

O_2 Al_2O_3 SiO_2 Na_2O

$\eta = 10^{13} \text{ dPa}\cdot\text{s}$

$\eta = 10^{7.6} \text{ dPa}\cdot\text{s}$

$$k = \frac{\Delta \sigma}{\Delta T} = \frac{1}{1-\mu} \frac{\alpha \cdot E}{\Delta T}$$

$$R_d = \left(\frac{n_d - 1}{n_d + 1} \right)^2$$

Al_2O_3 SiO_2 Na_2O

Al_2O_3 SiO_2 Na_2O

Al_2O_3

SiO_2

SiO_2 Na_2O

SiO_2

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

$\eta = 10^{14} \text{ dPa}\cdot\text{s}$

Al_2O_3 SiO_2

Al_2O_3 Na_2O

SiO_2

$$\lg p = A - \frac{B}{T}$$

T_g

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

Schott Technische Gläser

Physikalische und chemische Eigenschaften

$$R_d = \left(\frac{n_d - 1}{n_d + 1} \right)^2$$

$$\sigma = \frac{\Delta T \cdot \alpha \cdot E}{1-\mu}$$

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

$10^{13} \text{ dPa}\cdot\text{s}$

$$\sigma = \frac{\Delta T \cdot \alpha \cdot E}{1-\mu}$$

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

$$\eta = 10^{7.6} \text{ dPa}\cdot\text{s}$$

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

$$\sigma_g = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{E}$$

SiO_2 Na_2O

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

T_g

SCHOTT
glass made of ideas

$$\Delta l/l_0 \quad \lg p = A - \frac{B}{T}$$

Vorwort

Glas als technischer Werkstoff hat neben der rein optischen Anwendung die Entwicklung bedeutender Fachbereiche wie Chemie, Pharmazie, Elektrotechnik, Elektronik entscheidend beeinflußt und geprägt. Traditionelle technische Anwendungsgebiete für Glas wie Labortechnik, Elektronenröhren, Lampen, haben mit ihren verschiedenen Anforderungen an die chemisch-physikalischen Eigenschaften zur Typenvielfalt technischer Spezialgläser geführt. Neu hinzukommende Anwendungsgebiete, besonders in der Elektrotechnik und Elektronik, haben diese Vielfalt der Glastypen sowie auch die Anwendungsarten und Formgebungsverfahren ständig erweitert. Maßgebliche Impulse sind hier von der hermetischen Kapselung elektronischer Bauelemente ausgegangen. Schließlich ist mit der Herstellung von hochwertigen Glaskeramiken aus Gläsern eine neue Dimension eröffnet worden, deren Entwicklung in verschiedenen technischen Bereichen bereits neue Maßstäbe gesetzt hat.

Die laufende Optimierung aller handelsüblichen Gläser und Artikel für bestehende Einsatzgebiete sowie die Entwicklung von Gläsern und Verfahren für neue Anwendungen ist das ständige Bemühen der SCHOTT-Forschung. Für eine solche dynamische Entwicklung bedeutet enger Kontakt zum Anwender sowie dessen bestmögliche Information über Glas eine unverzichtbare Voraussetzung.

Die vorliegende Schrift soll dieser Notwendigkeit Rechnung tragen. Sie enthält allgemeine Angaben zur Bestimmung und Beurteilung wichtiger Glaseigenschaften und informiert über spezielle chemische und physikalische Kennwerte und Anwendungsmöglichkeiten der bei SCHOTT gefertigten kommerziellen technischen Gläser. Mit diesem Inhalt wendet sie sich an Wissenschaftler, Ingenieure und Konstrukteure, denen die vorliegenden Angaben zur zweckentsprechenden Auswahl und zur bestmöglichen Anwendung von SCHOTT-Gläsern verhelfen sollen.

Bei der Verwendung der vorliegenden Schrift ist zu beachten, daß die in den Abbildungen dargestellten Kurven und Kurvenscharen weniger auf aktuellen Präzisionsmessungen basieren, sondern daß sie vielmehr den typischen Verlauf der Eigenschaften der jeweiligen Gläser oder Glasgruppen charakterisieren und verdeutlichen sollen. Aktuelle Eigenschaftswerte bestimmter Gläser sind lediglich in den Tabellen dieser Broschüre (Stand: September 1998) oder in separaten Datenblättern (Produktinformation Nr. 40001) enthalten.

Mainz im Mai 1999

Inhalt

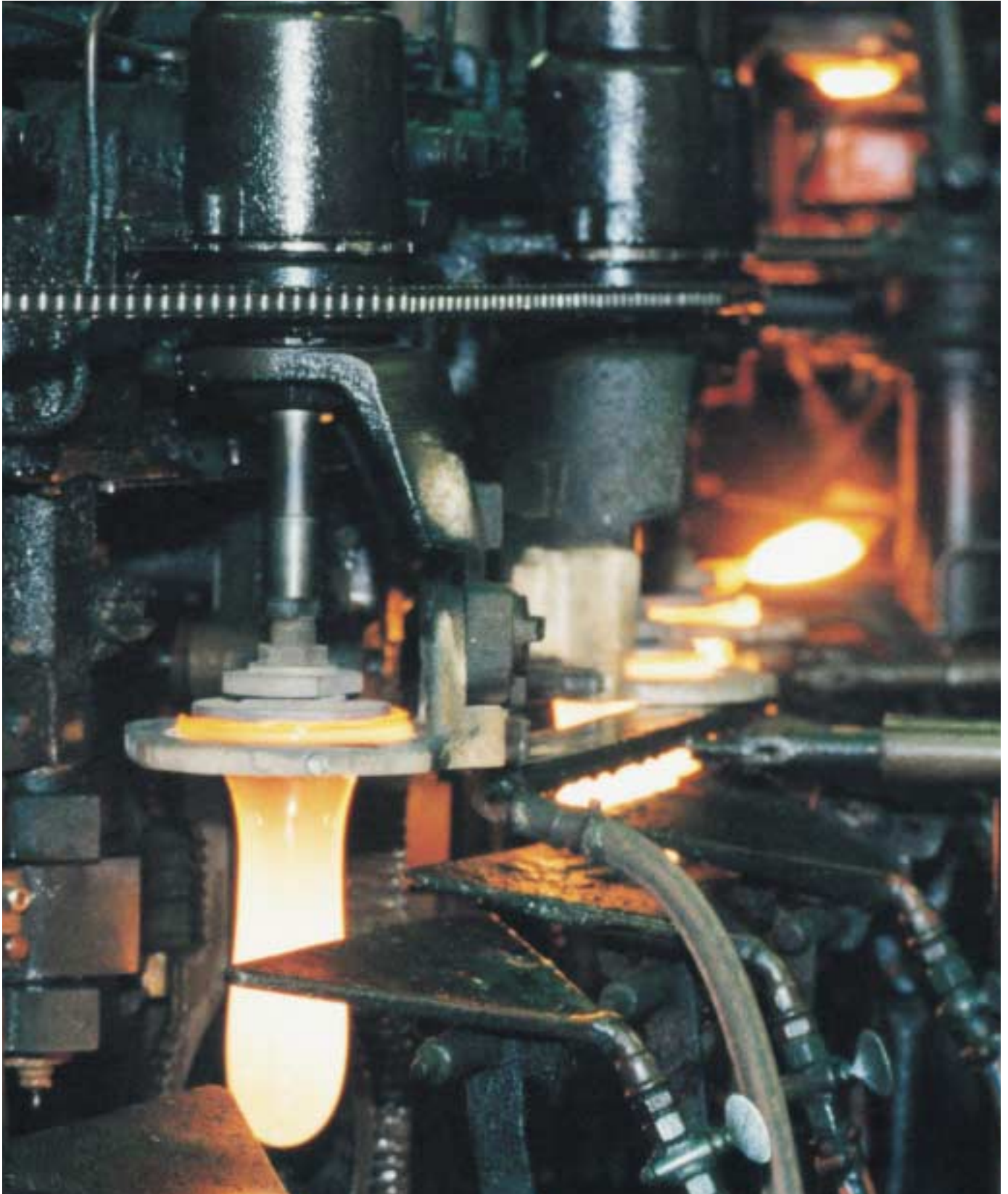
1	Typengruppen technischer Gläser	5
---	---------------------------------	---

Prüfung und Bedeutung wichtiger Glaseigenschaften

2	Chemische Resistenz von Gläsern	6
	2.1 Mechanismen der chemischen Wechselwirkung mit Wasser, Säuren und Laugen	6
	2.2 Bestimmung der chemischen Beständigkeit	7
	2.3 Bedeutung der chemischen Beständigkeit	8
3	Mechanische Eigenschaften	11
	3.1 Viskosität	11
	3.2 Festigkeit	12
	3.3 Elastizität	15
	3.4 Thermischer Längenausdehnungskoeffizient	15
4	Elektrische Eigenschaften	17
	4.1 Volumenwiderstand	17
	4.2 Oberflächenwiderstand	17
	4.3 Dielektrische Eigenschaften	18
	4.4 Durchschlagsfestigkeit	19
5	Optische Eigenschaften	20
	5.1 Lichtbrechung	20
	5.2 Spannungsdoppelbrechung	21
	5.3 Lichtdurchlässigkeit	21

Spezielle Eigenschaften und Anwendung technischer Gläser

6	Chemisch resistente Borosilicatgläser	22
	6.1 Duran [®] , 8330 und 8339	23
	6.2 Suprax [®] , 8486 und 8488	23
	6.3 Fiolax [®] klar, 8412 und Fiolax [®] braun, 8414	24
7	Einschmelzgläser	25
	7.1 Allgemeines	25
	7.2 Typengruppen von Einschmelzgläsern	25
	7.3 Druckglasdurchführungen	27
	7.4 Keramikanglasungen	27
	7.5 Übergangsgläser	28
8	Glaslote	29
9	Glaskeramik	33
	Glasarten (Tabelle)	36
	Zitierte Literatur	39



1. Typengruppen technischer Gläser

Unter technischen Gläsern seien im folgenden Spezialgläser verstanden, die in Form von Röhren, Stäben, Gefäßen und vielfältigen Formteilen besonderer Art sowie Flachglas und Granulat für Anwendungen hauptsächlich in Chemie, Labortechnik, Pharmazie, Elektrotechnik, Elektronik und Haustechnik hergestellt werden.

Gläser für rein optische Zwecke grenzen sich von diesen technischen Gläsern zumeist durch besondere Herstellungsverfahren und auch besondere Zusammensetzungsbereiche ab.

Für Übersichtszwecke kann die Vielzahl dieser technischen Gläser nach ihrer oxidischen Zusammensetzung (genannte %-Anteile in Gewichtsprozent) etwa in folgende vier Gruppen gegliedert werden, wobei Übergänge zwischen diesen Gruppen sowie auch Gläser außerhalb dieser Gruppen möglich sind, die keine eindeutige Zuordnung erlauben.

Borosilicatgläser

Kennzeichnend sind wesentliche Anteile von Kieselsäure (SiO_2) und Borsäure ($\text{B}_2\text{O}_3 > 8\%$) als Glasbildner.

Die Höhe des Borsäuregehaltes beeinflusst die Glaseigenschaften insbesondere dahingehend, daß neben den als hochresistent bekannten Arten (B_2O_3 bis maximal 13%) auch solche stehen, die infolge andersartigen strukturellen Einbaus der Borsäure (B_2O_3 -Gehalte $> 15\%$) nur noch geringe chemische Resistenz zeigen. Daher unterscheiden wir folgende Untergruppen.

Borosilicatglas erdalkalifrei (Borosilicatglas 3.3)

Typisch sind B_2O_3 -Gehalte von 12–13% und SiO_2 -Anteile $> 80\%$. Hohe chemische Beständigkeit und geringe Wärmeausdehnung ($3,3 \cdot 10^{-6}/\text{K}$) – die geringste von allen großtechnisch hergestellten Gebrauchsgläsern – machen diese Glasart zu einem Universalglas für chemisch-technische Apparate, Rohrleitungen und Laborgeräte. Ein solches Glas ist Duran®.

Borosilicatgläser erdalkalihaltig

Neben ca. 75% SiO_2 und 8–12% B_2O_3 enthalten diese Gläser bis zu 5% Erdalkalien und Aluminiumoxid (Al_2O_3). Zu diesen gegenüber 1.1 etwas weicheren Gläsern mit Wärmeausdehnungen im Bereich 4,0 bis $5,0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ gehören die chemisch hochresistenten Arten Fiolax® 8412, 8414 (= „Neutralgläser“) sowie Suprax® 8486, 8488 und 8656.

Borosilicatgläser hochborsäurehaltig

Gläser mit B_2O_3 -Gehalten von 15–25% bei 65–70% SiO_2 , Rest: Alkalien und Al_2O_3 , sind niedrigerweichend bei geringer Wärmedehnung. Verschmelzanpassung an Metalle des Bereiches Wolfram-Molybdän sowie hohe elektrische Isolation stehen bei diesen Gläsern im Vordergrund. Der erhöhte B_2O_3 -Gehalt verringert die chemische Resistenz, die Gläser heben sich diesbezüglich von den Gruppen 1.1 und 1.2 deutlich ab; Beispiel 8250, 8245, 8337, 8487.

Erdalkali-Alumino-Silicatgläser

Charakteristisch ist die Freiheit von Alkalioxiden, Al_2O_3 -Gehalte von 15–25%, 52–60% SiO_2 sowie ca. 15% Erdalkalien. Sehr hohe Transformations- und Erweichungstemperaturen sind typische Merkmale. Zu den Hauptanwendungen gehören Glaskolben für Halogenglühlampen, Displaygläser, Hochtemperatur-Thermometer, thermisch und elektrisch hochbelastbare Schichtwiderstände und Verbrennungsröhren.

Beispiele: Supremax® 8409, Halogenlampengläser 8252 und 8253, Displayglas 8261.

Alkali-Blei-Silicatgläser

Typisch sind Gehalte $> 10\%$ Bleioxid (PbO). Anteile von 20–30% PbO bei 54–58% SiO_2 und ca. 14% Alkalien enthalten hochisolierende und damit elektrotechnisch bedeutsame „Bleigläser“, wie sie als „Fußgläser“ in Lampen, Bildröhren usw. verwendet werden. Beispiele: 8095, 8099, Fernsehtrichterglas 8042.

Große Bedeutung kommt Bleioxid auch als röntgenschutzaktiver Komponente zu (Strahlenschutzgläser, Bildröhrenteile).

Alkali-Erdalkali-Silicatgläser (Natron-Kalk-Glas)

Zu diesem ältesten Glastype zählen die in großen Einheiten erschmolzenen Flachgläser (Fensterglas) und Verpackungsgläser mit ca. 15% Alkalien (meist Na_2O), 13–16% Erdalkalien ($\text{CaO} + \text{MgO}$), 0–2% Al_2O_3 und 71% SiO_2 .

Abkömmlinge dieser Grundzusammensetzung haben auch nennenswerte Anteile von BaO bei insgesamt verringertem Alkali- und Erdalkali-Anteil. Beispiel: 8350.

Höhere Anteile von Bariumoxid für Röntgenschutzzwecke enthalten Gläser für Bildröhrenteile, die ebenfalls dieser Gruppe zuzurechnen sind. Beispiel: Fernsehschirmglas 8056.

Im weiteren Sinne zählen hierzu auch die sogenannten Kristallgläser (Trinkgläser).

2. Chemische Resistenz von Gläsern

Allgemein zeichnet sich Glas durch eine sehr gute Beständigkeit gegenüber Wasser, Salzlösungen, Säuren und organischen Substanzen aus und übertrifft damit die meisten Metalle und Kunststoffe. Es wird nur durch Flußsäure, starke Laugen und konzentrierte Phosphorsäure, besonders bei hohen Temperaturen, merklich angegriffen.

Chemische Wechselwirkungen mit Glasoberflächen können über Austausch-, Abtrags- und/oder Adsorptionsprozesse zu den verschiedensten Erscheinungen führen: von praktisch nicht erkennbaren Veränderungen der Oberfläche bis zu Trübungen, Flecken, dünnen Schichten mit Interferenzfarben, Kristallisationen, Löchern, narbigem oder glattem Abtrag, um einige zu nennen. Diese Veränderungen können auf die Oberfläche beschränkt bleiben, im Extremfall das Glas aber auch vollständig zerstören oder auflösen. Glasart, Beanspruchungsmedium und Einsatzbedingungen entscheiden, inwieweit solche chemischen Wechselwirkungen technisch von Bedeutung sind.

2.1 Mechanismen der chemischen Wechselwirkungen mit Wasser, Säure und Laugen

Als „chemische Beständigkeit“ soll die Widerstandsfähigkeit der Glasoberfläche gegenüber chemischer Beanspruchung durch definierte Agenzien verstanden werden, wobei Temperatur und Beanspruchungsdauer sowie der Oberflächenzustand des Glases von wesentlichem Einfluß sind. [1]

Wenn ein chemischer Angriff auf Glas stattfindet, sind immer Wasser bzw. seine Dissoziationsprodukte, d.h. H^+ - oder OH^- -Ionen, beteiligt. Infolgedessen unterscheidet man zwischen der hydrolytischen (Wasser-), Säure- und Laugenbeständigkeit des Glases. Durch Einwirkung von Wasser und Säuren werden geringe Mengen besonders 1- und 2-wertiger Kationen herausgelöst. Hierbei bildet sich bei den resistenten Gläsern auf der Glasoberfläche eine sehr dünne Kieselgelschicht, die normalerweise den weiteren Angriff hemmt (Abb. 1 a, b). Flußsäure, Laugen und gegebenenfalls Phosphorsäure tragen jedoch mit der Zeit das Kiesel säuregerüst und damit die Oberfläche in ihrer Gesamtheit ab (Abb. 1 c). Demgegenüber treten wasserfreie, also organische Lösungen praktisch gar nicht in Wechselwirkung mit dem Glas.

Die chemische Wechselwirkung wird häufig erhöht oder vermindert durch die Gegenwart anderer Stoffe. So wird der Laugenangriff bei Gläsern durch gewisse in Lösung gehende Ionen, besonders denen des Aluminiums, gehemmt. Andererseits vermögen komplexbildende Verbindungen, wie z.B. EDTA (z.B. Titriplex), Weinsäure, Zitronensäure o.ä., die Löslichkeit heraufzusetzen. Ganz allgemein tritt die Glasoberfläche mit den Lösungen in Wechselwirkung, indem in geringem Ausmaß Austauschreaktionen

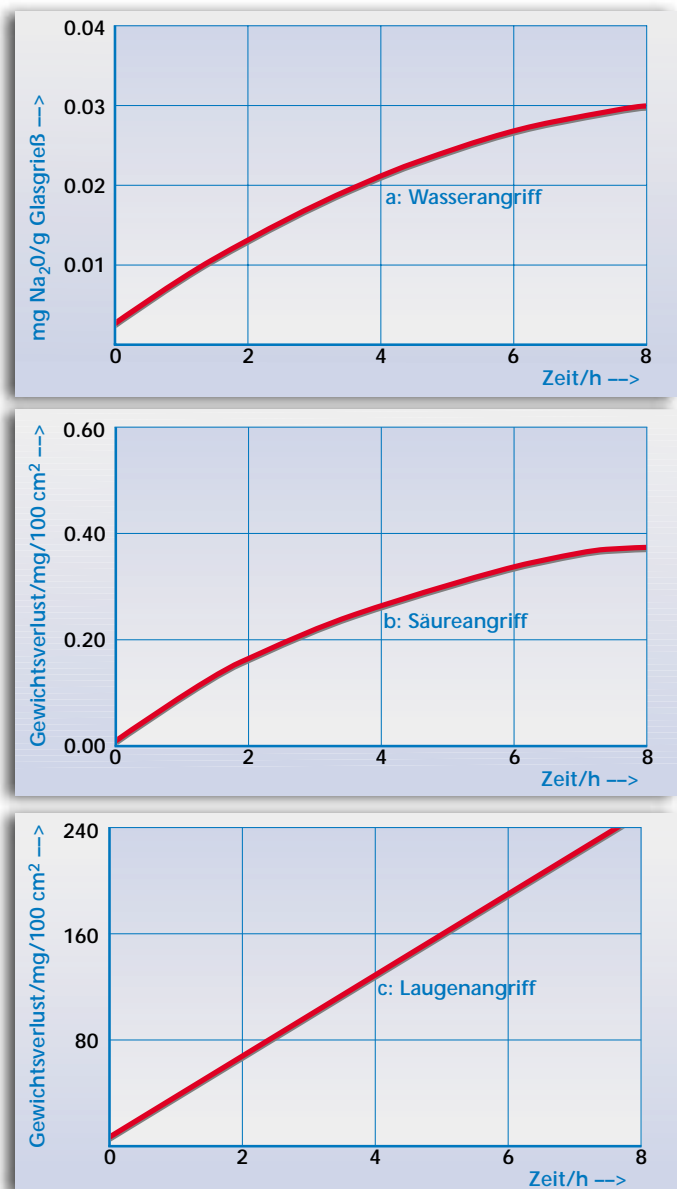


Abb. 1 Zeitlicher Verlauf des Glasangriffs bei Einwirkung von Wasser, Säuren und Laugen (resistentes Laborglas).

und/oder Adsorptionen eintreten. Bekannt sind diese Erscheinungen z.B. bei der Entfernung von Gasresten in der Hochvakuumtechnik oder bei der Beseitigung von geringen adsorbierten Chrommengen nach Behandlung mit Chromschwefelsäure bei gewissen anorganisch-chemischen Arbeiten.

