

DK 539.213.1:546.212-128:666.192

Der strukturmodifizierende Einfluß des Hydroxylgehaltes in Kieselgläsern

Von ROLF BRÜCKNER, Würzburg

(Mitteilung aus dem Max-Planck-Institut für Silikatforschung, Würzburg)

(Eingegangen am 4. November 1969)

Die Anomalie des negativen Volumen-Temperaturverhaltens von hydroxylarmen, „natürlichen“ Kieselgläsern (Typ I/II) im Temperaturbereich 1000 bis 1500 °C mit dem Hochtemperaturminimum bei 1550 °C tritt bei hydroxylreichen, „synthetischen“ Kieselgläsern (Typ III) nicht auf. Die Volumen-Temperaturkurve zeigt einen Verlauf, der zwischen dem des Typs I/II und den binären Alkali- und Mehrkomponenten-Silicatgläsern liegt. Das Tieftemperaturminimum, je nach thermischer Vorgeschichte bei -60 bis -120 °C, bleibt dagegen erhalten und wird durch den Hydroxylgehalt zu tieferen Temperaturen verschoben. Die Ergebnisse werden mit dem Konzept der Vorordnungsbereiche, der strukturellen Spannungen und der Entkoppelungswirkung der Hydroxylgruppen in Verbindung mit der Vorstellung von SMYTH über die bevorzugten transversalen Schwingungen im SiO₂-Verband gedeutet.

Festkörpereigenschaften können durch den Einbau geringer Fremdstoffe selektiv beeinflusst werden. Das gilt im allgemeinen in um so stärkerem Maße, je reiner die Grundsubstanz ist und je größer die Unterschiede im physikalisch-chemischen Verhalten der beiden Substanzen sind. Im Fall der Gläser geben die Kieselgläser ein typisches Beispiel hierfür. Diese chemisch so einfache Substanz (SiO₂-Glas) zeigt im physikalischen Verhalten eine Fülle von Anomalien [1, 2], von denen die meisten nicht einmal bei den Silicatgläsern wiederzufinden sind. Daher ist bei der Frage nach der Ursache u. a. die Kenntnis über die Ursache des Verschwindens der Anomalien von besonderem Interesse. Im folgenden werden das anomale Verhalten des Volumens und die durch den Hydroxylgehalt verursachten Veränderungen näher untersucht.

1. Experimenteller Befund

In einer früheren Arbeit wurde gezeigt, daß die Dichte abgeschreckter Kieselgläser ein Maximum in Abhängigkeit von der Abschrecktemperatur (fiktive Temperatur) besitzt, wobei ein deutlicher Unterschied zwischen zwei Kieselglasgruppen auftritt (Bild 1) [3]. Die eine Gruppe (Typ I und II) besteht aus Kieselgläsern, die aus Bergkristall entweder elektrisch in Graphittiegeln(I) oder nach dem Verneuil-Verfahren (II) erschmolzen werden („natürliche“ Kieselgläser). Diese Gruppe enthält je nach Typ etwa < 5 ppm (I: Infrasil) bzw. 150 bis 300 ppm (II: Hera-, Homo- und Ultrasil) Hydroxylgruppen und etwa 100 ppm Metalloxidverunreinigungen. Die andere Gruppe (III), die „synthetischen“ Kieselgläser, werden durch Hydrolyse von SiCl₄ hergestellt und besitzen einen Hydroxylgehalt von etwa 1200 ppm und einen Anteil Chlor von etwa 100 ppm. Sie sind weitgehend frei von Metalloxidverunreinigungen (weniger als 5 ppm). In einer weiteren Studie [4] konnte unter Berücksichtigung der thermischen Vorbehandlung gezeigt werden, daß vorwiegend der Hydroxylgehalt die relativen Volumenunterschiede bestimmt.

Rechnet man die bei Raumtemperatur erhaltenen Dichtewerte mit Hilfe der thermischen Ausdehnung auf die Volumenwerte bei Gleichgewichtstemperaturen um, so erhält man für die beiden Gruppen die in Bild 2 dargestellten Zusammenhänge. Während für die Gruppe der hydroxylarmen Kieselgläser das bereits aus [5] bekannte Minimum resultiert (Bild 2a), zeigen die hydroxylreichen Kieselgläser kein Minimum (Bild 2b); der anomale Volumenast der metastabilen Gleichgewichtskurve zwischen 1000 und 1550 °C ist in einen solchen mit etwas „normalerem“ Verlauf übergegangen, und es ist kein negativer Temperaturkoeffizient des Volumens in diesem Temperaturbereich mehr zu erkennen. Jedoch ist der positive Volumentemperaturkoeffizient so klein im Vergleich zu dem des Glases, daß bei Raumtemperatur noch ein „anomales“ Volumenverhalten resultiert (Bild 1).

Der Unterschied in den metastabilen Gleichgewichtskurven der beiden Kieselglasgruppen ist formal leicht zu verstehen, wenn man die Wirkung des hohen OH-Gehaltes der einen Gruppe (III) in ähnlicher Weise auffaßt wie die Wirkung von Alkalioxid. Es liegt hier offenbar gerade der Übergang vom Verhalten der „reinen“ Kieselgläser zu den binären Silicatgläsern vor, denn betrachtet man den OH-Gehalt als Verunreinigung, dann sind die Kieselgläser vom Typ III stärker „verunreinigt“ als die vom Typ I/II. Daher kann das Verhalten der

