

herausgegeben von der
Deutschen Glastechnischen Gesellschaft e. V.

Schriftleitung: Dr.-Ing. H. Maurach, Frankfurt a. M.

Nachdruck oder Vervielfältigung im ganzen oder in Teilen ausdrücklich untersagt.
Recht der Uebersetzung in fremde Sprachen vorbehalten. — Copyright 1931 by D G G in Frankfurt a. M.

9. Jahrg.

Oktober 1931

Heft 10

Einfluß der Glas-Herstellung und -Verarbeitung auf seine Sprödigkeit.

Von A. Ruß.

(Mitteilung aus dem glastechnischen Laboratorium der Osram G. m. b. H., Kommanditgesellschaft,
Zweigniederlassung Weißwasser, O.-L.)

(Eingegangen 14. April 1931).

I. Einleitung. Allgemeines über die Festigkeit, insbesondere die Schlagfestigkeit von Gläsern. — Fragestellung. — II. Meßmethode. — III. Einfluß der Wärmevergangenheit auf die Schlagfestigkeit des Glases: 1. Literatur; 2. Versuchsanordnung; 3. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse; 4. Deutung der Versuchsergebnisse. — IV. Der Einfluß der Schmelze auf die Schlagfestigkeit des Glases: 1. Allgemeines über aus der Schmelze stammende Inhomogenitäten; 2. Einfluß von Gemengeresten im Glase auf die Schlagfestigkeit; 3. Einfluß der Gispn auf die Schlagfestigkeit; 4. Gemengesclieren als Ursache für die Abnahme der Schlagfestigkeit; 5. Einfluß von Kristallisationserscheinungen auf die Schlagfestigkeit; 6. Zusammenfassung. — V. Einfluß der Verarbeitung auf die Schlagfestigkeit: 1. Einfluß der homogenen Spannung auf die Schlagfestigkeit; 2. Einfluß der thermischen Schlieren auf die Schlagfestigkeit. — VI. Einfluß der homogenen Spannung auf Schlagfestigkeit und thermische Widerstandsfähigkeit: 1. Allgemeines über die Beziehung zwischen Schlagfestigkeit und thermischer Widerstandsfähigkeit; 2. Allgemeines über den Sprungverlauf; 3. Einfluß der Spannung auf die thermische Widerstandsfähigkeit von Massiv- und Hohlkörpern. — VII. Zusammenfassung.

2. Teil*). (Abschnitt V bis VII.)

V. Einfluß der Verarbeitung auf die Schlagfestigkeit.

Die bisher ausgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß Inhomogenitäten chemischer Natur, die aus der Schmelze stammen, die Schlagfestigkeit des Glases stark beeinflussen. Zu diesen chemischen Inhomogenitäten treten Inhomogenitäten physikalischer Art, die bei der Verarbeitung eines chemisch homogenen Glases entstehen, und die man bei regelmäßiger Verteilung als homogene Spannungen, bei unregelmäßiger Anordnung als „thermische Schlieren“ bezeichnen kann.

1. Einfluß der homogenen Spannung auf die Schlagfestigkeit.

a) Theorien der Spannungsbildung.

Nach den bisherigen, insbesondere von Adams und Williamson⁵⁸⁾ näher dargelegten Anschauungen stehen bekanntlich Spannung und Viskosität in direktem Zusammenhang. Bei Temperaturen, bei denen infolge zu hoher Viskosität ein Fließen des Glases praktisch nicht mehr möglich ist, d. h. also bei Temperaturen unterhalb des Transformationspunktes, können mechanische oder thermische Beanspruchungen eines Glases nur vorübergehende Spannungen bewirken, die nach Aufhören der Be-

anspruchungen wieder verschwinden. Bei höheren Temperaturen dagegen, bei denen ein Fließen noch durchaus möglich ist, also bei Temperaturen oberhalb des Transformationspunktes, können sich Spannungen je nach dem Grade der Viskosität mehr oder weniger ausgleichen. Mechanische und thermische Beanspruchung hinterlassen also keine Spannungen. Wird aber eine thermische Beanspruchung bei der Abkühlung bis weit unter den Transformationspunkt fortgesetzt, wie es bei normaler Abkühlung der Glaskörper bei ihrer Herstellung geschieht, so fehlt beim Temperatenausgleich die der Temperaturdifferenz entsprechende Spannung; beim Temperatenausgleich entwickelt sich also eine permanente Spannung, die in der Größe gleich und im Vorzeichen entgegengesetzt ist der oberhalb des Transformationspunktes durch Fließen verloren gegangenen Spannung.

Nach neueren von Berger⁵⁹⁾ entwickelten Anschauungen ist dagegen die Entstehung der bleibenden Doppelbrechung in einem Glasstück zu deuten aus der infolge der verschiedenen Temperaturbehandlung der einzelnen Glaspatrien folgenden verschiedenen Gleichgewichtseinstellung, die sich in Verschiedenheiten aller Eigenschaften auswirkt. Diesen verschiedenen Gleichgewichtseinstellungen entsprechen auch Verschiedenheiten im Volumen, und zwar derart, daß ein von hoher Temperatur kommendes Glasstück bei längerem Verweilen bei Temperaturen in der Nähe des Transforma-

*) Der 1. Teil (Abschnitt I bis IV) erschien im vorigen Hefte der „Glastechn. Ber.“ (9. Jg. 1931, H. 8, S. 481 bis 501.)

⁵⁸⁾ L. H. Adams u. E. L. Williamson: „The annealing of glass“. J. Frank. Inst., Bd. 190, Jg. 1920, S. 597 u. 835. (Ref. Glastechn. Ber., 3. Jg. 1925/26, S. 378—379.)

⁵⁹⁾ E. Berger: „Gleichgewichtsverschiebungen im Glas und Einfluß der Wärmevergeschichte auf seine physikalischen Eigenschaften“. Glastechn. Ber., 8. Jg. 1930, S. 339—367.

tionspunktes allmählich ein kleineres Volumen einnimmt [Schönborn⁶⁰⁾]; bei ungleichmäßiger Abkühlung bzw. Erhitzung entstehen so Volumenverschiedenheiten zwischen den verschiedenen Glasteilen oder mit anderen Worten „Spannungen“.

Der praktische Unterschied zwischen diesen beiden Betrachtungsweisen über die Entstehung der Spannung liegt in der Verschiedenheit der Temperaturabhängigkeit der Spannungsänderung. Nach Adams und Williamson ergibt sich diese Temperaturabhängigkeit einfach aus der Viskositätskurve, nach Berger ergibt sie sich aus der Temperaturfunktion der Gleichgewichtseinstellung. Die experimentellen Beobachtungen sprechen mehr für die Bergerschen Anschauungen. Für die folgenden Untersuchungen sind diese Unterschiede von untergeordneter Bedeutung. Sie lassen sich sowohl nach der einen wie nach der anderen Betrachtungsweise darstellen.

Bemerkenswerterweise läßt die von Berger studierte Geschwindigkeitsfunktion dieser Gleichgewichtseinstellung erkennen, daß bei hohen Temperaturen (etwa oberhalb 800°C) die Geschwindigkeit der Gleichgewichtseinstellung so groß ist, daß von einer Wärmevergangenheit hier nicht mehr gesprochen werden kann, ganz in Übereinstimmung mit den in den vorigen Abschnitten erhaltenen Ergebnissen.

b) Praxis der Spannungsbildung.

Bei massiven einheitlichen Glaskörpern entsteht bei der normalen Abkühlung bekanntlich außen Druck- und innen Zugspannung. Bei der Kugel sind die Spannungen allseitig symmetrisch verteilt, bei Abweichungen von der Kugelform, z. B. bei Platten und Stäben, wird die Spannung entsprechend dem Grade der Unsymmetrie des Körpers unsymmetrisch. Bild 31

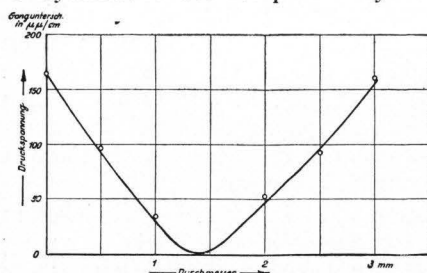


Bild 31.
Spannungsverlauf in einem handgezogenen Glasstab.

gibt ein Beispiel für eine Spannungsmessung durch einen Stab parallel zur Stabachse entlang einem Durchmesser. Die mit dem Berekischen Kompensator ausgeführten Messungen, die infolge der Eigenart der Methode nur die Unterschiede im Brechungsindex in zwei zueinander senkrechten Richtungen erkennen lassen, lassen die Abnahme der Doppelbrechung vom Rande zur Mitte gut erkennen; in der Mitte des Stabes

⁶⁰⁾ H. Schönborn: „Beiträge zur Frage der Konstitution der Gläser“. Sprechsaal, 61. Jg. 1928, S. 99 ff. und S. 117 ff. (Ref. Glastechn. Ber., 6. Jg. 1928/29, S. 137—138.)

wird die Doppelbrechung Null, da die hier vorliegende Zugspannung allseitig symmetrisch um die Stabachse verteilt ist*).

Bei Hohlkörpern ist die Spannungsverteilung von der Wandstärke und dem Durchmesser des Körpers abhängig. Bei Röhren in den Dimensionen, wie sie zur Instrumentenerzeugung oder auch zur Glühlampenherstellung (hier auch bei den üblichen dünnwandigen Kolben) verwandt werden, überwiegt die Abkühlung von außen bei weitem die von innen her; die eingeschlossene Luft erwärmt sich sehr schnell, bzw. die Form wirkt sehr stark abkühlend. Es entsteht also außen Druck- und innen Zugspannung.

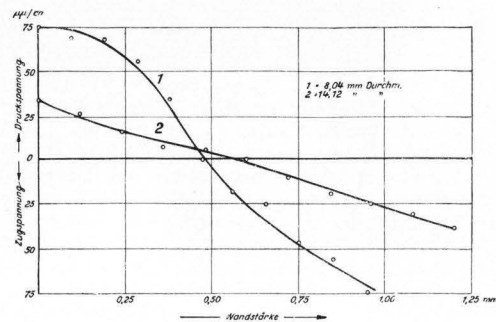


Bild 32. Spannungsverteilung in maschinengeblasenen Bleiglas-Röhren.

Bild 32 gibt das Spannungsbild einiger normaler Rohrtypen, Zahlentafel 8 einige Spannungswerte.

Zahlentafel 8.

Durchschnittliche Spannungswerte am Rand der Außen- und Innenwand von maschinengezogenem Bleiglasrohr.