Da sich Säure- und Laugenangriff auf Glas grundlegend unterscheiden, liegt nahe, daß durch Säureeinwirkung entstandene Kieselgelschichten gegen Laugen nicht wirksam zu sein brauchen und zerstört werden können. Umgekehrt muß die Gegenwart der den Laugenangriff hemmenden Ionen nicht ebenfalls einen Schutz gegen Säuren

und Wasser darstellen. Die dem Glas am wenigsten zu-trägliche chemische Beanspruchung ist also die wechselnde Behandlung mit Säuren und Laugen. Wie bei allen chemischen Reaktionen nimmt die Intensität der Wechselwirkung mit steigender Temperatur stark zu (Abb. 23 und 24).

Bei den das Glas echt abtragenden Lösungen, wie Flußsäure, Laugen und heißer konzentrierter Phosphorsäure, nehmen die Angriffswirkungen auch mit steigender Konzentration deutlich zu (Abb. 2). Für die übrigen, häufiger angewendeten Säuren trifft dies nicht zu, wie Abb. 3 veranschaulicht.

2.2 Bestimmung der chemischen Beständigkeit

Zur Bestimmung der chemischen Beständigkeit wurden im Laufe der Zeit zahlreiche Untersuchungsverfahren vorgeschlagen. In den meisten Fällen wird dabei die Oberfläche des Glases geprüft und zwar entweder im „Anlieferungszustand“ (mit der von der Feuerpolitur herrührenden originalen Oberfläche) oder als „Werkstoff“ nach mechanischem oder chemischem Abtrag der Feuerpolitur-Oberfläche oder nach Zerkleinerung.

Am zuverlässigsten, allgemein anwendbar und einfach durchführbar sind die genormten DIN-Prüfmethoden. Sie umfassen die Bestimmung der Wasserbeständigkeit (nach zwei Grieß-Titrationsverfahren und einem Oberflächenverfahren), der Säurebeständigkeit gegenüber Salzsäure und der Laugenbeständigkeit gegenüber einer Mischlauge. Daneben gibt es auch andere Prüfmethoden.

2.2.1 Hydrolytische Beständigkeit (Wasserbeständigkeit)

a) Grieß-Titrations-Verfahren bei 98 °C nach

DIN ISO* 719, Prüfung des Glases als Werkstoff

2 g Glasgrieß von 315–500 (DIN)** bzw. 300–500 (ISO) µm Korngröße werden mit 50 ml Wasser eine Stunde im siedenden Wasserbad erhitzt, dann wird das abgegebene Alkali mit Salzsäure, $c(\text{HCl}) = 0,01 \text{ mol/l}^{***}$, gegen

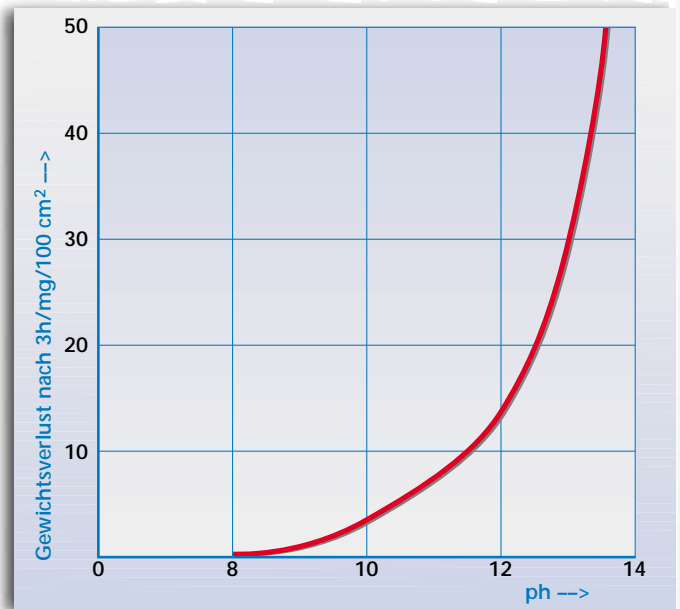


Abb. 2 Laugenangriff auf Duran® 8330 in Abhängigkeit vom pH-Wert bei 100°C.

Methylrotnatrium als Indikator titriert. Aufgrund des Säureverbrauchs bzw. der Alkaliabgabe werden die Gläser in 5 hydrolytischen Klassen eingeteilt (Tabelle 1). Die in Tabelle 12 angeführten hydrolytischen Klassen wurden nach vorstehender Methode ermittelt.

b) Grieß-Titrations-Verfahren bei 121 °C nach

DIN ISO 720; Prüfung des Glases als Werkstoff

Bei diesem aus USA stammenden und besonders für hochresistente Gläser geeigneten Prüfverfahren werden 10 g Glasgrieß von 300–425 µm Korngröße von 50 ml Wasser im Autoklaven 30 min bei 121 °C ausgelaut. Danach wird das abgegebene Alkali mit Schwefelsäure, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 0,01 \text{ mol/l}^{***}$, gegen Methylrotnatrium als Indikator titriert. Auch hier ergibt der Säureverbrauch ein Maß für die Wasserbeständigkeit. Eine Klasseneinteilung ist bei dieser Norm z.Z. nicht angegeben.

Hydrolytische Klasse	Säureverbrauch an 0,01 mol/l Salzsäure je g Glasgrieß ml/g	Basenäquivalent als Na ₂ O je g Glasgrieß µg/g	Mögliche Bezeichnung
1	bis 0,10	bis 31	chemisch hoch resistentes Glas
2	über 0,10 bis 0,20	über 31 bis 62	resistentes Glas
3	über 0,20 bis 0,85	über 62 bis 264	schwach resistentes Glas
4	über 0,85 bis 2,0	über 264 bis 620	deutlicher unbeständiges Glas
5	über 2,0 bis 3,5	über 620 bis 1085	stark unbeständiges Glas

Tabelle 1: Hydrolytische Klassen

* = International Organization for Standardization, internationale Standards

** = DIN soll an ISO angeglichen werden

*** = Die früher gebräuchliche Konzentrationsangabe in „Normal-Lösungen N“ wurde durch die nun international verbindliche SI-Basisgröße der Stoffmenge „mol“ ersetzt.



Borosilicatglas Duran® im Labor.

c) Oberflächen-Prüfverfahren bei 121 °C nach DIN 52 339 (1980) (Teil 1 = Europäisches Arzneibuch). [2]

Während bei den erstgenannten Gieß-Prüfverfahren infolge der Zerkleinerung des Glases immer das Glas als Werkstoff untersucht wird, gestattet das Oberflächenverfahren, die Wasserbeständigkeit der Glasoberfläche im angelieferten Zustand zu prüfen. Hierzu werden ganze, ungebrauchte Behältnisse (z.B. Kolben, Reagenzgläser, Fläschchen, Ampullen) mit Wasser gefüllt, im Autoklaven 60 min bei 121 °C erhitzt und danach die Auslauglösungen mittels Salzsäure, $c(\text{HCl}) = 0,01 \text{ mol/l}$, gegen Methylrot-natrium als Indikator titriert. Aufgrund des Säureverbrauchs werden die Behältnisse – nach Volumen differenziert – in Behältnisklassen eingeteilt.

Die so gemessenen Werte zeigen zusätzlich zum eigentlichen Werkstoffverhalten mögliche Veränderungen an, die bei der Heißverformung in der Glasoberfläche stattfinden können. Wertangaben sind in den Werkstofftabellen dieser Schrift daher nicht enthalten.

2.2.2 Säurebeständigkeit nach DIN 12 116

Die zu prüfende Glasoberfläche wird 6 Stunden in ~20%iger Salzsäure [$c(\text{HCl}) \cong \text{mol/l}$] gekocht und der Gewichtsverlust in $\text{mg}/100 \text{ cm}^2$ ermittelt. Hiernach werden die Gläser in folgende Säureklassen unterteilt:

Säure-Klasse	Bezeichnung	Halber Oberflächen-Gewichtsverlust nach 6 Stunden $\text{mg}/100 \text{ cm}^2$
1	säurebeständig	bis 0,7
2	schwach säurelöslich	über 0,7 bis 1,5
3	mäßig säurelöslich	über 1,5 bis 15
4	stark säurelöslich	über 15

Tabelle 2 Säureklassen

Die für Gläser von SCHOTT ermittelten Klassen sind der Tabelle 12 zu entnehmen.

2.2.3 Laugenbeständigkeit nach DIN ISO 695

Zur Bestimmung der Laugenbeständigkeit werden Glasoberflächen 3 Stunden lang einer siedenden wässrigen Lösung aus gleichen Raumteilen Natriumhydroxid, $c(\text{NaOH}) = 1 \text{ mol/l}$, und Natriumcarbonat, $c(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 0,5 \text{ mol/l}$, ausgesetzt und danach die Gewichtsverluste ermittelt. Es gilt die folgende Einteilung in Laugenklassen:

Laugen-Klasse	Bezeichnung	Oberflächen-Gewichtsverlust nach 3 Stunden $\text{mg}/100 \text{ cm}^2$
1	schwach laugenlöslich	bis 75
2	mäßig laugenlöslich	über 75 bis 175
3	stark laugenlöslich	über 175

Tabelle 3 Laugenklassen

Die für Gläser von SCHOTT ermittelten Klassen sind der Tabelle 12 zu entnehmen.

Besonders chemisch resistent im Sinne der beschriebenen Prüfverfahren sind die folgenden Borosilicatgläser: Duran® (8330 und 8339), Suprax® (8486 und 8488), Fiolax®-klar (8412) und Fiolax®-braun (8414). (Siehe hierzu Tabelle 4.)

2.3 Bedeutung der chemischen Beständigkeit

2.3.1 Korrosionsbeständigkeit im chemisch-technischen Gebrauch

Gegenüber den jeweiligen chemischen Lösungen muß das einzusetzende Glas so resistent sein, daß in Apparaten, Röhren und Behältnissen vielfältige Reaktionen gesichert ablaufen können, ohne daß der Einsatz von Laborglas oder Apparaturen durch starken Abtrag gefährdet wird. Weiterhin dürfen keine störenden Mengen von Glasbestandteilen in das Reaktionsgut abgegeben werden. Von besonderer Bedeutung sowohl in Laboratorien als auch in der chemischen Technik ist die Beanspruchung durch Säuren. Hier zeigen besonders resistente Borosilicatgläser ihre Überlegenheit über andere, alternative Werkstoffe. Ihre Wechselwirkung ist bis zu den Siedetemperaturen nur

sehr gering; sie nimmt mit steigender Konzentration der Säuren zunächst etwas zu, fällt jedoch mit höheren Säurekonzentrationen wieder ab (Abb. 3). Im Gegensatz hierzu steht der alkalische Angriff, der mit steigender Konzentration exponentiell ansteigt (Abb. 2).

Vergleicht man die Wirkung der Mischlauge der Konzentration von ca. 1 mol/l mit derjenigen der Salzsäure in der Konzentration 6 mol/l (die als aggressivste Säure zur Prüfung der Säurebeständigkeit verwendet wird) unter Normbedingungen, so ist der Laugenangriff nach längerer Einwirkung um die Größenordnung 1000 stärker zu erwarten.

2.3.2 Abgabe von Glasbestandteilen

Für viele Prozesse wird in anspruchsvollen Analysen der chemischen Technik, der Pharmazie und des Labors vom Werkstoff Glas gefordert, daß an das reagierende oder aufzubewahrende Präparat möglichst *keine* Bestandteile abgegeben werden.

Da auch höchstresistente Werkstoffe wie Glas mit den angrenzenden Medien in gewisse chemische Wechselwirkung treten, ist die Erfüllung solcher Forderungen eine Frage der Mengen und Nachweisgrenzen. Heute meßbare Konzentrationen von 10^{-6} bis 10^{-9} , die dem Spurenbereich zuzuordnen sind, können, je nach Beanspruchung, auch von Borosilicatgläsern in Form von SiO_2 , B_2O_3 und Na_2O abgegeben werden.

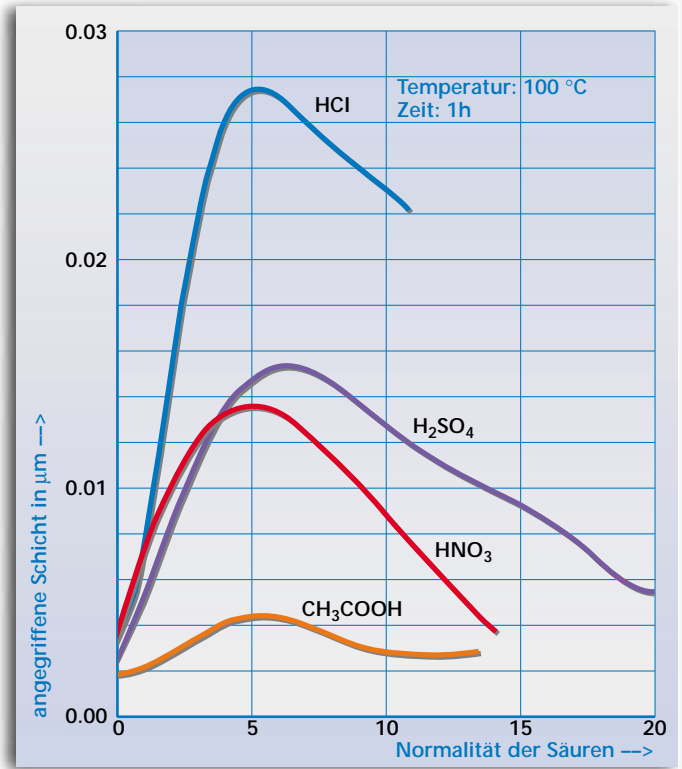


Abb. 3 Wechselwirkung verschiedener Säuren mit Borosilicatglas Duran® 8330 als Funktion der Konzentration.

Dagegen können Lösungen beim Kontakt mit hochwertigen, farblosen Duran® Laborgläsern nicht mit Fe, Cr, Mn, Zn, Pb oder anderen Schwermetallen kontaminiert werden.

2.3.3 Unerwünschte Veränderungen der Glasoberfläche

Tritt eine nennenswerte Wechselwirkung zwischen Glasoberfläche und wässrigen Lösungen ein, so bedeutet dies einen Ionenaustausch, bei dem leichter lösliche Glasbestandteile durch H^+ - bzw. OH^- -Ionen ersetzt werden. Diese Verarmung an bestimmten Glasbestandteilen in der Oberfläche führt zu einer entsprechenden Anreicherung der sehr schwer löslichen Kieselsäure – zur Bildung einer sogenannten Kieselgelschicht – die sich gegenüber dem Grundglas zumeist als chemisch resistenter erweist. Diese Kieselgelschicht wird, wenn ihre Dicke etwa 0,1 bis 0,2 μm übersteigt, infolge ihrer vom Grundglas abweichenden Brechzahl durch Interferenzfarben optisch auch ohne Hilfsmittel erkennbar. Bei anwachsender Schichtdicke wird diese undurchsichtig und blättert schließlich ab, das Glas wird zerstört.

Korrosionsbeständiges Schornstein-Innenrohrsystem Recusist®.





Floaten von Borosilicatglas.

Die ersten Stadien bedeuten für technische Laborgläser nur ein Ästhetikum, sie beeinträchtigen die Funktionstüchtigkeit in keiner Weise. Für optische Gläser können sie jedoch bereits Unbrauchbarkeit bedeuten und auch der Einsatz von Gläsern für elektrotechnische Zwecke könnte dadurch erheblich gestört sein.

Unbrauchbarkeit tritt in allen Fällen natürlich dann ein, wenn das letzte Stadium erreicht ist. Dazwischen liegt das große Feld von optisch bereits erkennbaren, aber für die Praxis völlig unbedeutenden Oberflächenveränderungen und solchen, die bereits beachtet werden müssen. – Bei weniger resistenten Gläsern kann vor allem Wasser im Unterschuß (Luftfeuchte, Kondensation) unter Mitwirkung von Kohlensäure und Schwefeloxiden zu Oberflächen-schäden führen. Bei empfindlichen Gläsern reichen auch Handschweiß oder Verunreinigungen durch übliche Spülmittel gelegentlich zur Entstehung von festhaftenden Schäden aus, die zumeist als Flecken erkennbar werden. Wenn derartig verschmutzte Glasoberflächen nochmals erhitzt werden ($> 350\text{--}400\text{ °C}$), kann es zum Einbrennen solcher Stoffe bzw. einiger ihrer Bestandteile in die Oberfläche kommen. Hier vermögen normale Reinigungsprozeduren nichts mehr auszurichten, dann muß die gesamte Oberflächenschicht (z.B. durch Ätzen) abgetragen werden.

2.3.4 Erwünschte chemische Wechselwirkungen mit der Glasoberfläche („Ätzen“)

Sehr starke chemische Wechselwirkungen zwischen wässrigen Agenzien und Glas können zur radikalen Glasreinigung benutzt werden. Die vollständige Abtragung von Glasschichten führt hierbei zur Ausbildung einer neuen Oberfläche.

Am stärksten wirkt Flußsäure auf Glas. Da sie mit einer Reihe von Glasbestandteilen schwerlösliche Fluoride bildet, ist sie häufig nur verdünnt anzuwenden. Ein Zusatz einer anderen Säure, wie Salz- oder Salpetersäure, ergibt meist die beste Ätzwirkung. So hat sich für ein mäßig starkes Abätzen insbesondere der resistenten Borosilicatgläser eine Mischung aus sieben Raumteilen Wasser, zwei Raumteilen konzentrierter Salzsäure (~38%) und einem Raumteil Flußsäure (~40%) bewährt. Bei Einwirkung während 5 min. bei Raumtemperatur unter Rühren der Lösung werden von weniger beständigen Gläsern (z.B. 8245, 8250) bereits Schichtdicken von etwa 1 bis $10\text{ }\mu\text{m}$ abgetragen, es verbleibt eine klare, glatte, völlig neue Oberfläche.

Da Laugen ebenfalls Glas abtragen, gibt es auch den alkalisch geführten Ätzprozeß, der jedoch erheblich weniger wirksam ist.

3. Mechanische Eigenschaften

3.1 Viskosität

Zwischen Schmelztemperatur und Zimmertemperatur durchlaufen Gläser einen Zähigkeitsbereich von 15–20 Zehnerpotenzen und unterliegen innerhalb dieses Bereiches drei verschiedenen thermodynamischen Zuständen:

1. Bereich der Schmelze – oberhalb Liquidustemperatur
2. Bereich der unterkühlten Schmelze – zwischen Liquidus- und Einfriertemperatur
3. Eingefrorene Schmelze – „Glasbereich“, unterhalb Einfriertemperatur (~ Transformationstemperatur)

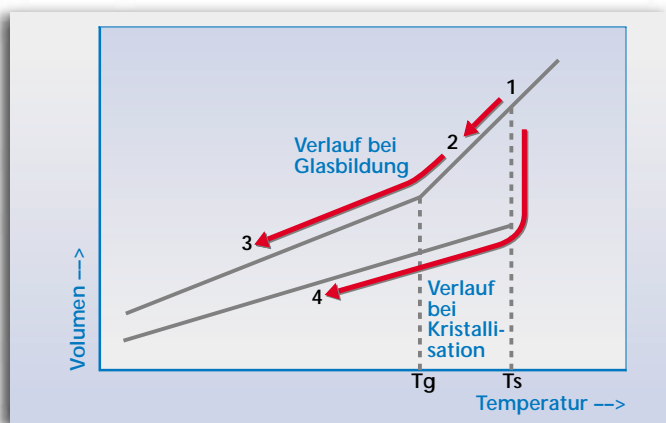


Abb. 4 Temperaturabhängigkeit des Volumens bei Kristallisation und Glasbildung (schematisch):

1: Flüssigkeit, 2: unterkühlte Flüssigkeit, 3: Glas, 4: Kristall.

T_s : Schmelztemperatur, T_g : Transformationstemperatur.

Wesentlich für die Glasbildung ist das Ausbleiben jeder merklichen Kristallisation im Bereich der unterkühlten Schmelze (2). Damit ergibt sich in allen Temperaturbereichen eine grundsätzlich stetige Änderung der Zähigkeit als Charakteristikum für Glas (Abb. 5).

Für die Herstellung von Gläsern ist die jeweilige Temperaturabhängigkeit der Viskosität (siehe Abb. 6) die maßgebliche Eigenschaft.

Schmelzprozeß und Läuterung (Homogenisierung) müssen allgemein bei ≤ 200 dPa·s ablaufen, bei niedrig schmelzenden Gläsern kann 1 dPa·s erreicht werden.