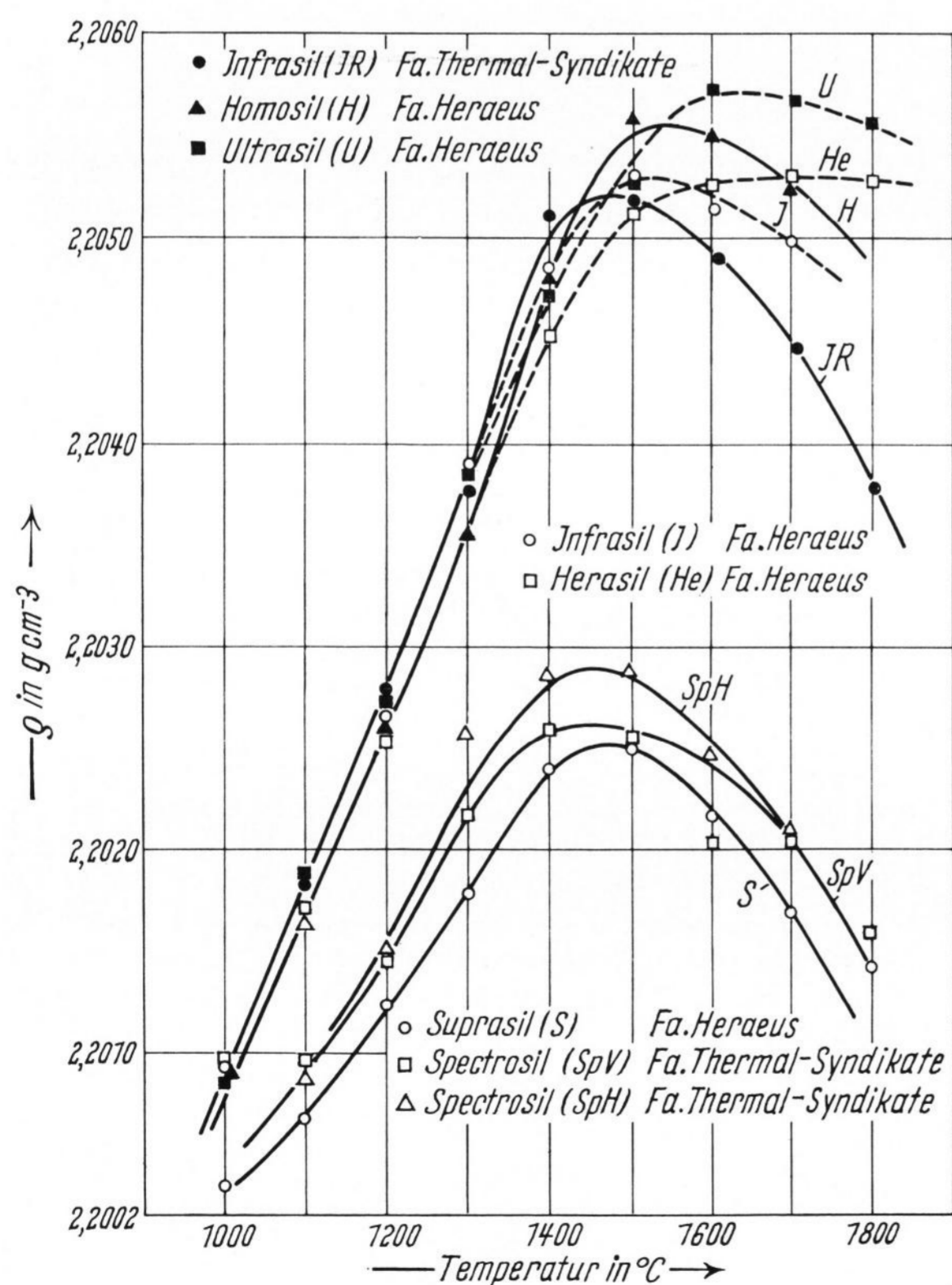
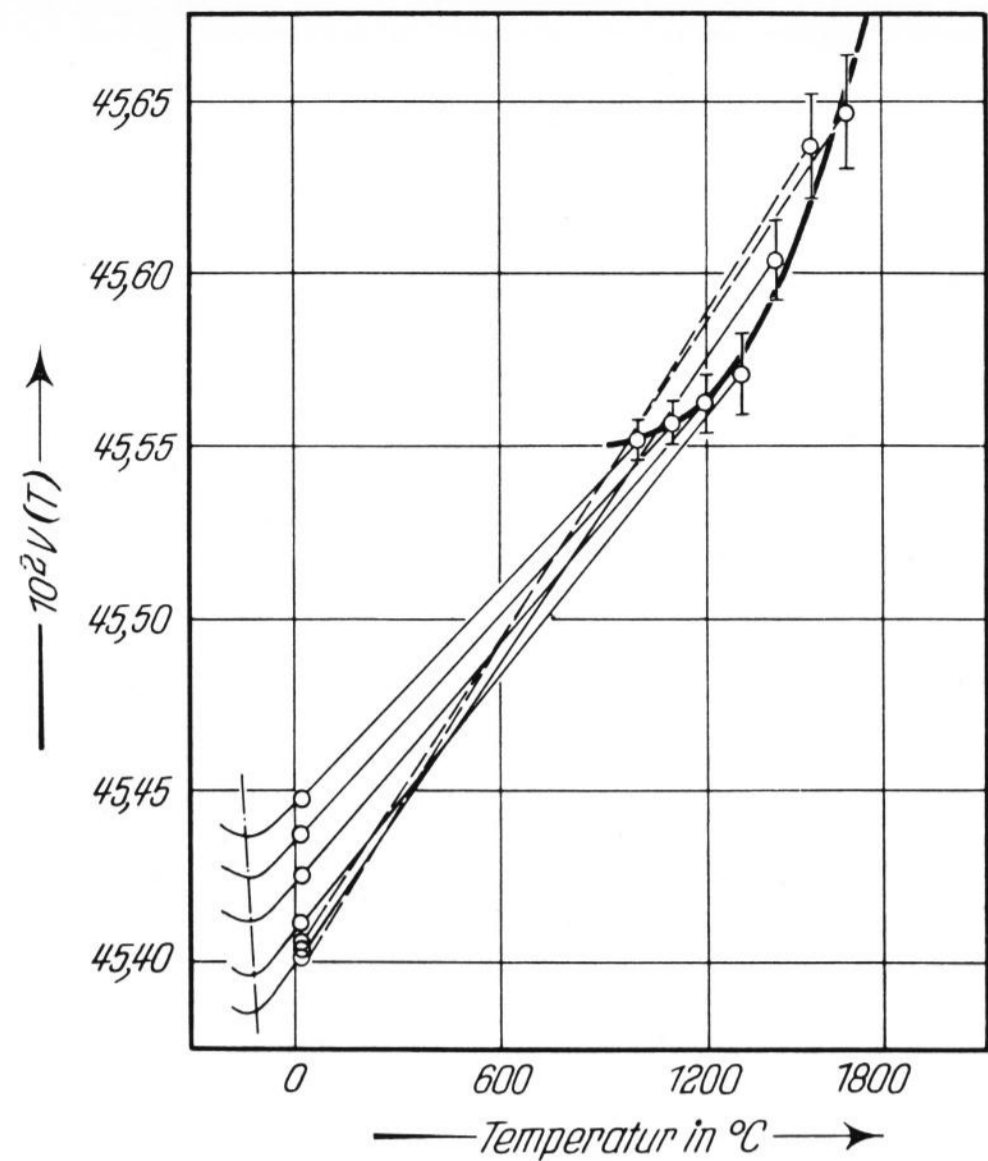
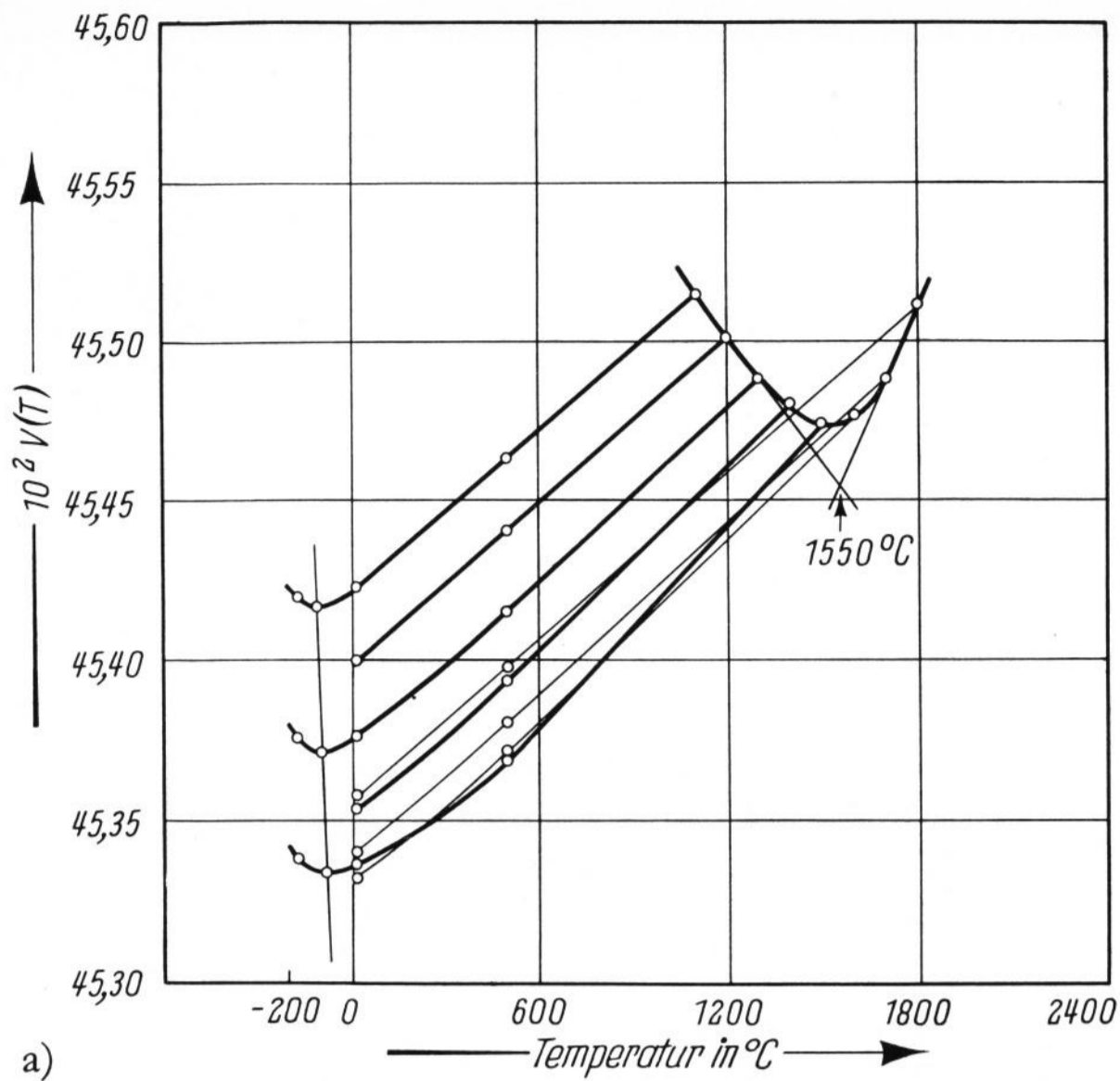