Durchmesser in mm	Wandstärke in mm	Mittelwerte der	
		Zugspannung an der Innenwand	Druckspannung an der Außenwand
3,5 — 4,5	0,60 — 0,80	76,0 $\mu\mu/\text{cm}$	58,0 $\mu\mu/\text{cm}$
5,3 — 5,7	0,50 — 1,10	60,0 „	50,0 „
7,0 — 8,0	0,90 — 1,10	61,0 „	51,0 „
10,0 — 11,0	0,85 — 1,10	67,0 „	55,0 „
15,8 — 16,8	1,50 — 1,80	77,0 „	58,0 „

Bei zunehmendem Durchmesser der Gefäße bzw. Röhren erwärmt sich die eingeschlossene Luft nicht mehr so stark; es tritt also an beiden Wänden Druckspannung und im Innern Zugspannung auf. Das gleiche ist der Fall bei zunehmender Wandstärke und gleichbleibendem Durchmesser (natürlich nur bei entsprechender Weite); hier übersteigt die Abkühlungszeit der mittleren Schichten des Glases die Abkühlung der Innenwand, was sich besonders dadurch erklärt, daß man die Formgebung, d. h. hier also das Festwerden der Innenwände

* Bei F. Späte: „Ueber die Untersuchung von Glas mittels des polarisierten Lichtes“ (Glastechn. Ber., 2. Jg. 1924/25, S. 1—19) sind Literaturangaben über frühere Untersuchungen von Spannungen im Glas mitgeteilt. — Eine neuere Literaturübersicht siehe ferner in den „Glastechn. Ber.“, 9. Jg. 1931, H. 1, S. 48—49.

durch fortwährendes Einblasen von Luft möglichst beschleunigt. Zahlentafel 9 gibt einige Belege für diese Verhältnisse an ungekühlten zylindrischen Gefäßen eines gewöhnlichen Weißhohlglases.

Zahlentafel 9.

Randspannungen in zylindrischen Hohlgläsern parallel zur Achse in Abhängigkeit vom Außendurchmesser und von der Wandstärke der Gefäße.

Außendurchmesser mm	Wandstärke mm	Spannung an der Außenfläche $\mu\mu/\text{cm}$	Spannung an der Innenfläche $\mu\mu/\text{cm}$
30	0,8	+ 28	- 19
85	2,0	+ 22	- 2
85	2,4	+ 14	0
85	3,2	+ 28	+ 9
245	1,7	+ 16	- 3
245	1,9	+ 28	+ 6
245	3,8	+ 78	+ 62
245	4,3	+ 95	+ 75

Die Vorzeichenänderung der Spannung an der Innenwand von Zug- auf Druckspannung mit zunehmender Weite und zunehmender Wandstärke geht aus der Zahlentafel 9

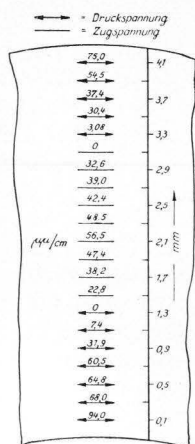


Bild 33.

Ausbildung von Spannungen
in Hohlgläsern
bei größerem Außen-
durchmesser und größerer
Wandstärke.

deutlich hervor. Bild 33 gibt das Spannungsbild eines starkwandigen und weiten Hohlglasgefäßes wieder.

Die Stärke der Spannung hängt ab von der Abkühlungsgeschwindigkeit bei der Formgebung; sie kann, wie viele praktische Versuche zeigten, vergrößert werden durch intensive Abkühlung in der Form, insbesondere durch zu langes Verweilen in der Form. Verringert wird sie dadurch, daß man der Außenoberfläche einen Ueberschuß an Wärme gibt, etwa in der Art, daß man nach dem Herausnehmen aus der Form den Gegenstand noch einmal kurze Zeit erhitzt, oder daß man bei ohne Form sich vollziehender Formgebung dem Glas vor der Formgebung ein Temperaturgefälle mit nach innen abnehmender Temperatur gibt. Beide Verfahren lassen sich in einigen Fällen praktisch anwenden, letzteres Verfahren z. B. bei der Röhrenfabrikation nach dem Danner-Verfahren.

Eine willkürliche Aenderung des Spannungszustandes nach der Richtung der Spannungsvergrößerung findet bei dem bekannten Oelhärtungsverfahren statt, bei dem man den Glaskörper von einer etwa 50° oberhalb des Transformationspunktes liegenden Temperatur (bei gewöhnlichem Hohlglas also von 550 bis 580°) plötzlich in 150 bis 180° heißem Oel abschreckt. Hier entsteht an der Innen- und Außenwand starke Druckspannung, welche Beträge von mehreren 1000 $\mu\mu/\text{cm}$ erreicht. Aus Bild 34 sind die Beziehungen zwischen äußerer Randspannung, Abschrecktemperatur des Glaskörpers und Temperatur des Oelbades ersichtlich. Die Versuche wurden an kleinen 1×2 cm großen Glasstückchen von 0,3 cm Wandstärke des gleichen Glases ausgeführt, welches eine Entspannungstemperatur von 500° (mit Hilfe des elektrischen Leitvermögens gemessen) besaß. Alle Proben, die von den angegebenen Abschrecktemperaturen in Oelbädern von 50 und 100° abgeschreckt wurden, erhielten feine Sprünge und wurden deshalb nicht ausgewertet. Im Prinzip ist es gleichgültig, womit die Gläser gehärtet werden, ob mit Oel oder anderen Medien, z. B. einem Luftstrom, wenn nur die Grundbedingung der gleichmäßigen allseitigen Abschreckung erfüllt ist.

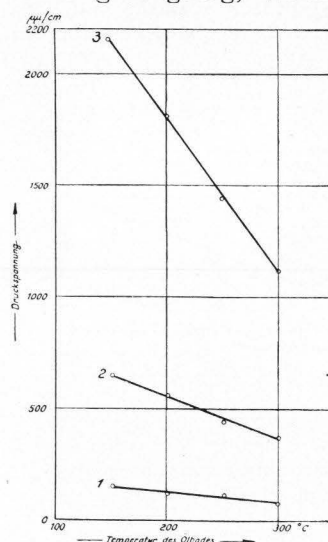


Bild 34.

Abhängigkeit der äußeren
Druckspannung
gehärteten Glases von
der Oelbad-Temperatur.
Abschrecktemperatur bei
1: 510°, bei 2: 550°,
bei 3: 600°.

Eine weitere willkürliche Beeinflussung der Spannung findet bei Verschmelzung zweier Gläser, etwa bei der Herstellung der bekannten Verbundgläser, statt. Bild 35 gibt Aufschluß über die

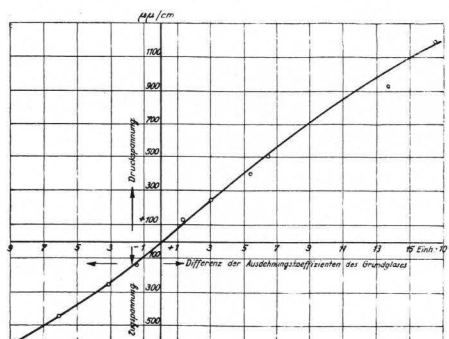


Bild 35.
Beziehungen zwischen
Größe der
Spannung und Differenz
der Ausdehnungs-
koeffizienten von Grund-
und Ueberfangglas.

Größenordnung dieser Spannung an der Verschmelzstelle in Abhängigkeit von der Differenz des Ausdehnungskoeffizienten bei Verschmelzung

normaler Hohlgläser mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten. Auch hier werden ganz enorme Spannungsbeträge erreicht.

c) Einfluß der Spannung auf die Schlagfestigkeit.

Die Wirkung von Schlägen auf Glaskörper äußert sich darin, daß die Flächen, auf die eine Stoßwirkung ausgeübt wird, im Augenblick des Stoßes vorübergehende Druckspannung, die gegenüberliegenden Flächen dagegen vorübergehende Zugspannung erleiden. Durch den Schlag wird der Glasgegenstand, Stab, Rohr usw., mehr oder weniger stark durchgebogen; die Außenflächen vergrößern, die Innenflächen verkleinern sich. Ueberschreitet die Zugspannung die Festigkeitsgrenze, so reißt das Glas ein und geht durch Absplitterung von Glasbrocken zu Bruch.

Befinden sich die Außenflächen eines Körpers unter Druckspannung, so kompensiert die vorhandene Druckspannung die durch Schlag oder Stoß auf der der Schlagseite entgegengesetzten Seite entstehende Zugspannung. Die Festigkeit normal gespannten Glases ist also gegen Stoß von außen größer als diejenige entspannten Glases. Die Bilder 36 und 37 geben

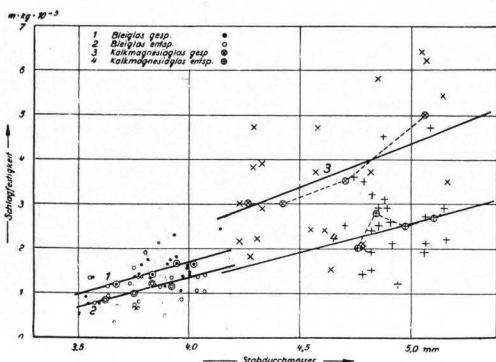


Bild 36. Einfluß der Spannung auf die Schlagfestigkeit von Glasstäben.

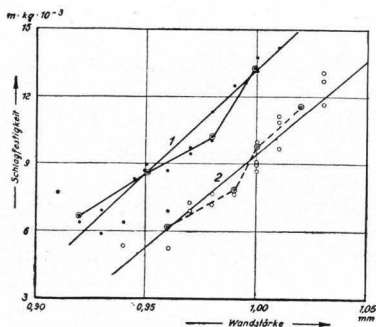


Bild 37.
Einfluß der Spannung auf die Schlagfestigkeit von Glasröhren.
1. Kalkmagnesiaglas, gespannt
2. „ entspannt
(Durchmesser etwa 9,6 mm.)

einige Belege für diese Tatsachen an Schlagfestigkeitsversuchen mit Stäben und Röhren. In beiden Fällen tritt durch die Entspannung eine Verminderung der Schlagfestigkeit ein.

Erreichen Rohre oder sonstige Hohlgefäße bestimmte größere Durchmesser, so wirkt die Schlagenergie nicht mehr auf die gegenüberliegende Außenfläche ein, sondern auf die dem Schlag benachbarte Innenfläche.

Gespannte Rohre, die auf der Innenfläche Zugspannung aufweisen, werden dementsprechend eher zu Bruch gehen müssen als entspannte. Versuche, die an gespannten und entspannten Kolben von 90 mm $\varnothing$ und 0,8 mm Wandstärke ausgeführt wurden, bestätigten die angestellten Ueberlegungen (Bilder 38 und 39). Weite Rohre

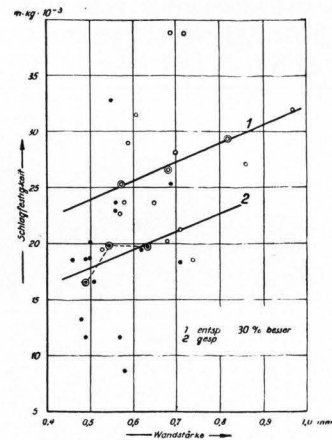


Bild 38.

Einfluß der Spannung auf die Schlagfestigkeit weiter Gefäße (Kolben).

