

Jonas Hilcken

Zyklische Ermüdung von thermisch entspanntem und thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas

*Cyclic fatigue of annealed and
tempered soda-lime glass*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Springer Vieweg

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen

Band 44

Weitere Bände in dieser Reihe
<http://www.springer.com/series/13824>

Institutsreihe zu Fortschritten bei Mechanik, Werkstoffen, Konstruktionen, Gebäudehüllen und Tragwerken.

Jonas Hilcken

Zyklische Ermüdung von thermisch entspanntem und thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas

Cyclic fatigue of annealed
and tempered soda-lime glass

Jonas Hilcken
Institut für Statik und Konstruktion
Technische Universität Darmstadt
Darmstadt, Deutschland

Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2015

D 17

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen
ISBN 978-3-662-48352-7 ISBN 978-3-662-48353-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48353-4

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt in den Jahren 2010 bis 2015.

Mein Dank gilt allen, die mich in dieser Zeit unterstützt und damit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider für das entgegen gebrachte Vertrauen, die ständige Diskussionsbereitschaft sowie seine Ideen und Anregungen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner und Frau Dr.-Ing. Kaja Boxheimer danke ich für die Initiierung und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung des mit der Arbeit verbundenen Forschungsvorhabens. Darüber hinaus danke ich meinen Kollegen Manuel Hark, Johannes Franz, Sebastian Schula, Jonas Kleuderlein und Johannes Kuntsche für Fachgespräche, Mithilfe und Kritik, Jeannette Kaupp für das Korrekturlesen der Arbeit und meiner Frau Melle Hilcken sowie meiner Mutter Beate Rüter und Schwiegermutter Angelika Kaupp für ihre fortwährende Geduld und Unterstützung.

Jonas Hilcken, im Juli 2015

Kurzfassung

Bauteile, die schwingenden oder periodisch wiederkehrenden Beanspruchungen ausgesetzt sind, müssen häufig auch hinsichtlich ihres Ermüdungsverhaltens eingestuft und bemessen werden. Im konstruktiven Glasbau liegt hierzu noch kein Nachweiskonzept vor, da das zyklische Ermüdungsverhalten von den im Bauwesen eingesetzten Gläsern nur ansatzweise erforscht ist.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten von thermisch entspanntem und thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas anhand von Schwingprüfungen im Doppelring- und 3-Punkt-Biegeversuch unter verschiedenen Randbedingungen mit definiert vorgeschädigten Probekörpern untersucht. Anhand der Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, dass die Festigkeit unter zyklischer Beanspruchung deutlich abnimmt und eine Schwelle existiert, unterhalb derer keine Ermüdung auftritt. Zudem konnten die wesentlichen Einflussparameter der zyklischen Ermüdung belegt und quantifiziert werden. Vergleiche mit analytischen Gleichungen und einem numerischen Modell, welches das subkritische Risswachstum mittels eines Zeitschrittverfahrens simuliert, haben gezeigt, dass die Festigkeit bei zyklischer Beanspruchung deutlich geringer ausfällt als erwartet. Die zyklische Ermüdung und die untersuchten Einflussparameter können unter Verwendung modifizierter Risswachstumsparametern dennoch recht gut mit den gängigen Risswachstumsgesetzen prognostiziert werden. Anders als vermutet traten bei Versuchen, bei denen zwischen den einzelnen Schwingspielen Belastungspausen eingelegt wurden, keine signifikanten Festigkeitserhöhungen auf, die auf Rissheilungseffekte hindeuten.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Nachweiskonzept erstellt, das zur Bemessung von periodisch beanspruchten Bauteilen aus thermisch entspanntem und thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas im konstruktiven Glasbau herangezogen werden kann.

Abstract

Structural elements that are subjected to cyclic or repeated loading shall be classified and designed with respect to their fatigue behavior. For glass elements, no approach for the determination of the fatigue life has been established thus so far as the cyclic fatigue of the glass elements commonly used in construction has only been investigated rudimentarily.

In the present work, the behavior of annealed and tempered soda lime glass has been investigated performing cyclic ring-on-ring and 3-point bending tests under varying boundary conditions on samples with well-defined pre-damages. The results obtained showed that the strength of the glass is significantly reduced under cyclic loading. A threshold below which no failure occurs was found, and the main parameters responsible for cyclic fatigue were characterized and quantified. A comparison with analytical equations and a numerical model simulating the subcritical crack growth using a time-marching method have shown that the strength is reduced more substantially by cyclic loading than expected. However, the cyclic fatigue and the investigated parameters can be predicted sufficiently using common crack propagation laws with modified constants. In contrast to previous assumptions, experiments with unstressed periods between load cycles did not show a significant increase in strength, indicating no or only minor crack healing effects.

Based on the findings, a concept was developed that could be used for the design of cyclically loaded structural elements of annealed or tempered soda lime glass.

Version abrégée

Des éléments structurels soumis à des charges cycliques ou périodiquement récurrentes nécessitent généralement une évaluation et vérification en vue de leur comportement en fatigue. En ce qui concerne l'utilisation de structures en verre, il n'existe pas de méthodes de vérification pour ce phénomène, comme la fatigue des verres utilisés dans le génie civil est un domaine peu exploré.

