

Praktikum Einführung in die Materialwissenschaften I

## Thermoschockverhalten von Glas

29. November 2007

Versuchsbetreuerin: Johanna Wallot

Gruppenmitglieder:

Anja Haberer

Jonathan Griebel

Andreas Hanauer

## 1. Einleitung:

Bei diesem Versuch soll das Thermoschockverhalten von normalem Fensterglas untersucht werden. Thermoschock bedeutet, dass die Temperatur einer Probe sehr schnell (schockartig) geändert wird. Da die Wärmeleitfähigkeit von Glas nicht unendlich hoch ist ergibt sich dabei ein Temperaturgradient zwischen dem Kern und dem äußeren Bereich der Probe welcher schneller erkaltet. Der äußere Bereich zieht sich zusammen wobei der Kern gleich bleibt. Es entstehen Spannungen. Ab einem kritischen Wert bei der Temperaturänderung sind die auftretenden Spannungen so groß, dass das Material dauerhaft geschädigt wird, was die Bruchfestigkeit wesentlich verschlechtert.

Folgende physikalische/materialwissenschaftliche Größen spielen eine Rolle für das Verhalten beim Thermoschock

### **Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]**

Gibt die Geschwindigkeit des Transports thermischer Energie (Wärme) durch das Material an. Umso größer  $\lambda$  ist, desto schneller werden die Temperaturunterschiede ausgeglichen. Die auftretenden Spannungen sind folglich kleiner. Bei unendlich großem  $\lambda$  wäre kein Thermoschock zu beobachten, da es keine Temperaturunterschiede innerhalb der Probe gäbe.

### **Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ [ $\text{K}^{-1}$ ]**

Der lineare Ausdehnungskoeffizient beschreibt die prozentuale Dehnung eines Materials bei einer Temperaturänderung um ein Kelvin. Je kleiner  $\alpha$ , desto beständiger ist das Material gegen einen Thermoschock, da die auftretenden Spannungen nicht so groß sind.

### **Elastizitätsmodul $E$ [GPa]**

Gibt bei uniaxialer Belastung im elastischen Bereich das Verhältnis zwischen aufgebrachter Spannung und Dehnung des Materials an. Der E-Modul ist ein Maß für den Widerstand gegen elastische Verformung. Ist  $E$  klein, so ist die elastische Verformbarkeit größer, sodass die Thermoschockbeständigkeit ebenfalls größer ist.

### **Bruchfestigkeit $\sigma_f$ [MPa]**

Die Bruchspannung  $\sigma_f$  gibt die Spannung an, bei der der Werkstoff bricht. Je größer sie ist, desto höher ist auch die Thermoschocktoleranz des Materials.

## Poisson-Zahl $\nu$

Die Poisson-Zahl beschreibt das Verhältnis zwischen Längendehnung und Querkontraktion. Sie liegt bei den meisten Materialien bei 0,3. Umso kleiner  $\nu$  ist, umso größer ist die Thermoschocktoleranz.

Aus diesen fünf Größen ergibt sich das erste und das zweite Thermoschockparameter.

### 1. Thermoschockparameter:

$$\Delta T_{cr} = R_S = \frac{\sigma_f \cdot (1 - \nu)}{\alpha \cdot E} \quad (1)$$

Findet der Thermoschock nicht rapide sondern über einen längeren Zeitraum statt, so nimmt auch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  Einfluss.

### 2. Thermoschockparameter:

$$R'_S = \lambda \cdot R_S = \lambda \cdot \frac{\sigma_f \cdot (1 - \nu)}{\alpha \cdot E} \quad (2)$$

Um das Thermoschockverhalten zu verbessern, sollte der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient verkleinert werden damit bei einem Temperaturunterschied die Ausdehnung bzw. die Kontraktion relativ klein ist, so dass die Spannungen im Material gering bleiben. Eine große Bruchfestigkeit und ein kleiner E-Modul optimieren ebenfalls das Verhalten beim Thermoschock. Außerdem sollte die Wärmeleitfähigkeit des Materials möglichst hoch sein, damit die Spannungen zwischen Kern und äußerem Bereich schnell ausgeglichen werden.

Wenn diese Parameter optimiert werden, kann das Material größeren Temperatursprüngen unbeschadet standhalten.