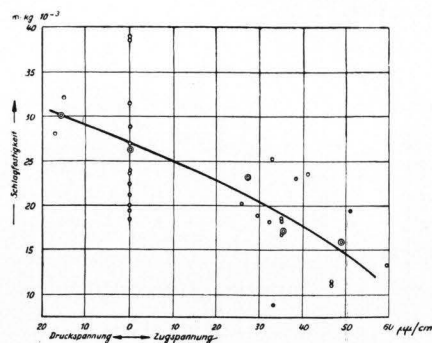


Bild 39.

Einfluß der inneren Randspannung auf die Schlagfestigkeit weiter Gefäße (Kolben).

genügender Gleichmäßigkeit standen nicht zur Verfügung; daher begnügten wir uns mit den Kolben. Besonders charakteristisch verhielten sich in dieser Richtung Kolben, die infolge einer Innenmaillierung starke Zugspannungen (bis 350 $\mu\mu/\text{cm}$) an den Innenflächen erhalten hatten. Die Kolben gingen bei dem geringsten Anschlagen auf eine harte Unterlage in Trümmer, während normale Kolben ein Herunterfallen aus 1 bis 1,5 m Höhe auf den Fußboden ohne weiteres vertragen. Beim Außenmaillieren mit der gleichen Emaille werden dementsprechend noch höhere Schlagwerte erzielt.

Praktisch benutzt wird die höhere Stoßfestigkeit von Gläsern mit Druckspannung in den Außenschichten bekanntlich bei dem ölgehärteten Glas, welches erstaunliche Schlagfestigkeit aufweist. Hier ist zu bemerken, daß die Erhöhung der Schlagfestigkeit durch Verstärkung der Druckspannung am Rand nicht beliebig hoch gesteigert werden kann. Nach unseren Versuchen, die an zwei verschiedenen Gläsern, einem Bleiglas mit dem mittleren Stabdurchmesser 3,21 mm und einem Kalkmagnesiaglas des mittleren Stabdurchmessers 4,45 mm durchgeführt wurden, wird die maximale Festigkeit schon bei verhältnismäßig geringen Randspannungen erreicht, bei dem Blei-

glas bei rd. $175 \mu\mu/\text{cm}$, bei dem Kalkmagnesiasglas bei rd. $200 \mu\mu/\text{cm}$ (Bilder 40 und 41). Der

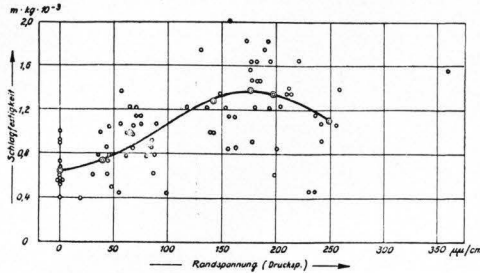


Bild 40. Abhängigkeit der Schlagfestigkeit von der Rand-Spannung:
Bleiglasstäbe, maschinengezogen,
Durchm. 3,15 bis 3,27 mm.

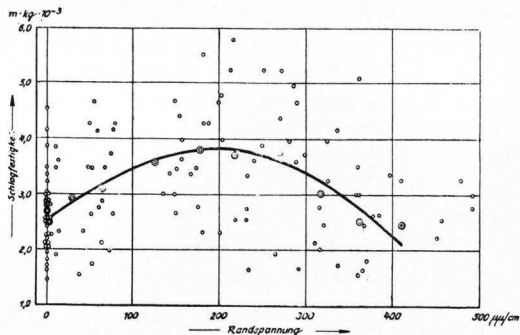


Bild 41. Abhängigkeit der Schlagfestigkeit von der Rand-Spannung:
Kalkmagnesiaglasstäbe, Durchm. 4,30 bis 4,60 mm.

Befund ist zunächst mit der Theorie nicht vereinbar, ist aber vielleicht dadurch zu erklären, daß die mit der äußeren Druckspannung proportional im Stabinnern anwachsende Zugspannung, verstärkt durch die Durchbiegung infolge der Pendelschläge, den vorzeitigen Bruch verursacht.

Da durch Ueberfangen von Gläsern mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten Spannungen der verschiedensten Art erzeugt werden können, kann man die Schlagfestigkeit der Gläser in leicht zu übersehender Weise durch Ueberfangen erhöhen oder vermindern. Einige Versuche an Ueberfangröhren, bei denen durch wechselweises Ueberfangen die Außenseite der Rohre einmal Zugspannung, im anderen Falle Druckspannung hatte, belegen diese Tatsache (Bild 42).

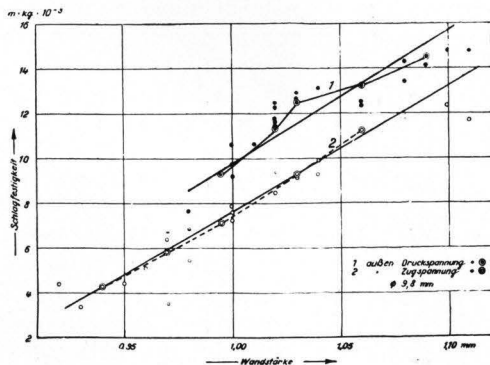


Bild 42. Einfluß der Spannung auf die Schlagfestigkeit von Ueberfangröhren.

2. Einfluß der thermischen Schlieren auf die Schlagfestigkeit.

a) Allgemeines über thermische Schlieren.

Thermische Schlieren treten allgemein an den Stellen eines Glaskörpers auf, an denen bei der Verarbeitung heißere und kältere Glasschichten miteinander verschmolzen sind. Es ist bekanntlich bei der Verarbeitung des Glasflusses zu Gebrauchsgegenständen vielfach unvermeidlich, daß kältere und heißere Glasposten miteinander in Berührung kommen; dies ist vornehmlich der Fall bei der Verarbeitung des Glases von Hand, insbesondere, wenn zur Ansammlung eines größeren Glaspostens an der Pfeife mehrfach überstochen werden muß, ganz besonders stark auch bei der Herstellung zusammengesetzter Stücke, z. B. Henkelwaren; in einigen Fällen liegt die Möglichkeit der Verschmelzung von heißem und kaltem Glas auch bei der maschinellen Glasverarbeitung vor, z. B. bei der Röhrenzieherei nach dem Danner-Verfahren.

Bekannt ist, daß angesetzte Stücke leicht an der Ansatzstelle springen; ferner hatten zahlreiche Kontrollprüfungen auf Spannung an gut gekühlten Gläsern ergeben, daß bei angesetzten Waren an der Grenze zwischen Grund- und Ansatzkörper durchweg mehr oder weniger starke Restspannungen vorhanden waren. Aus allen diesen Gründen und auf Grund sonstiger, später zu besprechender Beobachtungen wurde auch diese Frage geprüft, zumal sich in der Literatur nichts über diesen Gegenstand findet.

Ob es sich wirklich um rein thermische Schlieren handelt, ist noch nicht ganz klar. Es besteht die Möglichkeit, daß bei der verschiedenen Temperatur der beiden zu verschmelzenden Glaskörper die Oberflächen infolge der bekanntlich bei höheren Temperaturen stattfindenden Alkaliwanderungen zur Oberfläche⁶¹⁾⁶²⁾ verschiedene chemische Zusammensetzung haben. Für das hier vorliegende Problem ist die Deutung der bei der Verarbeitung auftretenden Inhomogenitäten nach der rein physikalischen oder chemischen Seite an sich ohne Belang.

b) Entstehung der thermischen Schlieren.

Bringt man einen Glaskörper, bei dem eine Schicht heißen Glases mit einer Schicht kalten Glases verschmolzen ist, nach dem Verschmelzen schnell unter den Transformationspunkt, so gerät das heißere Glas infolge des Nachhinkens bei der Abkühlung gegenüber dem kälteren Glas in Zugspannung und die kalte Schicht dementsprechend in Druckspannung. Verlangt man, daß der Körper bei einer etwaigen Kühlung seine

⁶¹⁾ G. Keppeler: „Chemische Wirkung der Glaskühlung“. Sprechsaal, 61. Jg. 1928, S. 300–305. (Ref. Glastechn. Ber., 6. Jg. 1928/29, S. 710.)

⁶²⁾ E. Rexer: „Kritische Untersuchung der Methoden zur Bestimmung der Angreifbarkeit der Gläser“. Keram. Rundschau, 38. Jg. 1930, S. 387. (Ref. demnächst in den „Glastechn. Ber.“.)

Form nicht mehr verändert, was man bei einem Glaskörper nach der Formgebung verlangen muß, so kann diese Spannung augenscheinlich auf keine Weise durch Tempern wieder herausgebracht werden. Gestattet man dagegen, daß der Körper sich bei der Kühlung deformiert, so kann unter einigen im folgenden zu besprechenden Umständen Entspannung eintreten, unter anderen dagegen nicht.

Die beim Verschmelzen ungleich temperierter Gläser entstehende Spannung wird, unter sonst gleichen Umständen, größer mit steigender Temperaturdifferenz, steigendem Ausdehnungskoeffizienten und steigendem Abstrahlungsvermögen des Glases; sie sinkt mit steigender Höhe der Verschmelztemperatur. Kompliziert werden die Verhältnisse durch die verschiedene Ausdehnung unterhalb und oberhalb des Transformationspunktes und die Verschiedenheit der Viskosität bei den verschiedenen Gläsern, insofern als oberhalb des Transformationspunktes ein Teil der Spannungen sich ausgleichen kann.

Es lag nahe, diese verwinkelten Verhältnisse im Laboratorium eingehend zu studieren. Leider läßt sich im Laboratorium mit Glas bei den Temperaturen, bei denen Glas normalerweise verarbeitet wird, nicht gut hantieren. Wir beschränkten uns daher, um zu sehen, ob die entwickelten Grundsätze richtig sind, auf einige Versuche bei verhältnismäßig hohen Temperaturen, bei denen sich besser arbeiten läßt.

Diese Versuche wurden in folgender Weise ausgeführt: Ein kleiner Glasposten aus einem Kalkmagnesiaglas, der sich in einem kleinen flachen Platintiegel befand und längere Zeit auf 1000° blieb, wurde mit einer kleinen Glasmenge der gleichen Zusammensetzung übergossen, die längere Zeit auf 1350, 1400, 1450 und 1500° gehalten war. Nach dem Erkalten im Ofen (ohne weitere nachfolgende Kühlung) wurde der Tiegel aufgeschnitten und ein Schliff durch die Probe derart angefertigt, daß eine Spannungsmessung parallel zur Verschmelzfläche in einer Ebene senkrecht zur Verschmelzfläche möglich war. Es wurde nun die Spannung durch das ganze Glasstück hindurch ausgemessen. Nach der Messung wurde das Glasstück, beginnend mit 500° [der mit Hilfe des elektrischen Leitvermögens gemessene Transformationspunkt⁶³⁾ liegt bei 495°] gut gekühlt und wieder gemessen; eine Deformation war bei dieser Kühlung nur in geringem Maße möglich. Bild 43 zeigt das Ergebnis bei Verschmelzversuchen mit einem Kalkmagnesiaglas von 1000 bzw. 1380°. Die Kurve der Spannungsverteilung macht an der Berührungslinie von kalter und heißer Glasschicht einen Sprung. Das heißere Glas besitzt einen höheren Zugspannungswert als das kältere. Der Sprung läßt sich durch Tempern bei 500° zum Teil entfernen. Homogene Proben des gleichen Glases ent-

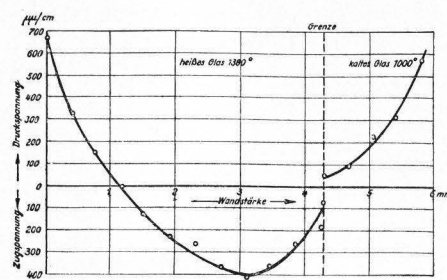


Bild 43.
Entstehung
von ther-
mischen
Schlieren
beim Zusam-
mengießen
verschieden
heißer Gläser
(Probe un-
getempert).

spannten sich bei dieser Temperatur völlig. Werden die Proben bei Temperaturen getempert, bei denen eine Deformation ohne weiteres möglich ist, so verschwindet der Spannungssprung.