Dans le présent travail, le comportement de verres silicosodocalciques recuits et trempés a été examiné à l'aide d'essais cycliques soit suivant d'essais avec doubles anneaux concentriques soit suivant d'essais flexion trois points. Ces tests ont été faits sous l'effet de différentes conditions imposées et avec des échantillons préalablement endommagés de façon bien définie. Les résultats ont montré une diminution considérable de la résistance du matériau sous l'effet de charges cycliques ainsi qu'un seuil en-dessous duquel la fatigue ne se produit plus. En plus, les principaux paramètres influant la fatigue du verre lors de l'exposition à des charges cycliques ont pu être prouvés et quantifiés. Une comparaison avec des solutions analytiques et un modèle numérique qui simule la fissuration sous-critique à l'aide d'une approche dite « time-marching » a montré que la résistance du matériau soumis à des charges cycliques est considérablement moins élevée qu'initialement supposé. La fatigue cyclique et les paramètres d'influence considérés peuvent toutefois bien être pronostiqués sous l'approche des paramètres de propagation des fissures et en utilisant les lois courantes de propagation des fissures. Contrairement aux prévisions, une augmentation significative de la résistance du matériau due au phénomène de cicatrization des fissures n'a pas été observée lors des tests pendant lesquels des pauses ont été faites entre chaque cycle.

Sur la base de ces connaissances, une méthode de vérification a été développée pour des éléments structurels en verre silicosodocalcique recuit ou trempé soumis à des charges périodiquement récurrentes.

Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelzeichen	xv
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	4
1.3 Begriffsbestimmung.....	6
2 Grundlagen	9
2.1 Ermüdungsfestigkeit.....	9
2.1.1 Definitionen und Begriffe.....	9
2.1.2 Wöhler-Versuch.....	11
2.2 Linear elastische Bruchmechanik.....	12
2.2.1 Allgemeines.....	12
2.2.2 Rissöffnungsmodi.....	12
2.2.3 K-Konzept.....	13
2.2.4 Geometriefaktoren.....	13
2.3 Glas im Bauwesen.....	17
2.3.1 Definition und Struktur von Glas.....	17
2.3.2 Physikalische Eigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas.....	19
2.3.3 Herstellung von Floatglas.....	20
2.3.4 Veredelung durch thermisches Vorspannen.....	21
2.3.5 Übersicht der wichtigsten Glasarten.....	21
2.4 Festigkeit und Ermüdung von Glas.....	23
2.4.1 Allgemeines.....	23
2.4.2 Bruchzähigkeit.....	23
2.4.3 Flächeneinfluss.....	24
2.4.4 Gebrauchtes Glas.....	26
2.4.5 Statische Ermüdung.....	27
2.4.6 Dynamische Ermüdung.....	29
2.4.7 Zyklische Ermüdung.....	33
2.4.8 Lebensdauerprognose mit dem Potenzgesetz.....	37
2.4.9 Rissheilungseffekte.....	48
2.5 Fraktographie von Glas.....	50
2.5.1 Allgemeines.....	50
2.5.2 Bruchvorgang.....	50
2.5.3 Bruchspiegel.....	51
2.5.4 Wallner-Linien.....	52
2.5.5 Bruchbild.....	53

2.5.6	Verzweigungslänge und Verzweigungswinkel	54
2.6	Statistische Methoden	56
2.6.1	Allgemeines	56
2.6.2	Schätzverfahren	56
2.6.3	Konfidenzintervalle	58
2.6.4	Verteilungsfunktionen	61
3	Experimentelle Untersuchungen zur definierten Vorschädigung	65
3.1	Versuchskonzept	65
3.2	Reproduzierbarkeit	69
3.3	Kratzlänge	72
3.4	Lagerungsdauer	72
3.5	Eindringkraft	72
3.6	Zusammenfassung	74
4	Mechanische Eigenschaften der Probekörper	75
4.1	Allgemeines	75
4.2	Beschreibung der Probekörper	75
4.3	Abmessungen	76
4.4	Thermische Eigenspannungen	77
4.5	Elastizitätsmodul	85
4.6	Rissfortschrittsexponent n	89
4.7	Risswachstumsparameter v_0	91
4.8	Zusammenfassung	95
5	Zyklische Ermüdung I	97
5.1	Versuchskonzept	97
5.2	Probekörper	102
5.3	Versuchsaufbau	102
5.4	Finite-Elemente-Simulation	104
5.5	Durchführung	108
5.5.1	Allgemeines	108
5.5.2	Zinnbad- und Luftseite	109
5.5.3	Abkleben der Probekörper	109
5.5.4	Schädigung	109
5.5.5	Lagerung	111
5.5.6	Biegezugfestigkeitsprüfung	111
5.5.7	Dauerschwingversuche	112
5.6	Vergleichsprobekörper	113
5.7	Basisversuche	114
5.8	Einflussparameter	120
5.8.1	Frequenz	120
5.8.2	Belastungstyp	123

5.8.3	Belastungsfunktion.....	125
5.8.4	Umgebungsbedingungen.....	128
5.8.5	Schädigung und Lagerung.....	132
5.9	Änderung mechanischer Eigenschaften.....	134
5.10	Zusammenfassung.....	136
6	Zyklische Ermüdung II	139
6.1	Versuchskonzept.....	139
6.2	Probekörper.....	140
6.3	Versuchsaufbau.....	140
6.4	Durchführung.....	142
6.4.1	Allgemeines.....	142
6.4.2	Dauerschwingversuche.....	142
6.5	Vergleichsprobekörper.....	143
6.6	Basisversuche.....	144
6.7	Einflussparameter.....	145
6.7.1	Frequenz.....	145
6.7.2	Belastungstyp.....	146
6.8	Zusammenfassung.....	147
7	Modelle zur Lebensdauerprognose	149
7.1	Allgemeines.....	149
7.2	Analytisches Modell.....	149
7.2.1	Beschreibung des analytischen Modells.....	149
7.2.2	Experimentelle Ergebnisse im Vergleich mit Prognosen anhand von Werten aus der Literatur.....	150
7.2.3	Anpassung der Versuchsergebnisse mittels Regressionsanalyse.....	151
7.3	Numerisches Modell.....	157
7.3.1	Beschreibung des numerischen Modells.....	157
7.3.2	Risswachstumssimulation.....	162
7.3.3	Anpassung der Versuchsergebnisse mittels der Regressionsanalyse.....	164
7.4	Zusammenfassung.....	167
8	Dauerschwingfestigkeit	169
8.1	Allgemeines.....	169
8.2	Auswertung der zyklischen Versuche.....	170
8.3	Treppenstufen-Versuche.....	173
8.3.1	Allgemeines.....	173
8.3.2	Durchführung.....	174
8.3.3	Ergebnisse und Auswertung.....	175
8.4	Zusammenfassung.....	178