Es wurde das Verhalten von Glas bei einem Thermoschock untersucht, weil es amorph und somit isotrop ist. Folglich hat der mikroskopische Aufbau keinen Einfluss auf die Materialeigenschaften. Außerdem ist es durchsichtig, wodurch Risse gut sichtbar sind und dazu ist es ein billiges Material. Des Weiteren liegt der kritische Temperaturunterschied in einem Bereich, für den die Wärme der Heizplatte ausreicht

## **2. Versuchsbeschreibung und Durchführung**

### **2.1 Vorbereiten der Proben**

Anfangs werden die Glasproben mit Hilfe einer Poliermaschine und 500 SiC Schleifpapier entgratet. Dies wird an allen vier Seitenkanten der Probe gemacht um Kerben zu entfernen, welche Schwachstellen repräsentieren und die Messung verfälschen würden. Anschließend wird jede Probe markiert, vermessen und gewogen.

### **2.2 Thermoschock**

Zuerst wird die Temperatur des Wassers bestimmt in dem die Glasproben abgeschreckt werden.

Nun werden acht der zehn Proben auf die Heizplatte gelegt und erhitzt. Zwei der Proben dienen später als Referenz für  $\Delta T = 0K$  und werden nicht erhitzt. Um die Temperatur exakt ermitteln zu können wird ein Digitalthermometer verwendet, das in einem Eisenblock steckt, welcher auf der Heizplatte liegt.

Bei 85, 130, 155 und 185°C werden jeweils 2 Proben mit einer erwärmten Pinzette genommen und möglichst schnell in das Wasser geworfen.

### **2.3. E-Modul**

Zuerst werden die Proben auf sichtbare Schäden untersucht und Auffälligkeiten wie Risse notiert.

Danach wird der E-Modul mit Hilfe eines akustischen Verfahrens mit einem Gerät von Grindsonic ermittelt. Hierzu werden die Glasproben auf ein Schaumstoffpolster gelegt, mit einem kleinen Hämmerchen angeschlagen und somit in Schwingung versetzt. Die Schwingungsfrequenz wird über ein empfindliches Mikrofon gemessen. Der Vorgang wird an jeder Probe so oft wiederholt, bis drei mal hintereinander, auf die zweite Kommastelle genau, derselbe Wert angezeigt wird.

## 2.4. Festigkeit

Die Restfestigkeiten der Proben werden nun im 4-Punkt-Biegeversuch (s. Abb.1) bestimmt. Über die beiden oberen Rollen wird eine Kraft auf die Probe ausgeübt. Die Kraft wird solange erhöht bis die Probe zerbricht. Die maximale Kraft wird von einem Messgerät erfasst, welches man vorher, nach dem Auflegen der Probe auf die unteren Röllchen, tariert hat.

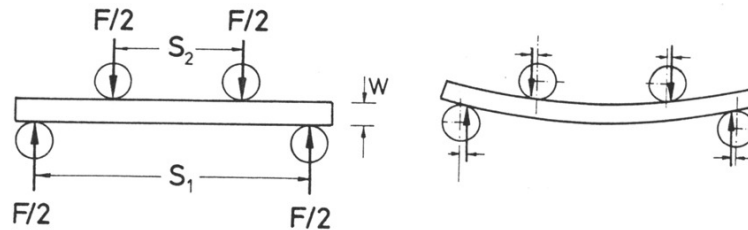


Abb. 1: Vierpunkt-Biegemethode

## 3. Auswertung

### 3.1. Messwerte

In Tabelle 1 sind alle Größen aufgeführt, die während des Praktikums gemessen wurden. B entspricht der Breite, H der Höhe, L der Länge und G dem Gewicht der Glasproben.  $T_A$  ist die Temperatur des Glaskörpers vor dem Abschreckvorgang,  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz des Thermoschocks.  $f_F$  bezeichnet die gemessene Resonanzfrequenz und F die Maximalkraft bei der Vierpunkt-Biegemethode.

Tabelle 1 - Messwerte

Probe	B [mm]	H [mm]	L [mm]	G [g]	$T_A$ [K]	$\Delta T$ [K]	$f_F$ [kHz]	F [N]
1 / a	4,17	2,88	30,23	0,86	293,85	0	16,822	159,4
2 / b	4,14	2,87	30,13	0,87	293,85	0	16,979	188,4
3 / c	4,15	2,88	30,21	0,85	358,15	64,3	16,574	106,7
4 / d	4,19	2,88	30,20	0,86	358,15	64,3	16,551	111,0
5 / e	4,07	2,87	30,20	0,83	398,15	104,3	16,507	99,4
6 / f	4,06	2,87	29,86	0,78	398,15	104,3	16,841	48,9
7 / g	4,07	2,87	30,33	0,86	423,15	129,3	16,246	21,4
8 / h	4,06	2,87	30,13	0,83	423,15	129,3	15,583	4,1
9 / i	4,11	2,87	30,14	0,84	458,15	164,3	15,931	14,1
10 / j	4,08	2,87	30,17	0,81	458,15	164,3	14,840	14,8

### 3.2. Berechnete Größen

Aus den Messwerten lassen sich die Restfestigkeit und der E-Modul der geschockten Glasproben berechnen. Die Gleichungen sind so konzipiert, dass die Größen wie folgt eingesetzt werden können.