Bei Versuchstemperaturen von 1350 und 1400° für das heiße Glas und 1000° für das kalte Glas, ist dieser Sprung deutlich ausgeprägt. Bei 1450° wurde der Unterschied merkwürdigerweise Null und kehrte sich bei höheren Temperaturen gelegentlich sogar um; bei 1500° ist diese Umkehrung deutlich vorhanden. In Zahlentafel 10 ist eine Uebersicht über die Ergebnisse zusammengestellt.

Zahlentafel 10.

Spannungsmessungen an der Berüh-
rungsstelle zwischen kalt und heiß
verarbeitetem Glas bei höheren
Temperaturen.

(Bezogen auf 1 cm Schichtdicke.)

(+ bedeutet Druckspannung, — Zugspannung.)

Temperatur des kalten Glases °C	Temperatur des heißen Glases °C	Spannung des nicht getemperten		$\mu\mu/\text{cm}$ -Differenz	Spannung des getemperten		Differenz $\mu\mu/\text{cm}$ der Spannung
		kalten Glases	heißen Glases		kalten Glases	heißen Glases	
1000	1350	— 311	— 395	+ 84	— 220	— 325	+ 105
1000	1350	— 399	— 449	+ 50	— 91	— 138	+ 47
1000	1400	— 235	— 397	+ 162	+ 152	— 89,8	+ 242
1000	1400	— 382	— 485	+ 103	— 51	— 132	+ 81
1000	1400	— 587	— 727	+ 140	+ 107	+ 193	— 98
1000	1450	— 546	— 337	— 209	— 282	+ 6	— 288
1000	1450	— 128	— 124	— 4	— 40	+ 153	— 193
1000	1450	— 208	— 218	+ 10	— 36	0,0	— 36
1000	1450	— 329	— 329	$\pm$ 0	— 21	+ 125	— 125
1000	1450	— 417	— 404	— 13	+ 108	+ 90	+ 18
1000	1500	— 521	— 435	— 86	— 97	— 50	— 47
1000	1500	— 390	— 324	— 66	— 90	+ 168	— 258

Unterhalb 1350° waren keine Versuche mehr möglich, da das Glas sich nicht mehr gießen ließ. Die Schwankungen in der absoluten Größe des Spannungssprunges sind beträchtlich; dies erklärt sich wohl aus kleinen Unterschieden in der Geschwindigkeit, mit der man das heiße Glas aus dem Ofen nahm und ausgoß (gelegentliches Kleben des Tiegels an der Zange usw.), ferner daraus, daß bei diesen Versuchen zunächst nicht auf die Verweilzeiten der Gläser bei den hohen Temperaturen geachtet wurde, was aus gleich zu besprechenden Gründen wichtig war. Immerhin läßt sich erkennen, daß unterhalb 1400° das heißere Glas sich zum kälteren Glas in Zugspannung, oberhalb 1400° in Druckspannung befindet. Diese Umkehr war zunächst un-

⁶³⁾ M. Fulda: „Ueber das elektrische Leitvermögen der Gläser“. Sprechsaal, 60. Jg. 1927, Nr. 42. (Ref. Glastechn. Ber., 6. Jg. 1928/29, S. 203.)

verständlich. Neben einer etwa anzunehmenden Ausdehnungsanomalie lag die Erklärungsmöglichkeit vor, daß oberhalb 1400° die Alkaliverdampfung so beträchtliche Werte annimmt, daß das heiße Glas einen bedeutend kleineren Ausdehnungskoeffizienten hat als das kalte Glas. Wenn dies der Fall ist, muß sich bei kurzer Verweilzeit auf hoher Temperatur für das heiße Glas zunächst Zugspannung, und bei langer Verweilzeit allmählich Druckspannung ergeben. Dies ist in der Tat der Fall, wie Versuche mit 1/2- und 3ständiger Verweilzeit des heißen Glases bei 1450° zeigten (Zahlentafel 11).

Zahlentafel 11.

Spannungsmessungen an der Verschmelzstelle von kaltem (1000°) und heißem Glas (1450°) in Abhängigkeit von der Verweilzeit.

Schmelzeit des heißen Glases	Spannung des kalten Glases in $\mu\mu/\text{cm}$	Spannung des heißen Glases in $\mu\mu/\text{cm}$	Differenz der Spannungen $\mu\mu/\text{cm}$
30 Minuten	— 342	— 607	+ 265
30 "	— 369	— 405	+ 36
180 "	— 273	— 208	— 65
180 "	— 242	— 174	— 68

Versuche im Verarbeitungsbereich ließen sich leider aus den angegebenen Gründen im Laboratorium nicht ausführen. Es wurde daher zu einigen orientierenden Versuchen folgende Methode angewandt. Ueber einen an der Glas-macherpfeife schon etwas erkalteten Posten von Glas (dunkle Rotglut) wurde an einer Seite ein Strang ofenheißes Glas (1200°) gezogen; dann wurde der Posten ein wenig zusammengewälzt und ohne Aufwärmen zum Stab verarbeitet. Nach dem Erkalten wurde die Spannung parallel zur Stabachse gemessen. Es zeigte sich in allen Fällen, daß an der Grenzfläche zwischen kaltem und heißem Glas die Spannung sich sprunghaft ändert. Die heiße Schicht steht in Zugspannung zur kälteren Schicht. In Zahlentafel 12 sind einige Messungen an nicht entspannten Proben wieder-

gegeben. Leider sind die Temperaturen bei diesen Versuchen wenig definiert, so daß die Werte nur qualitative Bedeutung haben.

Zahlentafel 12.

Spannungsmessungen an der Berührungsstelle von kalt und heiß verarbeitetem Glas.

Anzahl der Messungen	Mittelwerte (Gangunterschied) für kaltes Glas heißes Glas $\mu\mu/\text{cm}$		Differenz $\mu\mu/\text{cm}$
2 (in der Mitte)	+ 111,0	+ 58,0	43,0
3 (am Rand)	+ 11,5	— 84,0	95,5
5	+ 162	+ 110	52,0
4	+ 204	+ 160	44,0
4	+ 157	+ 136	21,0
4	+ 208	+ 193	15,0
4	+ 208	+ 196	12,0

Bild 44 gibt den Spannungsverlauf in einer derartigen Probe vor und nach den Temperversuchen wieder. Der Spannungssprung an der Verschmelzstelle ist im ungetemperten Zustand und nach zweimaligem Tempern bei 515° (Transformationspunkt elektrisch gemessen 515°) gut erkennbar. Homogene Proben, die mit gleicher Zeit bei 515° gekühlt wurden, entspannten völlig. Temperversuche, die bei 550° ausgeführt wurden, brachten den Spannungsunterschied an der Verschmelznaht zum Verschwinden. Die Proben erhielten bei 550° eine leichte Deformation. Leider erwies es sich experimentell nicht als möglich, außer diesen nur qualitativen Proben einen mehr quantitativen Einblick in die Verhältnisse zu gewinnen.

c) Die thermischen Schlieren in der Praxis.

Unsere praktischen Versuche über die Entstehung thermischer Schlieren und ihre Wirkung auf die Festigkeit beschränken sich auf die Rohr- und Stabherstellung und Weiterverarbeitung. Wir möchten indessen annehmen, daß die gefundenen Ergebnisse sich auch sinngemäß auf die Herstellung und das Verhalten anderer Gegenstände übertragen lassen. Bei gegossenen Spiegelgläsern wurden beispielsweise ganz ähnliche Erscheinungen, wie im folgenden geschildert, beobachtet.

Bei der Herstellung von Stäben und Röhren von Hand wird der notwendige Glasposten meist durch dreimaliges Ueberstechen, und dazwischenliegendes Verteilen und Abkühlen der Glasmasse an der Pfeife gesammelt. Die Entstehung thermischer Schlieren ist also gegeben. Bild 45 zeigt eine Mikrophotographie eines handgezogenen Rohres, bei dem sich drei aus dem Posten stammende Hauptschichten und einige weniger ausgeprägte Zwischenschichten gut erkennen

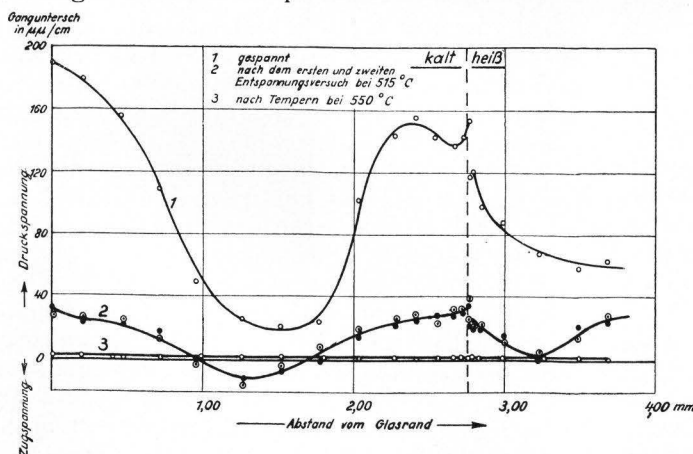


Bild 44. Beispiel des Spannungsverlaufs durch eine Probe, die aus kaltem Glas von ungefähr 750° und heißem Glas von ungefähr 1200° verarbeitet wurde, vor und nach den Entspannungsversuchen.

