



*Punktuelles Kleben
mit Silikon*

A. Hagl Ingenieurgesellschaft mbH, München

Vorstellung

Herz-Jesu Kirche, München



- Schwerpunkt ursprünglich Stahl- und Stahlbetonbau
- Später auch Glasbau
- Später auch Klebtechnik (Herz-Jesu-Kirche - 1998)
- Gründung AK Kleben innerhalb des FKG (2002)
- Anregung diverser Forschungsaktivitäten zur Klebtechnik im Bauwesen

10 kN Prüfmaschine, Videoextensiomter vertikal + horizontal



- Versuchsdurchführung an Klebstoffen und Verklebungen (Zug, Druck, Schub, zyklische Belastung)
- Forschung zur Klebtechnik und Klebstoffen
- Berechnung von komplexen Silikonklebfugen auf der Basis eigens erstellter Werkstoffgesetze
- Begleitung / Organisation von ZiE's aus dem Bereich Glas- und Klebtechnik

Inhalt

- 1. Technische Regel für Klebverbindungen: ETAG 002**
2. Allgemeine Materialgesetzmäßigkeiten
3. Tragfähigkeit punktueller U-förmiger Verklebungen
4. Tragfähigkeit geklebter Punkthalter
5. Schlussfolgerung

Bauaufsichtliche Anforderungen an SSG

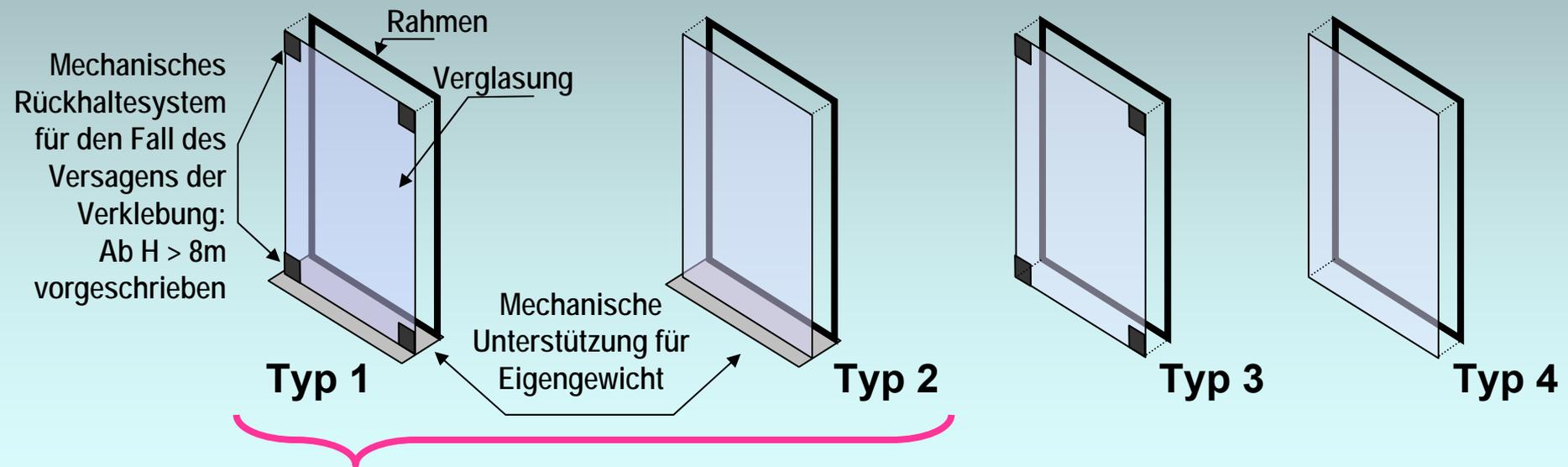
- Klassische Structural Glazing Klebstoffe (=Silikone) haben eine **Europäische Zulassung (ETA)** nach ETAG (European Technical Approval Guideline) der EOTA (European Organisation of Technical Approval)
- Die jeweilige Anwendung (Verklebung von Glas und Metallbauteil) stellt eine **nicht geregelte Bauart**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



Nach bestandener Prüfung kann von einer Lebensdauer der Verklebung von mindestens **25 Jahren** ausgegangen werden

Verklebung in der Europäischen Normung

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



**In Deutschland
zugelassen**

* ETAG: European
Technical Approval
Guideline

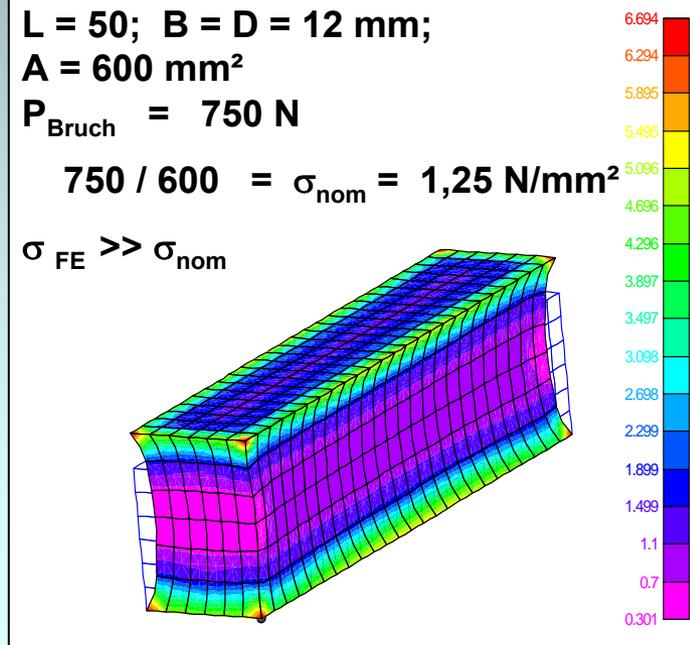
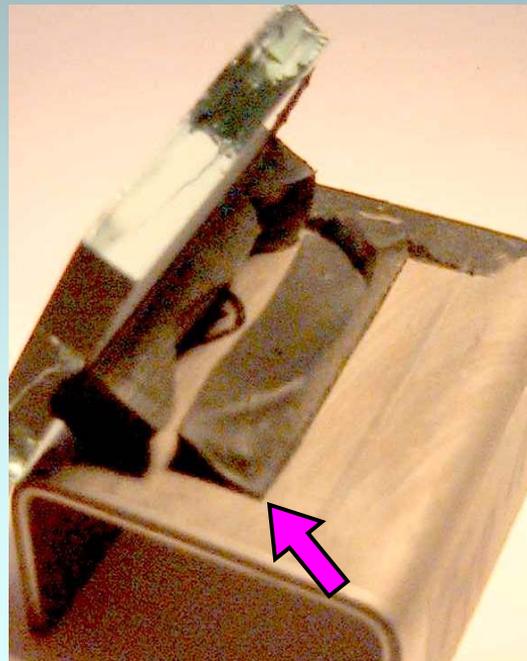
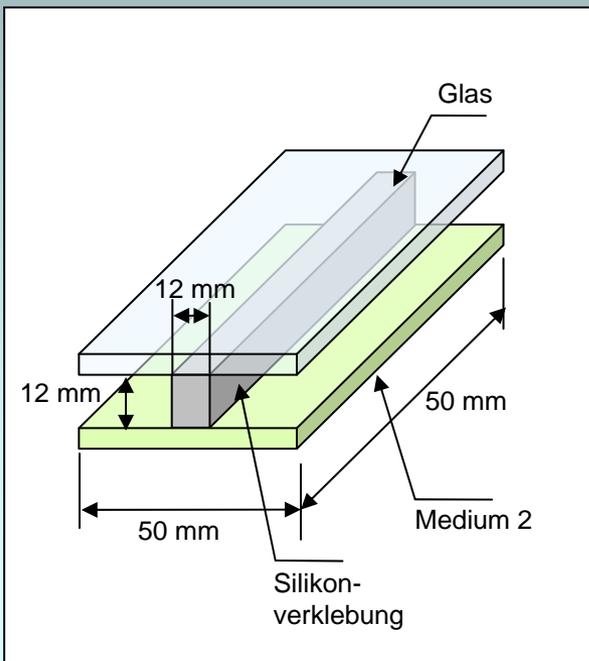
Sicherheitsbeiwerte nach ETAG 002

- **Windlast / kurzzeitige Last:**
Konstruktive Belastbarkeit des Silikones auf 140.000 Pa ($\triangleq 0,14 \text{ N/mm}^2$) festgelegt, 1/6 der mindestens erreichten Bruchfestigkeit
Sicherheitsfaktor von min. 6 → **zul $\sigma_i = R_{u,5} / 6$**
- **Eigengewichts- / Dauerlast:**
Konstruktive Belastbarkeit des Silikones auf 15.000 Pa ($\triangleq 0,015 \text{ N/mm}^2$) festgelegt, 1/10 der mindestens erreichten Elastizitätsgrenze
Sicherheitsfaktor von min 10 → **zul $\sigma_i = R_{u,5} / 10$**
- **Thermische Belastung:**
Silikon Bewegungsfähigkeit ist festgelegt auf 12,5 %, 1/8 der minimalen Reissdehnung
Sicherheitsfaktor von min 8
- Die angesetzten Absolutwerte der Silikoneigenschaften ($R_{u,5}$) werden ermittelt als 5% Fraktilwert. Er berücksichtigt auch Schwankungen der Tragfähigkeit

Auslegungsspannung nach ETAG 002

Ermittlung erfolgt an einem Prüfkörper der einen Abschnitt einer linienförmigen Verklebung repräsentiert, jedoch:

- Deutliche Einschnürung des Silikonmaterials unter Zug
- Inhomogene Werkstoffbeanspruchung innerhalb des Silikons wegen Querkontraktionsbehinderung an den Fügepartnern (Ecken)



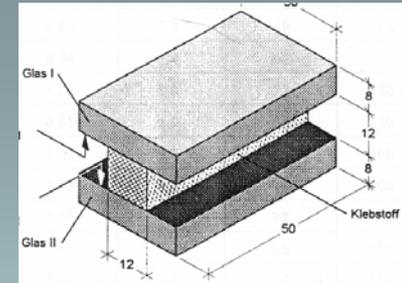
Versuchsdurchführung ETAG Zug

Der Versuch bestätigt das theoretische Ergebnis.



Nachweis mechanischer Festigkeit

- **Probengeometrie Quader 12x12x50 (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 95% Wahrscheinlichkeit alle Meßwerte enthalten sind



Auslegungsspannungen σ_{des}

- Auslegungsspannungen zweier repräsentativer Structural Glazing Verklebungswerkstoffe (2K-Silikone) zugelassen entsprechend ETAG 002 durch EOTA*
 - DOW Corning DC 993
 - SIKA Elastosil SG 500



Werkstoff	Europäische technische Zulassung	Zugspannung σ_{des}^{**}	Schubspannung (dynamisch) τ_{des}^{**}	Schubspannung (statisch) τ_{∞}^{**}
DC 993	ETA-01/0005	0.14 MPa	0.11 MPa	0.011 MPa
SG 500	ETA-03/0038	0.14 MPa	0.105 MPa	0.0105 MPa

