

Tempern und thermisch Härten

Jorma Vitkala

Normales Fensterglas, auch geglähtes Glas, ist ein spröder Werkstoff. Wenngleich es hohe Druckspannungen aushält, weist es aufgrund der mikroskopisch kleinen Risse an der Glasoberfläche, durch welche die Verbindungen zwischen den Glasmolekülen gesprengt werden, nur eine außerordentlich geringe Festigkeit gegenüber Zugspannungen auf.

Aufgrund dieser Gegebenheiten wird eine Verbesserung der Eigenschaften des Glases erforderlich, damit dieses fester und sicherer wird. Das thermisch gehärtete Glas weist gegenüber dem normalen, vergüteten Glas eine zweimal höhere Festigkeit auf. Getempertes Glas schließlich, das auch als Sicherheitsglas zu gelten hat, ist vier- bis fünfmal fester als normales Glas.

Um thermisch gehärtetes Glas herzustellen bzw. die für ein Tempern erforderlichen Spannungen im Glas herzustellen, muß zunächst die Molekularstruktur so beeinflusst werden, daß sie an der Oberfläche des Glases anders ist als in seinen Kernschichten. Durch strukturelle Umwandlungsprozesse kommt es zu Unterschieden in der Dichte des Glases zwischen dessen inneren und äußeren Schichten, und die für die Herstellung von thermisch gehärtetem bzw. getempertem Glas erforderlichen Spannungen entstehen durch diese Unterschiede. Durch die im Glas anliegenden Spannungen wird normales Glas dann zu Sicherheitsglas, wenn eine gewisse Mindestspannung erreicht wird. Bleibt die Spannung unterhalb eines bestimmten

Werts, so wird das Ergebnis als thermisch gehärtetes Glas bezeichnet [1].

Innerhalb des Glases befinden sich Verunreinigungen aus Nickelsulfid (NiS), die gelegentlich zu spontanen Brüchen des Glases führen; dies passiert insbesondere bei getempertem, mitunter jedoch auch bei thermisch gehärtetem Glas. Der sogenannte Heat Soak Test (HST), bei dem das Glas über längere Zeiträume hinweg bei einer Temperatur von 260 bis 290 °C gehalten wird, scheint gegenwärtig das effizienteste Verfahren zu sein, um im späteren Verlauf eine spontane Bruchbildung zu vermeiden. In der vorliegenden Arbeit sollen diese Pro-

Jorma Vitkala in Leitender Position beim finnischen Glasmaßmaschinenhersteller Tamglass ist vor allem durch den zweijährlich in Tampere unter seiner Regie stattfindenden Weltkongreß, den Glass-Processing-Days, bekannt.

bleme und die entsprechenden Testverfahren erörtert werden.

Bei der Herstellung von thermisch gehärtetem Glas muß der Führung und Beherrschung der im Glas entstehenden Spannungszustände ein besonderes Augenmerk gelten; dies gilt

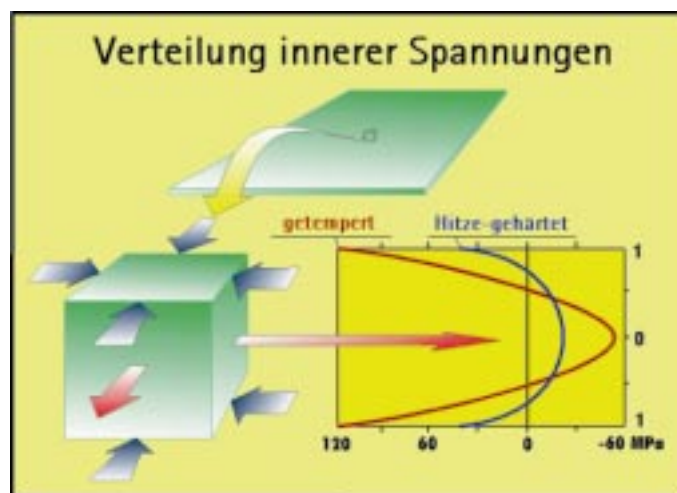


Bild 1: Verteilung der Spannungszustände im Glas
Bilder: Jorma Vitkala



Bild 2: Geglöh-tes/getempertes Glas

insbesondere im Falle von Glasprodukten von großer Stärke. Der Schlüssel zur Einbringung der richtigen Spannung in das Glas liegt in einer sorgfältigen Führung des Kühlungsprozesses, da hier die im Vergleich zu dem getemperten Glas niedrigeren Temperaturen zu einem allzu drastischen Wärmeabfall führen können, wodurch möglicherweise die Einhaltung der für thermisch gehärtetes Glas vorgeschriebenen Normen nicht gewährleistet werden kann.

Was ist thermisch gehärtetes und was ist getempertes Glas?