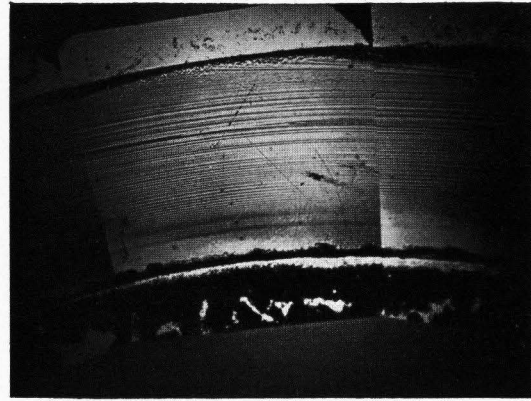
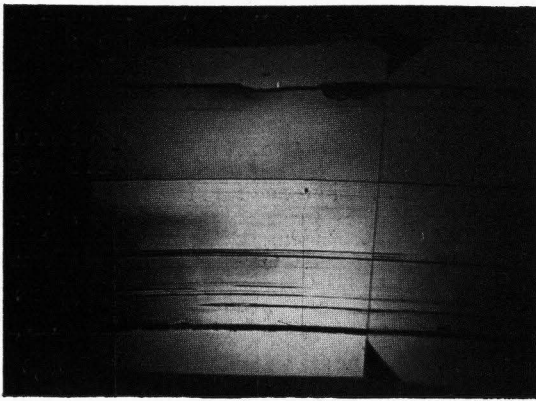


Bild 45 a und b. Thermische Schlieren in gezogenem Glasrohr.
a) Handgezogenes Glasrohr.
b) Maschinengezogenes Glasrohr.
(Vergrößerung rd. 50 fach.)

lassen. Die Zwischenschichten rühren offensichtlich daher, daß beim Verteilen der aufgenommenen Glasmassen an der Pfeife die einzelnen Glaspartien sich vielfach ganz unregelmäßig überlappen. Bild 46 gibt das Spannungsbild durch ein derartiges Rohr. Man sieht, wie das nor-

chendes Spannungsbild; es sind allerdings nicht alle, sondern nur die stärksten von diesen zahllosen Ringen exakt ausgemessen. Auch hier machen sich nach sorgfältigem Tempern bei 420° (Transformationspunkt elektrisch gemessen: 415°) die einzelnen Ringe durch verschiedene Spannung kenntlich. Homogenes Rohr ist dagegen bei 420° vollkommen spannungsfrei zu bekommen. Entspannungsvorversuche im Erhitzungsmikroskop nach Endell zeigten, daß sich Glasrohre mit stark ausgeprägter Zonenstruktur bei der üblichen Entspannungstemperatur des Glases vollkommen entspannten. Die Glasprobe wurde bei 420° spannungsfrei, beim Abkühlen jedoch kamen die Spannungsringe wieder zum Vorschein. Bei 350° traten sie ganz leicht hervor, bei 280° zeichneten sie sich scharf umrissen ab und bei 180° hatten sie höhere Spannungswerte wieder eingenommen. Dieser Abkühlungsvorgang wurde so geleitet, daß durch das Abkühlen an sich keine Spannungen entstehen konnten. Bemerkenswerterweise ist dagegen hier nicht möglich, die Ringe durch Tempern ganz herauszubringen, selbst wenn man dem Rohr Deformation gestattet. Durch Tempern bei 470 und 520° waren die Zonen auf keine Weise zu entfernen.

Es besteht hier ein Unterschied in der Entspannungsmöglichkeit der Körper aus zwei oder drei Schichten gegenüber dem Körper mit vielen Schichten. Eine exakte Erklärung kann noch nicht gegeben werden. Man kann sich diesen Unterschied etwa in der Richtung erklären, daß bei den Glaskörpern mit nur wenigen Schichten infolge der Breite der Schichten die Drehmomente, welche von den Spannungen erzeugt werden, verhältnismäßig groß sind und eben infolge ihrer Größe leicht zum Spannungsausgleich führen; bei den Glaskörpern mit vielen dünnen Schichten sind die Drehmomente infolge der geringen Dicke der Schichten natürlich verhältnismäßig klein, es findet daher viel schwieriger ein Spannungsausgleich statt.

Entsprechend der Art der Spannung treten diese Zonen sowohl bei hand- wie maschinengezogenem Rohr bei Beobachtung zwischen ge-

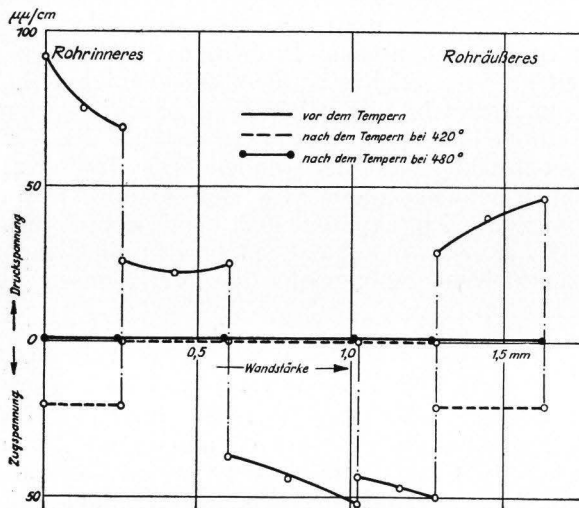


Bild 46. Spannungsquerschnitt durch ein handgezogenes Platinglasrohr.

male Spannungsbild völlig zerrissen wird. Durch Tempern bei 420° (Transformationspunkt mit Hilfe des elektrischen Leitvermögens gemessen: 415°) läßt sich nur die normale Spannung entfernen. Gewisse Spannungsunterschiede zwischen den Schichten bleiben bestehen. Erst durch Tempern bei 480°, d. h. also einer Temperatur, bei der Deformation leicht möglich ist, ist völlige Entspannung erreichbar.

Bei der maschinellen Herstellung von Röhren und Stäben nach dem Danner-Verfahren liegen ähnliche Verhältnisse vor, insofern, als das aus dem Vorratsgefäß (dem Trog) auf die Pfeife auflaufende Glas im allgemeinen heißer als die Pfeife ist. Bild 45 zeigt die zahllosen Ringe, die beim Aufwickeln des Glases auf die Pfeife entstehen, recht deutlich. Bild 47 gibt entspre-

kreuzten Nikols mit Gipsplättchen als blaue und gelbe Ringe hervor.

Es wurde in beiden Fällen versucht, die beschriebene Zonenstruktur in der Fabrikation abzuschwächen oder zu verstärken.

Eine Abschwächung müßte sich durch Verminderung der Temperaturdifferenz der beiden zu verschmelzenden Glasschichten, eine Verstärkung durch Erhöhung der Temperaturdifferenz erreichen lassen.

Beim Handziehen ließ sich trotz vielfacher Versuche kein Erfolg erzielen. Obwohl in dem einen Falle die Posten in möglichst kurzen Abständen dem Ofen entnommen wurden, während man im zweiten Falle die einzelnen Glasposten an der Pfeife bis auf schwache Rotglut abkühlen ließ, konnten keine nennenswerten Unterschiede in der Zonenstruktur erhalten werden. Der Grund für das schlechte Gelingen der Versuche liegt wohl in der Hauptsache darin, daß beim Arbeiten mit sehr heißen Posten beim Wälzen leicht ein Ueberlappen der einzelnen Glaspartien stattfindet, so daß hierdurch trotz größter Vorsicht Glasschichten sehr verschiedener Temperaturen aufeinander zu liegen kommen.

Entsprechend wurde an der Röhrenziehmaschine versucht, durch Veränderung der Temperaturdifferenz zwischen Trog und Pfeife die Stärke der Zonenstruktur zu variieren. Um die Dimension des Rohres mit dem vorhandenen Maschinen-Aggregat nicht zu ändern, mußte noch die Ziehgeschwindigkeit ein wenig mit variiert werden. Der Erfolg war durchschlagend: Bei hoher Trogtemperatur, tiefer Pfeiftemperatur und großer Ziehgeschwindigkeit starke Zonenstruktur, bei tiefer Trogtemperatur, hoher Pfeiftemperatur, verringerter Ziehgeschwindigkeit völliges Verschwinden der Zonen. Die Erhöhung bzw. Verringerung der Ziehgeschwindigkeit beeinflusst die Verschmel-

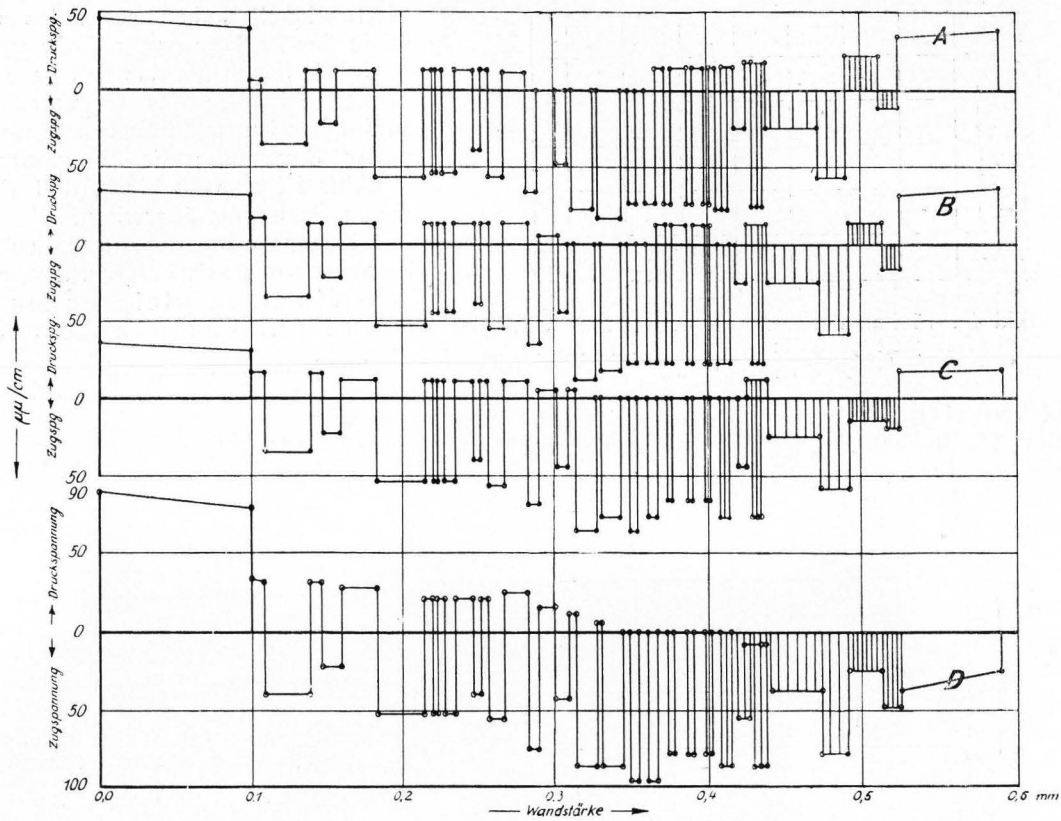


Bild 47. Einfluß des Temperns auf die Zonenstruktur eines maschinengezogenen Rohres (Transformationspunkt 415°).

A: bei 520° getempert, deformiert. C: bei 420° getempert.
B: bei 470° getempert, leicht deformiert. D: ungetempert.

zung auf der Pfeife, wie leicht vorstellbar, gleichfalls in ungünstigem bzw. günstigem Sinne.

d) Einfluß der thermischen Schlieren auf die Schlagfestigkeit.

