

## Thermisches Vorspannen von Gläsern niedriger Wärmeausdehnung

Von Werner Kiefer, Mainz

(Vortrag auf dem HVG-Kolloquium über Oberflächenbehandlung von Gläsern am 13. Oktober 1983 in Frankfurt (Main))

(Mitteilung aus den Schott Glaswerken, Mainz)

(Eingegangen am 11. Juli 1984)

An Hand vereinfachender Modellvorstellungen werden Formeln zur Abschätzung der erreichbaren Druckvorspannungen in Glasscheiben beim thermischen Vorspannen von Gläsern mit Wärmeausdehnungswerten von  $3,25 \cdot 10^{-6}$  bis  $9,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  angegeben. Die Formeln erlauben dem Praktiker eine Abschätzung über die erzielbare Druckvorspannung in einem vorgegebenen Glas und einer vorhandenen Vorspannungsanlage oder das benötigte Vorspannungsverfahren zur Erzeugung einer gewünschten Vorspannung in einem vorgegebenen Glas.

Die Formeln enthalten nur bekannte Glasdaten (thermischer Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$ , Elastizitätsmodul  $E$ , Poisson-Zahl  $\mu$ , Transformationstemperatur  $T_g$ , Glasdicke  $d$ ), leicht zu

ermittelnde Daten der Vorspannungsanlage (Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha'$ , Aufheiztemperatur  $T_A$ , Temperatur des Kühlmediums  $T_\infty$ ), die Wärmeleitfähigkeit des Glases und die Biegefestigkeit der vorzuspannenden Glasscheibe. Es wird ein wirksamer Wärmeleitkoeffizient für transparente Gläser angegeben, da die Wärmeleitfähigkeit von Gläsern temperaturabhängig ist.

Die Arbeit geht auf eine Reihe von Vorspannungsverfahren ein, die auf Grund ihrer unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten die Palette der technischen Gläser mit thermischen Längenausdehnungskoeffizienten zwischen  $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (Kalk-Natronsilicatglas) und  $3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (Borosilicatglas, z. B. Schott-Glas 8330) abdecken.

### Thermal toughening of low thermal expansion glasses

Simplified model assumptions are used to develop formulae for estimating the attainable compressive stresses produced in glass plates by thermal toughening for glasses with thermal expansion coefficients from  $3,25$  to  $9,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . The formulae allow the operator to estimate the attainable compressive stress for a given glass in defined toughening conditions or the details of the procedure needed to produce a desired stress in a particular glass.

The formulae require only the basic data for the glass (thermal expansion  $\alpha$ , Young's modulus  $E$ , Poisson's ratio  $\mu$ , transformation temperature  $T_g$ , glass thickness  $d$ ), easily determined parameters for

the toughening rig (heat transfer coefficient  $\alpha'$ , heating temperature  $T_A$  and temperature of the quenching medium  $T_\infty$ ), the thermal conductivity of the glass and the bending strength of the glass plate. An efficient thermal conductivity is given for transparent glasses because conductivity varies with temperature.

A range of toughening procedures are considered, which cover, because of their different heat transfer coefficients the whole field of technical glasses with heat transfer coefficients between  $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (soda-lime-silica) and  $3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (borosilicate, e.g. Schott-Glas 8330).

### Trempe thermique de verres à basse dilatation thermique

A l'aide de modèles simplifiés on donne des formules qui permettent d'évaluer l'état de contrainte en compression accessible dans des vitres lors de la trempe thermique de verres ayant des dilatations thermiques de  $3,25 \cdot 10^{-6}$  jusqu'à  $9,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Les formules permettent au praticien d'évaluer l'état de contrainte en compression accessible dans un verre et un dispositif de contrainte donnés ou le procédé de trempe nécessaire pour produire une contrainte donnée dans un verre donné.

Les formules ne renferment que des caractéristiques connues du verre (dilatation thermique  $\alpha$ , module  $E$ , coefficient de Poisson  $\mu$ , température de transition vitreuse  $T_g$ , épaisseur de verre  $d$ ), des données du dispositif de contrainte facilement déterminables

(coefficient de transfert de chaleur  $\alpha'$ , température de trempe  $T_A$ , température du milieu réfrigérant  $T_\infty$ ), la conductivité thermique du verre et la résistance à la flexion de la vitre à tremper. On indique un coefficient de conductivité thermique efficace pour les verres transparents, puisque la conductivité thermique des verres dépend de la température.

Cette étude aborde une série de procédés de trempe qui couvrent la fabrication de la palette des verres techniques ayant des coefficients de transfert de chaleur compris entre  $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (verre silicosodocalcique) et  $3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (verre de borosilicate, par exemple Schott-Glas 8330).

Die Erhöhung der Bruchfestigkeit von Glas durch thermisches Vorspannen ist eine seit langem bekannte Technik. Sie findet Anwendung in der Bauindustrie zur Herstellung von Einscheibensicherheitsglas (ESG), in der Kraftfahrzeugindustrie für Autoverglasungen oder in der Hohlglasindustrie für hochfeste Trinkgläser. Für diese Anwendungen werden Kalk-Natronsilicatgläser mit einem  $\alpha$ -Wert um  $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  eingesetzt. Aber auch technische Spezialgläser mit niedrigeren  $\alpha$ -Werten werden ther-

misch vorgespannt, so z. B. hochlaugenbeständige Borosilicatgläser mit  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  für Schaugläser in Dampfkessel- und Hochdruckanlagen (MAXOS®-Schaugläser der Schott Glaswerke) oder das Borosilicatglas mit  $\alpha = 3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  für Brandschutzgläser (PYRAN®-Brandschutzglasscheiben der Schott Glaswerke).