* EOTA: European Organisation for Technical Approvals

** Ingenieurspannungen σ_i , τ_i

Definition der Spannungen

Ingenieurspannungen

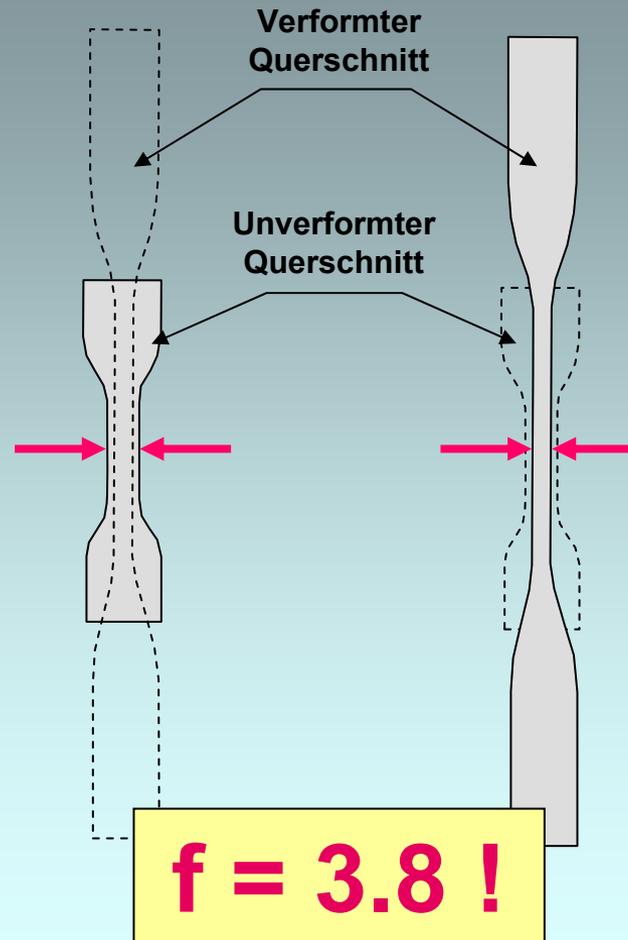
$$\sigma_i$$

Bezugsgröße:
Ausgangsquerschnitt

z.B. $A_0 = 24 \text{ mm}^2$

$F_{\text{Bruch}} = 40 \text{ N}$

$\sigma_i = 1.65 \text{ N/mm}^2$



**Wahre Spannungen
(Cauchy-Spannungen)**

$$\sigma_c$$

Bezugsgröße:
aktueller Querschnitt

z.B. $A = 6.21 \text{ mm}^2$

$F_{\text{Bruch}} = 40 \text{ N}$

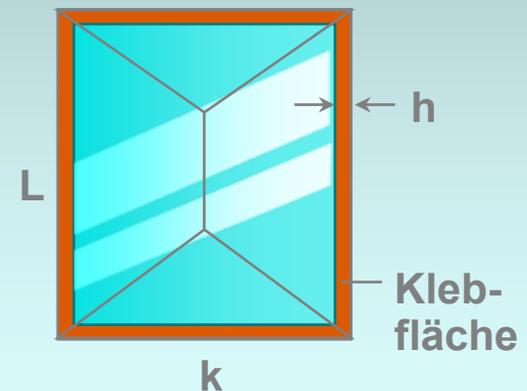
$\sigma_c = 6.21 \text{ N/mm}^2$

Bemessung über die „Mickeymouse“-Formel - Dimensionierung einer Klebfuge

- Bemessung von Structural Glazing Klebfugen über vereinfachten Ansatz einer aus Windsog resultierenden Flächenlast auf die Verklebungsfuge **vorh $\sigma \leq \text{zul } \sigma$**
- Windlast wird komplett über Klebstoff abgetragen
- Ermittlung der erforderlichen Fugenbreite h

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

- k : Fenstergeometrie (kleinere Kantenlänge)
 σ_{des} : nach ETAG zulässige Entwurfsspannung
 p_{Windsog} : Windlast nach DIN 1055 / 4

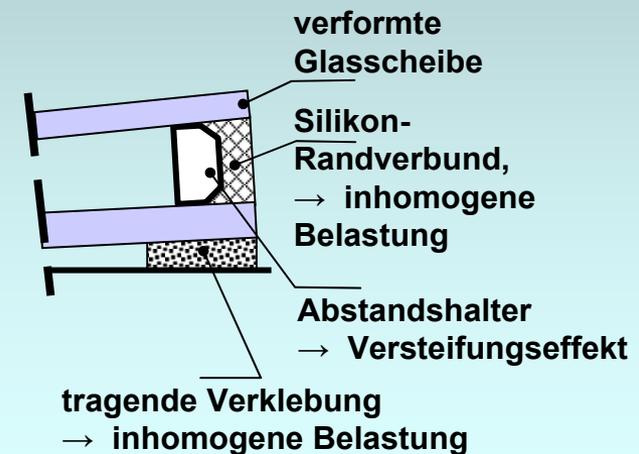
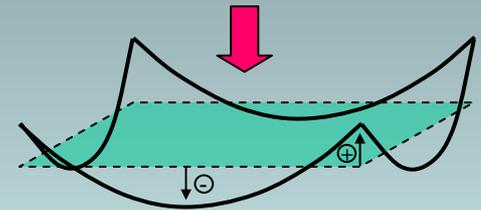


Annahmen nach ETAG

- Gleichmäßige Verteilung der Spannung innerhalb der Klebfuge
- Auslegungskriterium Klebspannung $<$ zulässige Spannung
- vernachlässigt wird hierbei:

- aus der Plattentragwirkung resultierende nichtlineare Verteilung der Beanspruchung entlang der Auflagerlinie (mit VZ-Wechsel in den Eckbereichen !)
- die Randbiegemomente in der Fuge durch Scheibenverformung
- der Einfluß konstruktiver Elemente (Rahmensteifigkeit, Abstandhalter)
- die geometrischen Abmessungen und Biegesteifigkeiten der Glasscheiben
- die tatsächlichen mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs über die zulässige Spannung hinaus

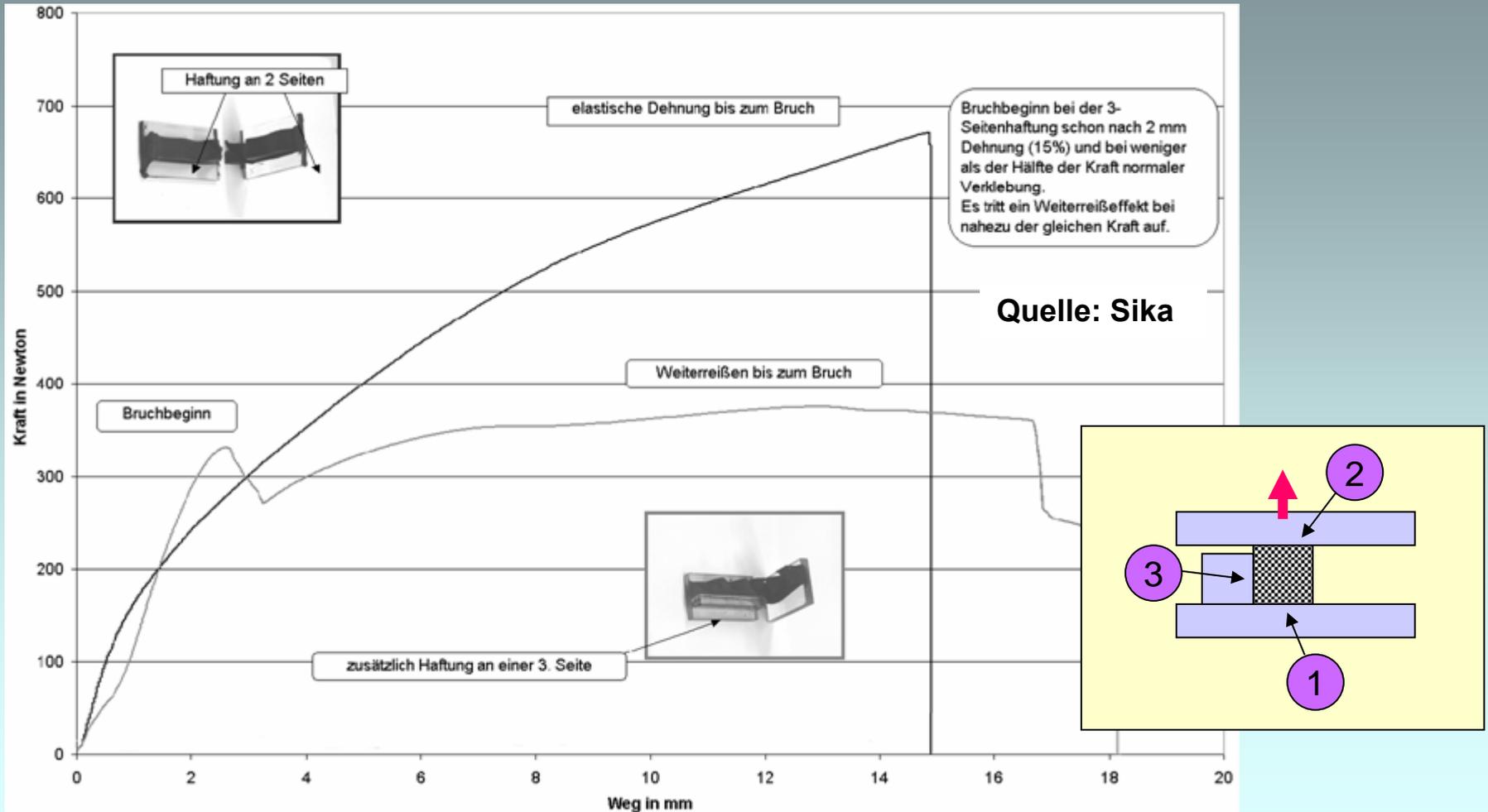
Winddruck oder Drucklast



Einschränkung der Anwendung der ETAG

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

„Dreiseitige“ Verklebung – nach ETAG unzulässig



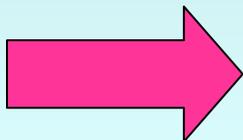
Bemessungsvorschrift ... aber !

Nach ETAG 002, Anhang 2 – Rechenverfahren

A.2.0 Einleitung:

„Dennoch kann ein Antragsteller ein anderes Rechenverfahren vorlegen, das auf Simulationsversuchen oder Forschungsergebnissen basiert.

Um es der Zulassungsstelle zu erlauben, eine ETA auf Grundlage eines solchen Rechenverfahrens zu erteilen, müssen vollständige Nachweise geliefert werden.“



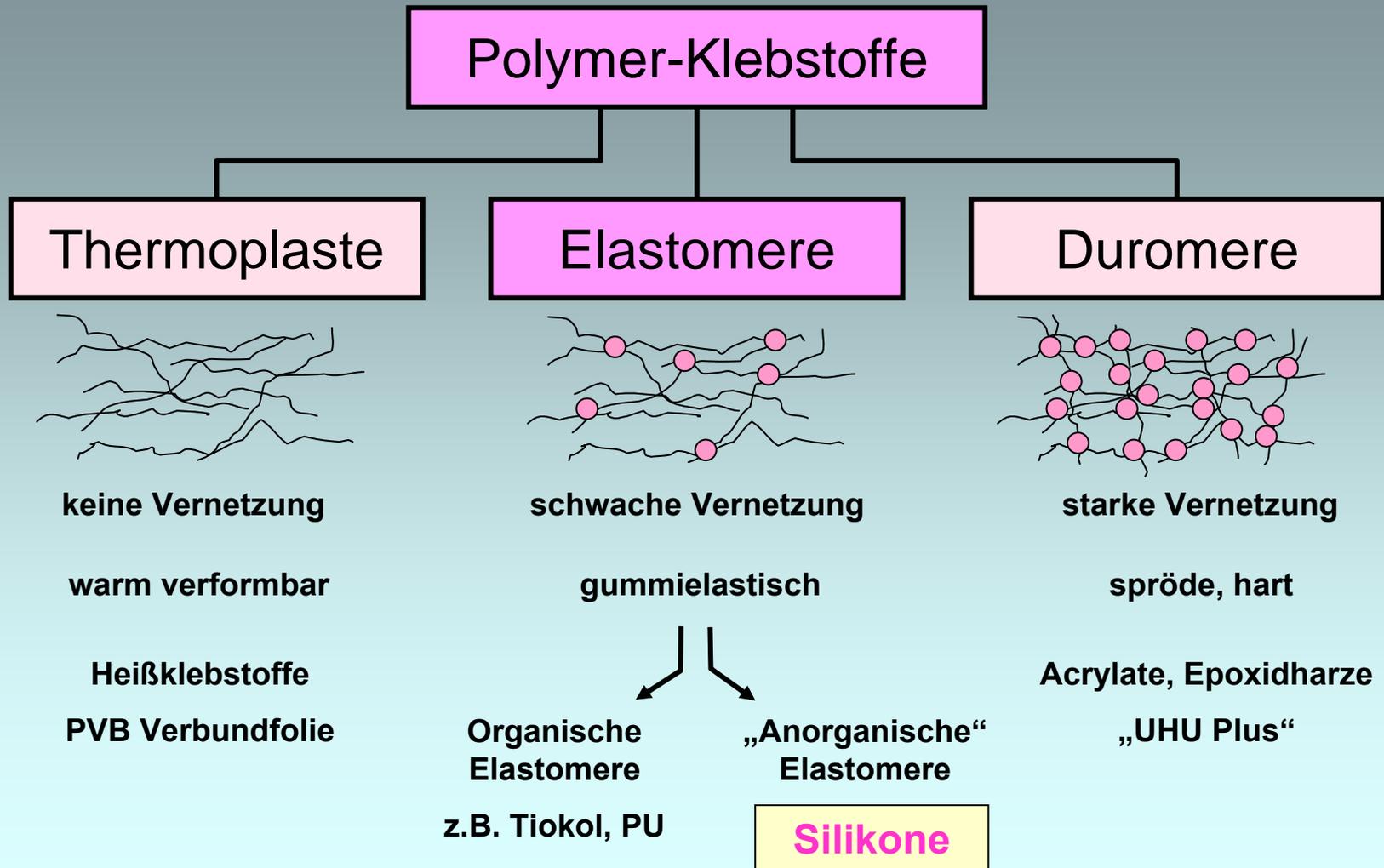
Die später vorgestellten Berechnungen basieren auf Forschungsergebnissen.