Die für Gläser typischen Verarbeitungsverfahren, wie Blasen, Pressen, Ziehen, Walzen, erfordern Zähigkeiten im Bereich 10^3 – 10^7 dPa·s. Als Charakteristikum für die Temperaturlage dieses „Verarbeitungsbereiches“ wird allgemein die Temperatur für 10^4 dPa·s als **Verarbeitungspunkt** (working point) gemessen (ISO 7884-1) und angegeben (Tabelle 12). Je nach Größe des Temperaturintervalls zwischen 10^3 und 10^7 dPa·s unterscheidet man zwischen „langen“ (große Temperaturdifferenz, geringe Kurvenneigung) und „kurzen“ Gläsern.

Im Bereich des **Erweichungspunktes** (softening point) verformen sich die Glasartikel rasch unter ihrem Eigengewicht (Formgebung durch „Senken“), werden Glaspulver porös oder dicht gesintert und Gläser glasbläserisch verformt. Den Erweichungspunkt charakterisieren wir durch diejenige Temperatur, bei der das Glas eine Zähigkeit von $10^{7,6}$ dPa·s aufweist (Meßverfahren: ISO 7884-3).

Etwa oberhalb 10^{10} dPa·s erweist sich die Zähigkeit zunehmend als zeitabhängig. Die hierfür maßgebliche Verzögerung bei der Einstellung struktureller Gleichgewichte wird mit weiterer Zähigkeitssteigerung (= Temperaturabnahme) schließlich so groß, daß man die Glasstruktur im Bereich 10^{13} dPa·s unter normalen Abkühlbedingungen als erstarrt oder „eingefroren“ bezeichnen kann. Das geringe Fließvermögen bei dieser Zähigkeit reicht gerade noch aus, um bei Wartezeiten von 15 min innere Spannungen im Glas auszugleichen. Andererseits ist seine Formstabilität für viele Zwecke bereits hinreichend und das Sprödverhalten (Rißempfindlichkeit) nahezu voll ausgebildet. Das Glas befindet sich im Transformationsbereich, was bei vielen seiner Eigenschaften durch eine Richtungsänderung der Temperaturabhängigkeit angezeigt wird. So dient die Änderung im Anstieg des Längenausdehnungskoeffizienten zur Kennzeichnung des Transformationsbereiches durch die **Transformations-temperatur T_g** nach ISO 7884-8 (Abb. 12).

Bei der so bestimmten Transformationstemperatur weisen die meisten Gläser Zähigkeiten im Bereich von 10^{12} bis $10^{13,5}$ dPa·s auf. Der „ 10^{13} -Temperatur“, bei der das Glas

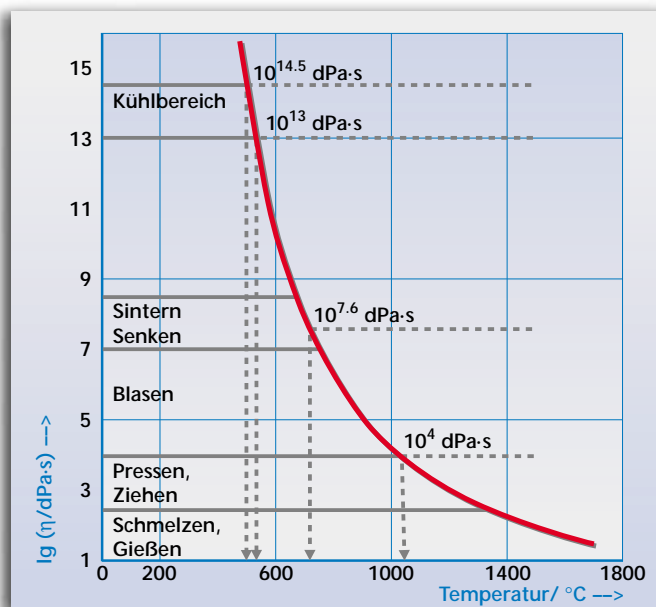


Abb. 5 Prinzipieller Verlauf der Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit eines Glases; Zähigkeitsbereiche wichtiger Verarbeitungstechniken und Lage von Zähigkeitsfixpunkten.

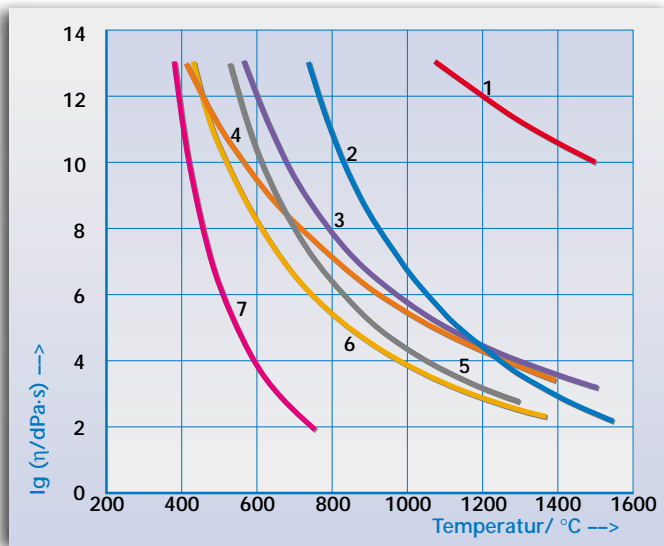


Abb. 6 Temperaturabhängigkeit der Viskosität einiger wichtiger technischer Gläser 1: Kieselglas, 2: 8409, 3: 8330, 4: 8248, 5: 8350, 6: 8095, 7: 8465. Gläser mit steilem Kurvenverlauf (7) werden als kurze, solche mit relativ flachem Verlauf (4) als lange Gläser bezeichnet.

eine Zähigkeit von 10^{13} dPa·s hat (Meßverfahren: ISO 7884-4), kommt als **Oberem Kühlpunkt** (annealing point) maßgebliche Bedeutung bei der Entspannung der Gläser nach deren Heißverformung zu. Sie markiert die Obergrenze des sog. Kühlbereiches, bei der innere Spannungen binnen Minuten abgebaut werden. Die Untergrenze des Kühlbereiches wird durch den **Unteren Kühlpunkt** (strain point) gebildet, bei dem das Glas eine Zähigkeit von $10^{14,5}$ dPa·s aufweist (Bestimmung: Extrapolation aus der Zähigkeits/Temperaturkurve). Der Untere Kühlpunkt liegt bei den meisten Gläsern ca. 30K bis 40K unterhalb des Oberen Kühlpunktes. Der Abbau innerer Spannungen benötigt hier bereits 3–5 Stunden, weswegen einerseits unterhalb dieser Temperatur schneller gekühlt werden kann, ohne daß neue Spannungen eingefroren werden, andererseits markiert der Untere Kühlpunkt den Maximalwert kurzzeitiger Temperatur-Belastung. Thermisch vorgespannte Gläser verlieren dagegen ihre Spannungen mit merklicher Geschwindigkeit bereits 200–300K unterhalb Tg. Für Gläser höchster Formtreue (z.B. Endmaße) sowie bei extremen Forderungen an die Konstanz gewisser Glaseigenschaften können die maximalen Gebrauchstemperaturen bereits mit 100 bis 200 °C begrenzt sein.

3.2 Festigkeit

Die hohe strukturelle Festigkeit von Gläsern und Glaskeramiken ($> 10^4$ N/mm²) ist ohne praktische Bedeutung, weil die Festigkeit realer Glasartikel durch gebrauchsb-

dingte Oberflächendefekte bestimmt wird: Durch Kontakt mit harten Werkstoffen entstehen nämlich an der Oberfläche von Glas- und Glaskeramikartikeln leicht Oberflächenverletzungen in Form feiner Kerben und Risse, an deren Spitzen bei mechanischen Belastungen kritische Spannungsüberhöhungen auftreten können, die zum Bruch der Artikel führen.

In duktilen Werkstoffen wie z.B. Metallen können diese Spannungsüberhöhungen durch plastisches Fließen abgebaut werden. Gläser und Glaskeramiken verhalten sich dagegen spröde wie Keramiken: bei „gebrauchstypischen“ Temperaturen und Belastungszeiten zeigen sie kein plastisches Fließen, durch das sich die Spannungsüberhöhungen an den Korb- und Reißspitzen abbauen können.

Hinsichtlich der Festigkeit sind damit die Oberflächenverletzungen bei Glas- und Glaskeramikartikeln von besonderer Bedeutung.

Oberflächenzustand

Infolge der gebrauchsbewingten Oberflächendefekte bewegt sich die praktische Zugfestigkeit von Glas- und

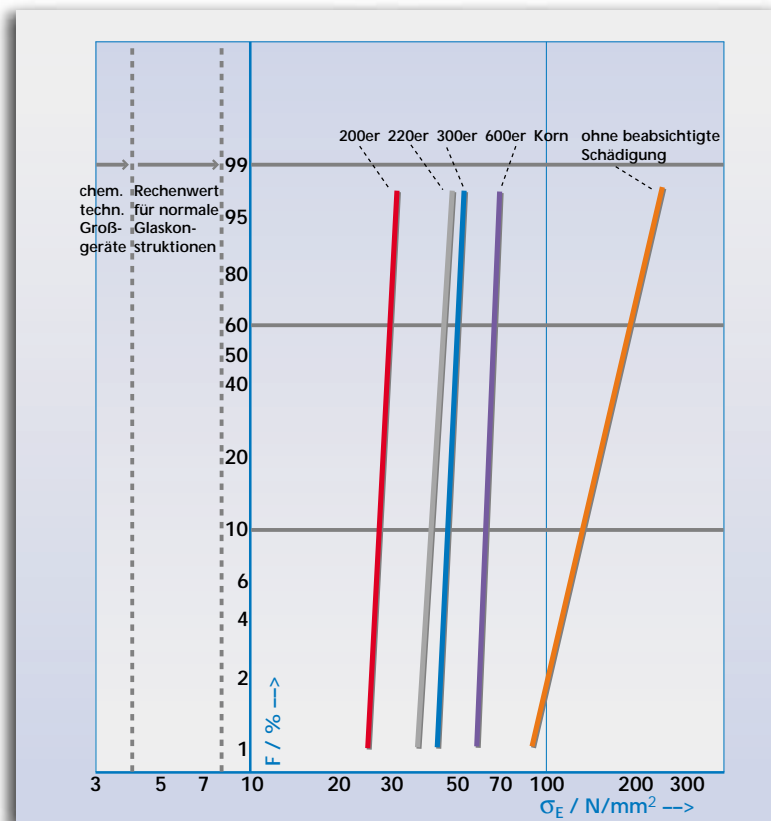


Abb. 7 Abhängigkeit der Verteilungsfunktion (Ausfallwahrscheinlichkeit F) bei Vorschädigung mit verschiedenem Korn für eine belastete Fläche von 100 mm² und einer Spannungsanstiegsrate $\dot{\sigma} = 10$ N/(mm²·s).

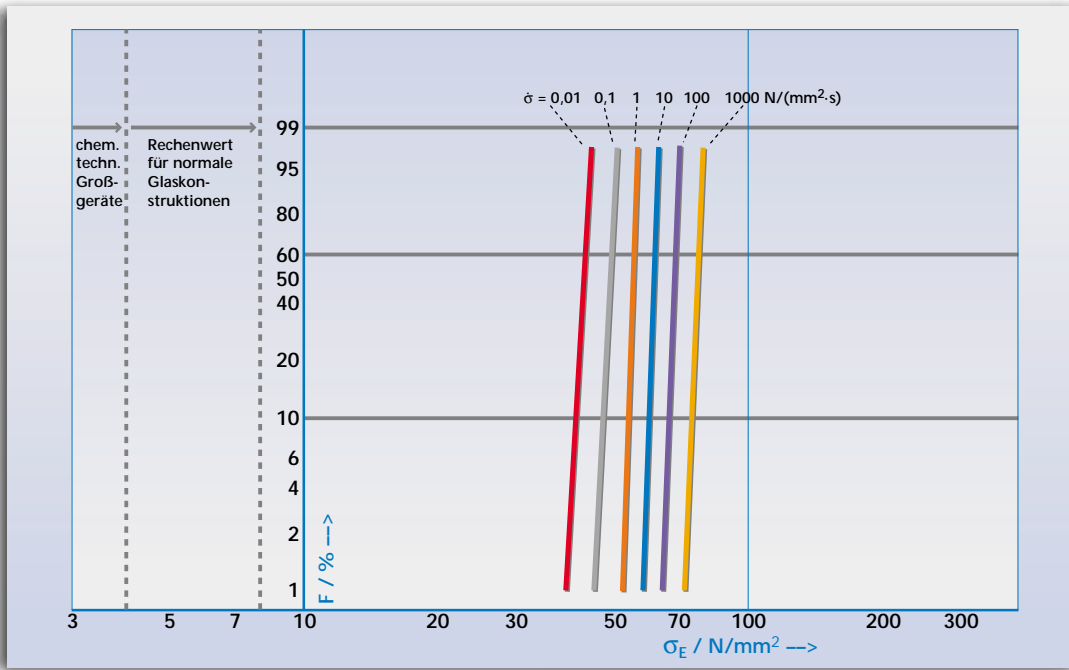


Abb. 8 Abhängigkeit der Verteilungsfunktion (Ausfallwahrscheinlichkeit F) bei unterschiedlichen Spannungsanstiegsraten $\dot{\sigma}$ für eine Vorschädigung mit 600er Korn und einer belasteten Fläche von 100 mm².

Glaskeramikartikeln im Bereich von 20–200 N/mm², je nach Oberflächenzustand (Abb. 7) und Belastungsbedingungen. Dabei findet man für Silicatgläser nur eine geringe, in der Regel vernachlässigbare Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung.

Belastungsgeschwindigkeit

Bei der Prüfung und Anwendung von Zugfestigkeitswerten erweisen sich besonders Belastungsgeschwindigkeit und Größe der maximal angestregten Glasfläche als bedeutsam. Im Gegensatz zum schnellen Spannungsanstieg, wie er beispielsweise beim Stoß vorliegt, können bei langsamer Zugspannungszunahme oder bei Dauerbelastung von Gläsern oberhalb gewisser Grenzwerte kritische Oberflächenverletzungen und Risse infolge Spannungsrißkorrosion weiterlaufen und damit ihre Kerbwirkung steigern. Dadurch entsteht eine Zeitabhängigkeit der Zugfestigkeit sowie eine Abhängigkeit von der Lastanstiegsrate – vornehmlich wichtig bei Prüfbelastungen – wie sie in Abb. 8 dargestellt ist. Unabhängig von Oberflächenschädigungen bzw. Ausgangszugfestigkeit führt hiernach ein Anstieg der Belastungsgeschwindigkeit um eine Zehnerpotenz zur Festigkeitssteigerung um ca. 15%.

Dauerbelastung

Bruchmechanische Analysen über die Wirkung und das Verhalten von Rissen in Gläsern und Glaskeramiken ermöglichen weitere Aussagen über den Zusammenhang von einer experimentell ermittelten Zugfestigkeit σ_E , die

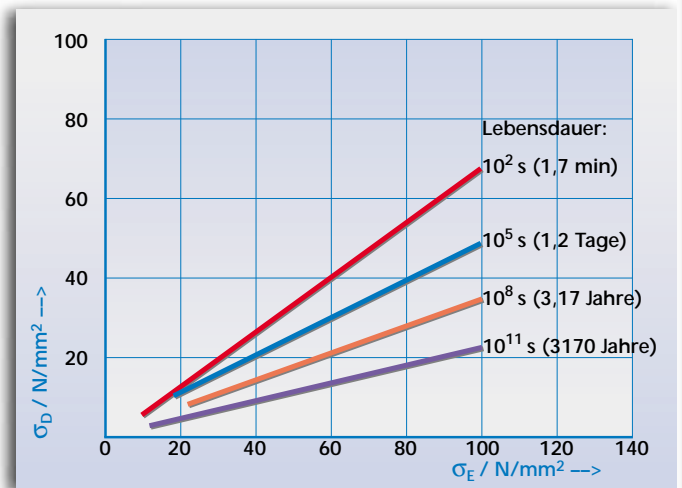


Abb. 9 Zeitstandfestigkeit σ_D (Festigkeit bei Dauerbelastung) in Abhängigkeit von der experimentellen Festigkeit σ_E bei 10 N/(mm².s) Spannungsanstieg mit der Lebensdauer t_L als Parameter in normaler Luftfeuchte (Natron-Kalk-Glas).

normalerweise bei rasch zunehmender Belastung gemessen wird, mit der bei Dauerbelastung zu erwartenden Zugfestigkeit (= Zeitstandfestigkeit) σ_D (Abb. 9).

Je nach Glasart kann hiernach als Festigkeit für Dauerbelastung σ_D (Belastung über Jahre) nur etwa 1/2 bis 1/3 der experimentellen Zugfestigkeit σ_E in Rechnung gestellt werden.

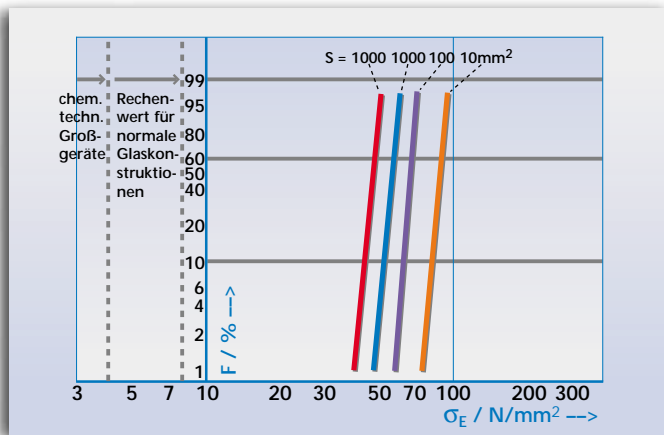


Abb. 10 Abhängigkeit der Verteilungsfunktion (Ausfallwahrscheinlichkeit F) bei verschiedenen Größen S der belasteten Fläche: Vorschädigung aller Flächen mit 600er Korn, Spannungstiegsrate $\sigma = 10 \text{ N/(mm}^2 \cdot \text{s)}$.

Flächeneinfluß

Mit Vergrößerung der belasteten Fläche erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen großer Fehler (großer Rißstiefen) innerhalb des belasteten Flächenbereiches. Dies ist wichtig bei der Übertragung von experimentellen Zugfestigkeiten, die zumeist an relativ kleinen Meßproben ermittelt werden, auf praktische Glaseinsatzgebiete, wie z.B. von Rohrleitungen, bei denen viele Quadratmeter Glas gleichmäßig angestrengt werden können (Abb. 10).

Festigkeitssteigerung

Die für Zugbelastungen entscheidenden Oberflächen-defekte sind unwirksam, wenn Gläser Druckbelastungen unterworfen werden. Die Druckbelastbarkeit von Gläsern liegt so hoch, daß technische Anwendungen von Glas durch sie praktisch nicht begrenzt werden.

Diese hohe Druckbelastbarkeit von Glasoberflächen wird zur Festigkeitssteigerung durch sogenanntes Vorspannen (fälschlich auch als Härten bezeichnet) ausgenützt. Hierbei werden in Glasartikeln mit geometrisch einfachen Formen, wie z.B. in Flachglas und Maxos® Sicherheits-Schaugläsern,

Maxos® Sicherheits-Schaugläser aus chemisch hochbeständigem Borosilicatglas.

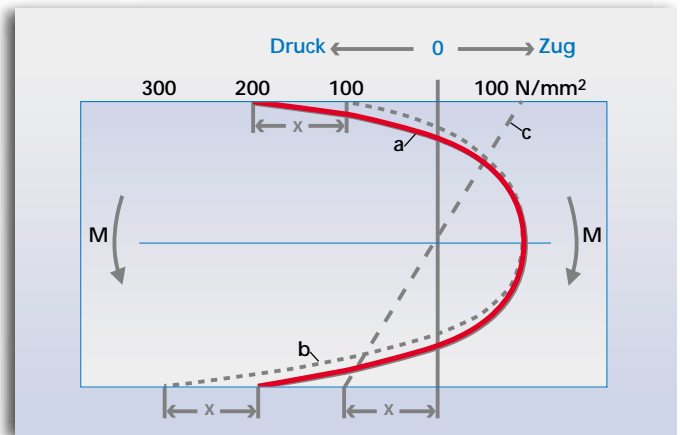


Abb. 11 Spannungsverteilung über die Dicke in thermisch vorgespanntem Flachglas (a) ohne, (b) mit zusätzlicher Biegebelastung M ; (c) Spannungsverteilung bei Biegung ohne Vorspannung.

Eigenspannungen erzeugt, welche die gesamte Artikeloberfläche unter gleichmäßige Druckspannung setzen und eine entsprechende Reaktionszugspannung im Inneren des Glases zur Folge haben.

Solche Eigenspannungen können durch Schnellkühlung (Abschrecken) des erweichten Glases (Abb. 11) oder in hierfür geeigneten Gläsern durch Ionenaustausch in einer ca. 50 bis 200 μm dicken Oberflächenschicht eingebracht werden. Bei späterer Zugbelastung so vorgespannter Gläser kann bis zur Höhe der Oberflächendruckspannung mit der Zugspannung = 0 gerechnet werden, d.h. Oberflächenbeschaffenheit und Belastungszeit sind für Zuganstrengungen innerhalb der Druckvorspannung ohne Einfluß.



