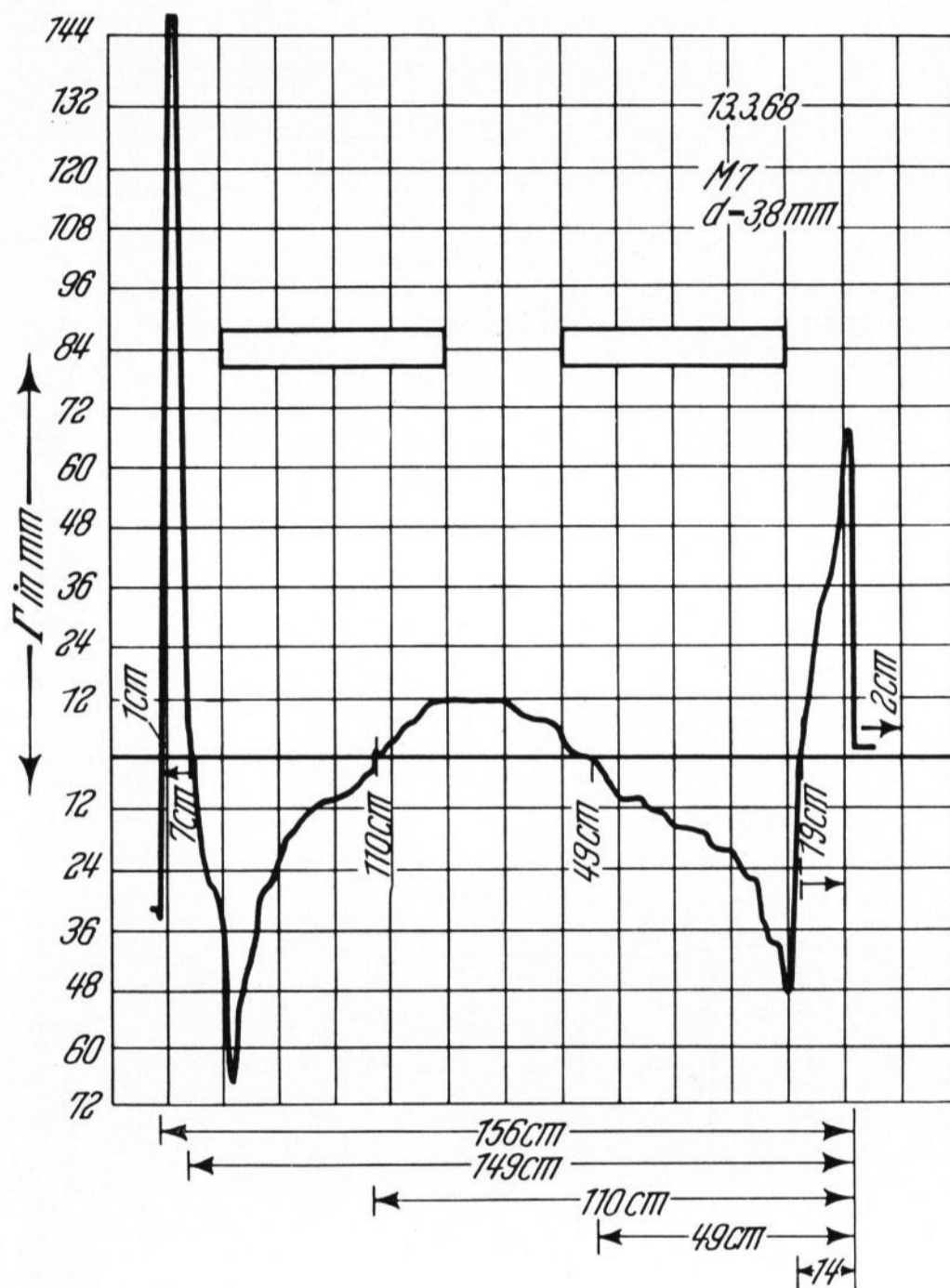
1. Die Hauptspannungsrichtungen entlang der Mittellinien, d. h. gleich weit vom oberen bzw. unteren Schnitt entfernt, liegen immer in der Zugrichtung (z-Richtung) und quer dazu (y-Richtung). Dies gilt auch für die Borten.

2. Die Spannungen in der y-Richtung, σ_2 , sind dabei gegenüber den Spannungen in der z-Richtung, σ_1 , verschwindend klein. Beispielsweise wurden an einer 140 cm langen, 266 cm breiten und 0,54 cm dicken Tafel für $\sigma_1 = 17,5 \text{ kp/cm}^2$ und für $\sigma_2 = 0,6 \text{ kp/cm}^2$ gemessen.

Aus diesen beiden Tatsachen kann geschlossen werden, daß man zumindest für die betriebliche Praxis den flächenhaften Spannungszustand als pseudo-einachsig annehmen kann. Daraus folgt andererseits, daß sich die Gleichung [1] vereinfacht zu

$$\Gamma = Cd\sigma_1 \quad (5)$$

Dies aber bedeutet, daß es für die betriebliche Praxis genügt, die Größe der Spannungen im senkrecht auffallenden Licht zu messen.