Sie stellen eine Möglichkeit dar, im Vorfeld von Bauteilversuchen die Tragfähigkeit einer Klebverbindung sicher abzuschätzen.

Inhalt

1. Technische Regel für Klebverbindungen: ETAG 002
- 2. Allgemeine Materialgesetzmäßigkeiten**
3. Tragfähigkeit punktueller U-förmiger Verklebungen
4. Tragfähigkeit geklebter Punkthalter
5. Schlussfolgerung

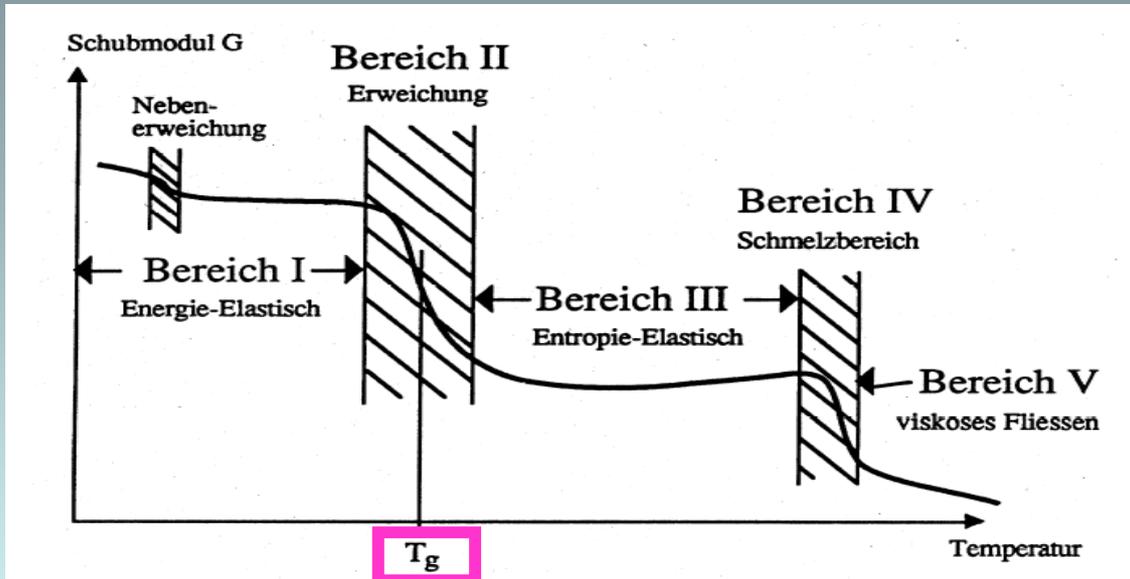
Systematik der Polymere



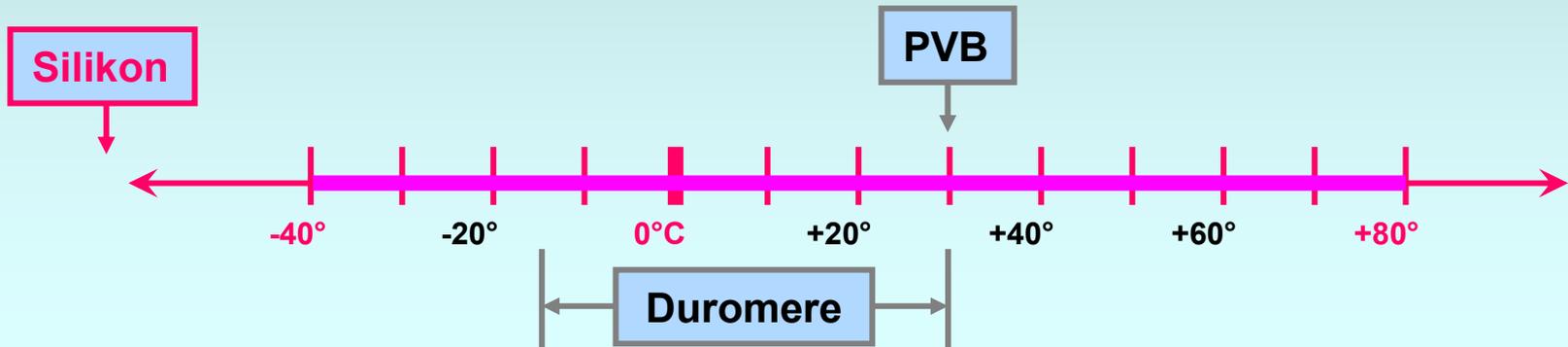
Klassischer SG-Klebstoff: Silikon

- **Struktur von Silikon**
 - **Anorganische Komponenten: Silikate**
 - **Organische Komponenten: Methyl-Bausteine**
- 
- **Geringe Änderung der Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich (-60° bis +150°C), daher kein Verhärten oder Erweichen**
 - **Kein Kristallisieren bei tiefen Temperaturen**
 - **Geringe Neigung zu Oxidation bei hohen Temperaturen**
 - **Sehr hohe Resistenz gegen Sonnenlicht, Hitze, Ozon, SO₂ etc.**
 - **Geringe Feuchteaufnahme und Quellung**

Glasübergangstemperatur bei Kunststoffen / Klebstoffen



Klebstoff	Glasübergangstemperatur T_g
PVB	ca. + 30°C
Duromer-klebstoffe	ca. - 15°C bis + 30°C
Silikon-klebstoff	ca. - 60°C

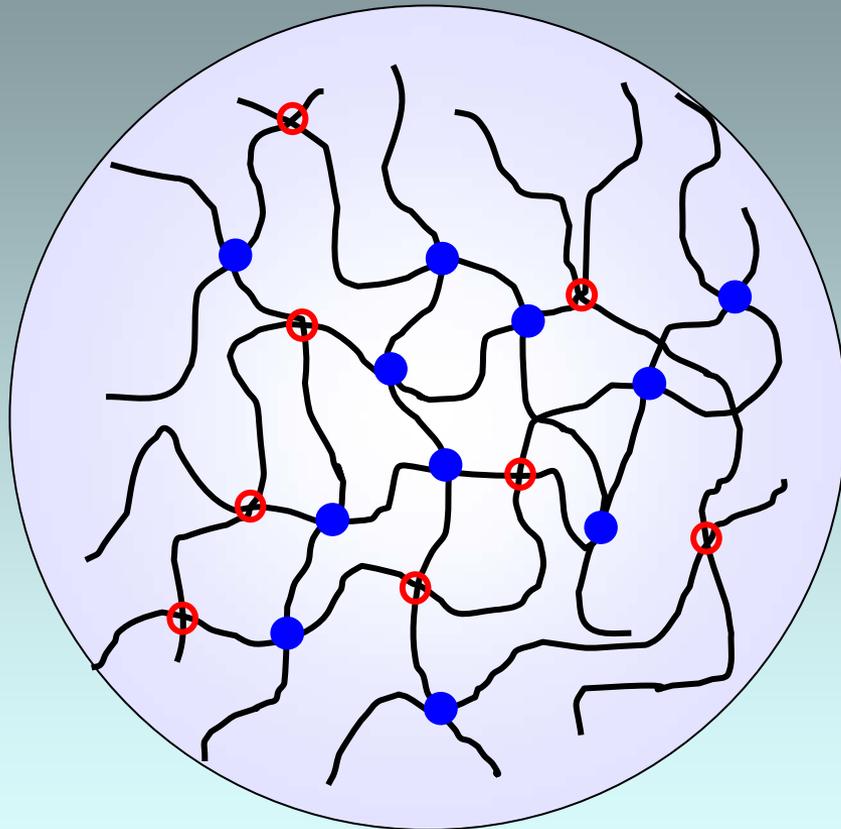


Was verbindet hier?



**Weil Silikon so außergewöhnliche Eigenschaften hat,
findet es einen weiten Anwendungsbereich.**

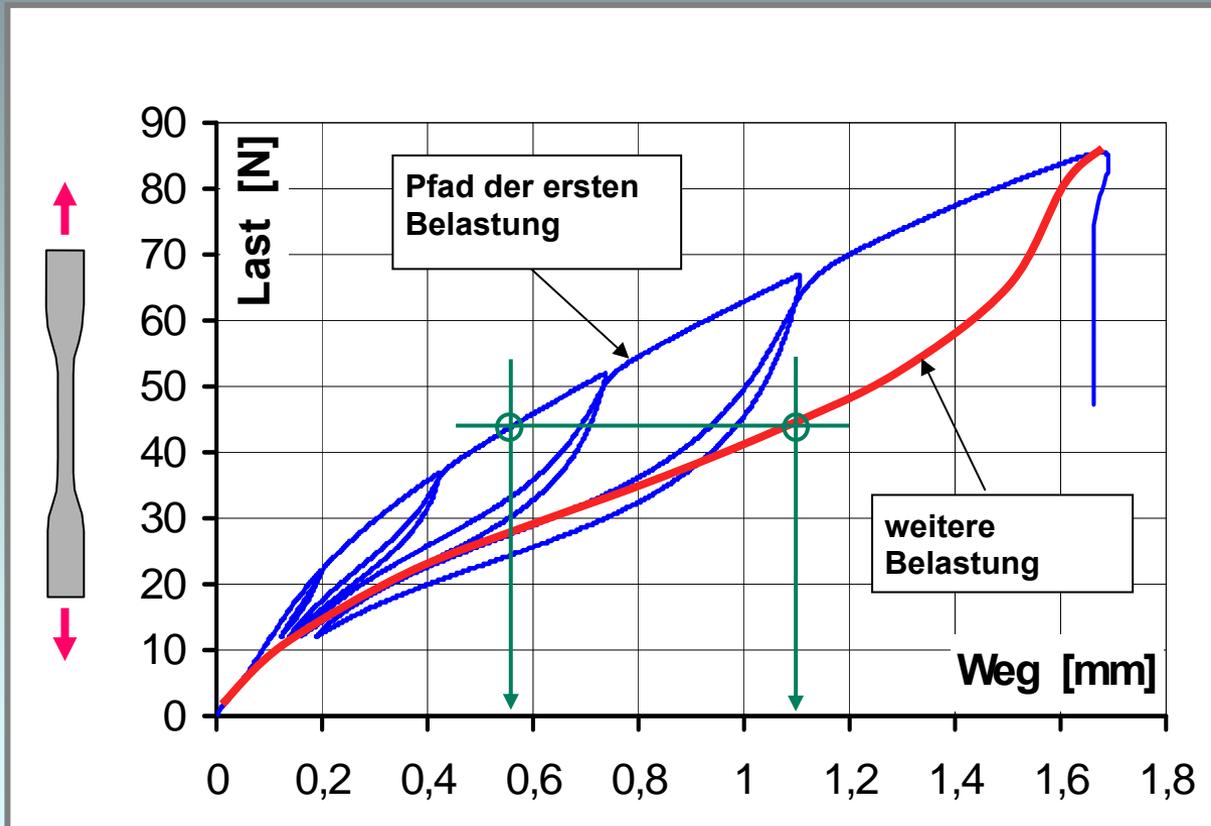
Mechanischer Mechanismus - Silikon



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

- Temporäre Bindungen der Kettenmoleküle lösen sich bereits bei geringem Lastniveau und verknüpfen sich neu (Mullinseffekt)
→ physikalische Bindungen.
- Fixe Bindungen der Kettenmoleküle reißen bei hohen Lasten auf (Versagen)
→ chemische Bindungen.

Belastungsgeschichte - Mullinseffekt



Unter uniaxialer Zugbelastung kann Silikon hohe Dehnungen aufnehmen.

Bei einer Vorbelastung ergibt sich für die Wiederbelastung eine größere „Weichheit“.