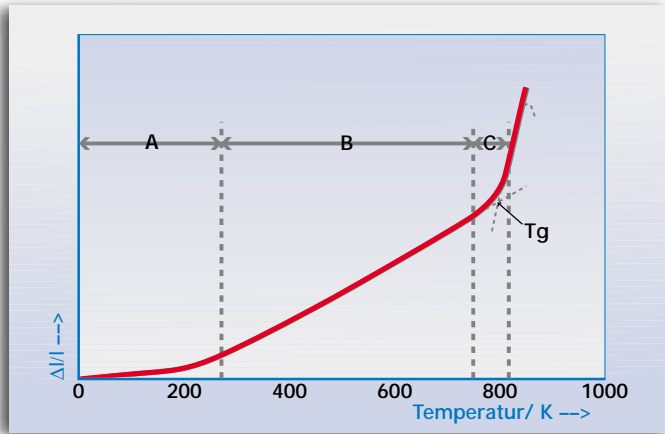


Abb. 12 Prinzipieller Verlauf der Wärmedehnung von Gläsern.

3.3 Elastizität

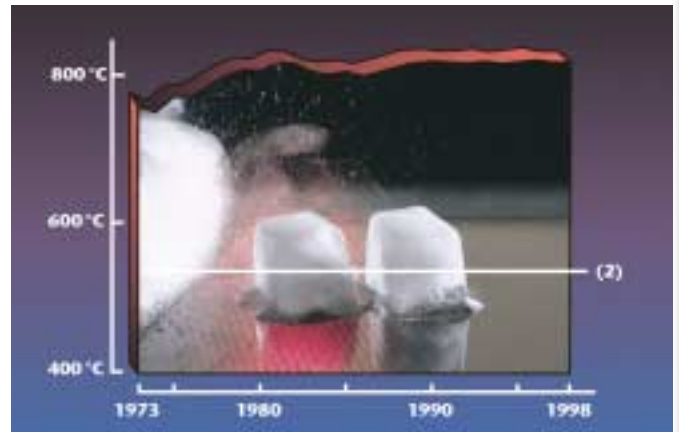
Das ideale Sprödverhalten von Gläsern und Glaskeramiken bedingt ebenso ein ideal elastisches Verhalten bis zum Brucheintritt. Die Elastizitätsmodulen für die meisten technischen Gläser liegen bei 50–90 kN/mm². Der Schwerpunkt dieses Bereichs von 70 kN/mm² stimmt etwa mit dem Elastizitätsmodul von Aluminium überein.

3.4 Thermischer Längenausdehnungskoeffizient

Abgesehen von wenigen Ausnahmen nehmen Länge und Volumen der Gläser mit steigender Temperatur zu (positiver Koeffizient).

Der typische Verlauf beginnt mit einer Steigung = Null beim absoluten Nullpunkt (Abb.12); hiernach folgt eine deutliche Steigungszunahme bis etwa Raumtemperatur (Abschnitt A) und eine abgeschwächte Steigungszunahme bis zum Beginn experimentell merklichen plastischen Verhaltens (Abschnitt B = quasi linearer Bereich). Eine deutliche Krümmung der Ausdehnungskurve kennzeichnet den Übergang vom vornehmlich elastischen zum mehr plastischen Verhalten des Glases (Abschnitt C = Transformationsbereich). Infolge zunehmender Strukturbeweglichkeit zeigen hier die Temperaturabhängigkeiten nahezu aller Glaseigenschaften eine deutliche Änderung. Dieser Transformationsbereich wird gekennzeichnet durch die Transformationstemperatur T_g nach ISO 7884-8.

Abb. 13 zeigt thermische Längenänderungskurven von fünf Gläsern, von denen 8330 und 4210 etwa den normalen Bereich technischer Gläser mit den Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_{(20^\circ\text{C}; 300^\circ\text{C})} = 3,3 - 12 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ abgrenzen. Als wesentliche Einflußgröße für die Verschmelzbarkeit mit anderen Werkstoffen sowie für die Ausbildung von thermisch induzierten Spannungen hat die thermische Längenausdehnung für Glas eine vorrangige Bedeutung.



Demonstration der Abschreckfestigkeit von Glaskeramik.

Verschmelzanpassung

Von praktischer Wichtigkeit für „Verschmelzanpassungen“ ist, daß Gläser im bereits stark gekrümmten Kurventeil des Transformationsgebietes einfrieren (Abb. 14) und daß diese Einfriertemperatur T_E sich mit steigender Abkühlgeschwindigkeit zu höheren Temperaturen verschiebt. Voraussagen für die bei Verschmelzungen maßgebliche Längenkontraktion des Glases setzen Kenntnisse des Kurvenverlaufs sowie der fiktiven Einfriertemperatur T_E für die jeweilige Kühlgeschwindigkeit voraus. Eine einfachere und vielfach genauere Möglichkeit zur Prüfung von Verschmelzanpassungen ermöglicht die spannungsoptische Vermessung von Probeverschmelzungen unter praxisnahen Kühlgeschwindigkeiten (ISO 4790).

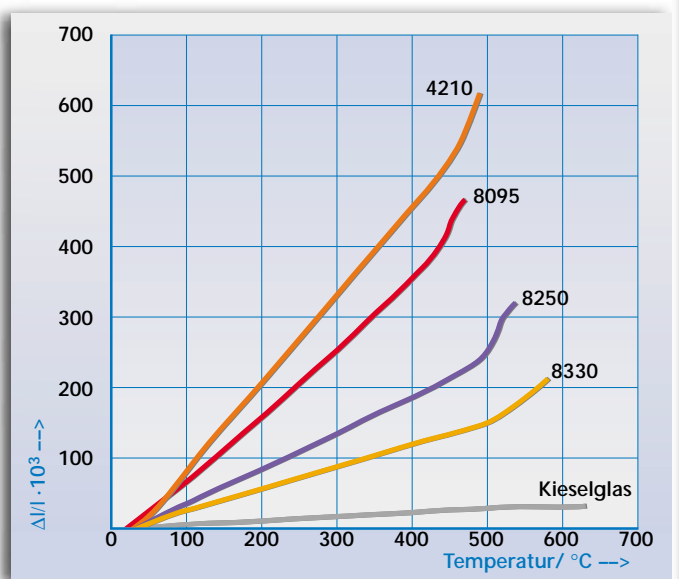


Abb. 13 Lineare thermische Ausdehnung verschiedener technischer Gläser und Kieselglas.

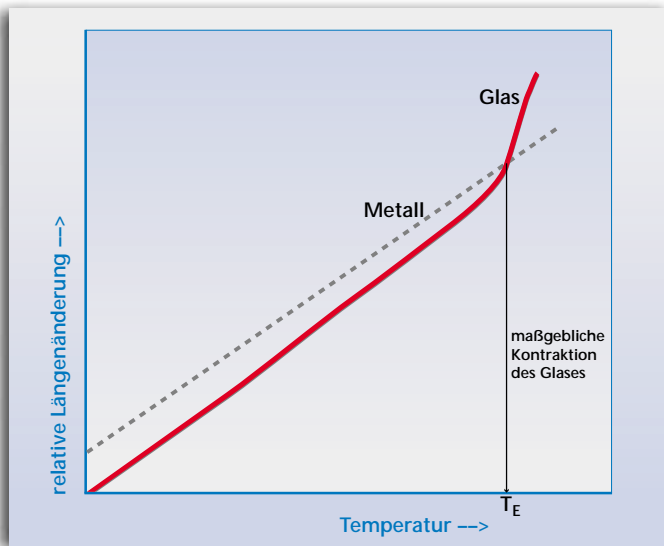


Abb. 14 Kontraktionskurven zweier Verschmelzpartner. Die Kurve des Metalls ist so eingezeichnet, daß sie die Glaskurve im Einfriertpunkt T_E des Glases schneidet. Damit verkörpert der vertikale Abstand beider Kurven die Kontraktionsdifferenz vorzeichengerecht bei Temperaturen unterhalb T_E .

Thermisch induzierte Spannungen

Infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit (typisch $0,9\text{--}1,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei 90°C , hochbleihaltige Gläser bis minimal $0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) bedingen Temperaturänderungen im Glas relativ hohe Temperaturunterschiede ΔT , die je nach den elastischen Eigenschaften E (Elastizitätsmodul) und μ (Querkontraktionszahl) sowie dem Längenausdehnungskoeffizienten α Spannungen σ der Höhe von

$$\sigma = \frac{\Delta T \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)}$$

zur Folge haben können. Für die thermische Belastbarkeit von Gläsern durch Temperaturunterschiede bzw. Temperaturwechsel sind neben den Geometriefaktoren für Artikelform und -wandstärke die Stoffeigenschaften α , E und μ von maßgeblicher Bedeutung. Besonders für Vergleiche von thermischen Belastungen gleicher Artikel aus verschiedenen Gläsern dient der Stoffkennwert

$$\varphi = \frac{\sigma}{\Delta T} = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \text{ in } \text{N}/\text{mm}^2\text{K},$$

der die maximal zu erwartende thermisch induzierte Spannung in einem biegesteifen Glasstück für einen örtlichen Temperaturunterschied von 1 K angibt. Mit Rücksicht darauf, daß Brüche in Gläsern nahezu aus-



Pyran® Brandschutzglas widersteht dem Feuer, ohne zu zerspringen.

schließlich von der Oberfläche ausgehen und dort allein durch Zugspannungen ausgelöst werden, erweisen sich Abkühlvorgänge allgemein als sehr viel gefährlicher gegenüber gleichmäßiger rascher Erhitzung von Glasartikeln.

4. Elektrische Eigenschaften

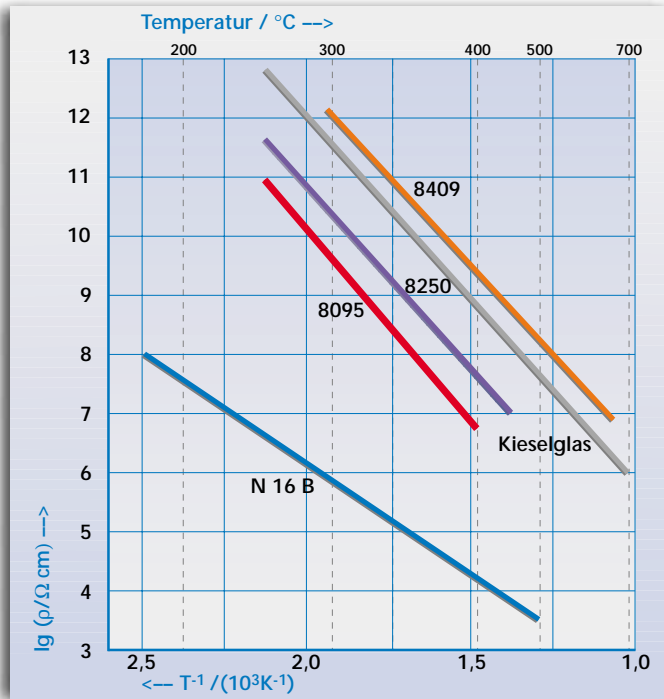


Abb. 15 Elektrischer Volumenwiderstand verschiedener technischer Gläser, sowie Kieselglas (Heraeus) in Abhängigkeit von der reziproken absoluten Temperatur.

Als elektrisch hochisolierende Werkstoffe werden Gläser in der Elektrotechnik und Elektronik für Hochvakuumröhren, Lampen, Stromdurchführungen, hermetisch gekapselte Bauteile, Hochspannungsisolatoren u.a. Anwendungen eingesetzt. Darüber hinaus finden Gläser als isolierende Träger elektrisch leitender Oberflächenschichten Verwendung (Flächenheizleiter, Datensichtgeräte).

4.1 Volumenwiderstand

Der Stromtransport in technischen Silicatgläsern erfolgt allgemein durch Wanderung von Ionen, vornehmlich durch Alkali-Ionen. Bei Raumtemperatur ist die Beweglichkeit dieser Ionen zumeist so klein, daß die Volumenwiderstände mit Werten $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ außerhalb der Meßmöglichkeiten liegen. Mit der Temperatur steigt die Ionenbeweglichkeit, wobei neben Anzahl und Art der Ladungsträger auch strukturelle Wirkungen sonstiger Komponenten auf Volumenwiderstand und dessen Abhängigkeit von der Temperatur einwirken. Für Temperaturen unterhalb Transformationsbereich gilt für diese Abhängigkeit das Gesetz von Rasch und Hinrichsen:

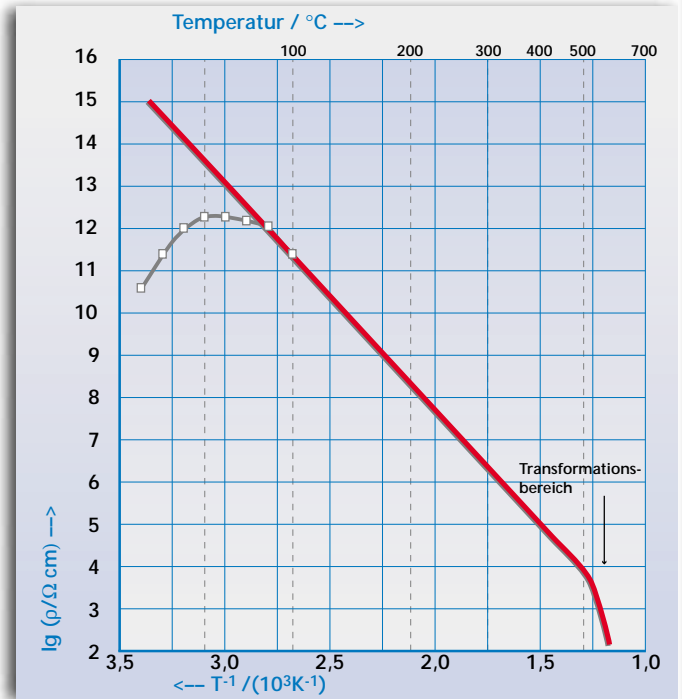


Abb. 16 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands ρ eines Natron-Kalk-Glases
a) ohne Wasserhaut, b) mit Wasserhaut.

$$\lg \rho = A - \frac{B}{T}$$

ρ = Maßzahl des spez. elektr. Volumenwiderstandes
A, B = glasspezifische Konstanten
T = absolute Temperatur

Die graphische Darstellung von $\log \rho = f(1/T)$ liefert somit Geraden (Abb. 15). Wegen der relativ geringen Neigungsunterschiede dieser Geraden für die meisten Gläser wird die elektrische Isolation von Gläsern oft allein durch die Temperatur bei $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ charakterisiert; diese Temperatur wird nach DIN 52 326 mit T_{k100} bezeichnet. International üblich ist die Angabe spezifischer Volumenwiderstände für 250 und 350 °C, aus denen sich die Konstanten A und B und beliebige andere Werte unterhalb T_g berechnen lassen.

4.2 Oberflächenwiderstand

Die allgemein bei Raumtemperatur vorliegenden hohen Volumenwiderstände von Gläsern werden in normaler Luft von Oberflächenwiderständen überdeckt, die um mehrere Zehnerpotenzen tiefer liegen (Abb. 16). Maßgeblich hierfür ist die Adsorption von Wasser an der Glasoberfläche, was je nach Glasart zu spezifischen Oberflächenwiderständen von 10^{13} – $10^{15} \Omega$ bei geringen relativen

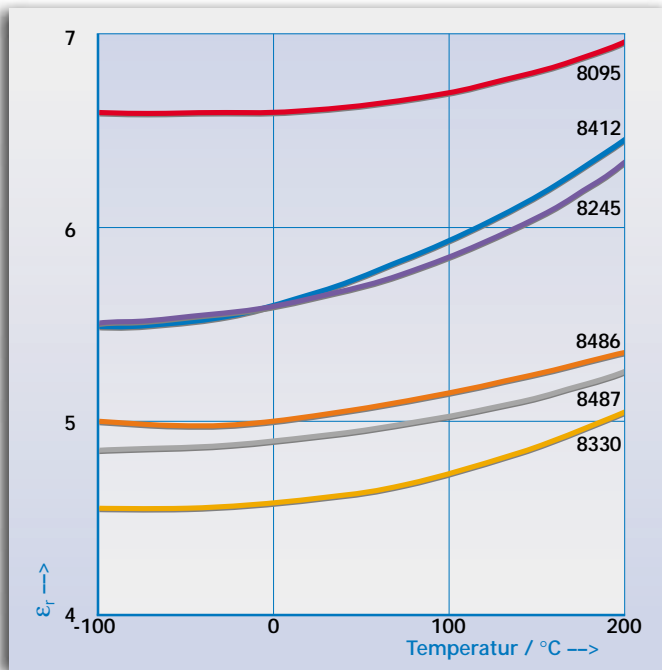


Abb. 17 Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl ϵ_r der elektronischer Gläser, gemessen bei 1 MHz.

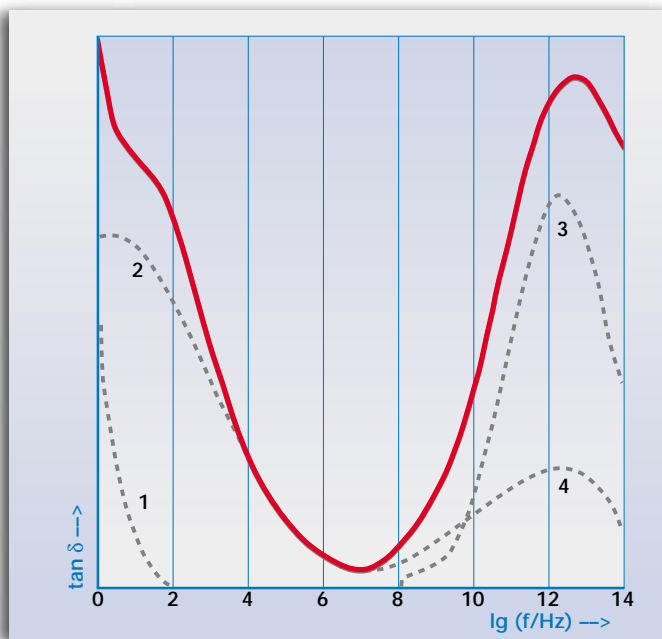


Abb. 18 Schematische Darstellung des Frequenzspektrums der dielektrischen Verluste in Glas für Raumtemperatur (nach Stevels). Die voll ausgezogene Kurve gibt die Gesamtverluste an, von denen angenommen werden kann, daß sie aufgebaut sind aus 1. den Leitungsverlusten, 2. den Relaxationsverlusten, 3. den Vibrationsverlusten und 4. den Deformationsverlusten.

Feuchten und 10^8 – $10^{10} \Omega$ bei hohen relativen Feuchten führen kann. Oberhalb 100 °C verschwindet die Wirkung der Wasserhaut nahezu vollständig. Durch Behandlung mit Siliconen läßt sich diese Wasserhautwirkung wesentlich verringern.

Elektrisch leitfähige und transparente Schichten auf Glas lassen sich durch halbleitende Oxide z.B. von Zinn und Indium herstellen; Bereich der Oberflächenwiderstände: 30–100 Ω .

4.3 Dielektrische Eigenschaften

Die Dielektrizitätszahl ϵ_r beschreibt die relative Kapazitätserhöhung beim Einführen eines polarisierbaren Dielektrikums in einem zuvor im Vakuum befindlichen Kondensator. Mit Dielektrizitätszahlen von allgemein 4,5 bis 8 verhalten sich technische Gläser analog anderen elektrotechnischen Isolierstoffen. Höchste Werte erreichen bleihaltige Gläser, wie 8531 ($\epsilon_r = 9,5$) und höchstbleihaltige Glaslote mit ϵ_r ca. 20. Die Abhängigkeiten der ϵ_r von Frequenz und Temperatur (Abb. 17) sind relativ gering. Von 50 bis 10^9 Hz ändern sich ϵ_r -Werte allgemein um nicht mehr als 10%.

Umpolung und Verlagerung von Dipolen in einem Dielektrikum, welches sich in einem elektrischen Wechselfeld befindet, führen zu dessen Erwärmung und damit einer Verlustleistung gegenüber der angestrebten verlustfreien Blindleistung. Das von Stoffart, Frequenz und Temperatur abhängige Verhältnis von Verlust- und Blindleistung wird als dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ bezeichnet.

Infolge verschiedener Mechanismen für die Entstehung solcher Verluste ergibt sich für Gläser eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit mit dem Minimum für $\tan \delta$ im Bereich 10^4 – 10^8 Hz sowie Anstiegen zu kleineren und größeren Frequenzen (Abb. 18).



Nahaufnahme der Vorderfront eines Ozongenerators, innen.



Wichtig für die Funktionsfähigkeit der Elektronik: Glas-Metall-Komponenten für Airbag und Gurtstraffer.

Für 10^6 Hz liegen die Verlustfaktoren bei Gläsern im Bereich 10^{-2} bis 10^{-3} , geringste Verluste zeigt Kieselglas mit 10^{-5} . Relativ geringe Verluste und nur geringe Zunahme von $\tan \delta$ bis 5,5 GHz ($\tan \delta = 3 \cdot 10^{-3}$) zeigt das Spezialglas 8248.

Der steile Anstieg von dielektrischen Verlusten mit der Temperatur (Abb. 19) kann bei behinderter Wärmeabfuhr und entsprechender elektrischer Leistung zur Instabilität, d.h. zur Überhitzung des Glases durch Verlustwärme führen.