Bilder 6a und b. Auftreten eines Zugspannungsmaximums in der Mitte der Glastafel, seitlich Druckspannungen,

a) Gesamtspannungsverlauf,

b) Vergrößerung des mittleren Abschnittes der Spannungskurve.

5. Einige Meßergebnisse und Schlußfolgerungen

Das beschriebene Gerät wird seit längerer Zeit im Ziehbetrieb verwendet. Es hat sich für die Überwachung und Lenkung der Produktion sehr gut bewährt. Von den dabei gewonnenen Erkenntnissen werden nachfolgend einige mitgeteilt.

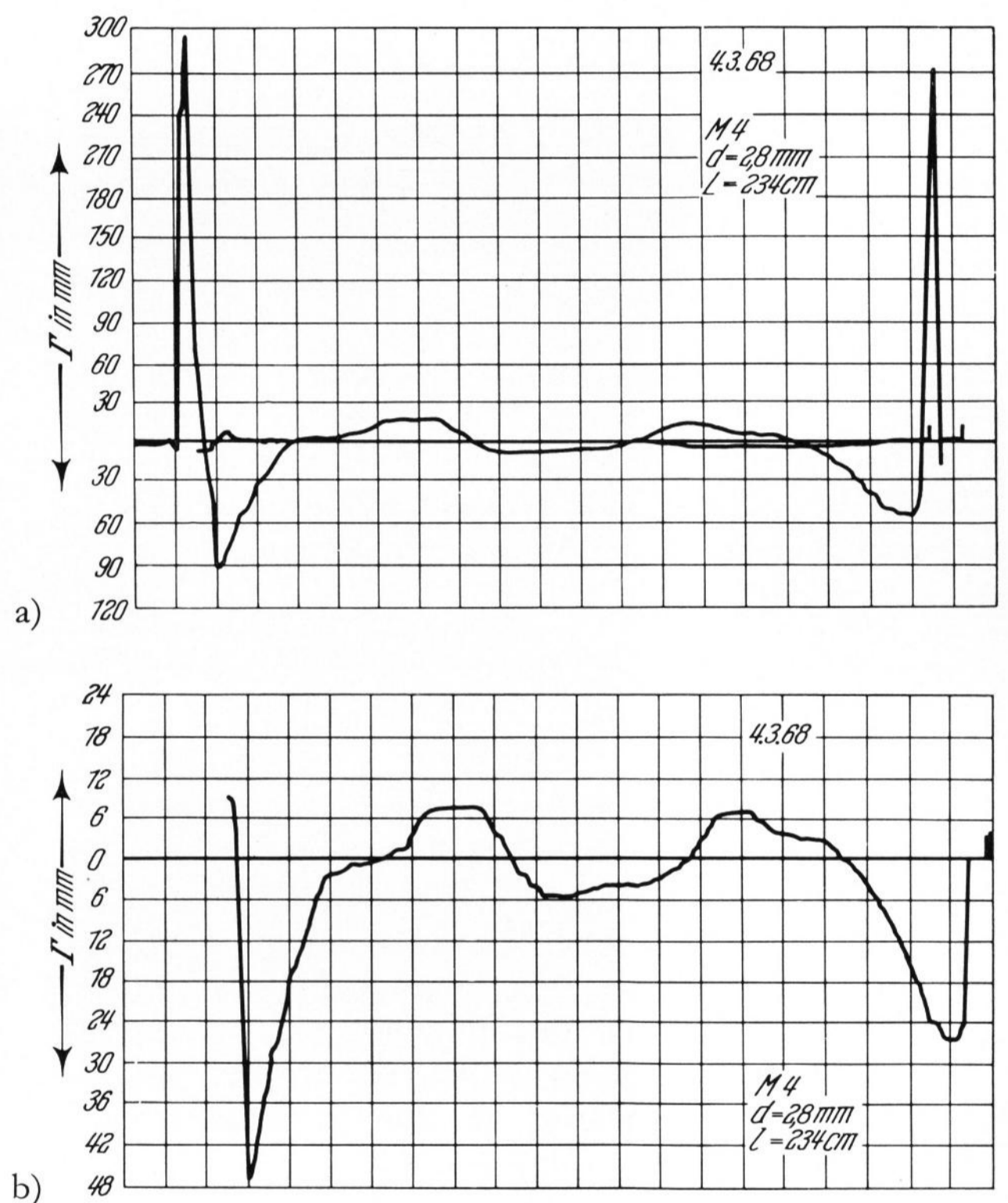
5.1. Abhängigkeit des Spannungszustandes von der Beschaffenheit des Ziehschachtes

