

2 Grundlagen

2.1 Ermüdungsfestigkeit

2.1.1 Definitionen und Begriffe

Unter Ermüdung versteht man das Versagen von Materialien oder Bauteilen bei zeitlich veränderlicher, periodischer Belastung. Durch einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess kann ein Versagen bei ausreichend oft wiederholter Beanspruchung (zyklischer Belastung) – evtl. auch unter zusätzlicher Einwirkung eines korrosiven Mediums – schon weit unterhalb der quasi-statischen Festigkeit des Materials auftreten. Bauteile, die zyklischen Belastungen ausgesetzt sind, haben eine entsprechend begrenzte Lebensdauer, die bei höherer Beanspruchung kürzer ausfällt. Aus diesem Grund sind für kritische Bauteile Berechnungen oder Versuche zur Lebensdauerprognose vorzunehmen. Viele Materialien weisen allerdings eine Ermüdungsschwelle auf. Das bedeutet, dass unterhalb einer bestimmten Lastgröße kein Ermüdungsversagen auftritt. Bei den meisten Materialien kann anhand von fraktographischen Untersuchungen, der Beurteilung des Bruchbildes, ermittelt werden, ob es sich um einen Spontan- oder einen Ermüdungsbruch handelt. Gegenüber spontanen Brüchen treten Ermüdungsbrüche viel häufiger auf [10].

Als Ermüdungsfestigkeit wird die ertragbare Beanspruchungsgröße bei begrenzt oder unbegrenzt wiederholter Belastung bezeichnet. Die Ermüdungsfestigkeit bildet den Oberbegriff der Schwingfestigkeit und der Betriebsfestigkeit. Als Schwingfestigkeit wird die Ermüdungsfestigkeit bei schwingender Beanspruchung, entsprechend periodisch wiederholter Belastung gleicher Größe, bezeichnet; als Betriebsfestigkeit wird die Ermüdungsfestigkeit bei zufälligem Belastungsverlauf verstanden (siehe Abbildung 2.1).

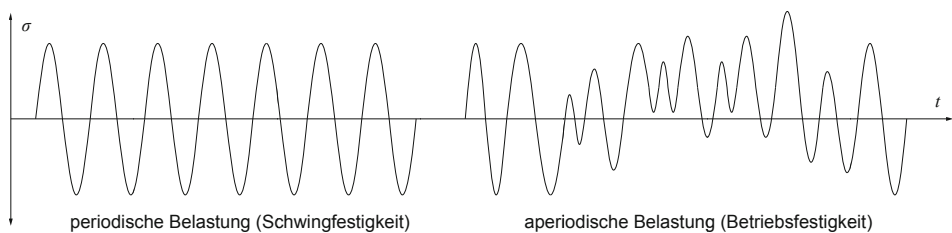


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung einer periodischen und einer zufallsartigen, aperiodischen Belastung

Die Schwingfestigkeit wird in sogenannten Dauerschwingversuchen ermittelt. In Abbildung 2.2 sind die wichtigsten Bezeichnungen der Dauerschwingbelastungen dargestellt. Die einzelne Schwingbelastung mit der Schwing- bzw. Periodendauer T wird

Schwingspiel genannt. Die Amplitude des Schwingspiels wird als Spannungsamplitude σ_{amp} , die maximale Beanspruchung als Oberspannung σ_{max} und die minimale Spannung als Unterspannung σ_{min} bezeichnet. Weitere wichtige Kenngrößen sind die Mittelspannung σ_m , die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ und das Spannungsverhältnis R zwischen Unter- und Oberspannung. Die Kenngrößen sind durch einfache Beziehungen ineinander überführbar:

$$\sigma_{\text{amp}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}) \quad (2.1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}) \quad (2.2)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}} \quad (2.4)$$