Über die Theorie des thermischen Vorspannens und die Berechnung der hierbei entstehenden Spannungsprofile existiert eine Vielzahl von Arbeiten

[1 bis 3]. In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, den Praktikern eine Formel in die Hand zu geben, die es ihnen erlaubt, an Hand bekannter oder experimentell leicht zu ermittelnder Daten sich folgende Fragen zu beantworten:

a) Welche Vorspannungen lassen sich mit einer vorhandenen Vorspannungsanlage in vorgegebenen Gläsern erzeugen?

oder

b) welches Vorspannungsverfahren wird benötigt, um in einem vorgegebenen Glas eine gewünschte Vorspannung zu erzeugen?

Darüber hinaus sollen die Grenzen des thermischen Vorspannens abgeschätzt werden.

### 1. Vereinfachte Modellvorstellungen

Das thermische Vorspannen von Gläsern geschieht durch rasches Aufheizen auf Temperaturen zwischen der Transformationstemperatur  $T_g$  und der Erweichungstemperatur ( $10^{7,6}$  dPa s) mit anschließendem raschen Abschrecken. Beim Abschrecken einer Kugel entsteht zunächst eine Temperaturdifferenz innerhalb der Kugel, und beim Unterschreiten der Einfriertemperatur erstarrt die Oberfläche. Obwohl das Glasinnere noch plastisch ist und sich durch Fließvorgänge zusammenziehen könnte, wird es durch die starre Oberflächenschicht daran gehindert. Die in einer Kugel entstehende Vorspannung wird durch das Einfrieren der Oberflächenschicht im aufgeweiteten Zustand sowie durch die Behinderung der Volumenkontraktion des noch plastischen Anteils im Inneren verursacht; d. h. sie ist sowohl von der Wärmeausdehnung  $\alpha$  und dem Elastizitätsmodul  $E$  oberhalb  $T_g$  als auch von  $\alpha$  und  $E$  unterhalb  $T_g$  abhängig.

Glasscheiben, deren Länge und Breite sehr groß sind gegenüber ihrer Dicke ( $x$ -Richtung), können sich beim Abschrecken solange in der  $x$ -Richtung

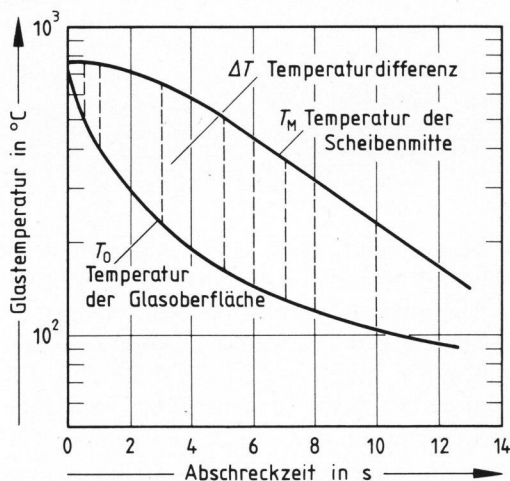


Bild 1. Glaskemperatur in Abhängigkeit von der Abschreckzeit beim thermischen Vorspannen durch Sprühen.

zusammenziehen, wie ein plastisches Fließen möglich ist, d. h. bis das Glasinnere die Einfriertemperatur  $T_E$  erreicht hat. In der vereinfachten Modellvorstellung wird davon ausgegangen, daß die Vorspannung bei Glasscheiben nur von der Wärmeausdehnung und dem Elastizitätsmodul unterhalb  $T_g$  abhängig ist.

Die im folgenden durchgeführten Betrachtungen gelten nur für Glasscheiben und Glasrohre, nicht aber für Glaskugeln oder -stäbe. Beim thermischen Vorspannen sind stets zwei Vorgänge zu beachten:

a) der vorübergehende Aufbau von Zugspannungen an der Oberfläche beim Abschrecken und

b) der Aufbau von Druckspannung an der Oberfläche nach Ende des Vorspannungsprozesses.

### 2. Druckvorspannung nach dem Vorspannungsprozeß

Die Spannung  $\sigma$ , die sich in einem Glas bei Temperaturwechsel unterhalb  $T_g$  aufbaut, ist bekanntlich der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  und der spezifischen Wärmespannung  $\varphi$  ( $\varphi = \alpha \cdot E / (1 - \mu)$ ) proportional:

$$\sigma = \Delta T \cdot \varphi \quad (1)$$

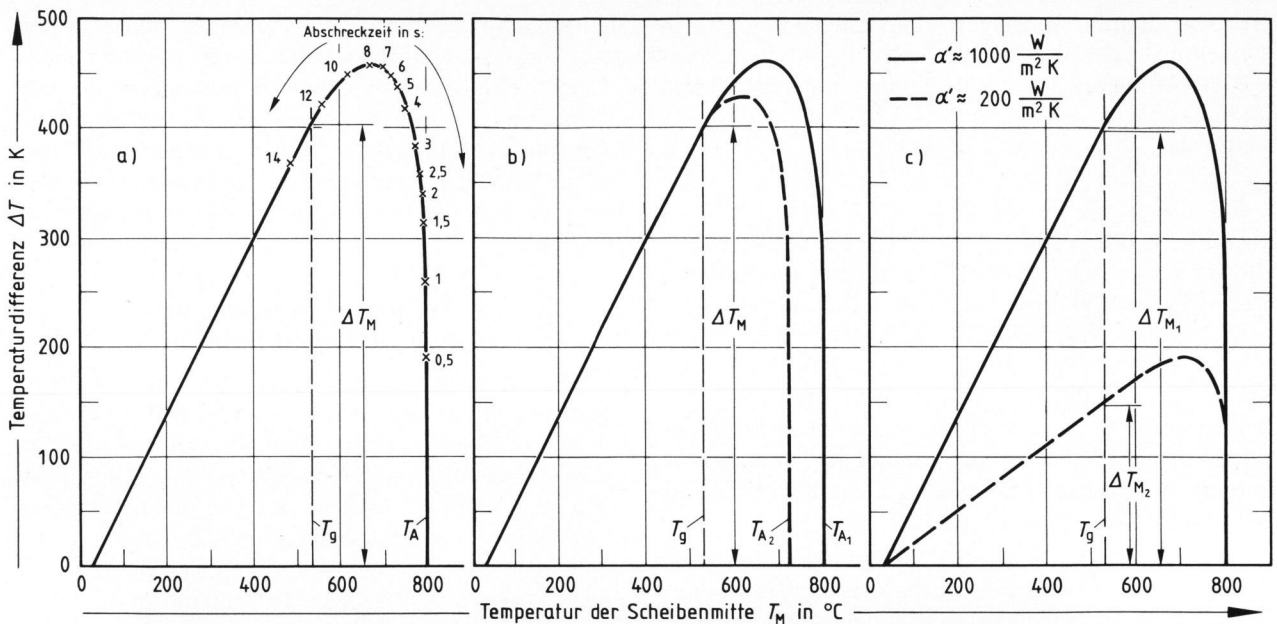
(in  $\text{N/mm}^2$ ). Eine analoge Abhängigkeit muß bestehen zwischen der Druckvorspannung  $\sigma_v$  und dem Produkt aus  $\varphi$  (spezifische Wärmespannung) und einer Temperaturdifferenz  $\Delta T'$ , die sich beim Abschrecken zwischen Glasoberfläche und Glasinnerem ausbildet:

$$\sigma_v = \Delta T' \cdot \varphi \quad (2)$$

(ebenfalls in  $\text{N/mm}^2$ ). Die maximale Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\max}$ , die sich beim Abschrecken zwischen Glasoberfläche und Glasinnerem ausbildet, ist abhängig von dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha'$  (in  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ ), der Aufheiztemperatur  $T_A$ , der Temperatur des Kühlmittels  $T_\infty$ , der Glasdicke  $d$  und der Wärmeleitfähigkeit des Glases  $\lambda$  (in  $\text{W}/(\text{m K})$ ).

Gardon [1] hat gezeigt, daß beim Abschrecken mit Luft ab einer bestimmten Aufheiztemperatur keine Zunahme der Vorspannung mehr erfolgt. Diese Temperatur wird häufig als Sättigungstemperatur bezeichnet. Da die maximale Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\max}$ , die beim Abschrecken zwischen Glasoberfläche und Glasinnerem auftritt, der Aufheiztemperatur  $T_A$  proportional ist, kann  $\Delta T_{\max}$  nicht die für die Druckvorspannung relevante Temperaturdifferenz  $\Delta T'$  sein.

Um die Temperaturdifferenz  $\Delta T'$ , die für die Druckvorspannung maßgebend ist, zu ermitteln, wurden experimentell die Temperatur der Scheibenoberfläche  $T_0$  und die Temperatur der Scheibenmitte  $T_M$  während des Abschreckvorganges gemessen (Bild 1). Die Temperaturdifferenz  $\Delta T' = T_M - T_0$



Bilder 2a bis c. Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Glasoberfläche und Glasinnerem (Scheibenmitte) in Abhängigkeit von der Temperatur im Glasinnerem (Scheibenmitte)  $T_M$ ; a) Darstellung mit Abschreckzeiten; b) für verschiedene Aufheiztemperaturen  $T_A$ ; c) für verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha'$ .

nimmt zunächst rasch zu, um dann langsam abzufallen.

In Bild 2a ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_M - T_O$ ) gegen die Temperatur der Scheibenmitte  $T_M$  aufgetragen. In dem vorliegenden Beispiel steigt in den ersten zwei bis drei Sekunden die Temperaturdifferenz stark an, ohne daß sich die Temperatur der Scheibenmitte wesentlich ändert. Nach 7 bis 8 s wird die maximale Temperaturdifferenz  $\Delta T_{max}$  erreicht. Da die Glasoberfläche nach etwa 12 s die Kühltemperatur  $T_\infty$  erreicht hat, wird  $\Delta T \approx T_M$ .

Nach der Modellvorstellung kann sich die Glasscheibe beim Abschrecken durch plastisches Fließen so lange zusammenziehen, bis das Glasinnere die Einfriertemperatur  $T_E$  erreicht hat. Da das Glasinnere deutlich langsamer abkühlt als die Glasoberfläche, kann für das Glasinnere die Einfriertemperatur gleich der Transformationstemperatur gesetzt werden ( $T_E = T_g$ ). Die für die Druckvorspannung maßgebende Temperaturdifferenz  $\Delta T'$  ist demnach die Temperaturdifferenz  $\Delta T_M$ , die herrscht, wenn die Glasmitte die Transformationstemperatur  $T_g$  erreicht hat (Bild 2a).

Hieraus folgt nach Gleichung (2):

$$\sigma_v = \Delta T_M \cdot \varphi \tag{3}$$

(in  $N/mm^2$ ). Aus Bild 2b geht hervor, daß oberhalb einer bestimmten Aufheiztemperatur sich  $\Delta T_M$  nicht mehr verändert. Dies erklärt auch das Auftreten einer Sättigungstemperatur nach [1]. Wenn das Glasinnere die Transformationstemperatur erreicht ( $T_M = T_g$ ), hat die Glasoberfläche bereits die Tem-

peratur des Kühlmittels erreicht ( $T_O = T_\infty$ ). Hieraus ergibt sich, daß

$$\Delta T_M \approx (T_g - T_\infty)$$

ist bzw.

