

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 1935 by DGG in Frankfurt a. M.

13. Jahrg.

März 1935

Heft 3

DK 92 Schott, Otto

## Otto Schott beging in aller Stille sein 60. Doktor-Jubiläum.

Wie wir erst nachträglich erfahren, konnte vor kurzem der Mitbegründer der Jenaer Glaswerke Schott und Genossen, Dr. Otto Schott, sein 60jähriges Doktorjubiläum feiern. Die großen Verdienste, die er sich um die wissenschaftliche Glasschmelzkunst erworben hat, sind von der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft bereits durch die Ernennung zum Ehrenmitglied im Jahre 1925 gewürdigt worden\*), und die Erinnerung an seine Pionierleistungen wird für alle Zeiten wachgehalten werden durch die Stiftung der Otto Schott-Denkünze der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, welche erstmalig 1929 an Gustav Tammann, zum zweiten Male 1932 an Gustav Keppeler verliehen wurde.

Den Wunsch Otto Schotts, im Sinne der in Jena herrschenden Tradition dieses seltene Jubiläum in aller Stille zu begehen, ehrt die DGG, indem sie ihm an Stelle einer Dankadresse die Zusicherung der deutschen Glastechnologen übermittelt, in seinem Geiste am Fortschritt der deutschen Wissenschaft und Technik arbeiten zu wollen.

\*) Näheres, auch über den Lebenslauf und die Arbeiten O. Schotts, siehe in „Glastechnische Berichte“, 4 (1926/27), S. 41—43.

DK 529.213 : 666.11 (045)

## Ueber die Umwandlung vom flüssigen in den glasigen Zustand.

Von H. Ebert, Berlin.

(Vortrag bei der 18. Glastechnischen Tagung, Berlin, 15. XI. 1934.)

Einleitung. — Begriffsfestlegung. — Praktische Bedeutung des Transformationspunktes für die Alterung des Glases. — Sicherung der Brauchbarkeit des Glases als thermometrischen Werkstoffes. — Abhängigkeit der Temperaturpunkte von der Glassorte. — Möglichkeit einer Verschiebung des Transformationspunktes, auch bei der thermischen Ausdehnung. — Umwandlungen höherer Art. — Anwendbarkeit auf den Uebergang viskos-spröde. — Ausblick. — Zusammenfassung. — Schrifttum. — Aussprache.

### Einleitung.

Die Frage nach der Umwandlung vom flüssigen in den glasigen Zustand hat seit jeher Fachleute immer wieder beschäftigt. Es scheint, als wäre gerade in letzter Zeit ein erneuter Anstoß durch mehrere Arbeiten gekommen. Daher sei es gestattet, unter Heranziehen dieser neuen Erkenntnisse die Frage nach dem glasigen Zustand aufzugreifen, zwar nicht, indem über den glasigen Zustand ganz allgemein berichtet wird, sondern indem zwei Punkte zur besonderen Behandlung herausgegriffen werden:

1. die Bedeutung des Transformationspunktes,
2. Umwandlungen höherer Art und ihr mögliches Auftreten beim Uebergang viskos-spröde.

### Begriffsfestlegung.

Ohne langwierige Definitionen sei ein Stück „Glas“ betrachtet und darüber berichtet, welche Versuche mit ihm durchgeführt sind. Es soll insbesondere an diesem Stück die Abhängig-

keit verschiedener physikalischer Eigenschaften von der Temperatur beschrieben werden. Dazu mögen drei Eigenschaften herausgegriffen werden: die Lichtbrechung (1)†), die elektrische Leitfähigkeit (2) und die Wärmeausdehnung (3). Alle diese drei Eigenschaften zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Temperatur, und es erweist sich, daß innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches die diese Temperaturabhängigkeit darstellende Kurve ihre Richtung ändert. Es läßt sich auch, indem man den ersten Teil der Kurve für niedrigere Temperaturen über die Stelle des Abweichens vom linearen oder doch fast linearen Verlauf hinaus verlängert und den Verlauf des zweiten Teiles nach niedrigerer Temperatur extrapoliert (Bild 1), durch den Schnittpunkt dieser beiden Verlängerungslinien ein Temperaturpunkt definieren, den man den Transformationspunkt nennt. Das Intervall, innerhalb dessen der eine Teil

†) Die eingeklammerten Zahlen verweisen auf die Schrifttumsübersicht am Schluß dieser Abhandlung.