$f_F$  = Frequenz in Hz

$L$  = Länge in mm

$H$  = Höhe in mm

$B$  = Breite in mm

$G$  = Gewicht in g

#### 3.2.1. Die Restfestigkeit

Die Restfestigkeit lässt sich mittels nachfolgender Gleichung berechnen, wobei  $S_1$  (40mm) und  $S_2$  (20mm) die Rollenabstände der Apparatur sind.

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot (S_1 - S_2)}{2 \cdot H^2 \cdot B} \cdot F \quad (3)$$

#### 3.2.1. Der E-Modul

Zur Berechnung des E-Moduls werden zunächst die Größen  $\rho$ ,  $I$ ,  $A$ ,  $i$  und  $C$  benötigt, welche sich mit  $\nu = 0,23$  folgendermaßen berechnen lassen:

$$\rho = \frac{G \cdot 10^3}{L \cdot B \cdot H} \quad (4)$$

$$I = \frac{B \cdot H^3}{12} \quad (5)$$

$$A = B \cdot H \quad (6)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (7)$$

$$C = 0,5 + X + \sqrt{0,25 + X + \frac{4,73^4 \cdot i^4}{4 \cdot L^4} \cdot \left[1 - \frac{12}{5} \cdot (1 + \nu)\right]^2} \quad (8)$$

wobei

$$X = \frac{4,73^2 \cdot i^2}{2 \cdot L^2} \cdot \left[1 + \frac{12}{5} \cdot (1 + \nu)\right]$$

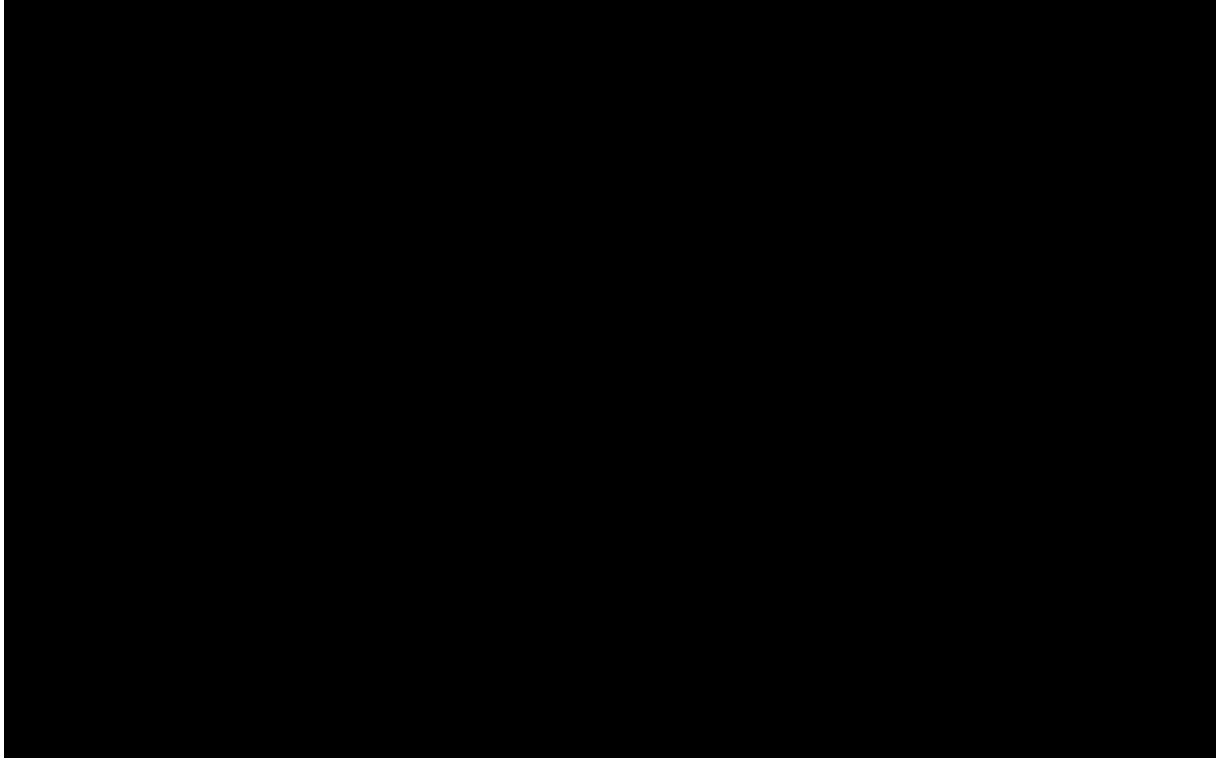
Der E-Modul lässt sich aus den ermittelten Größen nach Gleichung 9 bestimmen.

