

Dehnratenabhängigkeit mechanischer Werkstoffkennwerte von Kalk-Natronsilicatglas

Dissertation

von
Christian König

1. Auflage

Dehnratenabhängigkeit mechanischer Werkstoffkennwerte von Kalk-Natronsilicatglas – König

schnell und portofrei erhältlich bei beck-shop.de DIE FACHBUCHHANDLUNG

tredition 2012

Verlag C.H. Beck im Internet:
www.beck.de
ISBN 978 3 8472 3523 1

Dehnratenabhängigkeit mechanischer Werkstoffkennwerte von Kalk-Natronsilikatglas

Von der

Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina

zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines

Doktoranden (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Christian König

geboren am 6. November 1976

aus Hildesheim

Eingereicht am

3. Januar 2011

Disputation am

30. November 2011

Berichterstatter

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Prof. Dr.-Ing. Udo Peil

2012

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades
eines Doktoranden (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Eingereicht am	3. Januar 2011
<i>Disputation am</i>	<i>30. November 2011</i>
Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

© 2012 Christian König

Verlag tradition GmbH, Mittelweg 177, 20148 Hamburg

Printed in Germany

ISBN: 978-3-8472-3523-1



an-zah

sumerisch

Glas



chesbed-wedhu

ägyptisch

blauer Glasfluss



hyalos

griechisch

Kristall, Glas



vitrum

lateinisch

Kristall, Glas



glasa

germanisch

das Glänzende, Bernstein
(vgl. latein. *glaesum*)

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Danken möchte ich zuerst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer, der diese Arbeit angeregt, begleitet und vorangebracht hat.

Danken möchte ich ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Peil, der neben der Leitung des Instituts für Stahlbau seit April 2009 die kommissarische Leitung des Instituts für Bauwerkserhaltung und Tragwerk ausübt und den Fortgang der Arbeiten am Institut sichert. Insbesondere danke ich Herrn Prof. Peil für die Übernahme des Korreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme der Aufgaben des Prüfers im Promotionsverfahren und das Interesse an meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Empelmann danke ich für die freundliche Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein besonderer Dank gilt der Salzgitter AG, die durch ihr Engagement im Rahmen einer Stiftungsprofessur die Arbeit am Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk ermöglicht.

Den vielen Mitarbeitern, die zusammen mit mir am ibt tätig waren, danke ich für das freundliche und angenehme Arbeitsumfeld und die vielen Diskussionen und Anregungen. Darüber hinaus waren zahlreiche studentische Hilfskräfte in Tätigkeiten zu dieser Arbeit eingebunden, denen ich ebenfalls herzlich danken möchte.

Den Mitarbeitern des Labors des Instituts für Stahlbau unter Leitung von Herrn Olaf Einsiedler sowie der Werkstatt unter Leitung von Herrn Stephan Ameling bin ich für die zahlreichen Gespräche und Anregungen zum in dieser Arbeit verwendeten Versuchsaufbau samt Messtechnik sowie die schnelle und unkomplizierte Lösung von Problemen dankbar.

Herrn Georg Thomas vom Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig danke ich für die Möglichkeit zur Nutzung der Hochgeschwindigkeitskamera. Meinem Ansprechpartner bei der Firma Rofin-Sinar, Herrn Michael Haase danke ich für sein Engagement zur Durchführung des Glaslaserschnitts mit dem MLBA-Verfahren. Der Firma DELO Industrie Klebstoffe, vertreten durch Herrn Heiko Gellert danke ich für die kostenlose Bereitstellung von Klebstoffen für die Probenfertigung. Von der Firma August Behrens GmbH & Co. KG, Braunschweig wurden freundlicherweise kostenlose Glasprobekörper für die Vorversuche zur Verfügung gestellt.

Nicht zuletzt möchte ich ganz besonders meiner Frau Marion und meinen Söhnen Anton und Emil für die Motivation und Unterstützung während all der Zeit danken. Ihr drei seid das Wichtigste für mich.

Meinen Eltern Editha und Wilfried König in tiefer Dankbarkeit für die Unterstützung über all die Jahre gewidmet: Endlich haben wir auch einen Doktor in der Familie!