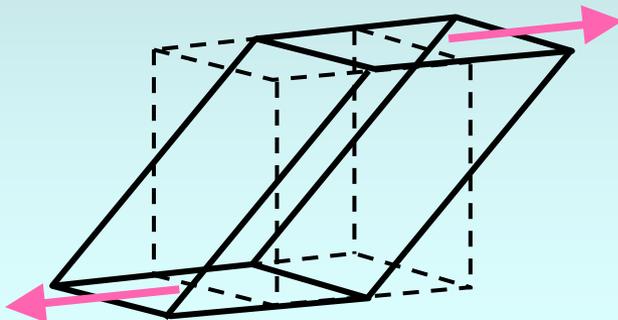
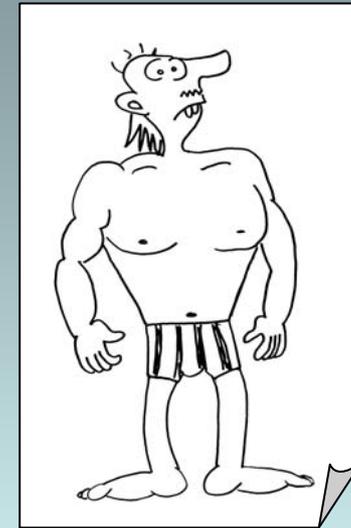
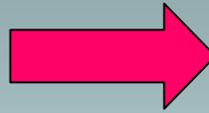
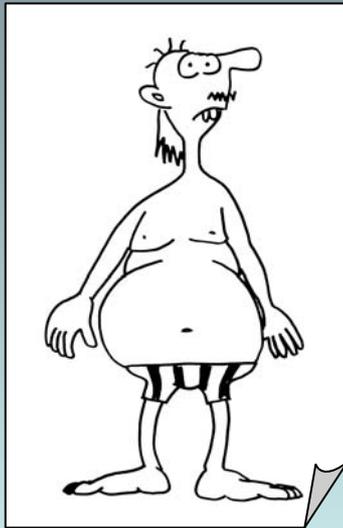
Jedoch ist das Bruchverhalten letztlich von der Vorbelastung unabhängig.

Daher bietet sich an, Versagenskriterien statt an der Verformung, besser an der Bruchlast zu orientieren.

Elastische Eigenschaften von Elastomeren

mechanisch sehr unterschiedlich bei Volumen- oder Gestaltänderungen

Gestaltänderung



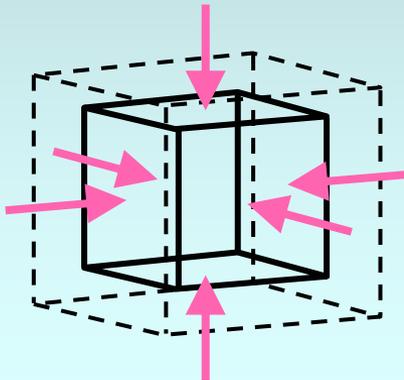
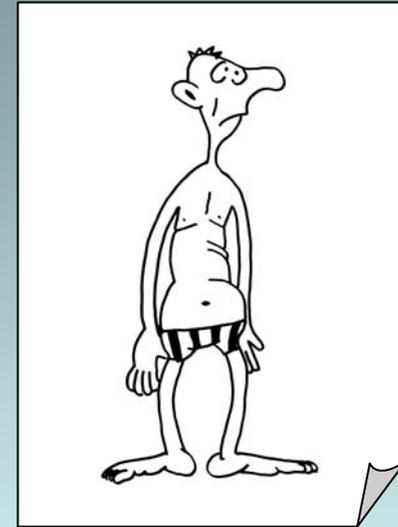
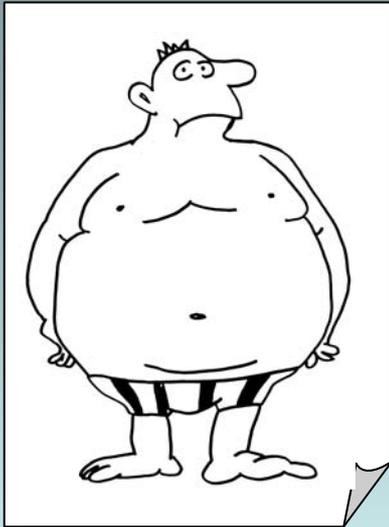
Beispiel: Einfacher Schubversuch

- geringe Steifigkeit
- große Verformung durch **Verschiebbarkeit der Molekülketten** gegeneinander

Elastische Eigenschaften von Elastomeren

mechanisch sehr unterschiedlich bei Volumen- oder Gestaltänderungen

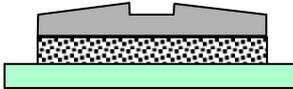
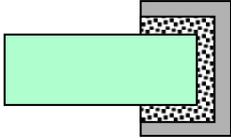
Volumenänderung



Beispiel: Kompressionsversuch

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

Steifigkeiten verschiedener Verklebungen

Belastung = $F/A_0 = 1 \text{ N/mm}^2$	Werkstoff	Verklebungsgeometrien		
				
Dehnung $\Delta l / l_0$	122 %	$\approx 2.6 \%$	$\approx 4.7 \%$	$\approx 4.7 \%$
$(F/A_0) / (\Delta l / l_0)$	0,82	38,5	21,3	21,3
E_{struc} / E	1	46,9	25,9	25,9

$E_{\text{struc}} \gg E$

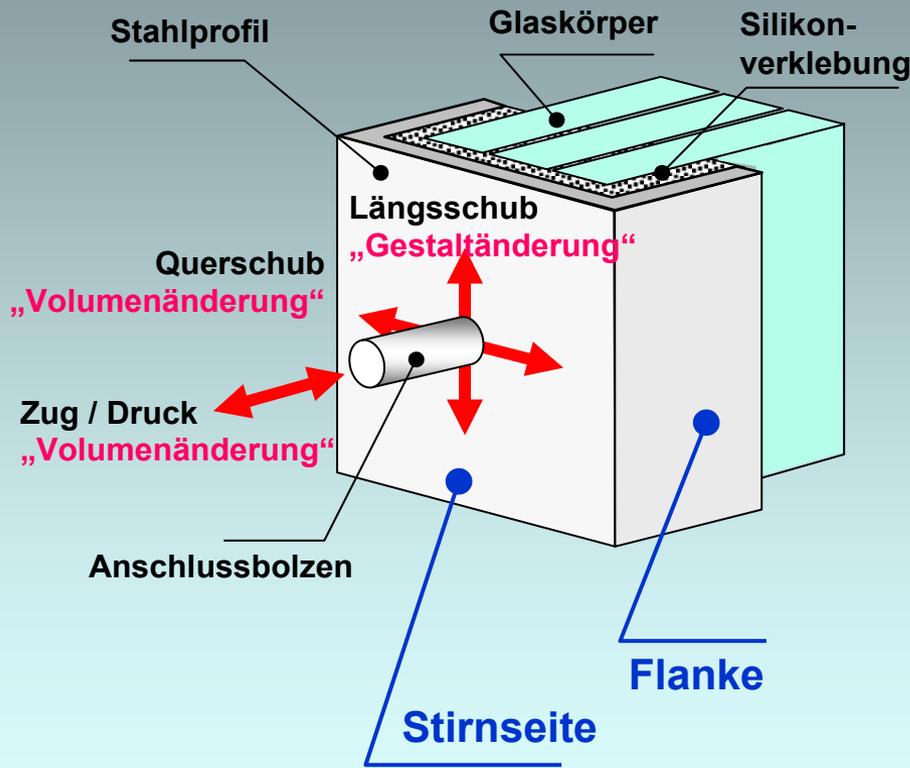
Annahme hierbei:
Linearisierte Material-Gesetzmäßigkeiten!

Inhalt

1. Technische Regel für Klebverbindungen: ETAG 002
2. Allgemeine Materialgesetzmäßigkeiten
- 3. Tragfähigkeit punktueller U-förmiger Verklebungen**
4. Tragfähigkeit geklebter Punkthalter
5. Schlussfolgerung

Lastschema für U-förmige Verklebung

Dominierende Effekte



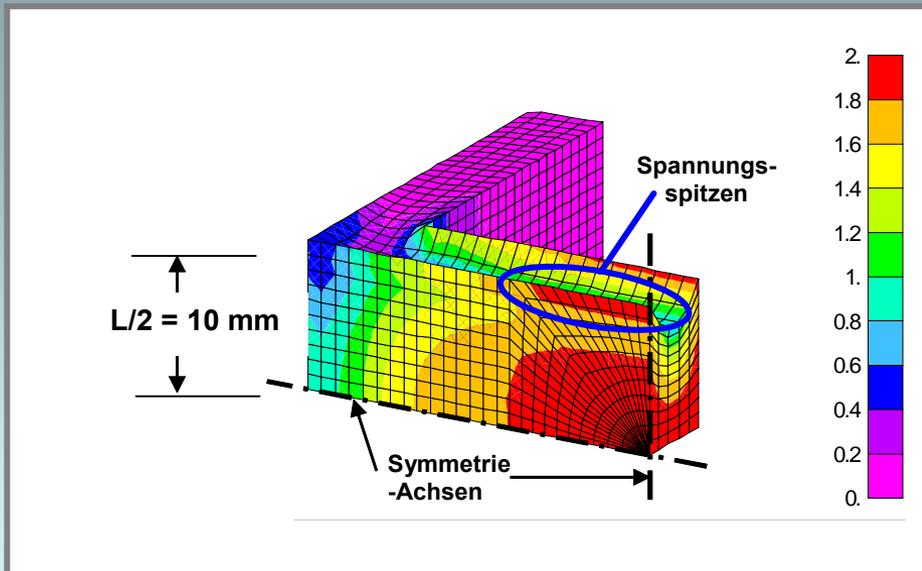
Bedeutung für die Bemessung:

Längsschub	Thermische Lasten
Querschub	unkritisch durch Formschluss des U-Profiles
Druck	unkritisch durch Formschluss
Zug	kritischer Lastfall für U-förmige Verklebungen

Daher steht das Zugverhalten im Mittelpunkt von Forschungsaktivitäten.

Die vorgestellten Bemessungsdiagramme beziehen sich auf Zug.

Spannungsverteilung kleiner U-Verklebungen



Bei kleinen Klebflächen treten die Spitzenspannungen auch bei U-förmigen Verklebungen ($\Sigma L=20\text{mm}$) an den Rändern auf.

Da sich hier der Werkstoff ungehinderter einschnüren kann, werden bei kleineren Verklebungen höhere Verformungen bis zum Bruchbeginn beobachtet.

Ermittlung der zulässigen Last / Länge - in 2000

Versuchswerte mit freundlicher Genehmigung durch das Erzbischöfliche Ordinariat zur Verfügung gestellt

Werte sind bezogen auf die Probenlänge von 5 cm

18.04.2000
ungealtert

Probekörper	max Z
1	4,113.0 N
2	3,919.0 N
3	3,509.0 N
4	4,247.0 N
5	4,193.0 N
6	4,405.0 N
7	4,383.0 N
8	4,103.0 N
9	4,162.0 N
10	4,247.0 N

Mittelwert 4,128.1 N

Standardabw. 245.6 N

$R_{u,5} = 3,612.4 \text{ N}$

$R_{u,5} / 6 = 602.1 \text{ N}$

$R_{u,5} / 6 \text{ pro lfm} = 12.0 \text{ kN/m}$

05.05.2000
künstl. gealtert 500 h

Probekörper	max Z
1	4,685.0 N
2	5,117.0 N
3	5,051.0 N
4	4,571.0 N
5	5,022.0 N

Mittelwert 4,889.2 N

Standardabw. 218.5 N

$R_{u,5} = 4,351.8 \text{ N}$

$R_{u,5} / 6 = 725.3 \text{ N}$

$R_{u,5} / 6 \text{ pro lfm} = 14.5 \text{ kN/m}$

24.05.2000
künstl. gealtert 1.000 h

Probekörper	max Z
1	4,913.0 N
2	* N
3	4,171.0 N
4	4,981.0 N
5	4,145.0 N

* Durch Vorschädigungen bei Probenherstellung keine Auswertung für Probe 2

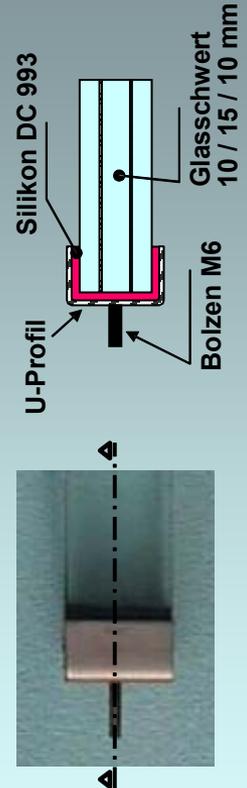
Mittelwert 4,552.5 N

Standardabw. 395.3 N

$R_{u,5} = 3,493.0 \text{ N}$

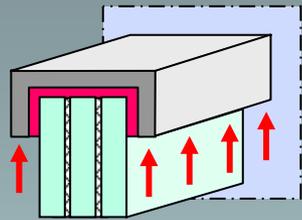
$R_{u,5} / 6 = 582.2 \text{ N}$

$R_{u,5} / 6 \text{ pro lfm} = 11.6 \text{ kN/m}$

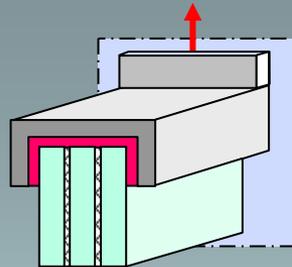


(Typ U3)

