

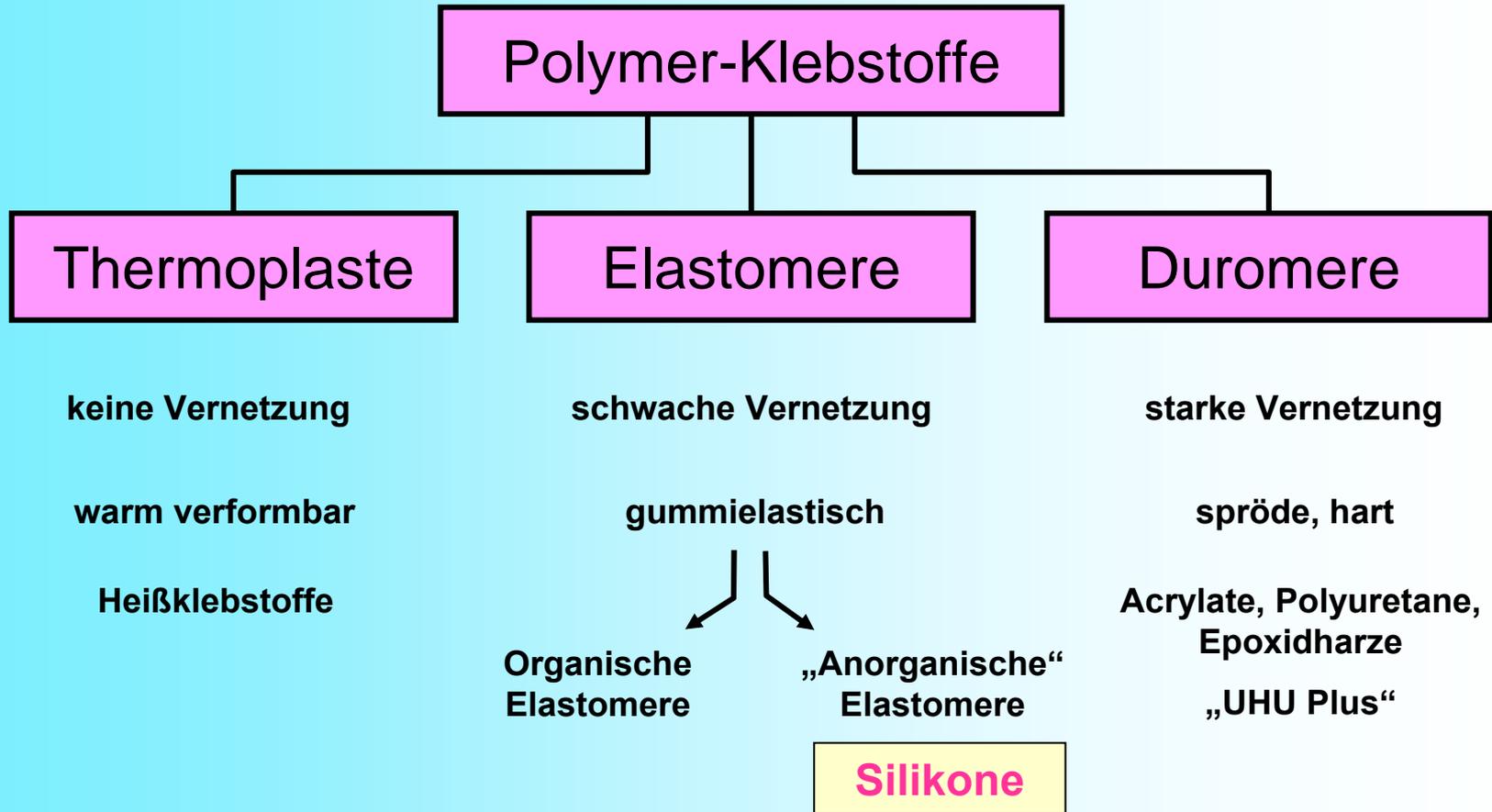
Kleben im Glasbau

Verklebung mit Silikon
A. Hagl

Inhalt

- **Chemische und physikalische Eigenschaften**
- Technische Regeln für tragende Verklebung von Glasfassaden
- Elastisches Verhalten typischer Verklebungsgeometrien
- Brand- und Explosionsverhalten von Silikonverklebungen
- Ausgewählte Beispiele tragender Verklebungen

Systematik nach Polymerart



Aufbau von Silikon-Elastomeren

Hybrid zwischen **anorganischen** (Silikaten) und **organischen** (Methyl) Bausteinen



Polydimethylsiloxan (PDMS)

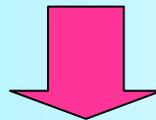
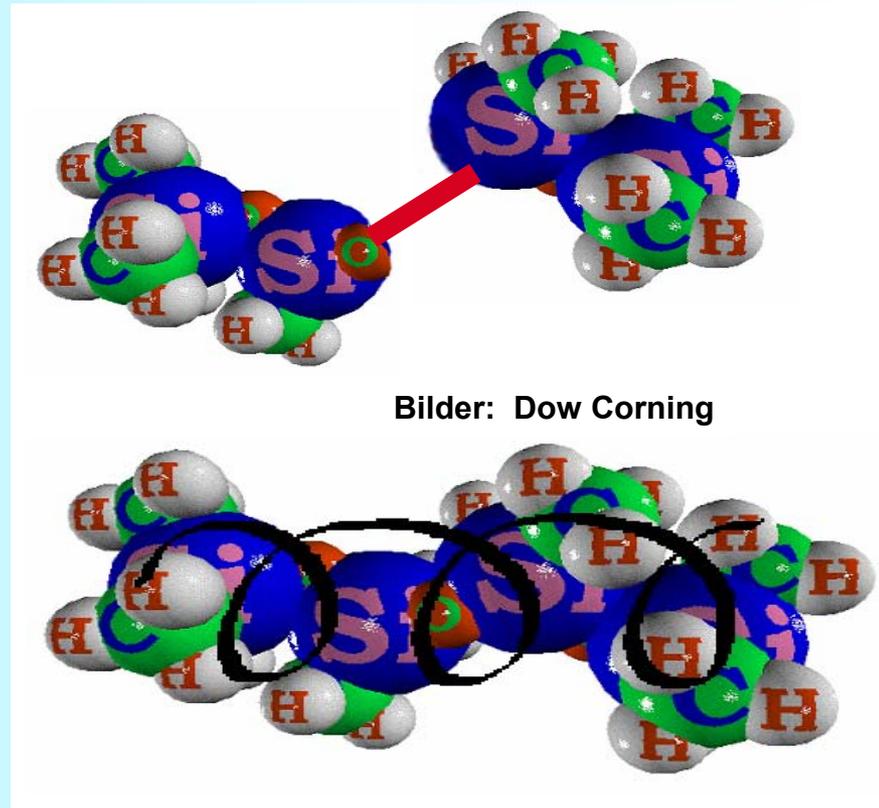


Bild: Dow Corning

Bindungswinkel von 60° bei Si-O-Si und 109° bei O-Si-O
und freie Rotationsmöglichkeiten um alle Bindungen des Polymers
führen zu Flexibilität von Silikon

Das molekulare "Geheimnis"

- Starke Si-O Bindungen
(hohe Bindungsenergie)
- Geringe
zwischenmolekulare
Wechselwirkungen
- Flexible Molekülketten



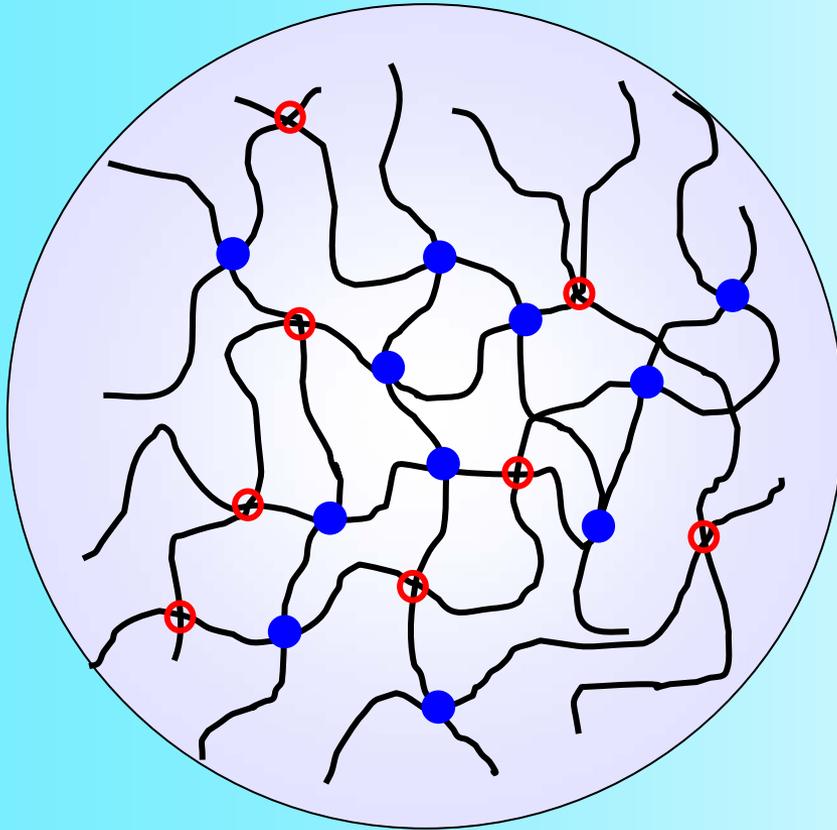
Chemische und Physikalische Eigenschaften

