

## HVG-Mitteilung Nr. 2072

Anwendung der Spannungssimulation nach Narayanaswamy zur Optimierung der Kühlparameter bei der Flaschenkühlung

C. Phan Dang, D. Brüggemann  
Forschungsstelle WOPAG, Universität Bayreuth

Vortrag auf der DGG-Jahrestagung am 8.6. 2004 in Nürnberg

### 1. Einleitung

Bei der Entspannungskühlung werden Glasflaschen in einem Kühllofen auf die Entspannungstemperatur erwärmt und eine Zeit lang bei dieser Temperatur gehalten. Danach werden sie „kritisch“ auf den so genannten „unteren Kühlpunkt“ und dann auf Zimmertemperatur abgekühlt. Dabei werden Spannungen in der Flasche zunächst in der Entspannungsphase abgebaut, aber dann bei der Abkühlung wieder erzeugt. Die Intensität und die lokale Verteilung der Kühlspannung beeinflussen die mechanische Festigkeit und damit die Gebrauchseigenschaft der Flasche. Mit der Methode zur Spannungsrechnung von Narayanaswamy ist es möglich, die Entstehung von Kühlspannungen in Abhängigkeit von der thermischen Vorgeschichte des Glases zu simulieren und den Kühlprozess zu optimieren.

### Theoretische Grundlagen

Es wurde der kommerzielle FEM - Software Code ANSYS verwendet. Für die Berechnung von thermischen Spannungen im Glas wurde zuerst die Temperaturverteilung in der Flasche über den ganzen Kühlprozess simuliert. Die Wärmebilanzgleichung lautet in diesem Fall [1]:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla q_r + \nabla q_{conv} \quad (1)$$

Dabei ist  $q_r$  der Strahlungswärmestrom und  $q_{conv}$  der konvektive Wärmestrom. Die unterschiedlichen thermischen Dehnungen im Glas verursachen Spannungen, welche man nach dem Hooke'schen Gesetz berechnen kann. Da sich Glas bei hohen Temperaturen entspannt, nimmt die Spannung mit der Zeit ab. Versuchsdaten zeigen, dass der Entspannungsvorgang (ähnlich wie die Strukturrelaxation im Glas) mathematisch als Funktion der Zeit ( $t$ ) durch die Maxwell - Gleichung beschrieben werden kann [2]:

$$F(t)_{Spannung} \text{ bzw. } F(t)_{Struktur} = \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_T}\right)^{0,5}\right] \quad (2)$$

Durch die Strukturrelaxation ändern sich die Glaseigenschaften im Transformationsbereich nicht nur bei Temperaturänderungen, sondern auch mit der Zeit, d.h. Glaseigenschaften relaxieren. Als Relaxationsfunktion der Glaseigenschaften wurde die experimentell ermittelte Relaxationsfunktion des Glasvolumens verwendet. Dabei wurde die fiktive Temperatur definiert und die Änderung der Glaseigenschaft über die

Änderung der fiktiven Temperatur beschrieben [3]. Als Simulationsobjekt wurde die GdB-Standardflasche für Mineralwasser (siehe Bild 1) gewählt. Die Entspannungstemperatur wurde auf 550 °C und der untere Kühlpunkt auf 470 °C festgelegt. Die Kühlzeit in verschiedenen Kühlphasen sowie die Flaschentemperatur wurden variiert.

### Ergebnisse und Diskussion

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich besonders hohe Zug- und Druckspannungen während des gesamten Kühlprozesses am Übergangsbereich von der Flaschenwand zum Boden ausbilden. Bild 1 zeigt die Kühlspannungsprofile in der x-, y- und z-Richtung an dieser Stelle am Ende des Kühlprozesses.