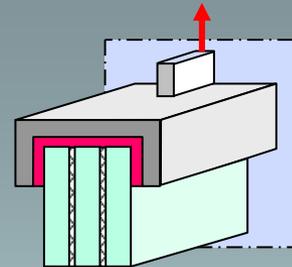
Spannungsverteilung in U-Verklebungen



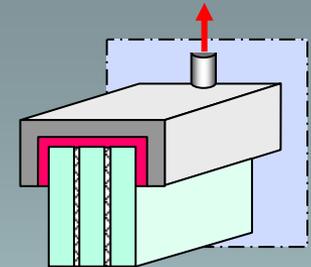
Typ U0 – linienförmige Lasteinleitung



Typ U1



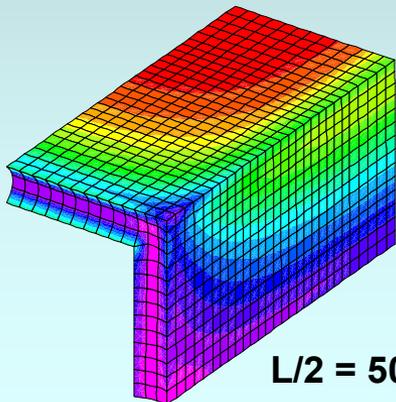
Typ U2



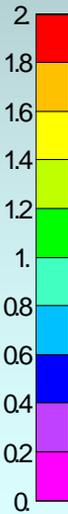
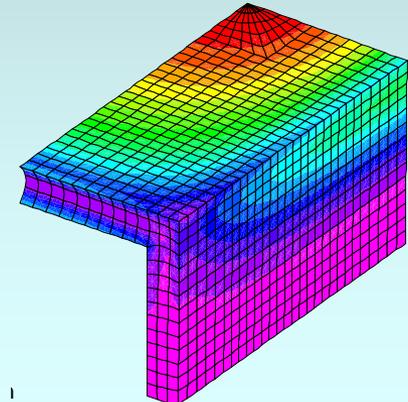
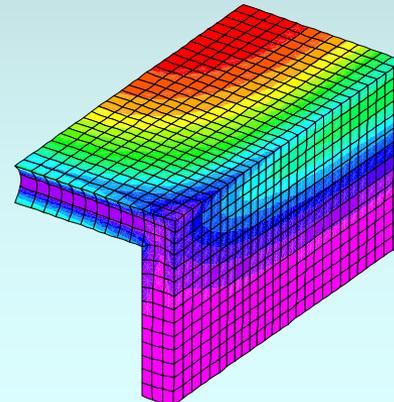
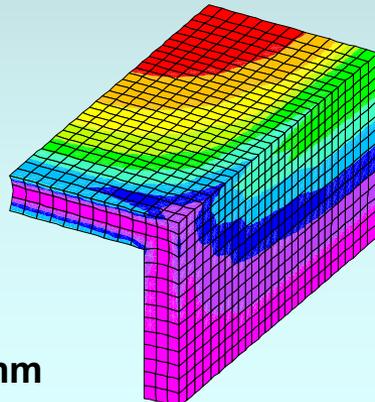
Typ U3

Vergleich von verschiedenen Lasteinleitungsgeometrien zeigt, dass die Spannungsverteilung maßgeblich von der Geometrie der Lasteinleitung abhängig ist.

Je größer der Bereich hoher Spannungen, je mehr Last kann aufgenommen werden.



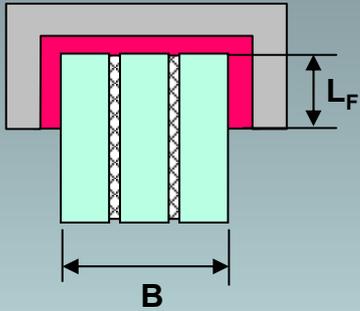
L/2 = 50 mm



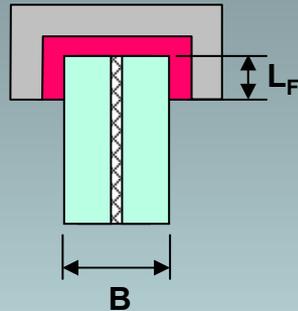
Variationen U-förmiger Verklebungsgeometrien

Unterschiedliche Querschnittstypen

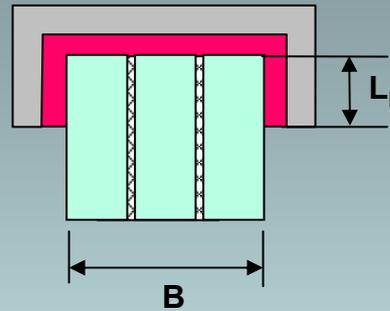
Typ U / UF



Typ US / USF



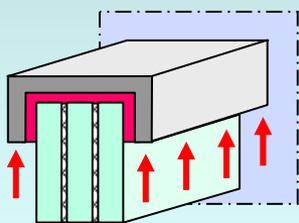
Typ UL



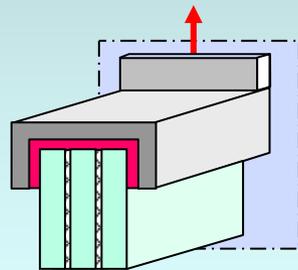
Übersicht über Abmessungen

Typ	Glas	B [mm]	L _F [mm]
U	3 x 12	39	22
UF			15
US	2 x 12	25,5	22
USF			15
UL	3 x 15	48	22

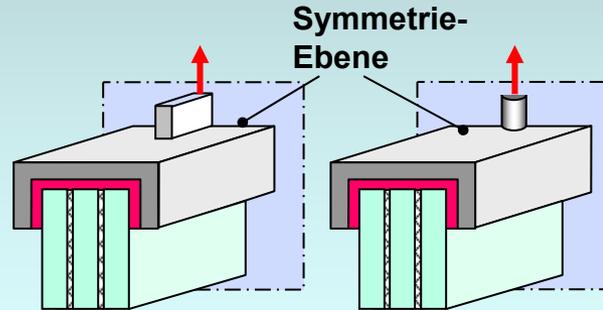
Lasteinleitungs-Typen U0 – U3 (Halbmodelle)



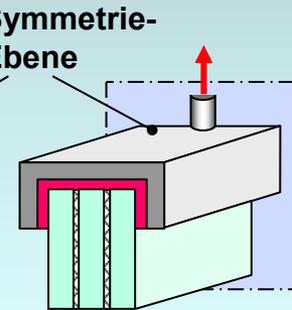
Typ U0 –
linienförmige
Lasteinleitung



Typ U1



Typ U2



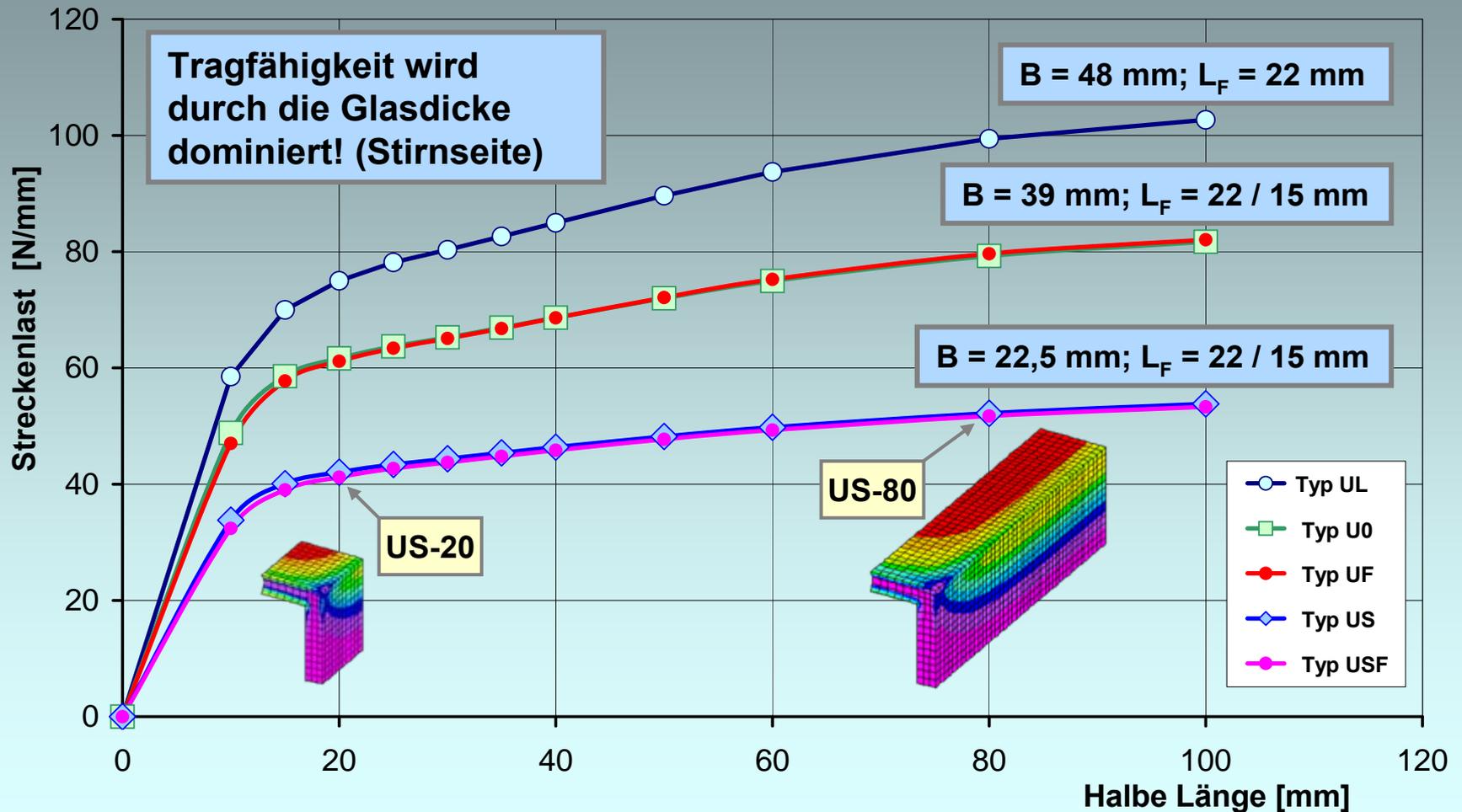
Typ U3

lokale (punktförmige) Lasteinleitung

Klebstoff $d_A = 5 \text{ mm}$
U-Profil,
Stahl $d = 3 \text{ mm}$
↑ aufgebrachte Last