$$\Delta T_M = m \cdot (T_g - T_\infty) \tag{4}$$

(in K). Die Steigung  $m$  wird durch die Glasdicke  $d$ , die Wärmeleitfähigkeit des Glases  $\lambda$  und den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha'$  bestimmt. Bild 2c zeigt die Abhängigkeit von  $\Delta T_M$  vom Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha'$ . Die Steigung  $m$  muß darüber hinaus eine dimensionslose Zahl von  $\leq 1$  sein, da  $\Delta T_M \leq (T_g - T_\infty)$  ist. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha'$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die Scheibendicke  $X$  ( $X = d/2$ ) werden durch die Biotzahl ( $Bi$ ) verknüpft

$$Bi = \frac{\alpha' \cdot X}{\lambda}$$

Die Forderung nach einer dimensionslosen Zahl  $\leq 1$  wird erfüllt durch den Ausdruck

$$m = \frac{Bi}{1 + Bi} = \frac{\alpha' \cdot X}{\lambda + \alpha' X} \tag{5}$$

Durch die Einführung der Biotzahl ist es nun möglich, die experimentell schwer bestimmbare Temperaturdifferenz  $\Delta T_M$  durch bekannte bzw. leicht zugängliche Größen zu ersetzen:

$$\Delta T_M = \frac{\alpha' \cdot X}{\lambda + \alpha' X} \cdot (T_g - T_\infty) \tag{6}$$

(in K). Durch Einsetzen von Gleichung (6) in Gleichung (3) läßt sich die beim thermischen Vorspannen entstehende Druckvorspannung berechnen

$$\sigma_v = \frac{\alpha' \cdot X}{\lambda + \alpha' X} \cdot \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot (T_g - T_\infty) \quad (7)$$

In Bild 3 ist  $\sigma_v$  gegen  $\varphi \cdot (T_g - T_\infty)$  für verschiedene Gläser aufgetragen. Die Gläser liegen im Rahmen der Meßgenauigkeit auf einer Geraden. Dies bedeutet, daß die Wärmeleitfähigkeitswerte der Gläser ähnlich sind. Aus der Steigung läßt sich eine wirksame Größe für  $\lambda$  von 1,45 W/(m K) für transparente Gläser abschätzen. Da die Wärmeleitfähigkeit von Gläsern mit steigender Temperatur zunimmt, liegt dieser Wert über dem, der für Gläser bei Raumtemperatur angegeben wird.

Für die Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten stehen mehrere Methoden zur Verfügung, auf die hier im einzelnen nicht eingegangen werden soll.

Im Falle einer unendlich raschen Abschreckung strebt  $\alpha' \rightarrow \infty$  und damit die Steigung  $m$  nach 1. Hiermit ist die maximale Vorspannung, die theoretisch in einem Glas erzeugt werden kann:

$$\sigma_{v(max)} = (T_g - T_\infty) \cdot \varphi; \quad (8)$$

z. B. Floatglas  $\sigma_{v(max)} = (530 - 20) \cdot 0,8 = 408 \text{ N/mm}^2$  und Schott-Glas 8330  $\sigma_{v(max)} = (530 - 20) \cdot 0,25 = 102,5 \text{ N/mm}^2$ .

Die bei Floatglas theoretisch erreichbare Druckvorspannung von 400 N/mm<sup>2</sup> kann in der Praxis nicht erreicht werden, da hierbei zu hohe temporäre

Zugspannungen entstehen. Darüber hinaus bildet sich zum Spannungsausgleich im Inneren der Glasscheibe eine etwa halb so hohe Zugspannung aus. Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Zugspannung im Glasinneren einen Wert von 60 bis 70 N/mm<sup>2</sup> und damit die Druckspannung in der Oberfläche einen solchen von 120 bis 140 N/mm<sup>2</sup> nicht überschreiten sollten.

### 3. Temporäre Zugspannungen in der Oberflächenschicht

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde nicht berücksichtigt, daß sich während des Abkühlens vorübergehend eine Zugspannung aufbaut, die zur Zerstörung der Glasscheibe führen kann. Auch diese Zugspannung ( $\sigma_z$ ) wird wieder von einer Temperaturdifferenz und der spezifischen Wärmespannung  $\varphi$  abhängen. Analog der Abhängigkeit zwischen  $\Delta T$  und  $T_M$  wird nun  $\Delta T$  gegen die Temperatur der Glasoberfläche  $T_0$  während des Abschreckprozesses aufgetragen (Bild 4a). Es handelt sich hierbei um das

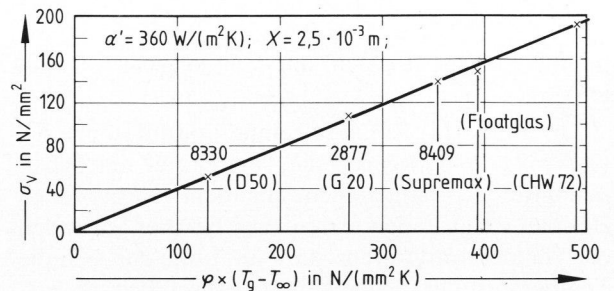
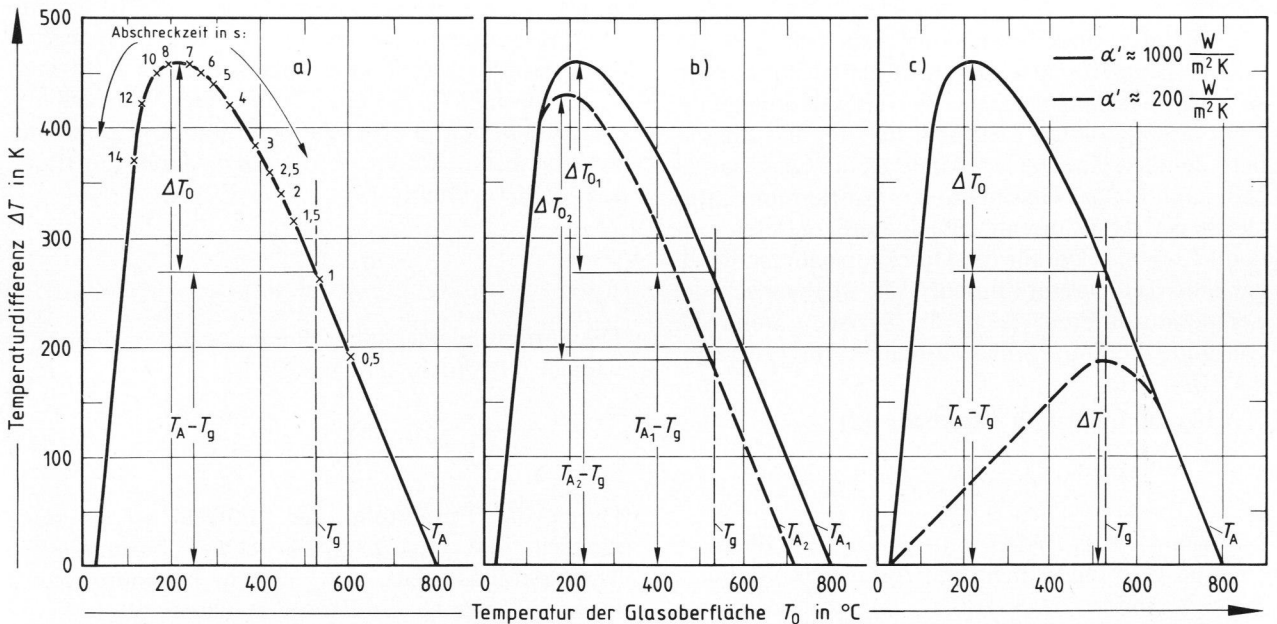


