

Schriftenreihe des

Lehrstuhls für
Stahlbau und Leichtmetallbau
der RWTH Aachen

Heft 84 - 2018

Vereinfachte rechnerische Last-Verformungs-
vorhersage von Klebfugen mit hyperelastischem
Verhalten im Konstruktiven Glasbau

von Carl Hans Otto Richter

**Vereinfachte rechnerische Last-Verformungsvorher-
sage von Klebfugen mit hyperelastischem Verhalten
im Konstruktiven Glasbau**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur
Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Carl Hans Otto Richter

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger
Prof. Dr.-Ing. Christian Schuler

Tag der mündlichen Prüfung: 11.12.2018

Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen

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

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

Heft 84

Carl Hans Otto Richter

**Vereinfachte rechnerische Last-Verformungsvorhersage von
Klebfugen mit hyperelastischem Verhalten
im Konstruktiven Glasbau**

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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, 2018)

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6432-2

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

Die Last-Verformungsvorhersage von gummielastischen Klebstoffen wie Silikonen mittels einfacher Hooke'scher Elastizität, wie sie z.B. in der ETAG 002 vorgeschlagen wird, trifft in der Regel nur auf Spannungszustände zu, die dem der Herstellerangabe zugrunde liegenden Versuch zur mechanischen Charakterisierung entspricht. Eine allgemeine Beschreibung der Steifigkeit indes ist wegen des entropischen Verhaltens damit schlecht möglich, sie führt bei abweichenden Spannungszuständen i. d. R. zu Fehleinschätzungen. Damit werden bei der Bauteilberechnung regelmäßig von der Wirklichkeit deutlich abweichende Spannungsverteilungen ermittelt, was die bei Klebungen ohnehin mit vielen Unwägbarkeiten behaftete Traglastprognose weiter erschwert und zu großen Sicherheitsmargen beiträgt.

Alternative Berechnungsmethoden erfolgen nach entropieelastischen Ansätzen. Sie sind wegen ihrer spannungszustandsabhängigen Formulierung wesentlich genauer, was jedoch durch einen relativ hohen Berechnungsaufwand erkauft werden muss.

Hier setzt die von Herrn Dr.-Ing. C. Richter erarbeitete Methode an, indem er spannungszustandsabhängige Steifigkeiten über den entropieelastischen Ansatz nach Ogden mit Einheitszellen vorberechnet und so eine mehrachsigenabhängige Funktion des Anfangs-Elastizitätsmoduls erhält, die die Grundlage für die Überführung der Berechnung in die bekannte Hooke'sche Elastizität bildet. Damit nachgerechnete Bauteilversuche fallen mit verblüffender Genauigkeit aus.

Die Methode hat bereits Beachtung im Rahmen der europäischen Glasbaunormung des CEN/TC250/SC 11 erfahren, in dessen Hände die Erstellung eines Eurocode für tragende Glasbauteile einschließlich geklebter Verbindungen gelegt wurde.

Schließlich sind bei der Erstellung der Dissertation weitere wertvolle Erkenntnisse angefallen. Besonders zu erwähnen ist die Berücksichtigung der Kompressibilität auch bei Silikonklebstoffen, die einerseits entgegen früherer Auffassungen auch bei kleinen Abweichungen von flüssigkeitsähnlichen Verhalten eine deutliche Veränderung der Steifigkeit erzeugt und andererseits in den entropieelastischen Ansätzen unzureichend berücksichtigt wird. Auch dieses Defizit konnte durch den Ansatz von Herrn Richter kompensiert werden.

Der Förderung der Experimente der Arbeit durch die DECHEMA- und FOSTA-Forschungsprojekte „Vereinfachtes Bemessungsverfahren für elastische Klebfugen mit mehrachsigen Spannungszuständen unter Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens - KLAX“ (IGF-Nr. 16842 N) und „Methoden zur Auslegung und Simulation von Metall-Glas-Klebungen im Bauwesen“ (IGF-Nr. 19158 N / P 1235) sei an dieser Stelle sehr gedankt.

Herzlichen Dank gebührt auch den Korreferenten der Arbeit, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Dilger von der TU Braunschweig und Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Schuler von der Hochschule München.