4.4 Durchschlagsfestigkeit

Gläser, die frei von Inhomogenitäten wie Blasen und Fremdeinschlüssen sind, erweisen sich als dielektrisch hochfest und übertreffen vielfach porenbehaftete Elektrokeramiken.

Bei Gläsern ist die Durchschlagsfestigkeit abhängig von der Frequenz, der Geschwindigkeit des Spannungsanstieges, von der Temperatur, der Glaszusammensetzung sowie von den äußeren Versuchsbedingungen. Weiterhin nimmt die Durchschlagsfeldstärke mit abnehmender Glasdicke erheblich zu, was auf den Wärmedurchschlag (wechselweise Steigerung von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit) als bevorzugten Durchschlagsmechanismus hinweist. „Kalte“ Durchschläge, ausgelöst durch plötzliche Ausbildung einer Elektronenlawine, sind dagegen technisch unbedeutend.

Als konstruktive Richtwerte für die Durchschlagsfestigkeit von Glas können bei 50 Hz und 20 °C für Dicken von

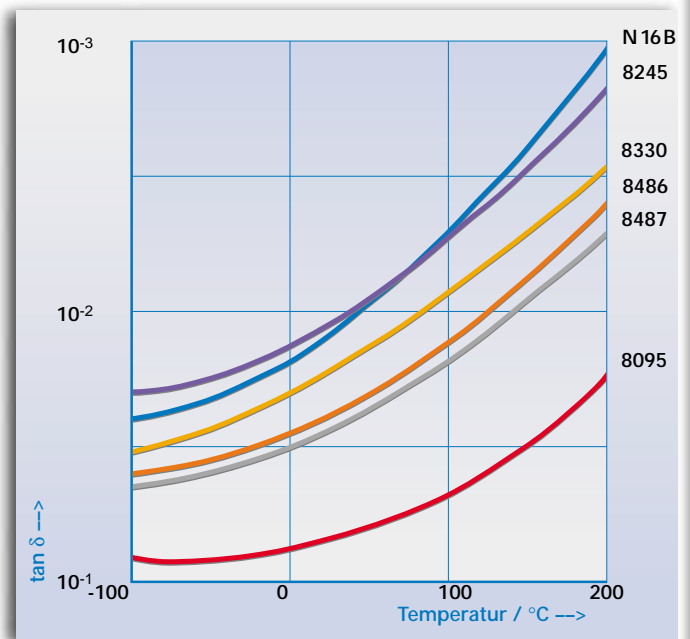


Abb. 19 Temperaturabhängigkeit des Verlustfaktors $\tan \delta$ bei 1 MHz im Temperaturbereich von -100 bis +200 °C.

1 mm Feldstärken von 20–40 kV/mm und bei größeren Glasdicken 10–20 kV/mm angenommen werden. Bei höheren Temperaturen und Frequenzen ist mit Absinken der Werte zu rechnen.

5. Optische Eigenschaften

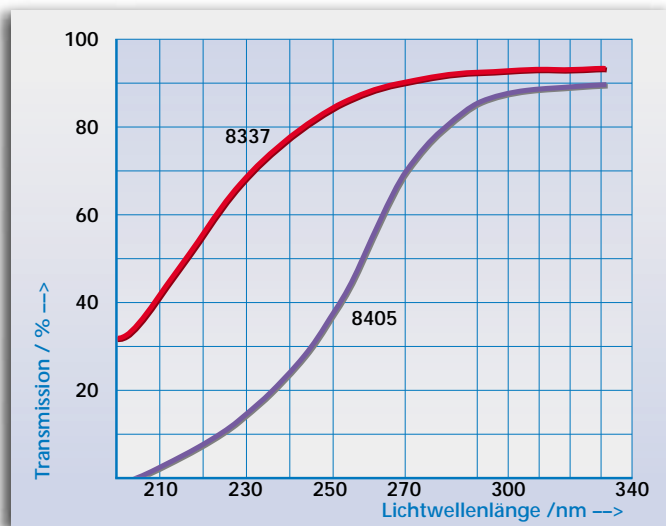


Abb. 20 UV-Transmission speziell UV-durchlässiger technischer Gläser 8337 und 8405 für 1 mm Glasdicke.

5.1 Lichtbrechung

Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu der in einem bestimmten Stoff wird als Brechzahl n_λ dieses Stoffes bezeichnet. Die Brechzahl von Gläsern hängt von der Wellenlänge λ ab (Dispersion, für rein optische Anwendungen entscheidend).

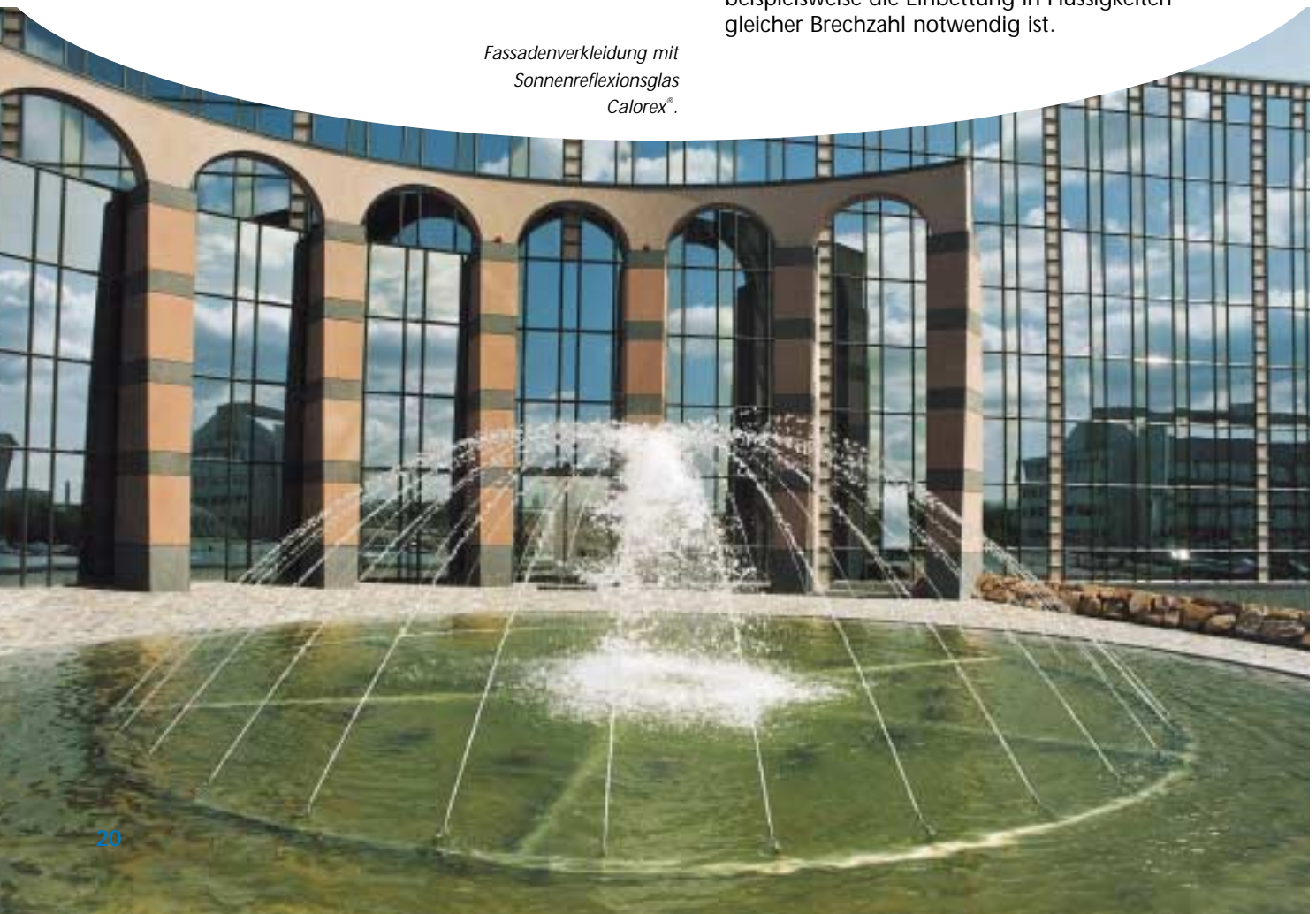
Die für technische Gläser genannten Brechzahlen n_d gelten für $\lambda_d = 587,6$ nm und liegen allgemein im Bereich 1,47 – 1,57. Ausnahmen bilden Gläser mit PbO-Gehalten > 35% (8531: $n_d = 1.7$). Die Hauptdispersion $n_F - n_C$ ($\lambda_F = 486,1$ nm, $\lambda_C = 656,3$ nm) technischer Gläser liegt im Bereich 0,007 bis 0,013.

Für Ein- und Austritt senkrecht einfallenden Lichtes berechnet sich das Reflexionsvermögen R nach

$$R_d = \left(\frac{n_d - 1}{n_d + 1} \right)^2$$

zu 0,036–0,049, das bedeutet im Mittel eine Schwächung von 8% infolge Reflexionsverlusten beim senkrechten Durchgang durch eine Glasplatte. Reflexion kann – besonders bei schrägem Lichteinfall – die Durchsicht von Glasteilen erheblich stören oder auch ausschließen, so daß bei spannungsoptischen Untersuchungen beispielsweise die Einbettung in Flüssigkeiten gleicher Brechzahl notwendig ist.

Fassadenverkleidung mit
Sonnenreflexionsglas
Calorex®.



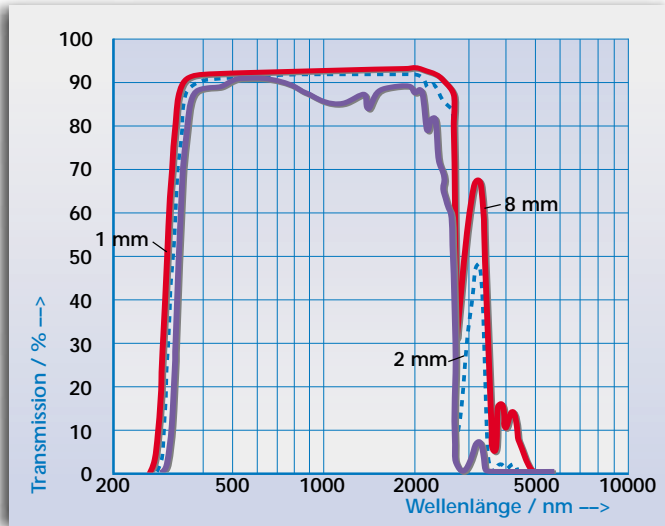


Abb. 21 Transmission von Duran® 8330 für 1, 2 und 8 mm Glasdicke.

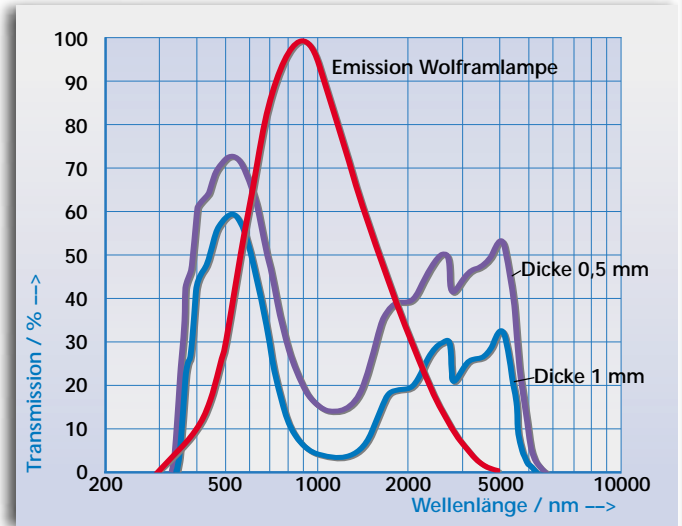


Abb. 22 IR-Absorption Fe-dotierter Gläser im Vergleich zur Emission von Halogenleuchtampen. Transmission von Reedglas 8516 verschiedener Dicken, sowie der Emission einer Wolframlampe (3000 K, rel.).

5.2 Spannungsdoppelbrechung

Von seinem strukturellen Aufbau her ist Glas isotrop. Mechanische Spannungen erzeugen eine Anisotropie, die sich als Spannungsdoppelbrechung äußert: Ein auf Glas auftreffender Lichtstrahl wird in zwei senkrecht zueinander schwingende Komponenten mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit zerlegt. Nach dem Durchlaufen einer Scheibe der Dicke d , die der Hauptspannungsdifferenz $\Delta\sigma$ ausgesetzt ist, besteht zwischen beiden Komponenten ein optischer Gangunterschied Δs , der anhand der auftretenden Doppelbrechungsfarben geschätzt oder mit Kompensatoren gemessen werden kann:

$$\Delta s = K \cdot d \cdot \Delta\sigma$$

Hierbei ist K der spannungsoptische Koeffizient des Glases (Bestimmung festgelegt nach DIN 52 314).

$$K = \frac{\Delta s}{d} \cdot \frac{1}{\Delta\sigma} \text{ in } \frac{\text{nm}}{\text{nm}} \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{N}} = \frac{\text{mm}^2}{\text{N}}$$

Viele Gläser haben spannungsoptische Koeffizienten um $3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$, Borosilicatgläser bis $4 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$. Hoch PbO-haltige Gläser können Werte um Null und auch negative Werte aufweisen.

Spannungsoptische Messungen erlauben die Beurteilung der Glaseigenstressungen (Kühlzustand) sowie Glas-Reaktionsspannungen bei äußeren Krafteinwirkungen. Von besonderer Bedeutung sind spannungsoptische Messungen für die Bewertung von Glasverschmelzungen mit anderen Gläsern, Metallen oder Keramiken, durch die sich eine empfindliche Möglichkeit zur Bestimmung thermischer Ausdehnungs- und Kontraktionsdifferenzen bietet.

5.3 Lichtdurchlässigkeit

Im Normalfall ist Glas für sichtbares Licht durchlässig. Verluste entstehen vornehmlich durch Reflexion, wie oben angegeben. Diese Durchlässigkeit kann durch färbende Bestandteile (Oxide von Übergangselementen oder Kolloide, Farbgläser) oder durch feine Partikel im Glas mit unterschiedlicher Brechzahl (Lichtstreuung, Opalgläser) verringert sein.

Im Ultravioletten-Spektralbereich ist die Durchlässigkeit stark durch Absorption von Verunreinigungen, wie z.B. Fe_2O_3 , aber auch durch Hauptkomponenten, wie PbO , begrenzt. Die beste UV-Transmission zeigt reines Kieselglas (UV-Kante bei 1 mm Dicke im Bereich 160–180 nm); besonders UV-durchlässige Mehrkomponentengläser reichen bis etwa $0,22 \mu\text{m}$ Wellenlänge (Abb. 20); normale technische Gläser (Abb. 21) absorbieren bereits bei $0,3 \mu\text{m}$ erheblich.

Im Infraroten-Spektralbereich ist die Durchlässigkeit, außer durch absorbierende Verunreinigungen wie z.B. FeO , durch Absorption im Glas gelösten Wassers (Absorptionsband von $2,8\text{--}4,5 \mu\text{m}$) begrenzt. Ab ca. $4,5 \mu\text{m}$ bedingen die Si-O-Gitterschwingungen eine vollständige Absorption in Silicatgläsern.

Die im Bereich der Schwerpunktwellenlänge von Halogen-Wolframlampen liegende maximale FeO-Absorption kann mit FeO-Anteilen von 2–4 Gew.-% im Glas zur schmelztechnischen Verarbeitung von Gläsern, wie 8512 und 8516, durch IR-Strahlung als Wärmequelle genutzt werden (Abb. 22).

6. Chemisch resistente Borosilicatgläser



Ampullen und Fläschchen aus Neutralglasrohr.

Die in der Gruppe „Borosilicatgläser“ zusammengefaßten chemisch resistenten Glasarten enthalten neben einem hohen Prozentsatz an Kieselsäure (70–80%) nennenswerte Anteile an Borsäure (7–13%), außerdem neben Alkalioxiden (Na_2O , K_2O , 4–8%) noch Aluminiumoxid (2–7%) und gegebenenfalls Erdalkalioxide (CaO , BaO , 0–5%). Kennzeichnende Eigenschaften sind: hohe chemische Beständigkeit (hydrolytische Klasse 1, Säureklasse 1) sowie relativ geringe Wärmeausdehnungen, die hohe Temperaturbelastbarkeiten sowie die Herstellung großer, dickwandiger Bauteile aus diesen Gläsern ermöglichen.

Diese hervorragenden Eigenschaften von Borosilicatgläsern wurden von Otto Schott erkannt und durch großtechnische Schmelzen erstmalig genutzt (1892).

Chemisch resistente Borosilicatgläser weisen eine so hohe Säurebeständigkeit auf, daß selbst bei großen Oberflächen, wie 400 cm^2 , nach sechsständigem Kochen in 20%iger Salzsäure nur geringe Gewichtsverluste gemessen werden. Da die Meßgenauigkeit bei der Bestimmung der Gewichtsveränderung großflächiger Glasteile in die Größenordnung der Gewichtsverluste selbst kommt, ist ein sicherer Vergleich der verschiedenen Glasarten dieser Gruppe nicht möglich; die Werte zeigen in erster Linie die hohe Säurebeständigkeit an.

Andererseits gehören Silicatgläser mit höheren Borsäureanteilen (> 15%) zumeist nicht mehr zu den chemisch resistenten Glasarten, z.B. elektrotechnische Einschmelzgläser, wie 8245 oder 8250, die in die Säureklassen 4 bzw. 3 gehören.

Glasart	H Hydrolyt. Beständ. DIN ISO 719 Verbrauch ml 0,01 mol/L HCl	H Hydrolyt. Beständ. DIN ISO 720 Verbrauch ml 0,01 mol/L H_2SO_4	S Säure- Beständ. DIN 12 116 Gewichtsverl. mg/dm ²	L Lauge- Beständ. DIN ISO 695 Gewichtsverl. mg/dm ²
Duran® 8330	0,030	0,027	0,4	136
Suprax® 8486	0,030	0,033	0,5	134
Fiolax® 8488	0,029	0,030	0,3	92
Fiolax®-klar 8412	0,030	0,034	0,4	110
Fiolax®-braun 8414	0,036	0,035	0,6	115

Tabelle 4 Meßwerte chemische Beständigkeit.

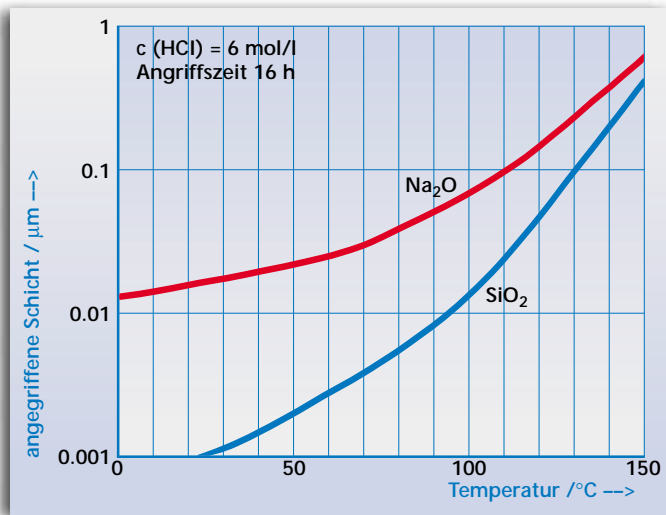


Abb. 23 Säureangriff auf Duran® 8330 in Abhängigkeit von der Temperatur, berechnet aus den abgegebenen Massen von Na₂O bzw. SiO₂.

6.1 Duran®

Der thermische Längenausdehnungskoeffizient von $3,3 \cdot 10^{-6}/K$ ist der kleinste unter allen großtechnisch erschmolzenen chemisch hochbeständigen Massengläsern. Gläser dieser Eigenschaftskombination nehmen eine Sonderstellung ein:

Die geringe spezifische Wärmespannung $\varphi = 0,24 \text{ N}/(\text{mm}^2\text{K})$ kennzeichnet seine besondere Temperaturwechsel- und Temperaturunterschiedsfestigkeit. Diese ermöglichen die Herstellung und Heißverarbeitung großer und starkwandiger Artikel und erlauben deren Verwendung bis zu Temperaturen von max. 200 °C.

Diese Wärmeeigenschaften, gekoppelt mit höchster Beständigkeit gegen Wasser und Säuren, prädestinieren DURAN für den Einsatz in Labor und chemischer Großtechnik, z.B. Rohrleitungen, Reaktionsgefäße, Wärmetauscher u.a..

Maxos® Sicherheits-Schaugläser für Chemie und Energietechnik.

