

Zur Versagensvorhersage von Silikon-Glas-Klebeverbindung mit LS-DYNA: Identifizierung von geeigneten Materialmodellen und -parametern

Dr.-Ing. Stefan Brendler, Regierungspräsidium Tübingen, Landesstelle für Bautechnik

Dr.-Ing. André Haufe, DYNAmore GmbH, Stuttgart

Abstract:

So far structural sealants for use in structural sealant glazing systems were dimensioned by simple hand formulas with a high, global safety factor. Hence the building authority has only allowed to realise rectangle sealant sections in typical civil engineering applications. The real stiffness and rigidity behaviour could neither be calculated nor simulated correctly with finite element calculations so far.

The present papers shows examples where the hyperelastic material law „SIMPLIFIED_RUBBER“ in LS-DYNA is used to correctly predict the load-displacement behaviour of sealant characterizing test specimen. The great accuracy between experiments and computed results are unique in the construction industry and have not been delivered before by other codes or constitutive models. Therefore it is believed that the present investigations can lead to a more thorough understanding of the load carrying behaviour of structural glazing components. From there engineering models that will allow a safe and economic design of more complex glass-adhesive connections may be developed.

Keywords:

Structural Glazing Silikon, MAT SIMPLIFIED RUBBER, konstruktiver Glasbau

1 Allgemeines und Motivation

Im konstruktiven Glasbau wird Glas zunehmend häufiger lastabtragend verklebt. Diese Lagerungsart muss ebenso dauerhaft und sicher sein wie herkömmliche mechanische Befestigungselemente. Verklebungen leiten Kräfte gleichmäßig und kontinuierlich, nahezu ideal für den Werkstoff Glas, in das angrenzende Bauteil ein. Dieses Fügeverfahren ist baurechtlich noch nicht allgemein anerkannt, es ist daher erforderlich das Bauvorhaben mit einer Zustimmung im Einzelfall zu begleiten. In Zustimmungsverfahren und den zugehörigen bautechnischen Prüfungen ist in der Vergangenheit aufgefallen, dass bei der Dimensionierung, der konstruktiven Umsetzung bis hin zur Ausführung der Klebefuge auf der Baustelle häufig Fehler gemacht werden. Vielfach wurde dabei über das vorhandene Sicherheitsniveau von Structural Glazing – Verklebungen - spekuliert. Die „zulässigen Spannungen“ werden in der Regel gegenüber den charakteristischen Bruchspannungen mit einem Faktor 5 bis 7 (z. B. [4], [3]) abgemindert. Dieser Faktor ist jedoch nicht zwangsläufig mit der Sicherheit der Konstruktion gleichzusetzen, da die tatsächlichen Beanspruchungen der Klebefugen in komplexen Fugengeometrien unbekannt sind.

Der vorliegende Aufsatz zeigt am Beispiel des Zweikomponenten - Silikon - Klebers DC 993 der Firma DOW CORNING, dass mit komplexen Materialmodellen von LS-DYNA, die hyperelastisches Werkstoffverhalten abbilden können, Aussagen über die tatsächlich vorhandene Sicherheit - auch an Mehrflankennähten - möglich sind. Erst mit diesem Wissen können sichere und vereinfachte Ingenieurmodelle zur Dimensionierung der Klebegeometrie abgeleitet oder Sondergeometrien wirtschaftlich bemessen werden.

Die grundsätzliche Eignung des Klebstoffs für die Anwendung im Bauwesen wird durch [3] bestätigt. Allerdings werden darin nur einige Klebstoffeigenschaften wie Tangenten - Elastizitätsmodul E_0 , zulässige Zugspannungen sowie die Untergründe geregelt. Nach Baurecht darf damit noch nicht gebaut werden, da nur die grundlegenden Eigenschaften festgelegt sind. Die eigentliche Bauart mit eventuell zusätzlich zu beachtenden systemabhängigen Bestimmungen muss mit einer Zustimmung im Einzelfall oder einer weiteren Zulassung geregelt werden. Hier gibt es Beispiele namhafter Systemhersteller - Maximalabmessungen, die Erfordernis von Nothaltesystemen, Festlegungen zur Dimensionierung bis hin zur Zusammensetzung des Reinigungswassers werden dabei festgelegt. Erfüllt die gesamte Konstruktion die sechs Grundsatzanforderungen der Bauproduktenrichtlinie:

- Schallschutz
- Wärmeschutz
- Feuchteschutz
- Brandschutz
- Tragsicherheit
- Gesundheitsschutz und Nutzungssicherheit

ist das System für Anwendungen im Bauvorhaben geeignet und darf eingebaut werden.

2 Stand der Technik

2.1 Allgemeines

Glas lässt sich mit Glas, Aluminium oder nichtrostendem Stahl mit Klebstoffen auf Basis von Silikon, Epoxydharz oder UV-Acrylaten verkleben [6], [10]. Im konstruktiven Glasbau haben sich Silikone bewährt. Verschiedene Systeme mit einer oder zwei Komponenten werden angeboten. Einkomponenten Silikone benötigen die Luftfeuchtigkeit zum Aushärten, sie sollten bei Klebstofftiefen über ca. 25 mm nicht eingesetzt werden - der innere Klebekern könnte nicht ausreichend aushärten.

Einige Fassadensysteme und Klebstofftypen wurden in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt. Trotzdem gibt es bis heute keine baurechtlich anerkannte Spezifikation, mit der eine tragende Glasverklebung allgemein gültig konstruiert und dimensioniert werden kann. Bisher sind lediglich einige Fassadensysteme mit rechteckigen Klebefugengeometrien, geklebt auf der Glasoberfläche, allgemein zugelassen. Gegenüber den Bruchlasten an Zugversuchen an H-Proben bei 23°C wird die Klebefuge mit vereinfachten Handformeln mit Sicherheiten von rund 6 dimensioniert.