Die Auswertung von mehreren hundert Spannungskurven hat ergeben, daß sie bei den untersuchten Gläsern nur in zwei charakteristischen Formen auftreten. Sieht man von den Bortenspannungen ab, so haben alle Glastafeln entweder in der Mitte ein Zugmaximum, das von beiden Seiten durch je ein Druckgebiet flankiert wird (Bilder 6a und b), oder sie haben drei ausgeprägte Druckspannungsbereiche mit zwei dazwischen liegenden Zugmaxima (Bilder 7a und b). Die Anzahl der Druckspannungszonen hängt von der Zahl der Leuchtklappenreihen am Ziehschacht ab. Generell bilden sich immer dort, wo die Klappenöffnungen dem Glasband gegenüberstehen, deutliche Druckspannungsgebiete aus, während der Zwischenraum von Zugspannungsgebieten beherrscht wird. In Bild 6a ist der Gesamtspannungsverlauf über ein 159 cm breites und 3,8 mm dickes Glasblatt mit genauen Maßangaben zu sehen. Bild 6b zeigt den mit einer größeren Geräteempfindlichkeit registrierten Mittelteil der gleichen Spannungskurve. In beiden Bildern ist die Lage der Leuchtklappen eingezeichnet. Die Bilder 7a und b zeigen den charakteristischen Spannungsverlauf bei Ziehmaschinen mit drei Klappenreihen. Auch hier stellt Bild 7b den mit höherer Geräteempfindlichkeit aufgenommenen Mittelteil der Kurve aus Bild 7a dar. In allen Bildern sind die Zugspannungen nach oben und die Druckspannungen nach unten gerichtet. Bild 7a enthält außer der Hauptspannungskurve und der Null-Linie noch eine weitere Kurve. Dieser Linienzug, der sich von der Null-Linie kaum unterscheidet, wurde dadurch gewonnen, daß der feststehende Analysator des Gerätes mit seiner Schwingungsrichtung unter 45° zur Ziehrichtung des Glases gestellt war. Mit dieser Kurve ist gleichzeitig der Beweis erbracht, daß die Hauptspannungsrichtungen in Ziehrichtung und parallel zum Düsenschlitz liegen.

5.2. Spannungsbild im Bereich der Borten

In Bild 8 ist der charakteristische Verlauf der Bortenspannung eines Fourcault-Glases dargestellt. Man kann hier vier typische Spannungsbereiche unterscheiden. Im rechten Teil des Bildes erkennt man unterhalb der Null-Linie einen Druckspannungsbereich. Dieser endet mit einem deutlich sichtbaren Knick nach oben und wechselt damit in ein ausgeprägtes Zugspannungsgebiet über, welches auf der äußeren linken Seite mit einer Rille endet. Es wurde gefunden, daß diese Spannungsverhältnisse durch die Form der Ziehwalzen hervorgerufen werden. Wie dabei die Zusammenhänge sind, ersieht man aus Bild 9. Es ist hier deutlich zu erkennen, daß sich der vorhin erwähnte Knick genau an der Stelle im Glasband einstellt, an der sich der Übergang von der Vollwalze zum Konus befindet. Der sich daran anschließende Zugspannungsanstieg wird nicht allein durch die Verdickung der Borten hervorgerufen, sondern auch durch die Form des abgedrehten Endes der Ziehwalze selbst.

Wie das Spannungsbild bei verdickten Borten aussieht, ist im unteren Teil des Bildes 10 dargestellt. Dort, wo die Verdickung am größten ist, bildet sich auch das Maximum der Zugspannungszone aus, während der Bortenrand selbst wieder druckverspannt ist. Wird beim Ziehen eine Bortenzange verwendet, so ergibt sich das Spannungsbild, wie es die obere Hälfte von Bild 10 zeigt. Der starke Abfall ins Druckspannungsgebiet dort, wo sich die durch die Zange hervorgerufene Rille befindet, ist hauptsächlich durch die Ablenkung des Meßstrahls verursacht. Aber auch wenn man diese Rille mit Kanadabalsam ausfüllt und dann die Spannungskurve mißt, zeigt sich dort, wo die Bortenzange eingreift, ein starkes Druckspannungsgebiet, was wegen der an dieser Stelle hervorgerufenen Abkühlung auch verständlich ist. In den Bildern 11 a und b kann man diese Verhältnisse sehen. In Bild 11 a ist der Spannungsverlauf an der gleichen Borte



Bilder 7a und b. Auftreten von drei Druckspannungsbereichen mit dazwischenliegenden Zugspannungsmaxima, a) Gesamtspannungsverlauf, b) Vergrößerung des mittleren Bereiches der Spannungskurve.