Bei der Prüfung eines kleinen Musters von fertigem, thermisch gehärtetem oder getempertem Glas erkennt man charakteristischerweise die Entstehung von hohen Druckspannungen an der Glasoberfläche und einer gewissen Zugspannung in den inneren Glasschichten. Als Ergebnis dieser Spannungszustände weisen thermisch gehärtetes und getempertes Glas unter anderen Eigenschaften auch eine deutlich höhere Biegebruchfestigkeit und eine höhere Festigkeit gegenüber Wärmeshocks auf als vergütetes Glas.

Wird normales, vergütetes Glas gebrochen, so entstehen dabei messerscharfe Scherben. Das auch als vorgespanntes Glas bezeichnete getemperte Glas dagegen zerbricht dann in kleine Scherben, wenn die im Glasinneren anliegende Spannung zusammenbricht. Thermisch gehärtetes Glas dagegen zerbricht unter Entstehung großer Scherben und wird aus diesem Grunde nicht als Sicherheitsglas betrachtet, sondern lediglich als eine Glasqualität, bei der mit dem Verfahren der thermischen Härtung eine gewisse Verbesserung der Eigenschaften angestrebt wird.

Es liegt demzufolge auf der Hand, daß das Tempern des Glases erforderlich ist, um die Sicherheit und die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs zu verbessern.

Vergütetes Glas ist ein spröder Werkstoff. Es bricht bereits bei Vorliegen der geringsten Zugspannung. Die

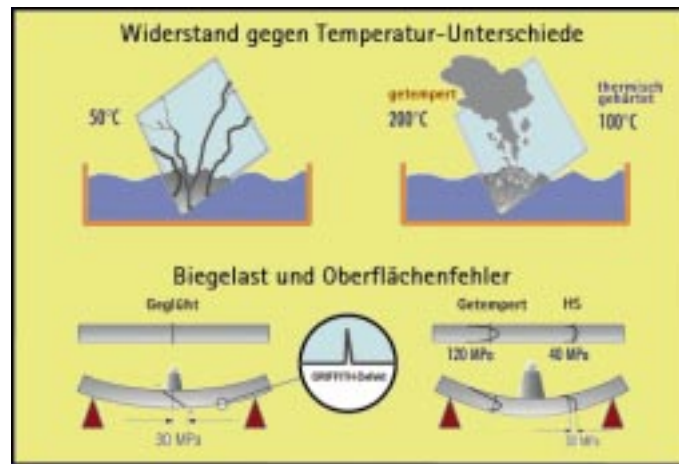


Bild 3: Eigenschaften von vergütetem/getempertem Glas

Sprödigkeit entsteht durch die mikroskopisch kleinen Brüche an der Glasoberfläche, die auch als Griffith Flaws bzw. Griffith-Einschlüsse bezeichnet werden und sich weiter öffnen, wenn eine Zugspannung auf die Oberfläche einwirkt.

Eine solche Zugspannung an der Oberfläche des Glases kann durch Verbiegen einer Glasscheibe oder auch durch Temperaturveränderungen entstehen. Eine plötzliche Veränderung der Temperatur im Bereich von 40 bis 50 °C reicht bereits, um das Glas brechen zu lassen. Getempertes Glas dagegen hält Temperaturveränderungen im Bereich von 200 °C aus, ohne zu brechen; thermisch gehärtetes Glas schließlich verträgt Temperaturschwankungen von bis zu 100 °C. Diese Erkenntnis ist von größter Bedeutung für den Einsatz von Bauglas, wie es z. B. für die Erstellung von Fassaden zum Einsatz kommt.

Die mechanische Festigkeit von getempertem Glas ist 4–5 mal höher als die von vergütetem Glas. Thermisch gehärtetes Glas ist etwas 2 mal so fest wie normales Glas. Dies liegt an den Spannungszuständen in den äußersten Glasschichten. Durch Druckspannung an der Oberfläche schließen sich die mikroskopisch kleinen Risse und verleihen dem Glas eine größere Festigkeit. Wird getempertes Glas gebrochen, so wird die gesamte, im Glas gespeicherte Energie von einem Augenblick auf den anderen freigesetzt, und das Glas bricht daher unter Entstehung kleiner Scherben. Thermisch gehärtetes Glas dagegen bricht unter Bildung großer Scherben und kann daher nicht bei Anwendungen eingesetzt werden, bei denen Sicherheitsglas vorgeschrieben ist.

Unterschiedliche Temper-Prozesse

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher technischer Lösungen für das Tempern und das thermische Härten von Glas. Unabhängig vom einzelnen Verfahren jedoch muß das Glas zunächst in einem Ofen auf eine Temperatur von 610 bis 660 °C erhitzt werden. Im Anschluß daran wird es in die Kühlanlage verbracht und unter Einsatz von Druckluft rasch heruntergekühlt.