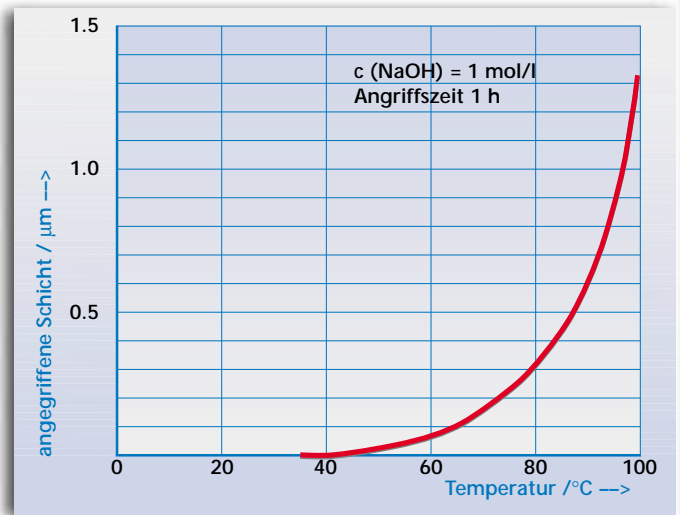


Abb. 24 Laugenangriff auf Duran® 8330 in Abhängigkeit von der Temperatur, berechnet aus Gewichtsverlusten.

Für dünnwandige Glasteile aus Duran® können die Anwendungstemperaturen weit über 200 °C liegen. Vom Blickpunkt der Formbeständigkeit aus sollte eine maximale Gebrauchstemperatur von 500 °C nicht überschritten werden.

Duran® wird in Form von Röhren bis zu 1 m im Durchmesser sowie Preß- und Blasartikeln hergestellt. Unter dem Warenzeichen Borofloat® findet es als Flachglas für Leuchten, Schau-, Schutz- und Sichtscheiben Verwendung.

Die Abb. 23 und 24 veranschaulichen die chemische Beständigkeit.

6.2 Suprax® 8486, 8488

Geringere Schmelz- und Verarbeitungstemperatur infolge geringerer Anteile an SiO₂ und B₂O₃ zugunsten von Alkali- und Erdalkalioxiden gegenüber Duran® kennzeichnen die Gruppe der Suprax®-Gläser mit Wärmedehnungen $4,1$ bzw. $4,3 \cdot 10^{-6}/K$. Mit spezifischen Wärmespannungen von $\varphi = 0,34$ bzw. $0,36 \text{ N}/(\text{mm}^2 \text{K})$ erweisen sich Suprax®-Gläser ebenfalls als hitzebeständig und werden zur Herstellung thermisch belastbarer Artikel mit mittleren Wanddicken verwendet.

8486 mit guter Verschmelzanpassung für Wolfram wird u.a. für thermisch hochbelastete Lampen eingesetzt.

8488 zeigt erhöhte Laugenbeständigkeit und läßt sich mit $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-6}/K$ bereits hinreichend thermisch vorspannen. Beide Eigenschaften sind Voraussetzungen zur Herstellung qualitativ hochwertiger Maxos®-Schaugläser, wie sie z.B. in Dampfkesseln und Hochdruckanlagen benötigt werden.



Lampenkolben aus Suprax®.

6.3 Fiolax®-klar und Fiolax®-braun

Diese hochresistenten Borosilicatgläser dienen insbesondere in der Pharmazie als Verpackungsgläser, wie Ampullen und Fläschchen, für hochwertige Injektabilia. Ihre ausschließliche Herstellung in Form von Röhren ist heute mit außerordentlich geringen Toleranzen in Durchmessern und Wanddicken möglich, so daß die Ampullen- und Fläschchen-Herstellung sowie deren Abfüllung auf den Hochleistungsautomaten der pharmazeutischen Industrie problemlos ist. Da die Wanddicken der Röhren vergleichsweise gering sind, sind Temperaturwechselbelastungen bei der Weiterverarbeitung trotz der Wärmeausdehnung von $4,9$ bzw. $5,4 \cdot 10^{-6}/K$ unkritisch. Fiolax®-Röhren mit dem blauen Kennstreifen sind Garant für höchste Qualität und chemische Resistenz. Aus diesen, auch Neutralgläser genannten Glasarten sachgemäß hergestellte Behältnisse genügen allen Pharmacopoe-Vorschriften, insbesondere auch dem Europäischen Arzneibuch. [2]

Fiolax®-klar, 8412

Diese Glasart gehört zu den chemisch resistentesten Borosilicatgläsern, sie entspricht bezüglich ihrer hydrolytischen und ihrer Säure-Beständigkeit dem Duran®, in ihrer Laugen-Beständigkeit ist sie sogar günstiger. Alkalische Präparate bis zu pH-Werten von 12 können in Fiolax®-klar abgefüllt und autoklaviert werden.

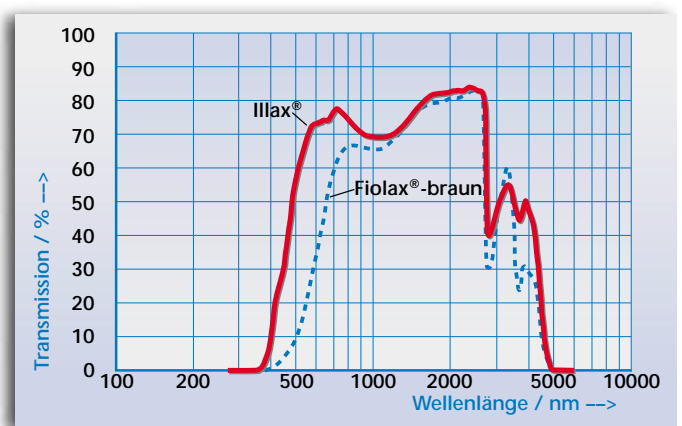


Abb. 25 Transmission von Fiolax®-braun und Illax® bei 1 mm Dicke.

Fiolax®-braun, 8414

Dieses Borosilicatglas zeigt durch Zusätze von Eisen- und Titanoxiden eine hohe Lichtabsorption im blauen und UV-Spektralbereich. Pharmazeutisch empfindlichen Präparaten kann hierdurch ein wirksamer Lichtschutz im kritischen Wellenlängenbereich gegeben werden.

7. Einschmelzgläser

7.1 Allgemeines

Gläser sind zur Herstellung mechanisch zuverlässiger und hochvakuumdichter Schmelzverbindungen mit Metallen, Keramiken und Glimmer bevorzugt geeignet. Besonders günstige Voraussetzungen bilden hierbei das glas-spezifische Viskositätsverhalten sowie die gute direkte Benetzbarkeit vieler kristalliner Werkstoffe durch Gläser. Demzufolge zeichnet sich die Technologie zur Herstellung solcher Schmelzverbindungen durch unkomplizierte Verfahrensweisen mit wenigen, einfach überschaubaren und leicht kontrollierbaren Verfahrensschritten aus. [4]

Voraussetzung für die Haltbarkeit und mechanische Belastbarkeit von Glasschmelzverbindungen ist die Begrenzung mechanischer Spannungen im Glasteil für die in Herstellungsprozeß und Anwendung auftretenden Temperaturen. Die hierzu notwendige sogenannte Verschmelzanpassung – hierunter versteht man die Abstimmung der Wärmekontraktion beider Verschmelzpartner unterhalb der Einfriertemperatur des Glases – führt vielfach zu speziell zusammengesetzten Gläsern und Glasgruppen, die als Einschmelzgläser bezeichnet werden. Neben der



Komponenten für Autohalogenlampen.

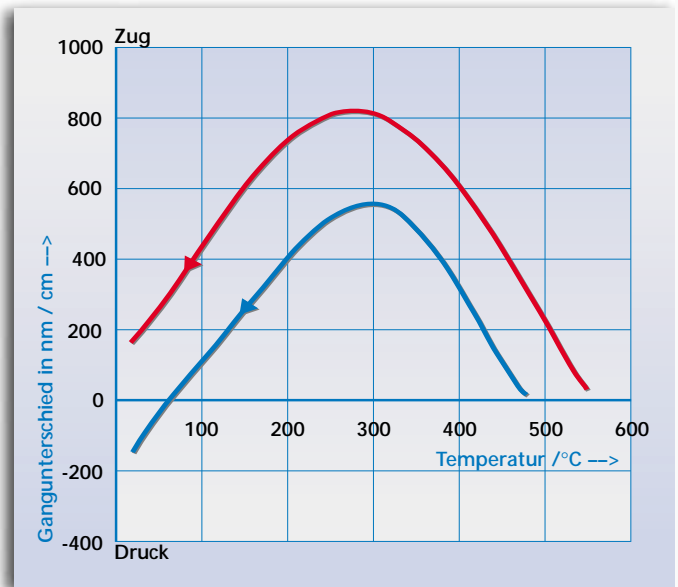


Abb. 26 Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die Temperaturabhängigkeit der Verschmelzspannung in einer Verbindung 8516–52 Ni/Fe.

Verschmelzanpassung genügen diese Gläser vielfach weiteren Anforderungen, wie hoher elektrischer Isolation, speziellen optischen Eigenschaften usw. Prüfung und Bewertung von Verschmelzanpassungen lassen sich durch spannungsoptische Messungen im Glasteil einer Verschmelzprobe relativ genau und sicher ausführen (ISO 4790). [5]

Neben den Stoffkennwerten, wie thermischer Längenausdehnungskoeffizient, Transformationstemperatur und elastische Eigenschaften können Kühlgeschwindigkeit (Abb. 26) und Formgebung Höhe und Verteilung der Verschmelzspannungen wesentlich beeinflussen. Die für SCHOTT-Gläser empfohlenen Schmelzverbindungen mit Metallen und Keramiken sind in Abb. 28 dargestellt.

7.2 Typengruppen von Einschmelzgläsern

Entsprechend den Ausdehnungskoeffizienten technisch genutzter Einschmelzmetalle wie Wolfram, Molybdän, sowie den Legierungen aus Ni-Fe-Co, Ni-Fe-Cr und anderen Sonderwerkstoffen, ergeben sich Schwerpunkte für Typengruppen zugehöriger Einschmelzgläser, die unter diesen Gesichtspunkten als „Wolfram-Einschmelzgläser“, „Kovargläser“ usw. bezeichnet werden. (Siehe Tabelle 5).

Für besonders in Hochleistungslampen verwendete Wolfram- und Molybdäneinschmelzungen sind Erdalkali-Borosilicatgläser (8486, 8412) sowie vor allem Alumino-silicatgläser (8252, 8253) geeignet, welche die hierzu notwendige Verschmelzanpassung und Temperaturbelastbarkeit aufweisen.

Metall ($\alpha_{20/300}$ in $10^{-6}/K$)	Glas- Nr.	Charakteristiken der Gläser	Herstellungsformen* und Hauptanwendungen als Einschmelzglas
Wolfram (4,4)	8486	Erdalkali-Borosilicat chem. hochresistent, hohe Verarbeitungstemperatur Suprax®	F Lampenkolben
	8487	hochborhaltig, niedrigschmelzend	R, S Entladungslampen Überspannungsableiter
Molybdän (5,2)	8412	Erdalkali-Borosilicat chem. hochresistent Fiolax®-klar	R Lampenkolben
	8252	Erdalkali-Aluminosilicatgläser elektrisch hochisolierend	R Lampeninnenaufbauten Lampenkolben
	8253		
Molybdän und 28 Ni/18 Co/Fe (5,1)	8250	hochborhaltig, niedrig- schmelzend, elektrisch hochisolierend, geringe dielektrische Verluste	F, R, S, G Senderöhren Bildwandler Fernsehempfängerröhren
	8245	hochborhaltig, niedrig- schmelzend, geringe Röntgenabsorption	F, R, S, G Röntgenröhren
28 Ni/23 Co/Fe (7,7)	8454	Alkali-Erdkalisilicat, verschmelzbar mit Steatit und Al_2O_3 -Keramiken	S Übergangsglas
	8436	Alkali-Erdkalisilicat, verschmelzbar mit Saphir, natriumdampf- und laugenbeständig	R, S Spezialanwendungen
51 Ni/1Cr/Fe (10,2)	8350	Natron-Kalksilicatglas, AR-Glas®	R, S Röhrenglas
Kupfermantel- draht ($\alpha_{20/400}$ radial 99) ($\alpha_{20/400}$ axial 72)	8095	Alkalibleisilicat, elektrisch hochisolierend	R Bleiglas, Fußglas für el. Lampen und Röhren
	8531	Hochbleisilicate, Na- u. Li-frei, niedrigschmel- zend, el. hochisolierend	R temperaturschonende Kapselung von Dioden
	8532		
52–53 Ni/Fe (10.2.–10.5.)	8512	FeO-dotiert für IR-Heiß- formung, bleifrei	R Reedkontakte
	8516	FeO-dotiert für IR-Heiß- formung, verdampfungsarm, bleifrei	R Reedkontakte

Tabelle 5 Sondereigenschaften und Hauptanwendungen technisch bedeutender Einschmelzgläser, gegliedert nach zugehörigen Einschmelzwerkstoffen
*R= Röhren, S= Stäbe, G= Gußglas, T= Tafelglas, F= gepreßte und geblasene Formgläser.

Eine Begrenzung der Transformationstemperatur auf maximal 500 °C erfordern die Ni-Fe-Co-Legierungen, die als Ersatzlegierung für Molybdän große Bedeutung haben. Hierfür geeignete Gläser (8250, 8245) sind durch relativ hohe B_2O_3 -Gehalte gekennzeichnet. Mit zusätzlichen Spezialeigenschaften, wie hohe elektrische Isolation, geringe dielektrische Verluste sowie geringe Röntgenabsorption, werden Gläser dieser Gruppe höchsten vakuumtechnischen und elektronischen Anforderungen gerecht.

Für die technisch viel verwendeten NiFe-(Cr)-Legierungen sowie für Kupfermanteldraht bieten sich Glasgruppen aus dem Bereich der Weichgläser an, die z.T. Sonderanforderungen, wie hohe elektrische Isolation (Alkalibleisilicat 8095), besonders niedrige Verarbeitungstemperatur (Hochbleigläser 8531, 8532) u.a. erfüllen.

Für die hermetische Kapselung elektrischer Schalter und elektronischer Bauteile unter Inertgas haben sich FeO-dotierte Gläser eingeführt (8512, 8516), deren Heißformung und Verschmelzung allein durch Absorption von IR-Strahlung mit Schwerpunkt bei 1,1 μm Wellenlänge möglich ist (Abb. 22). Infolge eines gewissen Fe_2O_3 -Anteils im Glas erscheinen diese Gläser grüngefärbt. Bei entsprechend hohen IR-Leistungen lassen sich mit diesen Gläsern wesentlich kürzere Schmelzzeiten gegenüber normalbeheizten Klargläsern erreichen.

7.3 Druckglasdurchführungen

Allen Druckglasdurchführungen ist gemeinsam, daß der thermische Ausdehnungskoeffizient des äußeren Metallteils wesentlich höher als der des Einschmelzglases und der metallischen Innenleiter ist. Dadurch wird gewährleistet, daß der Glaskörper nach der Verschmelzung unter allseitigem radialem Druck steht. Diese Druckvorspannung schützt den Glaskörper vor gefährlichen mechanischen Belastungen und gewährleistet damit robuste, mechanisch unempfindliche Durchführungen. Da die Druckspannung des Glases durch eine Zugspannung im Außenmantel kompensiert wird, muß dieser hinreichende Wandstärke (auch bei kleinen Durchführungen mindestens 0,5 mm) haben, um solche Spannungen dauerhaft aufnehmen zu können. Analog wie angepaßte

Durchführungen können auch Druckglasdurchführungen als Hartglas- oder Weichglas-

durchführung ausgeführt werden. Wenn der metallische Innenleiter so gewählt wird, daß seine thermische Ausdehnung noch unter der des Einschmelzglases liegt, ergibt sich eine zusätzliche Druckvorspannung des Glaskörpers („verstärkte Druckglasdurchführung“).



Röntgenröhre.

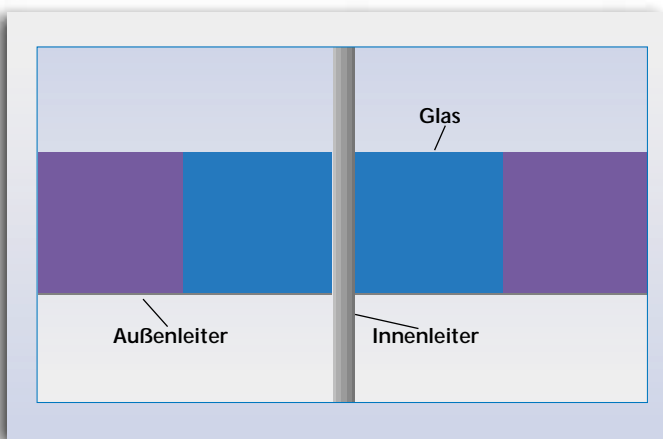


Abb. 27 Typisches Beispiel einer Druckglasdurchführung.

7.4 Keramikanglasungen

Dielektrisch hochwertige und hochisolierende Keramiken, wie z.B. Hartporzellan, Steatit, Al_2O_3 -Keramiken und Forsterit, verteilen sich nahezu über den gesamten Ausdehnungsbereich technischer Gläser. Hartporzellane lassen sich allgemein mit Erdalkali-Borosilicatgläsern (z.B. 8486) verbinden, die auch für Wolfram geeignet sind. Anglasungen an Al_2O_3 -Keramiken und Steatit sind mit Spezialgläsern, wie 8454 und 8436 möglich, die ebenfalls eine Verbindung mit der Legierung 28 Ni/18 Co/Fe erlauben. Für Forsterit-Anglasungen bieten sich Weichgläser mit Wärmedehnungen um $9 \cdot 10^{-6}/K$ an.

7.5 Übergangsgläser

Gläser, deren Wärmedehnung von derjenigen anderer Verschmelzpartner (Gläser, Keramiken, Metalle) soweit abweicht, daß eine direkte Verbindung aus Spannungsgründen nicht möglich ist, müssen unter Zwischenschaltung von Übergangsgläsern verschmolzen werden.

Diese Gläser sind für die empfohlenen Verschmelzübergänge so ausgewählt, daß die Verschmelzspannungen bei Raumtemperatur 20 N/mm² nicht überschreiten (siehe Tabelle 6).

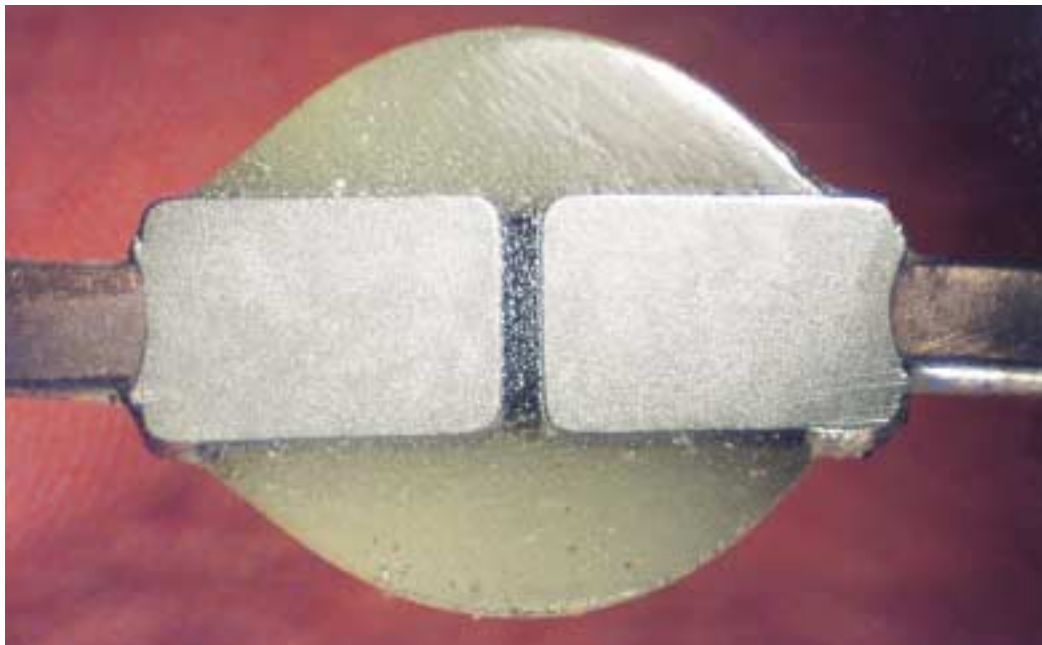
Übergangsgläser und Einschmelzgläser

Glas Nr.	Verschmelzübergänge	$\alpha_{20/300}$ [10 ⁻⁷ /K]	Transformations- temperatur [°C]	Temperatur des Glases bei den Viskositäten			Dichte [g/cm ³]	t_{100} [°C]
				10 ⁻⁴ dPa·s [°C]	10 ⁻³ dPa·s [°C]	10 ⁻² dPa·s [°C]		
N 16 B	KER 250 Vacovit 501 Platin } - N 16 B-8456	8,8	540	540	720	1045	2,48	128
2954	KER 220/221 Vacon 20 } -2954	6,3	600	604	790	1130	2,42	145
4210	Eisen-4210	12,7	450	455	615	880	2,66	175
8228	Quarzglas-8228-8229	1,3	~700	725	1200	1705	2,15	355
8229	8228-8229-8230	2,0	630	635	930	1480	2,17	350
8230	8229-8230-8330	2,7	570	590	915	1520	2,19	255
8447	8412-8447-Vacon 10	4,8	480	505	720	1035	2,27	270
8448	8330-8448-8449, 8486, 8487	3,7	510	560	800	1205	2,25	265
8449	8486 } 8487 } -8449- 8412 8447	4,5	535	550	785	1150	2,29	350
8450	8412-8450-KER 220 2954, 8436	5,4	570	575	780	1130	2,44	200
8454	KER 221 } Al ₂ O ₃ } -8454-Vacon 70	6,4	565	575	750	1070	2,49	210
8455	2954 } 8436 } -8455- 8456 8454 }	6,7	565	570	740	1030	2,44	165
8456	8455-8456- { N 16 B 8350 }	7,4	445	450	685	1145	2,49	240

Tabelle 6 Übergangsgläser und Einschmelzgläser.