Abstract

Strain-Rate Dependency of Material Properties of Soda Lime Silica Glass

In this work investigations of the dependency of the material properties modulus of elasticity and tensile strength on the strain-rate occurring when loading structures made of soda lime silica glass are performed. Therefore, a test setup for conducting uniaxial tension tests on specimens in a high-speed testing machine is designed. Especially for developing the specimens' shape and their coupling to the testing machine the brittle material behavior of glass needs to be considered. Progression of force and strain during the experiments is recorded by means of a measurement setup with high sampling rates.

Using this test setup comprehensive test series on plain float glass as well as on single pane safety glass with different testing velocities and subsequent different strain-rates in the material are conducted. The investigated strain-rate region extends over an area from quasi-static loading with $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}$ s⁻¹ up to impact-testing with strain-rates of $\dot{\varepsilon} = 1$ s⁻¹. The maximum strain rate is limited by the test setup and corresponding data acquisition which is not able to deliver analyzable data for higher testing velocities.

From the measured progression of force and strain during the tests the mechanical material properties for each specimen are determined. The expectation values and standard deviations for each group of specimens tested with the same strain-rate are calculated by statistical evaluation. For the modulus of elasticity as well as the tensile strength of the investigated soda lime silica glass an increase with higher strain-rates can be observed.

Based on these results material models with rheological and inductive approaches are developed to describe the observed strain-rate dependent stress-strain-behavior of the investigated glass. The free parameters of the models are determined using numerical optimization. The applicability of the different models for describing the real material behavior is evaluated and compared.

Finally, a strain-rate dependent material model is implemented into a commercial finite element method program to represent the high-speed tensile testing of glass specimens and the strain-rate dependent material behavior of the investigated soda lime silica glass within a numerical simulation.

Kurzbeschreibung

Dehnratenabhängigkeit mechanischer Werkstoffkennwerte von Kalk-Natronsilicatglas

In der vorliegenden Arbeit wird die Abhängigkeit der Werkstoffkennwerte Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von der während der Beanspruchung von Bauteilen aus Kalk-Natronsilicatglas auftretenden Dehnrate untersucht. Hierzu wird ein Versuchsaufbau zur Durchführung von einaxialen Zugversuchen an Probekörpern in einer Hochgeschwindigkeits-Prüfmaschine konzipiert, für den insbesondere das spröde Werkstoffverhalten bei der Planung der Probengeometrie und der Probenankopplung an die Prüfmaschine berücksichtigt wird. Mit zeitlich hochauflösender Messtechnik werden Kraft- und Dehnungsverlauf während der Versuche aufgezeichnet.

Mit dem Versuchsaufbau werden umfangreiche Versuchsreihen an Glasprobekörpern aus gewöhnlichem Floatglas und thermisch vorgespanntem Floatglas (ESG) mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und daraus in der Probe resultierenden Dehnraten durchgeführt. Der Dehnratenbereich erstreckt sich dabei von quasistatischen Beanspruchungen mit $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ bis zu Beanspruchungen im Bereich von Impaktversuchen mit $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$. Die obere Dehnratengrenze ergibt sich hierbei durch den Versuchsaufbau, der bei schnelleren Prüfungen keine zuverlässige auswertbaren Messschritte mehr liefert.

Aus den aufgezeichneten Kraft- und Dehnungsverläufen werden zunächst für jeden Probekörper die mechanischen Werkstoffkennwerte bestimmt, in einer statistischen Auswertung werden dann die jeweiligen Erwartungswerte und Standardabweichungen für jede untersuchte Dehnrate ermittelt. Sowohl für die Zugfestigkeit als auch für den Elastizitätsmodul des untersuchten Kalk-Natronsilicatglases kann ein eindeutiger Trend zur Zunahme mit ansteigender Dehnrate festgestellt werden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden unter Verwendung rheologischer und induktiver Ansätze Werkstoffmodelle entwickelt, die in der Lage sind, das dehnratenabhängige Spannungs-Dehnungs-Verhalten des untersuchten Glases zu beschreiben. Die freien Parameter der Werkstoffmodelle werden hierzu in einem numerischen Optimierungsprozess bestimmt. Die Eignung der verschiedenen Modellansätze zur Beschreibung des realen Werkstoffverhaltens wird vergleichend bewertet.