Bild 1. Unterschied in der Dichte zweier Kieselglasgruppen als Funktion von der thermischen Vorgeschichte (fiktive Temperatur).

1. Gruppe: Typ I (Kieselgläser I, IR) und Typ II: (Kieselgläser H, U, He),
2. Gruppe: Typ III (Kieselgläser S, SpV, SpH).



a) Bilder 2a und b. Spezifisches Volumen von Kieselgläsern, insbesondere die metastabilen Gleichgewichtskurven von Kieselglasschmelzen,
a) Kieselgläser vom Typ I/II (geringer OH-Gehalt), b) Kieselgläser vom Typ III (hoher OH-Gehalt).

hydroxylreichen synthetischen Kieselgläser in Bild 2b als erster Schritt von den „klassischen“ Kieselgläsern I und II in Richtung auf die gewöhnlichen Mehrkomponenten-Silicatgläser angesehen werden (Bild 4). Mit dieser qualitativen Parallele im Einklang ist auch der durch den Hydroxylgehalt bedingte höhere thermische Ausdehnungskoeffizient [5] und die Erniedrigung der Einfriertemperatur, wie mit Hilfe der mechanischen Schwingungsdämpfung gezeigt werden konnte [3].

Das Volumen-Temperaturverhalten im metastabilen Bereich der Kieselglasschmelze ist in Bild 3 durch Mes-

sungen im stabilen Bereich (oberhalb des Cristobalitschmelzpunktes) [6] ergänzt. Hieraus ist zu sehen, daß der Hochtemperaturast von Bild 2a oberhalb 1700 °C in einen steileren Anstieg übergehen sollte, als er mit der Abschreckmethode gemessen wurde. Der Grund hierfür ist, daß für Temperaturen oberhalb 1700 °C die Volumenrelaxationszeiten kleiner als die Abschreckzeiten der (sehr dünnen) Proben werden [5].

2. Deutung

Das unterschiedliche Volumenverhalten der beiden Kieselglasgruppen kann in der folgenden Weise gedeutet

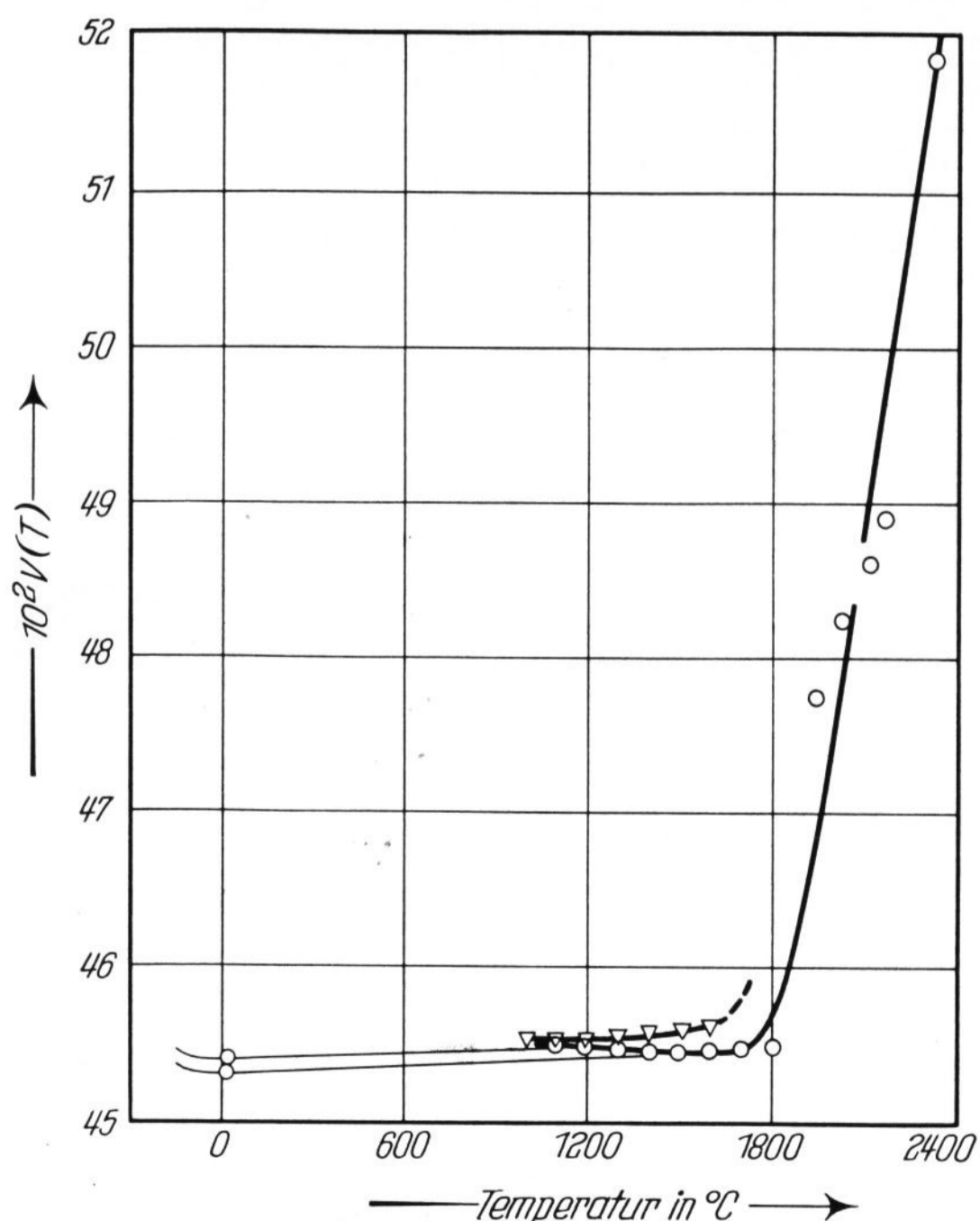


Bild 3. Übersicht über den gesamten Volumen-Temperaturbereich von Kieselgläsern [3, 5, 6].