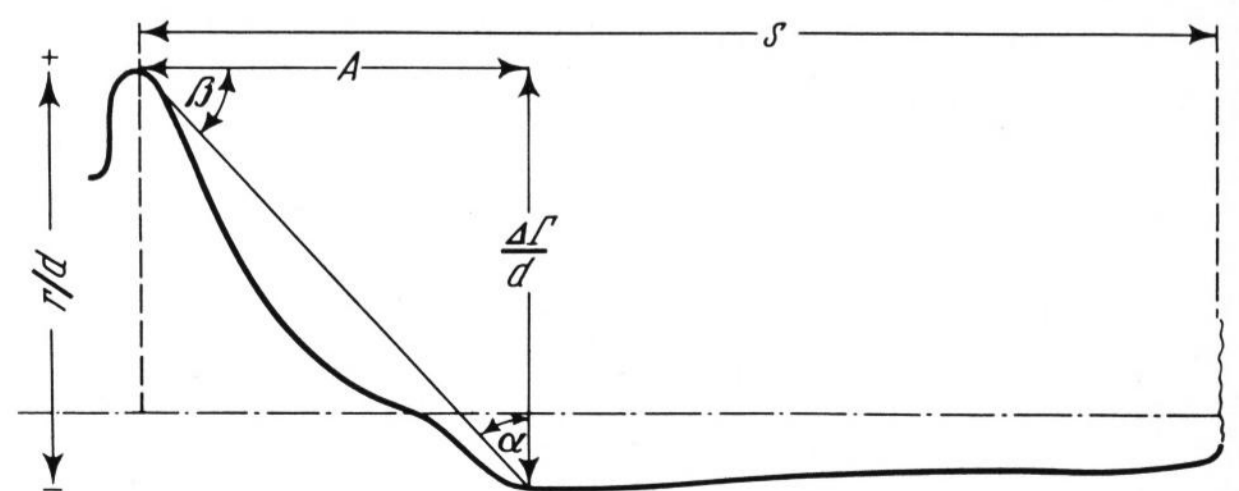


Bild 8. Verlauf der Bortenspannung bei einem Fourcault-Glas.

A = Abstand Knick — Maximum in cm, Γ = Gangunterschied in nm, d = Dicke der Probe in cm, $\frac{d\Gamma}{dA}$ = Steigung in nm/cm², S = Schneidbarkeitsabstand in cm.

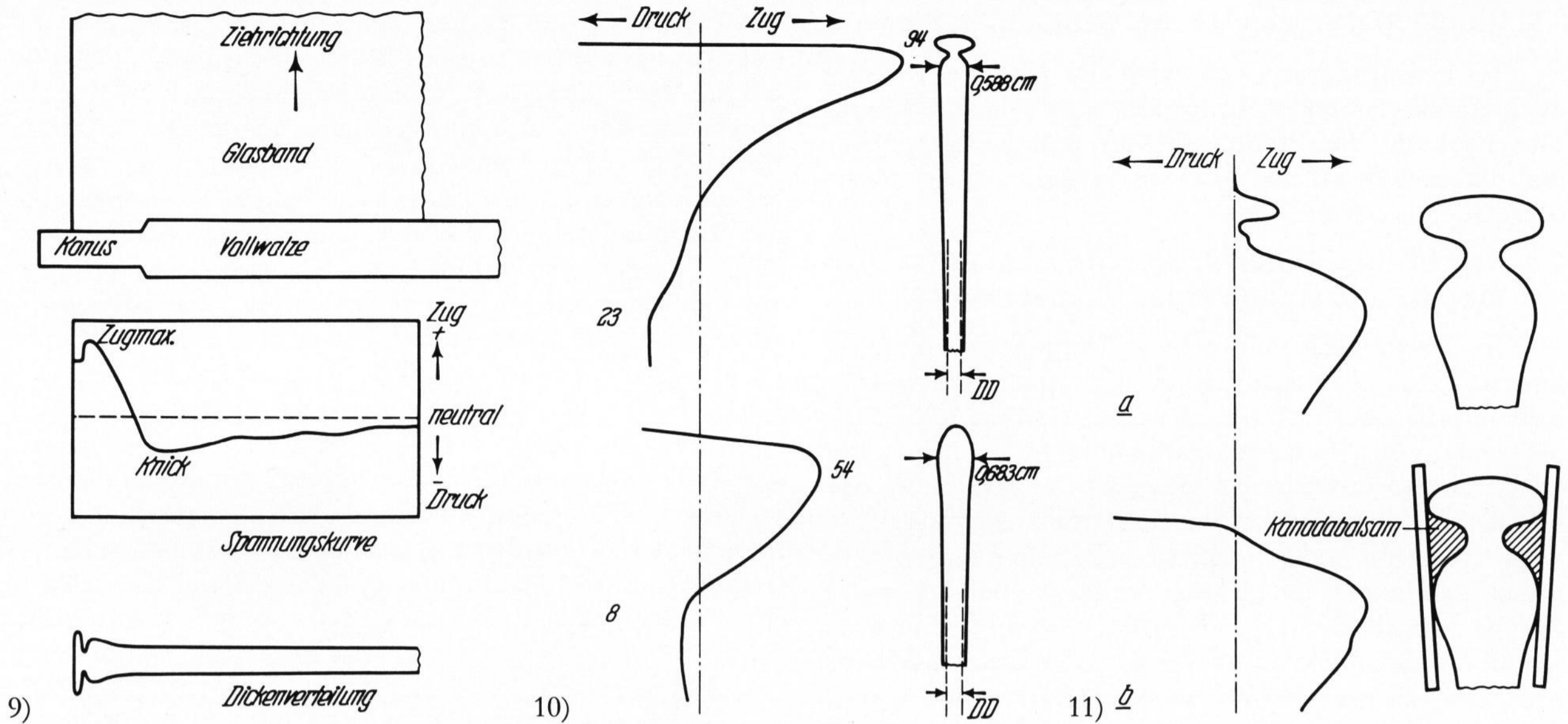


Bild 9. Abhängigkeit der Spannungsverhältnisse von der Form der Ziehwalze.