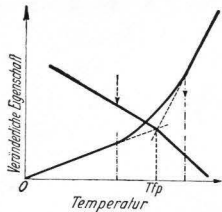


Bild 1.  
Schema für die Festlegung der verschiedenen Temperaturpunkte beim Glas.

der Kurve in den anderen übergeht, nennt man das Transformationsintervall. Es hat sich bisweilen gezeigt, daß bei Untersuchung eines Glases in Bezug auf eine andere physikalische Eigenschaft der Transformationspunkt etwas schärfer in Erscheinung tritt. Andeutungen im veränderten Verlauf der Kurve sind aber auch dann über einen bestimmten Bereich wahrzunehmen. Den Beginn des Transformationsintervalles bei tieferer Temperatur wollen wir „thermometrischen Erweichungspunkt“ nennen. Der Punkt, der nach höheren Temperaturen das Intervall begrenzt, hat einen besonderen Namen, soviel bekannt, nicht erhalten. Wohl aber ist es üblich, wenn bei Ausdehnungsmessungen der steilere Ast plötzlich absinkt, von einem „Umkehrpunkt“ zu sprechen. Das Glas sei oberhalb des Transformationspunktes infolge der geringen Zähigkeit als „viskosflüssig“, unterhalb dagegen als „starr-spröde“ bezeichnet.

In der Folge ist im wesentlichen nur noch eine Eigenschaft des „Glases“ behandelt, und zwar die Wärmeausdehnung. An Hand der bekannten Kurven (Bild 2) ist festgestellt worden, daß bei Innenhalten bestimmter Versuchsbedingungen das Transformationsintervall gut realisierbar herauskommt.

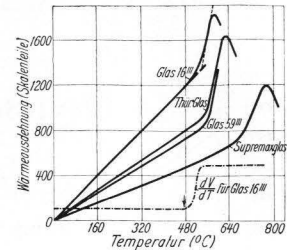
**Praktische Bedeutung des Transformationspunktes für die Alterung.**

Betreffs der Alterung, d. h. derjenigen Behandlung, nach der die Eigenschaften des Glases im starr-spröden Gebiet praktisch unveränderlich sind, wird die Vorschrift gegeben, daß das fertig geblasene Stück etwa 20 bis 30° über dem Beginn des Transformationsintervalls oder auch, wie man sagt, der kritischen Zone drei Stunden lang zu erwärmen, danach in etwa ebenso langer Zeit abzukühlen und am Punkt des Beginns des Transformationsintervalls sechs Stunden anzuhalten ist. Die Art der darauf folgenden Abkühlung soll alsdann von geringem Einfluß sein. Es ist bei dieser Alterungsvorschrift notwendig, hervorzuheben, daß jener Umkehrpunkt (siehe Bild 2), bei dem die Ausdehnungskurve wieder sinkt, nicht erreicht wird. Indes ist dieser Umkehrpunkt, wie wir noch zeigen werden, sehr stark von den Versuchsbedingungen abhängig.

**Sicherung der Brauchbarkeit des Glases als thermometrischen Werkstoffes.**

In der Beachtung dieser Vorschrift liegt die Begründung dafür, daß thermometrische Gläser genügend eindeutig festgelegt sind.

Bild 2.  
Ausdehnungskurven verschiedener Gläser, und Abgeleitete der Ausdehnung für Glas 16 III.



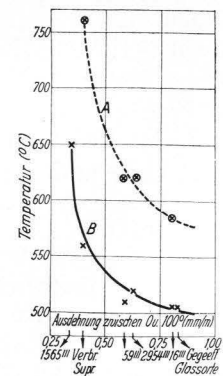
Das Glas ist damit als thermometrischer Werkstoff brauchbar, denn durch diese Vorbehandlung ist für die Zwecke der Thermometerherstellung das Glas hinreichend eindeutig in seinem thermischen Verhalten festgelegt, solange es nicht über den Erweichungspunkt hinaus erwärmt wird. Das aber wird gerade vom Verbraucher des Thermometers verlangt. Bei jedem thermometrisch zugelassenen Glase wird neben der Depression noch der thermometrische Erweichungspunkt oder die noch etwas tiefer liegende Gebrauchstemperatur festgelegt, so daß für eine ausreichende Sicherung der Eindeutigkeit der Thermometergläser gesorgt ist.