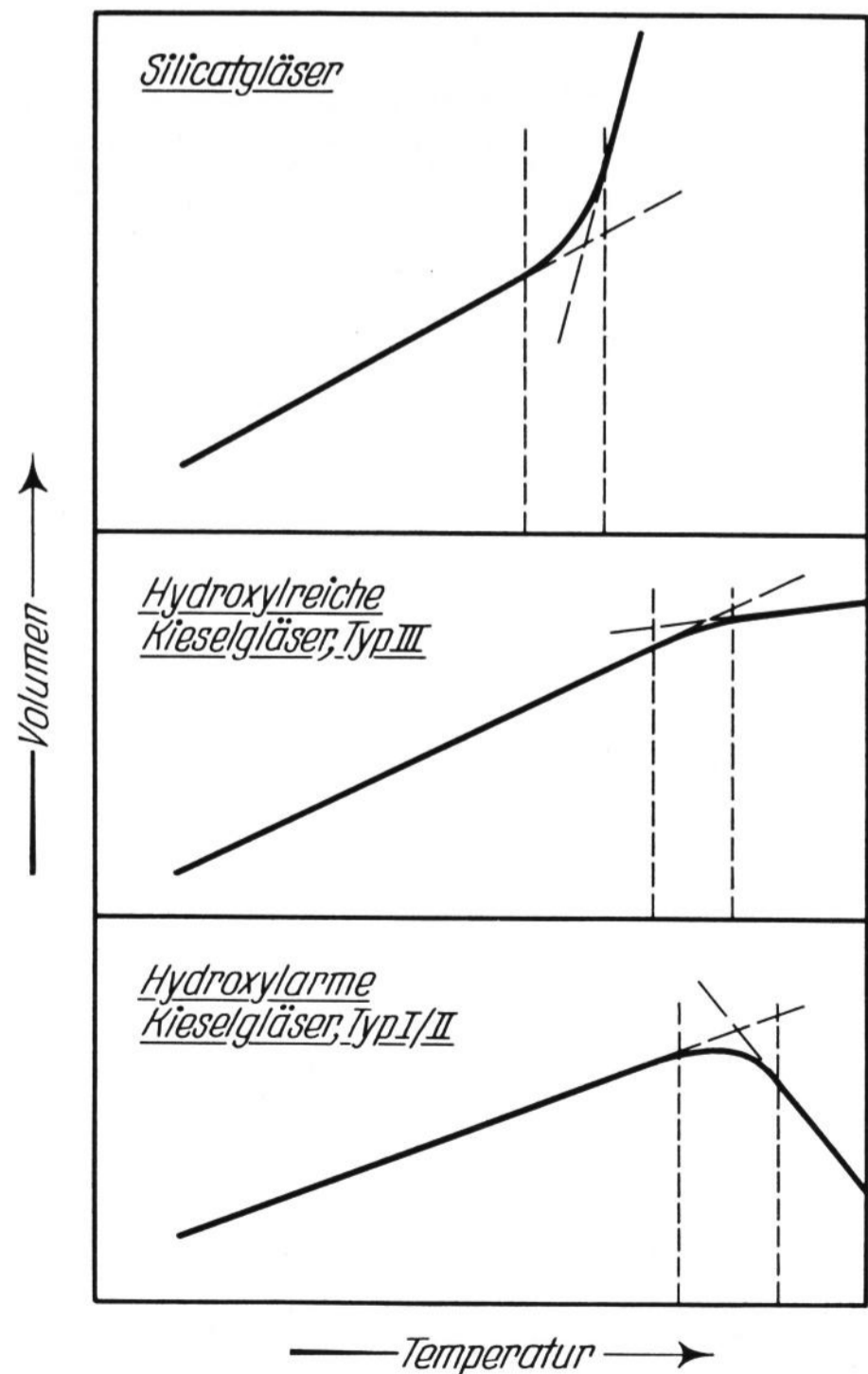
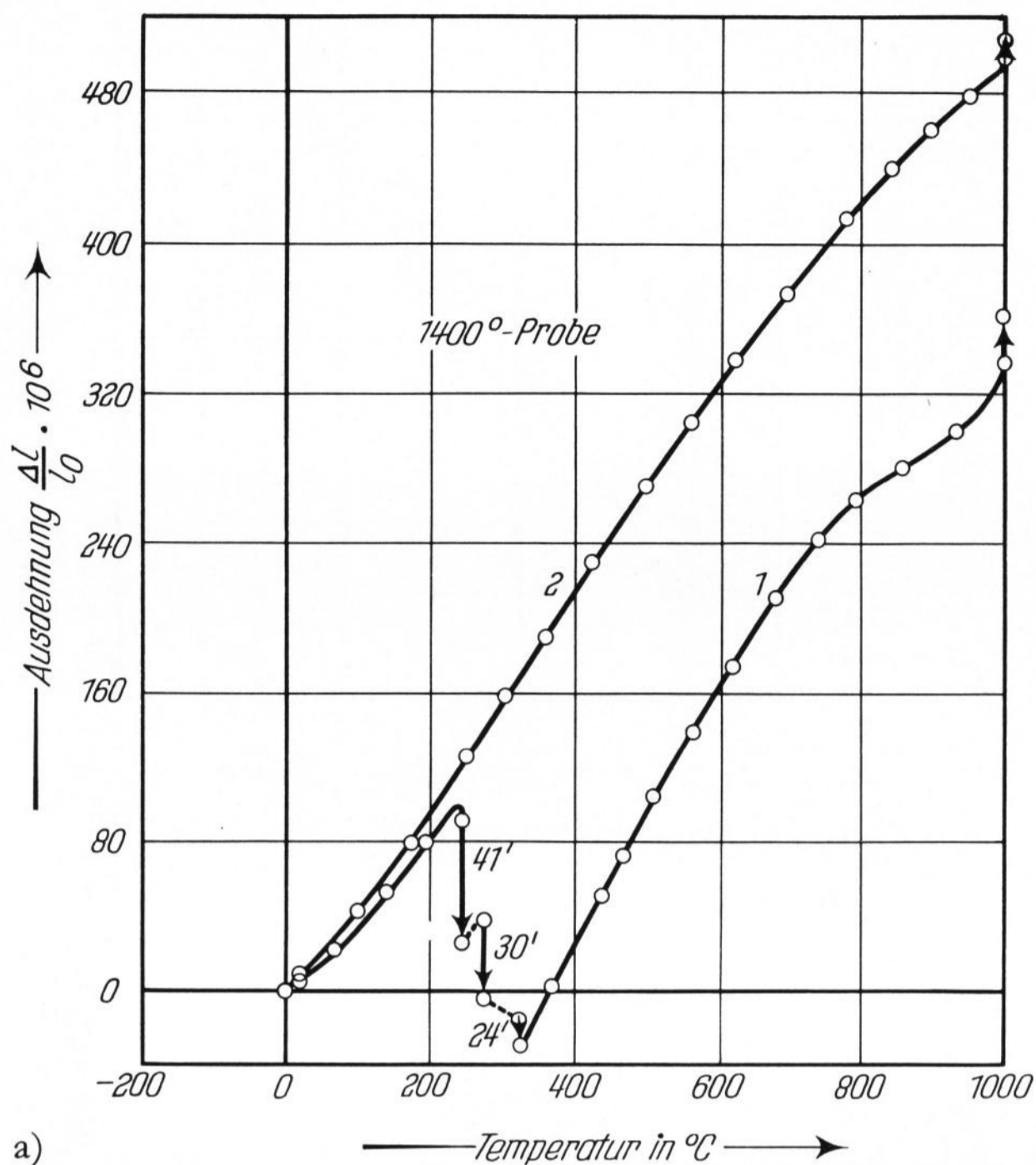
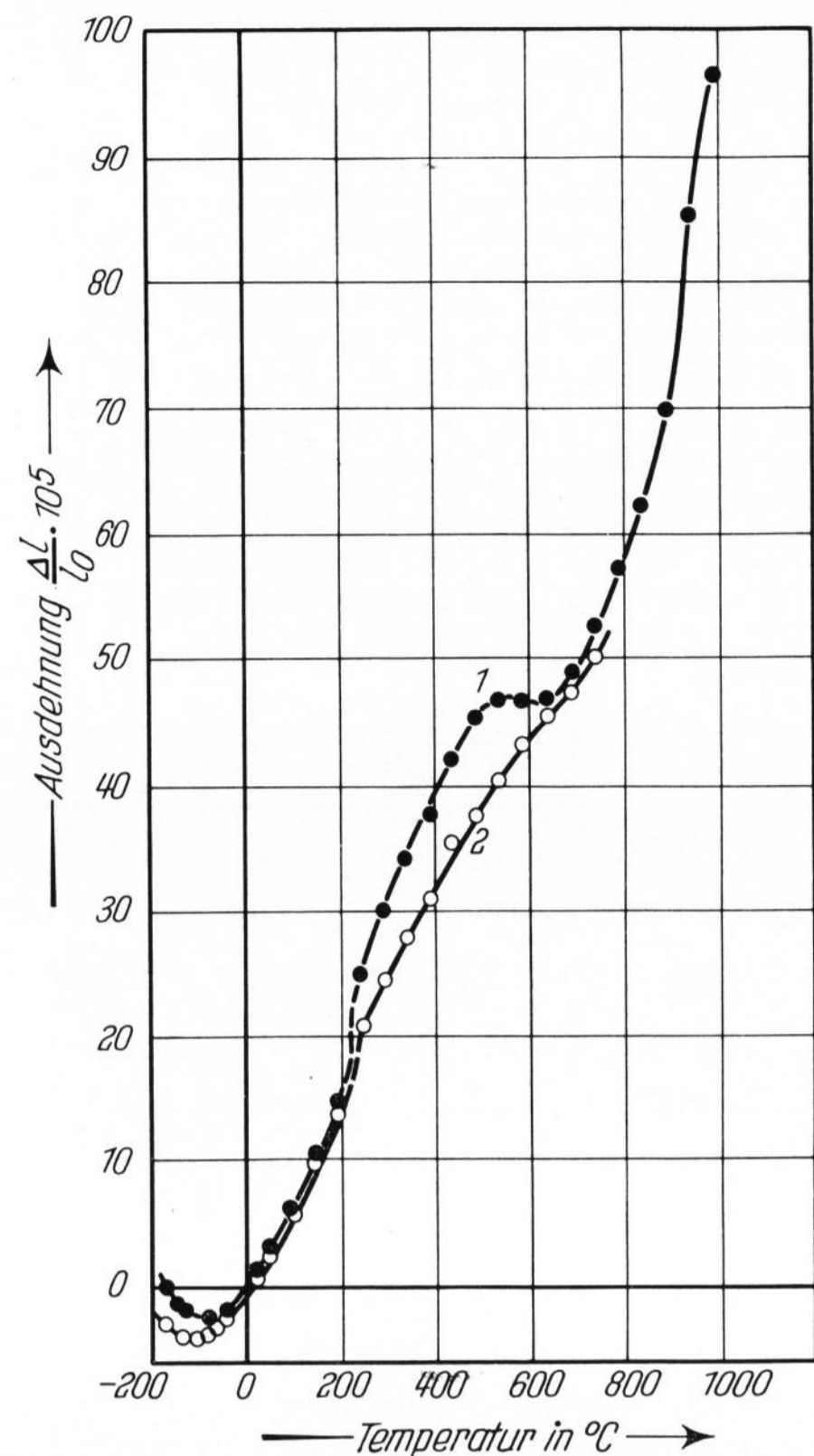