Tragende Verklebungen im konstruktiven Ingenieurbau haben viele Vorteile und ermöglichen neue, bisher ungeahnte Anwendungen. Aufgrund der geringeren Werkstoffausnutzung wurde bei komplexen Bauwerken z. B. der Ganzglasbrücke in Schwäbisch Hall Bild 2.1 mit linear-elastischen Werkstoffformulierungen und ingenieurmäßigen Grenzfalluntersuchungen mit verschiedenen Steifigkeiten gearbeitet. In [7] wurden die Werkstoffeigenschaften bestimmt; neben der Steifigkeitszunahme infolge Querdehnungsbehinderung wirkt dabei auch die Druckbeanspruchung versteifend.

Mit Grenzfallbetrachtungen kann unter Umständen das globale Verformungsverhalten nachgebildet werden, allerdings erhöhen sich mit der Skalierung des Elastizitätsmoduls die im FE-Modell zurückge-

rechneten Spannungen. Da keine zugehörigen „zulässigen Spannungen“ zur Verfügung stehen, ist dieses Vorgehen nicht wirtschaftlich.



Architekt: Architekturbüro Kraft + Kraft
 Statische Bearbeitung: Ingenieurbüro Ludwig & Weiler, Augsburg
 Prüfenieur für Baustatik: Dr. Bornscheuer, Stuttgart
 Zustimmung im Einzelfall: Regierungspräsidium Tübingen
 Glaslieferant: Glas Trösch GmbH, Nördlingen
 Ausführende Firma: Glas Oswald GmbH, München

Bild 2.1: Ganzglasbrücke in Schwäbisch-Hall, geklebte Boden- und Deckenplatte

Die Dehnungsbehinderung an der Glasoberfläche beeinflusst das Steifigkeitsverhalten. Steifere Kleberegionen ziehen die Kräfte an und versagen in der Regel früher. Aus diesem Grund können Mehrflankenverklebungen oder vom Rechteck abweichende Klebenahquerschnitte nicht mit überschlägigen Handformeln bemessen werden.

Das Abschätzen des tatsächlich vorhandenen Sicherheitsniveaus einer beliebigen Klebegeometrien kann nur mit realitätsnahen Werkstoffmodellen auf numerischer Basis erfolgen. Schwierig sind in diesem Zusammenhang die Wahl eines geeigneten Werkstoffmodells und das Identifizieren der dazu erforderlichen Parameter. Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie eine komplizierte Klebenahgeometrie wirtschaftlich und sicher nachgewiesen werden kann?

2.2 Vereinfachtes Makroskopisches Werkstoffmodell

Die Klebung auf Aluminium erfolgt vorwiegend auf einer anodisch oxidierten Oberfläche. Die Anodisation dient bei Aluminiumoberflächen als Schutzschicht gegen Korrosion und zur dekorativen Oberflächengestaltung. Ob eine Oberfläche als definierte Haftfläche für eine Klebung geeignet ist, wird in Verfahrensprüfungen gemäß [ETAG 002] geprüft. Im Labor werden zeitraffende Versuche durchgeführt, damit alterungsbedingte Eigenschaftsänderungen erkannt werden. Für die Prüfungen sind vergleichende Probekörper zu verwenden. Diese müssen mit dem Klebstoff und gleichen Verarbeitungsparametern wie die reale Anwendung ausgeführt werden. Die Haftung (Adhäsion) zum Substrat ist der tragfähigkeitsbestimmende Faktor. Die Adhäsion des Klebstoffes auf der Substratoberfläche wird durch chemische und physikalische Bindungen und vom Zustand der Oberfläche beeinflusst. Eine glatte Glasoberfläche oder Glaskante (bruchblank oder poliert) ist die Voraussetzung für eine tragfähige Silikon-Verklebung.

Silikon besteht aus langkettigen Molekülen, die nach der Verarbeitung in ungeordneter Ausrichtung in der Klebenah liegen (Bild 2.1). Vereinfacht dargestellt, nimmt die Klebeverbindung so lange Energie auf und überträgt damit Lasten, bis die Molekülketten gestreckt sind. Bild 2.2 und Bild 2.3 zeigen den Zustand für unterschiedliche Einwirkungen kurz vor dem Bruch. Somit ist die eigentliche Bemessungsgröße eine maximale Dehnung des Klebstoffes. Nachfolgend werden mit geeigneten FE-Modellen die jeweils auftretenden Dehnungen berechnet. Bezugnehmend auf eine charakteristische Bruchdehnung lässt sich die tatsächlich vorhandene Sicherheit bestimmen.

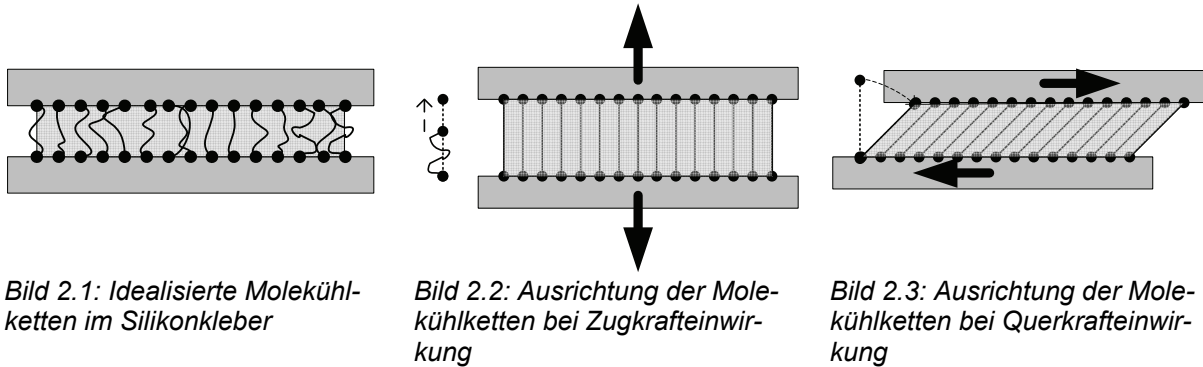


Bild 2.1: Idealisierte Molekülketten im Silikonkleber

Bild 2.2: Ausrichtung der Molekülketten bei Zugkrafteinwirkung

Bild 2.3: Ausrichtung der Molekülketten bei Querkrafteinwirkung

2.3 Werkstoffmodelle von LS-DYNA zur Simulation von Silikon-Verklebungen

2.3.1 LINEAR ELASTISCH

Die einfachste Nachbildung des Werkstoffverhaltens von Silikon ist das linear elastische Werkstoffverhalten nach Hook. Structural Glazing Silikon ändert seine Steifigkeit je nach Dehnungszustand deutlich. Dies kann mit einem linear elastischen Modell nicht beschrieben werden. Selbst nach Zulassung geregelte rechteckigen Fugengeometrien können mit den ausgewiesenen zulässigen Spannungen nicht mit FE nachgerechnet werden. An den dehnungsbehinderten Oberflächen treten Umlenkkräfte und damit hohe Spannungen auf. In der Klebstoffmittelfläche stimmen die mit FE berechneten Spannungen dagegen mit den vereinfachten Handformeln überein.