**Abhängigkeit der Temperaturpunkte von der Glassorte.**

Neben dieser wichtigen, aber mehr praktischen Frage der Bedeutung der verschiedenen Punkte des Transformationsintervalls ist es erwünscht, einen Zusammenhang zwischen einem dieser Temperaturpunkte und irgendeiner anderen Eigenschaft des Glases zu kennen. Unbeschadet der späteren Ueberlegungen kann ein solcher Zusammenhang gefunden werden. Für diese andere Eigenschaft ist als Charakteristikum eines Glases die Größe der Ausdehnung in mm/m zwischen 0 und 100° gewählt worden. Wird dieser Betrag als Abszisse eingetragen und der thermometrische Erweichungspunkt als Ordinate, so ergibt sich die in Bild 3 gezeigte untere Kurve. Darüber befindet sich die entsprechende Kurve für die Umkehrpunkte. Diese hängen nun besonders stark von der jeweiligen Belastung des Versuchskörpers beim Versuch ab. Auch der thermometrische Erweichungspunkt ist durch entsprechende Belastung verschiebbar. Es ergibt sich die Regel, daß ein thermometrisches Glas mit sehr geringer Ausdehnung einen hohen Transformations-, Erweichungs- und Umkehrpunkt hat.

Bild 3.  
Abhängigkeit der Umkehr- (A) und der Erweichungs- (B)-Punkte von der Glassorte.

Es bedeutet:  
Verbr. = Verbrennungsröhrenglas.  
Supr. = Supremaxglas.



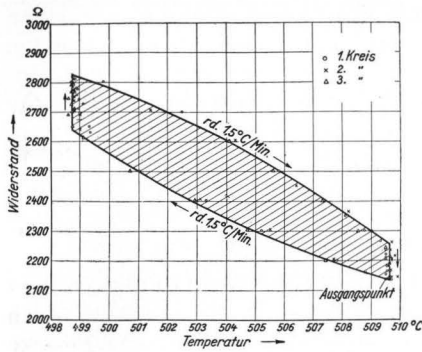


Bild 4.  
Kreisprozeß  
beim elek-  
trischen Wider-  
stand  
(nach Hänlein  
und Thomas).

Die Möglichkeit einer Verschiebung des Transformationspunktes.

Die Frage, welche Bedeutung alle diese Temperaturpunkte für den glasigen Zustand haben, ist vor einiger Zeit durch eine Abhandlung von Hänlein und Thomas (4) wieder in den Vordergrund getreten. In dieser Arbeit wird gezeigt, daß bei genügend langem Warten und bei geeignetem Beobachtungszyklus der Transformationspunkt eines Glases verschiebbar ist; die beiden Autoren kommen zu dem Ergebnis, daß bei rein statischer Behandlung ein solcher Transformationspunkt nicht vorhanden sei. Zur Bekräftigung ihrer Meinung geben sie die in Bild 4 gezeigte Kurve, welche eine Art Kreisprozeß darstellt. Wenn sie vom Ausgangspunkt bei höherer Temperatur verhältnismäßig schnell abkühlen und dann bei einer niedrigeren Temperatur die Einstellung des Gleichgewichtes abwarten, so erkennen sie ein Anwachsen des elektrischen Widerstandes. Wird nun von diesem Haltepunkt in schnellem Tempo wieder zur Ausgangstemperatur erhitzt, so wird zunächst der Ausgangswert des Widerstandes nicht erreicht. Erst nach längerem Warten mündet die Kurve wieder in den Ausgangspunkt. Auf Grund dynamischer Messungen lag ein Transformationspunkt bei 504°.

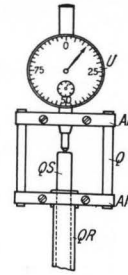
Es war nun die Frage, nachdem auch optische Messungen ein ähnliches Verhalten andeuten, ob bei der Ausdehnung ebenfalls solche geschlossenen Kurven zu beobachten sind. Die Untersuchungsmöglichkeiten sind bei der Wärmeausdehnung ungünstiger, so daß ohne besonderen Aufwand kaum in gleichem Umfange und mit gleicher Sicherheit Beobachtungsmaterial gesammelt werden kann, wie z. B. bei den Untersuchungen des elektrischen Widerstandes.

Dennoch war es möglich, mit einem gegen früher wenig abgeänderten Verfahren auch hier dem Ziele sehr nahe zu kommen. Die bequeme Methode von Henning (5) zur Bestimmung der Ausdehnung läßt sich in der Art der Ablesung noch wesentlich vereinfachen, indem das eine Ende des Rohres ein Traggerüst erhält (Bild 5), dessen einer Querbalken eine Meßuhr trägt. Diese ruht mit ihrem Taster auf dem Planende des inneren Quarzrohres oder -stabes, der seinerseits wiederum auf dem zu untersuchenden Probestück ruht und dessen Bewe-

Bild 5.

