

Die Innovation - Kleben

Aktuelles aus der „Arbeitsgruppe Kleben“ des Fachverband Konstruktiver Glasbau - FKG

Zusammenfassung

Wesentliche Motivation zur Gründung der Arbeitsgruppe war, dass sich Silikonverklebungen - im Bauwesen seit langem bekannt - in den vergangenen Jahren einen großen Einsatzbereich auf dem Gebiet der Fassadenverglasung erobert haben. Vorrangiges Einsatzgebiet war lange Zeit fast ausschließlich die Abdichtung von Wetterfugen und der Randverbund von Isolierglaseinheiten.

Aufgrund seiner Eigenschaften bietet der Werkstoff Silikon das Potenzial, über die Dichtwirkung hinaus, tragende Funktionen bei Fassadenkonstruktionen zu übernehmen. Eine Europäische Richtlinie (ETAG 002) regelt derzeit die konstruktiven Randbedingungen von Silikon für linienförmige Verklebungen. Trotzdem ist das Wissen bezüglich der tatsächlichen mechanischen Eigenschaften von Silikon noch begrenzt, so dass beim Einsatz von Verklebungen mit beliebiger Fugengeometrie in großem Maß auf Versuche zurückgegriffen werden muss. Wirkliche Werkstoffkennwerte und -gesetzmäßigkeiten, die ein ingenieurmäßiges Dimensionieren (Berechnen mit FEM) allgemeiner Fugengeometrien ermöglichen, sind zudem unbekannt. Der nach ETAG durchzuführende Zugversuch ist außerdem zur direkten Bestimmung der Festigkeitswerte von Silikon nur bedingt geeignet, da Randeffekte zur Spannungskonzentration in den Probekörpern führen und so Rückschlüsse auf das Festigkeitsverhalten des eigentlichen Werkstoffs nur eingeschränkt möglich sind.

Das in der Arbeitsgruppe erarbeitete Versuchsprogramm dient dazu, durch das Zusammenspiel von Experiment (Werkstoffversuche) und Theorie (Nachrechnung mit FEM), theoretische Modelle für den Werkstoff Silikon zu entwickeln. Wesentliche Zielsetzung ist das Schaffen von Bemessungsdaten für komplexere Verklebungsgeometrien im Bereich des Structural Glazing.

Durch das erlangte Wissen wird es künftig möglich sein:

- Verklebungsgeometrien frei zu gestalten,
- sie hinsichtlich eines möglichst günstigen Versagensmechanismus zu optimieren,
- einfache Formeln und Kennwerte für den Entwurf beliebiger Verklebungen heranzuziehen,
- umfangreiche Versuche bei jeder einzelnen Anwendung einzuschränken, bzw. zu vermeiden.

Als Erweiterung des bisherigen Arbeitsprogramms ist vorgesehen in Kürze auch Verklebungen mit Duromeren (z. B. Acrylate, Epoxidharze) zu untersuchen.

The Innovation – Bonding, Conclusion

Essential motivation for establishing the workgroup “Bonding” was that silicone bondings – in the structural engineering well known - received a great importance in the past years regarding application for structural glazing. Long times the application of silicones was only the usage in weather sealings and for sealings of insulated glass units. Due to the special properties of silicone this material has certainly the potential, in addition to the weather seal purpose, to take over also load bearing functions. The European Technical Guideline ETAG 002 regulates actually the constructive requirements of line shaped silicone bondings. Nevertheless the knowledge of the real parameters of the pure material and its mechanical properties is very limited. This is the reason, that for using a silicone bonding, planned by engineering principles, experiments are necessary in wide areas. Reliable parameters and material properties are widely unknown, so the sizing of a general bonding geometry with using Finite Element Analysis is unsatisfactory. The ETAG test specimen for tension is moreover unsuitable for retrieving direct material properties, due to edge effects leading to stress concentrations within the specimen. Therefore getting real parameters of the silicone material out of this kind of tests is nearly impossible.

In the working group focus has been given at the development of theoretical models for the material silicone by a combined approach of experiment (material tests) and theory (analysis by FEM). Main objective is the establishment of design criteria for complex bonding geometries by application of engineering principles in area of structural glazing. Based on the gained experience it will be possible in future:

- to design arbitrary bonding geometries
- to optimise them with respect to the most possible failure mechanism
- to use simple formula and criteria for the design of arbitrary kinds of bondings
- to limit extensive testing for each application.

Extending the existing work program, it is envisaged in the short term to analyse bonding systems by duromer adhesives (e.g. acrylate, polyurethane).

1. Motivation und Ausgangssituation

1.1. Geklebt hat man schon immer

Das Kleben ist eine der ältesten Verbindungstechniken überhaupt, selbst „Ötzi“ war im Besitz eines „prähistorischen Uhu“ gekocht aus Birkenwurzeln [1]. Hatten unsere prähistorischen Vorfahren oft zum Kleben keine Alternativen, da geeignete mechanische Verbindungsmethoden noch ihrer Entdeckung harften, erscheint uns heute diese Verbindungstechnik als Anwendung im Bauwesen vordergründig als unsicher. Dennoch hat sich diese Technologie seit vielen Jahren im Automobilbau und in der Luft- und Raumfahrt ein weites Einsatzfeld erobert. Diverse Forschungsvorhaben beschäftigen sich derzeit daher mit der künftigen Anwendung der Klebtechnologie. Selbst im Bauwesen sind Klebstoffe seit sehr langer Zeit in Gebrauch. Bauwerke wie z. B. das Bicton Palm House in Devon (Bild 1) wären ohne „Verklebung“ der Glasplatten mit den filigranen Eisenprofilen mit dem damals üblichen „Klebstoff“ (Kitt - aus Leinöl und Kreide) in ihrer Transparenz nicht denkbar.

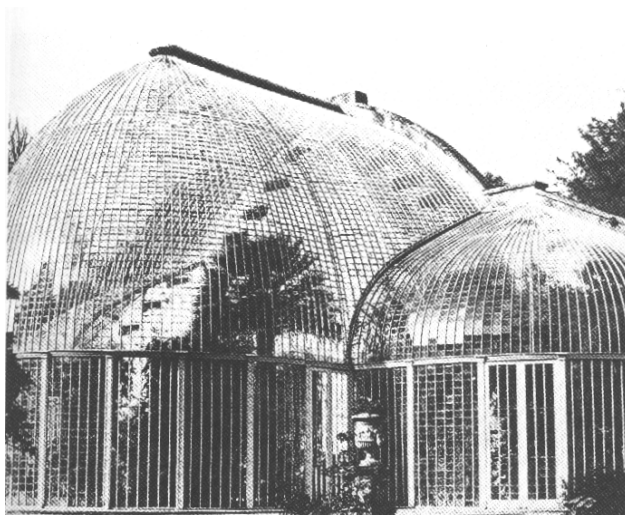


Bild 1: Bicton Palm House, Devon, erbaut 1820

Fig. 1: Bicton Palm House, Devon, built in the year 1820

1.2. Motivation zur Gründung der „Arbeitsgruppe Kleben“ des FKG

Obwohl der Silikonwerkstoff über seine reine Dichtfunktion hinaus, überragende mechanische Eigenschaften gezeigt hat, steht dem Ausschöpfen der vollen Leistungsfähigkeit von Silikon im Bauwesen eine nur begrenzte Kenntnis der mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise des Tragfähigkeitsvermögens entgegen. Als auf europäischer Ebene maßgebendes Regelwerk für die Auslegung von Verklebungen sei hier die ETAG No. 002 [2] genannt. Die DIN 13022 befasst sich allgemeiner mit der Auslegung von verklebten Fassadenkonstruktionen, sie ist jedoch in Deutschland nicht bauaufsichtlich eingeführt. Beide Regelwerke beziehen sich jedoch lediglich auf eine linienförmige Verklebungsgeometrie, sodass Fragen hinsichtlich der Auslegung allgemeinerer

Verklebungsgeometrien offen bleiben. Ausgehend von der Anwendung einer komplexen tragenden Verklebung bei dem Neubau der Herz-Jesu-Kirche in München [3] stellte sich daher die Frage nach der tatsächlichen Tragfähigkeit des Werkstoffs Silikon und der ingenieurmäßigen Rahmenbedingungen für allgemeine Verklebungsgeometrien, die nach derzeitigem Stand der Technischen Regelung offen sind. Dies war der Ansatzpunkt für die Gründung der „Arbeitsgruppe Kleben“ des FKG.

1.3. Stand des technischen Regelwerks

Derzeit regelt die ETAG 002 (European Technical Approval Guideline: Richtlinie für Europäische Technische Zulassung) auf europäischer Ebene den Einsatz von tragenden Verklebungen für Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing System: SSGS). Diese Richtlinie regelt den Einsatz für das Gesamtsystem einer lastabtragenden Glasfassade mit Vorgaben für die zu verklebenden Baustoffe. Die ETAG 002 stellt eine Rahmenrichtlinie dar, die Regeln für allgemeine Bauaufsichtliche Zulassungen auf Europäischer Ebene aufstellt. Diese Richtlinie geht dabei davon aus, dass als Verklebungsmaterial ein Silikon-Elastomer zur Anwendung kommt und die Klebefuge linienförmig ausgeführt wird. Sie bezieht sich nur auf den genau spezifizierten Anwendungsbereich tragender Verklebungen bei Glasfassaden und enthält auch Vorgaben zur Dimensionierung von linienförmigen Klebefugen. Eine Beurteilung von allgemeinen Verklebungen ist somit auf der Basis der ETAG 002 nur eingeschränkt möglich. Im Vorfeld der Ausarbeitung der ETAG 002 wurde durch die FMPA Stuttgart ein Forschungsvorhaben durchgeführt [4] mit dem Ziel, die Materialeigenschaften und Belastbarkeiten der Silikonklebstoffe zu ermitteln. Da hierbei Fragen hinsichtlich des Werkstoffs selbst offen blieben, wurde eine sehr vereinfachte Bemessungsvorschrift (umgangssprachlich „Mickeymouse-Formel“) in die Technische Regel aufgenommen, mit der Festlegung auf rein linienförmige Verklebungen. Die ETAG 002 hat dem Einsatz von Structural Sealant Glazing (SSG) eine tragfähige technische Basis geschaffen; sie bietet jedoch für einen erweiterten Einsatz von Verklebungen eine nur ungenügende Basis, weshalb es wichtig ist weitere Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Verklebung mit Silikon zu entwickeln.