2.3.2 MOONEY-RIVLIN

Die bisher baurechtlich zugelassenen Structural Glazing Silikone weisen einen nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang auf. Ferner sind Dämpfungs- und verformungshistorische Effekte sowie eine ausgeprägte Inkompressibilität aus Versuchsdaten zu erkennen. Wird der Werkstoff gedehnt, baut sich ein Widerstand auf. Der Winkel zwischen langkettigen Makromolekülen wird bei einer Verstreckung des Moleküls quasi ohne Energieaufwand (reibungsfrei) geändert. Durch das Ausrichten der Makromoleküle wird Energie gespeichert. Wird die äußere Kraft entfernt, so führt eine Energieaufnahme aus der Umwelt (Wärmezufuhr) dazu, dass die Moleküle sich wieder verdrehen, der Werkstoff zieht sich wieder zusammen. Diese Effekte werden auch als Gummielastizität (Entropieelastizität) oder unter quasi-statischen Bedingungen als Hyperelastizität bezeichnet.

Häufig werden zur Beschreibung des Verhaltens Green'sche Materialmodelle verwendet. Dabei wird aus der Energiedichte als Funktion der Dehnungen die Spannung berechnet, so dass auch nichtlineare Zusammenhänge modelliert werden können. Bekannte Ansätze für die Energiedichte sind neben Mooney-Rivlin, auch Neo-Hooke'sche, Yeoh oder Ogden Modelle. In den bisher vorgestellten Veröffentlichungen zu diesem Thema wurden Glas - Silikon - Verklebungen meist mit dem Zwei-Parameter-Werkstoffmodell „Mooney Rivlin“ untersucht.

2.3.3 SIMPLIFIED RUBBER

Die Materialformulierung „SIMPLIFIED RUBBER“ kann in LS-DYNA zur Abbildung des Verhaltens von Gummi und Schäumen verwendet werden. Grundlage des Werkstoffgesetzes sind Messdaten aus einem einaxialen Zugversuch. Versagen oder Schädigungen der Verklebung können mit den Erweiterungen „WITH FAILURE“ oder „WITH DAMAGE“ in der Simulation berücksichtigt werden. Im Folgenden wird mit diesem Materialmodell weitergearbeitet.

2.4 Werkstoffeigenschaften

Einige Klebstofftypen sind über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung geregelt. In Tabelle 2.1 sind die mechanischen Kennwerte aus den Zulassungen zusammengestellt.

Tabelle 2.1: Werkstoffeigenschaften zugelassener SG Silikone

| Name des Klebstoffs, Hersteller | σ_{des} [N/mm ²] | τ_{∞} [N/mm ²] | $\tau_{\text{des kurz}}$ [N/mm ²] | E_0 [N/mm ²] | G_0 [N/mm ²] |
|------------------------------------|---|---|--|-------------------------------|-------------------------------|
| DC 3362, DOW CORNING | 0,14 | - | 0,11 | 2,4 | 0,8 |
| DC 895, DOW CORNING | 0,14 | - | 0,14 | 0,9 | 0,3 |
| DC 993, DOW CORNING | 0,14 | 0,011 | 0,105 | 1,4 | 0,47 |
| Sikasil SG 500, SIKA | 0,14 | 0,0105 | 0,105 | 1,5 | 0,5 |

2.5 Formeln zur Dimensionierung nach ETAG 002 Anhang A

In [2] werden im Anhang A Handformeln zur Dimensionierung von Klebenähten gegeben. Es dürfen ausschließlich im Querschnitt rechteckige Klebenähte auf einer Glasoberfläche (siehe [2]) ausgeführt werden.

Die Vorgaben der Zulassungen können teilweise auf den Einsatz in Sonderkonstruktionen übertragen werden. Im Einzelfall ist die zuständige Behörde frühzeitig einzuschalten. Die Zulassungen schlagen als Tragsicherheitsnachweis der Verklebungen Handberechnungen vor. Die Normalspannungen ermitteln sich nach (2.1) zu Kraft bezogen auf die Klebefläche.

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{Fuge}}} \quad (2.1)$$

In der Entstehungsphase der EOTA-Leitlinie [2] erschien dieser Ansatz als zu grob vereinfachend, so wird seither in Fachkreisen von der „Mickey-Mouse-Formel“ gesprochen. Trotz Widersprüche gegen diese Vorgehensweise, wurden alle detaillierteren Nachweisformen, die z. B. auch eine Rotation der Klebenahnt berücksichtigt hätten, zugunsten dieser groben Näherung verworfen.

Der Querkraftnachweis erfolgt nach (2.2). Der Einfluss der Relativverschiebungen der Klebepartneroberflächen, die Schubbeanspruchung, darf nicht unterschätzt werden. Qualifizierte Querkraftnachweise, die alle Längenänderungen der Klebepartner, besonders der Temperaturendehnungen, berücksichtigen werden in der Praxis aus Unkenntnis sehr häufig nicht geführt.

$$\tau = G \frac{\Delta l}{h} \quad (2.2)$$

Versucht man mit der Methode der Finiten Elemente und linear elastischen Materialmodellen zugelassene Fassadensysteme nachzuweisen, so werden bei den Maximalabmessungen die berechneten Spannungen deutlich über den zulässigen Werten der Klebstofftypenzulassungen [3] oder [4] liegen. Grund ist die Querkzugbehinderung an der Glasoberfläche, die zu hohen Sekundärspannungen führt. Nur in der Klebenahntmittelfläche werden die gleichen Spannungen wie in der Handrechnung nach (2.1) und (2.2) geliefert.