Die Geschwindigkeit des Kühlprozesses entscheidet darüber, ob das Glas als thermisch gehärtetes oder als vollständig getempertes Glas eingestuft wird. In dem gegenwärtig am häufigsten eingesetzten Verfahren wird mit einem Rollbett-Temperofen (HTF) gearbeitet. In dieser auch als Schwingtemperofen bezeichneten Anlage schwingt das Glas während des Erhitzungszyklus vor und zurück.

Darüber hinaus wird oftmals auch mit dem kontinuierlichen horizontalen Tempern (CHF) gearbeitet. In diesem Verfahren wird das Glas während seiner Passage durch den Ofen nur in einer Richtung in Bewegung versetzt.

Zu besonderen Herstellungszwecken werden gelegentlich vertikale Öfen eingesetzt. Bei diesem Prozeß wird das Glas während des Erhitzens senkrecht in den Ofen gehängt, und die Erhitzung erfolgt vorwiegend durch Strahlung von beiden Seiten. Soll das Glas gebogen werden, so ist dieser Schritt dem Tempern vorzuschalten. Auch bei der Biegetechnologie gibt es verschiedene Verfahren wie z. B. das

Bild 5: Volumen/ Temperatur-Wechsel während der Wärmebehandlung

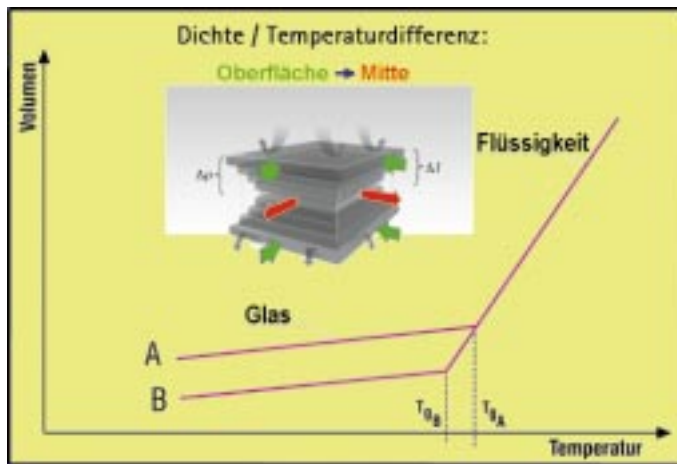
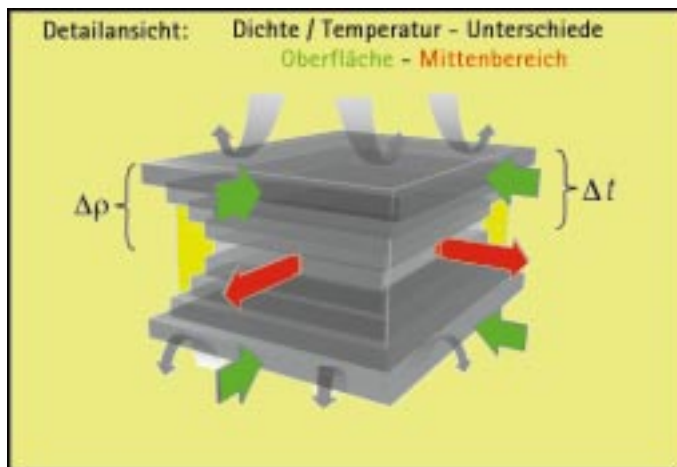


Bild 6: Dichte/ Temperatur-Unterschiede



Temperatur zu definieren, bei der es zur Ausbildung dieser Spannungszustände kommt. Damit diese Spannungen entstehen können, muß während des Kühlzyklus ein ausreichend deutlicher Temperaturunterschied zwischen Oberfläche und inneren Schichten des Glases erzeugt werden. Die Unterschiede in der Dichte des Glases und damit die Entstehung der Temperspannungen sind von der jeweiligen Temperaturdifferenz abhängig. Diese erforderliche Temperaturdifferenz wird durch die schwache Wärmeleitfähigkeit des Glases möglich.

Zur Vereinfachung stellen wir uns vor, die Glasscheibe sei in verschiedene Schichten oder Zonen unterteilt. Wenn das Glas an der Oberfläche auf eine Temperatur unterhalb des Übergangsbereichs heruntergekühlt ist und dort eine dauerhafte Molekularstruktur aufweist, dann befinden sich die inne-

ren Schichten des Glases nach wie vor in einem „flüssigen Zustand“, in dem die Moleküle sich weiterhin ständig neu ausrichten und enger aneinander anlagern. So wird in den inneren Schichten des Glases eine höhere Dichte erreicht als an der Oberfläche. Aufgrund dieser erhöhten Dichte im Inneren des Glases richtet sich eine hohe Druckspannung auf die Oberfläche, wodurch in den inneren Schichten des Glases eine gegenläufige Zugspannung entsteht. Die Druckspannung und die Zugspannung besitzen die gleiche Kraft.

