DK 666.1.033.4:666.171.4:666.1.032.532:536.24

Wärmeabgabe und Rückerhitzung dünnwandiger Gläser beim Preß-Blas-Verfahren

Von Wolfgang Trier, Frankfurt (Main)

Herrn Dipl.-Ing. Rudolf Meister zum 60. Geburtstag gewidmet

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 18. Dezember 1979)

Während beim Blas-Blas-Verfahren dem Glas in der Vorform nur von einer Seite Wärme entzogen wird, kommt beim Preß-Blas-Verfahren im Vorformbereich der Wärmeentzug durch den Plunger hinzu. Bei gleicher vorgegebener Abkühlung des Glases ergibt sich damit bei gleicher Wanddicke eine Verminderung der Kontaktzeit auf ¼.

Eine überschlägige Berechnung der Rückerhitzung des randnahen Glases zeigt, daß im Augenblick der Freigabe des Glases durch die Vorform und den Plunger Rückerhitzungen von über 250 °C/s auftreten. Die Rückerhitzung ist im äußersten Randbereich sehr stark, in tieferen Schichten bedeutend langsamer. Kurze Kontaktzeiten in der Vorform verstärken diesen Effekt, längere Kontaktzeiten vermindern ihn.

Heat transfer from and reheating of thin walled glassware in the press and blow process

Heat is removed from only the outer surface of the glass during parison formation by the blow-blow process but there is also heat transfer to the plunger in the press and blow process. In otherwise similar conditions the same cooling of the glass is given for the same wall thickness when the contact time is decreased to a quarter.

An approximate calculation of the reheating of the glass in the peripheral zone shows that immediately after the release of the glass by the mould and the plunger reheating of up to 250 °C/s appears. Reheating is greatest at the surface and smaller deeper inside the glass. Short contact times in the parison mould give the largest effects, longer times give smaller effects.

Transfert de chaleur et réchauffage de verres à paroi mince au cours du procédé pressé-soufflé

A la différence du procédé soufflé-soufflé où la chaleur est absorbée uniquement d'un côté dans le moule ébaucheur, au cours du procédé pressé-soufflé il y a également absorption de chaleur par le poinçon ébaucheur dans la zone d'ébauche. Pour un refroidissement égal du verre et une épaisseur identique, le temps de contact se réduit à ¼.

Le calcul approximatif du réchauffage du verre près du bord montre qu'au moment du démoulage, le réchauffage dû au moule et au poinçon ébaucheurs atteint plus de 250 °C/s. Près du bord, le réchauffage est particulièrement fort, il s'atténue considérablement dans les couches internes. Les temps de contact courts à l'intérieur du moule accentuent ce phénomène, les temps de contact longs l'atténuent.

Im allgemeinen ist man bei Hohlglasmaschinen bestrebt, dem Glas in der Vorform möglichst schnell Wärme zu entziehen, um mit kurzen Kontaktzeiten und damit kurzen Fertigungszeiten auszukommen. Als Vorteil des Preß-Blas-Verfahrens wird u. a. angeführt, daß in der Vorform dem Glas von beiden Seiten (innen und außen) Wärme entzogen wird, was eine Steigerung der Maschinengeschwindigkeit erlaubt. Bei der Fertigung dünnwandiger Artikel, und das ist besonders beim Enghals-Preß-Blas-Verfahren der Fall, kann der „Vorteil" des beidseitigen Wärmeentzugs jedoch zum Nachteil umschlagen. Die Wärmeabgabe des Glases wird unter Umständen so stark, daß die nachfolgende Rückerhitzung gefährdet ist. Die genaue Berechnung der beiden Vorgänge Wärmeabgabe und Rückerhitzung ist möglich, aber aufwendig, was zur Folge hat, daß sie in der Praxis meist unterbleibt. Beide Vorgänge lassen sich aber relativ leicht abschätzen, wie im folgenden gezeigt wird.