Typische physikalische Eigenschaften eines 2K-Silikons

Einsatztemperatur	-50°C bis 150°C
Verarbeitungstemperatur	5°C bis 40°C
Dichte	1.36 kg/l
Zugfestigkeit (ISO 8339)	0.95 MPa
Reißdehnung (ISO 8339)	130 %
Härte Shore A	40
(Elastizitätsmodul	1.4 MPa)

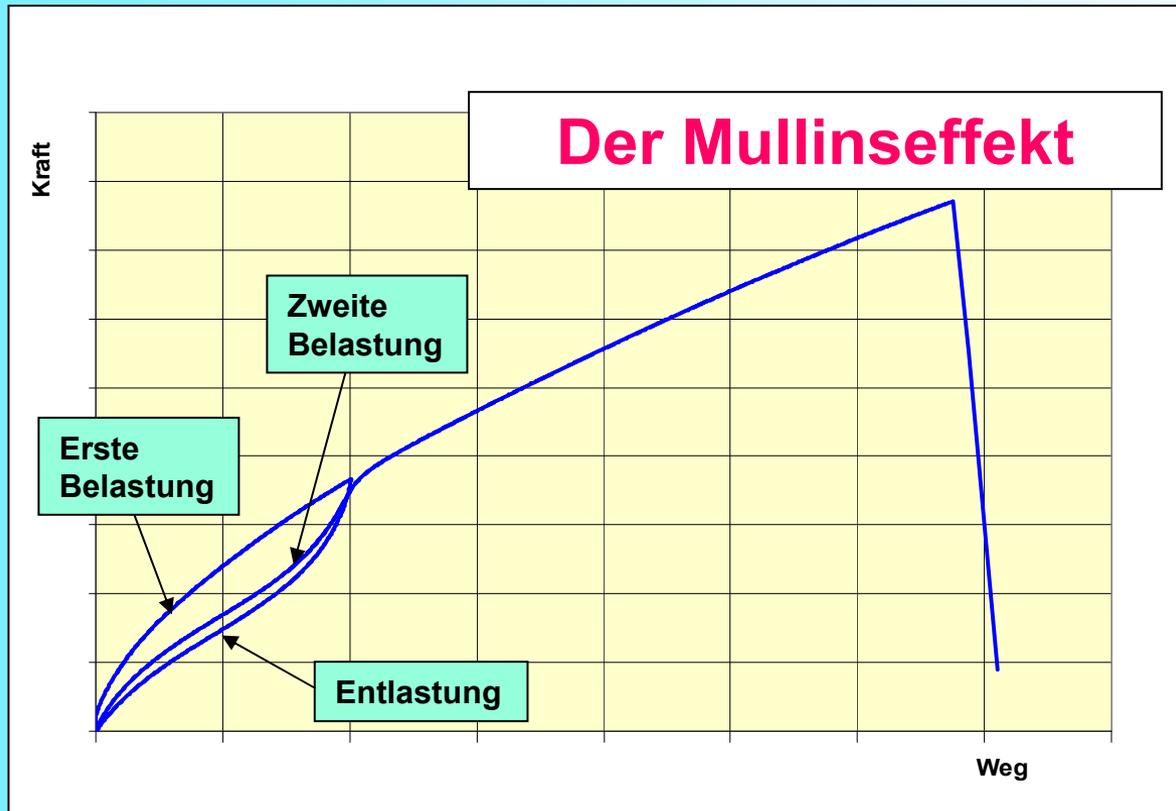
Wirkungsweise des Werkstoffs Silikon

Silikone kann man sich als Knäuel von langen Kettenmolekülen vorstellen, die untereinander mit unterschiedlich festen Verbindungen verknüpft sind.



- **Fixe Bindungen der Kettenmoleküle reißen bei hohen Lasten auf**
→ chemische Bindungen
→ **Effekt: Materialversagen**
- **Temporäre Bindungen der Kettenmoleküle lösen sich bereits bei geringem Lastniveau und verknüpfen sich neu**
→ physikalische Bindungen
→ **Effekt: Mullinseffekt**

Einfluss der temporären Bindungen



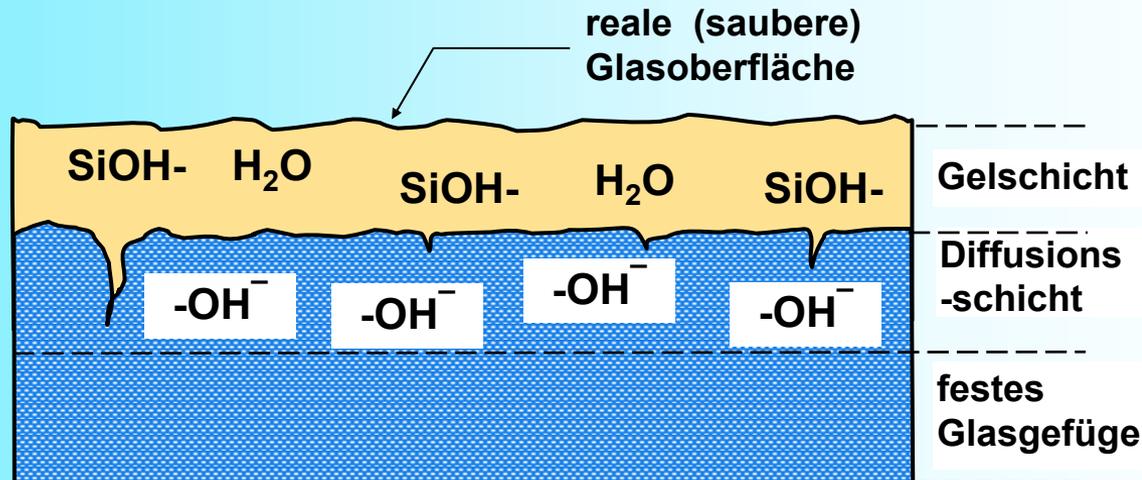
Auszug aus
Materialversuch
der FH München
für den FKG



Der Pfad der ersten Belastung - maßgebend für das Tragfähigkeitsverhalten von Silikon

Glas als Fügepartner

- **Grenzschicht zur Glasoberfläche stellt wegen ihres Wassergehalts für viele Klebstoffe eine nahezu unüberbrückbare Hürde dar.**
- **Glas und Silikon bilden an den Grenzflächen über SiOH-Gruppen chemische Bindungen aus ⇒ gute Haftung = chemische Verbindung.**
- **Mit entsprechender Vorbehandlung (Primer auf Siloxanbasis) ergeben sich gute Hafteigenschaften auch auf Metallen.**



Inhalt

- Chemische und physikalische Eigenschaften
- **Technische Regeln für tragende Verklebungen von Glasfassaden**
- Elastisches Verhalten typischer Verklebungsgeometrien
- Brand- und Explosionsverhalten von Silikonverklebungen
- Ausgewählte Beispiele tragender Verklebungen

Merkmale von 1K und 2K Verklebungen mit Silikon - Gemeinsamkeiten

- **Ähnliche mechanische Festigkeiten gemäß Zulassungen von 1K und 2K - Silikon**
- **Ausführung von tragenden Verklebungen generell unter „Werkstattbedingungen“ (Probleme: Oberflächenverschmutzung, Temperatur, Feuchtigkeit)**
- **Vor Ausführung einer Verklebung ist eine Abstimmung aller konstruktiven Besonderheiten der geklebten Fuge mit dem Hersteller erforderlich (s.a. Qualitätshandbücher der Hersteller)**

Merkmale von 1K und 2K Verklebungen mit Silikon - Unterschiede

1-komponentige Silikone

- Aushärtung durch Luft
- Aushärtung von der Fugengeometrie (Volumen) abhängig
- Größerer Einfluss der Alterung
- Fugengeometrie eingeschränkt
 $b_{\text{Luft}} / d = 3 / 1$ bis $2 / 1$
- Keine Dauerlast zulässig nach derzeitiger ETA
- Einfachere Verarbeitbarkeit, daher geringere Anwendungsfehler

2-komponentige Silikone

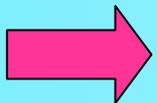
- Aushärtung durch Mischung der beiden Komponenten
- Schnelle, gesteuerte Aushärtung
- Sehr geringer Einfluss der Alterung
- Freie Fugengeometrie möglich (z. B. U-förmig, T-förmig, etc.)
- Für Dauerlasten (z. B. Eigengewicht) nach ETA zugelassen
- Applikation mit Mischapparaturen
- Höherer Aufwand bei Qualitätssicherung

Bauaufsichtliche Anforderungen an SSG

- Klassische Structural Glazing Klebstoffe (=Silikone) haben eine **Europäische Zulassung (ETA)** nach ETAG (European Technical Approval Guideline) der EOTA (European Organisation of Technical Approval)
- Die jeweilige Anwendung stellt eine **nicht geregelte Bauart** dar
- Daher Erfordernis einer **Zustimmung im Einzelfall** bzw. einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, trotz zugelassenem Werkstoff Silikon
- Bis zu einer Höhe von **4,0 m über Gelände ohne Anforderung** (Bezug: TRLV)

