Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Gründer:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Gerhard Sedlacek

Heft 75

Katharina Paulina Langosch

Das Tragverhalten von Glasstützen mit Mono- und Verbundquerschnitten

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Shaker Verlag
Aachen 2013

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2013
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9926-2
ISSN 0722-1037

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Der konstruktive Glasbau erlebt derzeit eine lebhafte Entwicklung, die den sich kontinuierlich weiter entwickelnden Produkten, den steigenden architektonischen Ansprüchen und den Erkenntnis- und Erfahrungsgewinnen aus Forschung und Praxis zu verdanken ist. Dies verändert auch die Normensituation. So wird die Überführung und Verbesserung der Inhalte der „Technischen Regeln“ in die DIN 18008 dem Glasbau weitere Impulse geben.

Jedoch bleibt in den Normen die Ausbildung primärer tragender Bauteile aus Glas wie z. B. Stützenkonstruktionen noch so gut wie außen vor, zwar hat man eine geplante normative Behandlung durch Reservierung entsprechender Normenteile zum Ausdruck gebracht, jedoch fehlt eine entsprechende Grundlage für Bemessungsansätze.

Denn bei Entwurf und Bemessung von Glasbauteilen, insbesondere bei primär tragenden Glasbauteilen, ist es außerordentlich geboten, besonders sorgfältig zu entwerfen und zu konstruieren, Glas mit dauerhaften duktilen Materialien zu kombinieren, gleichzeitig den Kontakt mit harten Materialien zu vermeiden und mit Hintergrundsicherheiten auf Querschnitts-, Bauteil- oder Bauwerksebene robuste Konstruktionen zu schaffen.

Dies gilt auch für tragende Glasstützen, für deren theoretische Bemessung sich Frau Langosch das Ziel gesetzt hat, möglichst allgemeine und realistische Bemessungsfunktionen für die axiale und biegeaxiale Belastbarkeit für Mono- und VSG-Querschnitte abzuleiten, dabei das zeitabhängige Verhalten der Verbundfolien nicht aus dem Auge zu verlieren und so auch die Kombinationseffekte von Kurz- und Langzeitverhalten beim nichtlinearen Tragverhalten von scheibenartigen VSG-Glasstützen zu verfolgen. Gleichzeitig werden u. a. Werte für Imperfektionsannahmen und Vorschläge für Detailausführungen gegeben.

Die Ergebnisse, die dankenswerterweise von der AiF, dem Deutschen Stahlbauverband und dem Deutschen Ausschuß für Stahlbau gefördert wurden, stellen somit wertvolle Grundlagen und Hintergründe für die weiteren Arbeiten an der DIN 18008 und im CEN TC250 WG 3 „Structural Glass“ dar.

Dank gebührt auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Siebert von der Universität der Bundeswehr, München, für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Raupach für den Vorsitz bei der Promotionsprüfung.

Aachen, Dezember 2012

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Kurzfassung

Stützen weisen eine tragende Funktion auf. Werden zusätzlich besondere Anforderungen wie z. B. Transparenz an den Baustoff gestellt, so kommen Bauteile aus Glas zur Anwendung. Bei primär tragenden Bauteilen werden überwiegend Verbundglasscheiben mit viskoelastischen Zwischenschichten (hier insbesondere PVB-Folie) verwendet. Diese gläsernen Stützen unter axialen Drucklasten und ggf. horizontalen Querbelastungen sind gegen Stabilitätsversagen unter Berücksichtigung der materialspezifischen Eigenschaften des Werkstoffs Glas und der Zwischenschicht zu bemessen, wobei an dieser Stelle nach wie vor normative Regeln fehlen.

Der Entwicklung eines geeigneten analytischen Bemessungsverfahrens für den Stabilitätsfall (Biege-) Knicken für thermisch vorgespannte Glasstützen mit monolithischen und laminierten Querschnitten widmet sich die vorliegende Arbeit.