Bild 10. Spannungsbild bei verdickten Borten.

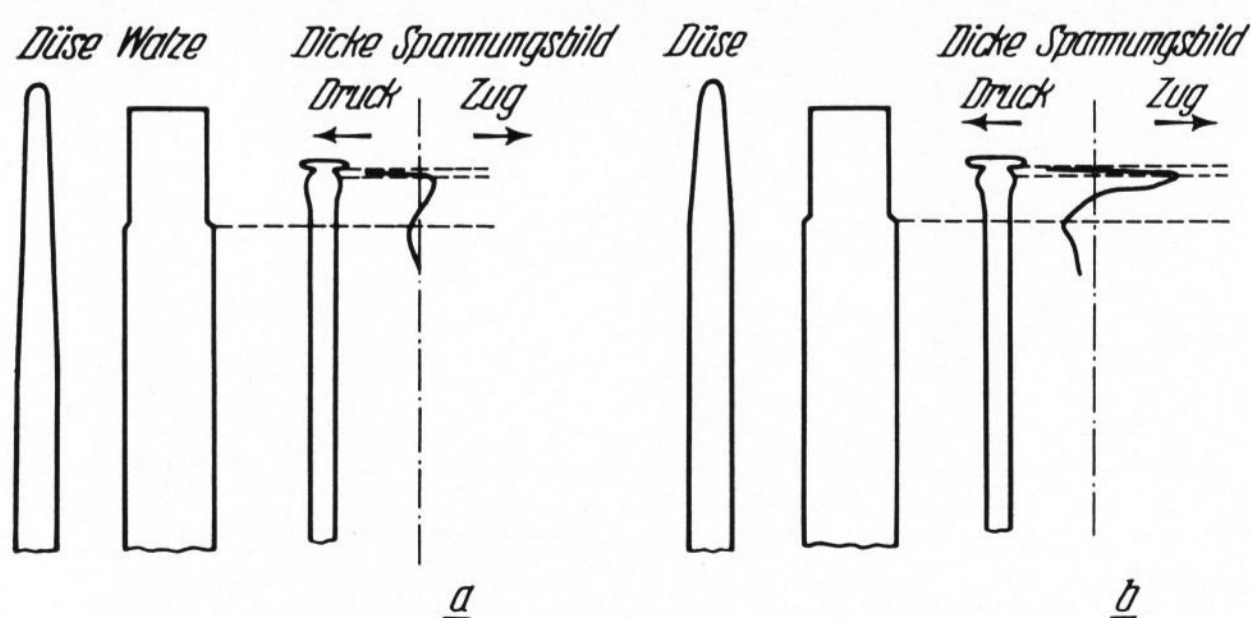
Bilder 11 a und b. Druckspannungsgebiet an der Stelle, an der die Bortenzange angreift, a) ohne Immersion, b) mit Kanadabalsam.

ohne Immersion dargestellt. Das Gerät wurde hier ziemlich schnell über die Borte bewegt, so daß der Ausschlag in der Rille selbst überspielt wurde. Dadurch ist am linken Kurvenende ein kleiner Zugspannungsberg entstanden, der von der Verdickung direkt am Bortenrand herrührt.

5.3. Einfluß verschiedener anderer Faktoren auf den Spannungszustand des gezogenen Glases

Welchen Einfluß die Form des Düsen Schlitzes auf das Spannungsbild der Borten ausübt, zeigen die Bilder 12a und b. In Bild 12b sieht man einen parallelen Düsen Schlitz, der sich erst 25 cm vor seinem Ende verjüngt. Bild 12a zeigt dagegen einen schlank auslaufenden Düsen Schlitz. Wie aus den zugehörigen Spannungsbildern gefolgert werden kann, ist sowohl für die Spannungs- als auch für die Dickenverteilung die schlanke Form wesentlich günstiger.

Daß auch das Alter einer Ziehmaschine auf den Spannungszustand einen Einfluß hat, ist jedem Fachmann hinlänglich bekannt. Bild 13 zeigt dazu zwei Beispiele. Mit dem Altern der Maschinen verschlechtert



Bilder 12a und b. Einfluß der Form des Düsen Schlitzes auf das Spannungsbild der Borten, a) Düse mit 55 cm Verjüngung, b) Düse mit 25 cm Verjüngung.

sich das Spannungsbild und damit die Schneidbarkeit; die Keiligkeit der Borten nimmt zu. In dem Bild gilt der hohe Spannungswert für ein Maschinenalter von 250 h und der niedrige Wert für eine Maschinenlaufzeit von 12 h.