1. Wärmeabgabe

Bezeichnet man die mittlere Temperatur des einfallenden Glastropfens mit ϑ_1 und die mittlere Temperatur der Külbelwand nach der Rückerhitzung vor dem Ausblasen in der Fertigform mit ϑ_2, so gilt, wenn die Wanddicke d ist, für die abgegebene Wärme q

$$q = d \cdot c \cdot \varrho(\vartheta_1 - \vartheta_2)\,. \tag{1}$$

Vom Wärmeübergang Glas–Form her betrachtet gilt außerdem in erster Näherung

$$q = C_1\sqrt{\lambda\, c\, \varrho}\,\sqrt{t} \cdot n + C_2\,. \tag{2}$$

C_1 ist dabei eine Konstante, λ die Wärmeleitfähigkeit, c die spezifische Wärme und ϱ die Dichte des Glases, t die Kontaktzeit. n kennzeichnet die Anzahl der wärmeabgebenden Oberflächen. Für das Blas-Blas-Verfahren ist $n = 1$, für das Preß-Blas-Verfahren $n = 2$. C_2 steht für die Wärmeabgabe des Külbels während des Übersetzens von der Vor- in die Fertigform einschließlich der Rückerhitzungsphase. Die Kontaktzeit t des Glases in der Vorform sei hier der Einfachheit halber beim Pressen des Külbels innen und außen als gleich groß angenommen. Aus den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich

$$d = \frac{C_1\sqrt{\dfrac{\lambda}{c\,\varrho}}}{\Delta\vartheta_{1-2}}\sqrt{t} \cdot n + \frac{C_2}{c\,\varrho\,\Delta\vartheta_{1-2}}\,.$$

Für Hohlgläser, die in bezug auf ihre Zusammensetzung nicht zu stark voneinander abweichen, können λ, c, ϱ und $\Delta\vartheta_{1-2}$ als Konstante betrachtet werden, wobei ϑ_1 vornehmlich vom Speiser und ϑ_2 von den Ausblasbedingungen in der Fertigform abhängen (das Glas muß eine ausreichende Rückerhitzungsfähigkeit besitzen). Damit wird

$$d = C_I\, n \sqrt{t} + C_{II}\,, \qquad (3)$$

wobei bedeuten: $C_I = \dfrac{C_1 \sqrt{\dfrac{\lambda}{c\varrho}}}{\Delta\vartheta_{1-2}}$ und $C_{II} = \dfrac{C_2}{c\,\varrho\,\Delta\vartheta_{1-2}}$.

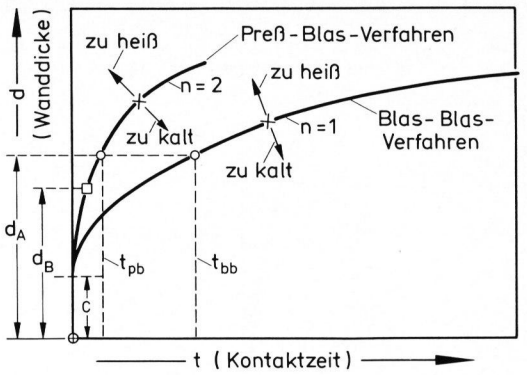

Bild 1. Einfluß der Kontaktzeit auf die notwendige Wanddicke des Preßkülbels bei vorgegebener Abkühlung.

Grafisch aufgetragen ergibt sich für Gleichung (3) der in Bild 1 eingetragene Zusammenhang.

Vergleicht man ein im Blas-Blas-Verfahren hergestelltes Külbel mit einem im Preß-Blas-Verfahren hergestellten gleicher Wanddicke d_A, dann ergibt sich aus Gleichung (3)

$$\frac{t_{bb}}{t_{pb}} = 4\,.$$

Das bedeutet, daß ein im Preß-Blas-Verfahren hergestelltes Külbel nur $\frac{1}{4}$ der Vorformzeit (Kontaktzeit) eines im Blas-Blas-Verfahren hergestellten Külbels haben darf, um gleiche mittlere Endtemperatur nach der Rückerhitzung zu bekommen. In dieser Beziehung steckt eine Reihe von Vereinfachungen, die Zusammenhänge werden aber richtig wiedergegeben.