Die Grundlage des Bemessungskonzeptes stellt das bereits im Stahlbau verwendete Nachweisverfahren mittels europäischen Knickspannungslinien in Abhängigkeit von bezogenen Schlankheiten.

Unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Glas (u. a. elastisches Tragverhalten, hohes Verhältnis der charakteristischen Druckfestigkeit zu charakteristischen Biegezugfestigkeit) werden für thermisch vorgespannte monolithische Glasstützen Nachweisverfahren für zentrische und exzentrische Drucklasten aufgestellt und durch experimentelle und numerische Untersuchungen verifiziert. Darüber hinaus werden Stabilitätsnachweise für zentrische Drucklast in Kombination mit Biegung für ausgewählte Lastfälle präsentiert. Die Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten vervollständigt die Nachweismethoden.

Die Bemessungsverfahren werden weiterhin auf Glasstützen mit Verbundquerschnitten erweitert. Hierfür wird die temperatur- und zeitabhängige Verbundtragwirkung durch die Verwendung eines beliebigen Schubmoduls für die Zwischenschicht in den Spannungsgleichungen nach der Theorie II. Ordnung und den analytisch abgeleiteten Knickkurven erfasst. Für kombinierte Belastungen mit unterschiedlicher Wirkungsdauer werden Bemessungsgleichungen vorgestellt, welche sowohl die Kombination aus axialen Langzeit- und Kurzzeitdrucklasten als auch die Kombination aus axialen Langzeitdruckbelastungen und kurzfristigen vertikalen Querbelastungen durch Ansatz unterschiedlicher Schubmoduli berücksichtigen.

Summary

Columns have a supporting function. If there are additional requirements such as transparency of building materials, components of glass are used. In load-bearing members mainly glasses with laminated cross sections and viscoelastic interlayer (especially PVB) are used. These glass columns under axial compressive loads and possible horizontal shear loads are dimensioned against stability failure taking into account material specific properties of the glass and the interlayer. Normative rules for this are still lacking.

This work is devoted developing of an appropriate analytical design method for the stability case buckling of monolithic and laminated glass columns.

The basis of the design concept has already been established in the structural steel design calculation using European buckling curves as a function of non-dimensional slenderness.

Considering the special features of glass (elastic structural behavior, high ratio of characteristic compressive strength to characteristic flexural strength) for thermally tempered monolithic glass columns structural design calculation are developed for concentric and eccentric compression loads and verified by experimental and numerical investigations. In addition, stability analysis for centric compressive loads in combination with bending are presented for selected load cases. The derivation of partial safety factors completes the design methods.

Moreover the design method is extended to glass columns with laminated cross sections. For this purpose the temperature- and time-dependent composite action is considered by use of any shear modulus of the interlayer in the second-order stress equation and the analytically derived buckling curves. For combined loads of different duration, design equations are available taking into account both the combination of axial long-term and axial short-term pressure loads as well as the combination of axial long-term compressive and short-term vertical shear loads by using different shear moduli.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Stand der Technik 3