Aachen im Dezember 2018

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann

Kurzfassung

Geklebte Verbindungen haben im Konstruktiven Glasbau ein großes Anwendungspotential. Allerdings sind die Vorbehalte gegenüber einem tragenden Einsatz aufgrund der fehlenden Kenntnis des Tragverhaltens noch groß. Falls die Entscheidung zugunsten einer Ausführung mit einer geklebten Verbindung fällt, ziehen die einzelfallabhängigen bauaufsichtlichen Vorgaben häufig zeit- und kostenintensive Konsequenzen nach sich.

Große Herausforderungen liegen dabei auch in der Bemessung. Selbst der Grenzzustand der Tragfähigkeit unter quasi-statischen Lasten wird noch nicht beherrscht. Zwar ist die Abhängigkeit des Materialverhaltens vom vorherrschenden Spannungszustand neben den Einflüssen aus Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit und Belastungsgeschichte prinzipiell geklärt, bisher aber nur schwer quantifizierbar.

In dieser Arbeit sollen unter klarer Definition der Randbedingungen die Kenntnisse bezüglich des Tragverhaltens und die Möglichkeiten der rechnerischen Prognose erweitert werden. Vorab werden Begrifflichkeiten definiert und erläutert, sowie ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik und der Normung weltweit und in Deutschland im Besonderen gegeben.

Um das Materialverhalten hyperelastischer Klebstoffe in geklebten Verbindungen im Konstruktiven Glasbau besser zu beschreiben, müssen die vorhandenen Kennwertversuche durch zwei weitere ergänzt werden. Dies ist notwendig um einerseits die bisher kaum beachtete gleichwohl zu berücksichtigende Volumenarbeit zu beschreiben und andererseits die Beschreibung der Gestaltänderung durch Erweitern um einen zusätzlichen Verformungszustand zu stabilisieren.

Die Untersuchung des realen Tragverhaltens geschieht auf zwei verschiedenen Ebenen der Bauteilskala. Auf Kleinbauteil-Ebene werden Kopfzugproben herangezogen. Der radialsymmetrische Spannungszustand bietet im Vergleich von innen nach außen und bei Variation der Klebschichtdickenverhältnisse sehr verschiedene Mehrachsigkeiten, sodass der Versuch sehr gute Möglichkeiten der Analyse und Prüfung der Modellgüten eröffnet. Die gewonnenen Erkenntnisse werden sodann auf Bauteile der normalen Skala (vierseitig geklebtes Fassadenelement) übertragen.

Zur Verdeutlichung der simulationstechnischen Prognose werden die Grundlagen für die nichtlinearen numerischen Modelle und die dafür notwendige Kontinuumsmechanik aufgearbeitet und dargestellt.

Mit sowohl den herkömmlichen als auch den zusätzlich eingeführten Kennwertversuchen wird der Prozess der Parameterermittlung für nichtlineare hyperelastische Materialmodelle anhand des Ogden-Modells dargestellt und die experimentellen Ergebnisse mit dem Modell nachgerechnet. Es werden die numerischen Ergebnisse der linearen und nichtlinearen FE-Berechnung mit den Versuchsergebnissen verglichen und Randbedingungen und Anwendungsgrenzen aufgezeigt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird eine neuartige Methode vorgestellt, die die Spannungsmehrachsigkeit als Basisvariable des vorherrschenden Spannungszustandes heranzieht. Darauf aufbauend werden über FEM-Einheitszellenberechnungen mit dem Ogden-Modell über die Spannungsmehrachsigkeit klebstoffspezifische Steifigkeitsortskurven abgeleitet. Mit der spannungsmehrachsigkeitsabhängigen Ortssteifigkeit kann wieder eine gewohnte Berechnung auf Basis quasi-Hookescher Elastizität erfolgen, die wegen der Anfangsschätzung der Steifigkeitsverteilung i. d. R. in zwei Iterationsschritten geführt werden muss. Der Vergleich der Ergebnisse mit Versuchen ergibt überaus zufriedenstellende Übereinstimmungen.

Abstract

Bonded joints in structural glass construction have great potential for application due to the continuous loading and the increase in transparency. However, reserves remain due to the lack of precise knowledge of the load-bearing behaviour on the part of the building authorities and planners. If the decision is made in favour of a design using bonded joints, building authorities will set requirements for approval, which is both time-consuming and costly. To overcome this obstruction research work as basis for general modification is necessary.