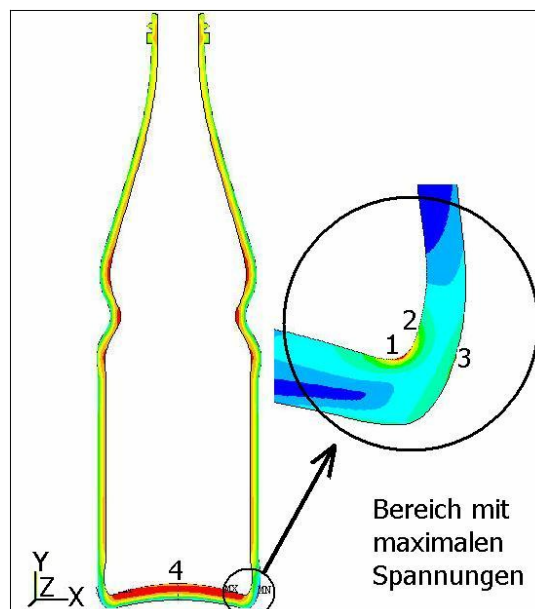
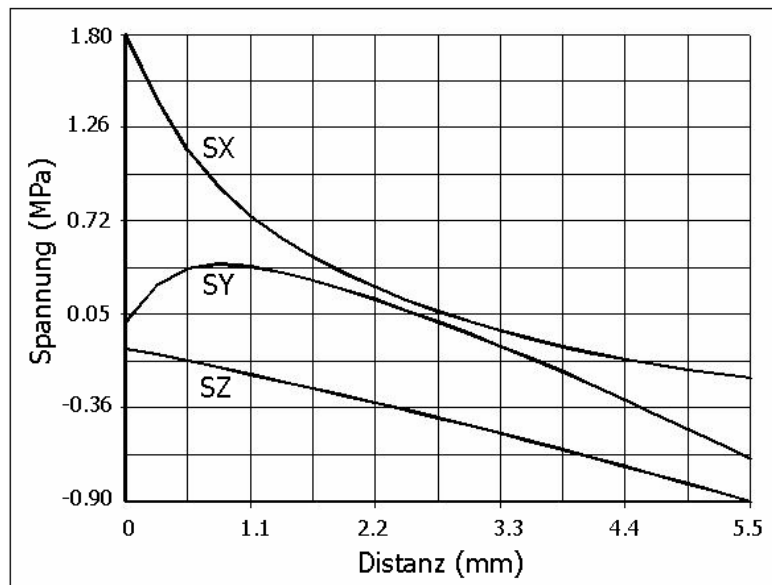


Bild 1: Spannungsprofil in x-, y-, z-Richtung im Übergangsbereich von der Flaschenwand zum Boden.

Bild 2 zeigt den Temperaturverlauf an den Stellen 1 und 4 in der Flasche und den entsprechenden Spannungsverlauf an den Stellen 1 bis 3 am Übergangsbereich zwischen Wand und Boden, wo maximale Spannungen in x- und y-Richtung auftreten. Zu berücksichtigen ist das Auftreten einer extrem hohen Spannung während des Aufheizens der Flasche auf die Entspannungstemperatur. Die Intensität dieser Spannung ist von der Anfangstemperatur (siehe Bild 3), von der Wandstärke der Flasche und vom konvektiven Wärmeübergang abhängig und kann zum Bruch der Flasche führen. Nach Erreichen der Entspannungstemperatur ( $> 520 \text{ }^\circ\text{C}$ ) bauen sich die Glasspannungen in wenigen Minuten rasch ab. Für eine erfolgreiche Entspannung muss demnach die kälteste Stelle in der Flasche über  $520 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgeheizt werden. Die notwendige Aufheizzeit ist dabei vor allem von der Anfangstemperatur und der Wandstärke der Flasche abhängig.