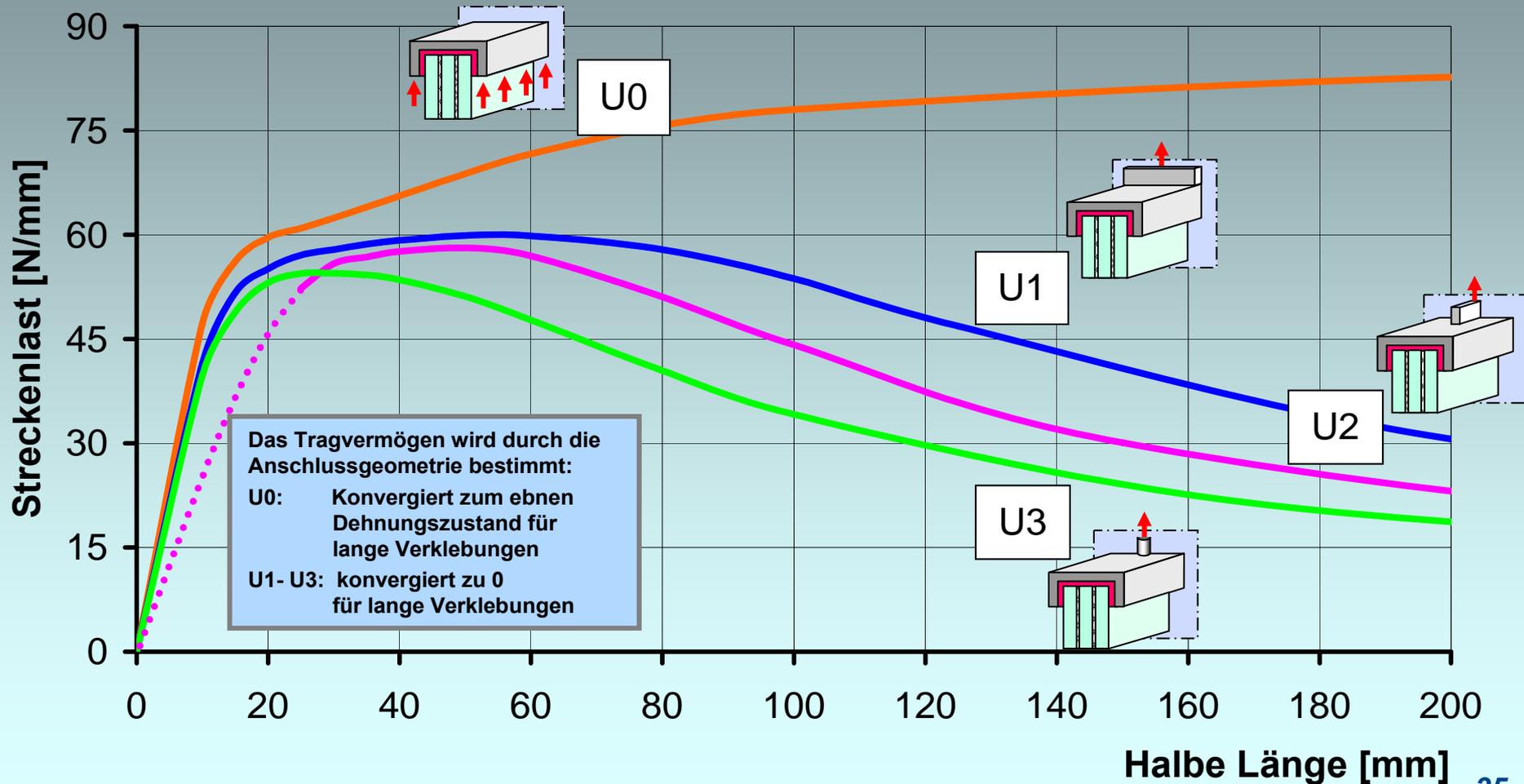
Tragvermögen linienförmiger Lasteinleitung

Datenpunkte bei ca. 2 N/mm² max. Hauptspannungen (= Beginnendes Versagen)

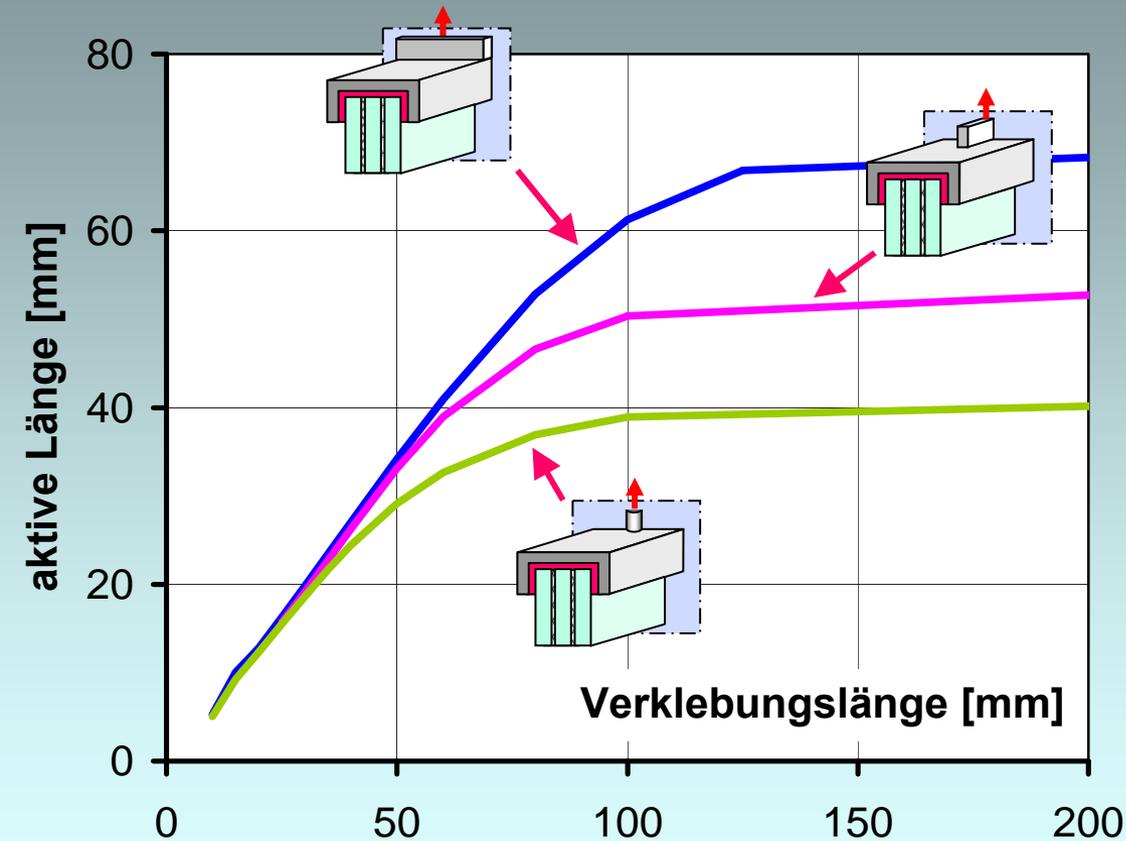


Tragvermögen verschiedener Lasteinleitungen Typ U

Freie Ränder – ermöglichen Einschnüren der Verklebung



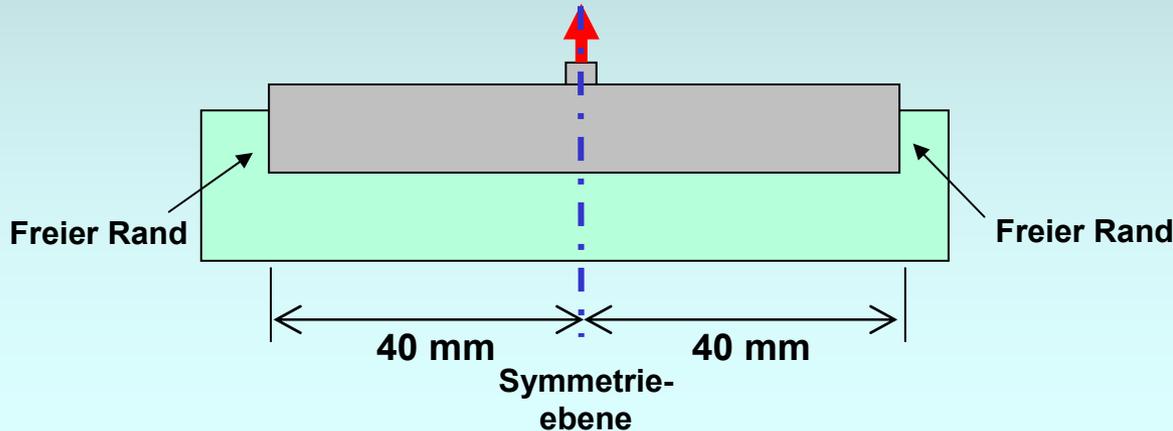
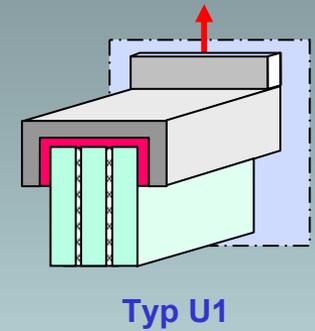
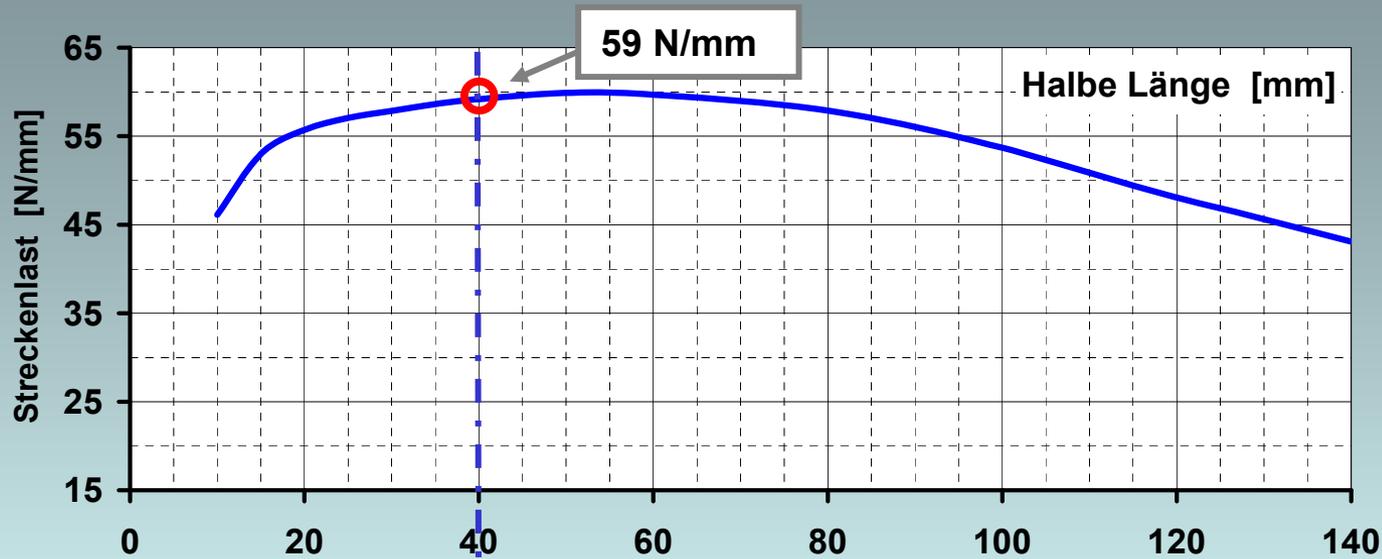
Aktive Länge einer U-förmigen Verklebung



Der Vergleich verschiedener Lasteinleitungsgeometrien zeigt, dass auch die Wirksamkeit einer Verklebung maßgeblich von der Geometrie der Lasteinleitung abhängig ist.