Vergleicht man zwei Preß-Blas-Külbel unterschiedlicher Wanddicke (d_A; d_B), dann bewegt man sich längs der oberen Parabel (n = 2). Eine mäßige Verringerung der Wanddicke $d_A - d_B$ vermindert die zulässige Kontaktzeit stark.

Da die erreichbare minimale Kontaktzeit in der Vorform von der Arbeitsweise der Maschine abhängt, kann beim Preß-Blas-Verfahren eine Verringerung der Wanddicke bei langsamen Maschinen sehr schnell in den Bereich zu starker Abkühlung führen.

2. Rückerhitzung

Die Betrachtung in Abschnitt 1. gibt in der vorliegenden Form pauschal Auskunft über die Wärmeabgabe. Das für die Praxis ebenso wichtige Verhalten bei der Rückerhitzung wird damit nicht erfaßt. Da bisher in der Literatur quantitative Angaben über die Rückerhitzung fehlen, soll im folgenden eine Abschätzung gegeben werden.

Das in der Vorform hergestellte Külbel muß anschließend in der Fertigform zum fertigen Hohlglasgefäß ausgeblasen werden. Dieser Ausblasvorgang erfordert nicht unerhebliche Dehnungen des Glases. Um möglichst überall gleiche Wanddicken zu erreichen, muß die Dehnung gleichmäßig erfolgen. Erfahrungsgemäß ist dies nur dann möglich, wenn das Glas nicht zu steif ist. Die Viskosität darf nicht zu hoch sein, sonst dehnt sich das Glas ungleichmäßig, und es entsteht das Bild einer gehämmerten Flasche. Im Grenzfall kann sogar die steife Randzone aufreißen.

Durch die intensive Abkühlung des randnahen Glases in der Vorform ist das Randglas beim Öffnen der Vorform sehr zäh und kann bei kalter Form sogar den Transformationsbereich unterschreiten. Zur weiteren Verarbeitung des Külbels in der Fertigform muß das randnahe Glas wieder erwärmt werden. Diese für die Verarbeitung wichtige Phase wird als Rückerhitzung bezeichnet. Wie kommt es zur Rückerhitzung und welche Vorgänge sind im Spiel? Es ist bekannt, daß die Wärmestrahlung bei der Rückerhitzung nur eine unbedeutende Rolle spielt [1]. Man kann sich daher darauf beschränken, die Wärmeleitung zu betrachten.

Für den örtlichen Wärmestrom ($\dot{q}(x,t)$) im Glas an der Stelle x nach der Kontaktzeit ergibt sich bei ideal gutem Wärmekontakt die Beziehung

$$\dot{q}(x,t) = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx} = -\frac{\lambda(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\sqrt{a\,t\,\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4\,a\,t}}\,. \qquad (4)$$

a bedeuten dabei die Temperaturleitzahl ($a = \lambda/c\varrho$) des Glases und t die Kontaktzeit. Wird die kühlende Form entfernt, dann wird die Wärmeabgabe des Glases an die Form schlagartig unterbrochen und vermindert sich um Zehnerpotenzen, so daß man davon ausgehen kann, daß die Wärmeabgabe nach außen an die Umgebung, gemessen an der Wärmestromdichte beim Vorformkontakt, praktisch gegen Null geht. Der Temperaturgradient in der äußersten Randschicht geht somit ebenfalls gegen Null. In den tieferen Schichten herrscht dagegen entsprechend (Gleichung (4)) ein steiler, nach innen abnehmender Temperaturgradient, der eine Wärmestromdichte entsprechend $\dot{q}(x,t)$ zur Folge hat. Von innen heraus wird somit Wärme in die Randschichten transportiert, während die Wärmeabgabe an die Umgebung mit der Entnahme aus der Vorform sehr gering geworden ist. Die Folge ist ein Wärmestau im Randbereich mit einem entsprechenden

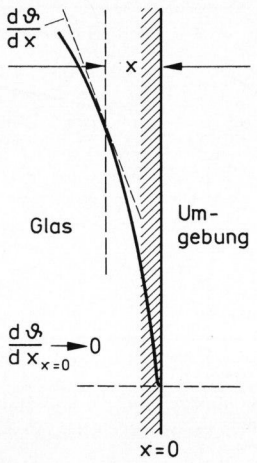

Bild 2. Temperaturverlauf in der Randschicht nach Entfernung der Form.