Bei der Rohrzieherei von Hand hatte sich die Zonenstruktur, wie oben beschrieben, trotz vielfacher Versuche nicht in ihrer Stärke verändern lassen; es war daher zu erwarten, daß auch keine Unterschiede in der Schlagfestigkeit zu erzielen seien. Bilder 48 und 49 geben zwei

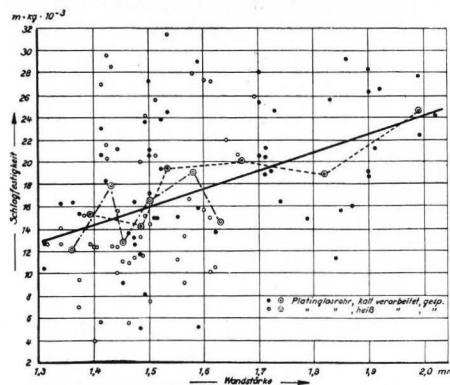


Bild 48. Einfluß der Zonenstruktur auf die Schlagfestigkeit eines handgezogenen Rohres. (Durchmesser 16,5 bis 17,5 mm.)

der mehrfach ausgeführten Versuchsreihen wieder; ein Unterschied zwischen den Versuchen mit möglichst heiß verschmolzenen Posten und möglichst kalt gewordenen und heiß überstochenen Posten ist nicht erkennbar. Die Messungen be-

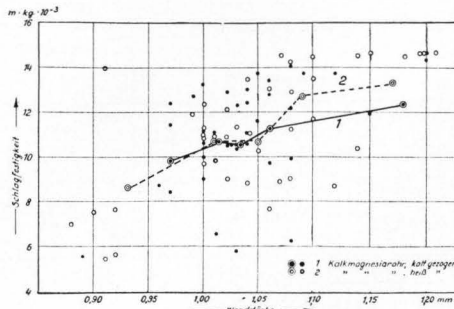


Bild 49. Einfluß der Zonenstruktur auf die Schlagfestigkeit eines handgezogenen Rohres.
(Durchmesser 9,9 mm.)

ziehen sich auf gespanntes Rohr, wie es von der Pfeife kam. Dies ist insofern berechtigt, als die in der verschiedenen Weise gezogenen Rohrposten durchaus gleiche Spannung haben (Bild 50).

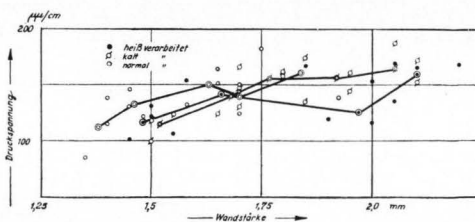


Bild 50.
Randspannungen an kalt und heiß verarbeitetem Rohr in Abhängigkeit von der Wandstärke.
(Platinglasrohr, Durchmesser 16,5 bis 17,5 mm.)

Bei dem maschinengezogenen Rohr sollte dagegen, falls die thermischen Schlieren sich ähnlich auswirken wie die chemischen, ein Effekt zu erwarten sein. Die Verhältnisse sind dadurch etwas kompliziert, daß die nach den beschriebenen Verfahren hergestellten Rohre mit und ohne Zonenstruktur grundsätzlich verschiedenen hohe Spannung aufweisen. Die Rohre ohne Zonenstruktur hatten allgemein geringere Spannung als die Rohre mit Zonenstruktur; dies rührt wohl daher, daß infolge der starken Erhitzung der Pfeife von außen der Außenmantel des sich bildenden Rohres einen Wärmeüberschuß gegenüber dem Innenmantel hat. Bei der Abkühlung ist demnach das Temperaturgefälle nicht so groß wie in dem anderen Fall, wo das Glas zwar heiß auf die Pfeife läuft, aber nicht mehr stark von außen erwärmt wird.

Nun ist bekannt, daß gespannte Glasrohre der in Frage kommenden Dimensionen höhere

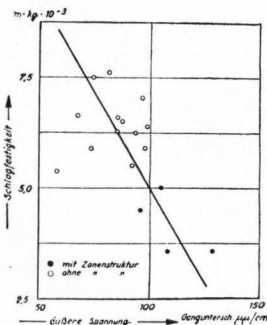


Bild 51.
Schlagfestigkeit von maschinengezogenem Rohr mit und ohne Zonenstruktur in Abhängigkeit von der Größe der äußeren Randspannung.
(Statistisches Material.)

Stoßfestigkeit haben als entspannte. Demnach sollte das heiß gezogene Rohr geringere Schlagfestigkeit haben als das kalt gezogene. In Wirklichkeit ist aber das Gegenteil der Fall, wie Bild 51 zeigt (statistisches Material, daher die starke Streuung); die Einwirkung der Zonenstruktur ist also so stark, daß sie die der normalen Spannung überwiegt.

Es wurde noch versucht, den Einfluß der Spannung dadurch auszuschalten, daß man die zu vergleichenden Rohre möglichst gut entspannte (Bild 52). Leider

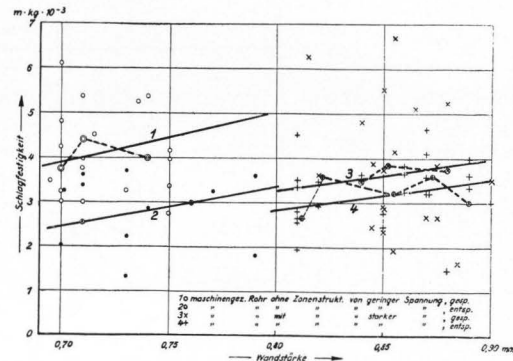


Bild 52. Einfluß der Zonenstruktur auf die Schlagfestigkeit von maschinengezogenen Rohren.

war dies bei den Rohren mit starker Zonenstruktur, wie oben beschrieben, nicht möglich. Dementsprechend ist auch der Unterschied in der Schlagfestigkeit zwischen dem gespannten und dem entspannten Rohr mit Zonenstruktur gering, während er in dem Falle des Rohres ohne Struktur trotz bedeutend geringerer absoluter Spannung viel größer ist. Bezüglich des Einflusses der Zonenstruktur selbst geht aus dem Bild aber ganz klar hervor, daß das Rohr ohne Zonenstruktur sowohl im gespannten als auch im entspannten Zustand höhere Schlagwerte hat als das Rohr mit Zonenstruktur, und zwar wiederum, obwohl das Rohr mit Zonenstruktur im getemperten wie im nicht getemperten Zustand höhere absolute Spannungen aufwies als das strukturfreie Rohr.

VI. Einfluß der homogenen Spannung auf die Schlagfestigkeit und die thermische Widerstandsfähigkeit.

1. Allgemeines über die Beziehung zwischen Schlagfestigkeit und thermischer Widerstandsfähigkeit.

In den vorhergehenden Abschnitten ist bisher nur die Schlagfestigkeit behandelt worden. Im allgemeinen genügt auch zur Erkennung und Messung der Sprödigkeit die Bestimmung der Schlagfestigkeit.

Die meisten der bisher aufgeführten Ursachen für erhöhte Sprödigkeit des Glases waren nämlich Inhomogenitäten, die, gleichgültig, ob chemischer oder thermischer Art, die Glasmasse durch und durch mehr oder weniger unregelmäßig durchsetzten und so ihre Festigkeit herabsetzten. Es ist ohne weiteres klar, daß mit der Unregelmäßigkeit des Gefüges auch eine Ver-

minderung der thermischen Widerstandsfähigkeit verbunden ist, wie dies z. B. auch aus der Weiterverarbeitung derartiger Gläser bekannt ist. Die besondere Betrachtung der thermischen Widerstandsfähigkeit erübrigte sich demgemäß in diesen Fällen.

Anders dagegen liegen die Verhältnisse bei der homogenen Spannung. Hier laufen die Schlagfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturwechsel durchaus nicht immer parallel. Vielmehr gibt es durch die besondere Form des Gegenstandes, die Art der Spannung und die Art der Beanspruchung bedingte Fälle, bei denen die vorhandene Spannung etwa durch den Stoß verstärkt, durch die thermische Beanspruchung dagegen geschwächt wird und umgekehrt. Im folgenden sollen die angeschnittenen Fragen näher erörtert werden.

2. Allgemeines über den Sprungverlauf.

Für die Entstehung von Sprüngen in Gläsern durch thermische Beanspruchung sind in der Hauptsache die vorübergehenden Spannungen, die durch Erhitzen oder Abkühlen unterhalb des Transformationspunktes entstehen, verantwortlich zu machen. Befindet sich nämlich ein Teil des thermisch beanspruchten Körpers oberhalb des Transformationspunktes, so wird die Gesamtspannung dadurch gemildert, daß die auf diesen Teil entfallenden Spannungen sich ausgleichen können, und dementsprechend auch die zugehörigen Spannungen entgegengesetzten Vorzeichens in dem unterhalb des Transformationspunktes befindlichen Teil.

Ueber die Wahrscheinlichkeit eines Sprunges und die Form des Sprunges ist allgemein folgendes zu sagen: Da die Zerreißfestigkeit von Gläsern erheblich kleiner ist als die Druckfestigkeit, so geht der Sprung immer von einer unter Zugspannung stehenden Stelle aus, und hier natürlich wiederum von einer Stelle geringster Festigkeit, z. B. von einer Inhomogenität, etwa einer Schliere oder einer angeritzten oder angerabten Stelle. Die Form des Sprunges und die Wahrscheinlichkeit des Sprunges hängt nun davon ab, ob die vorliegende Spannung durch diesen ersten Riß Gelegenheit findet, sich auszugleichen oder nicht. Gibt ein beginnender Sprung Gelegenheit zum Spannungsausgleich, so reißt das Glas in einer durch die regelmäßige Form der Zugspannung bedingten regelmäßigen Linie leicht weiter, zumal die unter Zugspannung stehende Schicht durch die Erweiterung des Risses immer mehr geschwächt wird. Gibt dagegen ein erster Sprung keine Gelegenheit zum Spannungsausgleich, so ist kein Anreiz zum Springen in der gleichen Richtung gegeben. Das Glas geht erst dann völlig zu Bruch, wenn allenthalben in der unter Zugspannung stehenden Schicht die Festigkeitsgrenze erreicht wird; es springt dann natürlich in einer durch etwa vorhandene unregelmäßig verteilte Inhomogenitäten bedingten ganz unregelmäßigen Form und meist in viele kleine Stücke.

Diese Verhältnisse seien an zwei Beispielen erläutert: Eine durch die thermische Beanspruchung oder sonstwie an der Außenschicht in Zugspannung geratene Vollkugel oder Hohlkugel reißt leicht an der Außenschicht auf, weil so der gepreßte, die Außenschicht auseinanderreißende Kern Gelegenheit findet, sich zu entspannen. Da die maximalen Spannungen infolge der Symmetrie auf größten Kugelkreisen liegen, geht der Riß auf einem größten Kugelkreis weiter, und die Kugel zerfällt in zwei Halbkugeln (Bild 53) oder, falls zufällig das Reißen von

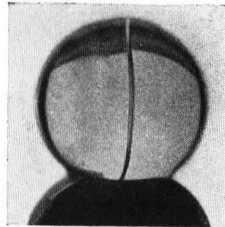


Bild 53.