1.4. Übersicht über Klebstoffe

Kennzeichen zahlreicher Klebstoffe sind lange Kettenmoleküle (Polymere), die beim Aushärten des Klebstoffs unterschiedlich stark untereinander vernetzt werden. Bild 2 dient als Übersicht über die Klebstoffe gegliedert nach ihrer Polymerart.

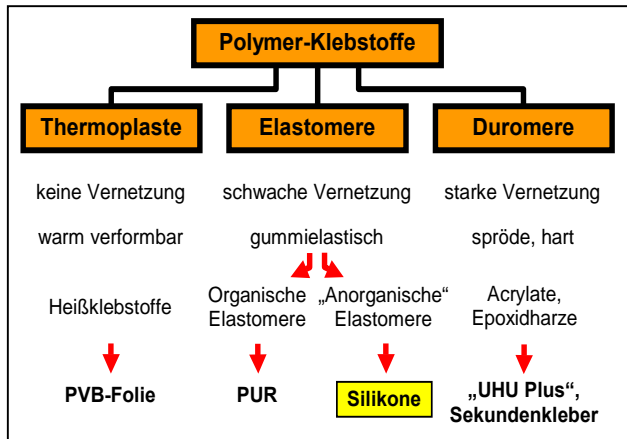


Bild 2: Übersicht Polymerfamilien

Fig. 2: Overview of polymers

Im Bauwesen finden derzeit im wesentlichen Klebstoffe aus dem Bereich der Elastomere Verwendung. Einsatzgebiet ist neben der tragenden Verklebung im Glasbau die Dichtfunktion von Elastomeren. Als Zwischenschichten in Verbundgläsern finden Thermoplaste (z. B. PVB-Folien) einen weit verbreiteten Einsatz. Vertreter aus der Gruppe der Duromere finden wir in Form von Kunstharzzusätzen in diversen veredelten Spezialmörteln oder als Verbundschicht im Glasbau. Weitere Einsatzmöglichkeiten von Duromeren sind Inhalt derzeit laufender Forschungsvorhaben. Die „Arbeitsgruppe Kleben“ des FKG hat damit begonnen sich vorerst mit der erweiterten Anwendbarkeit tragender Verklebungen mit Silikonelastomeren beschäftigt, da diese Verklebungen bereits Inhalt technischer Regelungen sind. So sind die wesentlichen am Markt vertretenen Silikonklebstoffe auf europäischer Ebene zugelassen, was deren Einsatz im Bauwesen normativ ermöglicht. Eine Übersicht der des derzeitigen Stands dieser Europäischen Zulassung (European Technical Approval - ETA) ist Tabelle 1 zu entnehmen:

ETA Nr.	Zulassungsinhaber	Gegenstand	Gültigkeit
01/0005	Dow Corning	DC 993 (2K) & DC 895 (1K): Tragende Silikonklebstoffe	07.03.2001 bis 06.03.2006
03/0003	Dow Corning	DC 3362 (2K): Silikonklebstoff für Randversiegelungen von Isolierverglasungen	01.04.2003 bis 09.04.2008
03/0038	SIKA Services AG	ELASTOSIL SG 500 (2K): Tragender Silikonklebstoff	02.02.2004 bis 15.03.2009

Tabelle 1: Übersicht über derzeit gültige Europäische Zulassungen (ETA) für Glas-Metallverklebungen

Table 1: Overview of actual valid European Technical Approvals for adhesives for metal and glass

1.5. Besondere Eigenschaften von Silikonelastomeren

Plant man den Einsatz von tragenden Verklebungen, sieht man sich häufig mit der Meinung konfrontiert, dass Verklebungen generell nicht ausreichend dauerhaft wären. Die Gruppe der Silikon-Elastomere weist zwar ein

mechanisch vergleichbares Verhalten wie organische Elastomere (z. B. Polyurethane) auf, jedoch unterscheiden sie sich wesentlich in ihrem chemischen Aufbau. Die Polymerketten der Moleküle bestehen bei Silikonen aus Silizium- und Sauerstoffatomen in wechselnder Anordnung. Herkömmliche Elastomere besitzen dagegen ein Gerüst aus Kohlenstoffatomen. Die Bindungsenergie zwischen Silizium und Sauerstoff führt zu einer äußerst stabilen Bindung, was zu den besonderen Eigenschaften von Silikonen führt. Am bedeutendsten ist hier sicherlich die hohe Temperaturbeständigkeit, verbunden mit einer niedrigen Glasübergangstemperatur bei welcher der Werkstoff in einen glasartig harten (eingefrorenen) Zustand übergeht. Silikone weisen eine geringe Änderung ihrer physikalischen Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich von -60°C bis $+150^{\circ}\text{C}$ auf, woraus sich ein entsprechend großer Einsatztemperaturbereich ergibt. Für die Anwendung folgt aus den starken chemischen Bindungen der Silikon-Kettenmoleküle eine geringe chemische Reaktivität (= Angreifbarkeit) und daher eine exzellente Beständigkeit gegen Sonnenlicht, Hitze, Ozon und Schwefeldioxid. Damit entkräftet der Werkstoff Silikon das weit verbreitete Vorurteil, dass er nicht ausreichend tragsicher oder dauerhaft sei. Außerdem weisen Silikone die Fähigkeit auf, wegen ihres Aufbaus eine chemische Bindung zu Glasoberflächen herzustellen. Mit diesen hervorragenden und innerhalb der elastischen Klebstoffe besonderen Eigenschaften begründet sich die Beschränkung auf Silikonklebstoffe innerhalb der ETAG 002.

Seit langem haben sich Silikone, auf Grund ihrer besonderen Eigenschaften, eine weite Verbreitung bei Spezialanwendungen erobert. So sind z. B. am Hitzeschild des Space Shuttle Orbiters die Spezialkeramikschalen mit Silikonklebstoffen befestigt und auch die Spuren des ersten Menschen auf dem Mond stammen von Sohlen mit Silikonen. Hinsichtlich des Verhaltens bei Brandeinwirkung erweisen sich Silikone als äußerst gutmütig. Die an der Oberfläche der Verklebung durch Brandeinwirkung sich bildende Schicht aus Siliziumdioxid ist chemisch gesehen eine Sandschicht, welche die darunter liegende Verklebung vor weiterer Beeinträchtigung schützt. Erfahrungen bei verklebten Fassaden, die ursprünglich nicht für die Aufnahme von Explosionslasten geplant waren, haben darüber hinaus gezeigt, dass eine elastische Verklebung sehr gut geeignet ist, explosionssschützende Verglasungen in ihrer Lage zu halten, wobei durch die Verklebung große Verformungen aufgenommen werden können, ohne dass die betroffene Scheibe sich aus dem Rahmen löst.

2. Die „Arbeitsgruppe Kleben“ im FKG

2.1. Beteiligte Mitglieder

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe rekrutieren sich aus Mitgliedern des FKG, dreier Hochschulen sowie Vertretern der Klebstoffhersteller. Diese Mitgliederstruktur innerhalb der Arbeitsgruppe ermöglicht die Einbeziehung der verschiedenen Interessen der Teilnehmer und verspricht eine große Effizienz der Gruppe. Zusätzlich eröffnete sich durch die Bereitschaft von drei Instituten sich an der Durchführung der Versuche zu beteiligen, eine zusätzliche Absicherung der Ergebnisse, die mit unterschiedlichen Prüfapparaturen und Versuchsanordnungen durchgeführt wurden.

	Firma	Teilnehmer	Aufgaben
Glasbe- und Verarbeitung, Fassadenbau	Glas Trösch	T. Baumgärtner	Kleinprüfkörper
	J. Gartner Fassadenbau	F. Heger	Kleinprüfkörper
	Dorma Glas	T. Vogler	Berechnungen
	Mero	K. Havemann	Berechnungen
	Wagener Gruppe	W. Wies	Kleinprüfkörper
	Saint-Gobain	A. Wittenkämper	Kleinprüfkörper
Ingenieurbüros	A. Hagl Ingenieures. mbH	A. Hagl	Berechnungen
	Ingenieurbüro Becker	H.-R. Becker	Berechnungen
	Glasconsult	R. Hess	Beratung
Hochschulen	TU Dresden	B. Weller	Versuchsdurchführung
	FH München	Ö. Bucak	Versuchsdurchführung
	FH Rosenheim	H. Feldmeier	Versuchsdurchführung
Klebstoffe	Sika (vorm. Wacker)	U. Müller	Lieferung Silikon
	Dow Corning	S. Sitte	Lieferung Silikon

Tabelle 2: Mitglieder der „Arbeitsgruppe Kleben“

Table 2: Members of the “Working Group Bonding”

2.2. Werkstoffe

Als im Konstruktiven Glasbau relevante Werkstoffe stehen zwei zweikomponentige Silikonklebstoffe im Mittelpunkt der Untersuchung, welche den Structural Glazing Bereich

Silikonklebstoff	DC 993	Elastosil SG 500	DC 895
Typ	2K		1K
Hersteller	Dow Corning	SIKA	Dow Corning
ETA	ETA-01/0005	ETA-03/0038	ETA-01/0005
σ_{des}	0,14 MPa	0,14 MPa	0,14 MPa
T_{des}	0,11 MPa	0,105 MPa	0,14 MPa
T_{Dauer}	0,011 MPa	0,0105 MPa	-*

* bei einkomponentigen Klebstoffen keine Zulassung von Dauerlasten

Tabelle 3: Zulässige Spannungen für Silikonklebstoffe

Table 3: Design stress for silicone adhesives

abdecken. Die derzeit zulässigen Beanspruchungen sind in den ETAs dieser Werkstoffe enthalten, die in Tabelle 3 zusammengestellt sind.