Abschließend wird ein dehnratenabhängiges Werkstoffmodell in ein kommerzielles FEM-Programm implementiert, um die Hochgeschwindigkeitszugversuche und das hierbei beobachtete dehnratenabhängige Werkstoffverhalten des untersuchten Kalk-Natronsilicatglases in der numerischen Simulation abbilden zu können.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungen und Formelzeichen	VI
1 Einleitung	1
2 Der Werkstoff Glas	3
2.1 Geschichte der Glasherstellung	3
2.2 Glaszustand und chemische Zusammensetzung	7
2.3 Eigenschaften und Zusammensetzung heutiger silicatischer Gläser	12
3 Mechanische Kennwerte der Glaswerkstoffe im Bauwesen	15
3.1 Geregelte Werkstoffkennwerte	15
3.1.1 In Richtlinien geregelte Werte	15
3.1.2 Normativ geregelte Werte	15
3.2 Stand des Wissens zu dehnratenabhängigem Werkstoffverhalten von Glas	18
4 Dehnratenabhängiges Werkstoffverhalten	21
4.1 Dehnratenabhängiges Werkstoffverhalten verschiedener Baustoffe	21
4.1.1 Metallische Werkstoffe	21
4.1.2 Beton	24
4.1.3 Kunststoffe	25
4.2 Erklärungsansätze für dehnratenabhängiges Werkstoffverhalten	27
4.3 Werkstoffmodelle zur Beschreibung dehnratenabhängigen Verhaltens	29
5 Experimentelle Untersuchungen	33
5.1 Auswahl und Herstellung der Probekörper	33
5.1.1 Art des Versuchs und Probekörperdefinition	33
5.1.2 Optimierung der Probekörpergeometrie	33
5.1.3 Glasschneideverfahren	36
5.1.4 Probekörperankopplung an die Prüfmaschine	39
5.1.5 Oberflächenbeschaffenheit	42
5.1.6 Glasdicke	46
5.1.7 Thermische Vorspannung	46
5.2 Versuchseinrichtung	50
5.2.1 Hochgeschwindigkeits-Prüfmaschine	50
5.2.2 Probekörperaufnahme	52

5.3 Messtechnische Datenerfassung	54
5.3.1 Dehnungsmessung	54
5.3.2 Kraftmessung.....	55
5.3.3 Messdatenerfassung.....	57
5.3.4 Hochgeschwindigkeitskamera.....	58
6 Auswertung der Versuche	61
6.1 Vorüberlegungen.....	61
6.1.1 Definition der Dehnrate	61
6.1.2 Wahl des untersuchten Dehnratengrenzbereichs.....	62
6.1.3 Statistische Datenauswertung.....	64
6.1.4 Messdatenverarbeitung.....	66
6.2 Zusammenstellung der durchgeführten Versuche	70
6.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	72
6.3.1 Auswertung der Vorversuchsserie A.....	72
6.3.2 Auswertung der Vorversuchsserie B	74
6.3.3 Auswertung der Hauptversuchsserie C	77
6.3.4 Auswertung der Hauptversuchsserie D	83
7 Entwicklung eines dehnratenabhängigen Werkstoffmodells	87
7.1 Viskoelastisches Werkstoffverhalten	87
7.2 Dehnratenabhängiges Werkstoffmodell für Kalk-Natronsilicatglas.....	98
7.3 Optimierungsprozess zur Bestimmung der Modellparameter	102
8 Numerische Simulation des Zugversuchs	109
8.1 Aufbau des FE-Modells.....	109
8.2 Implementierung des Werkstoffmodells.....	111
8.3 Bewertung der Ergebnisse	114
9 Zusammenfassung und Ausblick	115
9.1 Zusammenfassung der Untersuchungen	115
9.2 Auswertung der Ergebnisse	117
9.3 Ansatzpunkte für zukünftige Arbeiten	118
Literaturverzeichnis	121
Anhang	129
Anhang 1 Probengeometrie.....	129
Anhang 2 Übersicht Probekörper	130
Anhang 3 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Zugversuchs	139
Anhang 4 Vergleich gemessene und modellierte Spannungs-Dehnungs-Verläufe....	148
Anhang 5 Vergleich gemessene und simulierte Spannungs-Dehnungs-Verläufe.....	152