Prüfung von Structural Glazing Klebstoffen nach ETAG 002

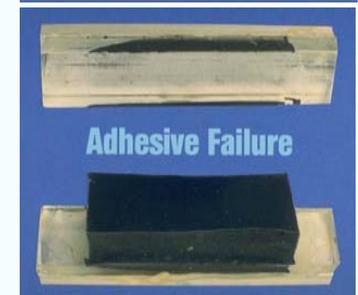
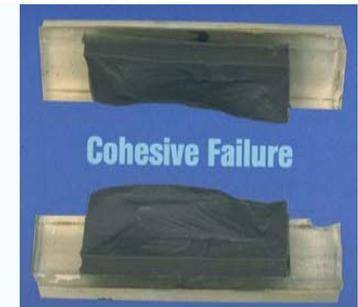
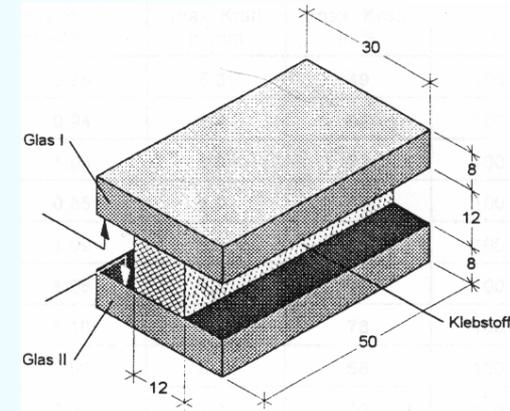
- 1. Produktqualität:** Härte (Shore A), Dichte, Farbe, Schwund, Rückstellvermögen, Gaseinschlüsse, Thermogravimetrische Analyse
- 2. Mechanische Festigkeit:** Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Bruchdehnung Scherfestigkeit, Schubmodul, Bruchdehnung unter Schub Kriechen unter Dauerlast Zug und Schub Prüfungen bei -20°C , $+23^{\circ}\text{C}$, $+80^{\circ}\text{C}$
- 3. Alterungsprozeduren:** 1000 h Wasserlagerung bei 45°C + UV-Bestrahlung
480 h Feuchtigkeit und NaCl (Salzsprühnebel)
480 h Feuchtigkeit und SO_2 -Atmosphäre
500 h Lagerung in Reinigungsmittel
Mechanische Ermüdung, 5350 Belastungszyklen
- 4. Chem. Verträglichkeit:** z.B. mit Vorlegebändern, Dichtprofilen, Klotzmaterialien
500 h Lagerung bei 60°C + UV-Bestrahlung



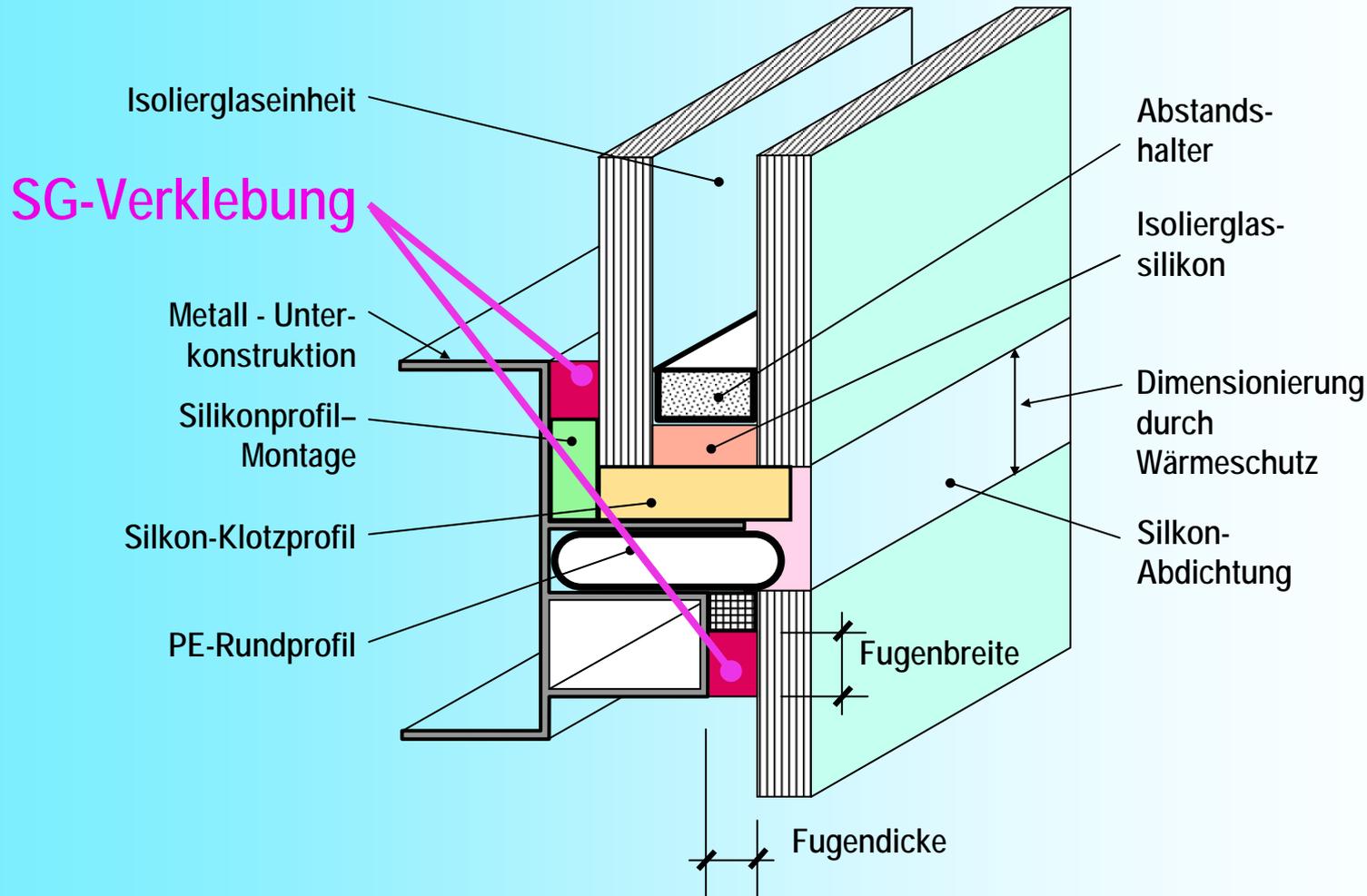
Nach bestandener Prüfung kann nach ETAG von einer Lebensdauer des Klebstoffs von mindestens **20 Jahren** ausgegangen werden

Nachweis mechanischer Festigkeit

- Probengeometrie Quader 12x12x50mm (Repräsentative Fuge)
- Belastung durch Zug oder Schub
- Anforderungen an Proben ohne Alterung
 - Kohäsives Bruchbild > 90%
 - $\text{Festigkeit}_{-20^{\circ}\text{C}} / \text{Festigkeit}_{+23^{\circ}\text{C}} > 0.75$
 - $\text{Festigkeit}_{+80^{\circ}\text{C}} / \text{Festigkeit}_{+23^{\circ}\text{C}} > 0.75$
 - Zulässige Spannung $R_{u,5}^* / 6$
- Anforderungen an Proben nach Alterung
 - Kohäsives Bruchbild > 90%
 - $\text{Festigkeit}_{\text{nach Alterung}} / \text{Festigkeit}_{\text{vor Alterung}} > 0.75$ (nur Zug)
 - * $R_{u,5}$: (5% Fraktile) Charakteristischer Wert, in dem mit 75% Wahrscheinlichkeit 95% aller Meßwerte enthalten sind



„Klassisches“ SSG nach ETAG (linienförmige, 2-seitige Verklebung)



Stand der ETA´s Mitte 2005 für SSG-Anwendungen

Auslegungsspannungen von Structural Glazing Verklebungswerkstoffen zugelassen
entsprechend ETAG 002 durch EOTA (European Organisation for Technical Approvals)