Oberer Teil einer Apparatur zur Ausdehnungsmessung.

- U = Meßuhr,
- Al = Aluminium-Legierung,
- Q = Quarz,
- QS = Quarzrohr oder -stab,
- QR = Quarzrohr.



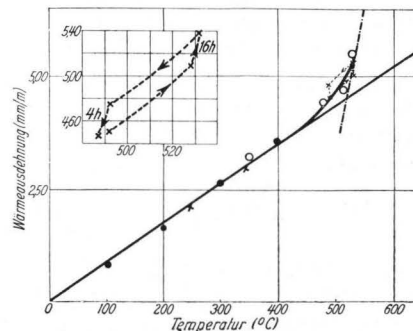
gung mitmacht. Diese Art der Ablesung gestattet ein schnelles Auswerten und erspart gegenüber früher erhebliche Rechenarbeit. Allerdings würde sich in dieser Form der Apparat nicht für Temperaturen unterhalb derjenigen der flüssigen Luft eignen (6). Mit dem neu eingerichteten Ausdehnungsapparat ist die Kurve des Bildes 6 gewonnen worden.

Es gelingt, wie man sieht, auch hier, einen geschlossenen Kurvenzug ohne Hervortreten des Transformationspunktes zu beschreiben. Allerdings sind diese Versuche insofern denen der elektrischen Leitfähigkeit nicht gleichwertig, als es bisher noch nicht gelang, von Seiten der niedrigeren Temperaturen, also unterhalb des Transformationspunktes, die steilere Kurve zu erreichen. Immerhin kann auf Grund dieser Versuche ebenfalls gesagt werden, daß bei hinreichend langer Beobachtungsdauer ein Transformationspunkt nicht aufzutreten scheint. Demnach könnte man sich an Hand der Ausdehnungskurve Bild 6 folgendes Bild machen: Auf dem steileren Ast befindet sich das Glas in einem Gleichgewichtszustand beachtlicher Stabilität. Von Punkt zu Punkt ändert sich in irgend einer Weise das Gefüge. Es bedarf sehr langer Zeit — je tiefer die Temperatur, um so längerer —, ehe das innere Gefüge sich angepaßt hat. Wartet man nicht lange genug — und das tritt bei dem gewöhnlich beobachteten Transformationsintervall besonders eindringlich erstmalig in Erscheinung —, so geht das Glas in seinem Verhalten von dem eigentlichen Gleichgewichtszustand ab.

Damit ergeben sich zwei Fragen:

1. In welchem Zustand befindet sich das Glas auf dem steileren Ast der Ausdehnungskurve?
2. In welchem Zustand befindet es sich, wenn es beim Abkühlen einen Transformationspunkt durchschreitet?

Bild 6.  
Ausdehnungskurve von Glas 16 III.  
Links oben: Vergrößerung des Kreisprozesses der Ausdehnung.



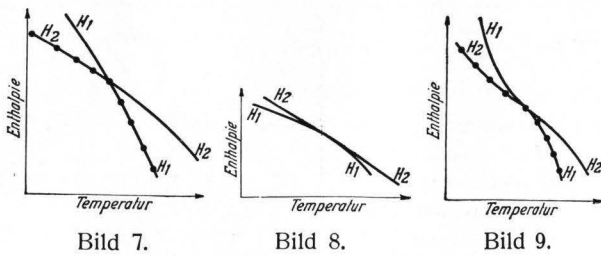


Bild 7.

Bild 8.

Bild 9.

Bild 7. Gleichgewicht erster Art.

Bild 8. „ zweiter Art.

Bild 9. „ dritter Art.

#### Umwandlungen höherer Art.

Es soll hier nicht über Einzelheiten dieser Erscheinung oder über Erklärungen der Vorgänge an sich berichtet werden; es soll auch nicht geprüft werden, ob die Vorstellung von W. Weyl (7) über die Solvatationserklärung oder von Zachariasen über die Atomanordnung in Gläsern richtig sind; es soll vielmehr ganz allgemein die Frage gestellt werden: Liegt im Falle des Auftretens eines Transformationsintervalles eine Umwandlung, also Uebergang von einem Gleichgewichtszustand in einen anderen, vor oder nicht? So allgemein gestellt, läßt sich diese Frage mittels thermodynamischer Ueberlegungen behandeln; denn die Thermodynamik verlangt keine besonderen Annahmen über Einzelheiten des inneren Aufbaus der Körper. Ich möchte aber gleich betonen, daß es z. Zt. noch unmöglich ist, eindeutig die Frage zu beantworten.