Eine bekannte Tatsache ist auch, daß die Schneidbarkeit verspannter Gläser mit zunehmender Bandlänge schlechter wird. Andererseits werden beim Kürzen einer verspannten Glastafel die Spannungen abgebaut. In Bild 14 sieht man die Spannungskurven, die man erhält, wenn man eine Tafel von 200 cm Länge zuerst auf 50 und dann auf 10 cm kürzt. Das Kürzen erfolgte natürlich von beiden Seiten gleichmäßig, so daß in jedem Fall über die gleiche Stelle der Tafel gemessen wurde. Es mag vielleicht von Interesse sein, daß in einer Tafel von nur 4 cm Länge die Bortenspannungen noch so groß waren wie in der Mitte einer 140 bis 200 cm langen Tafel.

Zum Abschluß dieser Betrachtungen soll noch kurz über Untersuchungen berichtet werden, die in bezug auf die Schneidbarkeit im Bortenbereich angestellt wurden. Dazu sei noch einmal Bild 8 betrachtet. Es wurde gefunden, daß kein direkter Zusammenhang besteht zwischen der Höhe des Zugmaximums und derjenigen Entfernung von der Borte, bei der sich das Glas noch schneiden läßt. Ein kleines, aber steiles Maximum ist schlechter als ein großes flaches Maximum.

Außerdem wurde festgestellt, daß ein direkter Zusammenhang besteht zwischen der Steigung ($\cot \alpha$) der Spannungskurve vom Knick zum Zugmaximum und dem Abstand (S) von diesem Maximum bis zu der Stelle, an der sich das Glas schneiden läßt. Es gilt der Satz: Der Abstand S, vom Zugmaximum bis zu der Stelle, an der sich das Glas noch schneiden läßt, ist proportional der Steigung der Spannungskurve zwischen dem Knick und dem Zugmaximum. Dieser Satz ist empirisch gewonnen. Seine Gültigkeit ist begrenzt. Die grafische und analytische Darstellung dieses Satzes für Glas von 3 mm Dicke (MD) zeigt Bild 15.

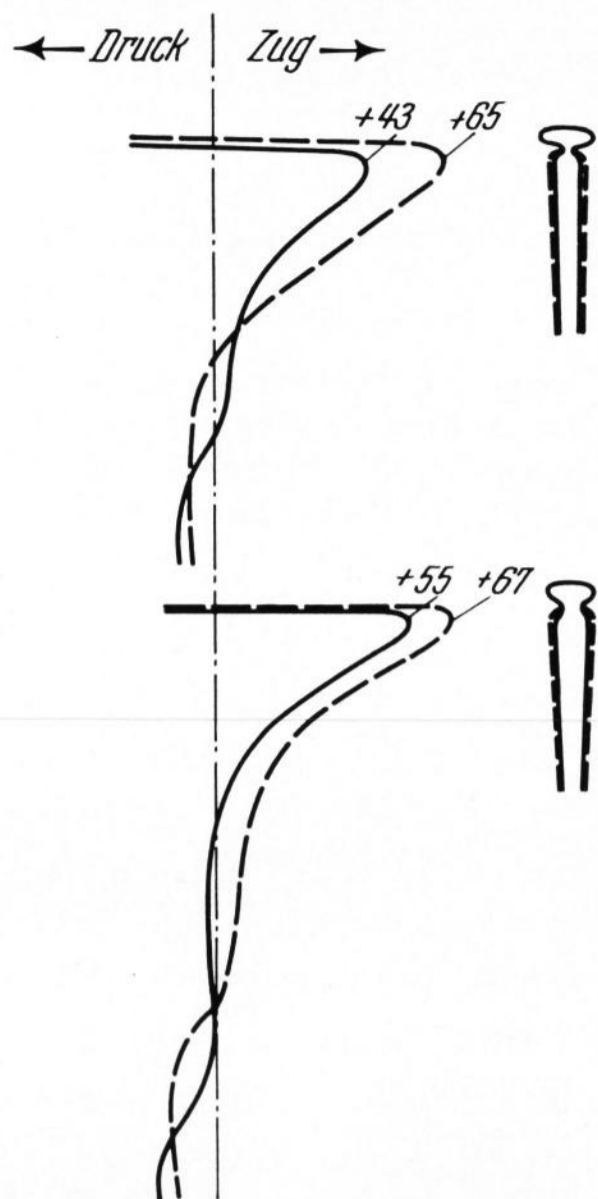


Bild 13. Einfluß des Alters der Ziehmaschine auf den Spannungszustand der Gläser.

6. Zusammenfassung

Der Eigenspannungszustand gezogener Tafelgläser wird prinzipiell in zwei Komponenten aufgeteilt: 1. in die Spannungen über die Dicke und 2. in diejenigen über die Fläche der Gläser.

Es wird gezeigt, daß sich beide Spannungssysteme unabhängig voneinander beobachten und messen lassen. Während die Spannungen über die Dicke einer Glasscheibe für deren Ebenflächigkeit verantwortlich sind, liegt die Bedeutung der flächenhaften Spannungen darin, daß sie ausschlaggebend für die Schneidbarkeit des Glases sind.