1.2.1 Knickspannungslinien (KSL) in der Literatur 3

1.2.1.1 Knickspannungslinien nach Weiler 3

1.2.1.2 Knickspannungslinien nach Liess 4

1.2.1.3 Knickspannungslinien nach Luible 5

1.2.1.4 Knickspannungslinien nach Holberndt 6

1.2.1.5 Diskussion der Knickspannungslinien aus der Literatur 6

1.2.2 Experimentelle Knickuntersuchungen aus der Literatur 7

1.3 Anlass und Zielsetzung 8

1.4 Vorgehensweise 10

2 Analytische Ansätze zum Knickverhalten von VSG-Scheiben aus der Literatur 12

2.1.1 Ansatz nach Möhler 12

2.1.2 Lineare Sandwichtheorie nach Stamm/Witte 15

2.1.3 Erweiterte technische Biege- und Verdrehtheorie 16

3 Materialverhalten von Verbundsicherheitsglas 20

3.1 Materialverhalten von Glas 20

3.2 Materialverhalten von PVB-Folie 21

3.2.1 Chemischer Aufbau von PVB-Folie und die Auswirkungen 21

3.2.2 Materialverhalten amorpher Thermoplaste (PVB-Folie) 22

3.2.3 Mathematische Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens von PVB-Folie 27

3.2.4 Bestimmung der Parameter der Ansatzfunktionen von viskoelastischen Modellen anhand von Torsionsversuchen 33

3.2.5 Kontinuierliche Kriech- und Relaxationsspektren 38

3.3 Tragverhalten von Verbundglasscheiben 44

4 Biegeverhalten von VSG-Scheiben unter Querlasten 45

4.1 Herleitung der allgemeinen Schlupfdifferentialgleichung 45

4.2 Schlupfverlaufsfunktionen für ausgewählte Lastfälle 48

4.2.1 Vierpunkt-Biegeträger ohne Schlupfendbehinderung 50

4.2.2 Biegeträger mit halbsinusförmiger Streckenlast (Knickstab) ohne Schlupfendbehinderung 52

4.3 Effektive Querschnittswerte, Spannungs- und Durchbiegungsgleichungen für ausgewählte Lastfälle 53

4.3.1 Vierpunkt-Biegeträger ohne Schlupfendbehinderung 55

4.3.2 Biegeträger mit halbsinusförmiger Streckenlast (Knickstab) ohne Schlupfendbehinderung 59

4.4 Überprüfung der analytischen Ansätze anhand von experimentellen und/oder numerischen Untersuchungen 63

4.4.1 Vierpunkt-Biegeträger ohne Schlupfendbehinderung 63

4.4.1.1 Bauteilversuche 63

4.4.1.2 Numerische Simulationen 65

4.4.1.3 Vergleich von Analytik mit Experimenten und Numerik 66

4.4.2 Knickstab ohne Schlupfendbehinderung 69

4.4.2.1 Vergleich der Gleichungen nach der Schlupf-DGL mit Ansätzen aus der Literatur 69

4.4.2.2 Numerische Simulationen 72

4.4.2.3 Vergleich von Analytik mit Numerik 74

4.4.3 Knickstab mit Schlupfendbehinderung 76

4.4.3.1 Numerisches Modell 77

4.4.3.2 Parameterstudien zur Untersuchung des Einflusses der Schlupfendbehinderung 78

4.4.3.3 Vergleich numerischer Untersuchungen mit analytischem Ansatz mit idealer Lagerung 79

5 Knickverhalten von Monoglasstützen 81

5.1 Herleitung von KSL für planmäßig zentrische Druckkräfte nach dem europäischen Format 81

5.2 KSL unter Berücksichtigung von planmäßigen Exzentrizitäten 90

5.3 Experimentelle und numerische Untersuchungen 91

5.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 91

5.3.2 Versuchskörper 93

5.3.3 Versuchsergebnisse 94

5.3.4 Numerische Simulationen 96

5.3.5 Vergleich der Knickversuche mit analytischen und numerischen Ergebnissen 97

5.3.6 Vergleich der KSL mit Versuchswerten und Numerik 98

5.3.7 Versuchsauswertung mit realen Bruchfestigkeiten 99

5.4 Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für KSL 101

5.5 Vergleich der hergeleiteten KSL für planmäßig zentrische Druckkräfte mit KSL aus der Literatur 102

5.6 Vergleich der hergeleiteten KSL für Knicken mit KSL für den Stabilitätsfall Beulen 103

5.7 Beanspruchung durch Druckkraft und Biegung 106

5.7.1 Herleitung von KSL für kombinierte Belastung aus Druck und Biegung 106

5.7.2 Nachweisverfahren auf der Querschnittsebene mittels M-N-Interaktionsdiagramm in Anlehnung an Verbundbau 114

5.8 Stabilitätsnachweise für Monoglasstützen 117

6 Stabilitätsverhalten von VSG-Scheiben 120

6.1 Herleitung von KSL nach dem europäischen Format für planmäßig zentrische Druckkräfte 120

6.1.1 Beanspruchung durch eine lang- oder kurzfristige zentrische Drucklast 121

6.1.1.1 Herleitung nach Schlupf-DGL mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ für beliebige G_f 121

6.1.1.2 Herleitung nach dem europäischen Format für Stahlbau nach Schlupf-DGL mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ für beliebige G_f 126