Bild 4. Volumen-Temperatur- und Einfrierverhalten von Gläsern. Übergang von hydroxylarmen Kieselgläsern zu Silicatgläsern (schematisch).



a)



b)

Bilder 5 a und b. Thermische Ausdehnung scharf abgeschreckter Kieselgläser,
 a) Kieselglasprobe vom Typ II mit thermischer Vorbehandlung (fiktive Temperatur) bei 1400 °C bis Erreichen des strukturellen Gleichgewichts,
 b) Kieselglasprobe vom Typ III mit thermischer Vorbehandlung bei 1300 °C bis Erreichen des strukturellen Gleichgewichts.
 Kurve 1: erste Aufheizkurve, Kurve 2: zweite Aufheizkurve.

werden. In einer früheren Arbeit [7] wurde der negative Temperaturkoeffizient des Volumens im Temperaturbereich von 1000 bis 1500 °C der Kieselgläser von Typ I/II mit Hilfe des Postulates über die vorgeordneten Bereiche gegeben. Die Vorstellung hierüber war die, daß auf Grund von Temperatur- und Dichteschwankungen, die von heterophasigen Schwankungen überlagert sind, Agglomerate von $\text{SiO}_{4/2}$ -Tetraederfragmenten entstehen können, die ähnliche Eigenschaften wie die der entsprechenden kristallinen Phasen aufweisen. Diese Vorordnungsbereiche besitzen im Kieselglas von etwa 150 grd unterhalb des Schmelzpunktes von Cristobalit an und darunter eine hinreichend lange Lebensdauer und Größe, um eingefroren werden zu können.