Bild 3. Druckvorspannung in Abhängigkeit von der spezifischen Wärmespannung  $\varphi$  und von der Temperaturdifferenz  $T_g - T_\infty$ .



Bilder 4a bis c. Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Glasoberfläche und Glasinnerem (Scheibenmitte) in Abhängigkeit von der Temperatur der Glasoberfläche  $T_0$ ; a) Darstellung mit Abschreckzeiten; b) für verschiedene Aufheiztemperaturen  $T_{A1}$ ; c) für verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha'$ .

Spiegelbild des Bildes 2a. Zu Beginn des Abschreckprozesses ist  $\Delta T$  gleich der Temperaturänderung von  $T_O$ , da sich die Temperatur der Scheibenmitte noch nicht ändert. Die maximale Temperaturdifferenz wird bei einem großen Wärmeübergangskoeffizienten erreicht, wenn die Temperatur der Oberfläche schon nahe  $T_\infty$  ist.

Solange die Temperatur der Glasoberfläche oberhalb der Einfriertemperatur  $T_E$  liegt, kann sich keine Zugspannung aufbauen. Kühlt sich nach Erreichen der Einfriertemperatur die Oberfläche weiterhin rascher ab als das Glasinnere, dann kann sich in der Glasoberfläche eine Zugspannung ausbilden. Diese Zugspannung wird um so größer sein, je größer die Temperaturdifferenz nach Erreichen der Einfriertemperatur noch wird. In Bild 4a ist dieser Anstieg der Temperaturdifferenz mit  $\Delta T_O$  gekennzeichnet. An Stelle der Einfriertemperatur ist die Transformationstemperatur  $T_g$  eingetragen. Im Gegensatz zum Glasinneren kann bei der Glasoberfläche die Einfriertemperatur nicht gleich der Transformationstemperatur gesetzt werden. Dies bedeutet, daß  $\Delta T_O$  mit steigender Einfriertemperatur zunimmt und in der Praxis größer ist als in Bild 4a dargestellt. Beim raschen Abschrecken erreicht die Glasoberfläche die Transformationstemperatur, bevor sich die Temperatur im Glasinneren wesentlich verändert. Das bedeutet, daß sich die maximale Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\max}$  zusammensetzt aus

$$\Delta T_{\max} = \Delta T_O + (T_A - T_E) \quad (9)$$

(in K). Unter der Annahme, daß die Temperaturdifferenz  $\Delta T_O$  für die temporäre Zugspannung  $\sigma_Z$  verantwortlich ist, folgt

$$\sigma_Z = \Delta T_O \cdot \varphi \quad (10)$$

Zur Abschätzung der Druckvorspannung, die unter Berücksichtigung der temporären Zugspannung maximal erreicht werden kann, dient die folgende Betrachtung. Aus Bild 2a geht hervor, daß  $\Delta T_M < \Delta T_{\max}$ , und aus Gleichung (10) folgt:  $\Delta T_{\max} = \Delta T_O + (T_A - T_E)$ . Hieraus ergibt sich

$$\Delta T_M < \Delta T_O + (T_A - T_E) \quad (11)$$

Durch Multiplikation mit der spezifischen Wärmevorspannung  $\varphi$  erfolgt der Übergang zu den Spannungen

$$\Delta T_M \cdot \varphi < \Delta T_O \cdot \varphi + (T_A - T_E) \cdot \varphi \quad (12)$$

oder

$$\sigma_V < \sigma_Z + (T_A - T_E) \cdot \varphi \quad (13)$$

Damit die Glasscheibe beim Abschrecken nicht zerspringt, muß die Biegezugfestigkeit  $\sigma_{Bz}$  der Glasscheibe während des Abschreckvorganges

größer sein als die entstehende temporäre Zugspannung ( $\sigma_{Bz} > \sigma_Z$ ). Aus dieser Forderung folgt

$$\sigma_V < \sigma_{Bz} + (T_A - T_E) \cdot \varphi \quad (14)$$

Aus Gleichung (14) geht hervor, daß die maximale Druckvorspannung, die erreicht werden kann, sowohl von der mechanischen Festigkeit des Glases als auch von der Aufheiztemperatur  $T_A$  abhängt. Bild 4b zeigt, daß bei niedriger Aufheiztemperatur  $T_A$  die Temperaturdifferenz  $\Delta T_O$  größer wird, obwohl  $\Delta T_{\max}$  kleiner ist. Für niedrige Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha'$  geht  $\Delta T_O \rightarrow 0$ , d. h. es entsteht keine temporäre Zugspannung (Bild 4c).