Der wesentliche Unterschied zwischen ein- und zweikomponentigen Klebstoffen besteht darin, dass einkomponentige Klebstoffe den Luftzutritt zur Aushärtung benötigen, was die mögliche Verklebungsgeometrie einschränkt. Hierdurch erklärt sich die Forderung nach einer Fugengeometrie von „Luftbreite / Verklebungstiefe“ von ca. 3/1. Zweikomponentige Klebstoffe bieten hier den Vorteil einer freien Fugengestaltung, da die Aushärtung chemisch über das reaktive Zusammenwirken beider Komponenten erfolgt. Daher fiel die Wahl auf die folgenden zweikomponentigen Hochleistungs-Klebstoffe:

- DC @ 993, Dow Corning

- ELASTOSIL® SG 500, Sika (vormals Wacker)

Die vorläufige Beschränkung der Klebstoffauswahl auf Silikone begründet sich mit der mittlerweile gut 20-jährigen Erfahrung im Bauwesen mit dieser Werkstoffgruppe und der hiermit verbundenen relativ hohen Akzeptanz seitens der Bauaufsicht.

3. Forschungsprogramm - Übersicht

3.1. Übersicht über den Forschungsumfang

Das Forschungsprogramm gliedert sich in sechs Arbeitsabschnitte mit den folgenden Inhalten:

Arbeitspaket 0 / Vorarbeiten – Übersicht heute verwendeter Klebstoffe

Als Ausgangsbasis der Forschungsaktivitäten wird zur Dokumentation der Leistungsfähigkeit der Verklebungstechnik im konstruktiven Glasbau der Stand der derzeitigen Technik zusammengetragen. Hierzu werden die heute verfügbaren Klebstoffe mit ihren derzeit bekannten Eigenschaften charakterisiert und zusammengestellt.

Arbeitspaket 1 – Experimentelle Basis

Das erste experimentelle Arbeitspaket hat die Aufgabe, über geeignete Werkstoffversuche das Werkstoffverhalten (Tragfähigkeit und Versagen) der Silikonwerkstoffe möglichst allgemein qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Die experimentellen Ergebnisse bilden die Basis für das gesamte Paket, insbesondere für die aufzustellenden Werkstoffgesetze.

Arbeitspaket 2 – Theoretische Vorhersagemodelle

Mit Hilfe moderner Berechnungsmethoden werden theoretische Ansätze und numerische Verfahren zur Beschreibung des Werkstoffs Silikon ermittelt. Ziel ist die Erarbeitung eines Werkstoffmodells des Silikons, welche Aussagen über das Tragverhalten unter komplexer, dreidimensionaler Beanspruchung ermöglicht.

Arbeitspaket 3 – Rechnerische Tragfähigkeit

Mit den Ergebnissen der vorausgehenden Untersuchungen werden allgemeine Verklebungsgeometrien hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit analysiert. Der Einfluss der Verklebungsgeometrie und verschiedener Klebstoffdicken wird hierbei für unterschiedliche repräsentative Verklebungsgeometrien untersucht. Zum Einsatz gelangen hier marktübliche allgemeine FE-Programme.

Arbeitspaket 4 – Experimentelle Untersuchungen von Klebeverbindungen

Ausgewählte Geometrien von Klebeverbindungen werden experimentell auf ihr Tragverhalten und ihren Versagensmechanismus untersucht. Die hierbei erzielten Versuchsergebnisse werden mit den rechnerischen Vorhersagen verglichen. Eine Validierung der theoretischen Modelle für praxisrelevante Verklebungen wird hierdurch ermöglicht.

Arbeitspaket 5 – Praxisgerechte Umsetzung

Als Brücke zwischen den erarbeiteten Ergebnissen und den Anforderungen aus der Praxis werden Regeln für die Anwendung von Verklebungen in der Praxis erarbeitet. Auf der Basis der Berechnungen können vereinfachte Bemessungsregeln und Anwendungsgrenzen für allgemeinere Verklebungsgeometrien aufgestellt werden.

3.2. Derzeitiger Stand der Aktivitäten

Derzeit sind innerhalb des Arbeitspaket 3 diverse vergleichende Berechnungen für verschiedene Verklebungsgeometrien durchgeführt worden. Die Frage nach einer Explosionssicherung von Fassaden mit verklebten Scheiben hat dazu geführt, dass weitere Werkstoffversuche unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten in das Versuchsprogramm aufgenommen wurden. Erste Ergebnisse an punktuellen Verklebungen konnten bereits an der Fachhochschule in München gewonnen werden.

4. Werkstoffversuche

4.1. Auswahl geeigneter Versuche und Prüfkörper

Hinsichtlich der Auswahl geeigneter Werkstoffversuche sind insbesondere solche Versuche interessant, die Aussagen zu einfachen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen erlauben. Dies bedeutet, dass Versuchskörper auszuwählen sind, welche die wünschenswerten Werkstoffzustände möglichst homogen innerhalb des Messbereichs aufweisen. Klassische Versuche hierzu sind Zug-, Druck- und Schubversuche. Weiterführende Versuche wie bidirektionale Zugversuch oder Kompressionsversuche wären für nahezu inkompressible Werkstoffe wie Silikon von großer Bedeutung. Aus Kostengründen erfolgte hier allerdings eine Beschränkung auf die zuerst genannten Versuche. Diese wurden bei den beteiligten Instituten mit

unterschiedlichen Prüfapparaturen und Messmethoden (optische und mechanische Wegaufnehmer, unterschiedliche Prüfmaschinen) generell bis zum Versagen durchgeführt. Für die Auswahl der Prüfkörper können bereits bekannte Prüfkörpergeometrien, bzw. einfach herzustellende Prüfkörper ausgewählt werden. Ohne diese Basis von reinen Werkstoffversuchen wären Aussagen zu den Materialparametern mit ausreichender Genauigkeit unmöglich.

4.1.1. Zugprüfkörper

Die Werkstoffversuche für Zug wurden an Prüfkörpern S1 nach DIN 53504 [5] durchgeführt. Da bekannt ist, dass der kleine Querschnitt der Versuchskörper auf Grund der geringen Werkstoffsteifigkeit eine gewisse Problematik bei der Versuchsauswertung mit sich bringt, wurde die Dicke der Prüfkörper (nach Norm 2 mm) auf 4 mm erhöht. Dies ermöglicht gerade noch ein Ausstanzen der Prüfkörper mit den Stanzeisen nach DIN 53504. Bild 3 zeigt diesen Prüfkörper.

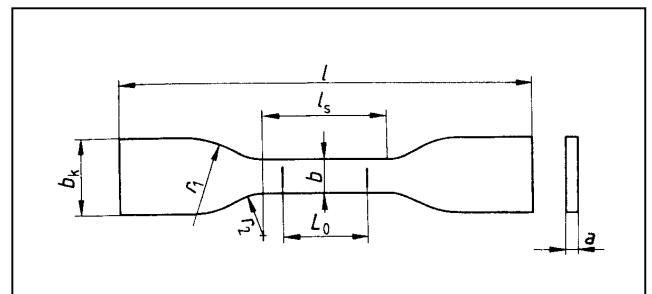


Bild 3: Zugversuchskörper

Fig. 3: Specimen for tension test

Bei der Durchführung der Versuche wurde nach der ersten Belastung eine Entlastung und unmittelbar danach eine Wiederbelastung durchgeführt. Bei anderen Elastomeren zeigt sich hierbei der so genannte Mullinseffekt [6]. Der Mullinseffekt erklärt sich an Hand des typischen Aufbaus der Silikonwerkstoffe wie in Bild 4 dargestellt, über das Lösen und Bilden temporärer Bindungen unter Deformation. Es sollte untersucht werden, ob dieser Effekt auch bei den untersuchten Silikonelastomeren auftritt und wie er sich äußert.

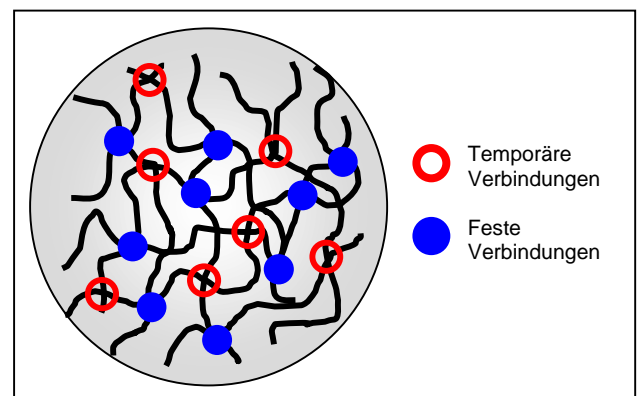


Bild 4: Aufbau von Silikonelastomeren

Fig. 4: Structure of silicone elastomers

Silikone kann man sich vereinfacht als Knäuel von langen Kettenmolekülen vorstellen, die untereinander mit unterschiedlich festen Verbindungen verknüpft sind. Die fixen Bindungen der Kettenmoleküle (chemische Bindungen) reißen bei hohen Lasten auf und führen daher zum Materialversagen. Neben diesen Bindungen existieren temporäre Bindungen der Kettenmoleküle untereinander, die sich bereits bei einem geringen Lastniveau lösen und in der Lage sind sich neu zu verknüpfen (physikalische Bindungen). Damit lässt sich der Mullinseffekt, wie in Bild 5 dargestellt, erklären. Aus dem vorgefundenen Verhalten der Silikone lässt sich ableiten, dass der Vorbelastungsgeschichte bei der Bemessung der Verklebungen offensichtlich keine wesentliche Bedeutung zukommt, wenn die Beanspruchungsart nicht wechselt.

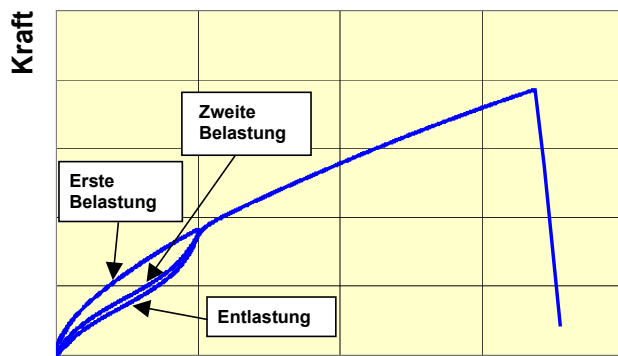


Bild 5: Mullins Effekt
Fig. 5: Mullins effect

4.1.2. Schubprüfkörper

Für die Schubprüfkörper konnte auf den Prüfkörper nach ETAG 002 (Bild 6) zurückgegriffen werden. Zwar zeigt dieser Prüfkörper unter Schublast eine gewisse Randverwölbung, die zur Abweichung vom perfekten Schubspannungszustand führt. Vorteilhaft ist jedoch, dass für diesen Versuchsaufbau bereits eine breite Datenbasis der Klebstoffhersteller als Vergleich zur Verfügung steht.

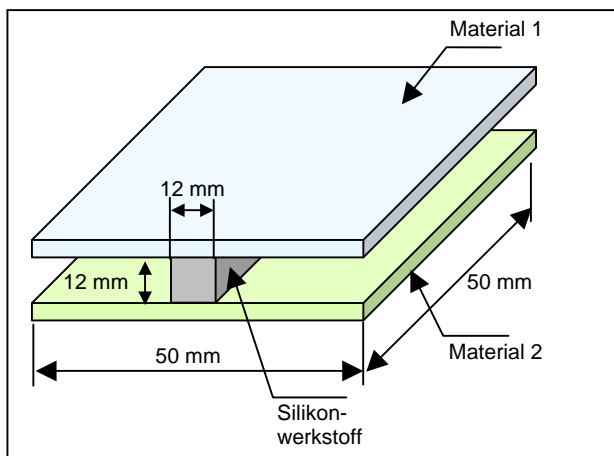


Bild 6: Schubprüfkörper
Fig. 6: Specimen for shear test

4.1.3. Druckprüfkörper

Bei der Auswahl der Druckprüfkörper (Bild 7) ist zum einen eine ausreichende Sicherheit gegen Ausknicken erforderlich, andererseits sollten die Prüfkörper einfach herzustellen sein. Die Wahl der Geometrie erfolgte daher unter pragmatischen Gesichtspunkten. Die Herstellung erfolgte in einer marktüblichen Kunststoffkartusche mit einem Innendurchmesser von 46,3 mm mit einer Höhe von 20 mm. Um eine möglichst reibungsfreie Lagerung in der Prüfmaschine zu erreichen, wurden die Versuchskörper zwischen Teflonscheiben in der Prüfmaschine eingespannt.

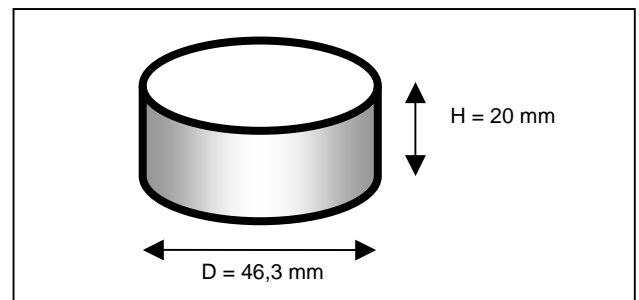


Bild 7: Druckprüfkörper
Fig. 7: Specimen for compression test

4.2. Ergebnisse der Versuche

4.2.1. Zugversuche

Bild 8 zeigt zerstörte Versuchskörper (Versuchsdurchführung FH München). Zu erkennen ist, dass wie erforderlich, das Versagen innerhalb der Messstrecke auftritt. Beide untersuchte Materialien erreichen eine annähernd gleiche Bruchlast von ca. 38 N bei Dehnungen im Bereich von 200-300% bezogen auf die Ausgangslänge der Messstrecke.



Bild 8: Zerstörte Zugversuchskörper
Fig. 8: Failed specimen for tension test

Die Bilder 9 und 10 zeigen die Versuchsergebnisse der Zugversuche aller Institute für die untersuchten Materialien. Festgestellt werden kann, dass beide Materialien ein ähnliches globales Verhalten aufweisen. Darüber hinaus sind die Messergebnisse – vergleicht man die Resultate der Institute untereinander – in sich konsistent.

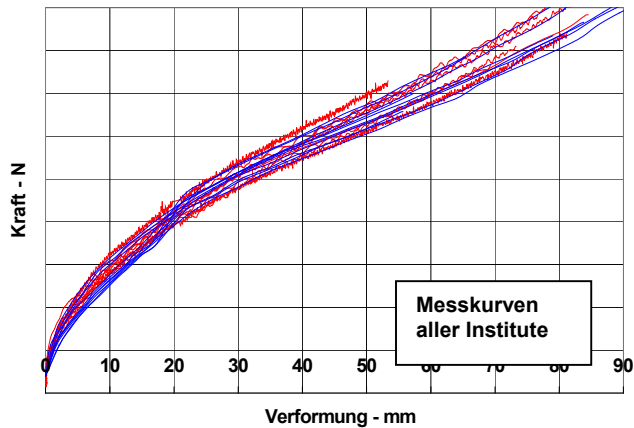


Bild 9: Zugversuchsergebnisse Werkstoff 1

Fig. 9: Tension test results material 1

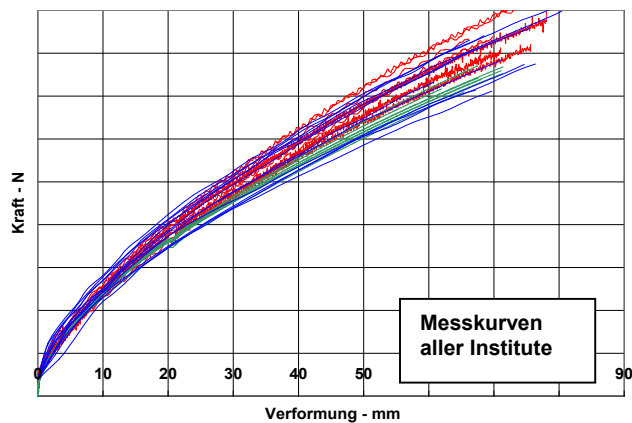


Bild 10: Zugversuchsergebnisse Werkstoff 2

Fig. 10: Tension test results material 2

Vergleicht man die Messergebnisse der beiden Materialien, unterscheiden sie sich vor allem im Anfangsbereich hinsichtlich der Anfangssteifigkeit. Bild 11 zeigt dies beispielhaft an den Ergebnissen eines Instituts.

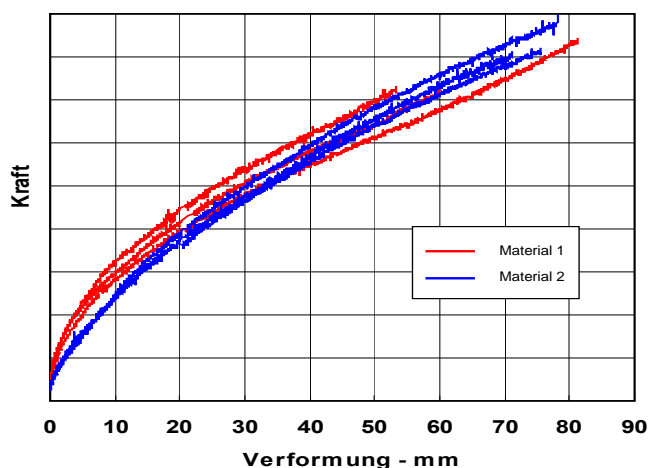


Bild 11: Zugversuchsergebnisse Vergleich Material 1 u. 2

Fig. 11: Tension test results comparison material 1 u. 2

4.2.2. Schubversuche

Das Versagen der Schubprüfkörper ist aus Bild 12 zu entnehmen. Betrachtet man die Messergebnisse der Schubversuche beider Werkstoffe (Bild 13), so fällt auf, dass die Kurven im Gegensatz zu den Ergebnissen der

Zugversuche über weite Bereiche nahezu linear verlaufen. Ein Unterschied ist hinsichtlich der Neigung der Kurven zu erkennen. Hier zeigt die Kurve für Material 2 wie bereits im Zugversuch festgestellt eine geringere Steifigkeit in Form einer flacheren Neigung als Material 1. Hinsichtlich der Bruchlasten stimmen die Werte zwischen Material 1 und 2 ungefähr überein und betragen ca. 430 N für den untersuchten Prüfkörper.

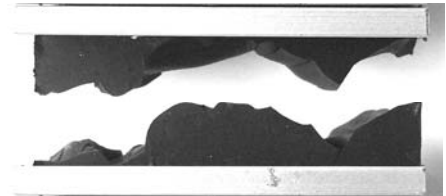


Bild 12: Zerstörter Schubprüfkörper

Fig. 12: Failed specimen for shear test

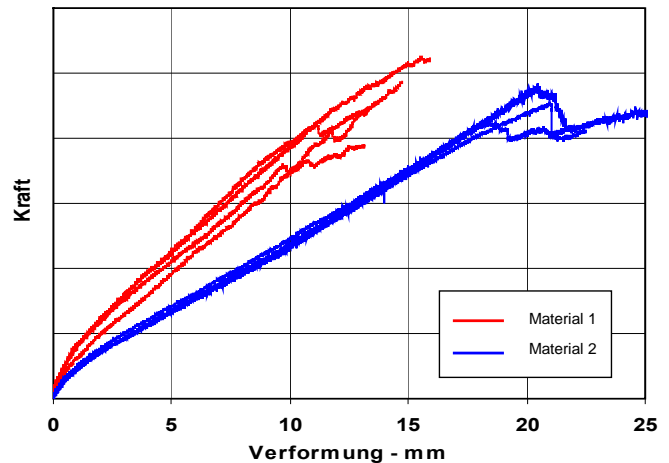


Bild 13: Schubversuchsergebnisse Vergleich Material 1 u. 2

Fig. 13: Shear test results comparison material 1 u. 2

4.2.3. Druckversuche

Bild 14 zeigt einen Prüfkörper der bei 153 kN seine Druckbruchlast erreicht hat. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Druckversuche stellt man fest, dass die Ergebnisse deutlich von den Reibungsverhältnissen der Einspannstellen in die Prüfmaschine abhängen.