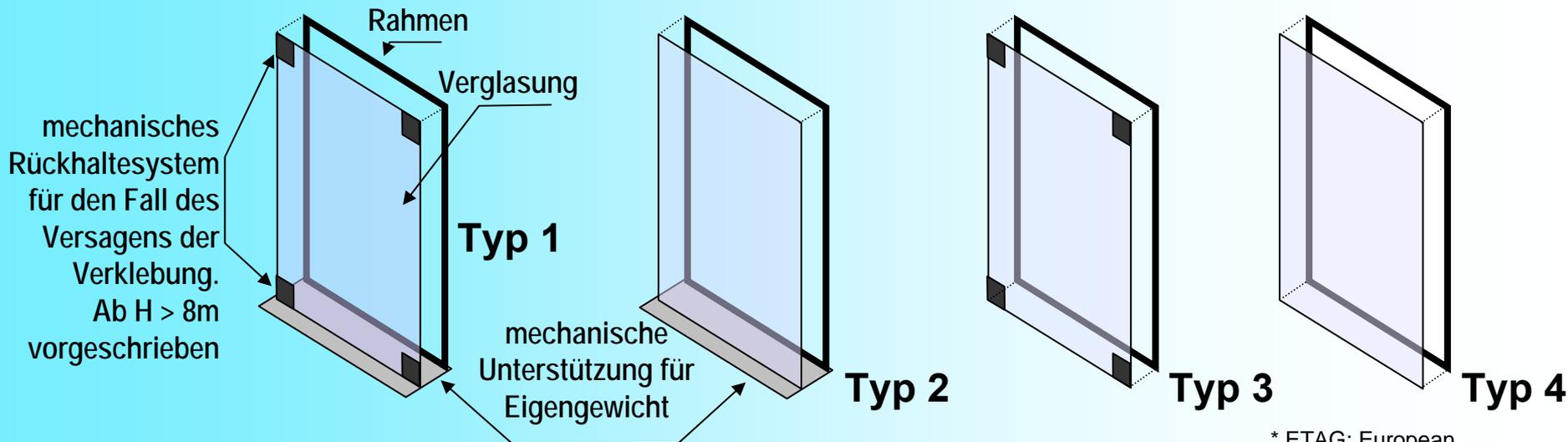
Silikon- klebstoff	Typ	Hersteller	ETA	Zug- spannung σ_{des}^{**}	Schub- spannung (dynamisch) τ_{des}^{**}	Schub- spannung (statisch) τ_{∞}^{**}
DC 993	2K	Dow Corning	ETA-01/0005	0,14 MPa	0,11 MPa	0,011 MPa
Elastosil SG 500	2K	SIKA	ETA-03/0038	0,14 MPa	0,105 MPa	0,0105 MPa
DC 895	1K	Dow Corning	ETA-01/0005	0,14 MPa	0,14 MPa	*

Qualitätshandbücher der Hersteller sind
zu beachten!

* Keine Zulassung für Dauerlasten
** Ingenieurspannungen

Verklebung in der Europäischen Normung

- **Structural Glazing (statische Verklebung von Glas und Metallkonstruktion) anerkannt als Bautechnologie**
- **ETAG* Richtlinie 002 offizielle Richtlinie für Structural Glazing**
- **Regelung von vier Structural Glazing Typen**



Nur diese Typen sind derzeit in Deutschland zugelassen

* ETAG: European Technical Approval Guideline

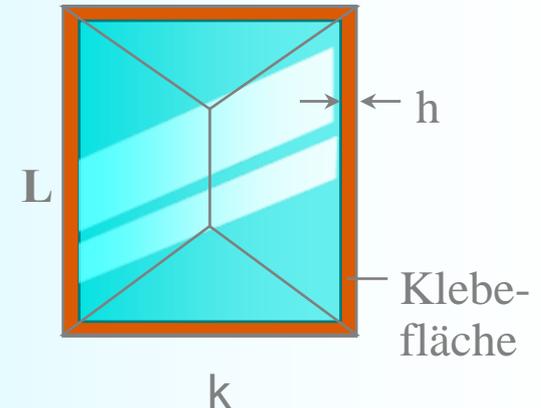
Dimensionierung einer Klebefuge nach ETAG

Die „Mickey-Mouse-Formel“

- Bemessung von Structural Glazing Klebefugen über den vereinfachten Ansatz einer resultierenden Flächenlast auf die Verklebungsfuge (z. B. Windlast)
- Last (hier Wind) wird komplett über Klebstoff abgetragen
- Ermittlung der erforderlichen Fugenbreite h

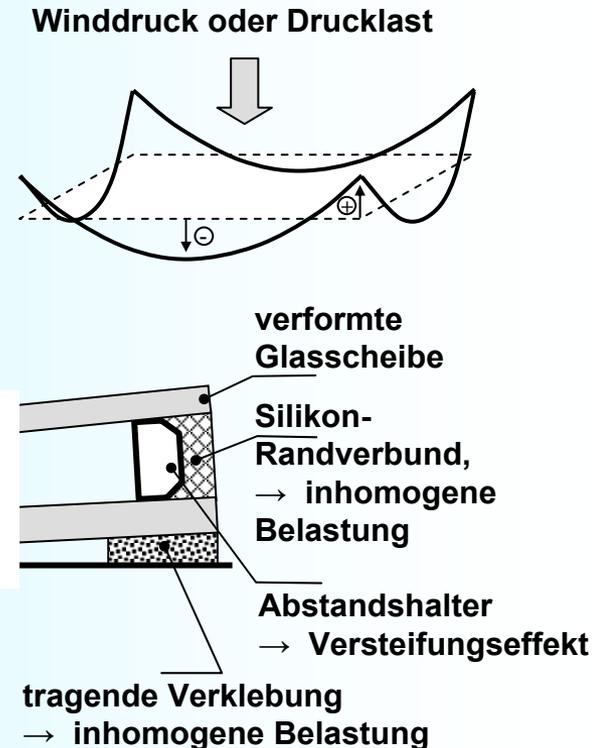
$$h = \frac{p_{Windsog} * k / 2}{\sigma_{des}}$$

- k : Fenstergeometrie (kleinere Kantenlänge)
 σ_{des} : nach ETAG zulässige Entwurfsspannung
 $p_{Windsog}$: Windlast



Annahmen hierbei:

- Gleichmäßige Verteilung der Klebespannung in Klebefuge
- Auslegungskriterium: Klebespannung < zulässige Spannung
- Vernachlässigung von:
 - aus der Plattentragwirkung resultierenden nichtlinearen Verteilung der Beanspruchung entlang der Auflagerlinie (mit VZ-Wechsel in den Eckbereichen !)
 - Randbiegemomenten in der Fuge durch Scheibenverformung
 - dem Einfluss konstruktiver Elemente (Rahmensteifigkeit, Abstandhalter)
 - den geometrischen Abmessungen und der Biegesteifigkeiten der Glasscheiben
 - den spezifischen Eigenschaften des Klebstoffs über die zulässige Spannung hinaus



Einschränkung der Anwendung

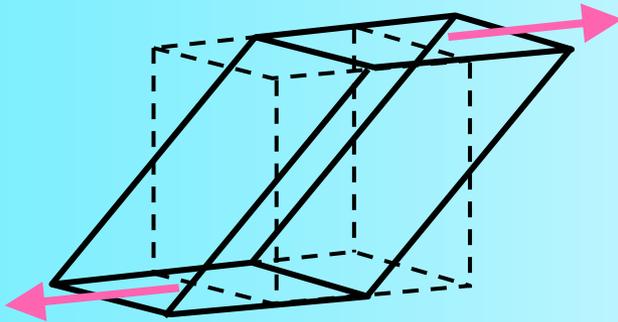
- **Starke Vereinfachung der Bemessungsformel**
 - Grobe Idealisierung der Klebefuge als Linienlager
 - Charakterisierung der Materialeigenschaften lediglich durch zulässigen Spannungswert
- Für allgemeine Anwendungen als tragende Verklebung ungeeignet, wegen stark idealisierter Lastabtragung
- Für komplexe Verklebungsgeometrien mit lokaler mehrdimensionaler Beanspruchung ungeeignet, da Abbildung mehrdimensionaler Spannungszustände auf zulässige Spannung („eindimensional“) nicht gegeben
 - **Beachte: ETAG 002 schließt dreiseitige Verklebungen ausdrücklich (!) aus.**



Inhalt

- Chemische und physikalische Eigenschaften
- Technische Regeln für tragende Verklebung von Glasfassaden
- **Elastisches Verhalten typischer Verklebungsgeometrien**
- Brand- und Explosionsverhalten von Silikonverklebungen
- Ausgewählte Beispiele tragender Verklebungen

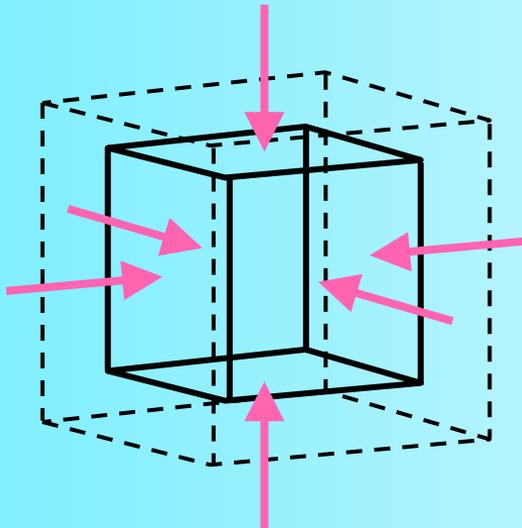
Elastische Eigenschaften von Elastomeren mechanisch sehr unterschiedlich bei Volumen- oder Gestaltänderungen



Gestaltänderung

(z. B. Einfacher Schubversuch)

- geringe Steifigkeit
- große Verformung durch Verschieblichkeit der Molekülketten untereinander und Rotationsmöglichkeit innerhalb der Ketten



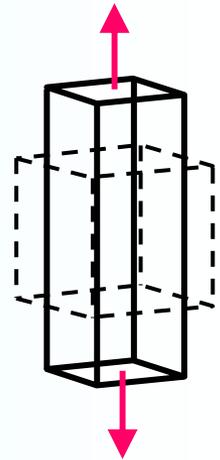
Volumenänderung

(z. B. Kompressionsversuch)

- hohe Steifigkeit (Inkompressibilität – „Volumenkonstanz“)
- geringe Verformung, da Längenänderung der Molekülketten hohe Energie erfordert

Phänomene beim Verkleben mit Silikon

- **Querkontraktionszahl $\nu \approx 0.5$ → Volumenkonstanz**
Nahezu perfekte Inkompressibilität von Silikon
führt zu
 - deutlichen Koppelleffekten der Spannungen bei behinderter Querkontraktion
 - hohe Steifigkeit beim „Einschließen“ des Materials
- **Demonstration dieser Effekte anhand von typischen Verklebungen**
 - Bandförmige Verklebung
 - Punktförmige Verklebung
 - Werkstoffversuch (Vergleich)

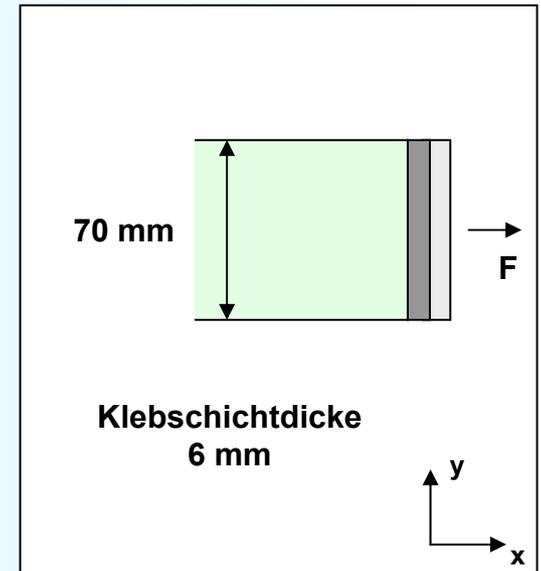


$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

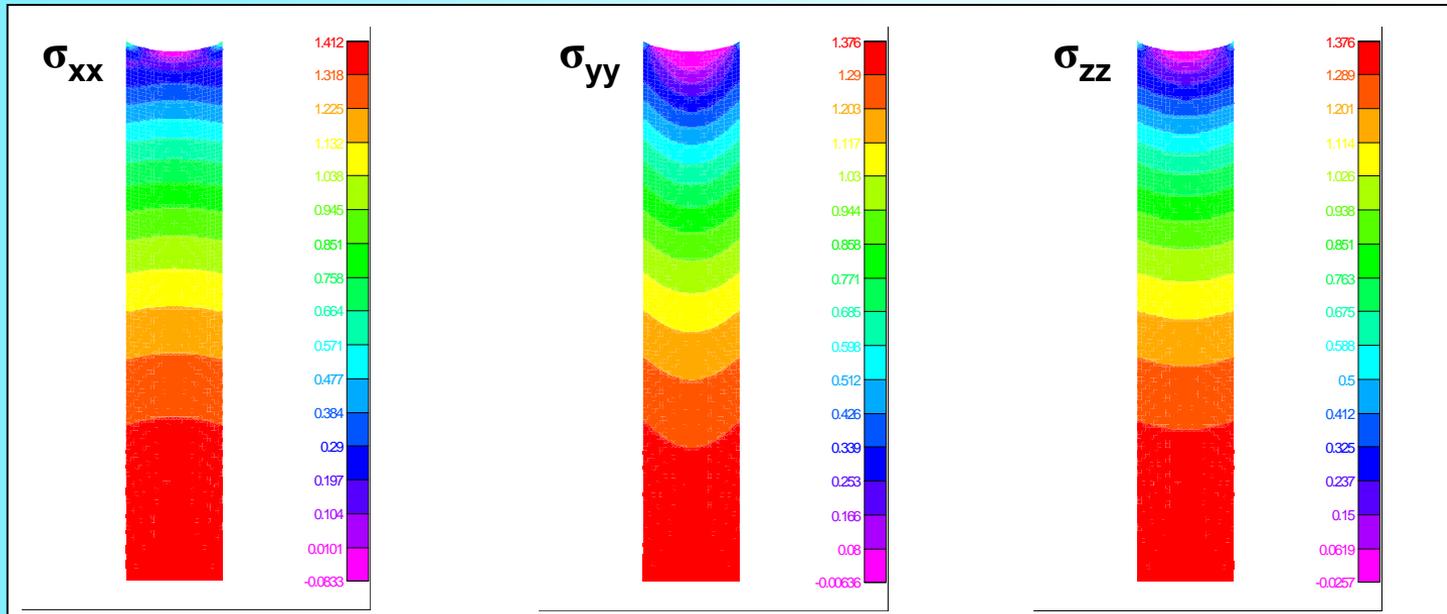
$$\frac{E}{3} < G < \frac{E}{2}$$

Bandförmige Verklebung

- **Geometrie der untersuchten Verklebung**
 - 70 mm Breite
 - 6 mm Dicke
 - Keine Verschiebungen in Längsrichtung
(Unendlich langer Körper,
ebener Dehnungszustand)
- **Randbedingungen**
 - Glaskörper als feste Lagerung
 - Stahlband 3 mm Dicke
- **Belastung**
 - Aufgebrachte Zugverformungen am Stahlband außen
 - Nominelle Zugspannung $F/A_0 = 1 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer
Linienlast von 70 N/mm



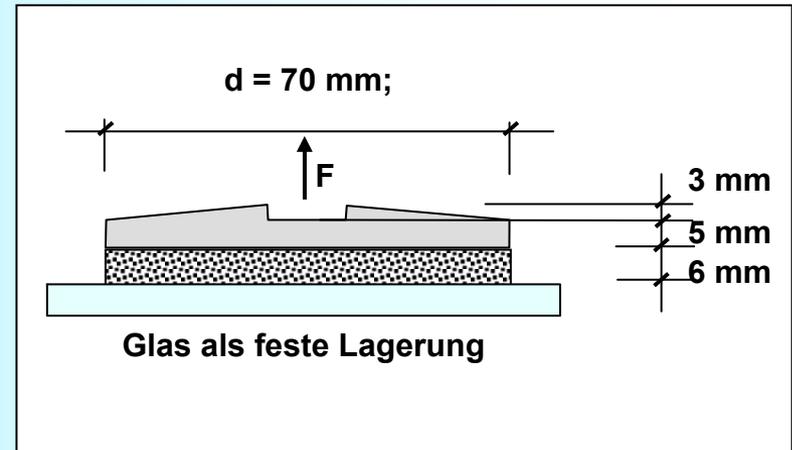
Spannungsverteilungen: Bandförmige Verklebung



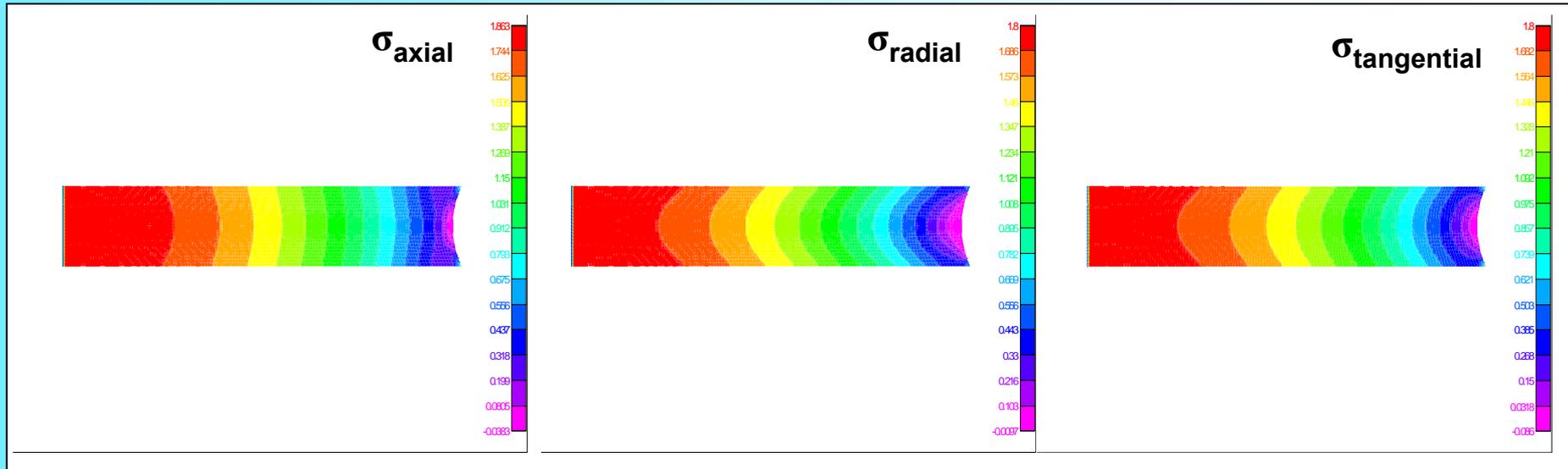
- Darstellung der deformierten oberen Verklebungshälfte
- Ungleichmäßige Spannungsverteilung in Zugrichtung
- Durch Einschnürungseffekte und Behinderung der Querkontraktion deutliche Zugspannungen in y- und z-Richtung
 - $\sigma_{xx}^{\max} = 1.41 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{yy}^{\max} = 1.38 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{zz}^{\max} = 1.38 \text{ N/mm}^2$ [Cauchy]

Punktförmige Verklebung

- **Geometrie der untersuchten Verklebung**
 - 70 mm Durchmesser
 - 6 mm Dicke
 - Axialsymmetrische Geometrie
- **Randbedingungen**
 - Glaskörper als feste Lagerung
 - Stahlteil mit variabler Dicke
- **Belastung**
 - Aufgebrachte Zugverformungen an Stahlteilachse
 - Nominelle Zugspannung $F/A_0 = 1 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer Belastung von $F \approx 3850 \text{ N}$
 - Axialsymmetrischer Belastungszustand