9 Rissheilungseffekte bei periodischer Beanspruchung	179
9.1 Allgemeines	179
9.2 Versuche mit Belastungspausen I – Durchläufer und Schwingenspielzahl	180
9.2.1 Versuchskonzept	180
9.2.2 Durchführung	181
9.2.3 Ergebnisse und Auswertung	182
9.3 Versuche mit Belastungspausen II – Biegezugfestigkeit	183
9.3.1 Versuchskonzept	183
9.3.2 Durchführung	183
9.3.3 Ergebnisse und Auswertung	184
9.4 Zusammenfassung	185
10 Bemessungskonzept	187
11 Zusammenfassung und Ausblick	191
11.1 Forschungsstand	191
11.2 Anwendungsperspektiven	193
11.3 Ausblick	194
Literaturverzeichnis	197
Abbildungsverzeichnis	207
Tabellenverzeichnis	215
Anhang	221

Liste der Formelzeichen

a	Risstiefe
a_c, a_f	kritische Risstiefe
a_i	Initialrisstiefe, Ausgangsrisstiefe
a	Beiwert zur Berechnung des Beanspruchungskoeffizienten
A	Risswachstumsparameter (empirisches Potenzgesetz)
A	Konstante des Wiederhorn-Gesetzes
A_b, A_0	Fläche unter Zug, effektive Fläche
A_b, A_m	Bruchspiegelkonstanten
b	Probekörperbreite
b	Konstante des Wiederhorn-Gesetzes
b	Beiwert zur Berechnung des Beanspruchungskoeffizient
B	Bestimmtheitsmaß
c	Rissbreite
c	Spezifische Wärmekapazität
C	Werkstoffkonstante zum zyklischen Rissfortschritt (<i>Gesetz von Paris</i>)
d	Glasdicke
E	Elastizitätsmodul, E -Modul
ΔE_a	Aktivierungsenergie (unbelastet)
f	Frequenz
$f_{g,k}$	charakteristische Biegezugfestigkeit
f_k	charakteristischer Festigkeitswert
f_N	Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung
f_{LN}	Wahrscheinlichkeitsdichte der Lognormalverteilung
f_{WB}	Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibull-Verteilung

F	Kraft
F_{ind}	Eindringlast (engl.: <i>indentation load</i>)
H_1	Häufigkeit
I_x, I_y, I_z	Flächenträgheitsmoment
K	Spannungsintensitätsfaktor
$K_{\text{rII}}, K_{\text{rIII}}$	Spannungsintensitätsfaktor, der den Bereich II bzw. III begrenzt
K_{I}	Spannungsintensitätsfaktor im Modus I
K_{Im}	Spannungsintensitätsfaktor (Rauzone)
K_{Ic}	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
K_{depth}	Spannungsintensitätsfaktor an der Risspitze
K_{surface}	Spannungsintensitätsfaktor an der Oberfläche
k_{mod}	Modifikationsbeiwert nach DIN 18008-1
k_c	Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Konstruktion
$K_0, K_{\text{TH}}, K_{\text{S}}$	Ermüdungsschwelle
ΔK	effektiver Spannungsintensitätsfaktor
l	Probekörperlänge
l_{K}	Kratzlänge
m	zyklischer Rissfortschrittsexponent (<i>Gesetz von Paris</i>)
m	Rissfortschrittsexponent (<i>Wiederhorn-Gesetz</i>)
m	Masse
MSE	Mittlerer quadratischer Fehler
n	Stichprobenumfang
n	Rissfortschrittsexponent (<i>empirisches Potenzgesetz</i>)
n_c	Rissfortschrittsexponent bei zyklischer Beanspruchung
n_{III}	Rissfortschrittsexponent im Bereich III
N	Schwingspielzahl
p_0	Luftdruck in der Atmosphäre

$p_{\text{H}_2\text{O}}$	Partialdruck der Luftfeuchte
P	Wahrscheinlichkeit, Aussagewahrscheinlichkeit
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit
P_N	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
P_{LN}	Verteilungsfunktion der Lognormalverteilung
$P_{\bar{u}}$	Überschreitungshäufigkeit, -wahrscheinlichkeit
P_{WB}	Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung
r_b	Verzweigungslänge
r_m, r_h	Bruchspiegelradius
r_1	Lastringradius des Doppelringbiegeversuchs
r_2	Stützringradius des Doppelringbiegeversuchs
R	Spannungsverhältnis
R	allgemeine Gaskonstante
R	Korrelationskoeffizient
R_d	Bemessungswert des Tragwiderstandes
RH	relative Luftfeuchtigkeit
s	Standardabweichung
$s_{y,x}$	Standardabweichung von der Regressionsgeraden
S	Summe der Fehlerquadrate
t	Quantil der t -Verteilung
t_f	Lebensdauer bei statischer Belastung
t_{fqs}	Lebensdauer bei Belastung mit konstanter Spannungsrate
t_{fc}	Lebensdauer bei zyklischer Belastung
t_L	Lagerungsdauer
Δt_r	Zeitspanne ohne Belastung
T	Periodendauer, Schwingdauer
v	Rissausbreitungsgeschwindigkeit