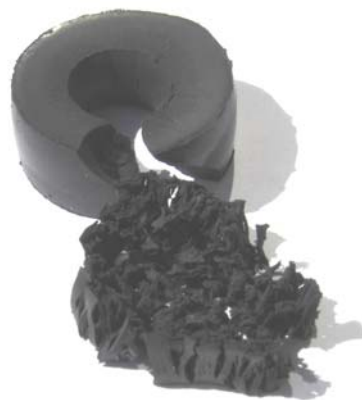


Bild 14: Zerstörter Druckprüfkörper, Bruchlast 153 kN

Fig. 14: Failed specimen for compression test, 153 kN

Vereinfacht lässt sich sagen, dass mit zunehmender Haftung / Reibung der Oberflächen eine höhere Steifigkeit im Versuchsergebnis auftritt. An der FH München wurden verschiedene Oberflächenbedingungen untersucht, wobei das steifere Verhalten bei einer Lagerung der Versuchskörper ohne Oberflächenbehandlung und damit mit großer Reibung (= Behinderung der Querkontraktion) festgestellt wird. Das nachgiebigste Verhalten ist bei der Lagerung der Versuchskörper unter Benetzung der Oberflächen mit einem Tensid festzustellen. Zwischen diesen beiden Werten liegen jeweils die Ergebnisse für die Lagerung der Versuchskörper mittels Teflonscheiben (Bilder 15 u. 16).

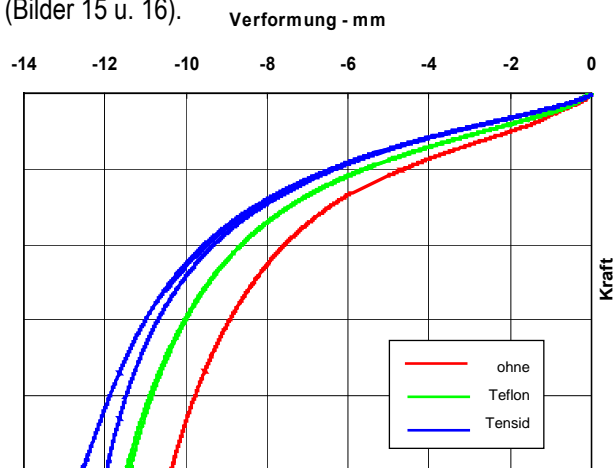


Bild 15: Druckversuchsergebnisse, Vergleich verschiedener Lagerbedingungen beim Versuch, Material 1

Fig. 15: Compression test results, comparison of different surface conditions during test, material 1

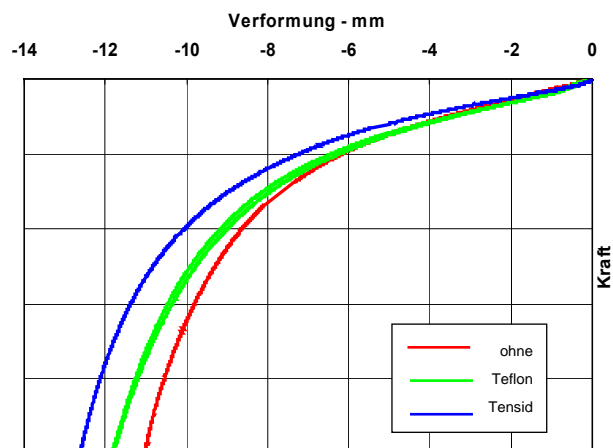


Bild 16: Druckversuchsergebnisse, Vergleich verschiedener Lagerbedingungen beim Versuch, Material 2

Fig. 16: Compression test results, comparison of different surface conditions during test, material 2

Festgestellt werden kann auch, dass die Messergebnisse zwischen den einzelnen Instituten deutlich streuen. Die Ergebnisse sind jedoch insoweit konsistent, dass der Werkstoff 1, der sich im Zugversuch als steifer erwiesen hat, generell auch im Druckversuch ein steiferes Verhalten zeigt (Bild 17).

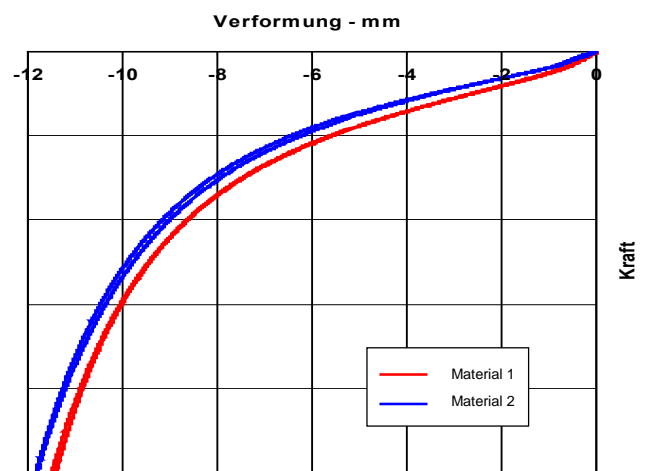


Bild 17: Charakteristische Gestalt- und Volumenänderungszustände

Fig. 17: Characteristic shape- and volume deformation states

4.3. Nullpunktdiskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuchsdaten hat Fragen hinsichtlich der Kurvenbereiche am Anfang der Messstrecke aufgeworfen. Durch die geringen Prüfkörperquerschnitte insbesondere der Zugproben (4 x 6 mm) und der daher sehr geringen Lasten beim Anfahren der Versuchsapparatur treten Ungenauigkeiten in den Messergebnissen auf, die sich durch Reibungskräfte und Schlupf beim Anfahren der Versuche begründen. Für den Vergleich mit theoretischen Ergebnissen waren die Kurven der Messergebnisse anzupassen.

5. Werkstoffmodelle für Silikon

5.1. Phänomene beim Verkleben mit Silikon

Bei Silikonelastomeren handelt es sich um eine Werkstoffgruppe mit nahezu vollständiger Inkompressibilität. Inkompressibilität bedeutet eine Volumenkonstanz des Werkstoffs unter Last wie zum Beispiel unter hydro-statischem Druck. Hieraus begründet sich eine Querkontraktionszahl von $\nu \approx 0,5$. Dies führt zu deutlichen Koppelwirkungen in den Spannungen bei behinderter Querkontraktion und einer hohen Steifigkeit beim „Einschließen“ des Materials, was an den Bauteilberechnungen nachfolgend noch aufgezeigt werden kann. Wird die Querkontraktion nicht behindert (z. B. reine Schubbelastung oder unidirektionaler Zug), reagiert eine Verklebung mit deutlichen Verformungen (Bild 18) – wie auch an den Zugversuchsergebnissen erkennbar ist. Diese großen Verformungen gehen bei der Entlastung zurück und sind somit elastischer Natur. Ein derartiges Verhalten – nahezu perfekte Inkompressibilität und große Elastizität – lässt sich durch sogenannte hyperelastische Materialgesetze beschreiben.

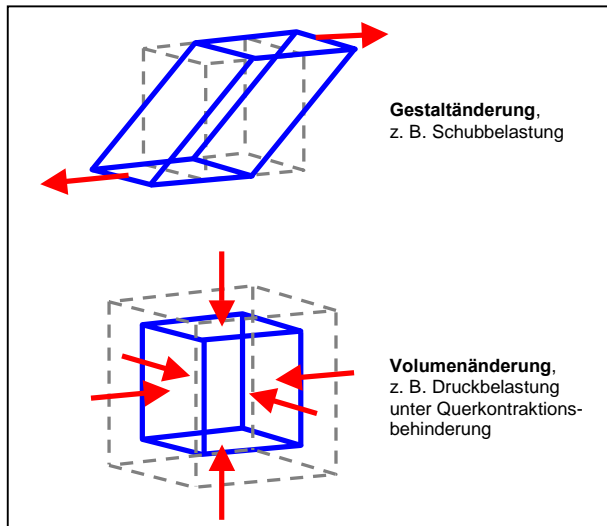


Bild 18: Charakterist. Gestalt- und Volumenänderungszustände
Fig. 18: Characteristic shape- and volume deformation states

5.2. Hyperelastische Materialgesetze

Für kleine Dehnungen linear-elastischer und isotroper Materialien kommt im allgemeinen das Hooke'sche Gesetz [7] zur Anwendung, das durch zwei Werkstoffparameter – üblicherweise Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl ν – definiert ist. Aus E -Modul und Querkontraktionszahl lassen sich zusätzliche Kenngrößen wie Schubmodul G und Kompressionsmodul K nach den folgenden einfachen Zusammenhängen ableiten:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \frac{E}{3} < G < \frac{E}{2} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Für den Grenzfall inkompressiblen Materialverhaltens lässt sich zeigen, dass die Querkontraktionszahl den Wert 0,5 erhält. Es gilt dann:

$$\nu = 0,5 \quad \longrightarrow \quad G = \frac{E}{3} \quad \longrightarrow \quad K \rightarrow \infty$$

Für Elastomere ist charakteristisch, dass sie großen Dehnungen unterworfen werden können. Um auch den Bereich großer Dehnungen mit einem Materialgesetz abdecken zu können, kommen hierbei hyperelastische Materialgesetze zur Anwendung, die auf Dehnungsenergieausdrücken basieren. Da Spannungen und Dehnungen bei großen Verformungen nicht mehr eindeutig definiert sind – für die Spannungsermittlung ändert sich die Bezugsquerschnittsfläche, während für die Dehnung sich die Bezugslänge ändert – sind die Dehnungsenergien oft in Invarianten I_1 , I_2 und I_3 des Deformationstensors oder in Streckungen λ_1 , λ_2 und λ_3 definiert [8], deren Definition für große Dehnungen eindeutig ist.

Eine große Familie von Dehnungsenergien W stellen dabei Polynominalfunktionen der Invarianten dar, deren bekanntester Vertreter das Gesetz nach Mooney-Rivlin ist mit I_i als Invariante des Deformationstensors.

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$

Eine alternative Formulierung für W , basierend auf Funktionen der Streckungen in den Hauptdehnungsrichtungen, ergibt sich nach Ogden wie folgt:

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), \quad \lambda_i = \frac{l_i}{l_{oi}}$$

l_i : deformierte Länge

l_{oi} : undeformierte Länge

Im Rahmen der theoretischen Aktivitäten der „Arbeitsgruppe Kleben“ wurde der Schwerpunkt auf Polynominalgesetze gelegt, aus deren allgemeiner Schreibweise sich die folgenden inkompressiblen Sonderfälle ableiten lassen:

Allgemein:
$$W = \sum_m \sum_n c_{mn} (I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n$$

Mooney-Rivlin
$$W = c_{10} (I_1 - 3) + c_{01} (I_2 - 3)$$

Neo-Hook
$$W = c_{10} (I_1 - 3)$$

c_{nm} : Materialkoeffizienten

Aus den Dehnungsenergiefunktionen lassen sich durch einmaliges Ableiten nach der Dehnung die zugehörige Spannung und durch zweimaliges Ableiten die Steifigkeit berechnen. Wie schon erwähnt, sind Spannungs- und Dehnungsdefinitionen im Fall großer Verformungen nicht eindeutig. Üblicherweise werden bei den gängigen FE-Programmen Cauchy-Spannungen, die auch als wahre Spannungen bezeichnet werden, da sie sich auf die aktuellen Bezugsquerschnitte beziehen, und logarithmische Dehnungen – auch als natürliche Dehnungen bezeichnet – ausgegeben.

5.3. Nachrechnung der Versuchsergebnisse

Die Versuche wurden im nächsten Arbeitspaket mit verschiedenen am Markt gängigen FE-Programmen mit unterschiedlichen hyperelastischen Materialgesetzen nachgerechnet. Die Forderung an die Materialmodellierung der Nachrechnung von Zug-, Druck- und Schubversuch ist hierbei, dass ein Materialgesetz konsistente Ergebnisse im Vergleich zu den Messergebnissen liefert. Bei diesen theoretischen Untersuchungen kamen die in Tabelle 4 aufgeführten Programme zum Einsatz:

In wie weit die zum Teil komplexen Ansätze für baupraktische Berechnungen künftig relevant sind oder sich für die praktische Anwendung vereinfachen lassen, wird sich aus der Weiterführung der Bauteilversuche

ergeben, die mit den jeweiligen Materialgesetzen im Arbeitspaket 3 und 4 vorhergesagt bzw. nachgerechnet werden.

Fe-Programm	Anwender	Materialgesetz
Ansys	Dorma Glas, T. Vogler	Neo_Hook
Nastran for Windows	A. Hagl Ingges. mbH, A. Hagl	Mooney Rivlin, erweitert
Sofistik	Ing. Büro Becker, H.R. Becker	Mooney Rivlin

Tabelle 4: Übersicht, eingesetzte FE-Programme

Table 4: Overview, applied FE-programs

5.3.1. Zugversuche

Bei der Nachrechnung der Zugversuche der verschiedenen Mitglieder der Arbeitsgruppe (Bilder 19-22) wird der Unterschied der verschiedenen gewählten Materialgesetze besonders bei Material 1 deutlich. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass die Versuchskurven im oberen Bereich einen Wendepunkt im Kurvenverlauf aufweisen. Hier bedarf es beim Ansatz der Materialgesetze für den Bereich großer Dehnungen eines erweiterten quadratischen Terms – was aus den Ergebnissen in Bild 21 erkennbar ist. Jedoch liefert selbst der einfache Ansatz nach Neo-Hook (Bild 20) in weiten Bereichen mit der Versuchskurve eine gute Übereinstimmung. Bei Material 2 ist der vor beschriebene

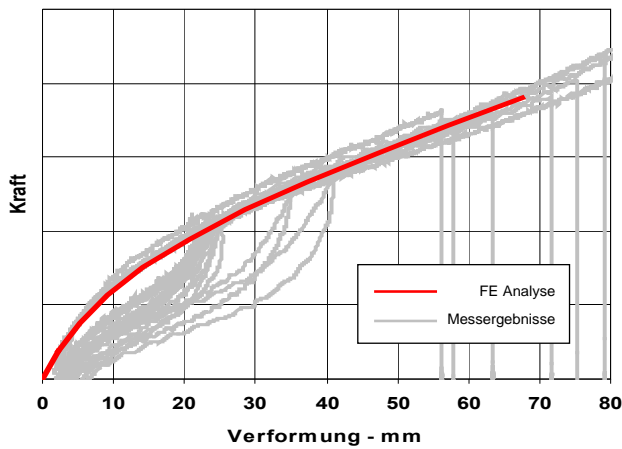


Bild 19: Nachrechnung Zugversuch Material 1, Becker
Fig. 19: Analysis tension test material 1, Becker

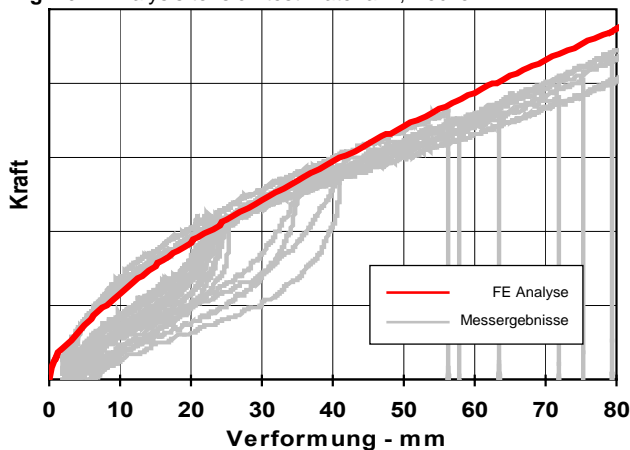


Bild 20: Nachrechnung Zugversuch Material 1, Vogler
Fig. 20: Analysis tension test material 1, Vogler

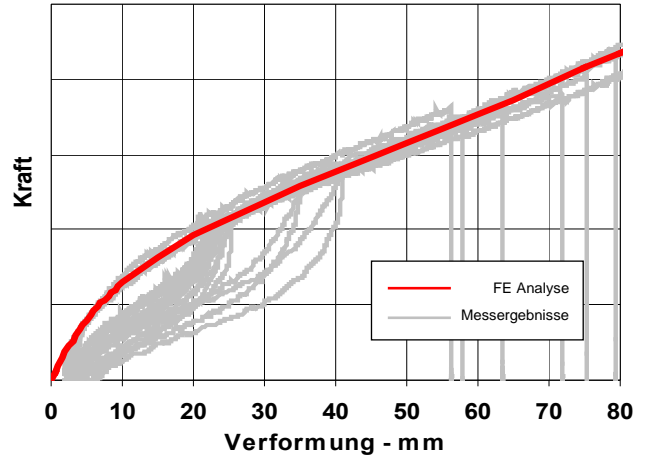


Bild 21: Nachrechnung Zugversuch Material 1, Hagl
Fig. 21: Analysis tension test material 1, Hagl
Wendepunkt nicht erreicht (Bild 22), sodass die Grundformulierung nach Mooney-Rivlin oder Neo-Hook als ausreichend gesehen wird.

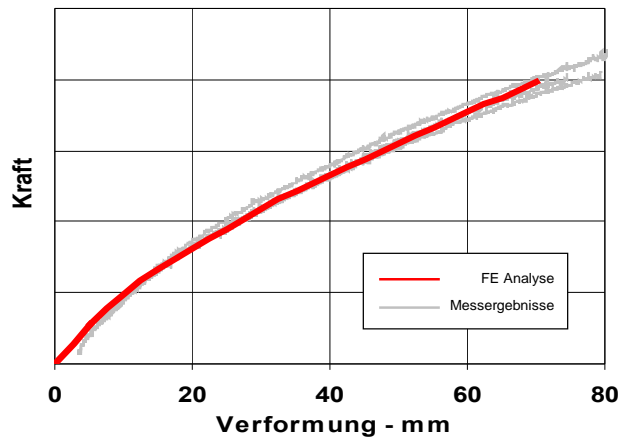


Bild 22: Nachrechnung Zugversuch Material 2, Hagl
Fig. 22: Analysis tension test material 2, Hagl

5.3.2. Schubversuche

Wie schon die Versuchsergebnisse, zeigen auch die analytischen Werte der Nachrechnung der Schubproben (Bilder 23 und 24) einen nahezu linearen Verlauf der Last-Weg-Kurve. Erkennbar wird, dass sich bei Material 1 eine deutliche Krümmung nach oben, bei Material 2 jedoch eine geringe Krümmung nach unten ergibt.

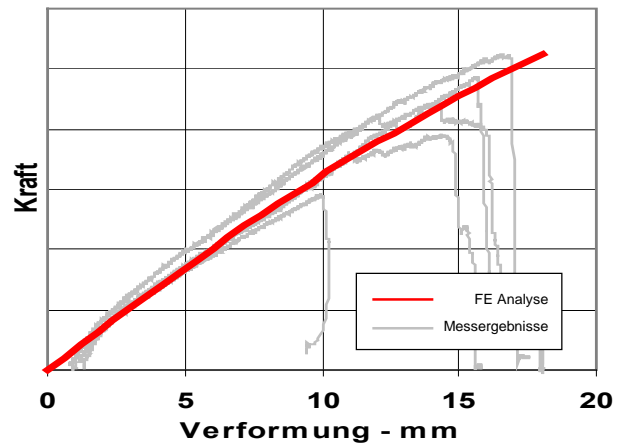


Bild 23: Nachrechnung Schubversuch Material 1, Hagl
Fig. 23: Analysis shear test material 1, Hagl

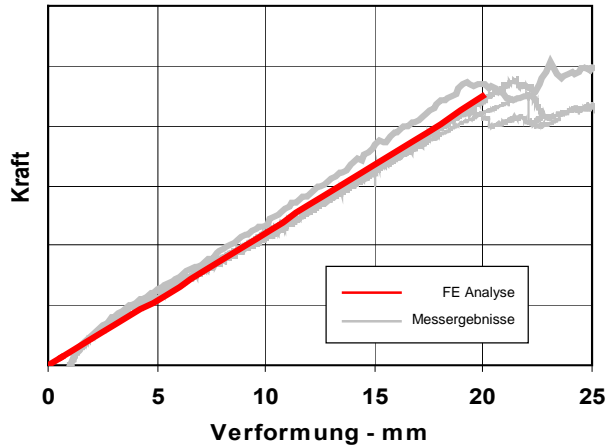


Bild 24: Nachrechnung Schubversuch Material 2, Hagl

Fig. 24: Analysis shear test material 2, Hagl

5.3.3. Druckversuche

Die Nachrechnung der Druckversuche gestaltet sich dahingehend schwierig, dass die jeweilig herrschenden Reibungsbedingungen aus der Versuchsanordnung nicht ausreichend genau bekannt sind. Ausgehend von der Überlegung, dass es für die Lagerung an den Kontaktflächen einen oberen (reibungsfrei) und einen unteren Grenzwert (voll haftend) gibt, spannen die Ergebnisse dieser Randbedingungen einen Korridor auf, in dem die gefundenen Versuchsergebnisse eingeschlossen sein müssen. Bild 25 zeigt stellvertretend die Ergebnisse der Berechnungen für Material 1 im Vergleich zur Lagerung der Prüfkörper mit Teflon.

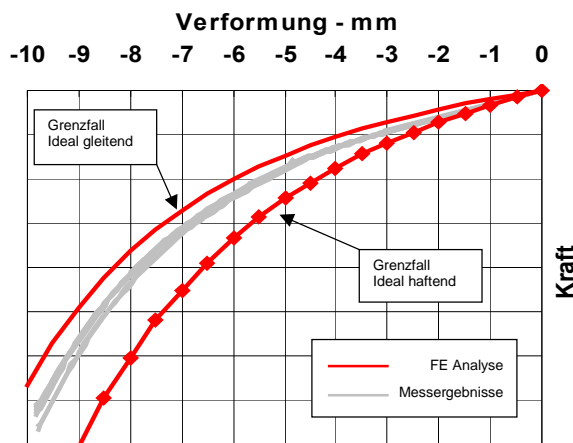


Bild 25: Nachrechn. Druckversuch Mat. 1, Teflonlagerung, Hagl

Fig. 25: Analysis compression test mat. 1, teflon support, Hagl

5.3.4. Schlussfolgerung

Die Nachrechnungen zeigen auf, dass es möglich ist mit üblichen allgemeinen FE-Programmen Silikonwerkstoffe mit guter Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen zu berechnen.

6. Untersuchung verschiedener repräsentativer Verklebungsgeometrien

Mit den durchgeführten Validierungsschritten der Berechnung anhand von Werkstoffversuchen werden nun in einem nächsten Schritt verschiedene ebene und rotationssymmetrische Verklebungsgeometrien analytisch untersucht.

6.1. Bandförmige Verklebung

Eine bandförmige Verklebung stellt insofern eine interessante Geometrie dar, als die Oberflächen des Klebstoffs, die freien Ränder, sich linear zur verklebten Fläche verhalten. Aus dieser Verklebungsgeometrie resultiert daher eine deutliche Querkontraktionsbehinderung die zu einer hohen Steifigkeit dieser Verklebungsgeometrie führt. Die nahezu perfekte Inkompressibilität des Werkstoffs Silikon führt daher zu einer dramatischen Steifigkeitserhöhung. Wie erwartet, zeigt sich eine sehr steife Wirkung dieser Verklebung unter Zug, was durch die Berechnungen bestätigt werden konnte. Bild 26 zeigt in einer Montage die Geometrie und die Spannungswerte in Lastrichtung.

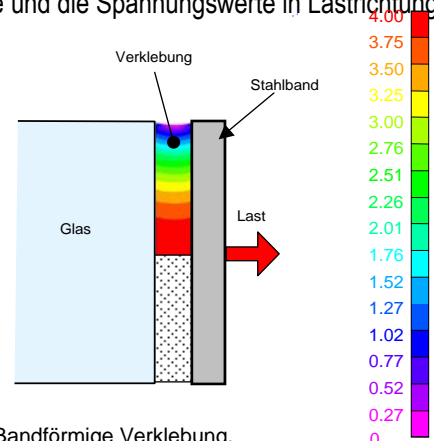


Bild 26: Bandförmige Verklebung, Spannung in Belastungsrichtung, Hagl

Fig. 26: Line shaped bonding, stress in load direction, Hagl

6.2. Punktförmige Verklebung

Die punktförmige Verklebung in der Geometrie eines runden Punkthalter weist am äußeren Umfang den Bereich der Verklebung auf, der sich einschnüren kann, vergleiche Bild 27. Es lässt sich sagen, dass dieser Bereich die im Inneren liegende Verklebung dann an der Kontraktion behindert. Daher sind im inneren Bereich der Verklebung die höchsten Spannungen im Klebstoff zu erwarten.

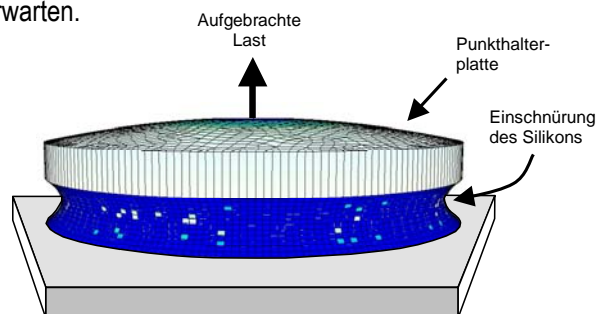


Bild 27: Modell Punkthalter, Becker

Fig. 27: model piont support

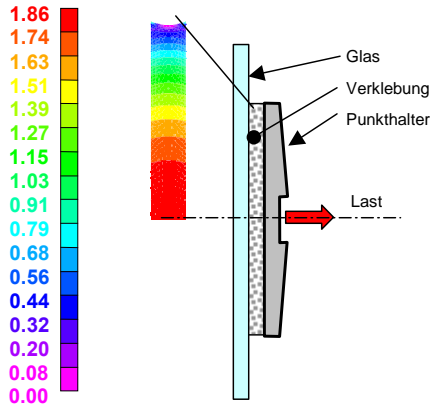


Bild 28: Punkthalter, Spannung in Belastungsrichtung, Hagl
Fig. 28: Point support, stress in load direction, Hagl

Bild 28 zeigt die Spannungsverteilung in dieser Verklebung in Lastsrichtung. Besonders für diese Verklebungsgeometrie erfolgten weitgefächerte Untersuchungen hinsichtlich Modellierung und Spannungsermittlung. Bild 29 zeigt hierzu verschiedene Spannungen aus linearen und nichtlinearen FE-Rechnungen sowie zum Vergleich die nominale Spannung (Last / Fläche). Aufgrund der deutlichen Inhomogenitäten in den Spannungen streuen deren Werte signifikant, je nachdem, ob sie an den Knoten des Netzes oder im Inneren der Finiten Elemente ermittelt werden.

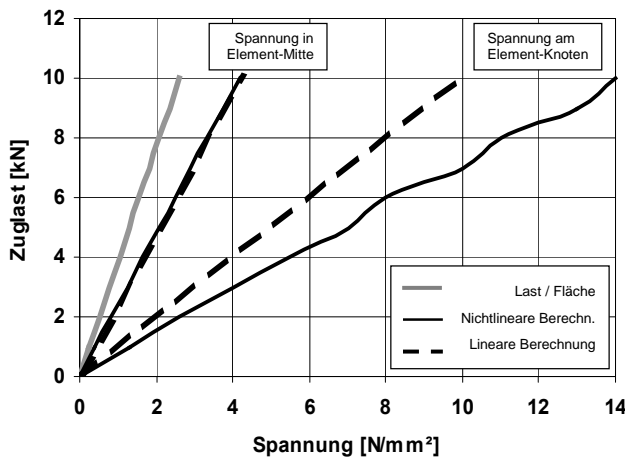


Bild 29: Berechnung für Punkthalter, Becker
Fig. 29: Analysis point support, Becker

$\sigma_{nom} = F/A_0$ = 1 N/mm ²			
Dehnung $\Delta l/l_0$	122 %	≈ 4,7 %	≈ 2,6 %
Maximum σ_x bzw. σ_{axial}	2,22 N/mm ²	1,86 N/mm ²	1,41 N/mm ²
Maximum σ_y bzw. σ_{radial}	0 N/mm ²	1,80 N/mm ²	1,38 N/mm ²
Maximum σ_z bzw. $\sigma_{tangential}$	0 N/mm ²	1,80 N/mm ²	1,38 N/mm ²

Zunehmende Querkontraktionsbehinderung →

Tabelle 5: Übersicht Spannungs-Dehnungs-Beziehung
Table 5: Overview stress strain conditions

6.3. Vergleich von rein zugbeanspruchten Geometrien

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse von rein zugbeanspruchten Bauteilen zeigt Tabelle 5 siehe hierzu [9]. Erkennbar wird hier, dass sich bereits bei rein zugbelasteten Verklebungsgeometrien trotz der einachsigen Lasteinleitung deutliche Kopplungseffekte in den Spannungen der Haupttrichtungen ergeben. Hiermit einhergehend ergeben sich deutlich geringere Dehnungen als unter unidirektionaler Belastung (z. B. Zugstab).

6.4. U-förmige Verklebung

Ein Beispiel für eine komplexere Verklebungsgeometrie ist eine U-förmige Verklebung, wie sie bei der Realisierung der Herz-Jesu-Kirche zum Einsatz kam, siehe Bild 30. Aufgrund der Verklebungsgeometrie herrschen in der Verklebung an der Stirnfläche Zugspannungen und in den Flanken Schubspannungen. Unter der Berücksichtigung der Querkontraktionsbehinderung kann gezeigt werden, dass der Hauptanteil des Lastflusses über die Stirnfläche abgetragen wird, da sich Stirnfläche und Flanken wie parallelgeschaltete Federn verhalten. In einem derartigen Fall zieht die steifere Feder – in diesem Fall die querkontraktionsbehinderte Stirnfläche – die Hauptlast auf sich. Die Flanken fungieren hierbei als redundanter Lastpfad im Fall eines Versagens der stirnseitigen Verklebung, siehe hierzu auch [10].

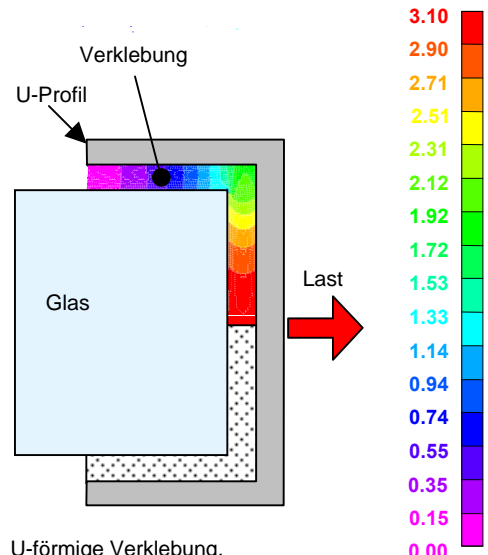


Bild 30: U-förmige Verklebung, Spannung in Belastungsrichtung, Hagl
Fig. 30: U-shaped bonding, stress in load direction, Hagl

7. Bauteilversuche an punktuellen Verklebungen

Als weitergehende Bauteilversuche mit deutlich inhomogenen Spannungsverteilungen wurden Zugversuche an Punkthaltern (Bild 31) und Schrägzugversuche für runde punktuelle Verklebungen durchgeführt. In Bild 32 ist der Versuchsaufbau für einen Schrägzugversuch dargestellt.



Bild 31: Zerörter Punkthalter, Zugversuch
Fig. 31: Failed point support, tension test



Bild 32: Versuchsaufbau für Schrägzugversuch
Fig. 32: Test configuration for shear-tension test

Bild 33 zeigt die Messergebnisse der Schrägzugversuche, die aufgrund der Lastkombination von Zug und Schub von besonderem Interesse sind. Erste Berechnungen, die im Rahmen des AIF-Forschungsvorhabens zu geklebten Verbindungen an der Fachhochschule München durchgeführt wurden, zeigen bereits eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung, Bild 34.

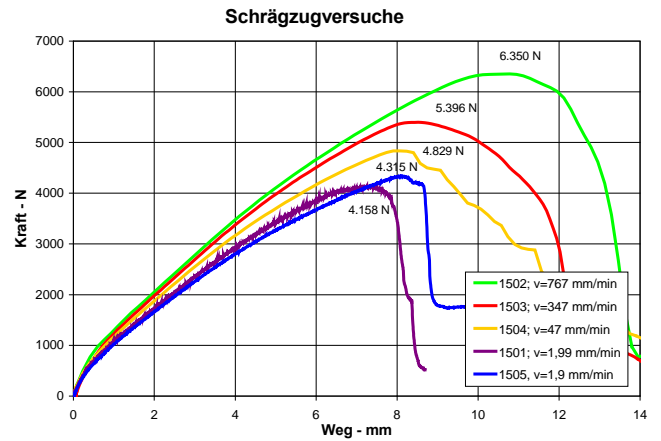


Bild 33: Versuchsergebnisse Schrägzugversuch mit unterschiedlichen Versuchsgeschwindigkeiten

Fig. 33: Test results of combined shear-tension tests for different load rates

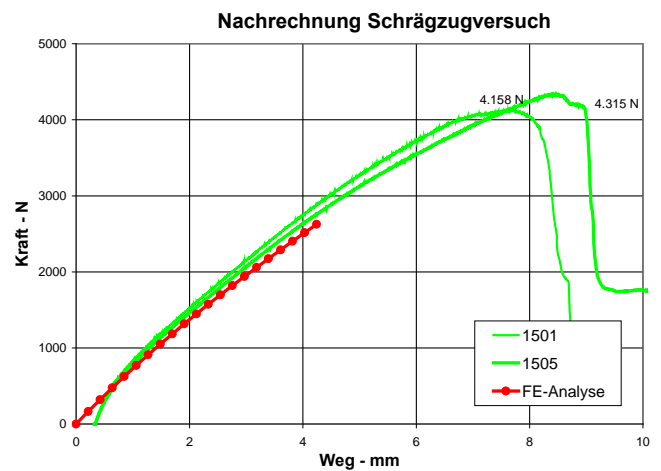


Bild 34: Versuchsaufbau für Schrägzugversuch

Fig. 34: Test configuration for shear-tension test

8. Ausblick und weiterführende Forschung

Die Fülle der bereits vorliegenden Berechnungsergebnisse, auch komplexerer Verklebungsgeometrien, konnte hinsichtlich der Anwendbarkeit der Werkstoffmodelle eine vertrauenswürdige Basis für weitergehende Aussagen legen. Als einer der wesentlichen nächsten Schritte ist nun eine Aussage zum Festigkeitsverhalten von Silikonelastomeren in Abhängigkeit der jeweiligen Spannungs- und/oder Dehnungszustände und damit zur Tragfähigkeitsvorhersage von Silikonverklebungen vorgesehen. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen werden Abhängigkeiten der Belastungsgeschwindigkeit und unter Explosionslasten eine Erweiterung der bisher gewonnenen Erkenntnisse bringen. Ein AIF-Forschungsvorhaben der FHM wird die Erweiterung der Werkstoffparameter hinsichtlich verschiedener Temperaturen erschließen. Aufbauend auf den im Rahmen der bisherigen Aktivitäten erlangten Erfahrungen wird sich die Arbeitsgruppe künftig auch mit Duromer-Verklebungen – den so genannten „hochfesten“ Verklebungen – beschäftigen.

Danksagung

Die Autorin bedankt sich bei den Mitgliedern des FKG für die Bereitstellung der Rahmenbedingungen einschließlich der finanziellen Förderung des Forschungsvorhabens, bei den Vertretern der beteiligten Institute, Herrn Prof. Weller, Herrn Prof. Feldmeier und Herrn Prof. Bucak, für die Durchführung der Werkstoffversuche zu Sonderkonditionen und für deren engagierte Mitarbeit innerhalb der Arbeitsgruppe. Den Mitgliedern der „Arbeitsgruppe Kleben“ gebührt Dank für die fruchtbare Zusammenarbeit und die Mitwirkung an dieser Veröffentlichung. An dieser Stelle sind auch die beiden Klebstoffhersteller Dow Corning und Sika zu nennen, die kostenlos Versuchskörper bereitgestellt haben und jederzeit mit Rat und Tat zur Verfügung standen.

Autorin dieses Beitrages

Dipl. Ing. (FH) Anneliese Hagl, Geschäftsführerin der A. Hagl Ingenieurgesellschaft mbH, Bodenseestraße 217, 81243 München, leitet seit 2003 die „Arbeitsgruppe Kleben“ innerhalb des Fachverband Konstruktiver Glasbau. Seit 2005 betreut sie das AIF-Forschungsvorhaben „Verklebte Verbindungen im Glasbau“ an der Fachhochschule München, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, Leitung: Prof. Dr.-Ing. Ö. Bucak.

Literatur

- [1] W. Endlich, Kleben und Dichten – aber wie?, Leitfaden für den Praktiker, Schweißtechnische Praxis, Band 32, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996.
- [2] EOTA (European Organisation for Technical Approvals), ETAG No.2 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems, Brüssel, 1998.
- [3] A. Hagl, Synthese aus Glas und Stahl: Die Herz-Jesu Kirche, München, Stahlbau 71 (2002), S.498-506
- [4] G. Krüger, G.E. Völkel, R. Wohlfahrt, Untersuchung der Beanspruchung in der Klebefuge eines Structural-Glazing-Elementes, FMPA, Stuttgart, 1992.
- [5] DIN 53504, Prüfung von Kautschuk und Elastomeren
- [6] G. A. Holzapfel, Nonlinear Solid Mechanics, A Continuum Approach for Engineering, J. Wiley & Sons, Ltd., Chichester / Weinheim / New York / Brisbane / Singapore / Toronto, 2001.
- [7] H. G. Hahn, Elastizitätstheorie, B. G. Teubner, Stuttgart, 1985.
- [8] Parisch, H.: Festkörper-Kontinuumsmechanik, B.G. Teubner Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden 2003
- [9] Kuhlmann U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2005, A. Hagl, Kleben im Glasbau, Verlag Ernst & Sohn Stahlbaukalender 2005,
- [10] Hagl A.: Durability by Design: Load Carrying Silicone Bonding, Herz-Jesu-Church, Munich, Durability of Building and Construction Sealants and Adhesives, Paper ID JA/11601, A. T. Wolf, Ed, STP 1453, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2004.