Je effizienter gekühlt wird, desto höhere Spannungen entstehen während des Temperns. Auf der anderen Seite gilt jedoch; je sicherer man ein Brechen des Glases während des Tempervorgangs selbst vermeiden möchte, desto höher muß die Anfangstemperatur heraufgefahren werden. Eine Erhöhung der Glastemperatur kann leicht zu einer verminderten optischen Qualität des Glases führen, wenn die Wärmeleitung und die gezielte Einstellung der Hitze im Ofen nicht wie

erwartet ablaufen. Die Glasscheibe ist jedenfalls homogen zu erhitzen, während jede Überhitzung zu vermeiden ist. Auch die Steuerung der Bewegung des Glases im Ofen ist von großer Bedeutung, wenn eine gute optische Qualität erzielt werden soll.

Auch der Prozeß der thermischen Härtung des Glases setzt voraus, daß das Glas fast ebenso stark erhitzt wird wie beim Tempern. Allerdings kann das Glas bei diesem Verfahren bei einer Temperatur von 10 bis 20 °C weniger aus dem Ofen genommen werden, da die Kühlgeschwindigkeit deutlich langsamer ist als im Tempervorgang. Wenn das Glas langsam heruntergekühlt wird, dann ist der Temperaturunterschied zwischen der Glasoberfläche und den inneren Schichten geringer, so daß auch die Unterschiede in der Molekulardichte zwischen Oberfläche und inneren Schichten geringer ausfällt als bei getempertem Glas. Dies führt auf der anderen Seite zu deutlich geringeren Druckspannungen an der Oberfläche als im Falle von getempertem Glas.

Die Kantenbearbeitung und ihr Einfluß auf die Qualität des Endprodukts

Es ist eine allgemein bekannte Tatsache, daß die Qualität der Kantenbearbeitung von großer Bedeutung ist, da natürlich gerade die Kanten immer die Schwachstelle des Glases ausmachen. Die Kanten zeigen gewöhnlich eine Vielfalt unterschiedlichster Defekte, die allerdings zum größten Teil durch eine sachgemäße mechanische Bearbeitung des Glases vor dem Tempern zu beseitigen sind. Wird erhitztes Glas in die Kühlanlage verbracht und beginnt dort das rasche Herunterkühlen des Glases, dann entstehen in aller Regel innerhalb von wenigen Sekunden nach Anfang des Temper- oder thermischen Härtungs-Prozesses die Zugspannungen an der Glasoberfläche. Diese Zugspannungen wandeln sich sehr schnell, d. h. innerhalb von Sekunden, in Druckspannungen um. Der Beginn des Kühlzyklus ist bei diesem gesamten Prozeß die wichtigste Phase, da hier das Glas am leichtesten bricht, wenn die Kantenbearbeitung

oder die Oberflächenqualität des Glases schlecht ausgefallen sind. Die Kantenbearbeitung ist gerade bei der Verarbeitung von Automobilglas von besonderer Bedeutung, da die Temperatur des Glases bereits während des Transfer- und Biegeprozesses und damit noch vor dem Tempern abzunehmen beginnt.

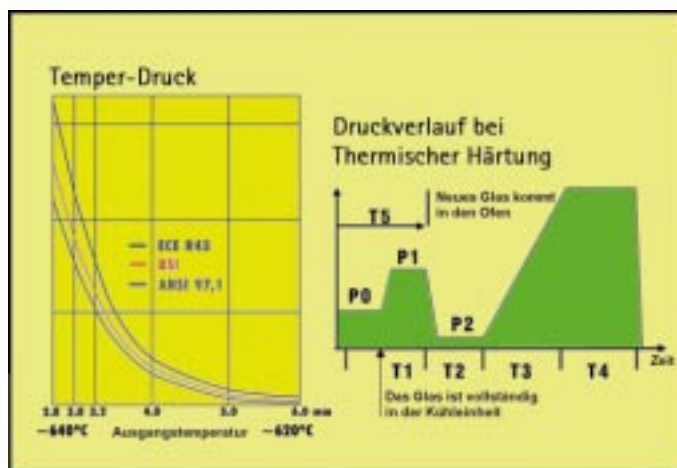
Im Vergleich mit Bauglas wird beim Temperieren von Automobilglas auch mit einer deutlich höheren Kühlgeschwindigkeit gearbeitet. Daraus ergeben sich besondere Erfordernisse bezüglich der Qualität der Kantenbearbeitung.

Gehärtetes Glas

Das im Bausektor auf breiter Basis eingesetzte, thermisch gehärtete Glas unterscheidet sich sowohl nach seinen Eigenschaften als auch nach dem Herstellungsverfahren von getempertem Glas. Der wesentlichste Unterschied liegt dabei in dem gefahrenen Kühl- druck.