Mit Hilfe dieses Postulates der Vorordnungsbereiche kann das komplexe Volumenverhalten insofern interpretiert werden, als der Abschnitt negativer Ausdehnung (1000 bis 1550 °C, Bild 2a) über die cristobalitähnlichen Vorordnungsbereiche¹⁾ mit dem negativen Ausdehnungskoeffizienten von Cristobalit in Zusammenhang ge-

¹⁾ Es sind Anzeichen vorhanden, daß auch bei 500 bis 600 °C anomale Volumenänderungen auf Grund von quarzähnlichen Vorordnungsbereichen stattfinden [2], jedoch sind diese Volumeneffekte klein gegenüber denen bei 200 bis 300 °C. Damit ist aber nicht gesagt, daß der reale Effekt ebenfalls klein ist, sondern es kann nur soviel gesagt werden, daß er klein im Sinne der Meßempfindlichkeit der thermischen Ausdehnung und des Probenzustandes ist, weil die Volumenrelaxation bei 500 bis 600 °C zu messen nur möglich ist nach derjenigen bei 200 bis 300 °C, nach der die Empfindlichkeit für eine Volumenrelaxation bei 500 bis 600 °C durch den teilweisen Ausheilprozeß bei 200 bis 300 °C (Umordnungen, strukturelle Spannungen) stark reduziert ist.

bracht werden kann. Oberhalb 1550 °C findet eine „thermische Zersetzung“ bzw. ein „Vorsmelzen“ der Vorordnungsbereiche statt, und die Volumen-Temperaturkurve verhält sich normal. Der negative Ausdehnungskoeffizient wiederum, von Cristobalit und Quarz bei hohen Temperaturen, und auch von Kieselglas bei tiefen Temperaturen hat nach einer Deutung von SMYTH [8] seinen Ursprung in einer Bevorzugung der Biegeschwingungen der Sauerstoffatome ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$) im Gegensatz zu den Longitudinalschwingungen; eine Vorstellung, die weder an den glasigen noch an den kristallinen Zustand gebunden ist.

Die große Zahl der Hydroxylgruppen in den synthetischen Kieselgläsern (Typ III) bewirkt eine Auflockerung und eine offenere Struktur des Netzwerkes ähnlich wie bei Alkalioxidzugabe, ohne jedoch das entstandene freie Volumen wie im Fall der Alkaligläser weitgehend zu füllen oder wie im Fall der Lithiumsilicatgläser wesentlich zu kontrahieren. Diese Strukturauflockerung kann man sich durch das Lösen von Si-O-Bindungen und damit durch die Schaffung von nichtbrückenbildenden Sauerstoffatomen im Netzwerk vorstellen. Da kein genügender Ersatz in Form von Verunreinigungen für den Ladungsausgleich in diesen an Metalloxiden fast freien Kieselgläsern vorhanden ist, muß wegen der Elektroneutralität angenommen werden, daß die OH-Gruppen etwa paarweise auftreten und sich gegenseitig abstoßen. In der im Vergleich zu anderen Gläsern symmetrischen Nahordnung wird dadurch eine erhöhte Asymmetrie der Nahordnungsbereiche erzeugt, die zu einer Aufweitung des Netzwerkes führt. Damit erklärt

sich die geringere Dichte der Kieselgläser vom Typ III im Vergleich zu denen der Gruppen I und II. Weiterhin bewirken die OH-Gruppen eine höhere Beweglichkeit der Netzwerkbruchstücke und der Vorordnungsbereiche, desgleichen eine lockerere Kopplung der Vorordnungsbereiche in sich und mit dem übrigen Netzwerk als bei den natürlichen Kieselgläsern (I/II), wodurch der Einfluß der cristobalitähnlichen Vorordnungsbereiche auf das negative Ausdehnungsverhalten so weit reduziert wird, bis der negative Ausdehnungsverlauf der metastabilen Gleichgewichtskurve (1000 bis 1500 °C) in einen positiven Verlauf übergeht. Dieser Übergang ist mit dem Übergang von Bild 2a nach Bild 2b und schematisch in Bild 4 demonstriert. Bei weiterer Erhöhung des Hydroxylgehaltes würde die metastabile Gleichgewichtskurve schließlich in einen Kurvenast mit einem gegenüber dem glasigen Bereich höheren (positiven) Ausdehnungskoeffizienten übergehen, wie es von den binären und Mehrkomponentensilicatgläsern her bekannt ist.

Der Hydroxylgehalt verursacht durch die Auflockerung des Netzwerkes und die gleichzeitige Entkoppelung der Vorordnungsbereiche vom Netzwerk ferner, daß die Viskosität stark herabgesetzt [9], der Einfrierbereich zu tieferen Temperaturen verschoben [3] (siehe oben) und die Kristallisationsgeschwindigkeit erhöht wird [10].

Ein Eindruck von der erhöhten Beweglichkeit der Netzwerkbestandteile (Vorordnungs- und Nahordnungsbereiche) sei durch die Gegenüberstellung der Bilder 5a und b als Beispiel gegeben. Bei Kieselgläsern vom Typ I/II finden im Bereich 200 bis 300 °C Volumenschrumpfungen statt, die eine geringere Relaxationszeit besitzen als die Volumendehnungen in Richtung auf die metastabile Gleichgewichtskurve bei 1000 °C²). Diese Schrumpfungen der natürlichen Kieselgläser wurden der Volumenschrumpfung der schnell abgeschreckten Vorordnungsbereiche zugeordnet [7], die nach dem Abschreckvorgang in einer Art „Hochtemperatur-Vorordnungszustand“ der Vorordnungsbereiche — entsprechend der Hochtemperaturmodifikation von (Cristobalit-)Kristallen — bei Raumtemperatur vorliegen, die anschließend beim langsamen Hochheizen während der Ausdehnungsmessung Gelegenheit haben, in den „Tiefemperatur-Vorordnungszustand“ überzugehen, wobei sie sich noch mehr fehlordnen, als sie es ohnehin schon sind, und sich von ihrer Umgebung mehr oder weniger stark lösen durch lokale Tetraeder-Umgruppierungen.

Die Beobachtung, daß anstelle der Volumenschrumpfung eine Volumenexpansion bei den synthetischen Kieselgläsern (Typ III, Bild 5b) bei etwa 250 °C stattfindet, kann sowohl der lockereren und offeneren Struktur, als auch der größeren Beweglichkeit der Tetraeder in den Vorordnungs- und Nahordnungsbereichen auf Grund des Hydroxylgehaltes zugeordnet werden. Daher werden die Hochtemperatur-Vorordnungsbereiche nicht eingefroren beim Abschrecken unterhalb 250 °C wie im Fall der natürlichen Kieselgläser, sondern in den Tiefemperatur-Vorordnungszustand übergehen und beim Hochheizen während der Ausdehnungsmessungen die geringe Volumenexpansion bei etwa 250 °C nach Bild 5b verursachen. Diese Expansion ist geringer und verläuft

²) In Bild 5a beziehen sich die Zahlen an den Stellen der isothermen Volumenschrumpfungen auf die Dauer der Schrumpfungen in Minuten, die isotherme Volumendehnung bei 1000 °C bezieht sich auf eine Stunde.