Zur Messung dieser flächenhaften Eigenspannungen wurde ein automatisch arbeitendes Gerät entwickelt. Mit seiner Hilfe läßt sich beweisen, daß man zumindest für die betriebliche Praxis den an sich zweidimensionalen Spannungszustand auf einen eindimensionalen reduzieren kann.

An Hand von einigen speziellen Spannungsuntersuchungen wird über die Anwendbarkeit des Gerätes im Ziehbetrieb berichtet. Die Messungen zeigen, wie der flächenhafte Spannungszustand einer nach FOURCAULT

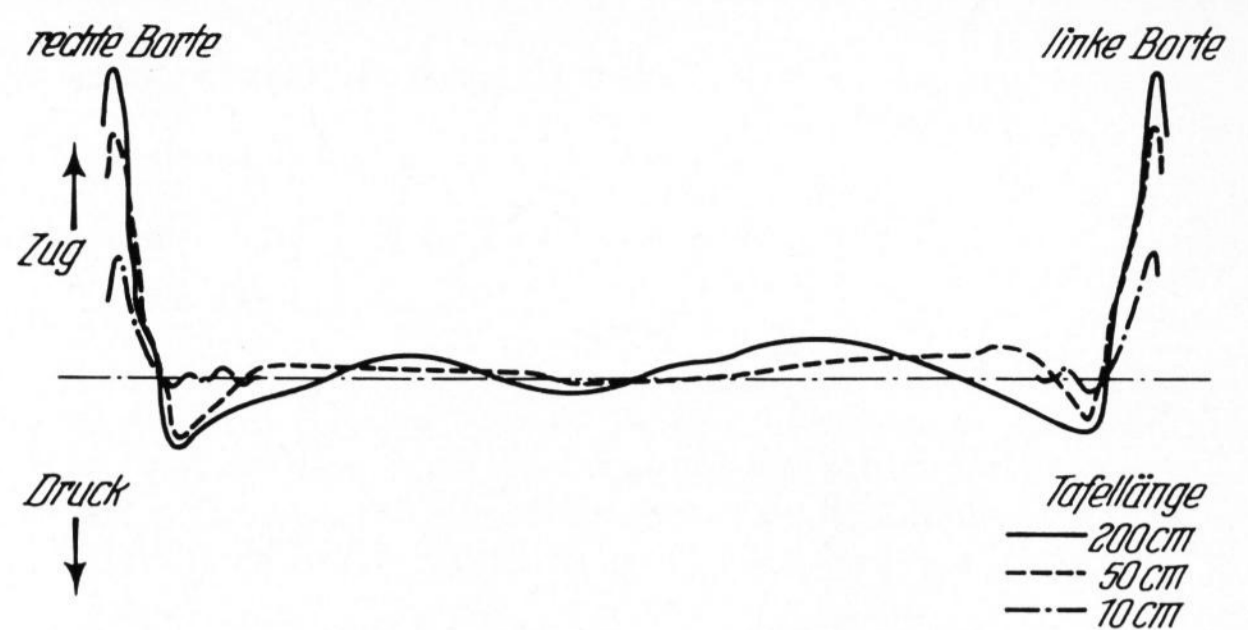


Bild 14. Spannungskurven beim Schneiden einer Glasscheibe von 200 cm Länge auf Stücke von 50 cm und dann auf 10 cm Länge.