Die im linken Teil der Grafik zu sehende Kurve zeigt, wie der für das

Bild 7: Drücke beim Tempern und beim thermischen Härten von Glas



Tempern erforderliche Luftdruck in dem Maße exponentiell ansteigt, da das Glas dünner wird. Während der normale Druck von 1,6 kPa für 6 mm starkes Glas ausreicht, kann bei 3 mm starkem Glas ein Druck von bis zu 23 kPa erforderlich werden. Das im Bausektor häufig eingesetzte Glas mit einer Stärke von 3,0 und 2,8 mm wird auf eine völlig unterschiedliche Weise hergestellt.

Thermisch gehärtetes Glas wird mit einem wesentlich geringeren Druck heruntergekühlt als getempertes Glas. Entscheidend für den Herstellungsprozess ist nicht die Höhe des Kühlkoeffizienten, sondern vielmehr die Frage, wie im Glas ein ausreichender Spannungszustand erreicht werden kann.

Bekanntlich ist die Höhe der erzeugten Spannung nicht nur von der korrekten und gleichmäßigen Temperatur des Glases abhängig, sondern auch von dem Wärmeübergangskoeffizienten während der Kühlung. Während der Herstellung von thermisch gehärtetem Glas ist die Steuerung dieses Kühlkoeffizienten alles andere als einfach, da hier ein sehr niedriger Druck erforderlich ist.

Die Lösung dieses Problems geht aus der anderen Hälfte von Bild 7 hervor. Die Anfangstemperatur für die Verarbeitung von thermisch gehärtetem Glas ist ungefähr die gleiche wie für getempertes Glas. Die Kühlung beginnt mit einer geringen Intensität; befindet sich die gesamte Glasscheibe in der Kühlsektion, dann wird die

ke des Glases steuerbar. Dadurch bekommen wir die entstehenden Spannungszustände sicher in den Griff. Ist die Temperatur in den inneren Glasschichten auf einen Wert von unter 470 °C abgesunken, so kann der Abschreckungskoeffizient erneut angehoben werden, da dies nun nicht mehr zu dauerhaften Spannungszuständen im Glas führen kann.

Thermisch gehärtetes Glas hat eine zweimal höhere Bruchfestigkeit als vergütetes Glas. Es ist allerdings wesentlich schwächer als temperiertes Glas. Dies resultiert aus der Tatsache, daß die im Glas erzeugte Spannung recht niedrig ist. Andererseits ist sie hoch genug, um z. B. die Temperaturschwankungen an der Fassade eines Gebäudes auszuhalten.

Aufgrund der niedrigen Spannung im Werkstoff zerbricht thermisch gehärtetes Glas unter Entstehung großer Scherben, anstatt wie temperiertes Glas zu kleinen Partikeln zu „zerkrümeln“. Aufgrund dieses Bruchverhaltens wird thermisch gehärtetes Glas oftmals zur Ausführung von Gebäudefassaden und für Verkleidungen im Überkopfbereich eingesetzt. Selbst wenn es bricht, fällt dieses Glas gewöhnlich nicht aus dem Rahmen, sofern es sachgemäß befestigt wurde.

Der Einsatz von thermisch gehärtetem Glas ist insbesondere in den USA und im pazifischen Raum weit verbreitet: dort setzt man es auch als eine Komponente von Verbundglas ein. Es verbessert die Bruchfestigkeit von Bauteilen aus Verbundglas sowie deren Festigkeit gegenüber Temperaturschwankungen [1].

Thermisch gehärtetes Glas und NiS-Verunreinigungen

Ein Grund für den verbreiteten Einsatz von thermisch gehärtetem Glas in den 70er und 80er Jahren waren die häufig vorkommenden Verunreinigungen aus NiS, die zu Glasbruch führten. Derartige Probleme waren insbesondere in Australien und in den USA aufgetreten. Die Gefahr eines spontanen Brechens von thermisch gehärtetem Glas ist nur äußerst gering, wenngleich sie nicht ganz auszuschließen ist, wenn allzu zahlreiche NiS-Verunreinigungen vorliegen

bzw. sich in der Mitte eines Glasteils anreichern.

Das spontane Brechen von getempertem Glas im Zusammenhang mit dem Auftreten von NiS-Verunreinigungen wurde erstmals im Jahre 1961 durch Ballantyne berichtet. Seit jener Zeit wurden zahlreiche Analysen von Brüchen bei temperiertem Glas erfaßt und berichtet. Spontane Brüche im Zusammenhang mit den genannten Einschlüssen wurden allerdings auch bei thermisch gehärtetem (halbgetempertem) Glas berichtet.