v	Varianz
v_0	Rissausbreitungsgeschwindigkeit bei $K = K_{Ic}$
v_{II}, v_{III}	Rissausbreitungsgeschwindigkeit im Bereich II bzw. III
V	Variationskoeffizient
w	Verschiebung, Verformung
x	Richtung im kartesischen Koordinatensystem
\bar{x}	Mittelwert der Zufallsvariablen X
x_i	Wert i der Stichprobe mit Zufallsvariable X
x_i	Einzelwert in Stichprobe
X	Zufallsvariable
y	Richtung im kartesischen Koordinatensystem
$y_{KI,u}$	Untergrenze des Konfidenzintervalls
$y_{KI,o}$	Obergrenze des Konfidenzintervalls
y_{PI}	Grenzen des Prädiktionsintervalls
Y	Geometriefaktor
$Y_{surface}$	Geometriefaktor an der Oberfläche
Y_{depth}	Geometriefaktor an der Risspitze
z	Richtung im kartesischen Koordinatensystem
α	Schätzwert des Achsenabschnitts (lineare Regression)
α	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung
α_T	Temperaturausdehnungskoeffizient
β	Schätzwert der Geradensteigung (lineare Regression)
β	Formparameter der Weibull-Verteilung
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für Materialeigenschaften
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
ε	Dehnung

ε	Residuum
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Hauptdehnungen
ζ	Beanspruchungskoeffizient
ϑ	Temperatur
ϑ	unbekannter Parameter der OLS
μ	Erwartungswert
ν	Poissonzahl, Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
σ	Spannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
σ_a	Gebrauchsspannung, Beanspruchung (engl.: <i>applied stress</i>)
σ_0	konstante Spannung (statisch)
σ_f	Bruchspannung
σ_{fs}	Bruchspannung bei statischer Beanspruchung
σ_{fqs}	Bruchspannung bei Beanspruchung mit konstanter Spannungsrate
σ_{fc}	Bruchspannung bei zyklischer Beanspruchung
σ_{amp}	Spannungsamplitude (engl.: <i>stress amplitude</i>)
σ_D	Dauerfestigkeit, Dauerschwingfestigkeit
σ_m	Mittelspannung (engl.: <i>mean stress</i>)
σ_{max}	Oberspannung (engl.: <i>maximum stress</i>)
σ_{min}	Oberspannung (engl.: <i>minimum stress</i>)
σ_r	Eigenspannung, Oberflächendruckspannung (engl.: <i>residual stress</i>)
$\sigma_{r,i}$	Eigenspannung vor der Prüfung
$\sigma_{r,f}$	Eigenspannung nach der Prüfung
$\sigma_{rad}, \sigma_{tan}$	Radial-, Tangentialspannungen
σ_{rc}	Eigenspannung, Zugspannung im Kern
σ_x	Spannung in x -Richtung

$\dot{\sigma}$	Spannungsrate
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
θ	Öffnungswinkel
θ_b	Verzweigungswinkel

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

In den vergangenen Jahrzehnten hat die Nutzung des spröden Werkstoffs Glas im Bauwesen stetig zugenommen. Moderne Architektur ist kaum noch ohne den großflächigen Einsatz von Glas in der Gebäudehülle vorstellbar. Aber nicht nur der Anteil verglasteter Flächen nimmt zu, sondern auch Form, Größe, Verbindungstechniken und Einsatzgebiet verändern sich stetig. Der momentane Trend geht hin zu immer größeren und dünneren Scheibenelementen. Gleichzeitig verändert sich die Nutzung von Glasbauteilen: Reichte einst die Funktion als transparentes Fensterelement aus, wird Glas heute oftmals als konstruktives Bauteil der Primär- oder Sekundärkonstruktion mit lastabtragender Funktion eingesetzt [1]. Es ist beispielsweise in Form von Glasbalken und -schwertern (siehe Abbildung 1.1), aber auch in Form von Glasstützen, -dächern und -brücken anzutreffen.

Auch die Zunahme der regenerativen Energiegewinnung aus Sonnenenergie führt zu einem vermehrten Einsatz von Glas. Sowohl für Photovoltaikmodule als auch für die Spiegel von Parabolrinnenkraftwerken ist Glas der Basiswerkstoff, der die Lastabtragung in die Unterkonstruktion gewährleistet. Die extrem großen Reflektorflächen solcher Kraftwerke verlangen einen ökonomischen Bemessungsansatz, der Ausfall und Austausch von Einzelscheiben potentiellen Materialeinsparungen zur Optimierung der Kosten gegenüberstellt [2]. Die Genauigkeit einer solchen Gegenüberstellung hängt von der Präzision der Prognose der Lebensdauer dieser Elemente ab.

Um sowohl die im Bauwesen üblichen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Sicherheit für konstruktive Bauteile aus Glas dauerhaft gewährleisten zu können als auch den ökonomischen Anforderungen möglichst präziser Lebensdauerprognosen gerecht zu werden, müssen die Materialeigenschaften untersucht und in entsprechende Kennwerte umgesetzt werden.

Im Glas- und Fassadenbau existieren verschiedenste periodisch wiederkehrende Belastungen (siehe Abbildung 1.2). Hierzu gehören beispielsweise die Belastungen aus Verkehr bei begehbaren und betretbaren Verglasungen, die Schneelast bei Überkopferglasungen, die Klimlast bei Isolierglaselementen und die Belastung durch Temperatur. Bei diesen Einwirkungen handelt es sich um stochastische Beanspruchungsverläufe mit eher geringen Lastwechselzahlen. Durch die Belastung aus Windböen bei Fassadenelementen [3] oder bei Spezialanwendungen wie Lärmschutzwänden aus Glas [4], die bei jeder Zugvorbeifahrt beansprucht werden, können über die Gesamtlebensdauer des Bauteils dennoch recht hohe Lastwechselzahlen erreicht werden.