Anmerkung: Die Typenbezeichnung der Keramiken entspricht DIN 40 685; Hersteller der Vacon-Metallegierungen: Vacuumschmelze Hanau.

8. Glaslote



Glasgekapselte
Silicium-Diode
im Anschliff.

Glaslote sind spezielle Gläser mit besonders niedriger Erweichungstemperatur. Mit ihnen können Verbindungen von Werkstoffen aus Glas, Keramik oder Metall hergestellt werden, ohne daß die Verbundpartner thermisch geschädigt werden. Die Verbindungen werden im Viskositätsbereich des verwendeten Glaslotes von $\eta = 10^4 - 10^6$ dPa·s hergestellt (Abb. 29), das entspricht einem Temperaturbereich von $T_{LÖT} = 350 - 700$ °C.

Entsprechend ihrem Verhalten während des Lötprozesses unterscheidet man stabile Glaslote und kristallisierende Glaslote.

Stabile Glaslote verhalten sich wie herkömmliche Gläser. Während des Lötvorganges ändern sich ihre Eigenschaften nicht; bei Wiedererhitzen der Lötstelle zeigt ihre Erweichung die gleiche Temperaturabhängigkeit wie beim vorhergegangenen Lötprozeß.

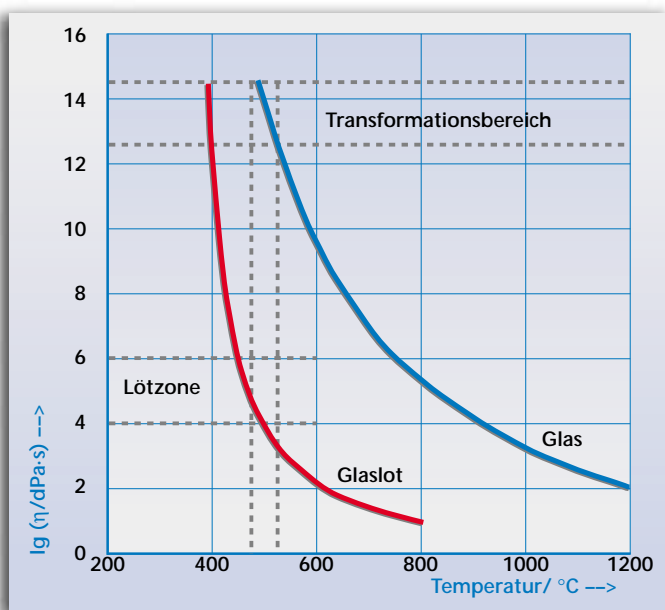


Abb. 29 Darstellung der Zähigkeiten η eines Glaslotes und dem zu lötfenden Glas.

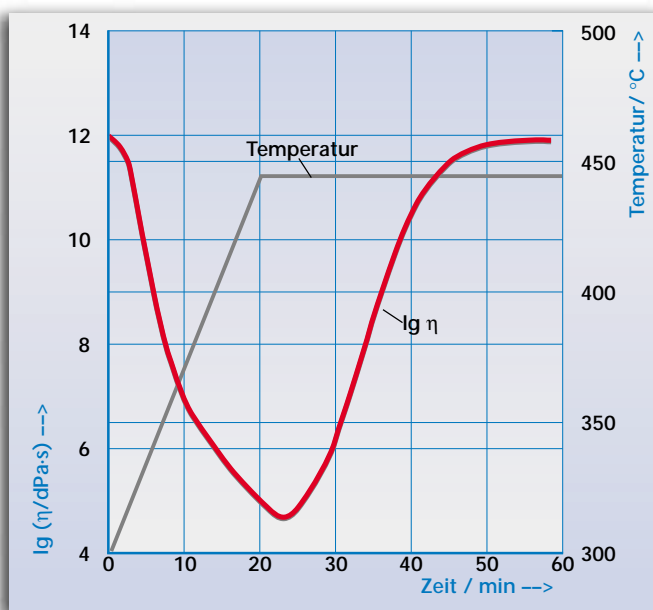
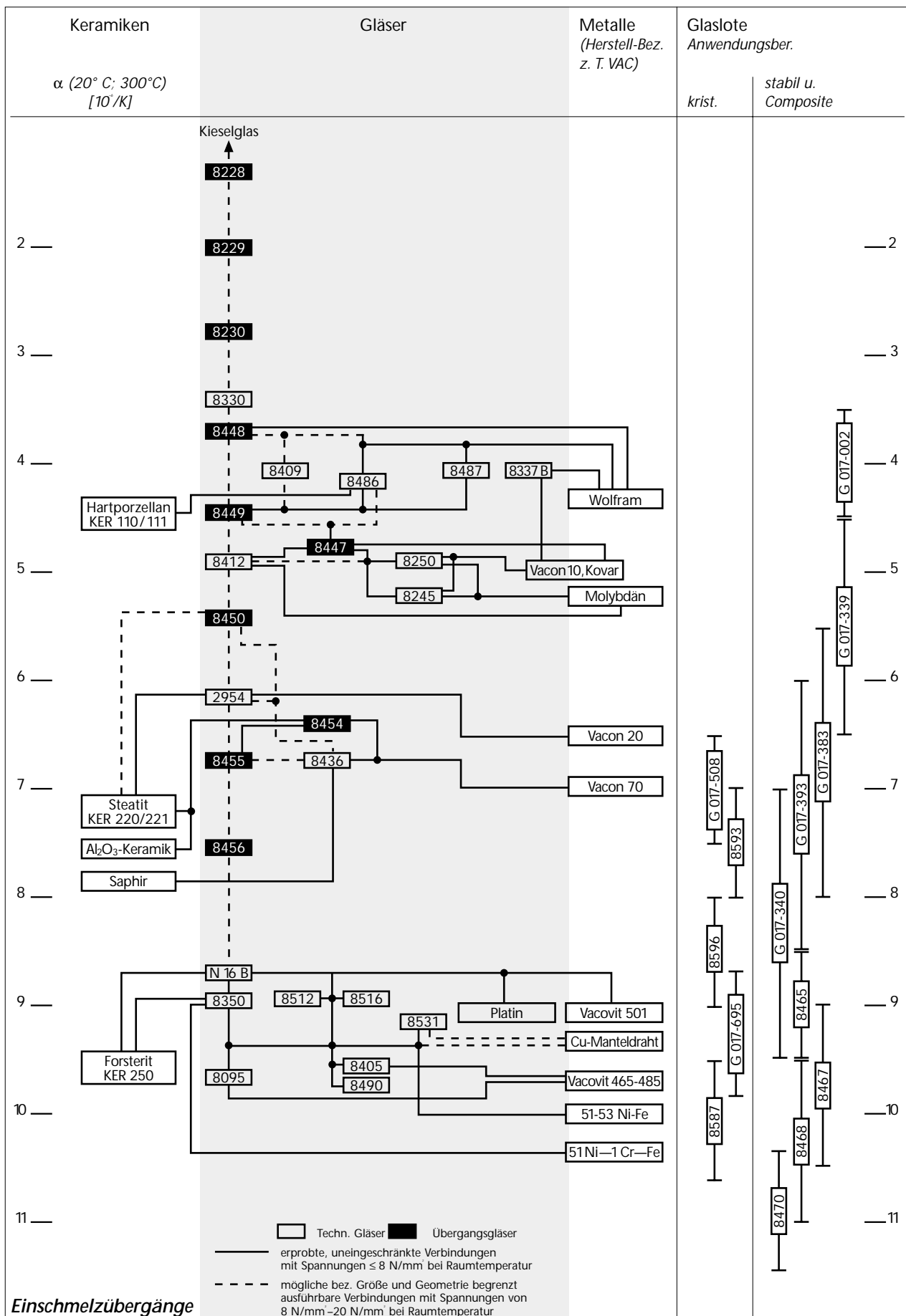


Abb. 30 Viskositätsverlauf eines kristallisierenden Glaslotes während des Lötvorgangs.



Einschmelzübergänge

Kristallisierende Glaslote besitzen im Gegensatz zu stabilen Glasloten eine erhöhte Kristallisationsneigung. Während des Lötprozesses gehen sie in einen keramikartigen, polykristallinen Zustand über. Im Verlauf der Kristallisation steigt die Viskosität um mehrere Größenordnungen an, so daß weitere Fließvorgänge unterdrückt werden. Dies zeigt anschaulich Abb. 30, in der der zeitliche Verlauf der Viskosität für ein kristallisierendes Glaslot und ein gegebenes Temperatur-Zeitprogramm dargestellt ist. Andererseits ermöglicht die Kristallisation eine stärkere thermische Wiederbelastung der Lötverbindung, in der Regel bis in das Temperaturgebiet des Lötvorganges selbst. (Beispiel Glas 8596, Löttemperatur ca. 450 °C, maximale Wiederbelastung ca. 435 °C.)

Die Auswahl geeigneter Glaslote erfolgt, mit Rücksicht auf die Eigenschaften der zu verbindenden Werkstoffe, hauptsächlich unter folgenden Gesichtspunkten:

1. maximal zulässige Löttemperatur
2. Wärmedehnung der zu verbindenden Werkstoffe
3. maximale Anwendungstemperatur der Lötzone
4. chemisches Verhalten

Verarbeitung

Für eine zufriedenstellende Verlötung ist es wichtig, daß das Glaslot ausreichend fließt und die zu verbindenden Teile gut benetzt. Fließen und Benetzen sind temperatur- und zeitabhängig; je höher die Temperatur, umso weniger Zeit ist für ein ausreichendes Fließen erforderlich und umgekehrt.

So kann bei hohen Temperaturen die Verlötung in nur wenigen Minuten erfolgen, während bei tiefen Temperaturen (genauer: bei Zähigkeiten $\geq 10^7$ dPa·s) ein ausreichendes Fließen nur bei sehr langen Zeiten und meist nur bei zusätzlicher mechanischer Belastung zu erreichen ist.

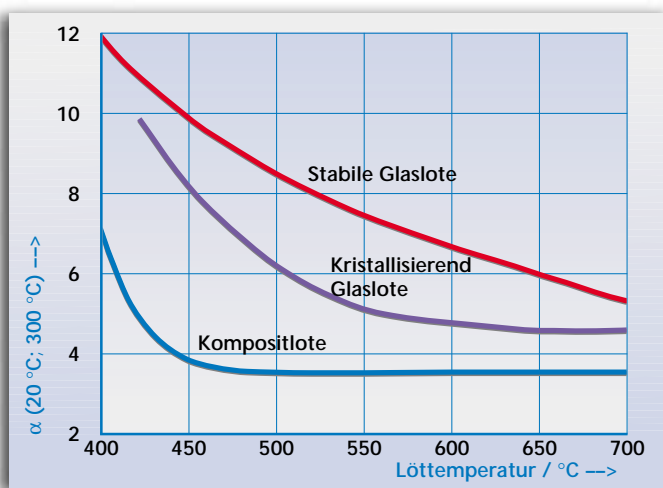


Abb. 31 Zusammenhang zwischen Löttemperatur und Längenausdehnung α für Glaslote. Es existieren jeweils nur oberhalb der gezeichneten Grenzkurven Glaslote des entsprechenden Typs.

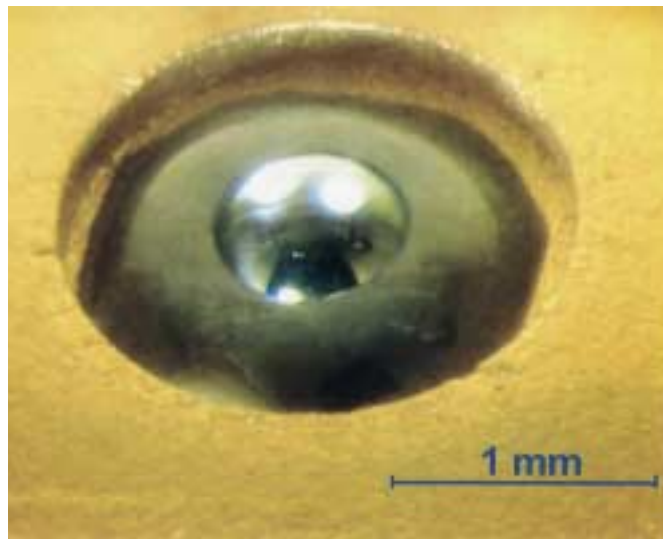


Abb. 32 Verbindung einer Kugellinse mit einem Metallgehäuse unter Verwendung eines Sinterglaslotringes.

Eigenschaften

Wie bei allen Verbindungen mit Glas ist auch bei Glaslotverbindungen die Anpassung der thermischen Ausdehnung der Verbindungspartner notwendige Voraussetzung für feste, dichte Verbindungen. In der Regel soll der thermische Ausdehnungskoeffizient der Glaslote um $\Delta\alpha = 0,5$ bis $1,0 \cdot 10^{-6}/K$ unter der der Verbindungspartner liegen. Die thermische Längenausdehnung stabiler oder kristallisierender Glaslote kann durch Zumischung keramischer Füllstoffe mit kleiner oder negativer thermischer Ausdehnung gesenkt werden. Füllstoffhaltige Gläser werden als Composite bezeichnet.

Eine Übersicht über die Beziehung zwischen Löttemperatur und thermischer Ausdehnung gibt Abb. 31.

Bei kristallisierenden Glasloten muß beachtet werden, daß die in den jeweiligen Eigenschaftslisten angegebenen Ausdehnungskoeffizienten nur bei Einhaltung des für jedes Glaslot vorgegebenen Lötprogrammes gelten. Jede Änderung im Lötprogramm, insbesondere der Löttemperatur und der Lötzeit, kann zu Veränderungen des Verhältnisses von Glas- und Kristallphase führen und damit zur Änderung des Ausdehnungskoeffizienten, was eine Fehlanpassung zur Folge haben kann.

Bei stabilen Glasloten können die Verschmelzstellen bis ca. 50 K unterhalb der Transformationstemperatur des jeweiligen Glaslotes belastet werden. Die maximale Gebrauchstemperatur von kristallisierenden Glasloten richtet sich nach der Art und dem Schmelzpunkt der ausgeschiedenen Kristalle sowie nach der Menge und

den Eigenschaften der Restglasphase. Bis zur maximalen Gebrauchstemperatur sind die Glaslote feuchtigkeits- und gasundurchlässig. Sie besitzen ein gutes elektrisches Isolationsvermögen und übertreffen in ihrer Isolation viele übliche technische Gläser. Sie können daher auch als temperaturbeständiges Isolationsmaterial verwendet werden. Die chemische Resistenz von Lotgläsern ist generell geringer als die normaler technischer Gläser. Einer Dauereinwirkung chemisch aggressiver Umgebungen (z.B. Säuren, Laugen) dürfen Glaslotverbindungen daher nicht ausgesetzt werden.

Lieferform

Glaslot kann in Form von Pulver, Granulat, Sinterkörper (z.B. Ringe, Stäbe, . . .) und als Suspension für den weiteren Gebrauch hergestellt werden. Ein Einsatzbeispiel einer Glas-Metall Verlotung zeigt Abb. 32. Eine Auswahl zur Verfügung stehender SCHOTT-Glaslote bieten die Tabellen 7 und 8.

Stabile und Composit-Glaslote

Glas Nr.	α (20°C; 300°C) [10 ⁻⁶ /K ⁻¹]	T _g [°C]	Temperatur [°C]	Lötbedingung bei Viskosität 10 ⁷ ·dPa·s [°C]	[min]	d Temp. [g/cm ³]	t _k 100 Haltezeit [°C]	DK	tanδ [10 ⁻⁴]
G 017-002 ¹⁾	3,6	540	650	700	15	3,4	–	6,8	37
G 017-339 ²⁾	4,7 ²⁾	325	370	450	30	4,0	320	11,5	19
G 017-383 ²⁾	5,7 ²⁾	325	370	430	15	4,7	325	13,0	15
G 017-393 ²⁾	6,5 ²⁾	320	370	425	15	4,8	305	11,6	15
G 017-340 ²⁾	7,0 ²⁾	315	360	420	15	4,8	320	13,4	14
8465	8,2	385	460	520	60	5,4	375	14,9	27
8467	9,1	355	420	490	60	5,7	360	15,4	29
8468	9,6	340	405	450	60	6,0	335	16,3	31
8470	10,0	440	570	680	60	2,8	295	7,7	15,5
8471	10,6 ²⁾	330	395	440	30	6,2	–	17,1	52
8472	12,0 ²⁾	310	360	410	30	6,7	–	18,2	47
8474	19,0 ²⁾	325	410	480	30	2,6	170	7,2	51

Tabelle 7

Kristallisierende Glaslote

G 017-508	6,5	365	–	530 ³⁾	60	5,7	340	15,6	206
8593	7,7	300	–	520 ³⁾	30	5,8	230	21,3	260
8596	8,7	320	–	450 ³⁾	60	6,4	280	17,4	58
G 017-695	8,9	310	–	425 ³⁾	45	5,7	275	15,4	54
8587	10,0	315	–	435 ³⁾	40	6,6	265	22,1	33

Tabelle 8

¹⁾ Composit, ²⁾ $\alpha_{20/250}$, ³⁾ Heizrate 7–10 °C/min

9. Glaskeramik



8,2 m-Teleskopspiegelträger, Zerodur® Glaskeramik.

Von den bisher bekannten Werkstoffen Glas und Keramik unterscheidet sich „Glaskeramik“ charakteristisch durch Herstellungsverfahren und Eigenschaften, so daß sie sich weder der Keramik noch dem Glas zuzuordnen, als neuer Werkstoff präsentiert. [6]

Ihre Herstellung erfolgt prinzipiell in zwei Produktionsstufen (Abb. 33):

In einem *ersten Verfahrensschritt* wird zunächst (wie beim Glas) ein Gemenge genau definierter Zusammensetzung erschmolzen. Die Zusammensetzung richtet sich nach den gewünschten Eigenschaften des Endproduktes sowie nach den erforderlichen Verarbeitungseigenschaften.

Nach der Schmelze werden mit den üblichen Verfahren wie Pressen, Blasen, Walzen oder Gießen, Formkörper hergestellt und gekühlt. In diesem Zustand weist das Material noch alle typischen Merkmale eines Glases auf.

Im anschließenden *zweiten Verfahrensschritt* werden die glasigen Gegenstände durch eine definierte, für jede Zusammensetzung spezifische Temperatur-Zeitbehandlung zwischen 800–1200 °C in einen überwiegend polykristallinen Werkstoff umgewandelt oder „keramisiert“, in dem neben den ausgeschiedenen Kristallen von ca. 0,05–5 µm Größe noch ein Anteil von Restglasphase von

5–50% vorliegt. Bei dieser Keramisierung scheiden sich zunächst im Temperaturbereich von ca. 600–700 °C Kristallkeime aus, wofür geringe Anteile von beispielsweise TiO_2 , ZrO_2 oder F im Glas als „Keimbildner“ maßgeblich sind. Auf diesen Keimen wachsen bei weiterer Temperatursteigerung Kristalle, deren Art und Eigenschaften sowie Anzahl und Größe sich nach der Glaszusammensetzung und dem Temperprogramm richten. Durch entsprechende Programmwahl kann man entweder durchsichtige, schwach opake oder auch stark getrübte, undurchsichtige Glaskeramiken erhalten, die im Gegensatz zu herkömmlichen Keramiken absolut dichte und porenfreie Werkstoffe darstellen.

Maßgeblich für eine solche „gesteuerte“ Kristallisation im Glas ist ein hinreichender Temperaturabstand von Keimbildungs- und Kristallisationsbereich (Abb. 34).

Hierdurch kann eine spontane Kristallbildung bei der heißverarbeiteten des Glases vermieden und andererseits ein störendes Kristallwachstum während der Keimbildung verhindert werden.

Wie bei den Gläsern kann auch die Zusammensetzung von Glaskeramiken sehr unterschiedlich sein. Bekannt sind beispielsweise Zusammensetzungen innerhalb der

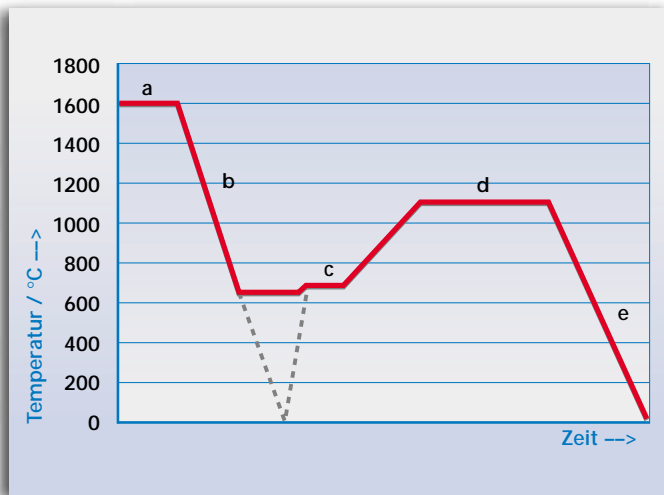


Abb. 33 Temperatur-Zeit-Schema zur Glaskeramik-Fertigung
 a: Schmelze, b: Verarbeitung, c: Keimbildung, d: Kristallisation, e: Abkühlen auf Raumtemperatur.