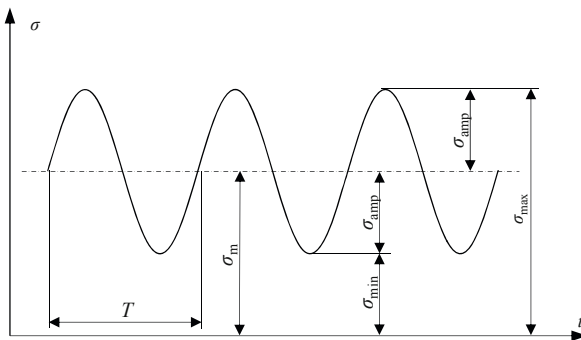


Abbildung 2.2 Kennwerte der Dauerschwingbelastung

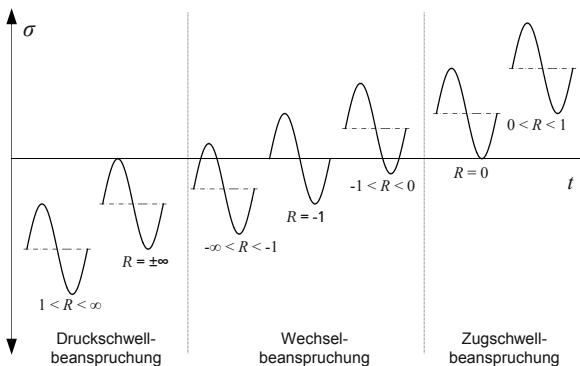


Abbildung 2.3 Belastungsarten bei Dauerschwingversuchen

Anhand des Spannungsverhältnisses R werden Schwingbeanspruchungen in verschiedene Belastungsarten eingeteilt (siehe Abbildung 2.3). Beanspruchungen mit Vorzeichenwechsel der Spannung werden Wechselbeanspruchungen (reine Wechselbeanspruchung bei $R = -1$) und Beanspruchungen ohne Vorzeichenwechsel Schwellbeanspruchungen (reine Zugschwellbeanspruchung bei $R = 0$) genannt.

2.1.2 Wöhler-Versuch

Der zentrale Versuch zur Ermittlung der Schwingfestigkeit ist der nach August Wöhler benannte Wöhler-Versuch. Hierbei werden Probekörper im Dauerschwingversuch zyklisch mit konstanter Beanspruchung, d.h. auf einem bestimmten Spannungshorizont, solange belastet, bis ein Versagen eintritt oder eine festgelegte Anzahl an Schwingspielen erreicht ist. Probekörper, die den Dauerschwingversuch überstehen, werden als Durchläufer bezeichnet. Die Versuchsdurchführung erfolgt meist bei sinusförmiger oder sägezahnartiger Beanspruchung. Die Versuche werden auf mehreren Lasthorizonten durchgeführt. Die hierbei erreichten Schwingspiele N der einzelnen Probekörper werden in einem Diagramm gegenüber der Spannungsamplitude, der Oberspannung oder der Spannungsschwingbreite aufgetragen (siehe Abbildung 2.4). Die Verbindungs- bzw. Mittellinie der Ergebnispunkte wird Wöhler-Linie (engl.: *s-N-curve*) genannt. Die Kurve lässt sich für Metalle in drei Bereiche einteilen: Die Kurzzeitfestigkeit, die Zeitfestigkeit, die bei doppellogarithmischer Darstellung eine Gerade bildet, und die Dauerfestigkeit, die eine flachere Neigung gegenüber der Zeitfestigkeit aufweist.

Neben dem Wöhler-Versuch gibt es noch eine Reihe weiterer Methoden und Verfahren zur Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit und der Wöhler-Linie. Sie können beispielsweise [10] und [11] entnommen werden.