$$E = 4 \cdot 10^{-12} \frac{L^4 \cdot \pi^2}{4,73^4 \cdot i^2} \cdot f_F^2 \cdot C \cdot \rho \quad (9)$$

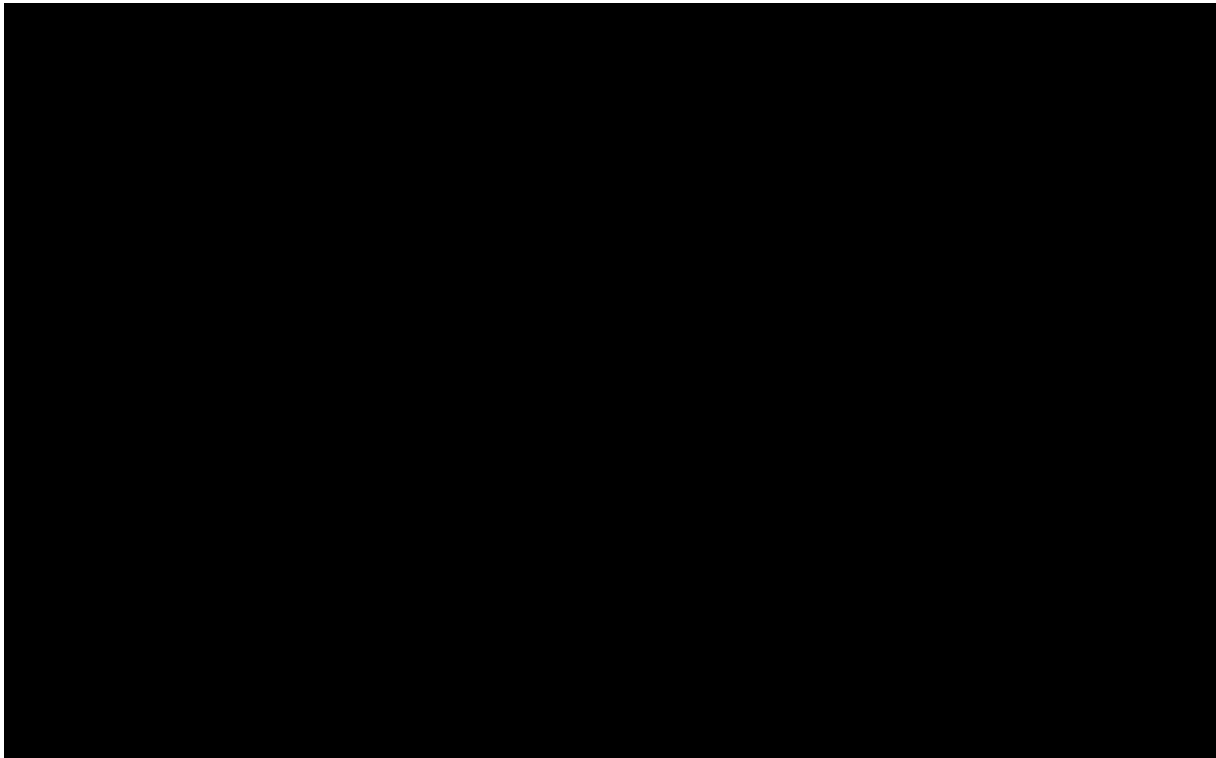
In Tabelle 1 sind die Werte der einzelnen Berechnungen aufgeführt. Abbildung 2 und 3 zeigen die Restfestigkeit bzw. den E-Modul in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz des Thermoschocks, der eingezeichnete Graph gibt den Verlauf der gemittelten Werte an.