Wird an Stelle der Einfriertemperatur  $T_E$  die Transformationstemperatur  $T_g$  gesetzt, dann ergibt sich

$$\sigma_V < \sigma_{Bz} + (T_A - T_g) \cdot \varphi \quad (15)$$

Aus den Gleichungen (14 und 15) ergeben sich folgende Lehren für das thermische Vorspannen:

- Die mechanische Festigkeit des Artikels soll möglichst hoch sein (Feuerpolitur, gute mechanische Bearbeitung).
- Die Aufheiztemperatur soll möglichst hoch sein. Die Aufheiztemperatur verhindert in erster Linie ein Zerspringen beim Abkühlprozeß. Sie hat keinen so großen Anteil an der späteren Spannung, wenn ein Mindestwert erreicht ist (Bild 4b).
- In der ersten Abschreckphase soll der Wärmeübergang nicht zu hoch sein, damit  $T_E$  möglichst nahe an  $T_g$  herankommt.
- Lange Gläser sind für das thermische Vorspannen besser geeignet als kurze Gläser.

Berechnungsbeispiele nach Gleichung (15):

Floatglas:

$$\begin{aligned} \sigma_{Bz} &= 60 \text{ N/mm}^2; T_A = 645^\circ \text{C}; T_g = 530^\circ \text{C}; \\ \varphi &= 0,80; \\ \sigma_V &< 60 + (645 - 530) \cdot 0,80 = 152 \text{ N/mm}^2. \end{aligned}$$

Schott-Glas 8330:

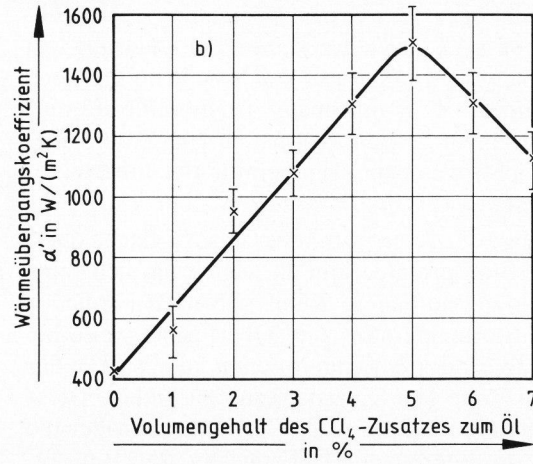
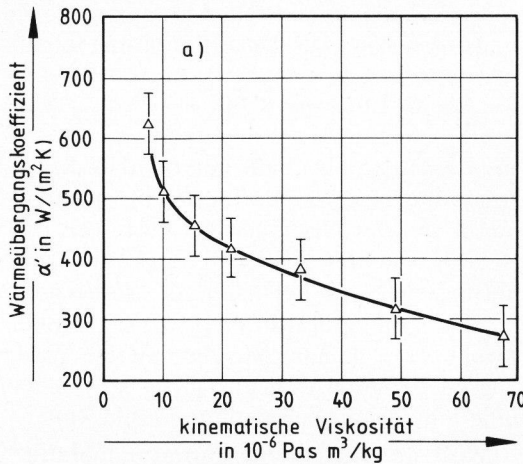
$$\begin{aligned} \sigma_{Bz} &= 60 \text{ N/mm}^2; T_A = 700^\circ \text{C}; T_g = 530^\circ \text{C}; \\ \varphi &= 0,25; \\ \sigma_V &< 60 + (700 - 530) \cdot 0,25 = 102,5 \text{ N/mm}^2. \end{aligned}$$

Für beide Gläser wurde eine Biegezugfestigkeit von  $60 \text{ N/mm}^2$  angenommen.

Die Berechnungsbeispiele zeigen, daß Floatglas auf Grund der temporären Zugspannungen nicht wesentlich über  $150 \text{ N/mm}^2$  vorgespannt werden kann. Dieser Wert liegt erheblich unter dem nach Gleichung (8) berechneten maximalen Wert (für  $\alpha' = \infty$ ) von  $408 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4. Abschätzung der benötigten Wärmeübergangskoeffizienten

Bisher wurden zur Berechnung der Druckvorspannung die beiden Gleichungen



Bilder 5a und b. Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Aluminium und Öl in Abhängigkeit von a) der Viskosität, b) dem CCl<sub>4</sub>-Zusatz.

$$\sigma_V = \frac{\alpha' \cdot X}{1 + \alpha' \cdot X} \cdot \varphi \cdot (T_g - T_\infty) \quad (7)$$

und

$$\sigma_V = \sigma_{Bz} + \varphi \cdot (T_A - T_g) \quad (15)$$

abgeleitet. Aus Gleichung (7) läßt sich der benötigte Wärmeübergangskoeffizient (in W/(m<sup>2</sup> K)) für eine vorgegebene Druckvorspannung berechnen, solange die Druckvorspannung den in Gleichung (15) berechneten Wert nicht überschreitet.

$$\alpha' = \frac{\lambda}{X} \cdot \frac{\sigma_V}{\varphi(T_g - T_\infty) - \sigma_V} \quad (16)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (7) in Gleichung (16) läßt sich der jeweils optimale Wärmeübergangskoeffizient berechnen

$$\alpha' = \frac{\lambda}{X} \cdot \frac{\sigma_{Bz} + \varphi(T_A - T_g)}{\varphi(T_g - T_\infty) - (\sigma_{Bz} + \varphi(T_A - T_g))} \quad (17)$$

Die Gleichungen (16 und 17) enthalten alle für das thermische Vorspannen wichtigen Parameter:

- $\sigma_V$  = Druckvorspannung in N/mm<sup>2</sup>,
- $\alpha'$  = Wärmeübergangskoeffizient in W/(m<sup>2</sup> K),
- $T_A$  = Aufheiztemperatur in °C,
- $T_\infty$  = Temperatur des Kühlmediums in °C,
- $X$  = halbe Glasdicke in m,

- $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit des Glases in W/(m<sup>2</sup> K),
- $\alpha$  = linearer Wärmeausdehnungskoeffizient in K<sup>-1</sup>,
- $E$  = Elastizitätsmodul in N/mm<sup>2</sup>,
- $\mu$  = Poisson-Zahl,
- $T_g$  = Transformationstemperatur in °C,
- $\sigma_{Bz}$  = Biegezugfestigkeit der Scheibe in N/mm<sup>2</sup>,
- $\varphi = \alpha \cdot E / (1 - \mu)$ , spezifische Wärmespannung in N/(mm<sup>2</sup> K).