3 Werkstoffverhalten des Strucural Glazing Silikon Klebstoffs

3.1 Versuchsergebnisse aus Zugproben

In [6] wird zum Nachweis einer Silikonverklebung ein Zweiparameter Werkstoffmodell von „Monley-Rivlin“ vorgeschlagen. Damit werden realistischere Spannungen als mit linear elastischem Ansatz berechnet. Im vorliegenden Fall wurde ein Isolierglasdichtstoff nach [4] verwendet. In Vergleichsberechnungen des Zugversuchs konnte das Steifigkeitsverhalten des Klebstoffs mit diesem Materialmodell nur global angenähert werden. Die extreme Steifigkeitsänderung des Werkstoffs wird nach Meinung der Autoren nicht hinreichend erfasst. Nur mit aufwändigeren Materialmodellen wie z. B. MAT_SIMPLIFIED-RUBBER oder MAT_SAMP (siehe [9] & [12]) ist die sich stark ändernde Anfangssteifigkeit realitätsnah zu erfassen. Letzteres eignet sich dabei eher für Epoxydharze.

Zur Parameteridentifikation für das Materialgesetz „SIMPLIFIED RUBBER“ dient der einaxiale Zugversuch nach Bild 3.1. Als Werkstoffprobe wird ein Silikonquader mit den Nennabmessungen: B = 4 mm, D = 6 mm, L = 25 mm herangezogen.

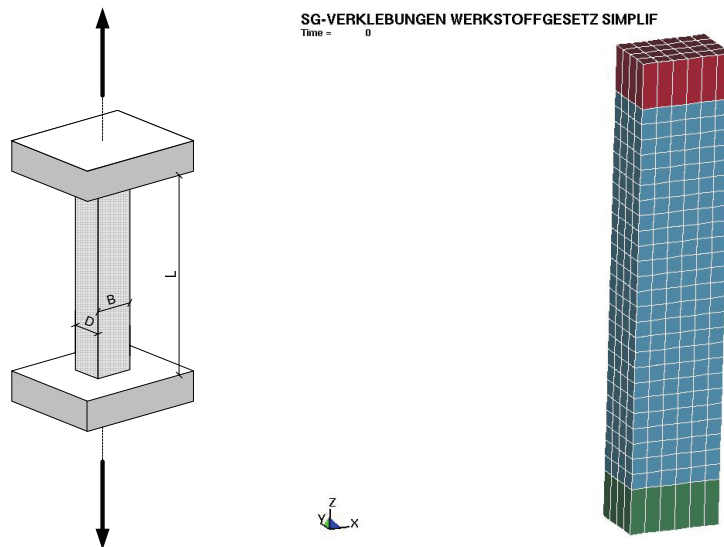


Bild 3.1: Geometrie des Zugversuchs und FE-Modell

Bild 3.2 zeigt eine Hystereseschleife eines Zugversuchs mit Be-, End- und Wiederbelastung. In den Messdaten ist die belastungsinduzierte Entfestigung des „Mullins-Effekt“ deutlich zu sehen. Die in der Erstbelastung vorhandene Steifigkeit wird in der anschließenden Wiederbelastung ebenfalls erreicht. Als Grundlage für die Materialmodellierung wurde der Mullins-Effekt „herausgeschnitten“ und der anschließende Kurvenabschnitt verschoben, so dass die Kurve kontinuierlich steigt. Nach einer Glättung mit einem hochfrequenten Filter entstand aus den Messdaten die Referenzkurve „MAT mod geglättet“ in Bild 3.3. Bei kleinen Verschiebungen bis 5 mm liegt die geglättete Kurve etwas unter den Messdaten.

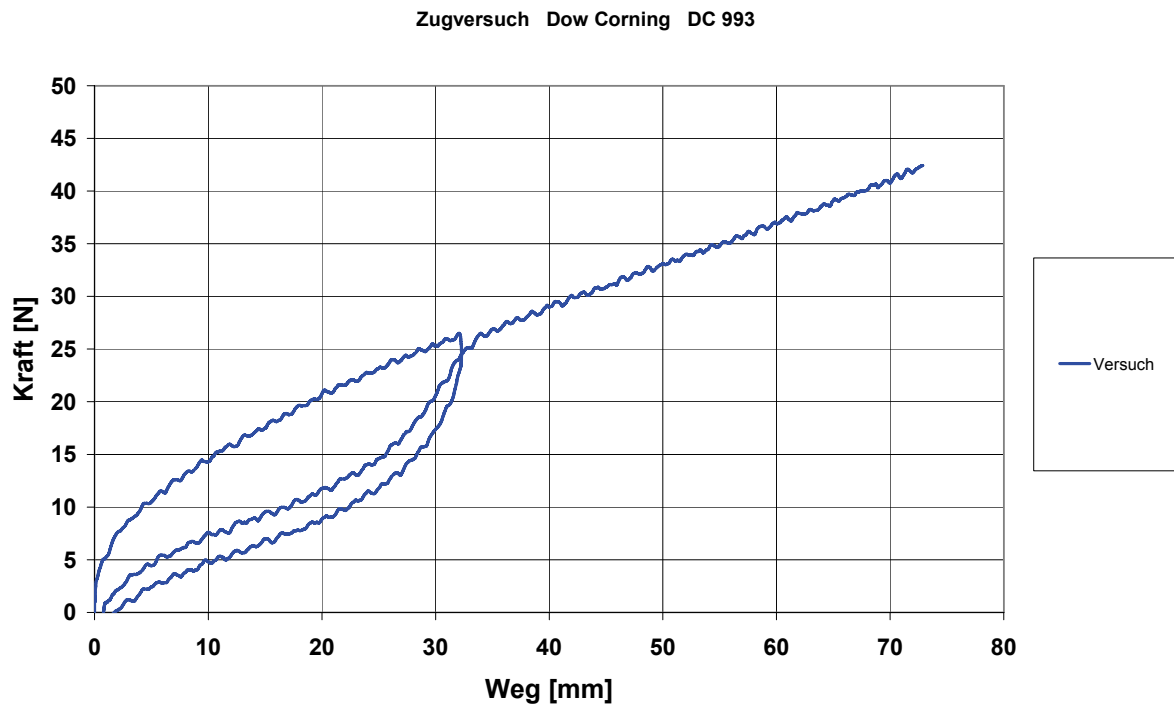


Bild 3.2: Weg-Kraft-Diagramm, Daten aus [6]