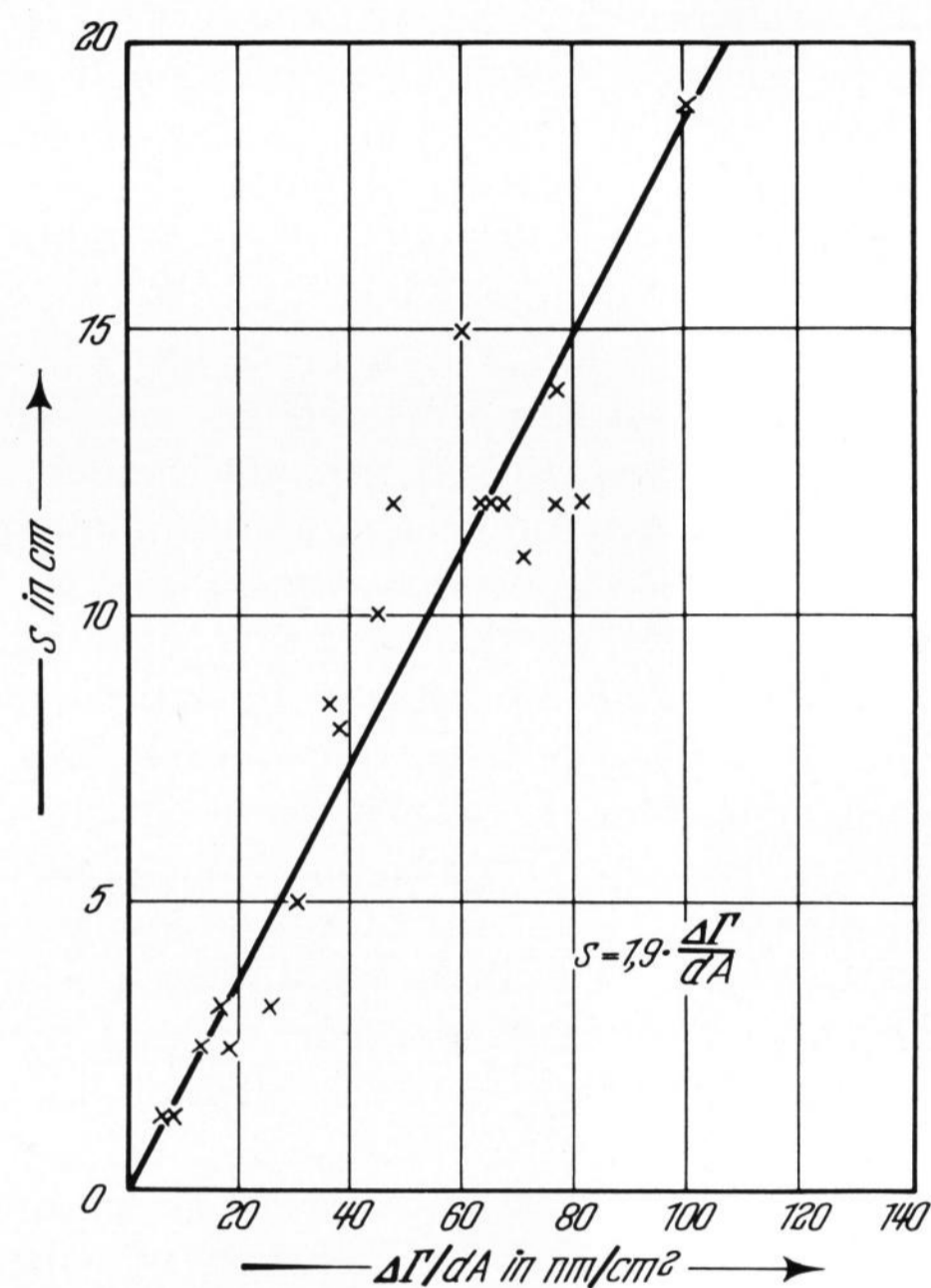


Bild 15. Abhängigkeit des Abstandes S von der Steigung der Spannungskurve bei einem Glas von 3 mm Dicke.

gezogenen Glasscheibe abhängt von der Beschaffenheit des Ziehschachtes, von der Form des Düsen Schlitzes, vom Alter der Ziehmaschine und von der Länge der Scheiben. Abschließend wird der Zusammenhang zwischen den Bortenspannungen und der Schneidbarkeit am Tafelrand untersucht.

7. Literatur

- [1] PEITER, A.: Eigenspannungen I. Art. Düsseldorf: Triltsch 1966.
- [2] ACLOQUE, P. und GUILLEMET, C.: Spannungsmessung durch ein „Spiegelungsverfahren“. Silikattechn. 11 (1960) S. 502–506.
- [3] INDENBOHM, W. L.: Spannungen im Tafelglas und die Methoden zu ihrer Messung. (Orig. russ.) Steklo i Keram. 13 (1956) Nr. 9, S. 18–23. [Ref. Glastechn. Ber. 30 (1957) S. 485.]
- [4] KONONKO, V. P.: Untersuchung der Temperaturspannungen beim Kühlen von Tafelglas. (Orig. russ.) Steklo i Keram. 19 (1962) Nr. 7, S. 9–13.
- [5] FÖPPL, L. und MÖNCH, E.: Praktische Spannungsoptik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1950. [Ref. Glastechn. Ber. 24 (1951) S. 189.]
- [6] TARDY, H. L.: Méthode pratique d'examen et de la biréfringence des verres d'optiques. Rev. d'Optique 8 (1928) S. 59–69. [Ref. Glastechn. Ber. 7 (1929) S. 340.]
- [7] WOLF, H.: Spannungsoptik. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Forschung, Technik und Unterricht. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1961. [Ref. Glastechn. Ber. 35 (1962) S. 490.]
- [8] BURRI, C.: Das Polarisationsmikroskop. Basel: Birkhäuser 1950.
- [9] GUILLEMET, C.: Dispositif enregistreur de biréfringences. Applications à l'analyse des contraintes dans les verres. Vortrag auf der Internationalen Tagung für Experimentelle Spannungsanalyse, Berlin 1966. VDI-Ber. Nr. 102, S. 13–18.
- [10] GUILLEMET, C. und ACLOQUE, P.: Feinmeßanordnung zur Aufzeichnung von Spannungen in industriellen Gläsern. Vortrag auf der Gemeinschaftstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, der Deutschen Keramischen Gesellschaft und der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, Erlangen 1967. [Ref. Glastechn. Ber. 40 (1967) S. 490.]
- [11] BORN, M.: Optik. Berlin und Heidelberg: Springer 1965. (48570)