Anstieg der Temperatur auf Kosten des Wärmeinhaltes und der Temperatur des Kernglases (Bild 2).

Ein Maß für die zeitliche Zunahme $\dot{\vartheta}$ der Randschicht der Dicke x im Augenblick der Freigabe des Glases durch die Vorform ergibt die Beziehung

$$\dot{\vartheta} = \frac{\dot{q}(x,t)}{x \cdot c \cdot \varrho}.$$

Mit Gleichung (4) ergibt sich dann

$$\dot{\vartheta} = \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{x} \cdot \sqrt{\frac{a}{t \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4at}}. \qquad (5)$$

Für $\vartheta_1 - \vartheta_2 = 400\,°C$ und $a = 1{,}56 \cdot 10^{-3}\ m^2/h$ wurde $\dot{\vartheta}$ für verschiedene Schichtdicken x berechnet. $\dot{\vartheta}$ ergibt sich in Temperaturzunahme pro Zeiteinheit, z. B. °C/s, und ist damit ein Maß für die Rückerhitzung. Für unterschiedliche Kontaktzeiten und Schichtdicken ergibt sich $\dot{\vartheta}$ aus Bild 3. Man erkennt ein unterschiedliches Verhalten. Die dünne 0,5 mm dicke Randschicht zeigt mit zunehmender Kontaktzeit t des Glases in der Vorform eine Abnahme. Kurze Kontaktzeiten führen im äußersten Randbereich somit zu einer Rückerhitzung von über 250 °C/s. Diese Erhitzungsgeschwindigkeit gilt aber nur im Augenblick

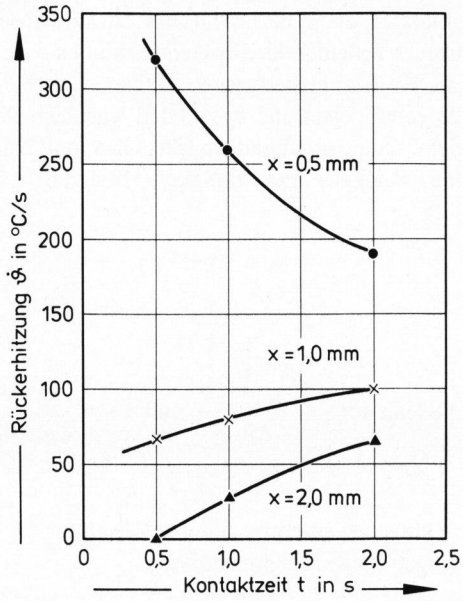

Bild 3. Mittlere Rückerhitzung in der Randschicht x unmittelbar nach Öffnen der Form.

der Freigabe des Glases durch die Form. Sie nimmt mit der Zeit schnell ab.

Betrachtet man dickere Schichten (z. B. 2 mm), dann zeigt sich ein umgekehrter Effekt. Hier nimmt $\dot{\vartheta}$ mit zunehmender Kontaktzeit zu. Dieses Verhalten hängt mit der nach innen fortschreitenden Abkühlung des Glases zusammen. Der Temperaturgradient $d\vartheta/dx$ an der Stelle x und damit auch $\dot{q}(x,t)$ nimmt bei dickeren Schichten mit der Kontaktzeit t zu, da die Abkühlungswirkung der Form sich in tieferen Glasschichten erst mit einiger Verzögerung bemerkbar macht.

Die Rückerhitzung ist somit im Randbereich sehr stark, in tieferen Schichten bedeutend langsamer. Kurze Kontaktzeiten in der Vorform verstärken diesen Effekt, längere Kontaktzeiten vermindern ihn.

3. Literatur

[1] Costa, P.: Untersuchung der thermischen und geometrischen Kontaktverhältnisse zwischen Glas und Metall bei der Formgebung heißen, zähflüssigen Glases. Glastechn. Ber. **45** (1972) S. 277–287. 80R0333