Das Problem des spontanen Glasbruchs entsteht bekanntermaßen durch eine Ausdehnung von NiS-Partikeln aufgrund eines sich langsam vollziehenden Übergangs von der Kristallstruktur Alpha-NiS (sechseckige Kristallform bei hoher Temperatur) zur Beta-NiS-Form (einer als Millerit bezeichneten, rhomboidalen Kristallform, die bei niedriger Temperatur entsteht). Während des Temperns werden die NiS-Steine im Verlaufe der Erhitzung vollkommen in den bei hoher Temperatur vorliegenden Zustand überführt, danach jedoch wird das Glas während des Temperns und der thermischen Härtung zu schnell heruntergekühlt, als daß die Kristallrückbildung zu der Niedrigtemperaturform Beta-NiS erfolgen könnte. Diese Rückbildung vollzieht sich erst später über Zeiträume, die von ein paar Minuten nach thermischer Behandlung bis zu mehr als 10 Jahren nach Installation der Verglasung reichen können [3].

Die gefährlichen Einschlüsse werden nach einem Bruch zwischen den „Schmetterlingsflügeln“ entnommen, sofern die geborstene Scheibe nicht aus dem Rahmen fällt (s. Bild 8).

Bild 8: Typisches Fehlerbild nach einem NiS-induzierten Spontanbruch



Meistens erbringt die Analyse polykristalline NiS-Kügelchen mit einem Durchmesser von 0,04 bis 0,7 mm, und sie finden sich durchweg in dem unter Zugspannung stehenden Teil des getemperten Glases.

Obwohl die meisten der gefährlichen NiS-Einschlüsse sich in den unter hoher Zugspannung stehenden Bereichen von getempertem Glas befinden, werden manche von ihnen auch in Bereichen unter niedriger Zugspannung angetroffen. Diese Erkenntnis könnte die Tatsache erklären, daß es in halbgetempertem Glas ebenfalls zu spontanen Brüchen kommt.

In Anbetracht dieses Problems des spontanen Zerbrechens von Glas haben die Hersteller immer wieder versucht, den Einsatz von Nickel in Glasöfen zu vermeiden oder die NiS-Einschlüsse am Ausgang der Schmelze bzw. vor dem Tempern abzufangen. Bisher wurden dabei nur enttäuschende Ergebnisse erreicht, wahrscheinlich weil bereits sehr geringe Nickelmengen in der Glasschmelze zur Entstehung zahlreicher gefährlicher NiS-Steine führen können (die Entstehung von 50 000 gefährlichen NiS-Steinchen mit einem Durchmesser von 100 µm erfordert lediglich 0,1 g Nickel) und wahrscheinlich weil die standardmäßigen Nachweismethoden eine zu geringe Auflösung und/oder zu geringe Selektivität für einen Nachweis von NiS-Partikeln besitzen, die mitunter nicht größer als 40 µm sind. Schließlich befinden sich innerhalb des Glases ja auch zahlreiche andere Einschlüsse.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt scheint die Wärmebehandlung von getempertem oder halbgetempertem

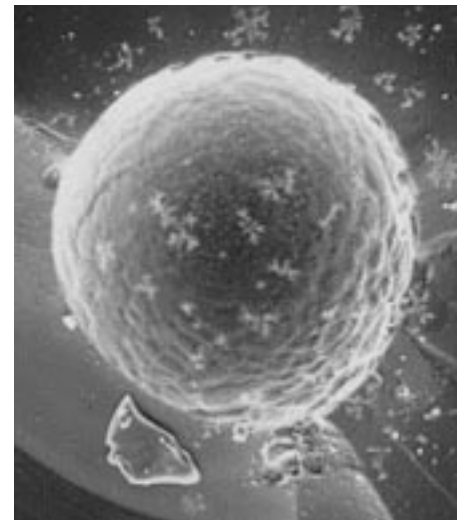


Bild 9: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines typischen NiS-Einschlusses (hier 0,2 mm Durchmesser)

Glas, die auch als „Heat Soak Test“ (HST) bzw. mitunter als „Qualitätstest“ bezeichnet wird, die einzige wirksame Methode zu sein, um spätere spontane Brüche zu vermeiden.

Der Heat-Soak Test (HST)

Der HST ist kein zerstörungsfreier Test; das Glas wird mehrere Stunden lang auf ca. 280 °C erhitzt, um den Kristallübergang von Alpha-NiS nach Beta-NiS zu beschleunigen und danach das möglicherweise kontaminierte Glas zu beseitigen. Der Standard-HST benötigt eine mehr als 10stündige Wärmebehandlung einschließlich einer Zeit von 1–6 Stunden zur Erhitzung großer Glasmengen auf bis zu 260–300 °C; dieser Phase folgt ein 3–12 Stunden anhaltendes Temperaturplateau, bevor langsam auf Raumtemperatur heruntergekühlt wird.