Zur Erreichung einer Druckvorspannung von 100 N/mm<sup>2</sup> sind nach Gleichung (16) für 2; 4 und 6 mm dicke Scheiben aus Float- bzw. Schott-Glas 8330 die zusammen mit anderen Größen in Tabelle 1 angegebenen  $\alpha'$ -Werte erforderlich. Für das Glas 8330 wird somit etwa der zehnfache Wärmeübergangskoeffizient benötigt im Vergleich zu Floatglas, obwohl der Wärmespannungsfaktor nur um ein Drittel kleiner ist. Für das thermische Vorspannen werden somit Wärmeübergangskoeffizienten zwischen 100 und 5000 W/(m<sup>2</sup> K) benötigt.

### 5. Thermische Vorspannungsverfahren und ihre Wärmeübergangskoeffizienten

Das bekannteste und am meisten verwendete thermische Vorspannungsverfahren ist das Anblasen der heißen Scheiben mit Druckluft. Mit diesem Verfahren lassen sich noch Floatglasscheiben von 3 bis 4 mm Dicke vorspannen. Die dabei erreichten Wärmeübergangskoeffizienten liegen zwischen 100 und 300 W/(m<sup>2</sup> K).

Tabelle 1. Einige Eigenschaftswerte des verwendeten Float- bzw. Schott-Glases 8330

Glas	$T_g$ in °C	$\lambda$ in W/(m K)	$\varphi$ in N/(mm <sup>2</sup> K)	$T_\infty$ in °C	$\alpha'$ in W/(m <sup>2</sup> K)		
					Glasdicke in mm		
					2	4	6
Floatglas	530	1,45	0,80	0	≈ 450	≈ 225	≈ 150
Schott-Borosilicatglas 8330	530	1,45	0,25	0	≈ 4500	≈ 2250	≈ 1500

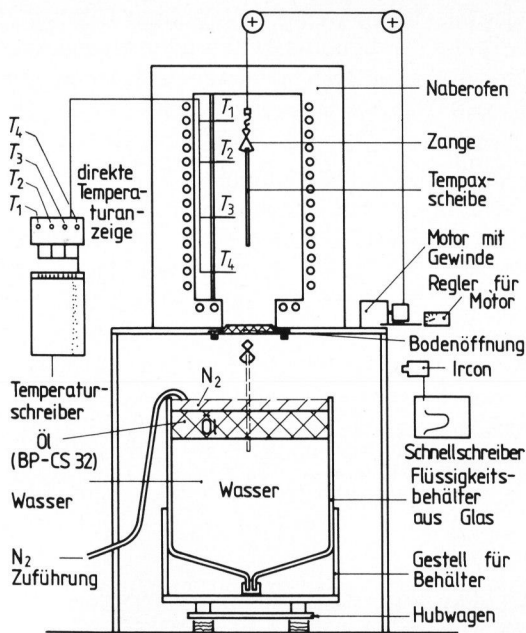


Bild 6. Versuchsanlage für das thermische Vorspannen von Glas in ölüberschichtetem Wasser.

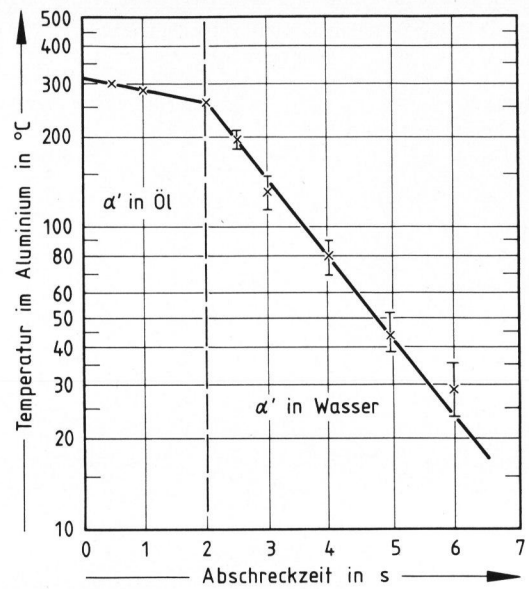


Bild 7. Wärmeübergangskoeffizienten in ölüberschichtetem Wasser.

Höhere Wärmeübergangskoeffizienten von 200 bis 600 W/(m<sup>2</sup> K) werden durch Eintauchen in Öle erzielt. Wie aus Bild 5a hervorgeht, ist der Wärmeübergangskoeffizient abhängig von der Viskosität des Öles. Mit abnehmender Viskosität nimmt aber nicht nur der Wärmeübergangskoeffizient, sondern auch die Entflammbarkeit der Öle zu. Der Wärmeübergangskoeffizient in Öl kann nach Wartenberg [4] durch die Zugabe von leicht verdampfenden Lösungen erhöht werden. Mit einem Volumengehalt von 1 bis 5 % CCl<sub>4</sub> läßt sich ein Wärmeübergangskoeffizient von 400 bis 1500 W/(m<sup>2</sup> K) erzeugen (Bild 5b). Die beim Verdampfen von CCl<sub>4</sub> an der Glasoberfläche entstehenden Gasbläschen führen zu einer erhöhten Durchmischung des Öles. Sobald sich jedoch eine geschlossene Dampfschicht bildet, verringert sich wieder der Wärmeübergangskoeffizient.