Der Kompressionsmodul K kann nach (3.1) abgeschätzt werden. Idealisiert man das Werkstoffverhalten von DC 993 mit einem Hookschen Werkstoffgesetz, erscheint die Steifigkeit abhängig von der Klebenachtgeometrie. Im Zugversuch gemäß ETAG 002 an einer „Spaghetti“, einem Zylinder mit $2,2 \pm 0,2$ mm Durchmesser (Maß ist zu kontrollieren) ergibt sich der Wert für $E = 1,2$ N/mm². An H-Proben (siehe 3.2) ermittelt man Werte zwischen 4 bis 5 N/mm².

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (3.1)$$

Die Berechnungsergebnisse sind den Versuchsergebnissen in Bild 3.3 gegenübergestellt. Wichtig ist, dass die hohe Steifigkeitsabnahme bei zunehmender Dehnung richtig abgebildet wird.

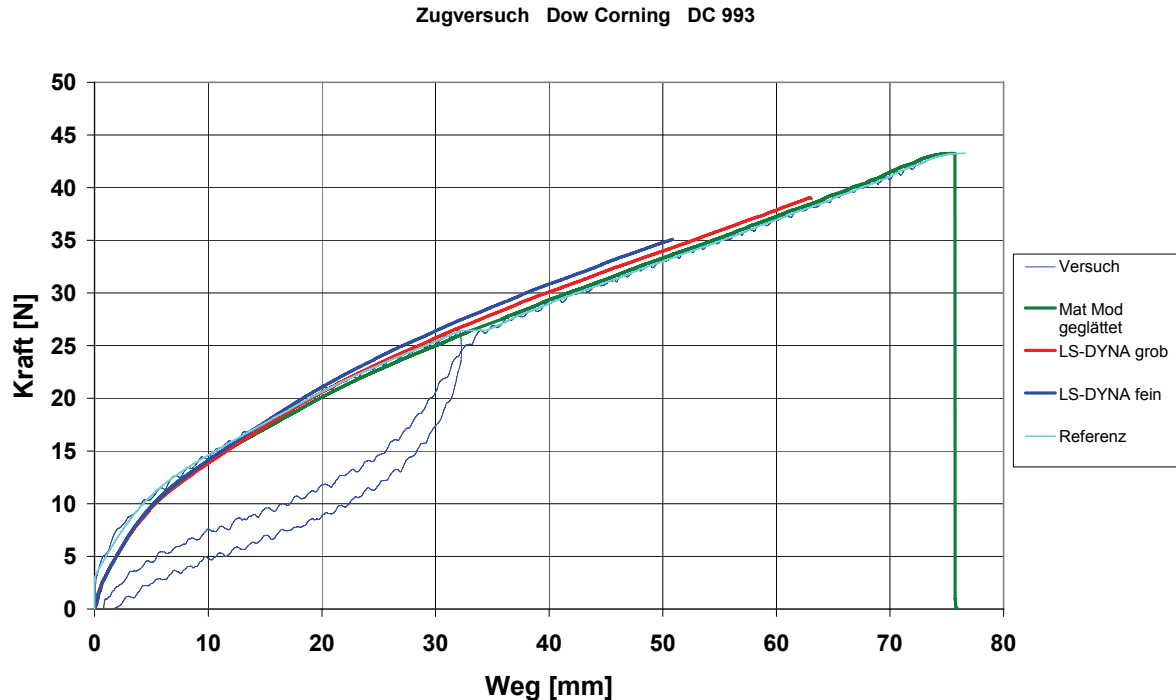


Bild 3.3: Gegenüberstellung LS-DYNA Zugversuch [6]

3.2 Versuche an „H-Proben“ - Werkstoffstreungen

Gemäß [2] werden Kleinproben gefordert, die für jede Klebstoffcharge während der eigentlichen Fertigung herzustellen sind. Zwischen zwei kleine Glastafeln wird eine U-förmige Schalung eingelegt, die mit Klebstoff gefüllt wird. Im Querschnitt betrachtet, ergibt sich die Form des Buchstabens H (Bild 3.4).

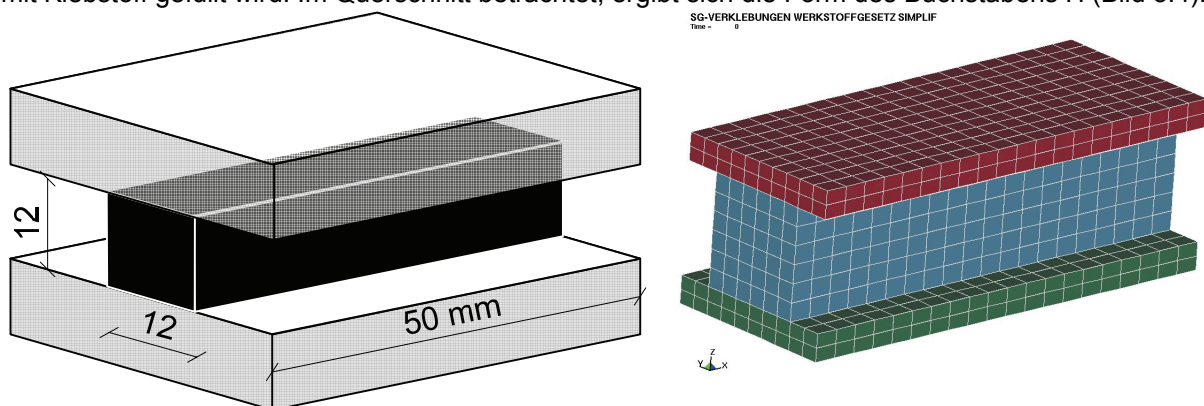


Bild 3.4: Geometrie der H-Proben und FE-Modell

3.2.1 Zugversuch H-Probe

Im Bauwesen werden Verklebungen mit den Handformeln nach (2.1) und (2.2) dimensioniert. Im Fassadenbau zeichnet sich ein Trend nach immer größeren Glastafeln ab, und so ist es nicht verwunderlich, dass bei bautechnischen Prüfungen hin und wieder Spannungsüberschreitungen aufgedeckt werden. Erschreckend ist dabei der sorglose Umgang der Anwender, die sich regelmäßig auf die vermeintlich vorhandene sechsfache Sicherheit in der Bemessung verlassen (Zur tatsächlich vorhandenen Sicherheit siehe [5]) mit rechnerisch ermittelten Spannungsüberschreitungen.).