Die dabei in der Umgebung der zu spontanen Brüchen führenden NiS-Einschlüsse entstehenden bzw. erzwungenen Spannungszustände werden potentiell durch folgende Faktoren beeinflusst:

- die Größe der Einschlüsse,
- die Reinheit der Einschlüsse
- den Standort der Einschlüsse innerhalb einer Glasscheibe,
- die Härtings-(Temperierungs-) Spannungen in der Umgebung der Einschlüsse

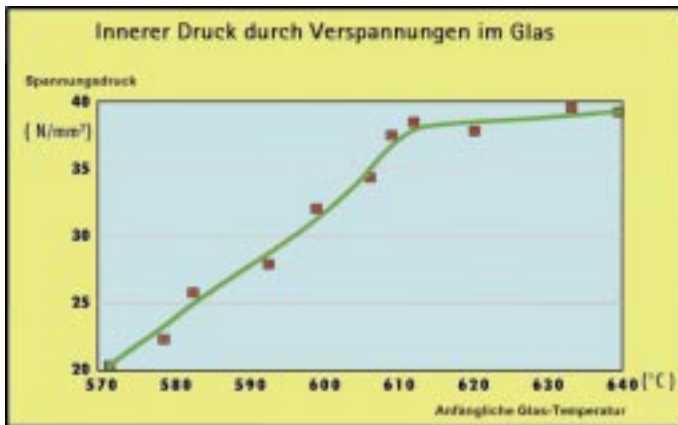


Bild 10

- die Umgebungstemperatur, welcher das Glas ausgesetzt ist,
- die Membranspannungen, die in Abhängigkeit von Wind und Druckbeaufschlagung entstehen, sowie
- die Größe und das Längenverhältnis der Glasscheibe [4].

Der Mindestdurchmesser von NiS-Einschlüssen, bei dem in einer getemperten Glasscheibe mit inneren Zugspannungen von 50–60 MPa spontane Brüche erwartet werden, liegt im Bereich von 44–58 μm , was experimentell festgestellt wurde. Für das Entstehen von spontanen Brüchen in thermisch gehärtetem Glas sind größere NiS-Einschlüsse, z. B. im Bereich von 160 μm , erforderlich, wenn die Restzugspannung im Glas z. B. bei 25 MPa liegt [3].

Einzelne Gesichtspunkte zur Herstellung von gehärtetem Glas

Die Werte für die Spannungsfestigkeit im Glas müssen nach den ASTM C1048-Normen im Bereich zwischen 3500 und 10 000 psi liegen. Andere geltende Normen sind unter anderem JIS R3222, GGF und die neue europäische Norm prEN 1863, die gegenwärtig zur Abgabe von Stellungnahmen ausgegeben wird. Jede dieser Normen weist gewisse Eigenheiten auf, jedoch geht es im wesentlichen darum, die Spannungswerte festzulegen, nach deren Erreichen das Glas unter Bildung großer Scherben brechen könnte.

Bei der Herstellung von thermisch gehärtetem Glas ist eine Reihe von

Fakten zu berücksichtigen, die nachstehend erörtert werden sollen.

Die Temperatur des Glases bei Ende der Herstellung kann 10–15 Grad Celsius niedriger liegen als im Falle von getempertem Glas. Dieses kann potentiell eine bessere optische Qualität erbringen, was insbesondere im Falle einer späteren Weiterverarbeitung zu Verbundglas ein wichtiger Vorteil ist. Die Glastemperatur darf jedoch nicht zu stark absinken, da in diesem Falle die sichere Beherrschung der im Glas entstehenden Spannungszustände nicht gewährleistet werden kann. Diese Spannungszustände müssen in einem Bereich gehalten werden, in dem sie sich stabil und vorhersehbar verhalten; Bild 10 macht dies deutlich.

Allerdings muß das Glas auch dann nicht zwingend brechen, wenn es bei einer Temperatur von weniger als 590 Grad Celsius aus dem Ofen entnommen wird; jedoch gibt es in diesem Falle keinerlei Gewähr bezüglich der erzielbaren Spannungen, und möglicherweise erfüllt dieses Glas auch die bestehenden Normen nicht.

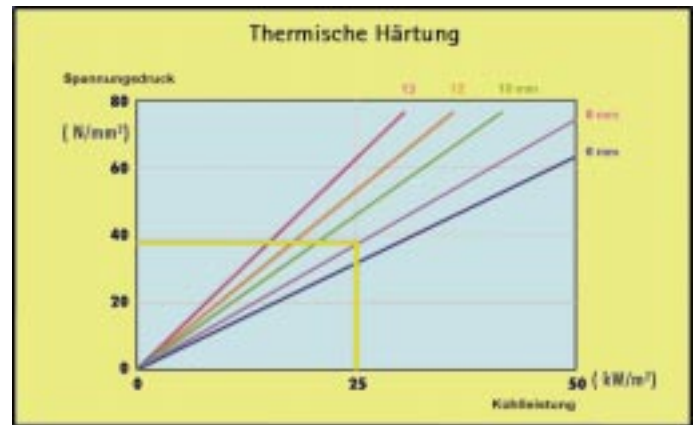


Bild 11

Bei der Herstellung von qualitativ hochwertigem, thermisch gehärtetem Glas ist ein besonderes Maß an Aufmerksamkeit erforderlich, damit die Temperatur nicht zu stark absinkt; dies gilt insbesondere bei kontinuierlichen Herstellungsverfahren.