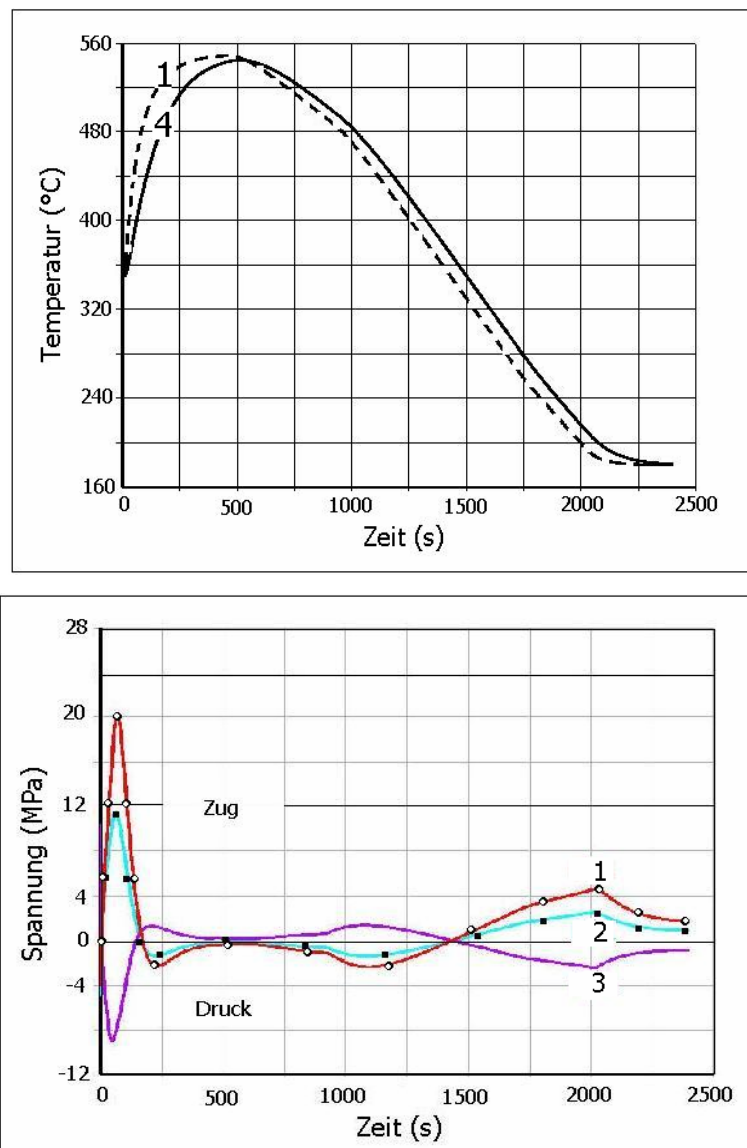


Bild 2: Temperaturverlauf an Stelle 1 und 4 und Spannungsverlauf an Stelle 1 bis 3 (s. Bild 1) im Kühlprozess. 1: Stelle mit maximaler Zug-Spannung in x-Richtung, 2: Stelle mit maximaler Zug-Spannung in y-Richtung, 3: Stelle mit maximaler Druck-Spannung in y-Richtung und 4: Kälteste Stelle in der Flasche.

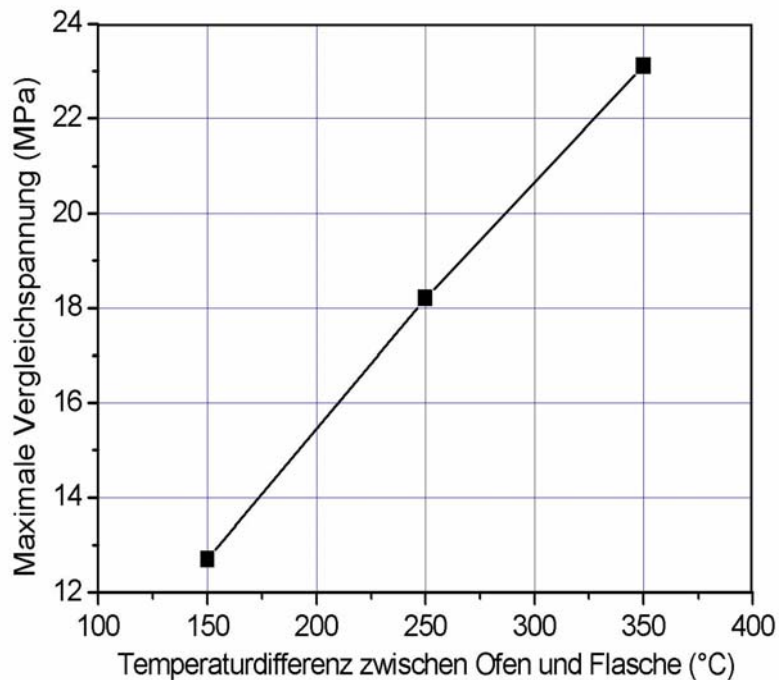


Bild 3: Maximal auftretende Zugspannung (an der Stelle 1) in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Flaschentemperatur und Ofentemperatur.

Die Restspannung wird nach dem Entspannungs Vorgang nur noch von der Verweilzeit in den letzten Kühlphasen bestimmt. Im Bild 4 wird die starke Abhängigkeit der Vergleichsspannung (ein Maß für das Bruchkriterium) von der Verweilzeit in der so genannten „kritischen“ Kühlphase  $t(Kritisch)$  und von der Wandstärke  $d$  der Flasche sowie die geringe Abhängigkeit von der Verweilzeit in der letzten Abkühlphase  $t(Schnell)$  dargestellt. Durch Fitten der Kurven erhält man Gleichung (3) zur Berechnung der Kühlspannungen in der Flasche:

$$Max. Spannung = (1,03 + 5,18 \cdot e^{-\frac{t(Kritisch)}{255}}) \cdot (0,92 + 1,46 \cdot e^{-\frac{t(Schnell)}{244}}) \cdot (0,21 \cdot d - 0,84) \quad (3)$$

### Zusammenfassung

Die Methode von Narayanaswamy eignet sich für Abschätzung von Kühlspannungen im Glas. Dies ermöglicht die Ermittlung und Optimierung der Kühlparameter für neue Glasprodukte bis zur thermischen Härtung von formkomplizierten Produkten.