Systeme $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$; $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$; $\text{CaO}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ u. a.

Größte kommerzielle Bedeutung haben heute Glaskeramiken aus dem System $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ mit kleineren Mengen an Alkali- und Erdalkalioxiden sowie $\text{TiO}_2 + \text{ZrO}$ als Keimbildner erlangt, da sich bevorzugt auf der Basis dieses Systems Glaskeramiken mit einem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von praktisch Null herstellen lassen (Abb. 35 und Tabelle 9). Diese außergewöhnliche Eigenschaft entsteht durch Verbund kristalliner Anteile (wie Mischkristalle von h-Quarz, h-Eukryptit oder h-Spodumen) mit negativem Ausdehnungskoeffizienten

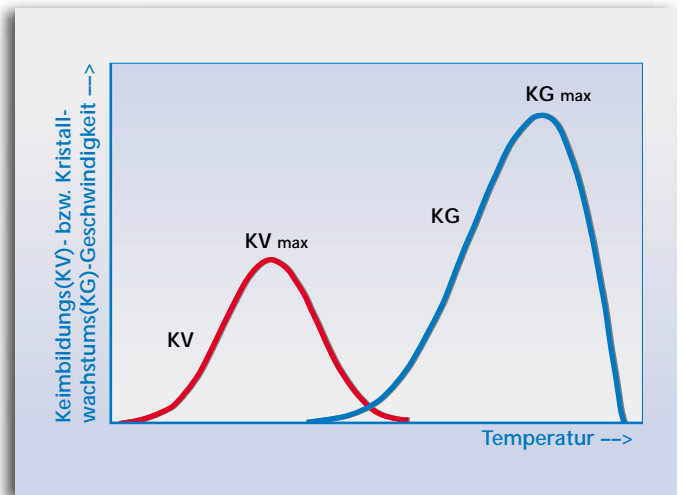
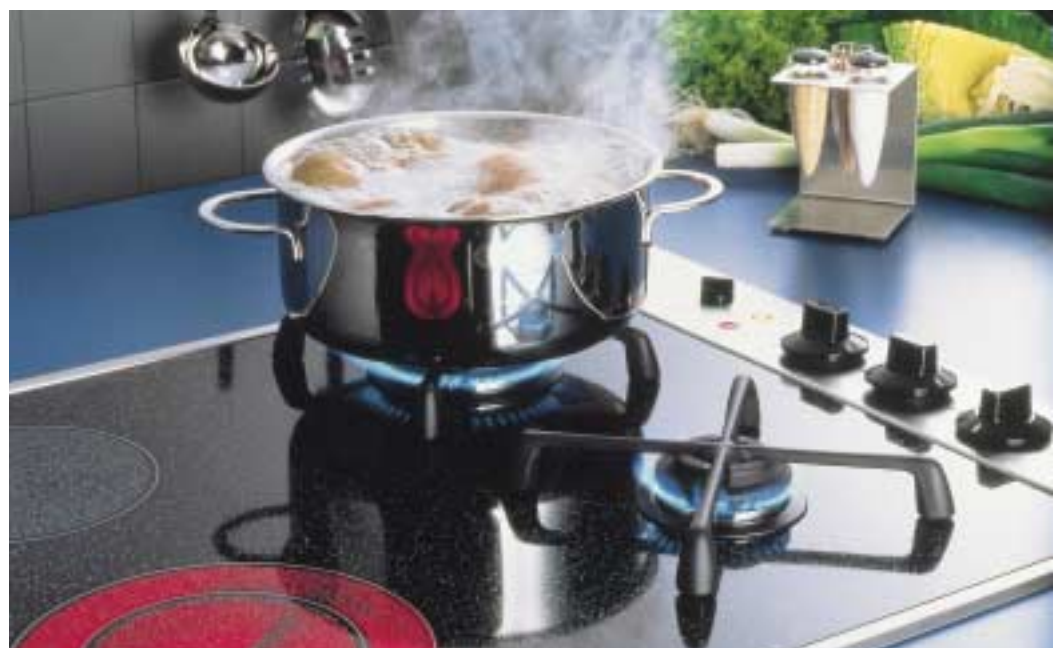


Abb. 34 Keimbildungs(KV)- und Kristallwachstums(KG)-Geschwindigkeit von Gläsern in Abhängigkeit von der Temperatur.

und der Restglasphase des Systems mit positivem Ausdehnungskoeffizienten.

Solche „ α -0-Glaskeramiken“ können praktisch beliebigen Temperaturwechseln oder Temperaturunterschieden unter 700°C ausgesetzt werden, wobei auch Wanddicken, Wanddickenunterschiede und komplizierte Formgebungen praktisch ohne Bedeutung sind.

Eine weitere technische Bedeutung liegt in der außergewöhnlich hohen Maß- und Formstabilität von Gegenständen aus diesen Werkstoffen, auch wenn diese unvermeidlichen Temperaturschwankungen unterworfen werden. [7] Zerodur® Glaskeramik, deren thermischer



Ceran® für Gas: Kombination von Elektro- und Gaskochzonen innerhalb eines Kochfeldes.

Längenausdehnungskoeffizient $\leq 0,05 \cdot 10^{-6}/K$ im Raumtemperaturbereich gehalten werden kann (Tabelle 9), wurde speziell für die Herstellung großer Spiegelträger für astronomische Teleskope entwickelt. Weiterhin wird diese Glaskeramik für mechanisch-optische Präzisionswerkstücke, wie Längennormale, Spiegelabstandshalter in Lasern u.a. eingesetzt. Zerodur® weist eine sehr gute zeitliche Längenstabilität auf: Längenalterungskoeffizient $A^{\text{)}} ist für Zerodur® < 1 \cdot 10^{-7}/\text{Jahr}$. [8]

$^{\text{)}} L = L_0(1+A \cdot \Delta t)$, $\Delta t = \text{Zeitspanne}$

	Einheit	Güteklasse	Zerodur®	Ceran®
$\alpha_{0/50}$	$10^{-6}/K$	1	$0 \pm 0,05$	
		2	$0 \pm 0,1$	
		3	$0 \pm 0,15$	
$\alpha_{20/300}$	$10^{-6}/K$		+0,1	-0,2
$\alpha_{20/500}$	$10^{-6}/K$		-	-0,01
$\alpha_{20/600}$	$10^{-6}/K$		+0,2	-
$\alpha_{20/700}$	$10^{-6}/K$		-	+0,15
Dichte	g/cm^3		2,53	2,56
E-Modul	N/mm^2		$91 \cdot 10^3$	$92 \cdot 10^3$
Poisson-Zahl μ			0,24	0,24

Tabelle 9 Thermischer Längenausdehnungskoeffizient α , Dichte und elastische Eigenschaften von Zerodur® und Ceran®.

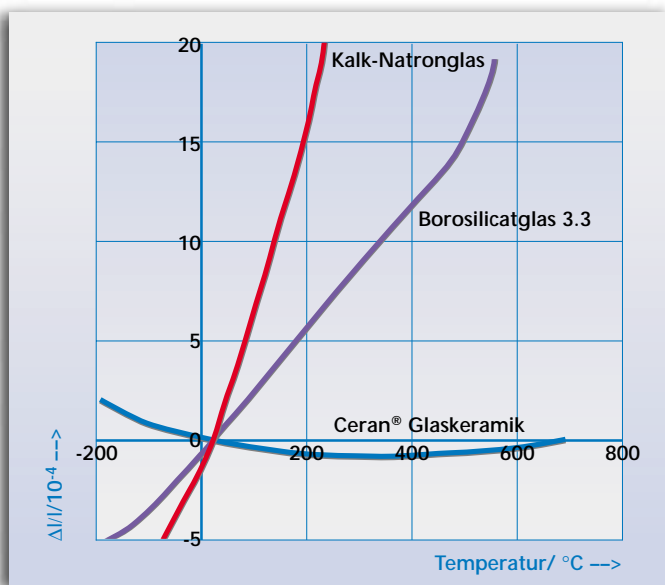


Abb. 35 Wärmeausdehnung von Ceran® Glaskeramik im Vergleich zu Borosilicatglas 3.3 und Kalk-Natronglas.

Chemisch-technische Gläser · Elektrotechn

1	2	3	4	5			6	7	8
Glas Nr.	Her- stellungs- form	α (20°C; 300°C)	Trans- formations- temperatur	Temperatur des Glases bei den Viskositäten			Dichte bei 25°C	Elastizitäts- modul	Poisson- zahl
		[10 ⁻⁶ /K]	[°C]	10 ¹³ dPa·s	10 ^{7,6} dPa·s	10 ⁴ dPa·s			
8095	RP	9,2	435	435	635	985	3,01	60	0,22
8245	FRSP	5,1	505	515	720	1040	2,31	68	0,22
8248	GP	3,1	445	490	740	1260	2,12	44	0,22
8250	FRG PK	5,0	490	500	720	1055	2,28	64	0,21
8252	RP	4,6	725	725	935	1250	2,63	81	0,24
8253	RP	4,7	785	790	1000	1315	2,65	83	0,23
8261	TP	3,7	720	725	950	1255	2,57	79	0,24
8326	FRP	6,6	560	565	770	1135	2,46	75	0,20
8330	FTRSPK	3,3	525	560	820	1260	2,23	63	0,20
8337 B	RP	4,1	430	465	715	1090	2,21	51	0,22
8350	RSP	9,1	525	530	715	1040	2,50	73	0,22
8405	FRP	9,8	460	450	660	1000	2,51	65	0,21
8409	FRSP	4,1	745	740	950	1230	2,57	85	0,24
8412	RP	4,9	565	565	780	1165	2,34	73	0,20
8414	RP	5,4	560	560	770	1155	2,42	71	0,19
8415	RP	7,8	535	530	720	1050	2,50	74	0,21
8421	P	9,7	525	535	705	1000	2,59	74	0,22
8422	P	8,7	540	535	715	1010	2,46	76	0,21
8436	RSP	6,7	630	630	830	1110	2,76	85	0,22
8486	FP	4,1	555	580	820	1220	2,32	66	0,20
8487	RSP	3,9	525	560	775	1135	2,25	66	0,20
8490	FP	9,6	475	480	660	1000	2,61	70	0,22
8512	RP	9,0	445	460	665	980	2,53	68	0,22
8516	RP	8,9	440	445	650	990	2,56	72	0,21
8531	RP	9,0	440	430	590	830	4,34	52	0,24
8532	RP	8,8	430	425	565	760	4,47	56	0,24
8533	RP	8,7	475	480	645	915	2,57	79	0,21
8625	RP	9,0	510	520	710	1030	2,53	73	0,22
8650	RP	5,2	475	475	620	880	3,57	62	0,23
8651	RP	4,5	540	540	735	1040	2,87	59	0,24
8652	RP	4,5	495	490	640	915	3,18	58	0,25
8656	TP	4,1	590	600	850	1270	2,35	-	-

Tabelle 12 Eigenschaftswerte technischer Gläser

ische Gläser

9	10	11	12	13	14	15	16				1
Wärmeleitfähigkeit λ bei 90°C $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	$t_{k 100}$ [°C]	log des elektr. Volumenwiderstandes in $\Omega \cdot cm$ bei 250°C 350°C		Dielektrische Eigenschaften bei 1 MHz u. 25°C DZ $\tan\delta$ [10]		Brechzahl n_d ($\lambda = 587,6 \text{ nm}$)	Spannungsoptischer Koeffizient K [10 ⁻⁶ mm ² /N]	Klassen der chemischen Haltbarkeit (W) (S) (L)			Glas-Nr.
0,9	330	9,6	7,6	6,6	11	1,556	3,1	3	2	3	8095
1,2	215	7,4	5,9	5,7	80	1,488	3,8	3	4	3	8245
1,0	-	12,0	10,0	4,3	10	1,466	5,2	3	3	3	8248
1,2	375	10,0	8,3	4,9	22	1,487	3,6	3	4	3	8250
1,1	660	-	12	6,1	11	1,538	3,3	1	3	2	8252
1,1	630	-	11	6,6	15	1,547	2,7	1	2	2	8253
1,1	585	-	-	5,8	14	1,534	3,1	1	4	2	8261
1,2	210	7,3	6,0	6,4	65	1,506	2,8	1	1	2	8326
1,2	250	8,0	6,5	4,6	37	1,473	4,0	1	1	2	8330
1,0	315	9,2	7,5	4,7	22	1,476	4,1	3	4	3	8337 B
1,1	200	7,1	5,7	7,2	70	1,514	2,7	3	1	2	8350
1,0	280	8,5	6,9	6,5	45	1,505	2,8	5	3	2	8405
1,2	530	12	10	6,1	23	1,543	2,9	1	4	3	8409
1,2	215	7,4	6,0	5,7	80	1,492	3,4	1	1	2	8412
1,2	200	7,1	5,6	6,3	107	1,523	2,2	1	2	2	8414
1,1	180	6,7	5,3	7,1	113	1,521	3,2	2	2	2	8415
1,0	255	8,1	6,4	7,4	43	1,526	2,7	3	3	2	8421
1,1	205	7,3	5,8	7,3	60	1,509	2,9	2	3	3	8422
1,1	245	7,9	6,5	7,9	75	1,564	2,9	1-2	1-2	1	8436
1,1	230	7,5	6,1	5,1	40	1,487	3,8	1	1	2	8486
1,2	300	8,3	6,9	4,9	36	1,479	3,6	4	3	3	8487
1,0	235	7,7	6,1	6,7	32	1,52	-	3	2	2	8490
1,0	320	9,5	7,5	6,5	21	1,510	3,0	3	1-2	2	8512
1,1	250	8,1	6,4	6,5	25	1,516	3,0	3	1	2	8516
0,7	450	11	9,8	9,5	9	1,700	2,2	1	4	3	8531
0,7	440	11	9,4	10,2	9	1,724	1,7	1	4	3	8532
1,1	200	7,0	5,5	6,9	55	1,527	3,0	1	2	2	8533
1,1	210	7,2	5,8	7,1	68	1,525	-	3	1	2	8625
0,5	-	-	-	7,6	33	1,618	2,8	1	4	3	8650
0,9	-	11,2	10,0	6,0	31	1,552	3,6	1	4	3	8651
0,9	-	-	-	6,9	35	1,589	3,4	1	4	3	8652
-	265	8,3	6,8	5,5	51	1,493	3,6	1	1	1	8656

Glasarten

Die Angaben dieser Druckschrift entsprechen dem Stand von 1998.

8095	Bleiglas (28% PbO), elektrisch hochisolierend, für allgemeine elektrotechnische Anwendungen
8245	Einschmelzglas für Ni-Fe-Co-Legierungen und Molybdän, minimale Röntgenabsorption
8248	Borosilicatglas (hoch-B ₂ O ₃ -haltig), minimale dielektrische Verluste bis GHz-Bereich, elektrisch hochisolierend
8250	Einschmelzglas für Ni-Fe-Co-Legierungen und Molybdän, elektrisch hochisolierend
8252	Erdalkali-Aluminosilicatglas f. hohe Anwendungstemperaturen in der Elektrotechnik, geeignet zur Verschmelzung m. Molybdän
8253	Erdalkali-Aluminosilicatglas f. hohe Anwendungstemperaturen in der Elektrotechnik, geeignet zur Verschmelzung m. Molybdän
8261	Aluminoborosilicatglas für TFT-Displays
8326	SBW-Glas, chemisch hochresistentes Laborglas
8330	Duran [®] , Borosilicatglas für Laborgeräte, chemisch-technische Apparate und Rohrleitungen (DIN ISO 3585)
8337B	Borosilicatglas, hoch-UV-durchlässig, verschmelzbar mit Gläsern und Metallen des Vacon-10-Bereiches und mit Wolfram
8350	AR-Glas [®] , Natron-Kalk-Silicatglas-Röhren
8405	hoch-UV-durchlässiges Weichglas
8409	Supremax [®] , alkalifrei, für hohe Anwendungstemperaturen in Thermometrie, Apparatebau und Elektrotechnik
8412*)	Fiolax [®] -klar (blauer Kennstreifen), Neutralglasröhren (chemisch hochresistent) f. pharmazeutische Primärpackmittel
8414	Fiolax [®] -braun (blauer Kennstreifen), Neutralglasröhren (chemisch hochresistent) f. pharmazeutische Primärpackmittel
8415	Illax [®] braun Glasröhren für pharmazeutische Primärpackmittel
8421	Einschmelzglas für Durchführungen mit NiFe45 (DIN 17745) und Druckglasdurchführungen
8422	Einschmelzglas für Durchführungen mit NiFe47 oder 49 (DIN 17745) und Druckglasdurchführungen
8436	speziell natriumdampf- und laugenbeständig, geeignet für Verbindungen mit Saphir
8486	Suprax [®] , Borosilicatglas, chemisch und thermisch resistent, geeignet für W-Einschmelzungen
8487	Einschmelzglas für Wolfram, weicher gegenüber 8486
8490	lichtdurchlässig im UV, hochabsorbierend im Sichtbaren
8512	IR-absorbierendes bleifreies Einschmelzglas für Ni-Fe (Reedschalter)
8516	IR-absorbierendes Einschmelzglas für Ni-Fe, bleifrei, verdampfungsarm (Reedschalter)
8531	Na-freies Weichglas zur temperaturschonenden Kapselung von Halbleiterbauelementen (Dioden), hochbleihaltig
8532	Na-freies Weichglas zur temperaturschonenden Kapselung von Halbleiterbauelementen (Dioden), hochbleihaltig
8533	IR-absorbierendes Einschmelzglas für Ni-Fe, blei- und kaliumfrei, verdampfungsarm (Reedschalter)
8625	IR-absorbierendes biokompatibles Glas für (implantierbare) Identifizierungssysteme (Transponder)
8650	Alkalifreies Einschmelzglas für Molybdän, speziell für Dioden in Implosionstechnik, hochbleihaltig
8651	Wolfram-Einschmelzglas für Hochleistungsdioden
8652	Wolfram-Einschmelzglas, niedrighschmelzend, für Hochleistungsdioden
8656	Borofloat [®] 40, vorskannbares Borosilicat-Floatglas

*)8258 Estax[®], Glasröhren zur Herstellung -von Probebehältnissen mit besonders geringer Eigenstrahlung

Zitierte Literatur

- [1] A. Peters in „Werkstoff Glas; Sachgerechte Auswahl, optimaler Einsatz, Gestaltung und Pflege“ Bd. 22 der Reihe „Kontakt und Studium“ S. 94–98. Lexika-Verlag Grafenau (1979)
- [2] Europäisches Arzneibuch, Bd II (1975), S. 63–68, Deutscher Apotheker Verlag, Stuttgart
- [3] A. Peters „Über das chemische Verhalten eines Borosilicatglases gegenüber alkalischen Lösungen bei Temperaturen über 150 °C“ *Glastechn. Ber.* 50 (1977), S. 276–280
- [4] A. Zincke „Technologie der Glasverschmelzungen“, Leipzig, Akad. Verl. Ges. Geest & Portig, 1961
- [5] H. Herrmann „Optische Spannungsmessungen an Glas-Metall-Verbindungen bei höheren Temperaturen“ *Z. Angew. Phys.* 7 (1955) S. 174–176
- [6] H. Scheidler „Herstellung und Eigenschaften von Glaskeramik-Werkstoffen“ *Silikat-Journal* 11 (1972) 6, S. 144–149
- [7] O. Lindig, W. Pannhorst „Thermal expansion and length stability of Zerodur® in dependence on temperature and time“ *Appl. Opt.* 24, (1985), S. 3330–3334
- [8] F. Bayer-Helms, H. Darnedde, G. Exner „Längenstabilität bei Raumtemperatur von Proben der Glaskeramik Zerodur“, *Metrologia* 21, 49–57 (1985)

Fachliteratur über Glas

H. Scholze: Glas – Natur, Struktur und Eigenschaften, 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin 1977

W. Vogel: Glaschemie; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1. Auflage 1979

G.W. McLellan, E.B. Shand: Glass Engineering Handbook; McGraw-Hill Book Comp. Inc. 1984

F. Kerkhoff: Bruchvorgänge in Gläsern; Verlag der Deutschen Glastechn. Ges., Frankfurt a. M. 1970

D. G. Holloway: The Physical Properties of Glass; Wykeham Publications (London) 1973

SCHOTT AG

Postfach 2480
D-55014 Mainz
Hattenbergstraße 10
D-55122 Mainz

Forschung und Technologieentwicklung
Telefon: 06131/66-3968
Telefax: 06131/66-2006
<http://www.schott.de>

SCHOTT
glass made of ideas