Bemessungsbeispiel einer Verklebung Typ U1

Annahme: Freie Ränder = punktuell



Erwartete Bruchlast:

$$F_{EB} = 2 \times 40 \times 59 = 4720 \text{ N} \\ = 4,7 \text{ kN}$$

$$\text{Gebrauchslast} = \frac{\text{Bruchlast}}{\text{Sicherheitsbeiwert}}$$

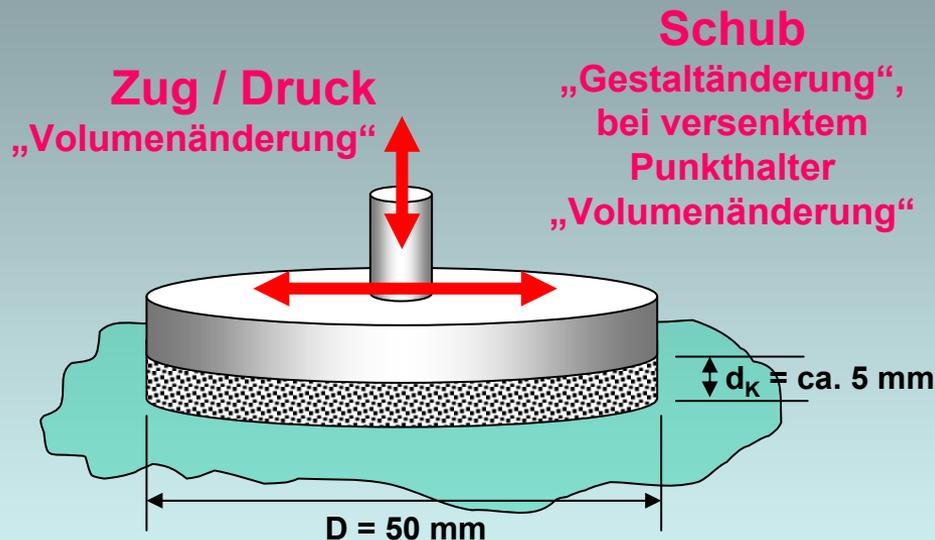
Inhalt

1. Technische Regel für Klebverbindungen: ETAG 002
2. Allgemeine Materialgesetzmäßigkeiten
3. Tragfähigkeit punktueller U-förmiger Verklebungen
- 4. Tragfähigkeit geklebter Punkthalter**
5. Schlussfolgerung

Beispiel: Fassade mit mechanischen Punkthaltern



Geometrie der Punkthalter - Lastrichtungen



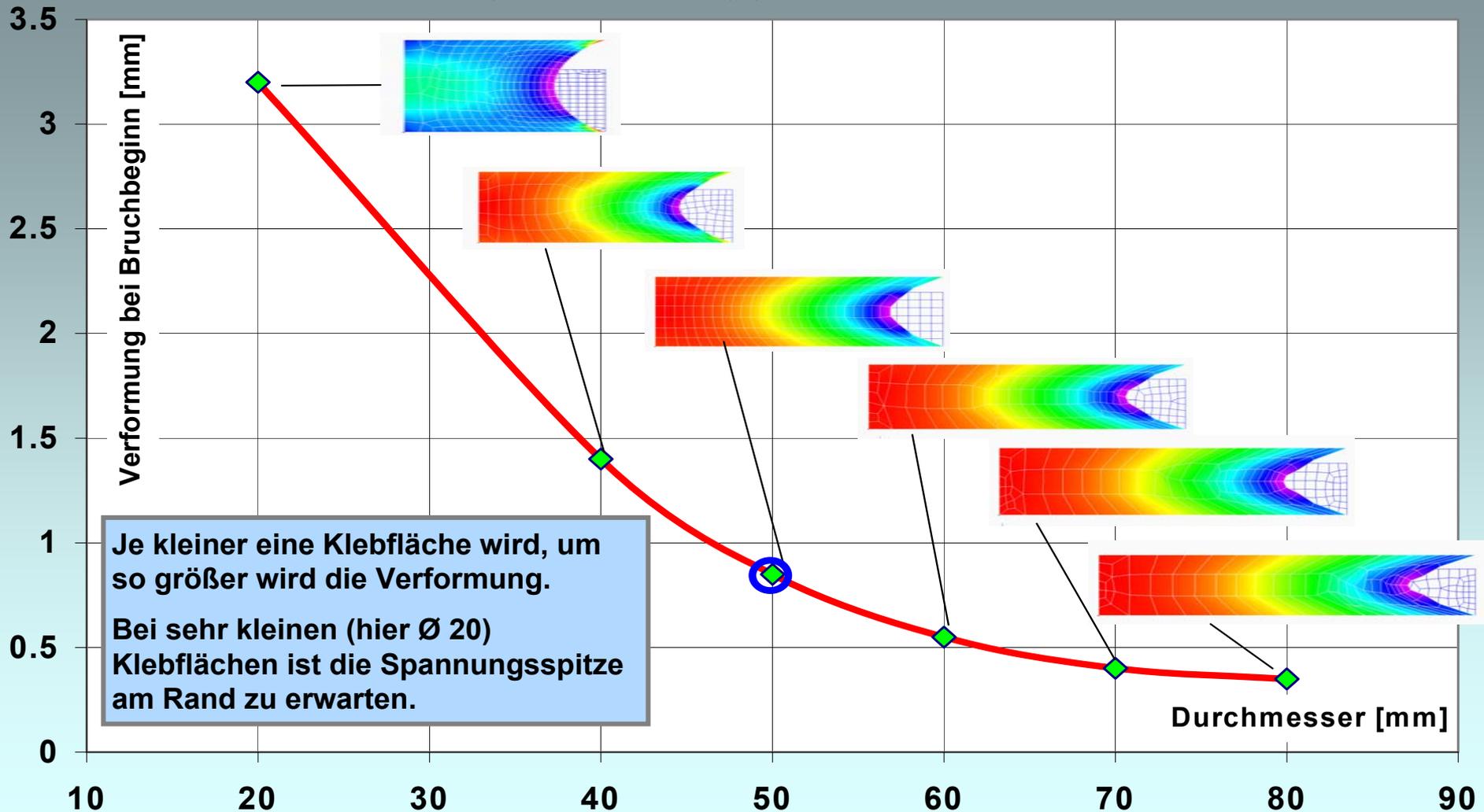
Geringe Verformungen unter Druck- und Zugbelastung, da Belastung auf Volumenänderung.

Reine Schubbelastung ungünstig, da hohe Verformungen zu erwarten sind wegen Belastung auf Gestaltänderung.

Geringe Verformungen bei einer Schubbelastung beim versenkten Punkthalter da Belastung auf Volumenänderung bzw. Formschluss.

Theoretischer Bruchbeginn bei planen Punkthaltern

Steifigkeiten in Abhängigkeit vom Durchmesser

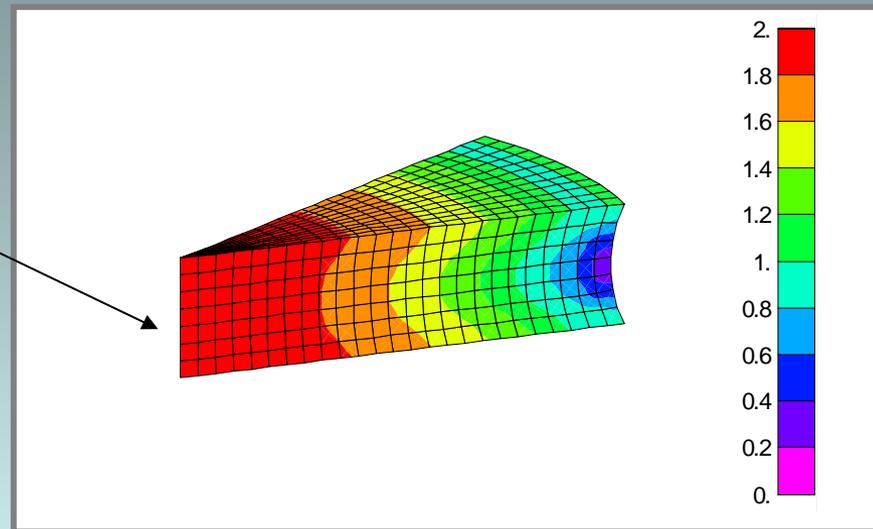


Spannungsverteilung innerhalb der Verklebung

Es wäre:

$$\sigma_{zul} = 2,0/6 = 0,33 \text{ N/mm}^2$$

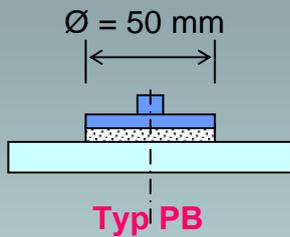
>> 0,14 N/mm²
nach Zulassungen
gemäß ETAG



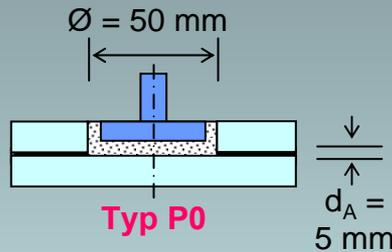
Ein Bemessungskonzept über Last / Fläche kann lediglich eine sehr grobe Näherung sein!

Geometrievariation theoretisch untersuchter Punkthalter

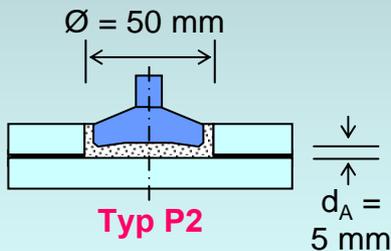
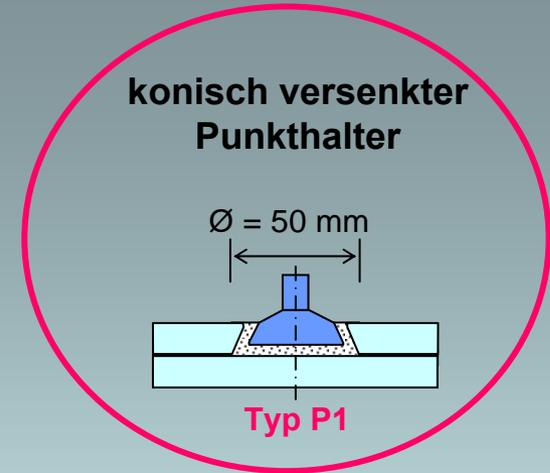
**Basistyp
als Vergleich**



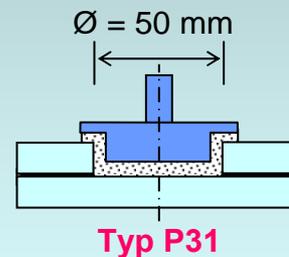
**Versenkter Punkthalter
Basistyp**



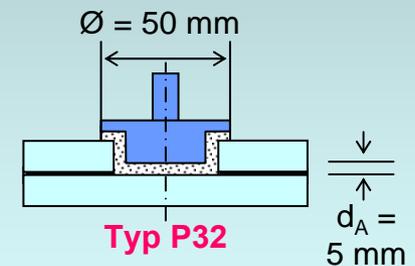
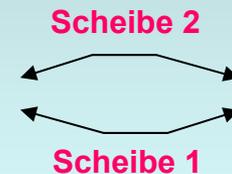
**konisch versenkter
Punkthalter**