6.1.1.3 Herleitung nach Schlupf-DGL mit $\bar{\lambda}_{t,voller\ Verbund}$ für beliebige G_f 128

6.1.1.4 Herleitung für die Grenzbereiche ohne Verbund (G_f=0) und voller Verbund (G_f=∞) mit $\bar{\lambda}_{t,voller\ Verbund}$ 130

6.1.1.5 Herleitung nach Ansatz von Möhler mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ bzw. $\bar{\lambda}_{t,voller\ Verbund}$ sowie nach dem europäischen Format für Stahlbau für beliebige G_f 133

6.1.2 Beanspruchung durch eine Kombination aus axialer Lang- und Kurzzeitdruckkraft 136

6.1.2.1 Herleitung mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ für beliebige G_f der Kurzzeitbelastung 140

6.1.2.2 Herleitung mit $\bar{\lambda}_{t,voller\ Verbund}$ für beliebige G_f der Kurzzeitbelastung 145

6.2 Experimentelle Traglastuntersuchungen an VSG-Stützen 148

6.2.1 Versuchskörper und Versuchsdurchführung 148

6.2.1.1 2-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) 149

6.2.1.2 Stufenglas aus 3-fach VSG (ohne Schlupfendbehinderung) 150

6.2.1.3 3-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) 151

6.2.2 Versuchsergebnisse 152

6.2.2.1 2-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) 152

6.2.2.1.1 Knickversuche mit kontinuierlicher lang- oder kurzfristiger Lastaufbringung 153

6.2.2.1.2 Knickversuche mit kombinierter axialer Lang- und Kurzzeitbelastung 155

6.2.2.1.3 Einfluss zyklischer Vorbelastungen auf das Knickverhalten 157

6.2.2.1.4 Vergleich der Ergebnisse der kontinuierlichen und kombinierten Belastungen 161

6.2.2.2 Stufenglas aus 3-fach VSG (ohne Schlupfendbehinderung) 162

6.2.2.3 3-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) 166

6.2.3 Vergleich der Traglasten ausgewählter VSG-Knickversuche 169

6.2.3.1 Einfluss der Schlupfendbehinderung auf die Traglast bei 3-fach VSG-Stützen 169

6.2.3.2 Einfluss des Glasaufbaus auf die Traglast - Vergleich zwischen Mono, 2-fach und 3-fach VSG-Stützen 170

6.2.3.3 Einfluss der Zwischenschicht auf die Traglast - Vergleich von Knickversuchen mit PVB-Folie und SentryGlas® 173

6.2.4 Analytische Auswertung der Knickversuche 175

6.2.4.1 2-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) 176

6.2.4.1.1 Knickversuche mit kontinuierlicher lang- bzw. kurzfristiger Lastaufbringung 176

6.2.4.1.2 Knickversuche mit kombinierter axialer Lang- und Kurzzeitbelastung 178

6.2.4.2 Stufenglas aus 3-fach VSG (ohne Schlupfendbehinderung) 180

6.2.4.3 3-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) 192

6.3 Vergleich der KSL mit Versuchsergebnissen 195

6.3.1 Kontinuierliche Lang- oder Kurzzeitbelastung 195

6.3.2 Kombination aus axialer Lang- und Kurzzeitbelastung 199

6.4 Beanspruchung durch eine Kombination aus langfristiger zentrischer Druckkraft und kurzfristiger Querlast 200

6.4.1 Herleitung mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ für beliebige G_f der Kurzzeitbelastung 203

6.4.2 Herleitung mit $\bar{\lambda}_{t,\text{voller Verbund}}$ für beliebige G_f der Kurzzeitbelastung 212

6.4.3 Nachweisverfahren auf der Querschnittsebene mittels M-N-Interaktionsdiagramm in Anlehnung an Verbundbau 215

6.5 Stabilitätsnachweise für Verbundglasstützen 218

7 Zusammenfassung und Ausblick 220

8 Literaturverzeichnis 224

Anhang A Exponentialzeitfunktionen der 3-parametrigen Kelvin- bzw. Maxwell-Modelle I