Durch thermische Behandlung
(Abschreckung)
gerissene Glaskugel.

zwei Stellen aus beginnt, in vier Segmente. Diese Erscheinung wurde oft bei der Messung der thermischen Widerstandsfähigkeit von Massivkugeln gegen Abschrecken beobachtet. Steht dagegen der Kern einer Kugel oder die Innenwand einer Hohlkugel unter Zugspannung, so findet durch einen im Kern vorhandenen Sprung durchaus noch keine Entspannung statt. Diese würde erst dann eintreten, wenn die durch den Kern zusammengepreßte Außenschale der Kugel sich an der Sprungstelle übereinanderschieben und so ein kleineres Volumen einnehmen könnte. Weil dies aber nicht möglich ist, reißt ein erster Sprung nicht weiter, vielmehr bleibt die Kugel ganz, bis im Kern allenthalben die Zerreißfestigkeitsgrenze erreicht ist.

Besonders instruktiv und teilweise technisch auch wichtig sind diese Verhältnisse bei zylindrischen Hohlkörpern, z. B. bei Röhren. Hier ist, entsprechend der besonderen Form des Rohres, bei thermischer Beanspruchung mit zwei Spannungen zu rechnen, der Spannung parallel zur Achse, der sog. „Längsspannung“, und der Spannung senkrecht zur Achse, im folgenden als „Querspannung“ bezeichnet. Bei der Längsspannung ist es für den Spannungsverlauf gleichgültig, ob die Außen- oder die Innenseite des Rohres unter Zugspannung steht. Entsteht nämlich durch Erzeugung eines Risses auf der Seite der Zugspannung ein vollständiger Riß, so muß dieser ein Kreisriß rund um das Rohr herum sein, da ein solcher stets zum Ausgleich der Längsspannung führt. Die Kreislinie ist durch die Richtung der Längsspannung als Schnittlinie der Hauptspannungsebene mit der zylindrischen Glasfläche gegeben.

Bei der Querspannung dagegen ist es durchaus nicht gleichgültig, ob die unter Zugspannung stehende Schicht sich an der Innen- oder Außenseite des Rohres befindet. Liegt die zug-

gespannte Schicht an der Außenseite, so gibt ein Längssprung, d. h. ein Sprung parallel zur Achse des Rohres, Gelegenheit zum Spannungsausgleich insofern, als der gepreßte Kern des Rohres so Gelegenheit findet, sich auszudehnen; das Rohr klafft nach der Entspannung auseinander. Bei einem derartig gespannten Rohr bildet sich also besonders leicht ein Längssprung. Durch Kombination dieses Längssprunges mit dem durch die stets gleichzeitig vorhandene Längsspannung bedingten Kreisprung entsteht der bekannte Spiralsprung (Bild 54). Die Ganghöhe der Spirale hängt mit

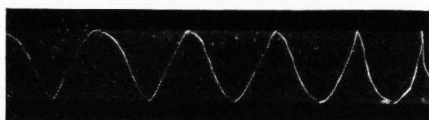


Bild 54. Durch thermische Beanspruchung entstandener Spiralsprung in einem Glasrohr.

der Größe der Spannungen und mit den Dimensionen des Rohres in leicht erkennbarer Weise zusammen. Befindet sich dagegen die Innenschicht des Rohres unter Zugspannung, so ist durch einen hier entstehenden Sprung durchaus keine Gelegenheit zum Spannungsausgleich gegeben; dieser würde erst dann eintreten, wenn die durch die Innenschicht zugepreßte Außenschicht genau wie bei der Kugel etwa Gelegenheit finden würde, durch Uebereinanderschieben der Sprungenden sich zusammenzuziehen. Da dies aber durch die thermische Beanspruchung nicht ohne weiteres stattfindet, liegt für das Rohr kein Anlaß vor, infolge der Querspannung längs aufzureißen. Ein Reißen tritt also viel schwerer ein, und dann in unregelmäßiger Form als in dem vorhin behandelten Fall⁶⁴⁾.

(Die in der unter ⁶⁴⁾ angeführten Arbeit gegebene Erklärung, welche das leichtere Springen des Spiralringes gegenüber dem drückenden Ring damit erklärt, daß bei dem Spiralring die Zugschicht einen etwas größeren Durchmesser hat als die Druckschicht, und so nach bekannten Prinzipien etwas geringere Festigkeit, ist, wie aus den vorliegenden Ausführungen hervorgeht, wohl nicht als ausschlaggebender Faktor anzusehen; sie tritt zu den oben angeführten Gründen nur als ein Faktor von untergeordneter Bedeutung hinzu.)

3. Einfluß der Spannung auf die thermische Widerstandsfähigkeit von Massiv- und Hohlkörpern.

Der Einfluß der Spannung auf die thermische Widerstandsfähigkeit massiver Körper ist bereits früher erörtert worden⁶⁵⁾. Der geschlossenen Uebersicht halber mit den hier zu besprechenden,

für die Weiterverarbeitung vor der Lampe besonders wichtigen Hohlkörpern (Röhren) ist die an der zitierten Stelle gegebene Zusammenstellung gegenüber dem thermischen Verhalten massiver Glaskörper in Tafel 13 wiedergegeben.

Tafel 13.

Widerstandsfähigkeit eines Massivkörpers von verschiedenem Spannungszustand gegen Abkühlen und Erhitzen.

Außenschicht des Körpers:		
unter Druckspannung	spannungsfrei	unter Zugspannung
3	2	1
Druckspannung wird kleiner	Entstehung von Zugspannung in der Außenschicht	Zugspannung wird größer
$\wedge \vee$	$\wedge$	$\wedge$
Druckspannung wird größer	Entstehung von Druckspannung in der Außenschicht	Zugspannung wird kleiner
4	5	6

NB. Spalte 1 bis 3: Verhalten beim Abkühlen.

" 4 " 6: " " Erhitzen.

Die größere oder kleinere Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturwechsel ist durch das $>$ bzw. $<$ Zeichen angedeutet, sofern die durch die thermische Beanspruchung dem Glaskörper aufgedrückte Spannung in der Größenordnung der vorhandenen Spannung ist. In dem Fall, daß die durch die thermische Beanspruchung entstandenen Spannungen die vorhandenen weit an Größe übertreffen, gelten bei einigen Beanspruchungen andere Gesetzmäßigkeiten (durch $\approx$ ausgedrückt) als bei geringerer thermischer Beanspruchung.

Beim Massivkörper ist lediglich bei dem in der ersten Spalte der Tafel 13 behandelten Fall der unter Druckspannung stehenden Außenschicht eine eindeutige Zuordnung nicht möglich: Ist das bei der Abkühlung entstehende Temperaturgefälle nicht so stark, daß die Druckspannung der Außenschicht in Zugspannung umschlägt, so ist das Abkühlen zweifellos gefahrloser als das Erhitzen, bei dem die bestehenden Spannungsverhältnisse verstärkt werden; ist dagegen die thermische Beanspruchung so stark, daß beim Abkühlen die vorhandene Druckspannung in Zugspannung verkehrt wird, so ist das Abkühlen gefahrvoller als das Erhitzen. Die in der ersten Zeile der Tafel 13 aufgeführten Beanspruchungen ergeben regelmäßigen, die in der zweiten Zeile aufgeführten unregelmäßigen Sprungverlauf. Auf Grund der in der tabellarischen Anordnung herrschenden Symmetrie bezüglich der Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturwechsel und einer kritischen Begutachtung der Spannungsverteilungen wurde die Gefährlichkeit des Springens infolge thermischer Beanspruchung zahlenmäßig bewertet. Die Zahl 1 bezeichnet die geringste, die Zahl 6 die höchste thermische Widerstands-

⁶⁴⁾ G. Gehlhoff u. M. Thomas: „Untersuchungen an Sprengringen“. (Sprechsaal, 59. Jg. 1926, S. 697—699.) (Ref. Glastechn. Ber., 4. Jg. 1926/27, S. 436.)

⁶⁵⁾ G. Gehlhoff: Lehrbuch der technischen Physik III, Leipzig 1929, S. 342 ff.

fähigkeit. Die Zahlen 1 bis 6 lassen sich in der in Tafel 13 angegebenen einfachen Reihenfolge so anordnen, daß alle Größer- und Kleiner-Zeichen in horizontaler und vertikaler Richtung erfüllt sind. (Die $\leq$ Zeichen bleiben hierbei unberücksichtigt.)

Nach den im vorhergehenden Abschnitt dargestellten allgemeinen Grundsätzen über den Einfluß der Spannung auf den Spannungsverlauf lassen sich in ähnlicher Weise wie Massivkörper auch Hohlkörper, in unserem Beispiel Rohre, auf die Entstehungsmöglichkeiten von Sprüngen infolge thermischer Einwirkung nachprüfen. Wie oben ausführlich auseinandergesetzt wurde, gelten für Kreis- und Längssprünge nicht die gleichen Voraussetzungen. In Tafel 14 sind daher Kreis- und Längssprünge gesondert behandelt.

Die bei Hohlkörpern (Röhren) möglichen Fälle sind folgende: 1. spannungsfreies Rohr, wie man es durch Kühlen erhalten kann; 2. außen druck-, innen zuggespanntes Rohr, wie es beim Ziehen von Röhren kleinerer Dimensionen entsteht; 3. außen und innen druck-, in der Mitte zuggespanntes Rohr, das z. B. durch Härten in Oel diese Spannungsverteilung erhält; 4. außen zug-, innen druckgespanntes und 5. außen und innen zug-, in der Mitte druckgespanntes Rohr, Fälle, die praktisch nicht vorkommen, aber durch Ueberfangen von Gläsern verschiedener Ausdehnungskoeffizienten hergestellt werden können. Die beiden letzteren Spannungsverteilungen besitzen keine praktische Bedeutung und wurden nur der Symmetrie halber mit aufgeführt.

Die möglichen thermischen Beanspruchungen sind:

1. Erhitzen von außen und innen,
2. Erhitzen von außen oder (und) Abkühlen von innen,
3. Abkühlen von außen oder (und) Erhitzen von innen,
4. Abkühlen von außen und innen.

Das Verhältnis zweier thermischer Beanspruchungen zueinander ist wiederum durch die Richtung der Größer- bzw. Kleiner-Zeichen in horizontaler und vertikaler Richtung ($\leq$ $\geq$) gegeben. Auch in dieser Tafel sind die möglichen Fälle derart zahlenmäßig bewertet, daß alle Größer- und Kleiner-Zeichen ($\geq$) in beiden Richtungen erfüllt sind. Im oberen Teil der Tafel genügen hierfür 13 Zahlen, da sieben Fälle mit sieben anderen, wie aus den angegebenen Spannungen zu ersehen, gleich zu bewerten sind: 2,2; 3,3; 4,4; 7,7; 8,8; 9,9; 11,11.

In dem unteren Teil der Tafel 14, der, wie bereits oben betont, größte Ähnlichkeit mit der thermischen Beanspruchung eines Massivkörpers hat, herrscht wegen dieser Ähnlichkeit vollkommenste Symmetrie. Die Zahlenfolge in der ersten und letzten Spalte ist allerdings nicht so einfach wie beim thermisch beanspruchten massiven Körper, da die vielen Ungleichheitszeichen in vertikaler Richtung berücksichtigt werden müssen.