Wann nun ist der Fall einer Umwandlung gegeben? Zur Beantwortung dieser Frage wird die thermodynamische Bedingung für das Gleichgewicht eines Systems gebraucht. Bekanntlich sind diese Gleichgewichtsbedingungen durch bestimmte Funktionen ausdrückbar, die man thermodynamische Potentiale oder charakteristische Funktionen nennt (9). Ist eine dieser Größen als Funktion der zur Feststellung des Zustandes gewählten unabhängigen Veränderlichen gegeben, so sind sämtliche thermischen und mechanischen Koeffizienten des Körpers (wie Entropie, Ausdehnungs-, Elastizitätskoeffizient) bekannt. Sind diese unabhängigen Variablen der Druck  $p$  und die Temperatur  $T$ , so heißt die charakteristische Funktion die freie Enthalpie ( $H$ ). Das durch diese Bedingung festgelegte Gleichgewicht kann aber ähnlich, wie in der Mechanik, stabil, labil (instabil) oder indifferent (neutral) sein. In der Thermodynamik errechnet man, daß von zwei Zuständen derjenige stabiler ist, dessen freie Enthalpie kleiner ist als die des andern. Von den Flächen der freien Enthalpie im  $p$ - $T$ - $H$ -Raum wird in der Folge ein Schnitt der Ebene  $p = \text{konstant}$  betrachtet.

Werden nun in einem  $T$ - $H$ -Diagramm — ich hebe nur das Wesentlichste hervor, ohne alle thermodynamischen Einzelheiten anzuführen — die freien Enthalpiekurven für zwei Zustände 1 und 2 aufgetragen, so ist die einfachste Mög-

lichkeit die, daß sich beide Kurven schneiden (Bild 7). Dann ist gemäß den eben gemachten Ausführungen, links vom Schnittpunkt der Zustand 2, rechts davon der Zustand 1 stabil; im Schnittpunkt findet eine Umwandlung zwischen 2 und 1 statt. Mathematisch läßt sich ableiten, daß bei dieser Umwandlung z. B. das Volumen — man sagt auch kurz „die Eigenschaft“ — einen Sprung macht.

Wenn beide  $H$ -Kurven sich berühren, so daß (siehe Bild 8) die Kurve z. B. für den Zustand 1 immer unterhalb der andern liegt, so würde mathematisch bei dieser Umwandlung nicht mehr das Volumen  $V$ , sondern die erste Ableitung des Volumens nach der Temperatur einen Sprung machen (10); der Uebergang von  $V_1$  nach  $V_2$  aber wäre ohne Sprung. Im Umwandlungspunkt selbst ist  $V_1 = V_2$ . Diese Art der Umwandlung, die man zweiter Art genannt hat, ist aber nach dem oben Gesagten in der hier gezeigten Form nicht möglich, da ja vorher sowohl wie nachher der Zustand 1 der stabilere ist, also gar keine Umwandlung stattfindet. Mit den thermodynamischen Forderungen ist eine Umwandlung zweiter Art nur dann verträglich, wenn auf einer Seite der Berührung die beiden  $H$ -Kurven zusammenfallen (sogenannte Gabelung). Hierin liegt z. Zt. eine Schwierigkeit, Umwandlungen 2. Art gänzlich auszuschalten. Weiter interessiert hier der Fall (Umwandlung dritter Art), daß sich die beiden Kurven  $H_1$  und  $H_2$  berühren und zugleich durchsetzen, wenn etwa beide an derselben Stelle einen Wendepunkt haben. Alsdann ist thermodynamisch eine Umwandlung möglich, weil vorher (s. Bild 9) die Phase 2, nachher die Phase 1 den kleineren Wert der freien Enthalpie hat, also die stabilere ist. Am Durchdringungspunkt findet eine Umwandlung dritter Art statt. Bei diesem haben sowohl das Volumen (also die „Eigenschaft“), als auch die ersten Abgeleiteten nach Temperatur und Druck keinen Sprung; erst die zweiten Abgeleiteten würden einen Sprung erleiden.

Man kann so Umwandlungen noch höherer Art festlegen, wobei für diejenigen gerader Art stets der obige Einwand gilt. Nebenbei sei bemerkt, daß bei diesen Anschauungen über Umwandlungen höherer Art die Festlegung des Begriffes einer Phase abgewandelt werden müßte, denn im allgemeinen wird zur Unterscheidung zweier Phasen gerade die sprunghafte Aenderung einer Eigenschaft (also z. B. des Volumens) geltend gemacht. Man müßte die Begriffsfestlegung einer Phase erweitern, indem man auch sprunghafte Aenderungen erst bei höheren Abgeleiteten zuläßt. Indes kann hier in diesem Zusammenhang diese Frage nicht weiter behandelt werden.