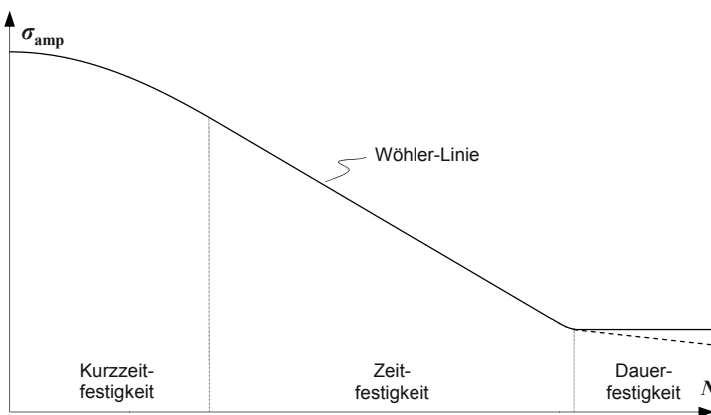


Abbildung 2.4 Schematische Darstellung der Wöhler-Linie; Abgrenzung der Bereiche Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit

2.2 Linear elastische Bruchmechanik

2.2.1 Allgemeines

Die Festigkeit und die Ermüdungsfestigkeit sind eng mit der Bruchmechanik verknüpft, da die Ermüdung von Bauteilen durch das Wachstum von vorhandenen Rissen hervorgerufen wird. Die Bruchmechanik befasst sich mit dem Versagen rissbehafteter Bauteile und dem Wachstum von Rissen unter statischer, dynamischer und zyklischer Belastung bis zum Bruch. Aufgrund des spröden Materialverhaltens von Glas wird bei den Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich das K -Konzept angewendet und im Folgenden kurz beschrieben. Neben dem K -Konzept existieren noch das Konzept der Energiefreisetzungsrate G und das J -Integral, die in der linear elastischen Bruchmechanik ineinander überführt werden können. Eine detaillierte Einführung in die Bruchmechanik und deren Konzepte können beispielsweise [12] entnommen werden.

2.2.2 Rissöffnungsmodi

Prinzipiell wird in der Bruchmechanik zwischen drei Arten der Rissöffnung unterschieden. Die drei sogenannten *Rissöffnungsmodi* sind in Abbildung 2.5 dargestellt: *Modus I* entspricht einer Zugbelastung normal zu den Rissflanken, *Modus II* einer Schubbelastung in Scheibenebene, *Modus III* einer Schubbeanspruchung aus der Scheibenebene heraus. Die gleichzeitige Beanspruchung eines Risses durch mehrere Modi wird *gemischte Beanspruchung* (engl.: *mixed mode loading*) genannt. Für die üblichen Anwendungen im Glas- und Fassadenbau und die in dieser Arbeit untersuchten Fälle (kleine Oberflächendefekte, senkrecht zur Scheibenebene) ist die Modus I-Belastung vorherrschend, während die Rissöffnungen aus Modus II- und Modus III-Belastungen vernachlässigbar klein sind.

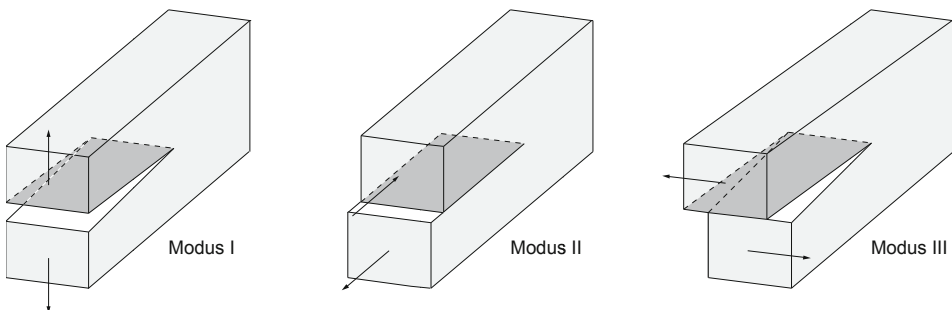


Abbildung 2.5 Darstellung der Rissöffnung unter Modus I-, Modus II- und Modus III-Belastung

2.2.3 K-Konzept

Mit dem *K-Konzept* wird die Spannungskonzentration unter einem Riss durch einen Spannungsintensitätsfaktor K ausgedrückt. Er beschreibt hierbei die „Stärke“ der Spannungssingularität bzw. kann als Verhältnis des Spannungsanstiegs an der Singularität betrachtet werden. Der Spannungsintensitätsfaktor, der unabhängig von den Materialeigenschaften ist, lässt sich mit Gl. (2.5) berechnen. Hierbei ist σ die anliegende Spannung, a die Risstiefe und Y der Geometriefaktor.