Zur Klärung der Frage des charakteristischen Widerstandes und damit der vorhandenen Sicherheit wurden aus dem Erfahrungsschatz der Landesstelle Versuchsergebnisse von 55 H-Zugproben mit den Abmessungen 12 mm x 12 mm x 60 mm (Die Kontrollproben gemäß [2] sind 50 mm lang) in Bild 3.5 überlagert. Global betrachtet, lässt sich das charakteristische Steifigkeitsverhalten des Silikon-Klebstoffs mit einer deutlichen Steifigkeitsabnahme bei höheren Kräften bzw. Dehnungen erkennen. Allerdings streuen die Bruchdehnungen und die Bruchkräfte deutlich. Neue Proben erreichen Bruchkräfte bis 700N. Von allen künstlich gealterten Proben werden nach der Maximalkraft, meist mit einem nichtlinearen Entfestigungsverlauf, Bruchdehnungen über 150% erreicht. Die Prüfcharge bei hohen Temperaturen von 80°C zeigt eine Schwächung, es wurden nur noch Bruchkräfte zwischen 400 und 600 N bei Dehnungen zwischen 100 bis 120 % erreicht.

Die Berechnung des charakteristischen Widerstands mit statistischen Methoden bei breit streuenden Versuchsergebnissen ist nicht in allen Fällen sinnvoll, da es dem Werkstoff unter Umständen nicht gerecht wird. Hilfreich wäre die Definition eines Versagenskriteriums wie z. B. ein Maß der Steifigkeitsabnahme. Den Autoren ist nicht bekannt, welcher charakteristische Widerstand die Grundlage der abZ [3] bildet. Deshalb wurden aus den nach abZ [3] zulässigen Werten die dazu gehörenden Kräfte und Dehnungen zurückgerechnet. Dieser Punkt ist in Bild 3.5 mit abZ beziffert. Erhöht man diese Werte mit dem (Sicherheits-)Faktor 6 erhält man den Punkt (6xabZ).

Bild 3.5 verdeutlicht, dass der Sicherheitsfaktor von 6 nicht in allen Fällen enthalten ist.

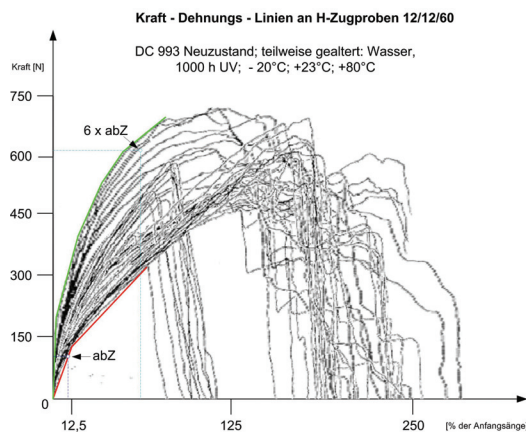
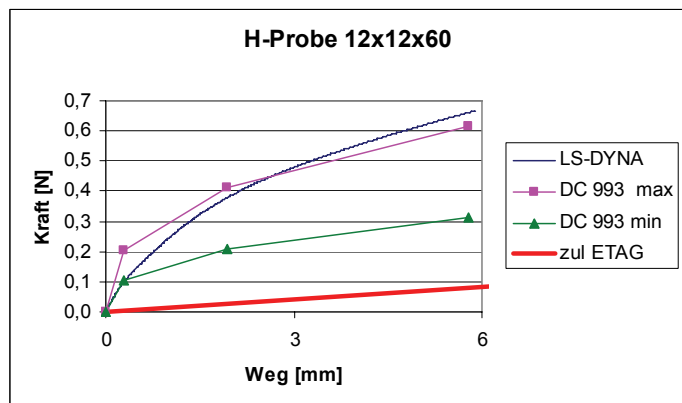


Bild 3.5: Weg-Kraft-Diagramm aus 55 H-Zugproben-Proben: neu, teilweise gealtert, UV, Wasser, Temperatur, Daten [1]



Vergleich Berechnungsergebnisse Versuch

Nach Meinung der Autoren ist die Werkstoffcharakterisierung für diesen Klebstoff hinreichend genau, wenn die Ergebnisse innerhalb des von den grünen und roten Linien aufgespannten Wertebereichs liegen.

3.2.2 Querzugversuche (Schub)

Der Schubspannungsnachweis nach (2.2) orientiert sich an dem Werkstoffverhalten herkömmlicher Baustoffe wie Stahl und Holz, verbaut in Biegeträger und -balken. Diese Modellvorstellung bildet die Tragfähigkeit und die Verschiebung auf der sicheren Seite, jedoch stark vereinfachend ab. Bild 2.3 zeigt eine andere Modellvorstellung mit der Ausrichtung der Makromoleküle. Bild 3.6 zeigt eine H-Schubprobe nach dem Bruch. Der Bruchverlauf ist gezackt. Sind ausgerichtete und gereckte Makromoleküle überbeansprucht reißen sie; die charakteristischen Bruchflächen quer zur Molekülkette entstehen. In Bild 3.7 ist zur Verdeutlichung die Modellvorstellung der Moleküle eingezeichnet.