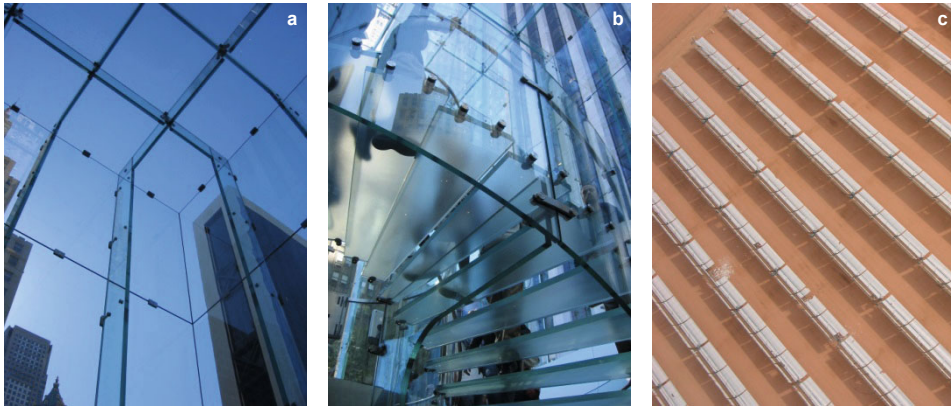


Abbildung 1.1 Konstruktive Glasbauteile, Glasschwerter, -balken (a), und -Treppe (b) des Apple Store, New York; (c) Parabolrinnenkraftwerk in Kalifornien (Bildnachweis: (a), (b) Ulrich Knaack, Technische Universität Darmstadt; (c) Alan Radecki)

Bauteile, die solchen zeitlich oder örtlich veränderlichen Lasten ausgesetzt sind, müssen zusätzlich zur statischen Festigkeit auch hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit bemessen werden. Bei der Bemessung von Glas wird die Periodizität von Belastungen bisher nicht berücksichtigt. Periodisch wiederkehrende Belastungen und die Lastgeschichte können allerdings einen großen Einfluss auf die Lebensdauer und die maximal aufnehmbare Biegezugspannung haben. In den Regelwerken und Bemessungsnormen für Glas [5] wird zurzeit nur die statische Ermüdung pauschal mit einem Abminderungsfaktor berücksichtigt. Während das Ermüdungsverhalten von Kalk-Natron-Silikatglas bei statischer Belastung qualitativ und quantitativ bereits weitgehend erforscht wurde, ist das Ermüdungsverhalten von Kalk-Natron-Silikatglas bei zyklisch wiederkehrender Belastung bisher nur ansatzweise untersucht worden: Für thermisch entspanntes Kalk-Natron-Silikatglas sind der Literatur lediglich einzelne überschaubare Versuchsreihen [6–8] zu entnehmen, bei denen keine Einflussparameter verglichen wurden; für thermisch vorgespanntes Kalk-Natron-Silikatglas existieren überhaupt keine aussagekräftigen Untersuchungen, bei denen Schwingversuche auf verschiedenen Lastniveaus vorgenommen wurden.

Aus diesen Gründen ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, das Verhalten von thermisch entspanntem und thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas bei zyklischer Beanspruchung experimentell zu belegen, die wesentlichen Einflussparameter zu bewerten und zu quantifizieren sowie mögliche Ursachen für die Ermüdung zu finden. Es stellt sich die Frage, ob bei thermisch vorgespanntem Glas eine Ermüdung auftritt, wenn die Beanspruchung geringer als die Eigenspannung ist. Zudem ist zu überprüfen, ob sich die Eigenspannung durch die Schwingbeanspruchung verändert oder die Ermüdung nur auf das subkritische Risswachstum der Oberflächendefekte zurückzuführen ist. Aus diesen

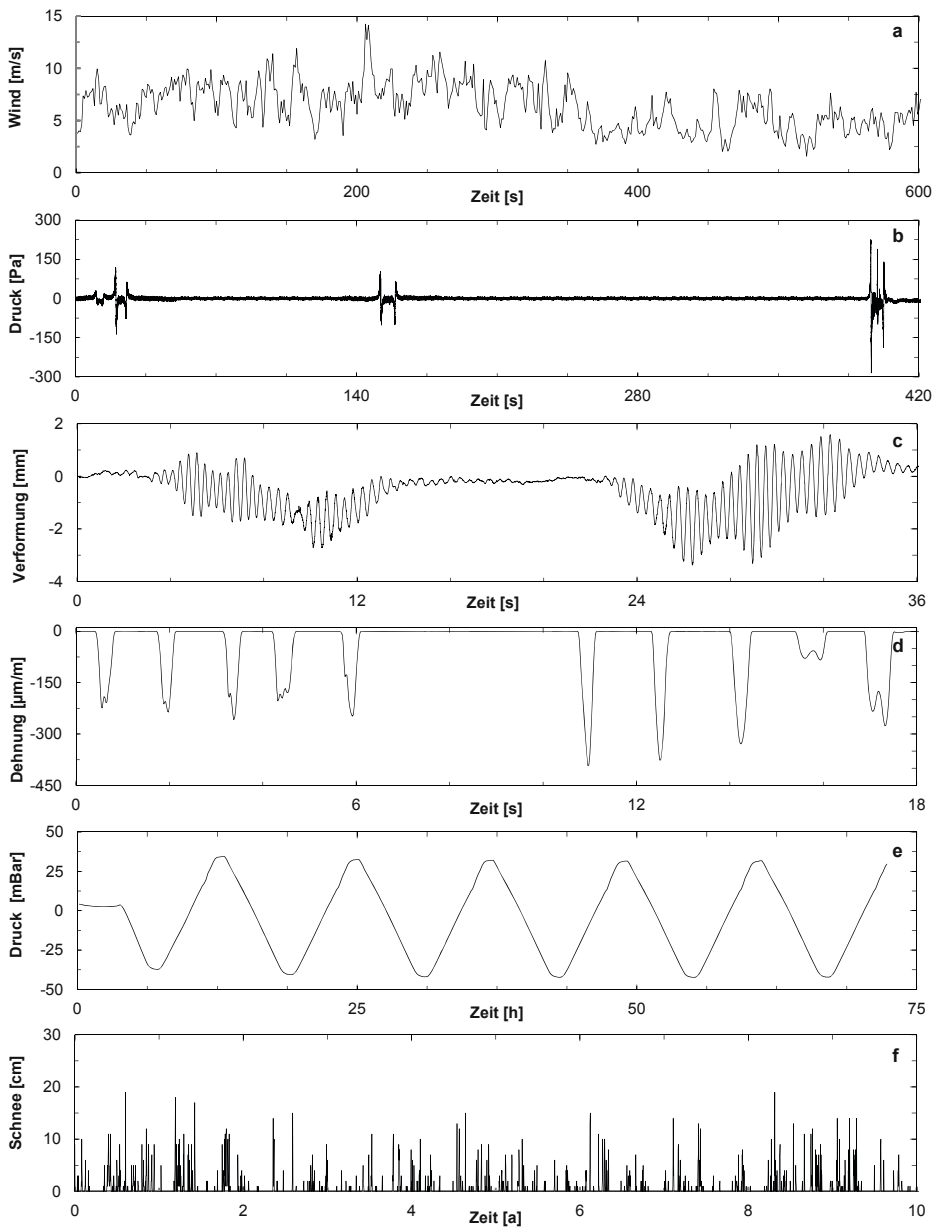


Abbildung 1.2 Beispielhafte Beanspruchungs-Zeit-Funktionen aus Messungen: (a) Windgeschwindigkeit an einem Hochhaus; (b) Luftdruck an Schallschutzelementen aus Glas an einer Eisenbahnstrecke; (c) Schwingungen bei Personenverkehr auf einer Glasbücke; (d) Dehnungen einer Treppe aus Glas; (e) Druckdifferenz in einer Isolierglasscheibe (Prüfung); (f) Schneehöhe auf einer Überkopfverglasung

Gründen wurden, im Rahmen eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhabens [9], umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit den im Bauwesen gängigen Glasarten Floatglas, teilvorgespanntem Glas (TVG) und Einscheibensicherheitsglas (ESG) durchgeführt. Sie wurden in Dauerschwingversuchen unter anderem verschiedenen Frequenzen, Beanspruchungstypen, -funktionen und Umgebungsbedingungen ausgesetzt.

Die Ergebnisse werden mit den gängigen theoretischen Modellen zum Risswachstumsverhalten von Glas aus der Bruchmechanik und der Materialwissenschaft verglichen. Insbesondere hierdurch soll festgestellt werden, ob thermisch entspanntes und thermisch vorgespanntes Kalk-Natron-Silikatglas zyklische Ermüdungseffekte aufweist oder sich die zyklische Ermüdung direkt aus einer Schadensakkumulation des Risswachstums unter statischer Belastung ergibt.

In weiteren Versuchsreihen wird Fragestellungen nachgegangen, die für die Bemessung in der Praxis von mindestens gleichrangigem Interesse sind: Ob Kalk-Natron-Silikatglas bei schwingender Beanspruchung eine Schwelle besitzt, unterhalb derer keine Ermüdung auftritt und ob in Zeitspannen, in denen die Bauteile aus Glas im Betrieb nicht belastet sind, Rissheilungseffekte auftreten, die einen positiven Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit haben bzw. die Ermüdung des Werkstoffs sogar verhindern.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in mehrere Kapitel, die im Folgenden kurz vorgestellt werden:

Kapitel 2 beschreibt die theoretischen Hintergründe, den Stand der Wissenschaft und Technik sowie die wesentlichen Grundbegriffe und Modelle, die im weiteren Verlauf der Arbeit benötigt werden. Es erfolgt eine kurze Darstellung der wichtigsten Begriffe und Zusammenhänge der Ermüdungsfestigkeit sowie der damit eng verknüpften Bruchmechanik. Es wird ein Überblick über den Werkstoff Glas und die im Bauwesen eingesetzten Gläser gegeben. Die Festigkeit und die Ermüdung des Werkstoffes werden im Detail erläutert und Gleichungen vorgestellt, mit denen die Lebensdauer bei zyklischer Belastung prognostiziert werden kann. Sie dienen im weiteren Verlauf der Arbeit zum Vergleich mit den experimentell ermittelten Ergebnissen. Zudem werden die zur Auswertung und Anpassung der Versuchsergebnisse verwendeten statistischen Methoden vorgestellt.

Um die Streuung bei den zyklischen Versuchen zu verringern und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurde ein Großteil der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche mit definiert vorgeschädigten Probekörpern durchgeführt. Da dies keine Standardmethode bei der Prüfung von Gläsern im Bauwesen ist, werden in *Kapitel 3* zu-

nächst experimentelle Untersuchungen vorgestellt, anhand derer eine Methode zur Vorschädigung ausgewählt und im Detail definiert wird.

In *Kapitel 4* werden die mechanischen Eigenschaften und die zur Prognose der Lebensdauer bei statischer und quasi-statischer Beanspruchung benötigten Risswachstumsparameter aller in den darauffolgenden Versuchen verwendeten Probekörper bestimmt. Zur besseren Übersicht wird die Beschreibung in einem gesonderten Kapitel vorgenommen.

In *Kapitel 5* und *Kapitel 6* werden die Hauptversuchsreihen dieser Arbeit beschrieben und ausgewertet. Mit diesen Versuchen wird das zyklische Ermüdungsverhalten von thermisch entspanntem (Floatglas) und thermisch vorgespanntem Kalk-Natron-Silikatglas (ESG, TVG) grundlegend untersucht. Es werden Ermüdungsfestigkeitskurven für verschiedene Belastungstypen und -funktionen ermittelt und verschiedene Einflüsse auf die zyklische Ermüdung untersucht. Zudem wird überprüft, ob sich die Materialeigenschaften (Elastizitätsmodul und Eigenspannung) bei schwingender Beanspruchung verändern. In *Kapitel 6* werden Parameter untersucht, die mit dem in *Kapitel 5* verwendeten Aufbau nicht realisierbar sind.

Die Ergebnisse dieser Versuche werden in *Kapitel 7* dann an theoretische Modelle zur Lebensdauerprognose angepasst und mit diesen verglichen. Hierzu werden zum einen die in den Grundlagen hergeleiteten analytischen Gleichungen und zum anderen ein an dieser Stelle vorgestelltes numerisches Modell zur Risswachstumssimulation verwendet.

Basierend auf diesen Ergebnissen werden weitere Fragestellungen aufgeworfen, die anhand zusätzlicher Dauerschwingversuche untersucht werden: In *Kapitel 8* wird überprüft, ob Kalk-Natron-Silikatglas bei schwingender Beanspruchung eine Ermüdungsschwelle besitzt, unterhalb der keine Brüche zu erwarten sind und *Kapitel 9* widmet sich der Frage, ob Rissheilungseffekte zwischen den einzelnen Zyklen periodischer Beanspruchungen zu erwarten sind.

In *Kapitel 10* wird basierend auf den experimentell ermittelten Ergebnissen ein Vorschlag für ein Bemessungskonzept vorgestellt.

Abgeschlossen wird die vorliegende Arbeit durch *Kapitel 11*, in welchem die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und abschließend bewertet sowie die Anwendungsperspektiven im Bauwesen beschrieben werden und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben wird.

1.3 Begriffsbestimmung

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Begriffe verwendet, die aus dem Sprachgebrauch unterschiedlicher Fachdisziplinen stammen: dem konstruktiven Glasbau im Bauingenieurwesen, der Materialwissenschaft, die sich mit Keramiken und Gläsern befasst, der Werkstoffmechanik, die sich unter anderem mit der Ermüdungsfestigkeit metallischer Werkstoffe beschäftigt, und der Bruchmechanik.

Hierbei kommt es zu Überschneidungen und es werden Begrifflichkeiten gebraucht, die nur in einer Fachrichtung gebräuchlich sind. Sie werden im Grundlagenteil dieser Arbeit beschrieben. Als Beispiel sind die Begriffe der statischen, dynamischen und zyklischen Ermüdung zu nennen, die in der Materialwissenschaft hauptsächlich im Zusammenhang mit Gläsern und Keramiken verwendet werden, und im Bauingenieurwesen üblicherweise nicht gebraucht werden.

- Die *statische Ermüdung* beschreibt die Festigkeitsabnahme bei konstanter Belastung.
- Die *dynamische Ermüdung* beschreibt die Abhängigkeit der Festigkeit von der Rate, mit der die Beanspruchung gesteigert wird – unabhängig davon, ob es sich um hohe Beanspruchungsraten oder um niedrige, also um quasi-statische Beanspruchungsraten, handelt.
- Das Versagensverhalten bei zyklischer, das heißt periodisch wiederkehrender oder schwingender Beanspruchung, wird als *zyklische Ermüdung* bezeichnet.
- Die Biegezugfestigkeit von Gläsern im Bauwesen wird üblicherweise in Biegeversuchen, bei denen die Belastung mit einer Spannungsrate von 2 MPa/s konstant gesteigert wird, ermittelt. Festigkeitswerte der untersuchten Gläser, die auf diese Weise ermittelt wurden, werden in der Arbeit vereinfacht als *quasi-statische Biegezugfestigkeit* oder kurz als *Biegezugfestigkeit* des Glases bezeichnet.

Einige Begriffe werden in der Arbeit zudem etwas abweichend vom üblichen Gebrauch verwendet, um ein Verständnis für die untersuchten Phänomene in allen Disziplinen – insbesondere aber im konstruktiven Glasbau – zu schaffen:

- Die in der Arbeit durchgeführten Schwingversuche sind vom Prinzip Wöhler-Versuche. Auf den Begriff der *Wöhler-Linie* wird im Zusammenhang mit Glas in dieser Arbeit jedoch verzichtet, da sich zeigen wird, dass Glas ein zeit- und nicht schwingspielabhängiges Ermüdungsverhalten aufweist. Die Wöhler-Linien werden jedoch per Definition gegenüber der ertragbaren Schwingspielzahl aufgetragen (siehe Abschnitt 2.1.2). Die Mittellinie, die bei der Auftragung der Festigkeit bzw. der aufgetragenen zyklischen Oberspannung gegenüber der

gemessenen Lebensdauer entsteht, wird im Folgenden Ermüdungslinie, -kurve oder Ermüdungsfestigkeitslinie, -kurve genannt.

- Auf die Begriffe *Zeitfestigkeit* und *Dauerfestigkeit*, die die Wöhler-Linie in Bereiche einteilen, wird in der Arbeit dennoch zurückgegriffen, da sich die Ermüdungslinien von Glas bei Auftragung gegenüber der Zeit in ähnliche Bereiche einteilen lassen. Im Zusammenhang mit Glas wird der Begriff *Zeitfestigkeit* in dieser Arbeit für eine Abnahme der Festigkeit mit der Zeit verwendet. Der Begriff *Dauerfestigkeit* und auch *Dauerschwingfestigkeit* soll den Festigkeitswert beschreiben, unterhalb dessen keine Ermüdung auftritt bzw. den Bereich in dem die Festigkeitsabnahme weniger ausgeprägt ist als im *Zeitfestigkeitsbereich*.

Es ist anzumerken, dass die Begriffe *Zeitfestigkeit* und *Dauerfestigkeit* suggerieren, dass es sich um eine Abnahme der Festigkeit mit der Zeit bzw. Beanspruchungsdauer handelt. Dennoch werden sie üblicherweise im Kontext der ertragbaren Schwingspielzahl verwendet. Treffender sind die im Englischen verwendeten Begriffe *low cycle* und *high cycle fatigue*.

- Verschiedene Bedeutungen gibt es vor allem auch bei den Formelzeichen. Um Verwechslungen auszuschließen, wurde bei ähnlicher oder gleicher Schreibweise anstelle der im deutschen Sprachraum gebräuchlichen Formelzeichen auf die Englischen oder eine andere Schreibweise (Groß-/Kleinschreibung) zurückgegriffen. Als Beispiel ist der Risswachstumsparameter n zu nennen, der üblicherweise groß geschrieben wird. Da diese Schreibweise in der Ermüdungsfestigkeit jedoch die Schwingspielzahl N angibt, wird für den Risswachstumsparameter die weniger gebräuchliche Form der Kleinschreibung verwendet.

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).

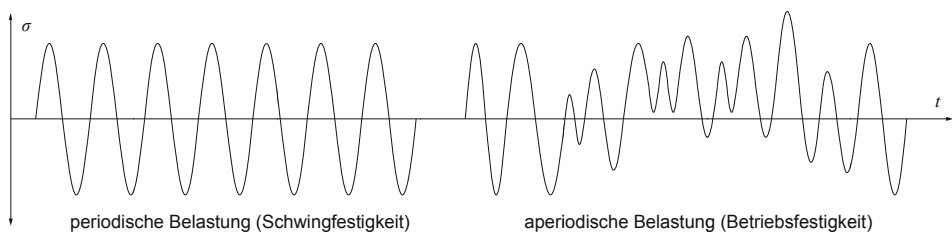


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung einer periodischen und einer zufallsartigen, aperiodischen Belastung

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:

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

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

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

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

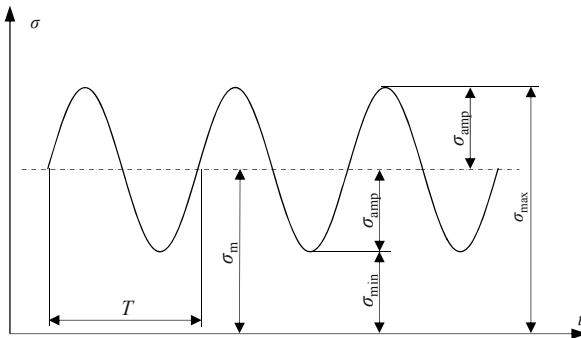


Abbildung 2.2 Kennwerte der Dauerschwingbelastung

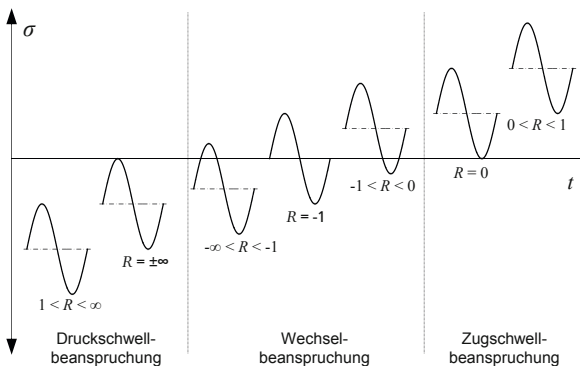


Abbildung 2.3 Belastungsarten bei Dauerschwingversuchen

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.

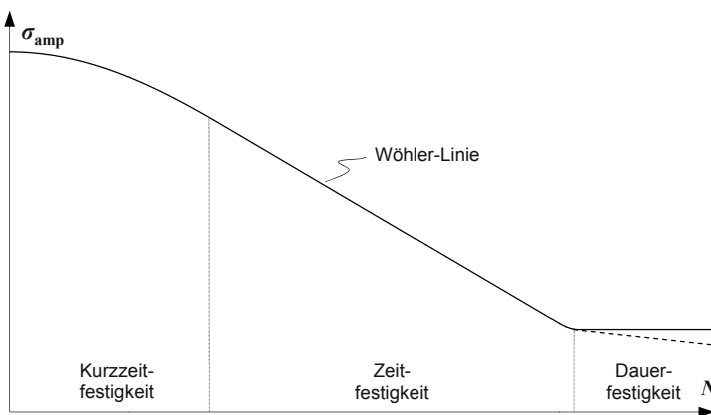


Abbildung 2.4 Schematische Darstellung der Wöhler-Linie; Abgrenzung der Bereiche Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit

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.

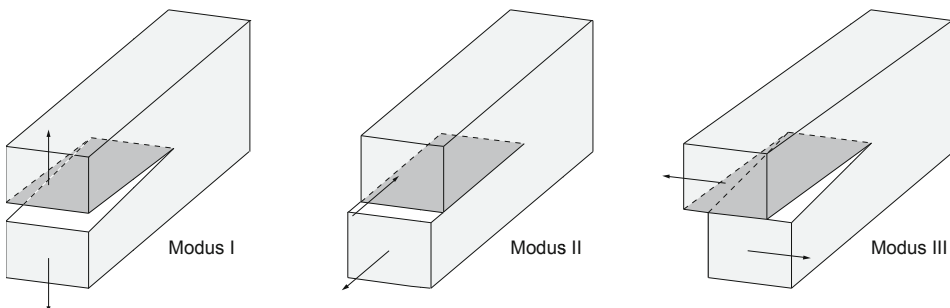


Abbildung 2.5 Darstellung der Rissöffnung unter Modus I-, Modus II- und Modus III-Belastung