Es ist aber immerhin reizvoll, zu wissen, ob solche Umwandlungen höherer Art experimentell nachgewiesen werden können. Viele Versuche bei sehr tiefen Temperaturen deuten auf solche Umwandlungen hin.

Insbesondere hat Justi Erwärmungs- und Abkühlungskurven von Sauerstoff bei 44° C beobachtet, die sich zwangsläufig nur durch Umwandlung dritter Art deuten lassen.

#### Anwendbarkeit auf den Uebergang viskos-spröde.

Es scheint weiterhin reizvoll, wie diese Ueberlegungen bei den beim Glas beobachteten Verhältnisse dann Anwendung finden könnten, wenn ein Transformationspunkt beobachtet ist. Es sei noch einmal die Ausdehnungskurve des Glases 16<sup>III</sup> (Bild 2) betrachtet. Ein Sprung in der Volumenkurve ist nicht beobachtet. Wenn man diese Kurve graphisch differenziert, so erhält man die unten strichpunktierte Kurve. Auch hier ist ein Sprung nicht vorhanden. Gemäß den oben gemachten Ausführungen über Umwandlungen dritter Art müßte auch die spezifische Wärme ohne Sprung verlaufen. Hier diene als Beispiel die Kurve für Glycerin, wie sie Gibson und Mitarbeiter (11) fanden (Bild 10), die nach den vorliegenden Beobachtungen völlig regelmäßig zu sein scheint.

Wenn also hiernach eine frappante Ähnlichkeit mit Umwandlungskurven höherer Art vorliegt, so muß doch vor übereilten Schlüssen gewarnt werden; denn es ist bekannt, daß nur einheitliche Stoffe bei Umwandlungen, die jetzt erster Art genannt werden, einen Sprung in der Kurve des Volumens haben. Bei irgendwelchen Verunreinigungen treten Verwaschungen auf, die die Gestalt der Kurven so verändern, daß sie den Umwandlungskurven höherer Art sehr ähnlich werden (12). Die Ueberlegungen von Justi und von Laue gelten ebenfalls nur für einheitliche Stoffe, auch die Justischen Beobachtungsergebnisse sind am einheitlichen Stoff gewonnen; mithin könnten zunächst die obigen Ueberlegungen nur für Glycerin und ähnliche einheitliche Stoffe im glasigen Zustand Anwendung finden.

Aus all diesen Unsicherheiten heraus kann, wie im Laufe dieser Ausführungen mehrfach hervorgehoben, z. Zt. keine eindeutige Entschei-

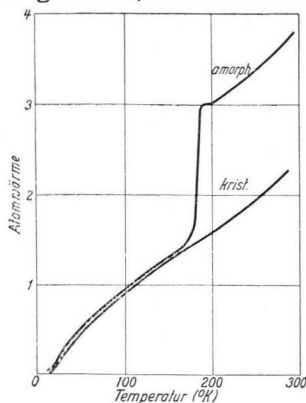


Bild 10.  
Atomwärme des  
kristallisierten und des  
amorphen Glycerins  
(nach Gibson, Parks  
und Latimer).

dung gefällt werden. Es scheint aber, als ob man den Transformationspunkt nicht als einen thermodynamischen Umwandlungspunkt ansehen sollte. Es hat den Anschein, daß sich, entsprechend der vielfach angenommenen Auffassung, das Glas auf dem steileren Ast der Ausdehnungskurve (bei höheren Temperaturen) tatsächlich in einem unterkühlten Zustand befindet. Läßt man dem Stoff nicht genügend Zeit, so kann er wegen der großen Zähigkeit nicht das dem unterkühlten Zustand entsprechende Gleichgewicht erreichen. Es tritt dann ein Transformationsgebiet auf, innerhalb dessen sich die Atome nur noch unwesentlich umstellen. Dann wird gerade das Gefüge im wesentlichen festgehalten, das bei der Temperatur herrschte, von der aus eine zu rasche Abkühlung einsetzte. Das Glas befände sich auf dem flacheren Kurventeil im Zustand einer eingefrorenen Phase.

#### Ausblick.

Eine Aussicht auf weitere Klärung der Frage nach dem glasigen Zustand und auf Beseitigung noch vorhandener Lücken würden zwei Wege geben:

1. eine Untersuchung, ob Gefügeänderungen bestimmter Form mit dem Auftreten von Umwandlungen höherer Art verknüpft sind. Denn die Erkenntnis über das innere Gefüge der durch Umwandlung höherer Art entstandenen Phase ist noch nicht genügend weit gefördert. Erst wenn hier hinreichend gesicherte Befunde vorliegen, könnte man vielleicht auf Grund des Aufbaus des Gefüges im starr-spröden Glas die Frage nach einer wahren Umwandlung beim Auftreten eines Transformationspunktes beantworten;

2. eine nähere Untersuchung, ob bei richtiger Vorbehandlung auch bei der Ausdehnung die Kurve der Unterkühlung über den Transformationspunkt fortgesetzt werden kann, und ob ein Glas je nach dem verschieden gewählten Transformationspunkt verschiedene Ausdehnung zeigt.

Sind diese beiden Fragen beantwortet, so wäre die Frage des glasigen Zustandes wieder einen Schritt der restlosen Klärung näher gebracht.

#### Zusammenfassung.

Der Transformationspunkt hat für die Praxis des Glases eine große Bedeutung. Bei Behandlung der Frage, ob bei seinem Auftreten eine Umwandlung höherer Art vorliegt, kann keine eindeutige Entscheidung gefällt werden. Die bisher vorliegenden Ergebnisse legen die Vermutung nahe, daß es sich beim Glas nach Durchschreiten eines Transformationsintervalles um eine eingefrorene Phase handelt.

#### Schrifttum.

- (1) E. Berger, Glastechn. Ber., 5 (1927/28), S. 393 bis 405; 8 (1930), S. 339—367; Kolloidchem. Beihfte, 36 (1932), S. 1—42. (Ref. Glastechn. Ber., 10 (1932), S. 560.)  
A. J. Jararoff, Trans. opt. Inst., Leningrad, 4 (1928), S. 39.

- A. H. Lebedeff, Rev. d'Optique, 5 (1926), S. 1—30. (Ref. Glastechn. Ber., 5 (1926/27), S. 175.)  
(2) H. Schönborn, Z. f. Physik, 22 (1924), S. 305 bis 316. (Ref. Glastechn. Ber., 3 (1925/26), S. 96.)

- N. Seljakow, L. Strutinsky und A. Krasnikow, ebenda, **33** (1925), S. 53—62. (Ref. Glastechn. Ber., **4** (1926/27), S. 225.)
- (3) E. Berger, M. Thomas und W. E. S. Turner, Glastechn. Ber., **12** (1934), S. 172—175, und J. Soc. Glass Technol., **18** (1934), Trans. S. 79.  
C. G. Peters und C. H. Cragoe, Scient. Pap. Bur. Stand., Nr. 393 (1920), S. 449—487. (Ref. Glastechn. Ber., **1** (1923/24), S. 111.)  
P. Lafon, Compt. rend. Acad. Sci., **175** (1922), S. 955—958. (Ref. Glastechn. Ber., **1** (1923/24), S. 144.)  
M. So, Tokyo Proc. Math. Phys. Soc., **9** (1917/18), S. 425.  
L. Holborn und J. Otto, Z. f. Instrumentenkde., **46** (1926), S. 415—424. (Ref. Glastechn. Ber., **5** (1927/28), S. 223.)  
O. Koerner, H. Salmang und W. Lerch, Sprechsaal Keramik usw., **65** (1932), S. 925.  
E. Seddon, W. E. S. Turner und F. Winks, J. Soc. Glass Technol., **18** (1934), Trans. S. 5—12. (Ref. Glastechn. Ber., **12** (1934), S. 349.)
- (4) W. Hänlein und M. Thomas, Glastechn. Ber., **12** (1934), S. 109—116.
- (5) F. Henning, Ann. d. Phys., (4), **22** (1907), S. 631.
- (6) H. Ebert, Z. f. Physik, **47** (1928), S. 712. (Ref. demnächst in den „Glastechn. Ber.“.)
- (7) W. Weyl, Glastechn. Ber., **10** (1932), S. 541—556.
- (8) W. H. Zachariasen, J. Amer. chem. Soc., **54** (1932), S. 3841—3851, und Glastechn. Ber., **11** (1933), S. 120—123.
- (9) G. H. Bryan, Enz. d. math. Wiss., **5,1** (1903/21), S. 71.
- (10) P. Ehrenfest, Comb. Leiden, Suppl. 75b, 1933. (Ref. demnächst in den „Glastechn. Berichten“.)  
E. Justi und M. v. Laue, Berl. Ber., Phys.-math. Klasse, 1934, XVII. (Ref. demnächst in den „Glastechn. Ber.“.)
- (11) G. E. Gibson, G. S. Parks und W. M. Lattimer, J. Amer. chem. Soc., **42** (1920), S. 1542. (Ref. demnächst in den „Glastechn. Ber.“.)
- (12) Siehe A. Eucken, Handb. der Experimentalphysik, Wien-Harms, **8,1** (1929), S. 252, und Müller-Pouillet, 11. Aufl. (1926), Band **3,1**, S. 17, 451 und 700.