Eine gewisse Willkür herrscht bezüglich der Anordnung der an sich schon nahe beieinander liegenden Zahlenpaare 2 3, 6 7, 14 15, 18 19. Den Ungleichheitszeichen würde auch durch Umstellung dieser Zahlenpaare Genüge geschehen. Die Anordnung in der vorliegenden Art geschah auf Grund noch eingehenderer Betrachtung der Spannungsverhältnisse, als sie in der Tafel 14 skizziert ist.

Die Tafel 14 zeigt deutlich, welche Fälle man in der Praxis nach dem jeweiligen Zweck unbedingt vermeiden muß. Man erkennt den Vorzug gehärteten Glases; man sieht, zunächst sehr überraschend, daß gut gekühltes Rohr durchaus nicht für alle praktischen Fälle das beste Ergebnis liefert usw. Jedenfalls wird diese vollständige Uebersicht aller bei Hohlglas möglichen Spannungs- und thermischen Beanspruchungsmöglichkeiten noch mancherlei Anregung für die Praxis geben können.

VII. Zusammenfassung.

Ausgehend von langjährigen Betriebsbeobachtungen über gelegentlich auftretende abnorme Sprödigkeit von Glas in der Hütte wie bei der Weiterverarbeitung in Glühlampenfabriken, wird den verschiedenen in der Glasindustrie verbreiteten Meinungen hierüber planmäßig nachgegangen. Der Einfluß der Wärmevergangenheit, der Schmelze und der Verarbeitung des Glases auf die Schlagfestigkeit wird untersucht.

1. Die Zusammenhänge zwischen Wärmevergangenheit bei hohen Temperaturen und Schlagfestigkeit werden an einer Reihe mehrfach umgefritterter und längere Zeit im Hafen stehengelassener Gläser nachgeprüft. Die Wirkung dieser thermischen Behandlung auf die Schlagfestigkeit ist bei den einzelnen Versuchsreihen verschieden. Einige Gläser werden schlechter, ein Glas bleibt unverändert, und einige Gläser werden fester. Es zeigt sich, daß für die beobachteten Sprödigkeitsänderungen die Theorie der Wärmevergangenheit nicht herangezogen zu werden braucht, sondern daß sich diese Festigkeitsänderungen viel einfacher durch Inhomogenitäten im Glase, insbesondere durch verschiedene Schlieren-Zahl und -Ausbildung erklären lassen. Bemerkenswert ist der starke Einfluß des „Blasens“ auf die Homogenisierung und damit auf die Erhöhung der Festigkeit unter sonst gleichen thermischen Verhältnissen in der Vergangenheit.

2. Der Einfluß des Schmelzvorganges, nämlich der Dauer, Temperatur und Läuterung auf die Schlagfestigkeit des Glases ist gleichfalls durch Inhomogenitäten im Glase erklärbar. Unaufgeschlossene Gemengeteilchen, Schlieren, Gispn und Entglasungen (in einigen Fällen) wirken mehr oder weniger schwächend auf die mechanische Festigkeit ein. Hervorzuheben sind die gefundenen

Zahlentafel 14.

Widerstandsfähigkeit von Hohlkörpern (Rohren) von verschiedenem Spannungszustand gegen Abkühlen und Erhitzen mit Erörterung der Entstehung von Kreis- und Längssprüngen und Nummerierung der Neigung zum Springen.

Spannungszustand	1.				2.				3.				4.				5.		
	Außen Druck	Mitte Zug	Innen Druck		Außen Druck	Mitte 0	Innen Zug		Außen 0	Mitte 0	Innen 0		Außen Zug	Mitte 0	Innen Druck		Außen Zug	Mitte Druck	Innen Zug
	wird				wird				wird				wird				wird		
Thermische Beanspruchungen																			
a) Kreissprünge																			
Außen und innen Erhitzen . .	6 vergrößert	vergrößert	vergrößert	<	8 vergrößert	Zug	verkleinert	<	10 Druck	Zug	Druck	>	8 verkleinert	Zug	vergrößert	<	13 verkleinert	verkleinert	verkleinert
																			
Außen Erhitzen oder(und) innen Abkühlen	7 vergrößert	wenig verändert	verkleinert	>	2 vergrößert	0	vergrößert	<	9 Druck	0	Zug	<	11 verkleinert	0	verkleinert	>	4 verkleinert	wenig verändert	vergrößert
																			
Außen Abkühlen oder (und) innen Erhitzen	7 verkleinert	wenig verändert	vergrößert	<	11 verkleinert	0	verkleinert	>	9 Zug	0	Druck	>	2 vergrößert	0	vergrößert	<	4 vergrößert	wenig verändert	verkleinert
																			
Außen und innen Abkühlen	12 verkleinert	verkleinert	verkleinert	>	3 verkleinert	Druck	vergrößert	<	5 Zug	Druck	Zug	>	3 vergrößert	Druck	verkleinert	>	1 vergrößert	vergrößert	vergrößert
																			
b) Längssprünge																			
Außen und innen Erhitzen . .	4 vergrößert	vergrößert	vergrößert	<	8 vergrößert	Zug	verkleinert	<	12 Druck	Zug	Druck	<	16 verkleinert	Zug	vergrößert	<	20 verkleinert	verkleinert	verkleinert
																			
Außen Erhitzen oder(und) innen Abkühlen	7 vergrößert	wenig verändert	verkleinert	>	3 vergrößert	0	vergrößert	<	11 Druck	0	Zug	<	19 verkleinert	0	verkleinert	>	15 verkleinert	wenig verändert	vergrößert
																			
Außen Abkühlen oder (und) innen Erhitzen	14 verkleinert	wenig verändert	vergrößert	<	18 verkleinert	0	verkleinert	>	10 Zug	0	Druck	>	2 vergrößert	0	vergrößert	<	6 vergrößert	wenig verändert	verkleinert
																			
Außen und innen Abkühlen .	17 verkleinert	verkleinert	verkleinert	>	13 verkleinert	Druck	vergrößert	>	9 Zug	Druck	Zug	>	5 vergrößert	Druck	verkleinert	>	1 vergrößert	vergrößert	vergrößert

Gesetzmäßigkeiten der Aenderung der Homogenität und damit der Schlagfestigkeit bei Aenderung des Scherbengehaltes.

3. Durch die Verformung des Glases entstehende Schlieren, sog. thermische Schlieren, setzen ebenfalls die mechanische Festigkeit des Glases herab. Entstehung, Vermeidung und Einfluß der thermischen Schlieren auf die mechanische Festigkeit werden ausführlich erörtert.

4. Die Beziehungen zwischen Schlagfestigkeit und thermischer Widerstandsfähigkeit werden besprochen. Pa-

rallelität herrscht zwischen Schlagfestigkeit und thermischer Widerstandsfähigkeit dann, wenn eine Aenderung der Schlagfestigkeit durch allgemeine Inhomogenität bedingt ist. Nicht parallel dagegen verlaufen Schlagfestigkeit und thermische Widerstandsfähigkeit bei Glas mit regelmäßig verteilter Spannung. Demgemäß werden einige praktisch besonders wichtige Probleme der normalen regelmäßig verteilten Spannung, insbesondere auch der Härtung bezüglich ihres Einflusses auf die Schlagfestigkeit und die thermische Widerstandsfähigkeit besprochen.

Berichtigung.

Die Numerierung der Mikrophotographien in Bild 12*) und Bildtafel 1**) entspricht nicht dem zeitlichen Verlauf des Versuches. Zur Verdeutlichung ist nachfolgend die Abbildung 12 mit Einschluß der zugehörigen Mikrophotographien aus Bildtafel 1 wiederholt.

*) 9. Jg., H. 9, S. 491. **) 9. Jg., H. 9, S. 492.

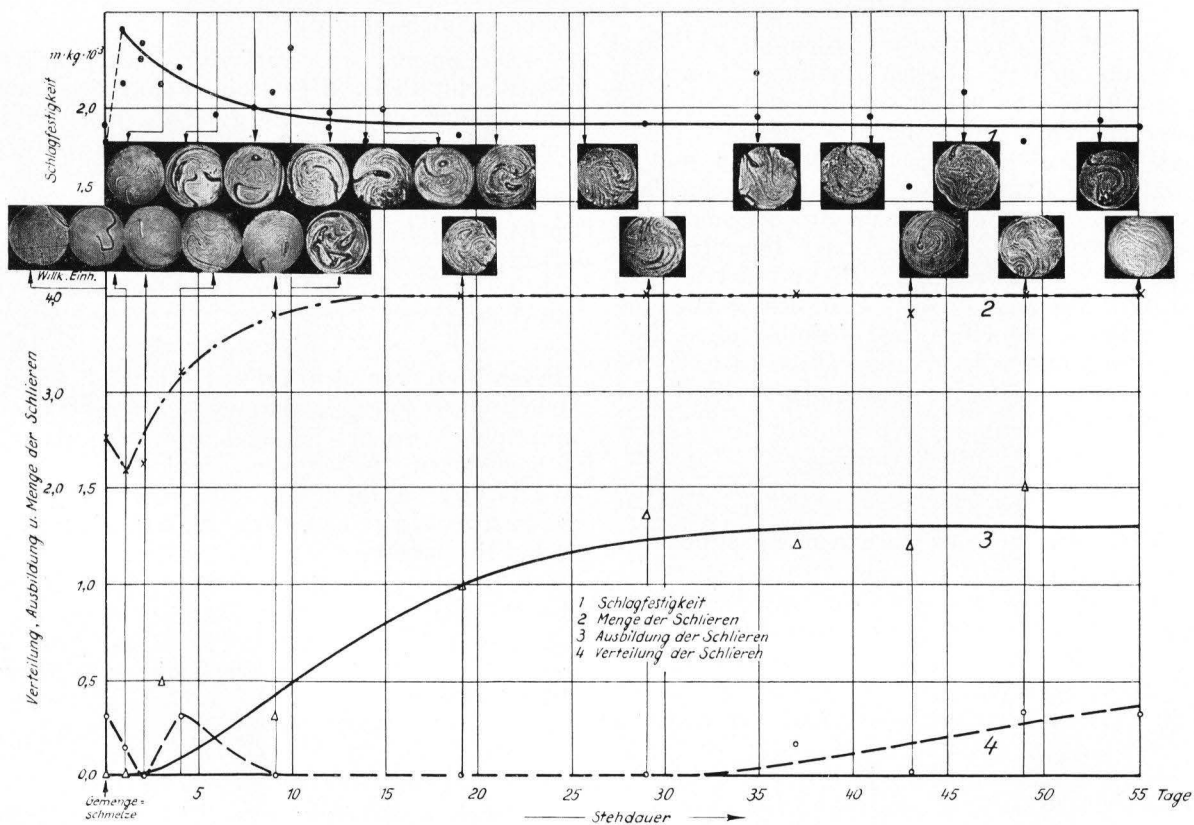


Bild 12. Einfluß des Stehenlassens bei hohen Temperaturen auf die Schlagfestigkeit und die Schlierigkeit eines Bleiglases. (Glas nicht geblasen.)