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Obsidian als natürlich vorkommendes Glas (Bildnachweis: Reiner Flassig).....	3
Abb. 2.2:	Schematische Darstellung der Flachglasfertigung mit dem Fourcault-Verfahren..	5
Abb. 2.3:	Schematische Darstellung des Floatverfahrens	6
Abb. 2.4:	Vergleich der Temperaturabhängigkeit des Volumens von Glas und Kristall	8
Abb. 2.5:	SiO ₄ -Tetraeder als Struktureinheit von Silicaten.....	9
Abb. 2.6:	Zweidimensionale Darstellung der Netzwerkstruktur eines Quarzkristalls	10
Abb. 2.7:	Zweidimensionale Darstellung des unsymmetrischen Netzwerks des Quarz-glasses.....	10
Abb. 2.8:	Zweidimensionale Darstellung des technischen Glases mit Netzwerkandler	11
Abb. 5.1:	Spannungsplot der numerisch optimierten Probengeometrie unter Längszug....	35
Abb. 5.2:	a) Konventionell mechanisch b) mit Wasserstrahl und c) mit dem MLBA-Verfahren erzeugte Glasschnittkante	38
Abb. 5.3:	Spannungsverlauf beim MLBA-Verfahren	39
Abb. 5.4:	Laschenklebung der Glasprobekörper	40
Abb. 5.5:	Versuchsanordnung zum Einfluss der Flusssäureätzung	43
Abb. 5.6:	Erhöhung der Oberflächenfestigkeit von Glas durch Flusssäureätzungen	45
Abb. 5.7:	Eigenspannungsverteilung bei thermisch vorgespanntem Glas	47
Abb. 5.8:	Hochgeschwindigkeits-Prüfmaschine Instron VHS 65/25.....	50
Abb. 5.9:	Probekörperaufnahme mit Slack-Adaptor, unterer Einspannung und Scher-bolzen.....	53
Abb. 5.10:	Nummerierung der DMS zur Messung des Dehnungsverlaufs.....	55
Abb. 5.11:	Anordnung der kalibrierten DMS zur Kraftmessung auf der Einspannung.....	57
Abb. 6.1:	Verlauf von Dehnung und Dehnrate im simulierten Pendelschlagversuch.....	63
Abb. 6.2:	Einteilung der Dehnratenbereiche unterschiedlicher Prüfverfahren.....	64
Abb. 6.3:	Position der fünf DMS zur Ermittlung von Versatzzeiten der Messwerte	70
Abb. 6.4:	Statistische Auswertung der Zugfestigkeit f_t für die Vorversuchsserie A	72
Abb. 6.5:	Statistische Auswertung der Bruchdehnung ε_u für die Vorversuchsserie A.....	73
Abb. 6.6:	Statistische Auswertung der Zugfestigkeit f_t für Vorversuchsserie B.....	75
Abb. 6.7:	Statistische Auswertung der Bruchdehnung ε_u für Vorversuchsserie B	75
Abb. 6.8:	Zeitversätze der Messdaten bei über die Probenlänge verteilten DMS	78
Abb. 6.9:	Dehnratenabhängigkeit der Zugfestigkeit f_t für Hauptversuchsserie C.....	81
Abb. 6.10:	Dehnratenabhängigkeit des Elastizitätsmoduls E für die Hauptversuchsserie C	82
Abb. 6.11:	Dehnratenabhängigkeit der Zugfestigkeit f_t für Hauptversuchsserie D	85
Abb. 6.12:	Dehnratenabhängigkeit des Elastizitätsmoduls E für Hauptversuchsserie D	85

Abb. 7.1:	Modell der Hookeschen Feder und der Newtonschen Flüssigkeit	91
Abb. 7.2:	Kelvin-Voigt Modell (links) und Maxwell Modell (rechts)	92
Abb. 7.3:	Darstellung der Phänomene Kriechen (links) und Relaxation (rechts).....	93
Abb. 7.4:	Verallgemeinertes Kelvin-Voigt Modell durch Reihenschaltung	94
Abb. 7.5:	Verallgemeinertes Maxwell-Modell durch Parallelschaltung	94
Abb. 7.6:	Werkstoffmodell Variante 1	98
Abb. 7.7:	Werkstoffmodell Variante 2	99
Abb. 7.8:	Modellierung des dehnratenabhängigen Elastizitätsmoduls.....	107
Abb. 8.1:	FEM-Modell des Zugprobekörpers.....	110
Abb. 8.2:	Modellierung der dehnratenabhängigen Zugfestigkeit.....	112
Abb. 8.3:	Ablaufdiagramm der Simulation mit FEM-Modell	113
Abb. A.1:	Optimierte (links) und gefertigte (rechts) Probengeometrie	129
Abb. A.2:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers C02	140
Abb. A.3:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers C25	141
Abb. A.4:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers C43	142
Abb. A.5:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers C49	143
Abb. A.6:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers C55	144
Abb. A.7:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers C56	145
Abb. A.8:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers C61	146
Abb. A.9:	Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Probekörpers D12	147
Abb. A.10:	Vergleich Messwerte und Werkstoffmodell Variante 1	148
Abb. A.11:	Vergleich Messwerte und Werkstoffmodell Variante 2	149
Abb. A.12:	Vergleich Messwerte und Werkstoffmodell Variante 3.....	150
Abb. A.13:	Vergleich Messwerte und Werkstoffmodell Variante 4.....	151
Abb. A.14:	Vergleich Messwerte und Simulationsmodell (FEM)	152

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Zusammensetzung des untersuchten Kalk-Natronsilikatglasses	13
Tab. 3.1:	Einteilung der Lasteinwirkungsdauern	16
Tab. 3.2:	Übersicht der mechanischen Glaskennwerte.....	17
Tab. 5.1:	Eigenschaften verwendeter Klebstoffsysteme.....	41
Tab. 5.2:	Übersicht der flusssäuregeätzten Glasbiegeproben.....	44
Tab. 5.3:	Oberflächendruckspannungen thermisch vorgespannter Glasprobekörper	49
Tab. 6.1:	Dehnrate der Vorversuche in Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit.....	62
Tab. 6.2:	Übersicht der Versuchsserien mit Glaszugprobekörpern aus Floatglas	71
Tab. 6.3:	Streuung der Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit der Oberflächengüte	74
Tab. 6.4:	Streuung der Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit der Glasdicke	76
Tab. 6.5:	Zeitversätze der Messwerte für verschiedene Prüfgeschwindigkeiten	79
Tab. 6.6:	Prüfgeschwindigkeiten und tatsächlich auftretende Dehnrraten der Serie C	80
Tab. 6.7:	Statistische Auswertung der Werkstoffkennwerte der Hauptversuchsserie C	83
Tab. 6.8:	Prüfgeschwindigkeiten und tatsächlich auftretende Dehnrraten Serie D	84
Tab. 6.9:	Statistische Auswertung der Werkstoffkennwerte der Hauptversuchsserie D	86
Tab. 7.1:	Viskosität verschiedener Stoffe.....	90
Tab. 7.2:	Kriech- und Relaxationsfunktionen verschiedener rheologischer Modelle	97
Tab. 7.3:	Optimierte Parameter der Werkstoffmodelle Varianten 1 bis 4	106
Tab. A.1:	Übersicht Werkstoffkennwerte Probenserie A	131
Tab. A.2:	Übersicht Werkstoffkennwerte Probenserie B	133
Tab. A.3:	Übersicht Werkstoffkennwerte Probenserie C	135
Tab. A.4:	Übersicht Werkstoffkennwerte Probenserie D	138
Tab. A.5:	Übersicht Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.....	139

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

CNC	Computerized Numerical Control (computerisierte numerische Steuerung)
DMS	Dehnungsmessstreifen
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIF	Dynamic Increase Factor (Dynamischer Erhöhungsfaktor)
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FEM	Finite Elemente Methode
GASP	Grazing Angle Surface Polarimeter
KPO	Kurzzeichen für polierte (Glas-)kante
MLBA	Multiple Laser Beam Absorption
PVB	Polyvinylbutyral
SEP	Stahl-Eisen-Prüfblatt
SH(P)B	Split-Hopkinson (Pressure) Bar
SPG	Spiegel- oder Floatglas
TRAV	Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen
TRLV	Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen
TRPV	Technische Regeln für die Bemessung und die Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen
TVG	Teilvorgespanntes Glas
UHPC	Ultra High Performance Concrete (Ultrahochfester Beton)
UV	Ultraviolet
VarK	Variationskoeffizient
VG	Verbundglas
VHS	Very High Speed (Hochgeschwindigkeits-)
VSG	Verbundsicherheitsglas