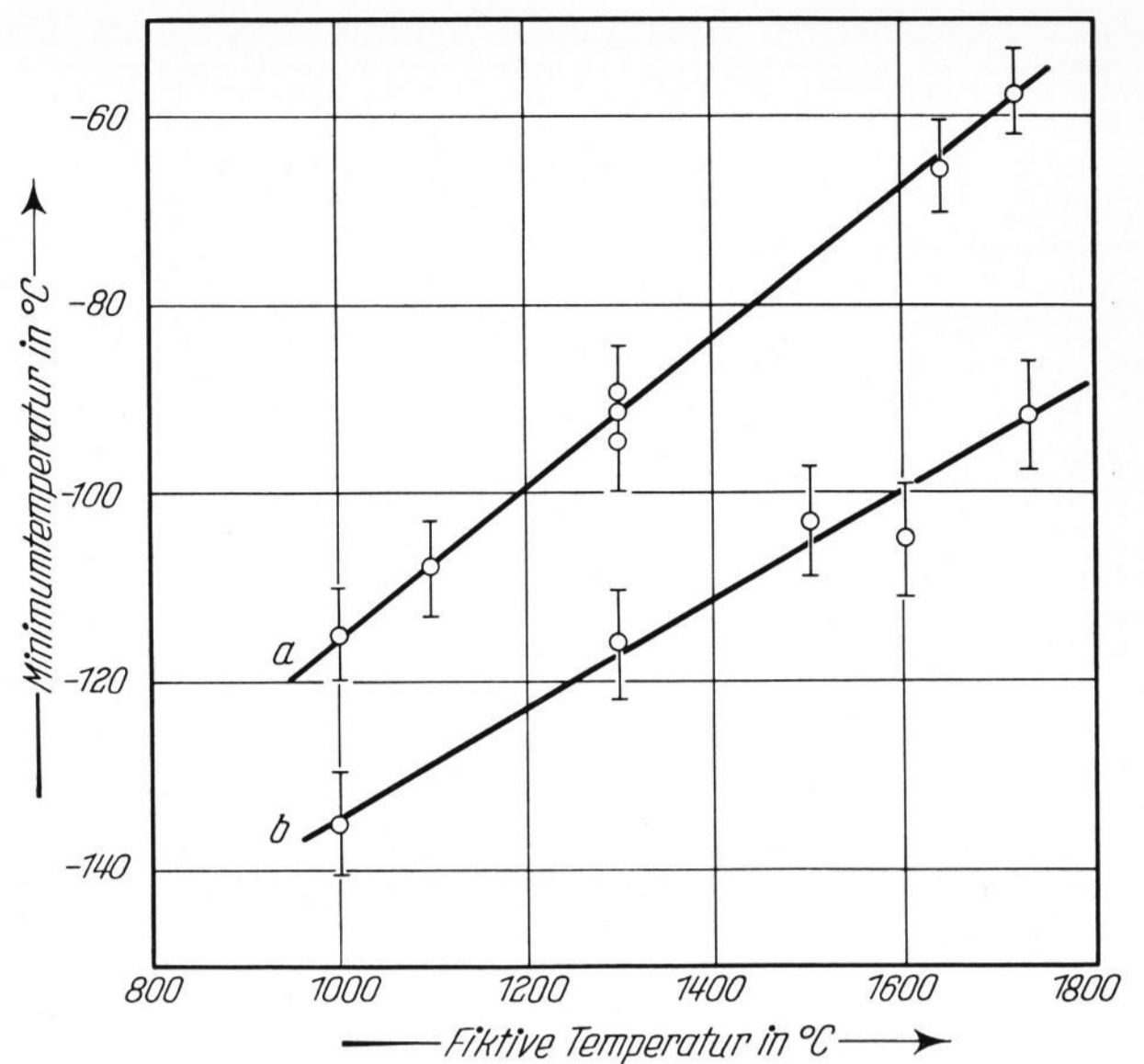


Bild 6. Tieftemperaturminimum als Funktion von der thermischen Vorbehandlung (fiktive Temperatur).

Kurve a: Typ I/II, Kurve b: Typ III.

wesentlich schneller als im Fall der natürlichen Kieselgläser (Bild 5a), was an der erwähnten größeren Beweglichkeit der Tetraeder liegt.

Ebenfalls verursacht durch den Hydroxylgehalt verläuft die Volumendehnung bei 1000 °C bei den Kieselgläsern vom Typ III wesentlich schneller als bei den Kieselgläsern vom Typ I/II; ja sie setzt schon bei tieferen Temperaturen ein, so daß die Volumendehnung in Richtung auf die metastabile Gleichgewichtskurve schon während der erforderlichen Meßzeit bei 1000 °C abgeschlossen ist.

3. Tieftemperaturverhalten

Die negative Ausdehnung der Kieselgläser bei tiefen Temperaturen könnte ebenfalls die Folge einer Bevorzugung der transversalen Schwingungen gegenüber der longitudinalen Moden im Sinne von SMYTH [8] sein, nur mit dem Unterschied, daß in diesem Temperaturbereich (unterhalb -60 °C) die Nahordnungsbereiche für dieses Verhalten verantwortlich sind, während bei hohen Temperaturen die Voraussetzungen in den (Hochtemperatur)-Vorordnungsbereichen gegeben sind. Die Verschiebung der Temperaturlage des Ausdehnungsminimums bei tiefen Temperaturen (-60 bis -135 °C) mit der thermischen Vorbehandlung [3, 5], die unabhängig vom Hochtemperaturminimum bei 1500 °C ist, liefert eine Stütze für diese Annahme. Es liegt nahe, diese Verschiebung (Bild 6) durch innere strukturelle Spannungen, die durch den Abschreck- und Einfriervorgang hervorgerufen werden und auch von der Wechselwirkung zwischen Vor- und Nahordnungsbereichen herrühren, zu deuten. Hierbei spielt die mehr oder weniger offene, von der thermischen Vorbehandlung abhängige Struktur gemäß der metastabilen Gleichgewichtskurve, die Temperatur des Einfriervorganges und die vom Hydroxylgehalt mitbestimmte Struktur eine entscheidende Rolle, desgleichen die von beiden Einflüssen abhängigen „offenen“ oder „gebrochenen“ Bindungen des SiO₂-Netzwerkes (strukturelle Inhomogenitäten [4]).

Die strukturellen Spannungen³⁾ können insofern das Tieftemperaturminimum beeinflussen, als die Bedingun-

³⁾ Unter struktureller Spannung sei diejenige Spannung verstanden, die zwischen den SiO_4 -Tetraedern und auch zwischen Agglomeraten, z. B. im vorliegenden zwischen den Vor- und Nahordnungsbereichen, herrscht. Sie entstehen neben den thermischen Spannungen durch den Abkühlvorgang, hauptsächlich aber auch durch den Einfriervorgang selbst und dessen Kinetik. Während die thermischen Spannungen von der Geometrie und Abkühlgeschwindigkeit abhängig sind und entsprechend abgebaut werden können, sind die strukturellen Spannungen in Gläsern nicht vollständig abzubauen. Das gelingt zwar selbst in Kristallen nur selten (versetzungs- und fehlordnungsfreie Einkristalle), doch sind die Gläser auf Grund ihrer hohen Unordnung in atomaren Bereichen wesentlich verspannter, was ihre Sprödigkeit bedingt.

gen für die SMYTHschen Voraussetzungen (Bevorzugung der transversalen Schwingungen) bei um so höheren Temperaturen erfüllt sein werden, je höher die strukturellen Spannungen sind. Das heißt aber experimentell: je höher die fiktive Temperatur, desto höher die strukturellen Spannungen, desto höher die Temperatur des Tieftemperaturminimums, an der also das negative Ausdehnungsverhalten beginnt, und desto niedriger der auf das Netzwerk entkoppelnd wirkende Hydroxylgehalt. Theoretische Vorstellung und Experiment stehen in vollem Einklang (Bild 6). Auch die in [5] gemessene Verschiebung des Tieftemperaturminimums in Abhängigkeit von den Volumenschrumpfungen bei 200 bis 300 °C passen in die vorliegende Deutung.