### Literatur

- [1] D. Krause; H. Loch: Mathematical simulation in glass technology. Springer Verlag, Berlin 2002
- [2] G. W. Scherer: Relaxation in glass and composites. Wiley Interscience, New York 1986
- [3] O.S.Narayanaswamy: A model of structural relaxation in glass. Journal of the American Ceramic Society Vol.54, No.10 (1971) p.491-498

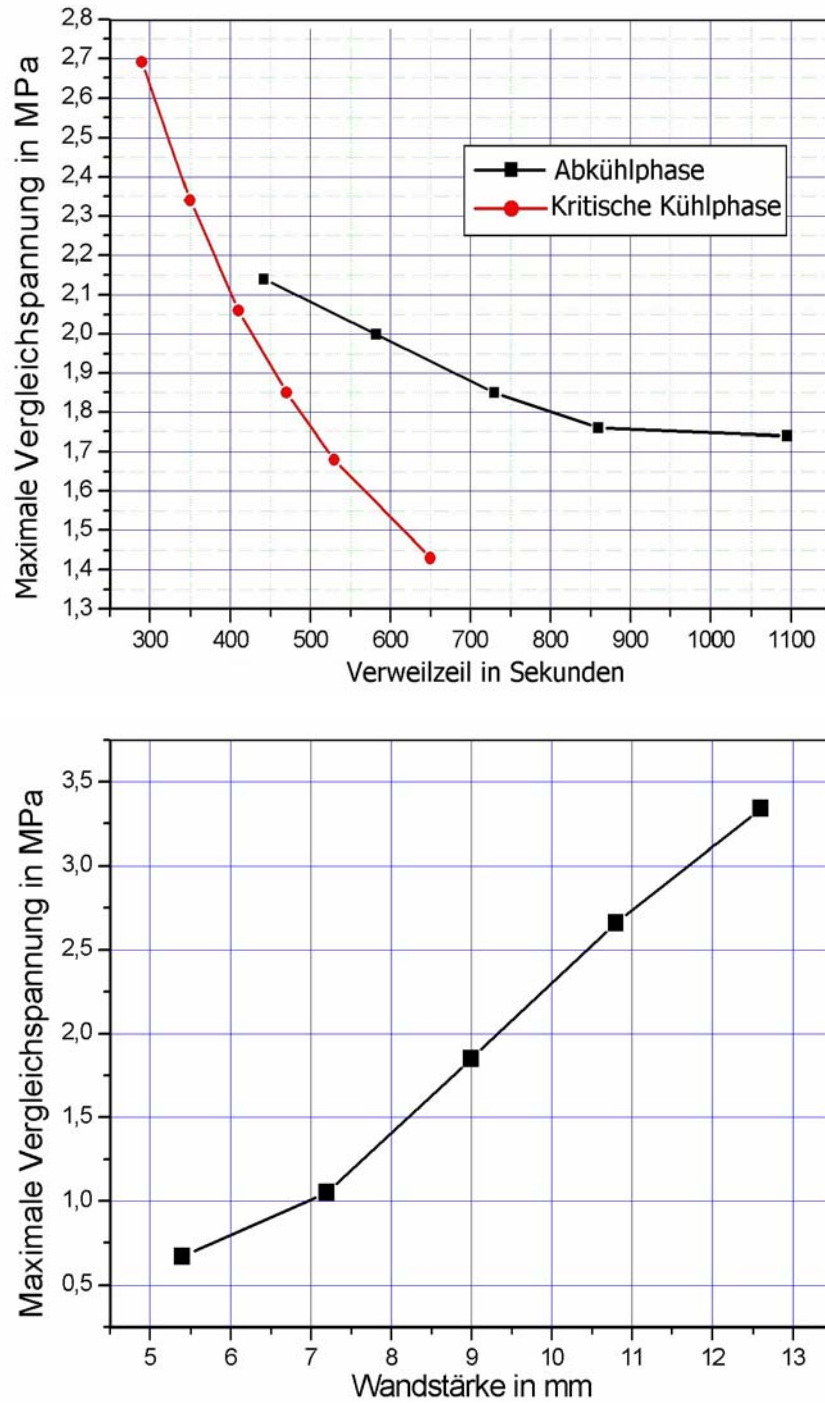


Bild 4: Abhängigkeit der Vergleichsspannung von der Verweilzeit in kritischer Kühlphase, in der Abkühlphase und von der Wandstärke der Flasche.