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

Das Bruchkriterium des *K-Konzepts* lautet:

$$K_I = K_{Ic} \quad (2.6)$$

Überschreitet die Spannungsintensität den kritischen Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} , kommt es zum instabilen Risswachstum und zum Versagen. Der kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} , oft auch als Bruchzähigkeit bezeichnet, ist eine materialspezifische Größe, die durch Versuche an speziellen Proben mit bekannter Risslänge und bekannter Rissgeometrie bestimmt wird. Werte für Glas sind in Kapitel 2.4.2 angegeben.

Liegen mehre Lastfälle vor, können die Spannungsintensitätsfaktoren der einzelnen Lastfälle superponiert werden.

2.2.4 Geometriefaktoren

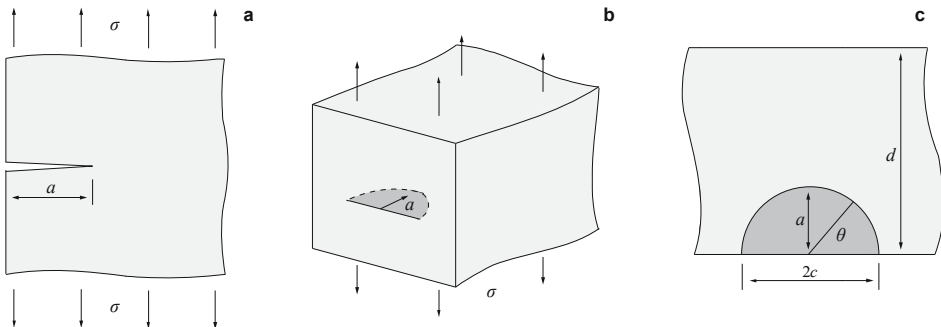


Abbildung 2.6 Schematische Darstellung eines geraden Oberflächenrisses (a), eines halbkreisförmigen Oberflächenrisses unter Zugbeanspruchung (b) sowie eines halbkreisförmigen Oberflächenrisses im Schnitt (c)

Zur Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors ist neben der Kenntnis der Risstiefe eine möglichst präzise Kenntnis des Geometriefaktors Y notwendig. Der Geometriefaktor ist eine bruchmechanische Korrekturfunktion, die sich aus der Geometrie des Risses,

der Lage des Risses im Bauteil und der Spannungsverteilung am Riss ergibt. Für einfache Fälle lassen sich Lösungen mit analytischen Methoden bestimmen. Bei komplizierteren Problemen werden numerische Lösungsverfahren zur Bestimmung genutzt. Lösungen für verschiedenste Problemstellungen können aus der Fachliteratur und aus Handbüchern (z.B. [13, 14]) entnommen werden. Nachfolgend werden Geometriefaktoren, die im weiteren Verlauf der Arbeit Verwendung finden, vorgestellt.

Gerader und halbkreisförmiger Riss

In Abbildung 2.6 sind die am meisten verwendeten Lösungen für Oberflächenschädigungen in Gläsern dargestellt. Für einen geraden, scharfen Riss in einer unendlich ausgedehnten Ebene, bei dem die Risttiefe a klein gegenüber der halben Rissbreite c ($a \ll c$) und der Dicke d ($a \ll d$) ist, ergibt sich ein Geometriefaktor von $Y = 1,1215$. Für einen halbkreisförmigen, scharfen Riss ($a = c$) in einem unendlich ausgedehnten Volumen (engl.: *half penny crack*) ergibt sich ein maximaler Geometriefaktor von $Y = 0,7216$. Für typische Oberflächen- und Kantendefekte in Gläsern können diese beiden Geometriefaktoren als Grenzwerte betrachtet werden, da sie üblicherweise ein Verhältnis der Risttiefe zur halben Rissbreite von $a/c \leq 1$ aufweisen: Lange Kratzer werden als gerade Risse behandelt; halbkreisförmige Risse entstehen durch einen punktuellen Kontakt mit einem härteren Material.