In der Realität sind damit Regionen im Werkstoff, die entsprechend der Einwirkung gerichtete Dehnungen aufweisen. Das Materialmodell SIMPLIFIED RUBBER ist in der Lage diese Effekte realitätsnah nachzubilden. Mit dem gleichen Werkstoffmodell der Versuche aus den Abschnitten 3.1 und 3.2.1 wird eine H-Proben, belastet mit Querzug berechnet. In diesem Beispiel waren die Abmessungen der Referenzproben 12 mm x 12 mm x 50 mm. Die Übereinstimmung der LS-DYNA Berechnungsergebnisse mit den Referenzkurve in

Bild 3.8 bestätigen die Eignung des Materialmodells. Eingezeichnet sind die „weichste“ und die „steifste“ Kraft-Weg-Kurve aus einer Fremdüberwachung für ein Bauvorhaben mit 5 Proben.



Bild 3.6: Schubbruch einer H-Probe; Bild: S. Koch Bild 3.7: Idealisiert eingezeichnete Makromoleküle vor dem Bruch

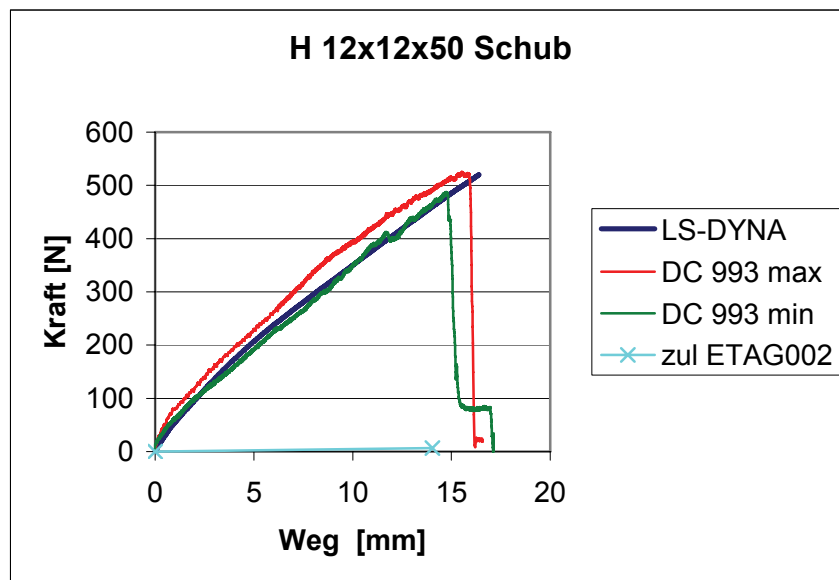


Bild 3.8: Vergleich Messdaten und LS-DYNA Berechnungsergebnisse an der H-Schubprobe

4 Ausblick

4.1 Bruchkriterium – Dimensionierung – Sicherheit

Es wurde gezeigt, dass das in LS-DYNA zur Verfügung stehende Materialmodell das komplexe Tragverhalten von Silikon realitätsnah erfassen kann. Zur Klärung von Grundsatzfragen und Produktentwicklung von SG-Systemen ist LS-DYNA das Mittel der Wahl.

Die Versuchsergebnisse der Zugproben in Bild 3.5 belegen eine starke Streuung der Bruchkraft. Bisher waren die Ergebnisse der Proben bei 23°C Bezugswerte für die Dimensionierung. Allerdings weisen die warmen Proben geringere Festigkeiten auf. Damit hat eine Klebnaht im Sommer eine geringere Tragfähigkeit bzw. Sicherheit. Wie hoch diese tatsächlich ist weiß bisher niemand genau. In systematischen Versuchsserien könnten hierzu Referenzdaten des Zugversuchs nach Abschnitt 3.1 mit unterschiedlich vorbereiteten Zugproben durchgeführt werden. Ausgehend von neuen, gealterten, kalten und warmen Proben könnte somit bei Festlegung eines sinnvollen Versagenskriteriums, z. B. einer definierten Steifigkeitsabnahme, charakteristische Tragfähigkeiten ermittelt werden.

Werden diese Erkenntnisse in eine FE-Berechnung mit dem vorgestellten Werkstoffmodell übernommen, lässt sich die zugehörige charakteristische Bruchspannung des Klebstoffs berechnen. Danach könnten beliebige Klebstoffgeometrien auf einem einheitlichen Sicherheitsniveau dimensioniert werden.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen ließen sich vereinfachte FE-Modellansätze z. B. mit Pendelstäben mit wirksamer Dicke erarbeiten. Dies hätte den Vorteil, dass dem praktisch arbeitenden Ingenieur ein vereinfachtes FE-Modell zur Verfügung steht, mit dem reale Bauvorhaben sicher und wirtschaftlich dimensioniert werden können.

4.2 Komplexe Geometrien – dynamisch beanspruchte Verklebungen

LS-DYNA ermöglicht den Einsatz in sehr komplexen Klebenah-Geometrien unter vielfältigen Einwirkungen. Die Abbildungen in *Bild 4.1* zeigen geschoßhohe Ganzglasecken. Die komplexe Klebegeometrie ist in *Bild 4.2* dargestellt. Diese Fugen und Glastafeln können nicht mehr mit den konventionellen Handformeln bemessen werden.

Im konstruktiven Glasbau übernehmen Verklebungen bei Lärmschutzwänden an Autobahnen oder in explosionshemmenden Fassaden Nothaltefunktionen für gebrochene Verbund-Sicherheitsglaselemente, siehe hierzu [8], [13]. Weitere Hinweise über Ausführung von Ganzglasecken finden sich in [11]. Für diese Untersuchung wurden die realisierten Lärmschutzwände in FE-Modelle umgesetzt *Bild 4.3* und *Bild 4.4*.