4. Literatur

- [1] SOSMAN, R. B.: The properties of silica. New York: The Chemical Catalog Corp. 1927. [Ref. Glastechn. Ber. 6 (1928/29) S. 224.]
SOSMAN, R. B.: The phases of silica. New Brunswick (New Jersey): Rutgers University Press 1964.
- [2] BRÜCKNER, R.: Properties and structure of vitreous silica. *J. non-crystalline Solids* 2 (1970) (Im Druck).
- [3] BRÜCKNER, R.: Charakteristische physikalische Eigenschaften der oxidischen Hauptglasbildner und ihre Beziehungen zur Struktur der Gläser. Teil III: Mechanische und optische Eigenschaften als Funktion der thermischen und mechanischen Vorgeschichte. *Glastechn. Ber.* 37 (1964) S. 500–505.
- [4] BRÜCKNER, R.: Der Einfluß des Hydroxylgehaltes auf die Dichte und auf den Diffusionsmechanismus in Kieselgläsern. *Glastechn. Ber.* 38 (1965) S. 153–156.
- [5] BRÜCKNER, R.: [3], Teil II: Mechanische und optische Eigenschaften als Funktion der thermischen Vorgeschichte. *Glastechn. Ber.* 37 (1964) S. 459–475.
BRÜCKNER, R.: Das thermische Ausdehnungsverhalten von Kieselglas als Funktion der thermischen Vorgeschichte. *Naturwiss.* 49 (1962) S. 150–152.
- [6] BACON, F. J., HASAPIS, A. A. und WHOLLEY, J. W.: Viscosity and density of molten silica and high silica content glasses. *Physics Chem. Glasses* 1 (1960) S. 90 bis 98.
- [7] BRÜCKNER, R.: [3], Teil IV: Deutung und strukturelle Schlußfolgerungen. *Glastechn. Ber.* 37 (1964) S. 536 bis 548.
- [8] SMYTH, H. T.: Thermal expansion coefficient of vitreous silica. *J. Amer. ceram. Soc.* 38 (1955) S. 140–141.
- [9] HETHERINGTON, G., JACK, K. H. und KENNEDY, J. C.: The viscosity of vitreous silica. *Physics Chem. Glasses* 5 (1964) S. 130–136. [Ref. *Glastechn. Ber.* 38 (1965) S. 369.]
- [10] WAGSTAFF, F. E., BROWN, S. D. und CUTLER, J. B.: Influence of H_2O and O_2 atmospheres on the crystallisation of vitreous silica. *Physics Chem. Glasses* 5 (1964) S. 76–81. [Ref. *Glastechn. Ber.* 39 (1966) S. 23.]
- [11] WAGSTAFF, F. E. und RICHARDS, K. J.: Kinetics of crystallisation of stoichiometric SiO_2 glass in H_2O atmospheres. *J. Amer. ceram. Soc.* 49 (1966) S. 118–121. (50359)

DK 539.219.2:541.12.036:532.73:539.213.22:666.122.2:549.514.51

Zerbrechung von Quarz in Schmelzen und Gläsern

Von ROBERT HEIMANN und ALEXANDER WILLGALLIS, Berlin

(Mitteilung aus dem Institut für Mineralogie der Freien Universität Berlin)

(Eingegangen am 23. Oktober 1969)

Es wird das Zerbrechen von Quarz in Alkalisilicat- und Alkaliboratschmelzen bzw. -gläsern quantitativ untersucht. Die zur Zerteilung führenden Kräfte entstehen sowohl durch Tridymit- und Cristobalitbildung im Quarz als auch durch mechanische Spannungen zwischen dem Versuchskörper und seiner glasigen Reaktionsschicht.

Bei Versuchen, die Lösungsvorgänge an Quarzkörpern in Alkalisilicat-, -borat-, -phosphat- und -fluoridschmelzen zu erfassen, trat als störender Nebeneffekt eine mehr oder weniger starke Zerbrechung des

Quarzes auf. Dadurch wurden die eigentlichen Lösungsphänomene überdeckt oder der Messung entzogen. Aus diesem Grunde wurde das mechanische Verhalten von Quarz in verschiedenen Schmelzen bzw. Gläsern näher untersucht.

Zu diesem Problem betrachten WEYL [1] und SELSING [2] theoretisch Druck- und Zugspannungen, die an einem kugelförmigen Kristall angreifen, der in einer homogenen Glasphase eingebettet liegt. Diese Kräfte entstehen durch das meist unterschiedliche Ausdehnungsverhalten zwischen Glas und Kristall beim Abkühlen und führen an Schwächestellen zur Trennung des Verbandes. BOGARDUS und ROY [3] konnten zeigen, daß die auftretenden Spannungen sogar eine Änderung der Hoch/Tief-Umwandlungstemperatur des Cristobalits bzw. Tridymits bewirken.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Zerbrechung von idiomorphen Quarzkristallen und Quarzkörnern

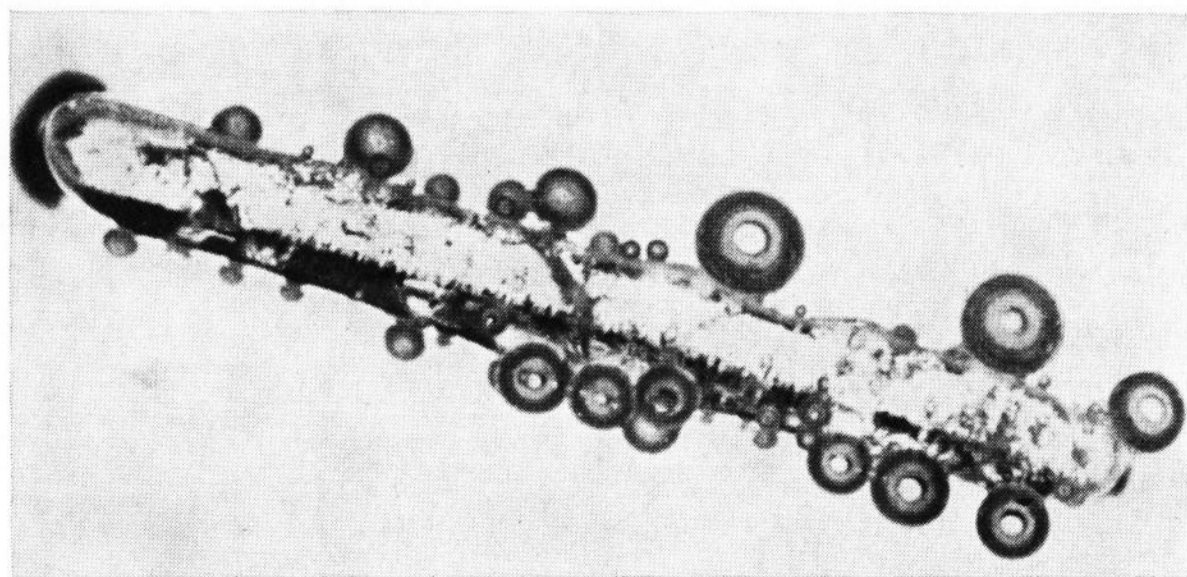


Bild 1. Auflösung eines Quarzkristalls in Natriummetasilicat-schmelze bei 1100 °C.