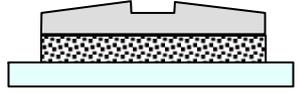


Spannungsverteilung: Punktförmige Verklebung



- Darstellung der deformierten rechten Verklebungshälfte
- Ungleichmäßige Spannungsverteilung in Zugrichtung (axial)
- Durch Einschnürungseffekte und Behinderung der Querkontraktion deutliche Zugspannungen in radialer Richtung
 - $\sigma_{ax}^{\max} = 1.86 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{rad}^{\max} = 1.80 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{tang}^{\max} = 1.80 \text{ N/mm}^2$

Zusammenfassung

$\sigma_{\text{nom}} = F/A_0$ $= 1 \text{ N/mm}^2$			
Dehnung $\Delta l/l_0$	122 %	$\approx 2.6 \%$	$\approx 4.7 \%$
Maximum σ_{xx} bzw. σ_{axial}	2.22 N/mm ²	1.41 N/mm ²	1.86 N/mm ²
Maximum σ_{yy} bzw. σ_{radial}	0 N/mm ²	1.38 N/mm ²	1.80 N/mm ²
Maximum σ_{zz} bzw. $\sigma_{\text{tangential}}$	0 N/mm ²	1.38 N/mm ²	1.80 N/mm ²
Materialbean- spruchung	Uniaxialer Spannungs- zustand	Ebener Dehnungs- zustand (2D)	Rotations- symmetrie

Inhalt

- Chemische und physikalische Eigenschaften
- Technische Regeln für tragende Verklebung von Glasfassaden
- Elastisches Verhalten typischer Verklebungsgeometrien
- **Brand- und Explosionsverhalten**
- Ausgewählte Beispiele tragender Verklebungen

Structural Glazing im Brandfall

Beispiele von Dow Corning zur Verfügung gestellt

Am verklebten Scheibenrand bleiben
Glasbruchstücke auf dem Rahmen



Silikon ist schwer entflammbar,
es bildet bei hohen Temperaturen
eine glimmende Silikatschicht,
welche den Untergrund schützt

Structural Glazing im Brandfall

chemische Betrachtung

Naturwissenschaftlich gesehen handelt es sich bei einem Brand um eine Oxidation unter hoher Temperatur.

- **Brandfall Organische Elastomere**
wesentliche Bestandteile: C, H, N, S
→ CO_2 (gasf.), CO (gasf.+giftig), H_2O (gasf.), NO_x / SO_x (gasf.+giftig)
- **Brandfall Silikon-Elastomere**
wesentliche Bestandteile: C, H, Si-O
→ CO_2 (gasf.), CO (gasf.+giftig), H_2O (gasf.), **SiO_2 (fest = Sand)**

Structural Glazing Silikone in explosionsbeständigen Fassaden

Beispiele von Dow Corning

- **Fallstudie – Madrid Juli 2000.**
- **Tests an SG-Fenstern – England 1997.**
- **Explosionsbeständig ausgelegte Objekte**

Fallbeispiel: Madrid Juli 2000 (Quelle: Dow Corning)

- **Explosion einer 20 kg Bombe in der Stadtmitte von Madrid zwischen zwei Gebäuden**
- **Eines dieser Gebäude hatte eine Fassade mit 4-seitigem Structural Glazing.**
- **Die Fassadenkonstruktion war nicht dafür konstruiert, solchen Belastungen standzuhalten. Die Fassade wurde deshalb total zerstört.**
- **Allerdings zeigte sich bei der eingehenden Untersuchung der verklebten Scheiben die außergewöhnliche Hafteigenschaft der 4-seitigen Silikon-Verklebung.**

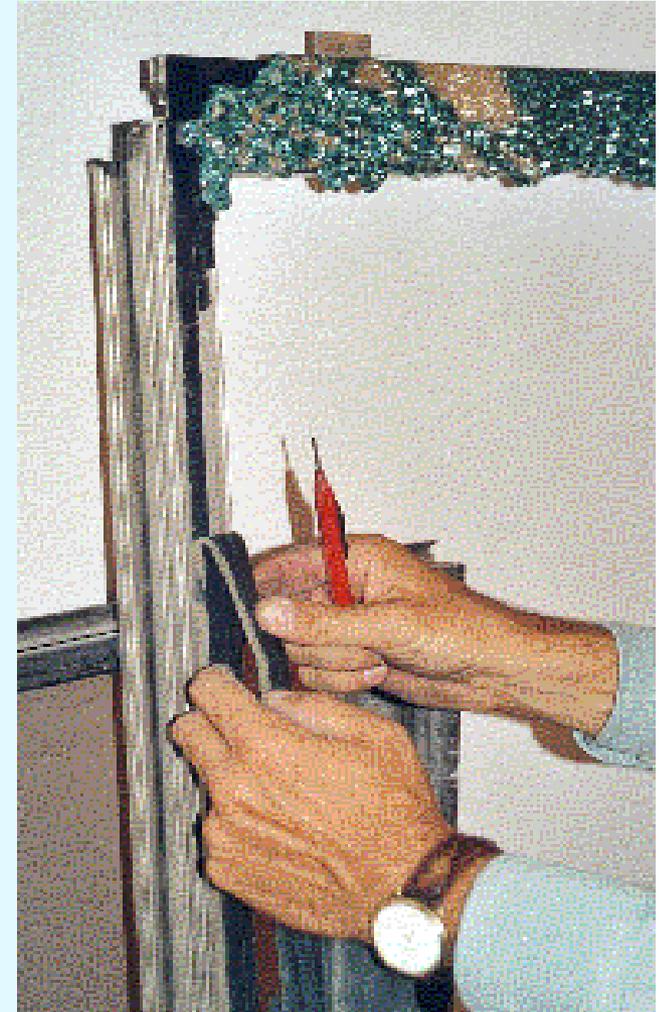
Madrid Juli 2000 (Quelle: Dow Corning)



Brand- und Explosionsverhalten

Madrid July 2000 (Quelle: Dow Corning)

- Der Explosionsdruck war deutlich höher als die bei der Berechnung zugrunde gelegten Windlasten. Deshalb wurden das Glas und die Rahmen zerstört. Die Verklebungen jedoch hielten diesen Belastungen stand.
- Die Klebefugen der Structural Glazing Silikone (DC 895 und DC 983) wurden nicht zerstört, während das Glas zerbrach.



Explosions-Tests an SG Fenstern

(Quelle Dow Corning)

- Explosions-Test mit 4-seitigem Structural Glazing.
- 12 kg TNT wurden in einer Höhe von 0,8 m und einer Entfernung von 6,6 m platziert.



Explosions-Tests an SG Fenstern: Zusammenfassung

(Quelle: Dow Corning)

- Die SG Verklebung muss so dimensioniert werden, dass sie den ersten Impuls übersteht, oder zumindest bis das vorgespannte Glas zerbricht. Dadurch wird die Ablösung der Scheiben verhindert.
- Die PVB Folie der VSG Scheibe muss so bemessen sein, dass sie dem Explosionsdruck standhält.
- Die Silikon-Klebefuge widersteht einmal dem hohen Druck und zum andern den hohen Frequenzen der Schwingungen, die bei Bombenexplosionen verursacht werden.



Inhalt

- Chemische und physikalische Eigenschaften
- Technische Regeln für tragende Verklebung von Glasfassaden
- Elastisches Verhalten typischer Verklebungsgeometrien
- Brand- und Explosionsverhalten von Silikonverklebungen
- **Beispiele tragender Verklebungen**



Institut für Konstruktion
und Entwurf,
Universität Stuttgart



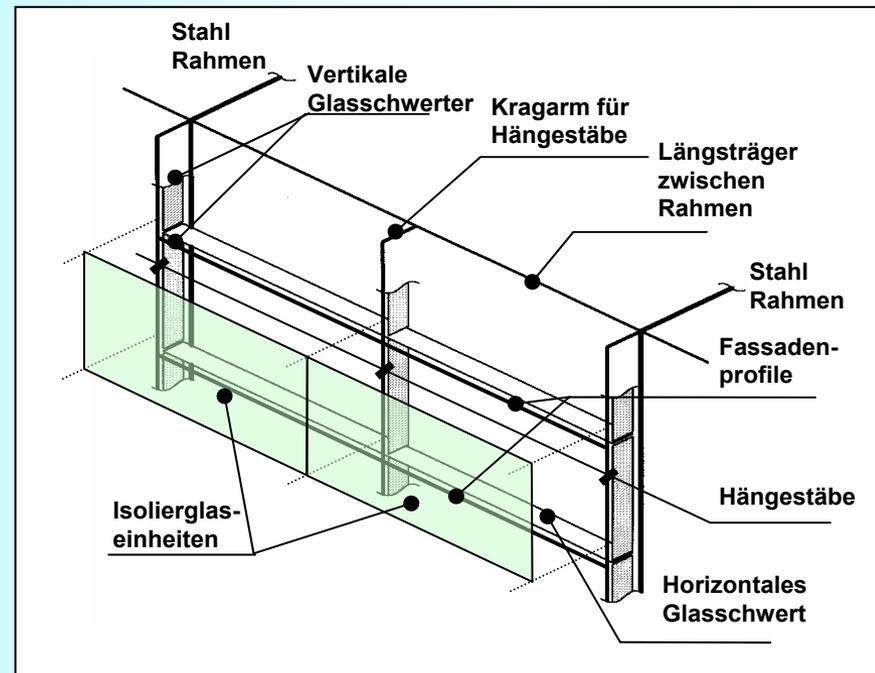
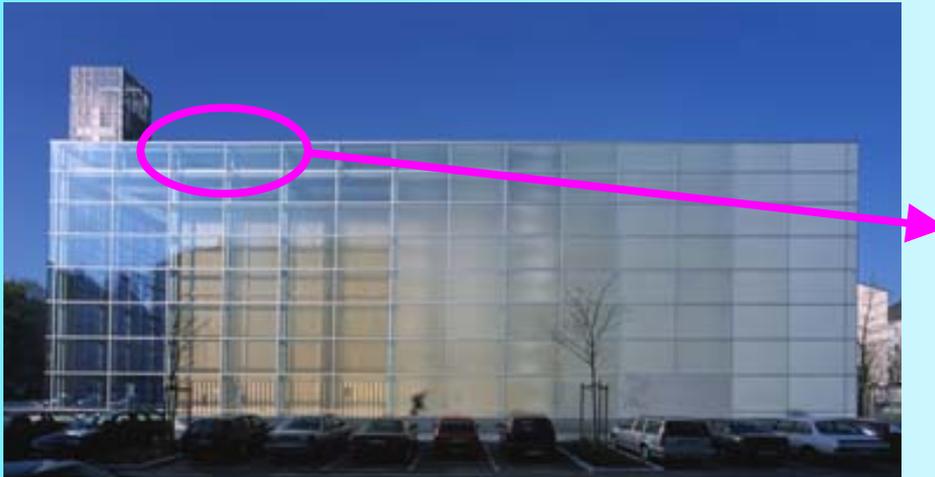
Kleben im Glasbau

Stahlbaukalendertag, Stuttgart, 07.10.05



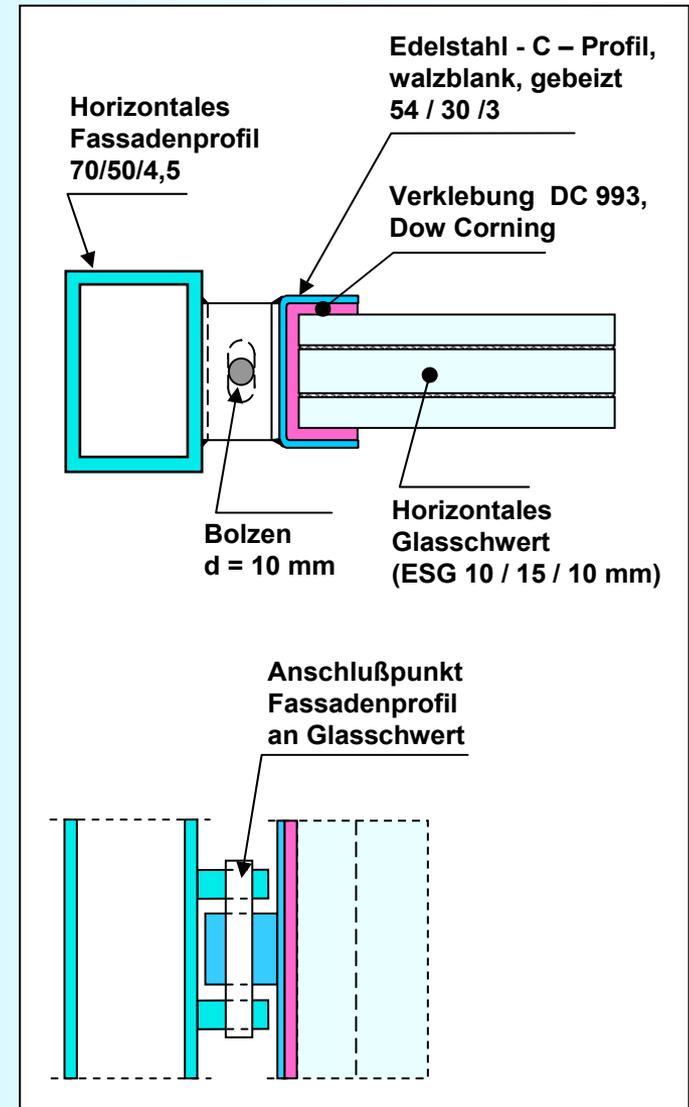
Beispiel tragende Verklebung mit Silikon

- Glasfassade Herz-Jesu Kirche München
- Tragende Silikonverklebung der horizontalen und vertikalen Glasschwerter (Länge der Verklebung bis 6.70 m)



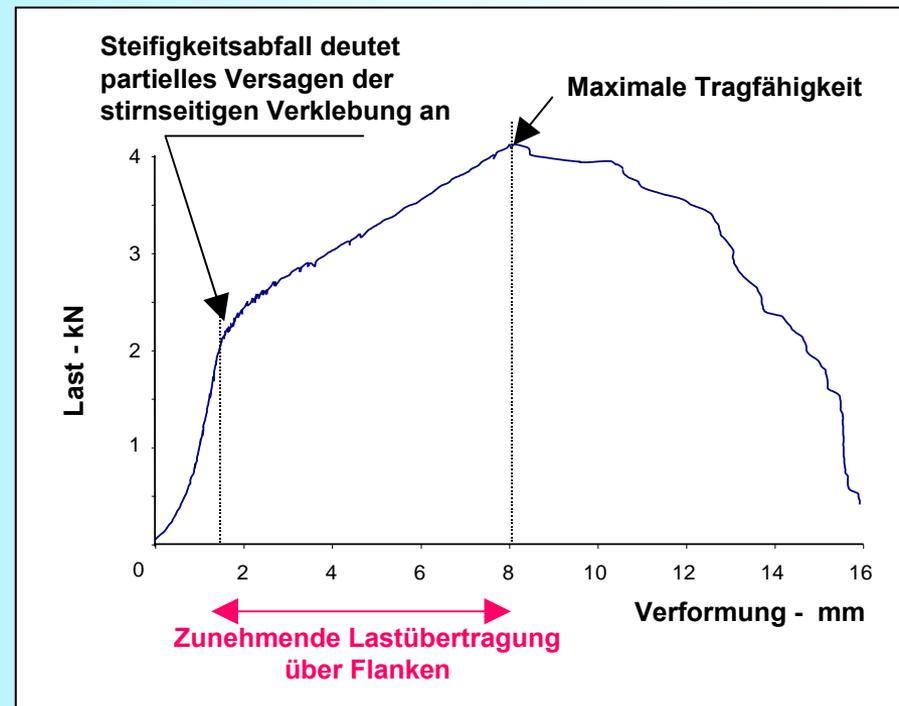
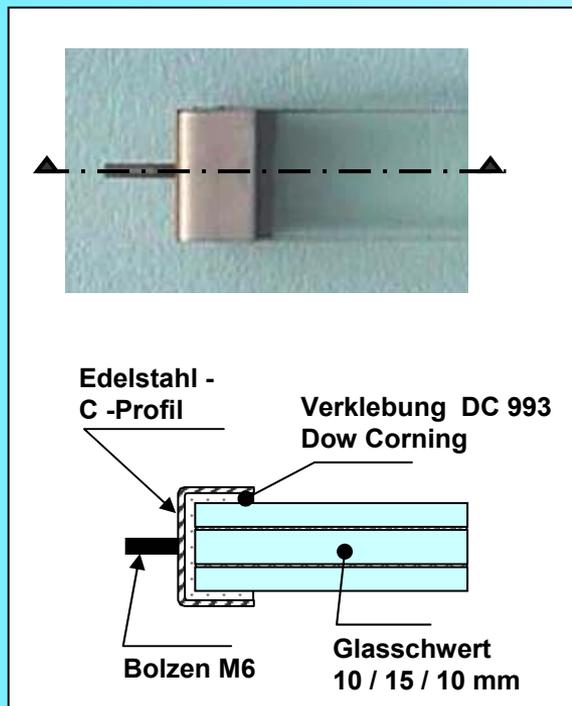
Verklebungsgeometrie

- Dreiseitige Verklebung des U-Profils mit Glasschwert
- Komplexe Beanspruchung des Silikonwerkstoffs (Stirnseitiger Zug, flankenseitiger Schub, Querkontraktionsbehinderung und fast perfekte Inkompressibilität)
- Keine direkte Übertragung von ETAG 002 Regeln auf diese Art von Anwendung möglich



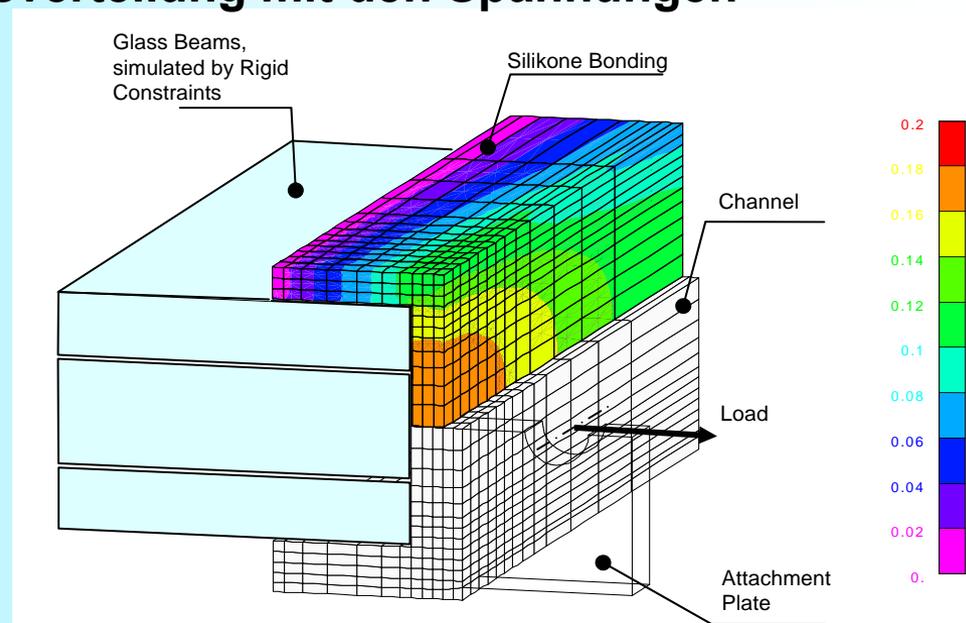
Nachweis der Tragfähigkeit: Experiment ...

- Nachweis erfolgt durch Kombination von experimentellen und theoretischen Methoden
- Experimentell: Detaillierte Bauteilversuche der Verklebung



Nachweis der Tragfähigkeit: ... und Theorie

- Theoretischer Ansatz, gestützt durch den experimentell untersuchten Probekörper:
 - Ermittlung der Spannungsverteilung in der Verklebung des Probekörpers unter kritischer Belastung
 - Vergleich dieser Spannungsverteilung mit den Spannungen der Glasschwerter
 - unter Windsog (horizontales Glasschwert)
 - unter Gewichtslasten (vertikales Glasschwert)



Schallschutzwand entlang einer Autobahn



Bild vor dem
Anprallversuch
Versuchsstand der
FH München

Quelle:
Dr. Ing. Rudolf Hess,
Glasconsult, Uitikon,
Schweiz

Schallschutzwand entlang einer Autobahn



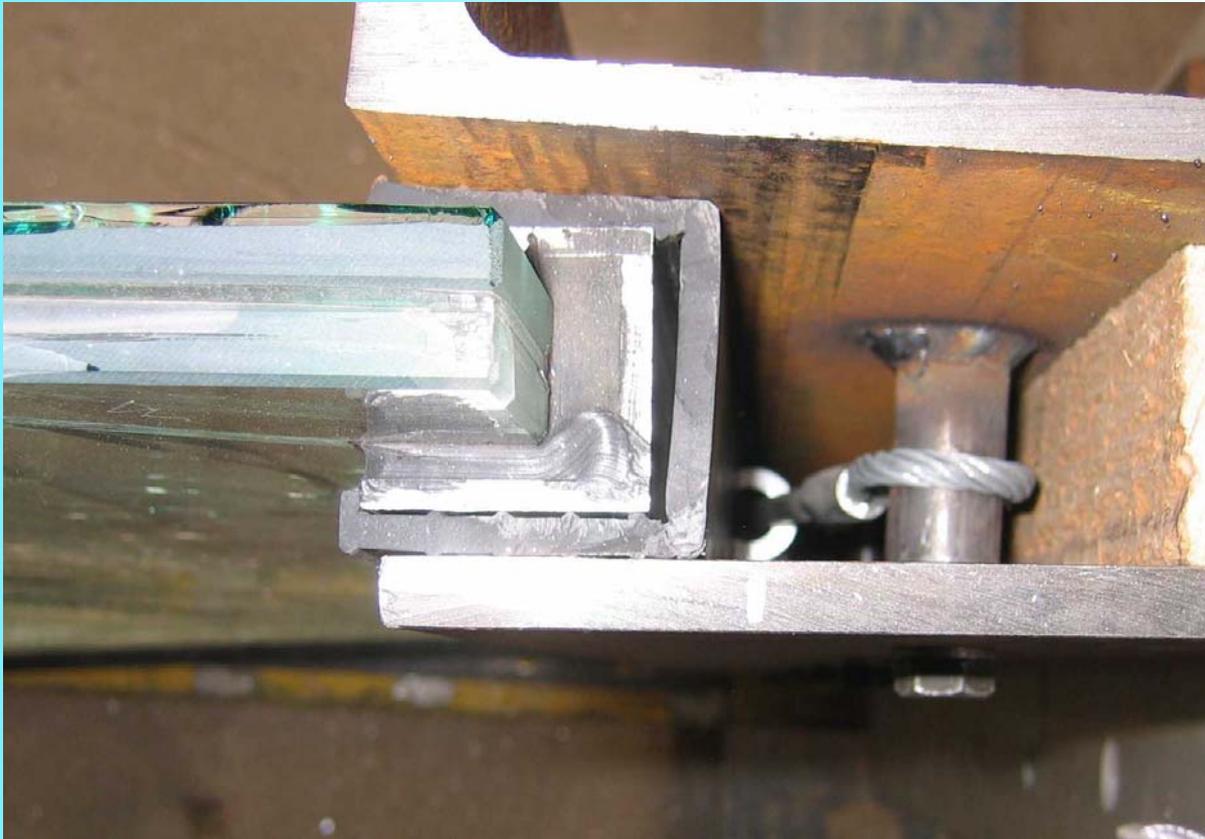
Bild nach 2-maligem
Anprall

Versuchsstand der
FH München

Quelle:
Dr. Ing. Rudolf Hess,
Glasconsult, Uitikon,
Schweiz

Schallschutzwand entlang einer Autobahn

Rückhaltesystem innerhalb der Klemmung



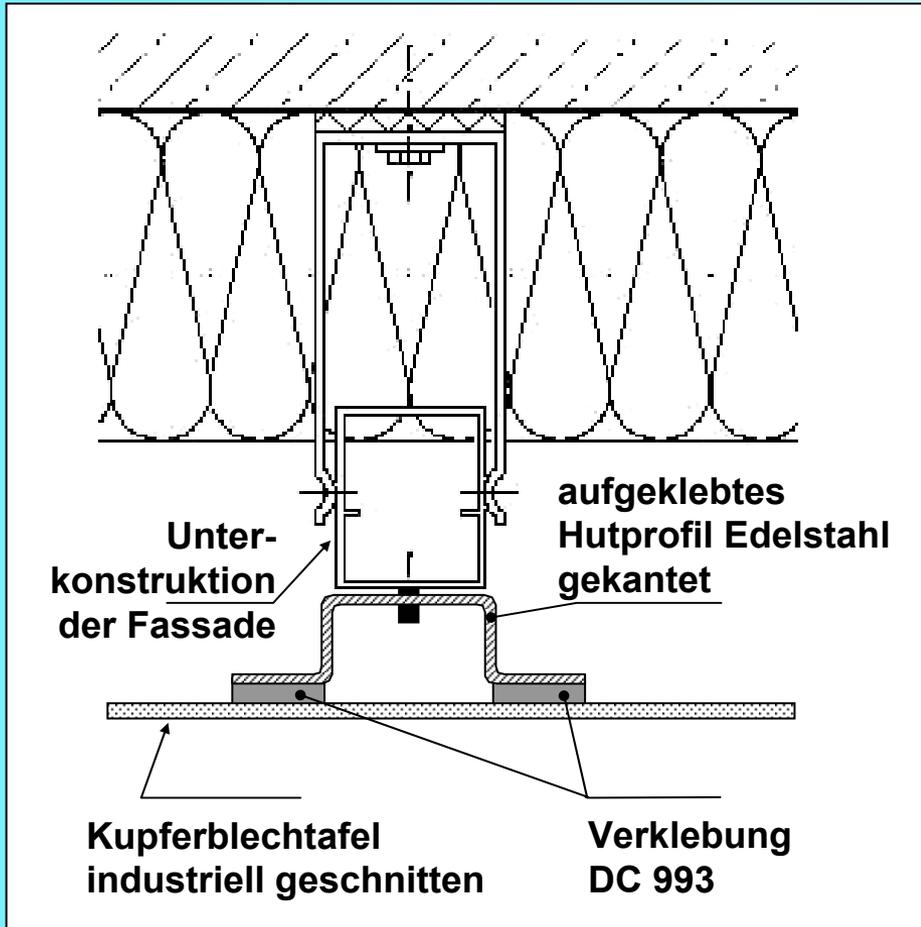
**Bild nach 2-maligem
Anprall**

**Versuchsstand der
FH München**

**Quelle:
Dr. Ing. Rudolf Hess,
Glasconsult, Uitikon,
Schweiz**

Verklebung Metall - Metall

Servicezentrum Theresienwiese - nicht ausgeführt



**Verklebung Edelstahl –
Kupfer**

**Nachweis der Verklebung
nach ETAG 002**

**Ohne Zustimmung im
Einzelfall, da außerhalb
des Anwendungsbereichs
der Technischen Regel für
die Verwendung von
linienförmig gelagerten
Verglasungen**

Verklebung Metall - Metall Guggenheimmuseum, Bilbao, Spanien



**Beispiel einer
ausgeführten
Verklebung von
Titanblechen als
Fassaden -
Verkleidung**

Ende