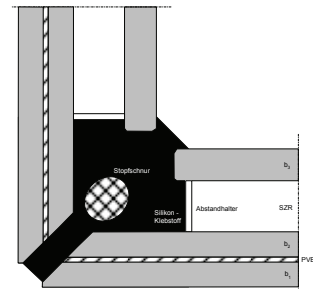
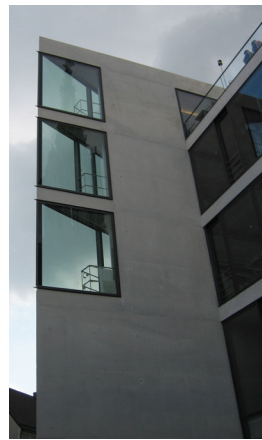
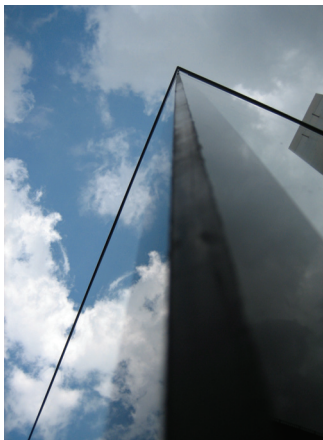


Bild 4.1: Geklebte Ganzglasecken (Münstertor Ulm) Fotos: S. Brendler

Bild 4.2: Detail der ausgeführten Klebefuge

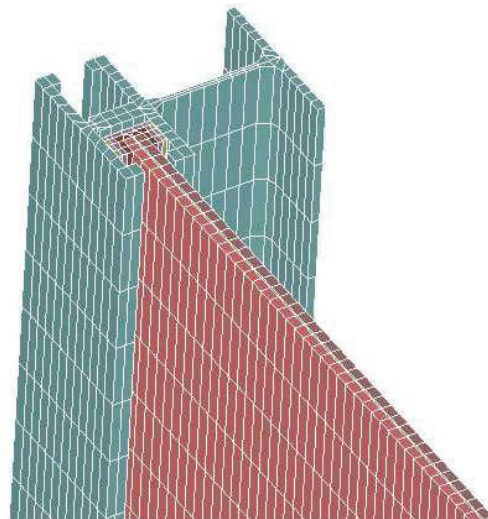
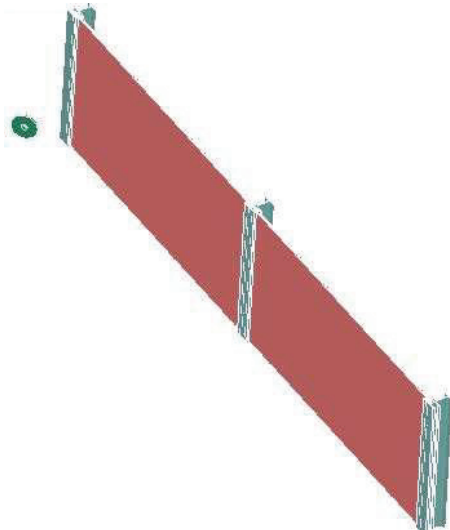


Bild 4.3: FE-Modell der Lärmschutzwand

Bild 4.4: Detail der Nothalterung in Anlehnung an [8]

5 Zusammenfassung

Die Auswertung zahlreicher nominal gleicher Versuche zeigt, dass die Werkstoffeigenschaften des Structural Glazing Silikon Klebers streuen. Die Festigkeit wird von der Lastrichtung, Temperatur, Alter, den Umgebungsbedingungen (Wasserlagerung, Salzsprühnebel, SO₂-Belastung, Reinigungsmittel etc.) beeinflusst. Bisher wurden diese Kleber mit einfachen Handformeln und einem hohen, globalen Sicherheitsabschlag dimensioniert. Das tatsächliche Steifigkeitsverhalten konnte nicht berechnet werden.

Mit FE-Modellen und dem hyperelastischen Materialgesetz des Typs „SIMPLIFIED_RUBBER“ können die Kraft-Weg-Verläufe aus unterschiedlichen Versuchen mit LS-DYNA mit guter Übereinstimmung simuliert werden. So können Dehnungen im Klebstoff realitätsnah abgebildet und einheitliche Versagenskriterien definiert werden. Auf diese Weise können mit Structural Glazing Silikon geklebte Glas-konstruktionen sicher und wirtschaftlich bemessen werden.

6 Danksagung

Die Autoren danken Herrn Professor Bucak und Herrn Dipl.-Ing. (FH) S. Koch für die Messdaten und Fotos.

7 Literatur

- [1] Erfahrungsschatz der Landesstelle für Bautechnik; Versuchsdaten aus Versuchsberichten; Autoren und Projektnamen können nicht veröffentlicht werden
- [2] ETAG Nr. 002 Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems – SSGS) Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme vom Juli 1998, Europäische Organisation für technische Zulassungen (EOTA), rue du Trône 12 Troonstraat, B-1000 Brussels
- [3] European Technical Approval ETA-01/0005 „DC 993 und DC 895 Structural sealants for use in structural sealant glazing systems“ vom 20.06.2006, 11 Seiten, 1 Anhang.
- [4] European Technical Approval ETA-03/0003 „DOW CORNING 3362 Sealant used in structural and non-structural edge seal of insulated-glass unit for use in structural sealant glazing systems“ vom 10.04.2003, 10 Seiten.
- [5] Hagl A.: Bemessung von struktural Silikon-Klebungen, Stahlbau 76 (2007), Heft 8 S. 569-581
- [6] Hagl A.: Kleben im Glasbau, Stahlbau-Kalender 2005, Ernst & Sohn 2005 Ernst & Sohn 2005, ISBN: 3-433-01721-2, S. 819- S. 861
- [7] Heather L. C.-H., Karl J. R.: Testbericht Bestimmung der Materialeigenschaften von DC 993 für FEA Modellierungen, 2001
- [8] Hess R.; Bau und Konstruktion von Lärmschutzwänden aus Glas, Vortrag, Glas im konstruktiven Ingenieurbau FH München 2007
- [9] Kolling S., Haufe A. (2005): A constitutive model for thermoplastic materials subjected to high strain rates, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, PAMM, Vol. 5(1), pp. 303-304.
- [10] Peters S.: Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen, Dissertation 2006 Universität Stuttgart
- [11] Schneider J., Siegele K.: Glasecke, Deutsche Verlags-Anstalt, ISBN: 3421034141, 2005
- [12] Software-Code und Handbuch LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation
- [13] Wagner, Maier; Expositions-hemmende Fassaden, Vortrag, Glas im konstruktiven Ingenieurbau FH München 2007