Die Kühlgeschwindigkeit

Einer Faustregel zufolge benötigt thermisch gehärtetes Glas etwa 10 % des Kühldrucks von normalem getempertem Glas. Diese Regel trifft im Falle von 3–8 mm starkem Glas recht genau zu. Bei höheren Glasstärken ist eine besondere Behandlung erforderlich, da hier die Kühlung zu rasch erfolgt. Die Kühlrate ohne Gebläse liegt im Bereich von 20 kW pro Quadratmeter, und hierdurch entstehen bei größeren Glasstärken allzu starke Spannungen. Es gibt jedoch in den Schwingkühlanlagen Möglichkeiten, auch Glas von bis zu 15 mm Stärke erfolgreich herunterzukühlen. In diesem Falle ist die Temperatur an der Außenseite zu erhöhen, und es ist

Definition von HS-Glas			
	ASTM C1048	GGF	JIS R 3222
Oberflächen-Drucklast	24 - 69 N/mm ² 3500 - 10000 PSI	25 - 68 N/mm ² 3500 - 8700 PSI	20 - 60 N/mm ² 3000 - 8700 PSI
Kanten-Drucklast	> 38 N/mm ²	-	-
Mechanische Festigkeit	~ 2 X	> 1.5 X	~ 2 X
Thermischer Widerstand	-	150 °C 300 °F	-

Die Tabelle zeigt die zwischen den einzelnen Normen bestehenden Unterschiede

eine indirekte Kühlung unter gleichzeitiger Verwendung von wärmeretflektierenden Materialien vorzunehmen.

Merkmale von thermisch gehärtetem Glas

Zusammengefaßt lassen sich folgende charakteristische Merkmale aufführen, die für den Weiterverarbeiter von Nutzen sind:

- Höhere mechanische Festigkeit als bei vergütetem Glas, zweimal höhere Festigkeit
- Höhere thermische Festigkeit als bei vergütetem Glas, plötzliche Temperaturschwankungen und Differenzen bis zu 100 Grad Celsius möglich
- Praktisch keine Gefahr eines spontanen Glasbruchs aufgrund von Nickelsulfid-Einschlüssen, normalerweise kein Soak-Test erforderlich
- Im Falle von Brüchen bleibt dieses Glas mit höherer Wahrscheinlichkeit in seinem Rahmen als getempertes Glas

- Möglicherweise bessere optische Qualität als bei getempertem Glas

Anwendungen für thermisch gehärtetes Glas

Kurz zusammengefaßt sind hier noch einige Tips und Anregungen zur Anwendung von gehärtetem Glas zusammengefaßt:

- Soweit ästhetisch möglich, kann dieses Glas anstelle von vergütetem Glas verarbeitet werden; zusätzliche Festigkeit
- Geglühtes Glas kann unter Beibehaltung der erforderlichen Festigkeit, der leichten Bauweise und des schonenden Umgangs mit Werkstoff durch dünneres gehärtetes/getempertes Glas ersetzt werden
- An Gebäudefassaden im Über-Kopf-Bereich in gebogenen Anwendungen und als Fensterglas
- Nach Weiterverarbeitung zu Verbundglas für Verglasungen im Über-Kopf-Bereich

- Anwendungen, bei denen eine Sicherheitsverglasung nicht erforderlich ist

Literatur

- [1] How to create tempering stresses and their effect on tempered glass properties (Die Erzeugung von Temperspannungen und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von getempertem Glas), Glass Processing Days '97, Konferenzband, Seiten 125–129.
- [2] R. Gardon: Thermal tempering of glass (Das thermische Tempern von Glas), Glass Science and Technology, herausgegeben von D. R. Uhlmann und N. J. Kredil, Academic Press 1980.
- [3] Reliable and shorter heat soak test to avoid spontaneous fracture of heat strengthened and tempered glasses (Ein zuverlässiger und kürzerer Heat Soak-Test zur Vermeidung spontaner Brüche bei thermisch gehärtetem und getempertem Glas), F. Bordeaux und A. Kasper, Glass Processing Days '97, Konferenzband, Seiten 85–89.
- [4] Factors that influence spontaneous failure in thermally treated glass-nickel sulphide (Einflußfaktoren beim Entstehen spontaner Brüche in thermisch gehärtetem Glas durch Nickelsulfid-Einschlüsse), Dr. Leon Jacob, Glass Processing Days '97, Konferenzband, Seiten 323–327.
- [5] LowE-tempering (LowE-Tempem), Glass Processing Days '97, Konferenzband, Seiten 103–107.