**Tabelle 2 – Die Restfestigkeit und der E-Modul**

Probe	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	I [mm <sup>4</sup> ]	A [mm <sup>2</sup> ]	i [mm]	C	E [GPa]	$\sigma_f$ [MPa]
1 / a	2,369	8,301	12,010	0,831	1,066	68,030	138,257
2 / b	2,430	8,156	11,882	0,828	1,066	70,653	165,744
3 / c	2,354	8,261	11,952	0,831	1,066	65,461	92,994
4 / d	2,360	8,341	12,067	0,831	1,066	65,355	95,818
5 / e	2,353	8,018	11,681	0,828	1,066	65,239	88,951
6 / f	2,242	7,998	11,652	0,828	1,067	61,923	43,867
7 / g	2,427	8,018	11,681	0,828	1,065	66,291	19,150
8 / h	2,364	7,998	11,652	0,828	1,066	57,895	3,678
9 / i	2,363	8,097	11,796	0,828	1,066	60,552	12,495
10 / j	2,293	8,038	11,710	0,828	1,066	51,185	13,212



**Abbildung 2 - Die Restfestigkeit in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz des Thermoschocks**



**Abbildung 3 - Die Änderung des E-Moduls aufgrund des Thermoschocks**



## 4. Diskussion

### 4.1 Interpretation der Diagramme

In der Theorie verläuft der Graph des E-Moduls annähernd linear abfallend, was in Abb.3 recht gut zu erkennen ist. Das bedeutet, dass die Elastizität der Proben mit steigenden Temperaturunterschieden zunimmt, da die Kräfte gegen die Verformung innerhalb der Probe durch die Risse abnehmen. Unsere Messwerte stimmen gut mit den Erwartungen überein.

Der Graph der Restfestigkeit sollte einen Sprung bei 88 Kelvin machen, da bei dieser kritischen Temperaturdifferenz der Thermoschockparameter überschritten wird, also die Probe anfängt Risse zu bilden und dadurch erst brüchig wird.

In Abbildung 2 ist dieser Sprung sehr deutlich zu erkennen. Die kritische Temperaturdifferenz liegt in unserem Graph bei einer Temperaturdifferenz von etwa 115 Kelvin.

Da bei der Probe h durch den Thermoschock ein großer Riss in der Mitte entstanden ist, ist der Wert verglichen mit der Bruchspannung von g so unterschiedlich. Dieser Wert beeinflusst aber nur die Intensität des Sprungs, den wir am Graph abgelesen haben. Die maximale Bruchspannungen der Proben e und f sind sehr unterschiedlich, trotzdem fügen sich diese Werte sehr gut in den Graph ein, was darauf schließen lässt, dass der Wert für e zu hoch und für f zu klein war. Größere Abweichungen der Messwerte und des Diagrammverlaufs sind aber nicht zu erkennen.

Die Risse, die während des Versuchs wahrgenommen werden, verschwinden mit der Zeit, weil die Probe wieder in ihre ursprüngliche Form zurückgeht, und die Lücken, die durch die Temperaturunterschiede entstanden sind, kleiner werden und das Licht nicht mehr so gut an ihnen gebrochen werden kann. Die Schäden bleiben aber erhalten.

### 4.2 Fehlerquellen

Es gibt viele verschiedene Fehlerquellen, die die Messwerte und damit auch unsere Interpretation beeinflussen können.

Die Glasproben können schon vor der Thermoschockbehandlung mit Produktionsfehlern belastet sein, und daher unterschiedliche Eigenschaften haben. Die Proben wurden manuell

entgratet, daher kann nicht gesagt werden, ob die Kerben vollständig entfernt wurden oder ob die Probe beim Abschleifen unsymmetrisch geworden ist. Außerdem wurden die Proben nur von einer Seite erhitzt, was Temperaturunterschiede in der Probe bewirken kann und auch dazu führt, dass Risse eher an einer der Seiten entstehen. Der Transport der Proben von Heizplatte zu Wasserbad beeinflusst außerdem die Probentemperatur. Auch der Biegeversuch wurde manuell durchgeführt, dadurch ist eine gleichmäßige Kraftübertragung auf die Probe nicht gegeben.

Die Fehler können dadurch verkleinert werden, dass mehr als nur zwei Glasproben mit gleicher Temperatur untersucht werden. Die statistischen Fehler werden durch den Mittelwert der Messergebnisse kleiner. Des Weiteren können durch Benutzung von speziellen Maschinen beim Schleifen und beim Biegeversuch die Vergleichbarkeit der Messwerte verbessert werden. Auch sollten die Glasproben von allen Seiten gleichmäßig erhitzt werden, was durch einen Ofen gewährleistet werden kann.

Auch bei der Bestimmung des E-Moduls durch das akustische Verfahren, können bei vielen Rissen in der Probe nicht immer genaue Werte ermittelt werden. Auch hier wäre eine Maschine zur Bestimmung besser geeignet. Allgemein können alle Fehler durch genaueres Arbeiten verkleinert werden. Für ein genaueres  $\Delta T$  der Restfestigkeit hätte man für weitere Temperaturen, vor allem zwischen 100 K und 120 K, Messwerte bestimmen müssen.