Für Oberflächenschäden mit einem a/c Verhältnis zwischen den genannten Grenzwerten wird die Lösung für halbelliptische Risse (engl.: *semi-elliptical crack*) verwendet. Die am weitesten verbreiteten und in verschiedenen Normen verwendeten Gleichungen (entnommen aus [15]) zur Bestimmung des Geometriefaktors von halbelliptischen Oberflächendefekten ($0 < a/c < 1$) unter Biegebeanspruchung in Abhängigkeit von a/c und a/d gehen auf Newman und Raju [16–18] zurück:

$$Y_{\text{depth}} = \frac{M}{\sqrt{Q}} H_2 \quad (2.7)$$

$$Y_{\text{surface}} = S \frac{M}{\sqrt{Q}} H_1 \quad (2.8)$$

Y_{depth} ist der Geometriefaktor an der tiefsten Stelle und Y_{surface} der Geometriefaktor an der Oberfläche der Scheibe. Die Funktionen M , Q , S , H_1 und H_2 sind dem Anhang A.3 zu entnehmen.

Zug- und Biegezugspannungen

Da die Risttiefe bei üblichen Defekten gegenüber der Glasdicke vernachlässigbar klein ist, wird bei der Berechnung des Geometriefaktors vereinfachend nicht zwischen Zug- und Biegezugspannungen unterschieden. Für tiefere Risse oder bei der Risswachstumsimulation bis zum Bruch kann es jedoch erforderlich werden, das Verhältnis zwischen Risttiefe und Glasdicke zu berücksichtigen sowie zwischen Zug- und Biegeanteilen der

Beanspruchung zu unterscheiden. In Abbildung 2.7(b) ist Gl. (2.7) für verschiedene a/c -Verhältnisse ausgewertet. Zum Vergleich sind die Geometriefaktoren für die gleichen a/c -Verhältnisse für eine reine Zugbeanspruchung in Abbildung 2.7(a) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei Rissen mit geringer Tiefe ($a/d \approx 0$) die Geometriefaktoren für Zug- und Biegebelastung gleich groß sind. Mit steigendem a/d -Verhältnis stellen sich jedoch deutlich unterschiedliche Geometriefaktoren ein: Der Geometriefaktor nimmt für Risse unter Zug zu, während er für eine reine Biegebeanspruchung aufgrund des linear abnehmenden Spannungsverlaufs abnimmt.