One of the greatest challenges are in the structural design of adhesives. Even the quasi-static design situation in the ultimate limit state cannot yet be systematically controlled, since a high dependence of the material behaviour on the current stress state in addition to the influences of temperature, loading rate and load history is known, but cannot yet be quantified today.

In this thesis the boundary conditions are to be defined more clearly and the knowledge regarding the load-bearing behaviour and the calculability is to be extended. For this purpose, concepts are defined and explained that the planning engineer does not necessarily face in his education. An overview of the present state of standardization worldwide and particularly in Germany is given.

In order to better describe the material behaviour of hyperelastic adhesives in bonded joints of structural glass, the existing characteristic value tests are supplemented by two further ones, which on the one hand describe the previously hardly considered volume work and on the other hand extend the description of the change in shape by an additional deformation state.

The real load-bearing behaviour is investigated on two different levels of the component scale. Butt joint tensile specimens are used at small component level. The radially symmetrical stress state offers very different multiaxialities in comparison from inside to outside and with variation of the adhesive layer thickness ratios, so that the test opens up very good possibilities for analysis and testing of the model grades. The knowledge gained then is to be transferred to the component level of the normal scale (four-sided bonded facade element).

In order to make numerical computability more understandable, the basics of non-linear numerical models and the continuum mechanics necessary for this are worked out and presented in an understandable way.

With the additionally introduced and the conventional characteristic tests, the process of parameter determination for non-linear hyperelastic material models is

presented comprehensibly using the Ogden model and the experimental results are recalculated with this model. The numerical results of the linear and nonlinear FE calculation are compared with the test results and limits are shown.

According to these results, a new method is presented which uses the stress multiaxiality as basic variable of the current stress state. Based on this, FEM unit cell calculations with the Ogden model are used to derive adhesive-specific stiffness locus curves over the stress multiaxiality. With the stress multiaxiality-dependent local stiffness, the usual calculation can again be based on quasi-Hooke elasticity, which usually has to be performed in two iteration steps due to the initial estimation of the stiffness distribution. Comparison of the results of the new method with tests is very satisfactory.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2	Structural Glazing	5
2.1	Grundlagen des Verbundes im Structural Glazing	5
2.1.1	Glas als Fügepartner	5
2.1.2	Metallische Fügepartner	6
2.1.3	Klebstoff	7
2.1.3.1	Glasübergangstemperatur / Transformationsbereich	10
2.1.3.2	Hyperelastizität / Entropieelastizität	11
2.1.3.3	Formänderungsenergie	13
2.1.3.4	Kompressibilität	13
2.1.3.5	Mullins-Effekt	14
2.1.3.6	Dauerhaftigkeit	16
2.1.3.7	Unterscheidung elastoplastisch und hyperelastisch	17
2.2	Stand der Technik in der Anwendung	18
2.2.1	ETAG 002	18
2.2.2	Mögliche Zulassungsverfahren	20
2.3	Stand der Normung	21
2.3.1	Übersicht	21
2.3.2	American Society for Testing and Materials (ASTM)	23
2.3.2.1	ASTM C1184 [ASTM1184]	23
2.3.2.2	ASTM C1401 [ASTM1401]	24
2.3.2.3	Vergleich ASTM Standards und ETAG 002	25

2.3.3	Standardization Administration of the People's Republic of China (SAC): GB 16776 [GB16776]	26
2.3.4	Comité Européen de Normalisation (CEN)	26
2.3.4.1	EN 14351 (harmonisiert) [EN14351]	26
2.3.4.2	EN 13830 (harmonisiert) [EN13850]	27
2.3.4.3	EN 13022-1/-2 (nicht harmonisiert) [EN13022]	27
2.3.4.4	EN 15434 (nicht harmonisiert) [EN15434]	27
2.3.4.5	EN 1279 (harmonisiert) [EN1279]	28
2.3.4.6	EN 16759 (nicht harmonisiert) [EN16759]	28
2.4	Spannungsberechnungen zur Bemessung einer geklebten Verbindung	28
2.5	Regulierende Situation geklebter Verbindungen im Konstruktiven Glasbau in Deutschland	33
3	Tragverhalten struktureller Klebfugen im Konstruktiven Glasbau	35
3.1	Kennwertversuche	35
3.1.1	Einführung	35
3.1.2	Volumenänderung (Kompressionsversuch)	38
3.1.3	Gestaltänderung (Äquibiaxialer Zugversuch)	41
3.1.4	Übersicht über mögliche Grundversuche	44
3.2	Bauteilversuche	44
3.2.1	Einführung	44
3.2.2	Kleinbauteilebene: Kopfzugversuch	44
3.2.2.1	Variation des Verhältnisses Durchmesser zu Klebschichtdicke	45
3.2.2.2	Variation des Durchmessers bei dem Verhältnis 1:1 von Klebschichtdicke zu Durchmesser	46
3.2.2.3	Versagensbetrachtung	48
3.2.3	Bauteilebene: geklebtes Fassadenelement im Kantenbereich	50
3.2.3.1	Übersicht	50

3.2.3.2	Randklebung unter Zugbelastung	53
3.2.3.3	Randklebung unter Druckbelastung	56
3.2.3.4	Randklebung unter Schubbelastung	59
3.2.3.5	Randklebung mit Moment um die Längsachse der Klebung	63
3.2.4	Eckbereich	69
3.2.4.1	Übersicht	69
3.2.4.2	Eckversuche unter Zugbelastung	71
3.2.4.3	Eckversuche unter Druckbelastung	73
3.2.4.4	Vergleich von Druck- und Zugbelastung der geklebten Glasecke	74
3.2.5	Untersuchungen zum Mullins-Effekt	75
3.3	Erkenntnisse über das Tragverhalten	77
4	Numerische Berechnung struktureller Klebfugen im Konstruktiven Glasbau	78
4.1	Einführung	78
4.2	Kontinuumsmechanische Grundlagen	81
4.3	Hyperelastische Modelle	87
4.3.1	Allgemeine Herleitung	87
4.3.2	Mooney-Rivlin	94
4.3.3	Rivlin	95
4.3.4	Neo-Hookean	96
4.3.5	Yeoh	96
4.3.6	Ogden	96
4.3.7	Antwortfunktion	98
4.4	Bauteilversuche	98
4.4.1	Modellierung	99

4.4.1.1	Diskretisierung	99
4.4.1.2	Bestimmung der Materialparameter	104
4.4.2	FE-Berechnungen	106
4.4.2.1	Kopfzugversuche	106
4.4.2.2	Randklebung unter Zugbelastung	109
4.4.2.3	Eckbereich	110
4.5	Grenzen der numerischen Berechnung	111
5	Steifigkeitsortskurven von Silikonklebstoffen im Konstruktiven Glasbau	113
5.1	Spannungsmehrachsigkeit	113
5.2	Entwicklung einer Methode zur realistischen Abschätzung der Klebfugensteifigkeit	116
5.2.1	Randbedingungen und Annahmen	116
5.2.2	Herleitung der Steifigkeitsortskurve am Beispiel des DC 993	117
5.2.3	Implementierung der Steifigkeitsortskurve in die FEM	123
5.2.4	Überprüfung der Methode	125
5.3	Anwendbarkeit der Methode auf Bauteilversuche	130
5.3.1	Rundproben	131
5.3.1.1	Kopfzugproben	131
5.3.1.2	Punkthalter	133
5.3.2	Randklebung unter Zugbelastung	138
5.3.3	Eckbereich	139
5.4	Übertragung auf das Klebstoffsystem Ködiglaze S	140
5.4.1	Herleitung der Steifigkeitsortskurve für den Ködiglaze S	140
5.4.2	Anwendbarkeit anhand von Bauteilversuchen	143
5.5	Bedeutung für die aktuelle Bemessungssituation	144

6	Zusammenfassung und Ausblick	145
6.1	Zusammenfassung	145
6.2	Ausblick	147
	Literaturverzeichnis	148
Anhang A	Versuchsergebnisse	I
A.1	Versuchsergebnisse Kopfbzugproben	I
A.2	Versuchsergebnisse Randlebung	VI
Anhang B	Vereinfachtes Programmierungsskript der Methode	VIII