

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 cicatrisation 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