A.1 Drei-parametriges Kelvin Modell I

A.2 Drei-parametriges Maxwell-Modell IV

A.3 Parameter für Schubspannungs-, Verzerrungs- und Schubmodulverläufe VIII

A.4 Torsionsversuche und analytische Ansatzfunktionen IX

A.5 Kontinuierliche Relaxationsspektren XI

A.6 Vergleich von Schubmodulverläufen XII

Anhang B Biegeverhalten von VSG-Scheiben XIII

B.1 Allgemeine Schlupfdifferentialgleichung für 3-fach Laminate XIII

B.2 Schlupfverlaufsfunktionen XIV

B.2.1 Biegeträger mit Einzellast ohne Schlupfendbehinderung XIV

B.2.2 Biegeträger mit konstanter Flächenlast ohne Schlupfendbehinderung XVI

B.3 Effektive Querschnittswerte, Spannungen und Durchbiegungen XVII

B.3.1 Biegeträger mit Einzellast ohne Schlupfendbehinderung XVII

B.3.2 Biegeträger mit konstanter Flächenlast ohne Schlupfendbehinderung XX

B.4 Vergleich der Schlupfgleichungen mit Numerik XXIII

B.4.1 Biegeträger mit Einzellast ohne Schlupfendbehinderung XXIII

B.4.2 Biegeträger mit konstanter Flächenlast ohne Schlupfendbehinderung XXIV

B.5 Zusammenstellung der Gleichungen für ausgewählte Lastfälle XXVI

Anhang C Knicken von Monoglasscheiben XXIX

C.1 Zusammenstellung der Gleichungen für Knickkurven XXIX

C.2 Übersicht über Versuchskörper XXX

C.3 Ergebnisse der Knickversuche XXXII

C.4 Gleichungen für Kombination aus Druck- und Querlast XXXV

Anhang D Knicken von Verbundglasscheiben XXXVI

D.1 Zusammenstellung der Gleichungen für Knickkurven XXXVI

D.1.1 Knickkurven nach Schlupf-DGL mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ XXXVI

D.1.2 Knickkurven nach Schlupf-DGL mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ (Stahlbau) XXXVII

D.1.3 Knickkurven nach Schlupf-DGL mit $\bar{\lambda}_{t,v}$ XXXVIII

D.1.4 Knickkurven für Grenzbereiche ohne Verbund (G_f=0) und voller Verbund (G_f=∞) mit $\bar{\lambda}_{t,v}$ XXXIX

D.1.5 Knickkurven nach Ansatz von Möhler mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ XL

D.1.6 Knickkurven nach Ansatz von Möhler mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ (Stahlbau) XLI

D.1.7 Knickkurven nach Ansatz von Möhler mit $\bar{\lambda}_{t,v}$ XLII

D.1.8 Knickkurven für kombinierte Belastungen mit $\bar{\lambda}_{t,eff}$ XLIII

D.1.9 Knickkurven für kombinierte Belastungen mit $\bar{\lambda}_{t,v}$ XLIV

D.2 Übersicht über die Versuchskörper XLVI

D.2.1 2-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) XLVI

D.2.2 Stufenglas aus 3-fach VSG (ohne Schlupfendbehinderung) XLVII

D.2.3 3-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) XLVIII

D.3 Ergebnisse der Knickversuche XLIX

D.3.1 2-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) XLIX

D.3.2 Stufenglas aus 3-fach VSG (ohne Schlupfendbehinderung) LV

D.3.3 3-fach VSG (mit Schlupfendbehinderung) LXII

Bisher veröffentlichte Titel der Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen