

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

Carl Richter¹, Björn Abeln¹, Benjamin Schaaf¹, Markus Feldmann¹

¹ RWTH Aachen University, Institute for Steel Construction, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland

Abstract

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. 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 diesem Beitrag sollen unter klarer Definition der Randbedingungen die Möglichkeiten einer rechnerischen Prognose vorgestellt werden. Über FEM-Einheitszellenberechnungen mit dem Ogden-Modell werden über die Spannungsmehrachsigkeit klebstoffspezifische Steifigkeitsortskurven abgeleitet. Der Vergleich der Ergebnisse mit Versuchen ergibt überaus zufriedenstellende Übereinstimmungen.

Simplified calculated load-deformation prediction of adhesive joints with hyperelastic behaviour in glass construction. Bonded joints have great application potential in structural glass construction. However, there are still major reservations against a load-bearing application due to the lack of knowledge of the load-bearing behaviour. Although the dependence of the material behaviour on the prevailing stress state in addition to the influences of temperature, load speed and load history has been clarified in principle, it has been difficult to quantify it to date. In this paper the possibilities of a computational prognosis shall be presented under clear definition of the boundary conditions. Using FEM unit cell calculations with the Ogden model, adhesive-specific stiffness location curves are derived via the stress multiaxiality. The comparison of the results with tests results in very satisfactory similarities.

Schlagwörter: *Structural Sealant Glazing, Berechenbarkeit, FEM*

Keywords: *structural sealant glazing, calculation, FEM*

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten Jahrzehnten ist die Nachfrage struktureller Klebungen im Bauwesen stark angestiegen. Die Entwicklung hin zu lasttragenden Einsätzen fand in Europa ihren vorläufigen Höhepunkt in der Veröffentlichung des ersten Teils der Leitlinie der Europäischen Technischen Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen ETAG 002 1998, die aufbauend auf der 1991 erschienenen amerikanischen Norm ASTM C1401 erstellt worden ist.

Zur Bemessung von geklebten Verbindungen wird heutzutage in Deutschland immer noch auf die 20 Jahre alte ETAG 002 zurückgegriffen [1]. Dafür wird die Bemessung entweder durch eine händische Berechnung oder durch eine numerische linear elastische Berechnung mit den Klebstoffkennwerten Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl aus der entsprechenden europäischen Zulassung ETA durchgeführt. Eine geklebte Verbindung ist in Deutschland ein unregelmäßiges Bauprodukt, welches bei jeder Anwendung in Anlehnung an diese Richtlinie eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) beziehungsweise vorhabenbezogene Bauartengenehmigung (vBG) oder eine abZ/aBG erfordert, häufig in Verbindung mit großmaßstäblichen Bauteilversuchen. Diese zeit- und kostenintensive Abwicklung über eine ZiE beziehungsweise abZ ist i. d. R. die Ursache, warum die Praxis sich oft gegen eine Ausbildung bestimmter Konstruktionsdetails mithilfe von lasttragenden Klebverbindungen entscheidet.

Vor diesem Hintergrund erscheint die Überarbeitung der ETAG 002 vor allem im Hinblick auf die Bemessung notwendig. Dabei ist die sehr starke Vereinfachung der Bemessung mit „Kraft pro Fläche“ auf der Einwirkungsseite und die nicht auf wissenschaftlichen Ergebnissen basierenden, frei festgelegten Sicherheitsbeiwerte für die Widerstandsseite der Größe 6 für Kurzzeitbelastung und 10 für Langzeitbelastung, die häufig auch als methodische Faktoren bezeichnet werden, ein Hauptkritikpunkt an dem Vorgehen der ETAG 002. Selbst die „Vorgängernorm“ ASTM C1401 geht von einem minimalen Sicherheitsfaktor von lediglich 2,5 aus. Dieser setzt sich aus der Anforderung an die charakteristische Zugfestigkeit nach ASTM C1135 und dem zur Bemessung anzusetzenden und von der Industrie empfohlenen Bemessungswert zusammen.

Grundlage der ETAG 002 ist die Betrachtung des einachsigen Zugversuches in der Klebschicht. In der Praxis gibt es allerdings nahezu keinen Anwendungsfall, in dem eine einachsige Belastung innerhalb der Klebung vorliegt. Ein mehrachsiger Spannungszustand ist die Regel und entsteht z. B. schon bei einer auftretenden Querkontraktionsbehinderung. Dies führt zu einer großen Abweichung bei der einwirkenden Belastung im Vergleich von dem Referenzfall der Bemessung nach ETAG 002 und dem realen Spannungszustand, was über die sehr hohen globalen Sicherheitsbeiwerte abgedeckt werden soll.

1.2 Stand der Technik

Im Folgenden werden die in der Literatur angegebenen Möglichkeiten zur Spannungsberechnung für eine Klebfuge im konstruktiven Glasbau betrachtet. Aufbauend auf dem Stand der Technik in der ETAG 002 sind einige Forschungsarbeiten dazu durchgeführt worden. Über eine Normalspannungsberechnung mit „Kraft pro Fläche“ und

einem Bemessungswert wird die Klebschichtbreite festigkeitsbasiert bestimmt. Über eine thermische Verformung wird über den Schubmodul die minimale Klebschichtdicke verformungsbasiert bestimmt. Dabei werden Einflüsse aus z. B. Randstörungseffekten, Querkontraktionsbehinderung, Spannungszustand, ortsabhängigen Unterschieden, Belastungshöhe oder -geschwindigkeit nicht berücksichtigt, sondern sollen über einen hohen globalen Sicherheitsfaktor abgedeckt werden.

Der amerikanische Stand der Technik zur Berechnung von Spannungen wird von Wolf [2] zusammengestellt. Als Hauptberechnungsmethode wird das trapezförmige Lastverteilungsmodell, wie es in der ETAG 002 verwendet wird, beschrieben. Es ist offensichtlich, dass der festigkeitsbasierte Normalspannungsansatz pauschal angesetzt wird und die Eigenschaften des Klebstoffes nicht wiedergibt.

Sandberg und Ahlborn [3] haben anhand von Zug- und Schubversuchen einen ellipsoförmigen Zusammenhang von Schub und Zug über die maximalen Spannungen gefunden. Klosowski und Wong [4] haben diese Formulierung erweitert, indem sie die maximalen Spannungen durch die Bemessungsspannungen ersetzen.

In [5] wird zur Spannungsberechnung die ETAG 002 herangezogen und vorgeschlagen, den Sicherheitsfaktor in bestimmten Regionen, die besonders relevant sind, zu erhöhen und in irrelevanteren Bereichen zu verringern. Dies wird am Beispiel von Punkthalterungen vorgeschlagen, bei denen im mittleren Bereich der Sicherheitsfaktor auf 5 reduziert und in den äußeren Bereichen auf 7 erhöht werden könnte.

Pröbster [6] beschreibt die Unterscheidung, wie es auch in der ETAG 002 gemacht wird, in festigkeits- beziehungsweise spannungsbezogene und verformungsbezogene Bemessung. Für die Abminderung wird auf die fünf verschiedenen Abminderungsfaktoren, die auch im DVS-Merkblatt [7] beschrieben sind, zurückgegriffen. Dabei werden andere Erfahrungswerte angegeben und noch ein zusätzlicher Faktor für sonstige festigkeitsmindernde Einflüsse ergänzt, der beispielsweise Schwankungen bei der Klebstoffqualität (z. B. Stellen mit fehlender Adhäsion) berücksichtigt.

Recknagel & Kaatz [8] haben mithilfe von FE-Untersuchungen einen neuen Versuchsaufbau entwickelt, mit dem sowohl globale als auch lokale Effekte untersucht und eine Beanspruchungsfunktion aus mechanischen, dynamischen und temperaturinduzierten Einwirkungen abgeleitet werden, die allerdings noch nicht direkt in einen Spannungsberechnungs- oder Bemessungsansatz umgesetzt worden sind.

Bei den bis hierher beschriebenen händischen Spannungsberechnungen wird vereinfachend zugrunde gelegt, dass die Windbelastung eine trapezförmige Verformung hervorruft [1]. Dow Corning hat aber in einem zusätzlichen Anhang zu [9] bereits selbst eine Spannungsberechnung für den Fall angegeben, dass die Glasdurchbiegung größer als 1/100 der kurzen Seitenlänge und/oder die Klebschichtbreite größer als die dreifache Klebschichtdicke ist, sodass ein zusätzlicher Rotationsfaktor im Klebstoff zur maximalen Spannungsberechnung berücksichtigt werden muss. Es wird allerdings ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Formel allgemein gültig ist, aber über Versuche mit realen Abmessungen validiert werden muss.

Drass [10] führt sehr ausführliche Untersuchungen zur numerischen Abbildung von Transparent Silicone Structural Adhesive (TSSA) der Firma Dow Corning durch, wobei es sich um einen 1 mm dünnen Silikonfilm handelt und sich somit deutlich von den hier untersuchten Dickschichtklebungen abgrenzt.

In [11] konnte anhand von dehnungsgeregelt geprüften Kopfzugproben, die den Vorteil der Rotationssymmetrie und damit keine Unstetigkeitsstellen aufweisen, mit

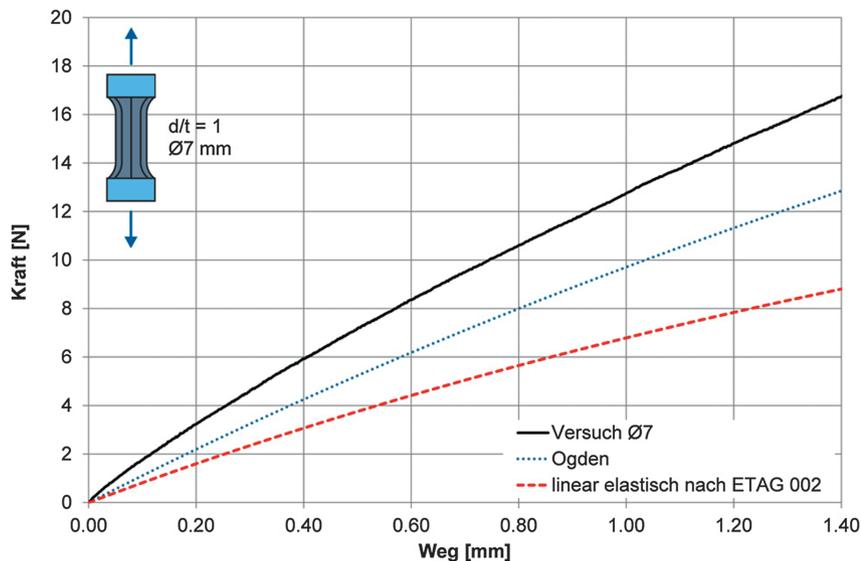


Bild 1 Vergleich FE/Versuche für Kopfzugversuche $\varnothing 7$ mm mit $d/t = 1$ als Kraft-Weg-Kurven

dem Marktführer bei Silikonklebstoffen für das Structural Sealant Glazing DOW-SIL 993 [9] gezeigt werden, dass eine numerische Berechnung auf Grundlage der Kennwerte aus den entsprechenden ETAs das wahre Tragverhalten deutlich unterschätzt (Bild 1). Da es keine klaren Vorgaben hinsichtlich der auszuwertenden Spannungen und Dehnung gibt, ist eine Betrachtung der globalen Kraft-Wegkurven für das globale Tragverhalten sinnvoll. Bei der Auswertung des Weges wird sowohl experimentell als auch numerisch nur der Klebstoff betrachtet. Auch wurde in [11] die Kontinuumsmechanik als Grundlage für die hyperelastischen Materialmodelle und die entsprechende Bestimmung der Materialparameter für das Ogden-Modell [12] ($\mu_1 = 0,8718$; $\alpha_1 = 1,4470$; $d_1 = 0,0019$) beschrieben. Dabei wurden die Kennwertversuche Zug, Druck, äquibiaxialer Zug, dicke Zugscherprobe und der Kompressionsversuch zugrunde gelegt [11]. Zwar führt die FE-Berechnung mit dem Ogden-Modell als Materialgesetz zu einer Verbesserung der Abbildbarkeit, doch gibt es immer noch deutliche Abweichungen zum realen Tragverhalten (Bild 1). Darüber hinaus benötigt die korrekte Herleitung eines Ogden-Modells gleichwohl einen deutlich größeren Aufwand und ein Expertenwissen [11].

Diese Abweichung wird noch größer bei Betrachtung von Kopfzugproben mit einem deutlichen höheren Anteil des hydrostatischen Spannungsanteils [12], [13], [14], der durch Herabsetzen der Klebschichtdicke und gleichbedeutend einer Erhöhung der Querkontraktionsbehinderung bei einem nahezu inkompressiblen Material entsteht (Bild 2). Dort sind die Abweichungen sowohl der linear elastischen Berechnung als auch der nichtlinearen Berechnung mit dem Ogden-Modell noch deutlich angestiegen, d. h. dass eine Prognostizierbarkeit mit den vorhandenen Methoden nicht möglich ist.

Als mögliche Ursache für diese deutlichen Abweichungen wurde in [11] die Abhängigkeit der Steifigkeit vom vorherrschenden Spannungszustand herausgearbeitet.

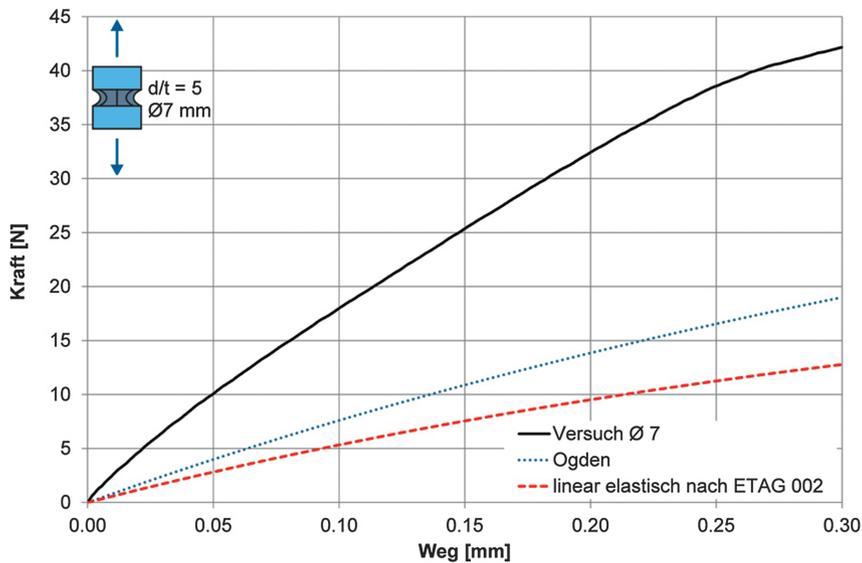


Bild 2 Vergleich FE/Versuche für Kopfzugversuche Ø 7 mm mit $d/t = 5$ als Kraft-Weg-Kurven

2 Methode zur realistischen Abschätzung des Last-Verformungsverhaltens von Klebfugen mit hyperelastischem Verhalten

Nachdem gezeigt werden konnte, dass die numerische Abbildbarkeit hinsichtlich des Last-Verformungsverhaltens beziehungsweise der Steifigkeit stark limitiert ist, wird im Folgenden eine Methode vorgestellt, mit der die Steifigkeit spannungszustandsabhängig abgeschätzt werden kann. Dafür wird die Spannungsmehrrachsigkeit als Bewertungskriterium des Spannungszustandes ausgenutzt und die Klebfuge mittels eines Gleichgewichtsansatzes über verschiedene Steifigkeitsbereiche abstrahiert. Der Lösungsalgorithmus sieht dabei einen iterativen Prozess vor, bei dem jedem einzelnen Finiten Element in Abhängigkeit der vorherrschenden Spannungsmehrrachsigkeit eine auf dem Ogden-Modell basierende isotrope Steifigkeit zugewiesen wird.

Für die das hyperelastische Materialverhalten besser abbildenden nichtlinearen Materialmodelle leitet sich der Spannungszustand aus der Formänderungsenergie ab, die sich aus Gestaltänderungs- und Volumenänderungsenergie zusammensetzt. Dabei kommt es durch die Substrate und die Querkontraktionsbehinderung innerhalb der geklebten Verbindung zu Versteifungseffekten durch hydrostatische Spannungszustände. Als Resultat daraus entstehen mehrachsige Spannungszustände innerhalb der Klebung. Eine Quantifizierung von diesen wird erstmals in [11] vorgenommen.

Für die Quantifizierung eines mehrachsigen Spannungszustandes bietet sich das Kriterium der Mehrachsigkeit η an. Es wird der hydrostatische Spannungszustand σ_H mit dem deviatorischen, in Form der von Mises-Vergleichsspannung σ_V , ins Verhältnis gesetzt:

$$\eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (1)$$

Drass [10] führt ebenfalls die Mehrachsigkeit als Bewertungskriterium für Silikonklebstoffe, wobei sich die Arbeiten auf den Silikonfilm TSSA der Firma Dow Corning konzentrieren, ein. Dieses Kriterium wird verwendet, um die Eignung bestimmter Kennwertversuche über die Homogenität der Spannungszustände durch numerische Berechnungen bewerten zu können.

Sikora [16] nutzt den Kehrwert der Spannungsmehrachsigkeit als ein Maß zur Beschreibung des vorherrschenden Spannungszustandes für einen elastischen Polyurethan-klebstoff, um den vorhandenen Spannungszustand in spezielle Bereiche einzuteilen. Aufbauend auf diesen Bereichen werden kombinierte Festigkeitshypothesen aus uniaxialen und hydrostatischem Zug aufgestellt.

Hier wird die Spannungsmehrachsigkeit als Basisvariable einer numerischen Methode zur Abschätzung des Last-Verformungsverhaltens von geklebten Verbindungen im Konstruktiven Glasbau verwendet.

Eine grundlegende Annahme ist, dass es sich um eine methodische Berechnung der Bauteilsteifigkeit handelt. Bei den ermittelten Last-Verformungsverhalten handelt es sich um Steifigkeiten, die bedingt durch die Verwendung eines hyperelastischen Materialgesetzes auf wahren, also auf den aktuellen Querschnitt bezogenen, Spannungs-Dehnungs-Werten beruhen, sodass diese nicht mit Kenngrößen, wie beispielsweise den Elastizitätsmoduln für Zug oder Druck vergleichbar sind.

Ein großer Vorteil gegenüber der herkömmlichen Bestimmung ist, dass die Steifigkeitsortskurve für den DC 993 systematisch und umfänglich bestimmt und auch für Bauteilgeometrien überprüft worden ist [11].

Die entwickelte Methode basiert auf dem auf Grundlage der durchgeführten Zug-, Druck-, Zugscher-, Äquibiaxial- und Kompressionsversuche ermittelten Ogden-Modell. Die Methode hat das vorrangige Ziel, den komplizierten Ansatz der Formänderungsenergiegedichte aus der Kontinuumsmechanik und die aufwendige Kennwertermittlung für den planenden Ingenieur zu vereinfachen und ein praxistaugliches Berechnungsverfahren über einen linearen Ansatz mit automatisierter iterativer spannungszustandsabhängigen Steifigkeitszuweisung der einzelnen Finiten Elemente zur Verfügung zu stellen.

Das Diagramm (Bild 3), das die spannungszustandsabhängige Steifigkeit $S(\eta)$ über die Spannungsmehrachsigkeit η beschreibt, wird als Steifigkeitsortskurve bezeichnet. Diese Steifigkeiten werden an einem statisch bestimmt gelagerten Einheitselement (Solid185 mit 8 Knoten und voller Integration mit der „B-bar Methode“ [17]) hergeleitet. Mit dieser Integrationsmethode soll nicht wie bei der reduzierten Integration, wie beispielsweise im klassischen Stahlbau, hauptsächlich das Scherlocking, sondern das bei nahezu beziehungsweise perfekt inkompressiblen Materialien dominanteres Volumenlocking verhindert werden. Dafür wird bei der „B-bar Methode“ die Verzerrungsverschiebungsmatrix in den deviatorischen und volumetrischen Anteil aufgeteilt [17].

Die Steifigkeitsortskurve wird bei den hier durchgeführten Untersuchungen durch FE-Berechnungen mit dem Programm Ansys an einem Einheitselement mit den Kan-

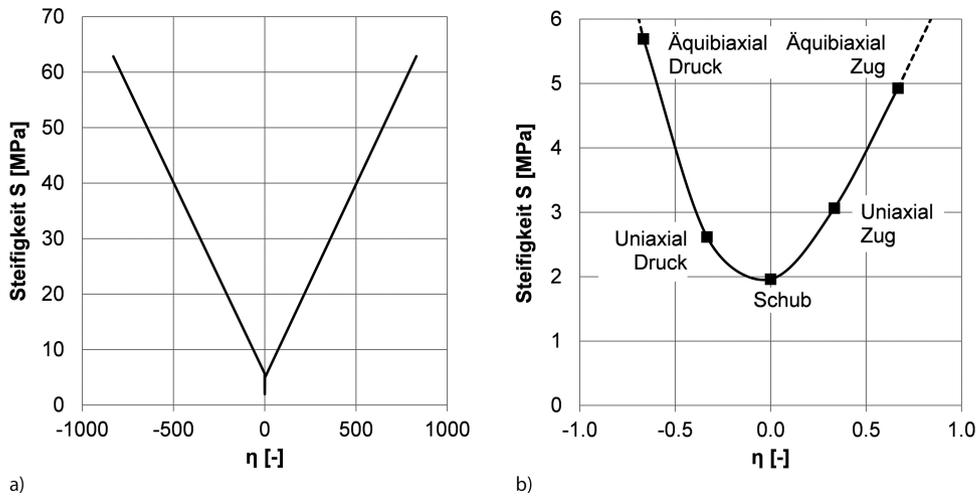


Bild 3 Steifigkeitsortskurve für den DC 993: a) gesamt; b) Bereich für Mehrachsigkeiten von -1 bis $+1$

tenlängen von $\eta_F = 1$ bestimmt und geometrisch und werkstofflich nichtlinear durchgeführt. Dabei wird als Belastung 10% einer Einheitslast aufgebracht, um die entstehenden Spannungen und Dehnungen in praxisüblichen Größenordnungen zu erreichen.

An dem Einheitslement, dessen Materialverhalten durch das hyperelastische und phänomenologische Ogden-Modell beschrieben wird, werden die Verformungszustände uniaxial, äquibiaxial und hydrostatisch unter Zug- und Druckbelastung, sowie Schub als Stützstellen durch Aufbringen einer dementsprechenden Belastung erzeugt. Aus den daraus errechneten Spannungs- und Dehnungszuständen ergibt sich eine Steifigkeit und die gemäß Gl. (1) für die Hauptspannungen ausgewerteten Mehrachsigkeiten. Dabei ist jeder Mehrachsigkeit eindeutig ein Steifigkeitswert zugeordnet.

Da das Ziel dieser Methode eine vereinfachte Berechnung ist, was mit der Verwendung eines linearen Materialgesetzes einhergeht, wird zur Bestimmung der Steifigkeit beziehungsweise des Elastizitätsmoduls auf das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz für isotrope Materialien ohne Temperaturberücksichtigung zurückgegriffen. Dabei wird die Steifigkeit vorrangig aus dem Spannungszustand bestimmt. Das zugrunde liegende Ogden-Modell definiert sich aber über die Verformungen, sodass die inverse Betrachtungsweise des verallgemeinerten Hooke'schen Gesetzes aufgelöst nach den Spannungen zielführender ist, da sich die Steifigkeit so vorrangig aus den Verzerrungen ergibt [11]. Daraus ergibt sich für die Materialsteifigkeit S :

$$S = \frac{\sigma_i(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)\varepsilon_i + \nu(\varepsilon_j + \varepsilon_k)}, \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (2)$$

Für die uniaxialen Belastungen ergibt sich erwartungsgemäß eine Spannungsmehrachsichtigkeit $\eta = 1/3$ und für die äquibiaxialen Belastungen ein $\eta = 2/3$. Da eine Schubverformung keine Volumenänderung, sondern eine reine Gestaltänderung beinhaltet, ist die Spannungsmehrachsichtigkeit $\eta = 0$.

Da bei einem hydrostatischen Spannungszustand naturgemäß $\eta = \infty$ wird, wird ein quasi-hydrostatischer Spannungszustand auf das Einheitselement aufgebracht, in dem die Randbedingungen entsprechend dem Kompressionsversuch [11] definiert sind. Durch diese zusätzlichen Randbedingungen wird eine Versteifung des Materialverhaltens berücksichtigt, die bei der Verwendung des Ogden-Modells nicht in die Modellparameter einfließen kann.

Es sei noch erwähnt, dass eine Ermittlung der Steifigkeitsortskurven ohne Zwischenberechnung mit Einheitszelle und Ogden, sozusagen über die direkte Auswertung von Kennwertversuchen, aus folgenden Gründen zu einem deutlich ungenaueren Ergebnis führen würde:

- Reduktion auf einen maßgebenden Parametersatz durch die Regressionsanalyse der verschiedenen Kennwertversuche,
- Berechnung von Punkten zwischen den Stützstellen (unter Voraussetzung einer „homogenisierten“ Steifigkeitsmatrix des Werkstoffes, die dann Besetzungen nicht nur auf der Matrixdiagonalen hätte).

Die Bestimmung der Spannungsmehrachsigkeit pro Element ist in dem Programm ANSYS [17] automatisiert. Durch Einlesen der Steifigkeitsortskurve wird jedem Element in Abhängigkeit der Spannungsmehrachsigkeit ein entsprechender isotroper Steifigkeitswert zugeordnet und die FE-Berechnung erneut durchgeführt.

Als Startwert wird in der sogenannte 0. Iteration von einer Steifigkeit von 2 MPa in jedem Element ausgegangen. Als Querkontraktionszahl wird in Anlehnung an [18] von einem Wert von 0,49 ausgegangen. Der Vorgang des Steifigkeitsupdates kann beliebig oft wiederholt werden. I. d. R. reicht die erste oder zweite Iteration aus.

Die Methode wurde in [11] anhand des Werkstoffes Stahl, bei dem sich eine Gerade bei 210.000 MPa ergibt, verifiziert, vgl. auch Bild 5.

3 Validierung anhand von Kopfzugproben

Im Folgenden wird die Methode zur Abschätzung der Steifigkeit anhand von Kopfzugversuchen mit d/t -Verhältnissen von 5 (Bild 4) validiert, da dort der Einfluss der Querkontraktionsbehinderung und damit der hydrostatische Spannungsanteil am größten ist. Dabei wird der Wertebereich untersucht, der einer praxisrelevanten technischen Dehnung von 2% entspricht.

Die Methode bildet die Versuchsergebnisse sehr gut ab. Die Berechnung wird hier bis zur 2. Iteration durchgeführt. Somit liefert die Methode deutlich bessere Ergebnisse als die FE-Berechnung mit dem Ogden-Modell oder dem linear elastischen Ansatz unter Anwendung der Kennwerte nach der ETA [9].

In [11] werden noch weitere Bauteilgeometrien untersucht. Die Methode zur Abschätzung der Steifigkeit liefert dabei bei allen eine gute Übereinstimmung und ist somit in der Lage, diese Bauteilgeometrien abzubilden beziehungsweise sogar zu prognostizieren.

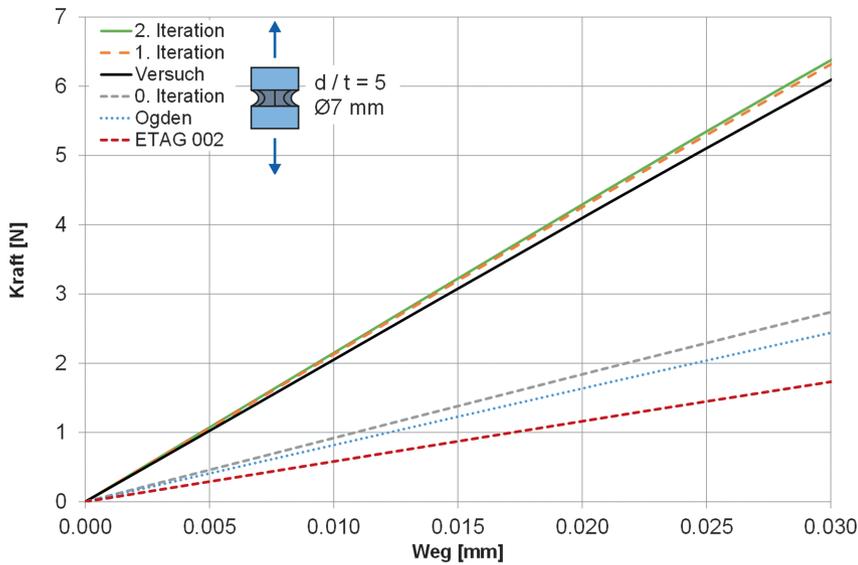


Bild 4 Vergleich FE/Versuche für Kopfzugversuche \varnothing 7 mm mit $d/t = 5$ als Kraft-Weg-Kurven

4 Erweiterung auf andere Klebstoffsysteme

Neben der Herleitung der Steifigkeitsortskurve für die Silikonklebstoffe DC 993 und Ködiglaze S [11] wurden weitergehende Untersuchungen durchgeführt, um die Anwendbarkeit der Methode auf andere Klebstoffsysteme zu überprüfen. Dabei wurden der hyperelastische Polyurethanklebstoff SF7550 und der elastoplastische Epoxidharzklebstoff DP490 verwendet (Bild 5). Die Kennwertversuche beruhen dabei auf [19].

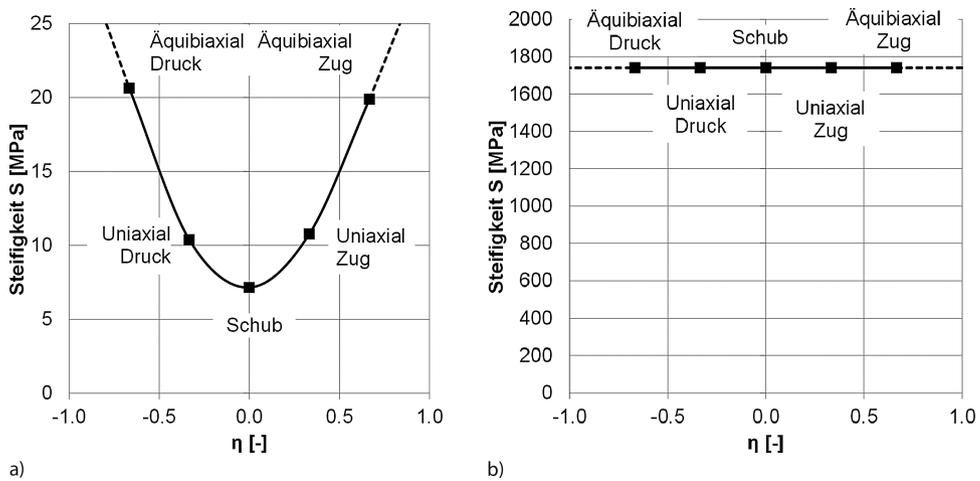


Bild 5 Steifigkeitsortskurve für: a) SF7550; b) DP490

Erwartungsgemäß bildet sich beim SF7550 wieder im Wertebereich von η zwischen -1 und $+1$ ein parabelähnlicher Verlauf, da dieser Polyurethanklebstoff ein hyperelastisches Materialverhalten aufweist. Aufgrund der absolut höheren Steifigkeiten (ca. Faktor 10) verschiebt sich die Kurve im Vergleich zum DC 993 nach oben. Obwohl dieser Klebstoff eine niedrigere Querkontraktionszahl (ca. 0,47 zu 0,49) aufweist, verläuft die Steifigkeitsortskurve aufgrund der absolut deutlich höheren Steifigkeiten spitzer zu. Beim DP490, der elastoplastisches Materialverhalten wie der Werkstoff Stahl aufweist, ergibt sich, wie beim Stahl eine Gerade über den Wertebereich. Dadurch, dass dieser Werkstoff eine deutlich geringere Querkontraktionszahl hat, ist keine Versteifung durch den hydrostatischen Spannungszustand vorhanden.

5 Zusammenfassung

Die Unsicherheiten hinsichtlich der Verwendung einer geklebten Verbindung im Konstruktiven Glasbau seitens der Baubehörden, der Planer und ausführenden Firmen, sind trotz vieler vorhandener Erfahrungen immer noch groß. Hier wird eine neuartige Methode auf Grundlage des hyperelastischen Ogden-Modells zur Abschätzung des Last-Verformungsverhaltens von geklebten Verbindungen im Konstruktiven Glasbau vorgestellt. Dafür werden an einem Einheitselement bestimmte Verformungszustände aufgebracht und die entsprechende Steifigkeit des resultierenden Verhaltens bestimmt. Als Bewertungskriterium für den vorherrschenden Zustand wird die Spannungsmehrachsigkeit eingeführt. Jeder Mehrachsigkeit kann in der Steifigkeitsortskurve für den DC 993 eine Steifigkeit eindeutig zugeordnet werden. Die Methode hat das vorrangige Ziel, den komplizierten Ansatz der Formänderungsenergiedichte aus der Kontinuumsmechanik und die aufwendige Kennwertermittlung zu vereinfachen und ein praxistaugliches Berechnungsverfahren über einen linearen Ansatz mit automatisierter iterativer spannungszustandsabhängigen Steifigkeitszuweisung der einzelnen Finiten Elemente zur Verfügung zu stellen.

Die Anwendbarkeit wurde an Kopfzugproben sowie Bauteilversuchen [11] gezeigt. Die Methode kann auf weitere Klebstoffsysteme übertragen werden. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass mit dieser Methode zur Abschätzung erstmals eine Prognostizierbarkeit des Last-Verformungsverhaltens ermöglicht werden kann.

Als nächster Schritt hin zur Prognostizierbarkeit müssen Untersuchungen zum Versagen durchgeführt werden [20].

6 Literatur

- [1] Feldmann, M.; Richter, C.; Abeln, B.; Schaaf, B. (2017) Zur Berechnung und Bemessung von Klebverbindungen aus der Sicht des Stahlbaus, In: Stahlbau, 86, S. 1106–1112.
- [2] Klosowski, J.; Andreas, A. T. (2015) Sealants in Construction, 2. Aufl., CRC Press.
- [3] Sandberg, B. S.; Ahlborn, T. M. (1989) Combined Stress Behavior of Structural Glazing Joints, In: Journal of Structural Engineering, 115, S. 1212–1224.
- [4] Klosowski, J. M.; Wong, A. (1992) Shear Component of a Structural Sealant Glazing Joint. In: Science and Technology of Buildings Seals, Sealants, Glazing and Waterproofing, ASTM STP 1168, C. J. Parise (ed.) 97–105. ASTM International.

- [5] Hagl, A. (2016) Development and test logics for structural silicone bonding design and sizing, In: *Glass Structures & Engineering*, 1, S. 131–151.
- [6] Pröbster, M. (2013) *Elastisch Kleben: aus der Praxis für die Praxis*, 1. Aufl. Springer.
- [7] DVS Merkblatt 1618 (2002) *Elastisches Dickschichtkleben im Schienenfahrzeugbau*.
- [8] Recknagel, C.; Kaatz, R. (2015) Exploration and Evaluation of the Performance and Durability of SSG Systems by Dynamic-Mechanical System Testing, In: *Durability of Building and Construction Sealants and Adhesives: 5th Volume*, STP 1583, S. 235–264.
- [9] DOW Europe (2017) *Dow Corning 993 N, DOWSIL 993, DOWSIL 895 - Sealant used in structural sealant glazing systems to bond glass onto metal*, ETA-01/0005.
- [10] Drass, M.; Schneider, J.; Kolling, S. (2018) Novel volumetric Helmholtz free energy function accounting for isotropic cavitation at finite strains, In: *Materials & Design*, 138, S. 71–89.
- [11] Richter, C. (2018) *Vereinfachte rechnerische Last-Verformungsvorhersage von Klebfugen mit hyperelastischem Verhalten im Konstruktiven Glasbau*, RWTH Aachen University, Dissertation.
- [12] Ogden, R. W. (1972) Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids, In: *Pro-ceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Eng. Sciences*, 328, S. 567–583.
- [13] Richter, C.; Abeln, B.; Geßler, A.; Feldmann, M. (2014) Structural steel-glass facade panels with multi-side bonding – Nonlinear stress-strain behaviour under complex loading situations, In: *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, 55, S. 18–28.
- [14] Richter, C.; Abeln, B.; Geßler, A.; Feldmann, M. (2015) The Use of Structural Adhesives for Steel-Glass Facade Panels With Multi-Axial Stress-Strain Behavior – Experimental and Numerical Investigations, In: *Durability of Building and Construction Sealants and Adhesives: 5th Volume*, STP 1583, S. 349–375.
- [15] Drass, M.; Schwind, G.; Schneider, J.; Kolling, S. (2018) Adhesive connections in glass structures – part I: experiments and analytics on thin structural silicone, In: *Glass Structures & Engineering*, 3, S. 39–54.
- [16] Sikora, P. (2014) *Materialcharakterisierung und -modellierung zur Simulation von Klebverbindungen mit Polyurethanklebstoffen*, Universität Paderborn, Dissertation.
- [17] ANSYS (2017): *Dokumentation zu Ansys 18.1*.
- [18] Descamps, P., Kimberlain, J.; Bautista, J.; Vandereecken, P. (2016) Structural Glazing: Design under windload, In: *intelligent glass solutions (Proceedings to Glass Performance Days)*.
- [19] Abeln, B. (2019) *Bemessungskonzept für strukturelle Stahl-Klebung im Bauwesen*, RWTH Aachen University, Dissertation.
- [20] Feldmann, Reese, Reisgen (2019), *Methoden zur Auslegung und Simulation von Metall-Glas-Klebung im Bauwesen im Hinblick auf eine Versagensprognose, eingereichter Forschungsantrag*.