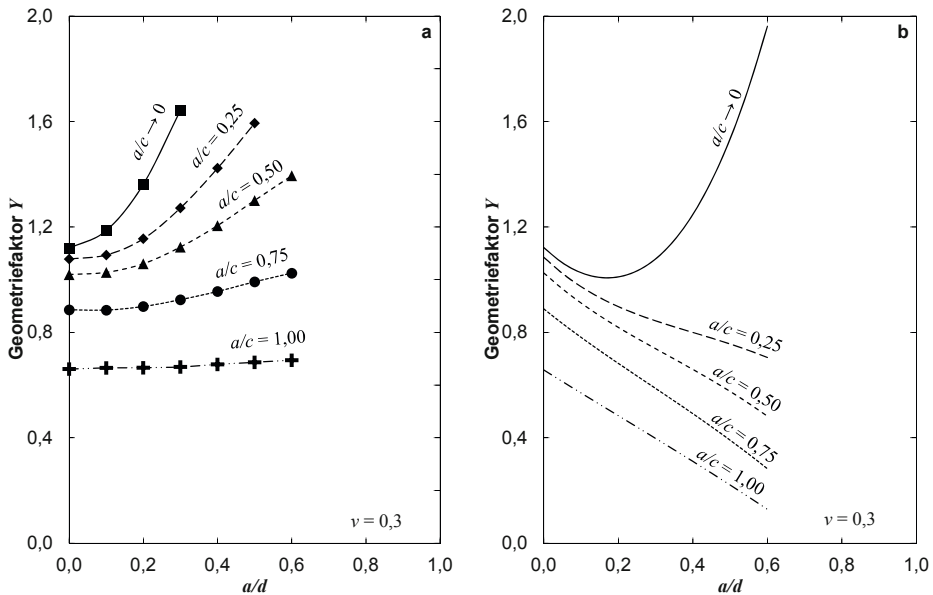


Abbildung 2.7 Geometriefaktor Y_{depth} bei reiner Zugbeanspruchung nach [13] (a) und bei reiner Biegebeanspruchung nach [16–18] (b) in Abhängigkeit von a/c und a/d

Geometriefaktor entlang des Rissufers

Im ebenen Fall existiert für einen Riss ein einzelner Geometriefaktor. Im räumlichen Fall kann der Geometriefaktor entlang des Rissufers variieren. In Abbildung 2.8 ist der Geometriefaktor entlang des Rissufers eines halbelliptischen Risses unter Biegebeanspruchung für verschiedene a/c -Verhältnisse dargestellt. Für einen tieferen Riss ($a/c = 0,25$) ist der Geometriefaktor und damit die Spannungsintensität Y_{depth} am tiefsten Punkt ($\theta = 90^\circ$) am größten und an der Oberfläche Y_{surface} ($\theta = 0^\circ$) am geringsten. Bei einem halbkreisförmigen Riss ($a/c = 1$) ist es umgekehrt: Der Geometriefaktor an der Oberfläche ($\theta = 0^\circ$) ist größer als an der tiefsten Stelle ($\theta = 90^\circ$).

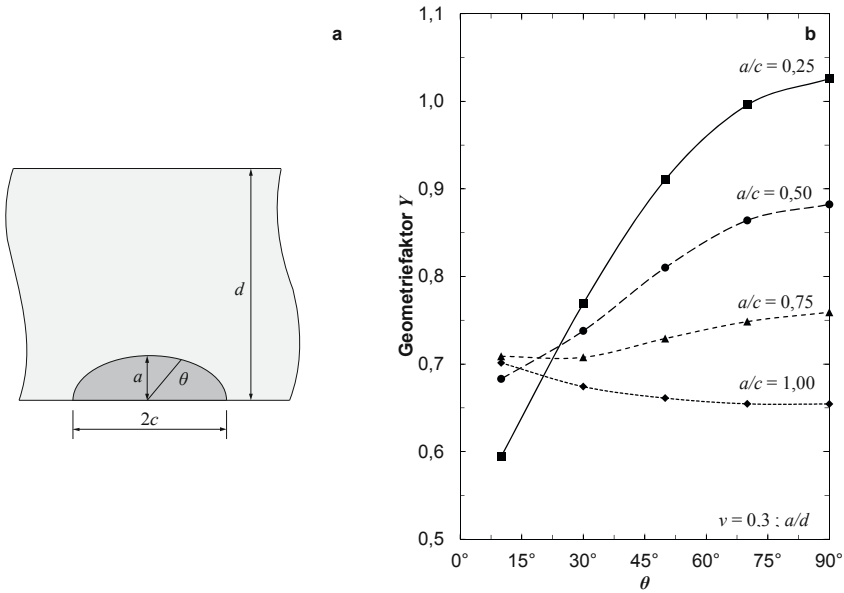


Abbildung 2.8 Halbelliptischer Oberflächenriss: (a) Schnitt durch einen halbelliptischen Riss mit der Risstiefe a , der Rissbreite $2c$; (b) Geometriefaktor Y entlang des Rissufers eines halbelliptischen Risses unter Zugbeanspruchung in Abhängigkeit von a/c und θ aus [13]

Thermisch eingeprägte Eigenspannungen

Neben der Beanspruchung aus Zug und Biegung sind die Oberflächenrisse vor allem in thermisch vorgespanntem Glas (siehe Abschnitt 2.3.4) den Eigenspannungen der Gläser ausgesetzt. Der Spannungsverlauf in Dickenrichtung z der Gläser kann in guter Näherung mit einer parabolischen Funktion nach Gl. (2.9) beschrieben werden. Hierbei sind die maximalen Druckspannungen an der Oberfläche σ_r betragsmäßig doppelt so groß wie die Zugspannungen im Kern (siehe Abbildung 2.9).

$$\sigma(z) = \sigma_r \left(1 - 6 \frac{z}{d} + 6 \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right) \tag{2.9}$$

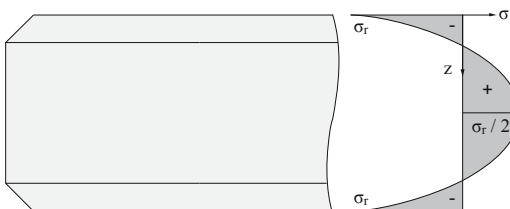


Abbildung 2.9 Spannungsverlauf in thermisch vorgespanntem Glas

In [19, 20] wurde mit der Methode der Gewichtsfunktionen hieraus eine Gleichung für den Geometriefaktor eines geraden Oberflächenrisses in einer thermisch vorgespannten Scheibe abgeleitet:

$$Y_r = 1,1215 \cdot \left(1 - \frac{12a}{\pi d} + 3 \frac{a^2}{d^2} \right) \quad (2.10)$$

In Bild ist Gl. (2.10) für $a \approx 0$ bis $a = d$ dargestellt. Zum Vergleich wurde eine weitere Gewichtsfunktion aus [13] für den Eigenspannungsverlauf nach Gl. (2.9) ausgewertet und Gl. (2.10) gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass der Geometriefaktor bei thermischer Eigenspannung für kleine a/d -Verhältnisse ($a/d < 0,01$) nur geringfügig vom Geometriefaktor bei reiner Zugbeanspruchung ($Y = 1,1215$) abweicht. Danach fällt der Geometriefaktor steil ab. Zwischen $a/d = 0,37$ und $a/d = 0,90$ nimmt der Geometriefaktor, aufgrund des Vorzeichenwechsels der Eigenspannungen bei $z/d = 0,21$ und $z/d = 0,79$, negative Werte an.

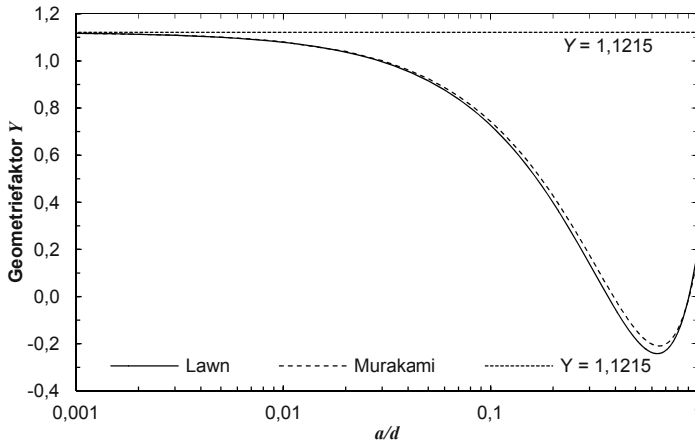


Abbildung 2.10 Geometriefaktor Y_r für einen Oberflächenriss ($a/c = 0$) unter thermisch eingepprägten Eigenspannungen in Abhängigkeit von a/d

2.3 Glas im Bauwesen

2.3.1 Definition und Struktur von Glas

Glas ist eine amorphe Substanz, die gewöhnlich durch einen Schmelzprozess erzeugt wird. Glas wird oftmals als „unterkühlte Flüssigkeit“ bezeichnet, denn anders als bei der Kristallisation von Kristallen (siehe Abbildung 2.11(b)) bilden sich beim Erstarren des

Glases zwar auch Kristallkeime, die sich jedoch in einem unregelmäßigen Netzwerk anordnen (siehe Abbildung 2.11(a)). Die Atomstruktur des Glases ist damit der Atomstruktur einer Flüssigkeit sehr ähnlich. Beim Kristall erfolgt der Übergang von Schmelze zum Kristall bei einer bestimmten Temperatur spontan; beim Glas hingegen erfolgt dieser Prozess im sogenannten Transformationsbereich nach und nach [21].

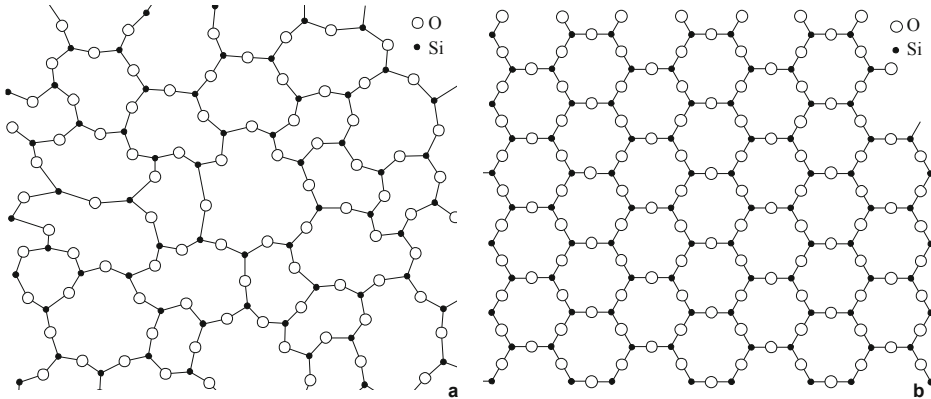


Abbildung 2.11 Atomstruktur von (a) Quarzglas (SiO₂) und (b) Quarz-Kristall (SiO₂)

Es gibt eine Vielzahl an verschiedenen künstlichen und natürlichen, nicht metallischen und metallischen Gläsern, die sich in ihrer Zusammensetzung und den Eigenschaften mehr oder weniger stark unterscheiden. Im Bauwesen wird – mit Ausnahme von Glas für Spezialanwendungen – Kalk-Natron-Silikatglas eingesetzt. Dieses ist ein nicht metallisches, oxidisches Glas, das der Gruppe der Silikatgläser angehört. Das Glasnetzwerk dieser Gläser wird fast ausschließlich durch Siliziumdioxid (SiO₂) gebildet. Es wird jedoch durch Netzwerk wandler aufgerissen. Im Falle von Kalk-Natron-Silikatglas sind das Natrium-, Kalium- und Calciumoxid.

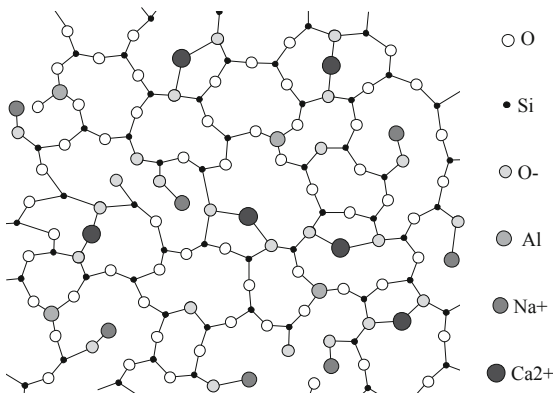


Abbildung 2.12 Atomstruktur von Kalk-Natron-Silikatglas

Zyklische Ermüdung von thermisch entspanntem und
thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas
Cyclic fatigue of annealed and tempered soda-lime
glass

Hilcken, J.

2015, XX, 290 S. 140 Abb., 45 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-48352-7