Wärmeübergangskoeffizienten von 500 bis 1500 W/(m<sup>2</sup> K) lassen sich auch durch Ansprühen mit einem Luft-Wasser-Gemisch mit Zweistoffdüsen erzielen [5].

Als besonders günstiges Verfahren zum Vorspannen von Gläsern mit niedrigem Wärmespannungsfaktor hat sich ölüberschichtetes Wasser erwiesen [6 und 7]. Hierbei wird das erhitzte Glas durch eine dünne Ölschicht in Wasser getaucht (Bild 6). In der Ölschicht findet in den ersten Sekunden nur ein mittlerer Wärmeübergang statt. Die Einfriertemperatur wird hierdurch in die Nähe der Transformationstemperatur verschoben. Das Abschrecken mit dem hohen Wärmeübergang erfolgt erst im Wasser (Bild 7). Durch die Dicke der Ölschicht lassen sich Wärmeübergangskoeffizienten zwischen 500 und

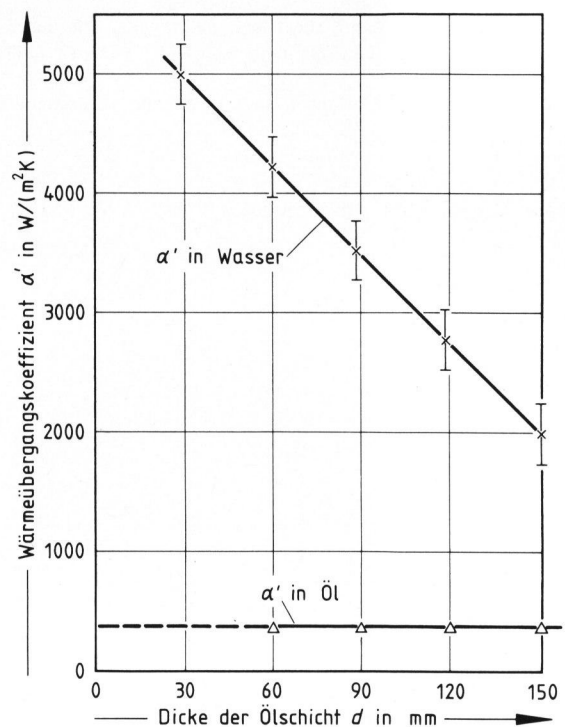


Bild 8. Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Aluminium und ölüberschichtetem Wasser in Abhängigkeit von der Ölschichtdicke.

5000 W/(m<sup>2</sup> K) einstellen (Bild 8). Ähnlich dem Öl-CCl<sub>4</sub>-Gemisch entstehen im Wasser feine Blasen, die eine erhöhte Durchmischung bewirken. Je niedriger die Glastemperatur bei Eintritt ins Wasser ist, um so geringer werden die Blasenbildung und damit der Wärmeübergangskoeffizient. Die Ölschicht über dem Wasser hat auch die Aufgabe, ein Filmsieden oder ein zu starkes Blasensieden im Wasser zu vermeiden.

Tabelle 2. Wärmeübergangskoeffizienten thermischer Vorspannungsverfahren

thermisches Vorspannungsverfahren	Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2 K)$
Anblasen mit Luft	100 → 300
Mineralöle	200 → 600
Mineralöle mit $CCl_4$	400 → 1500
Sprühen mit Luft-Wasser	500 → 1500
ölüberschichtetes Wasser	500 → 5000

In Tabelle 2 sind einige thermische Vorspannungsverfahren und die mit ihnen erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten zusammengestellt.

Bereits mit diesen wenigen Verfahren läßt sich das ganze Feld der benötigten Wärmeübergangskoeffizienten abdecken. Neben den hier erwähnten gibt es noch eine Vielzahl weiterer thermischer Vorspannungsverfahren.

Die abgeleiteten Gleichungen (7 und 15) bzw. (16 und 17) im Zusammenhang mit der ermittelten wirksamen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  für transparente Gläser von  $1,45 W/(m^2 K)$  und den in Tabelle 2 genannten Verfahren mit ihren Wärmeübergangskoeffizienten erlauben jedem Praktiker eine einfache Abschätzung und damit Beantwortung der eingangs gestellten Fragen nach der Höhe der erreichbaren Druckvorspannung bzw. dem richtigen Vorspannungsverfahren.

## 6. Literatur

- [1] Gardon, R.: Calculation of temperature distributions in glass plates undergoing heat-treatment. *J. Am. Ceram. Soc.* **41** (1958) S. 200–209. [Ref. *Glastechn. Ber.* **32** (1959) S. 201.]
- [2] Blank, K.: Thermisch vorgespanntes Glas. Teil 1. *Glastechn. Ber.* **52** (1979) S. 1–13.
- [3] Oel, H. J.; Helland, G.; Dannheim, H.: Thermisches Vorspannen von Glasscheiben. *Glastechn. Ber.* **57** (1984) Nr. 1, S. 1–6.
- [4] Wartenberg, E.: Verfahren zum Herstellen vorgespannter Gläser. Dt. Offenlegungsschr. Nr. 1 596 712. Anm. 28. 12. 1966, Offenleg. 22. 4. 1971.
- [5] Kiefer W.; Krause, D.: Thermisches Vorspannen von Gläsern mit niedrigem Wärmespannungsfaktor. Dt. Pat. Nr. 29 52 045.
- [6] Kiefer, W.; Stetter, K.: Verfahren zum thermischen Vorspannen von Glas. Dt. Pat. Nr. 30 01 944.
- [7] Kiefer, W.: Verfahren zum thermischen Vorspannen von Gläsern. Dt. Pat. Nr. 31 49 024.

84R1331