#### Aussprache.

Herr Berger (Jena): Die vom Herrn Vortragenden gezeigten Volumen-Temperatur-Kurven lassen durchweg einen sehr großen Umformungs- (Transformations-) -bereich<sup>1)</sup> erkennen. Die Größe dieses Bereiches hängt erfahrungsgemäß stark von dem Prüfverfahren ab. Es sind im Schrifttum Kurven mit sehr kleinem Bereich bekannt geworden<sup>2)</sup>, so daß bei ihnen geradezu von einem Umformungspunkt gesprochen werden darf. Es wäre daher eine aus-

föhrliche Beschreibung der vom Herrn Vortragenden gewählten Versuchsbedingungen erwünscht. Erst dann ließe sich erkennen, ob neue Ergebnisse zur Frage der Umwandlung vom flüssigen in den glasigen Zustand vorliegen.

(8985)

<sup>1)</sup> Vgl. dazu E. Berger, Z. techn. Phys., **15** (1934), S. 443, 447.

<sup>2)</sup> Vgl. z. B. Bild 1 bei E. Berger, M. Thomas und W. E. S. Turner, Glastechn. Ber., **12** (1934), S. 172—175.

DK 531.756 : 532.13 : 541.118 : 620.193.4 : 666.11 : 66.046.58(045)

## Ueber Beziehungen zwischen Dichte, Flüssigkeitsgrad und Schamottsteinangriff von Gläsern und Schlacken bei hohen Temperaturen.

Von K. Endell und C. Wens.

(Mitteilung aus dem Laboratorium für bauwissenschaftliche Technologie an der Technischen Hochschule Berlin.)

(Vortrag bei der 18. Glastechnischen Tagung, Berlin, 15. XI. 1934.)

1. Begriffsbestimmungen und Aufgabe. — 2. Dichtebestimmungen. (Verfahren, Fehlerquellen, Ergebnisse.) — 3. Schamottsteinangriff und Flüssigkeitsgrad. — 4. Relativmessungen von Zähigkeiten im Rinnenviskosimeter und mit dem Ablesefernrohr. — 5. Zusammenfassung. — Schrifttum.

### 1. Begriffsbestimmungen und Aufgabe.

Bei der Herstellung des Glases haben wir in der Wanne oder bei den Formgebungsmaschinen stets schleichende (laminare) Strömung, worauf auf Grund des bekannten physikalischen Schrifttums bereits W. Eitel (1) bei Betrachtung der Formgebung des Flaschenglases mittels der Owens-Maschine seinerzeit hinwies. Hierfür gilt das Reynold'sche Ähnlichkeitsgesetz bzw. die Reynold'sche Zahl  $R$ , kurz Kennzahl für Strömungsvorgänge genannt:

$$\frac{s \cdot w \cdot l}{\eta} = \frac{w \cdot l}{\nu} = R$$

Darin bedeuten:

$l$  ein charakteristisches Breitenmaß der Anordnung,

$w$  eine Geschwindigkeit,

$s$  die Dichte,

$\eta$  die dynamische Zähigkeit,

$\nu$  die kinematische Zähigkeit.

$R$  ist seiner Bedeutung nach das Verhältnis zweier Kräfte. Ein kleines  $R$  bedeutet ein Ueberwiegen der Zähigkeit, und eine große Reynold'sche Zahl ein Ueberwiegen der Trägheitskräfte. Bei schleichender Strömung ist  $R$  kleiner als 1300.

Dynamische Zähigkeit  $\eta$  ist innere Reibung; ihre Dimension ist  $[\text{cm}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{sec}^{-1}]$ .

Den reziproken Wert der Zähigkeitskonstante  $\frac{1}{\eta}$  bezeichnet man als Fluidität oder Flüssigkeitsgrad mit dem Buchstaben  $\varphi$ .