**konkav versenkter
Punkthalter**

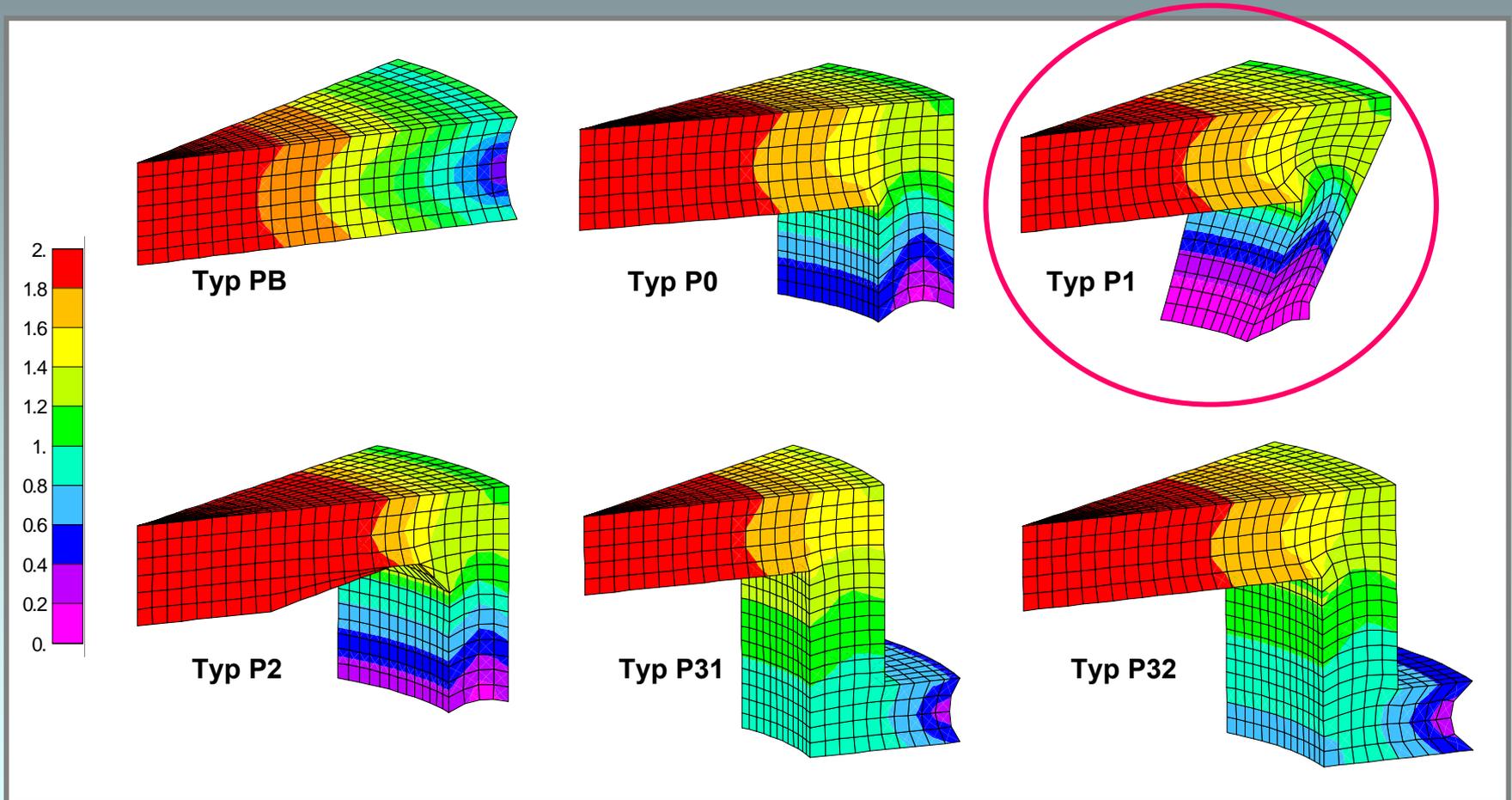


**versenkter Punkthalter
mit Flansch, groß**



**versenkter Punkthalter
mit Flansch, klein**

Spannungsverteilung in den Punkthaltern - Zug



Versuchsdurchführung planer Punkthalter



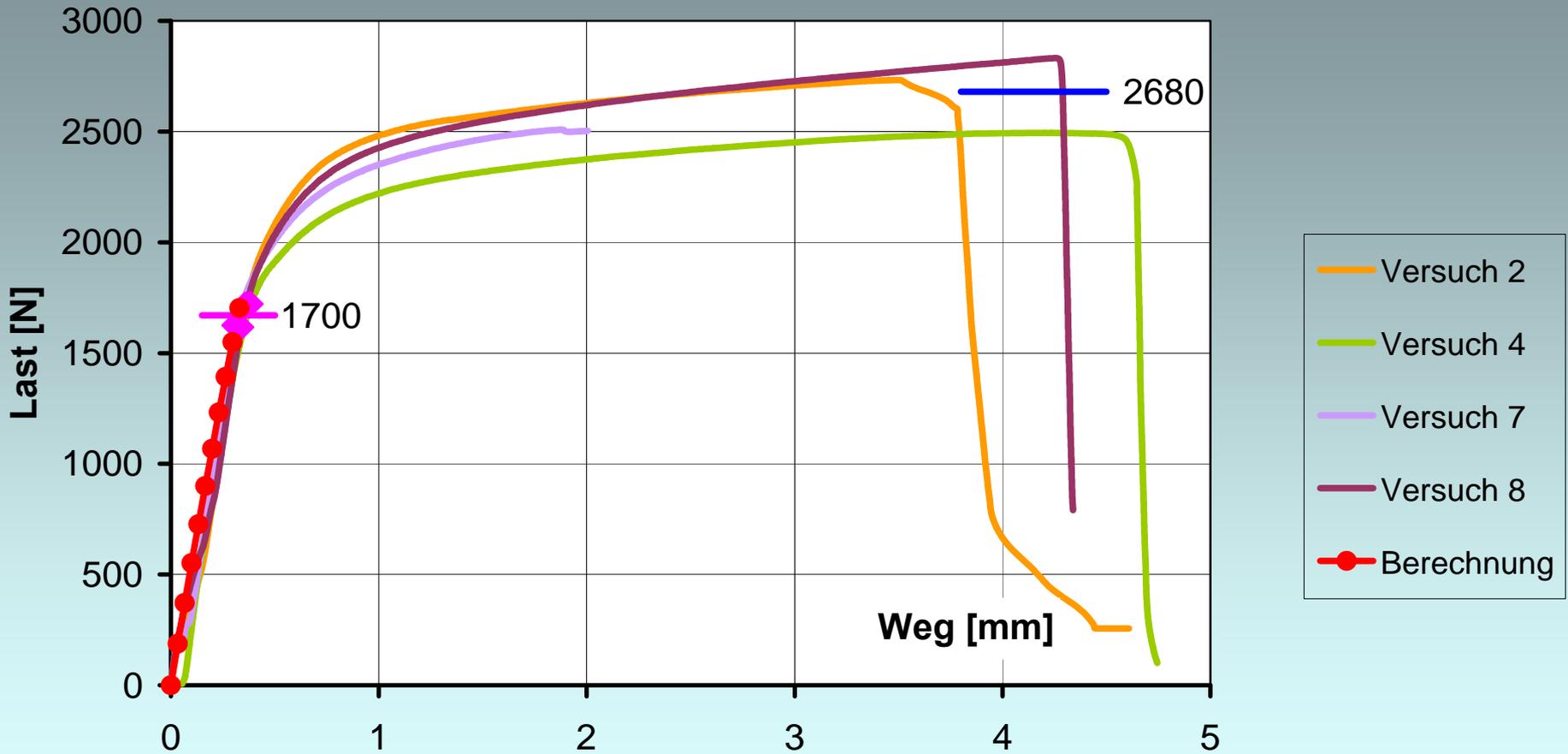
„rosenartige“
Bruchfläche



Versuchsstop kurz vor
endgültigem Bruch
aufgeschnitten



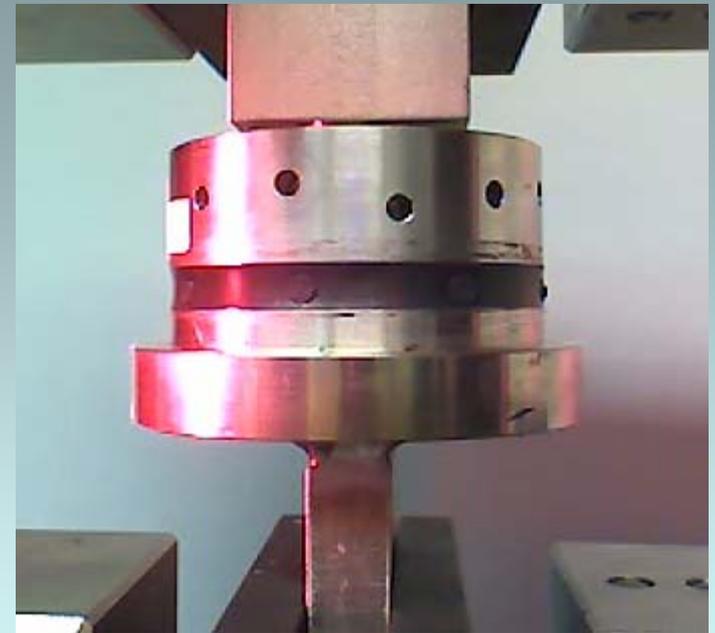
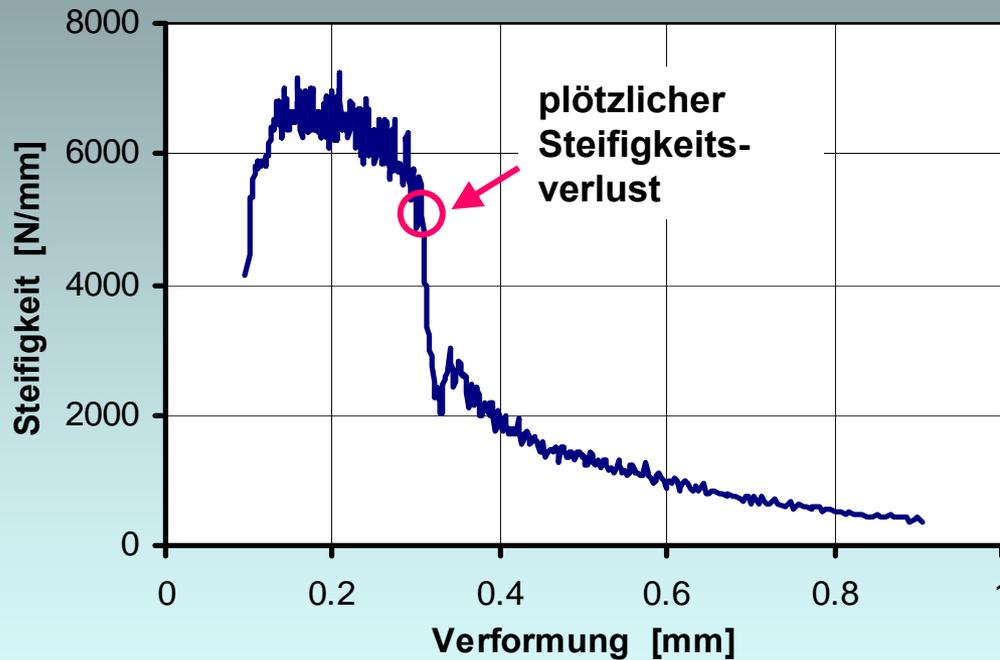
Versuchsergebnisse plane Punkthalter Ø 50 mm



Theoretische Ergebnisse stimmen mit dem Versuch gut überein!

Bruchpunkt EB an der Steifigkeitskurve

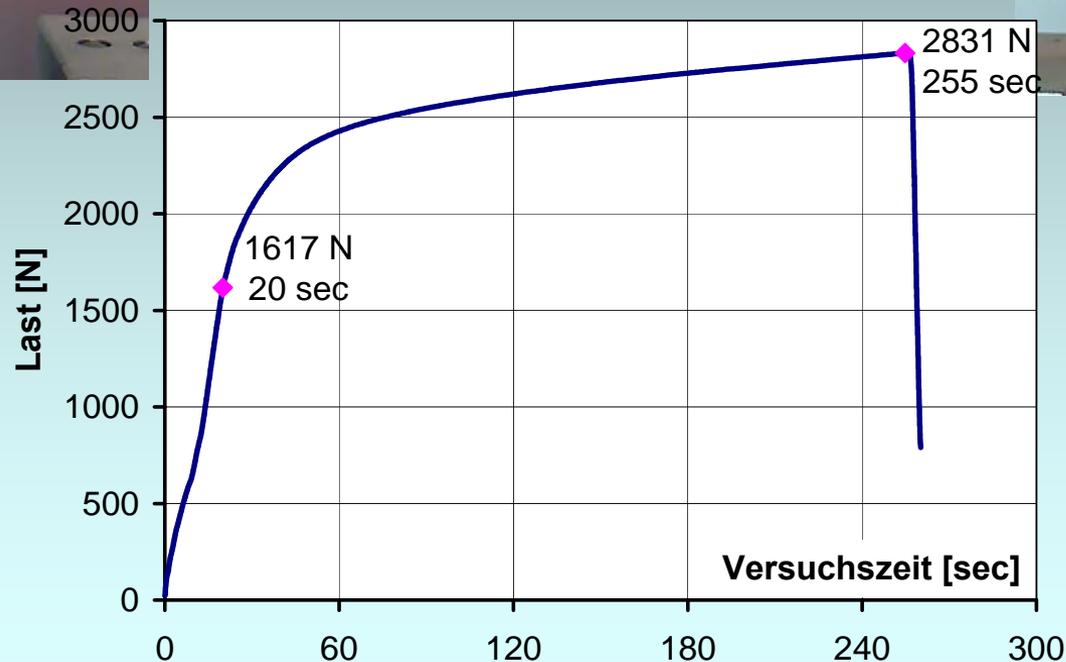
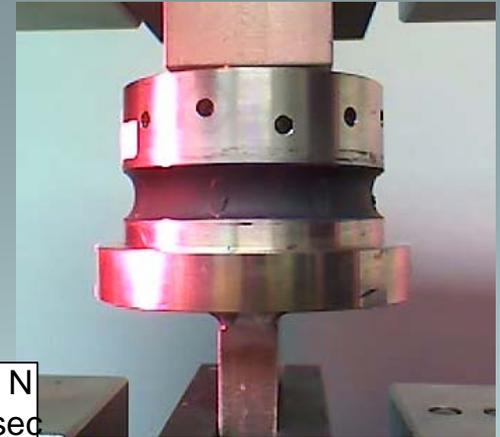
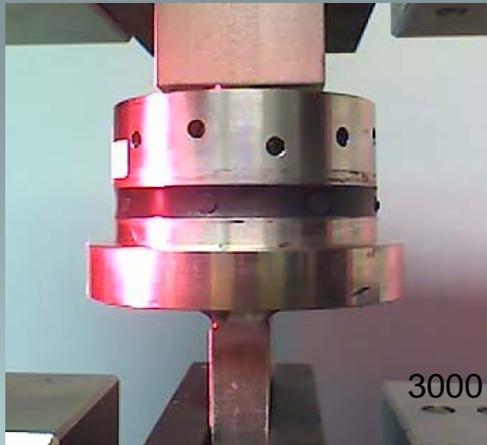
gezeigt am Versuch 8



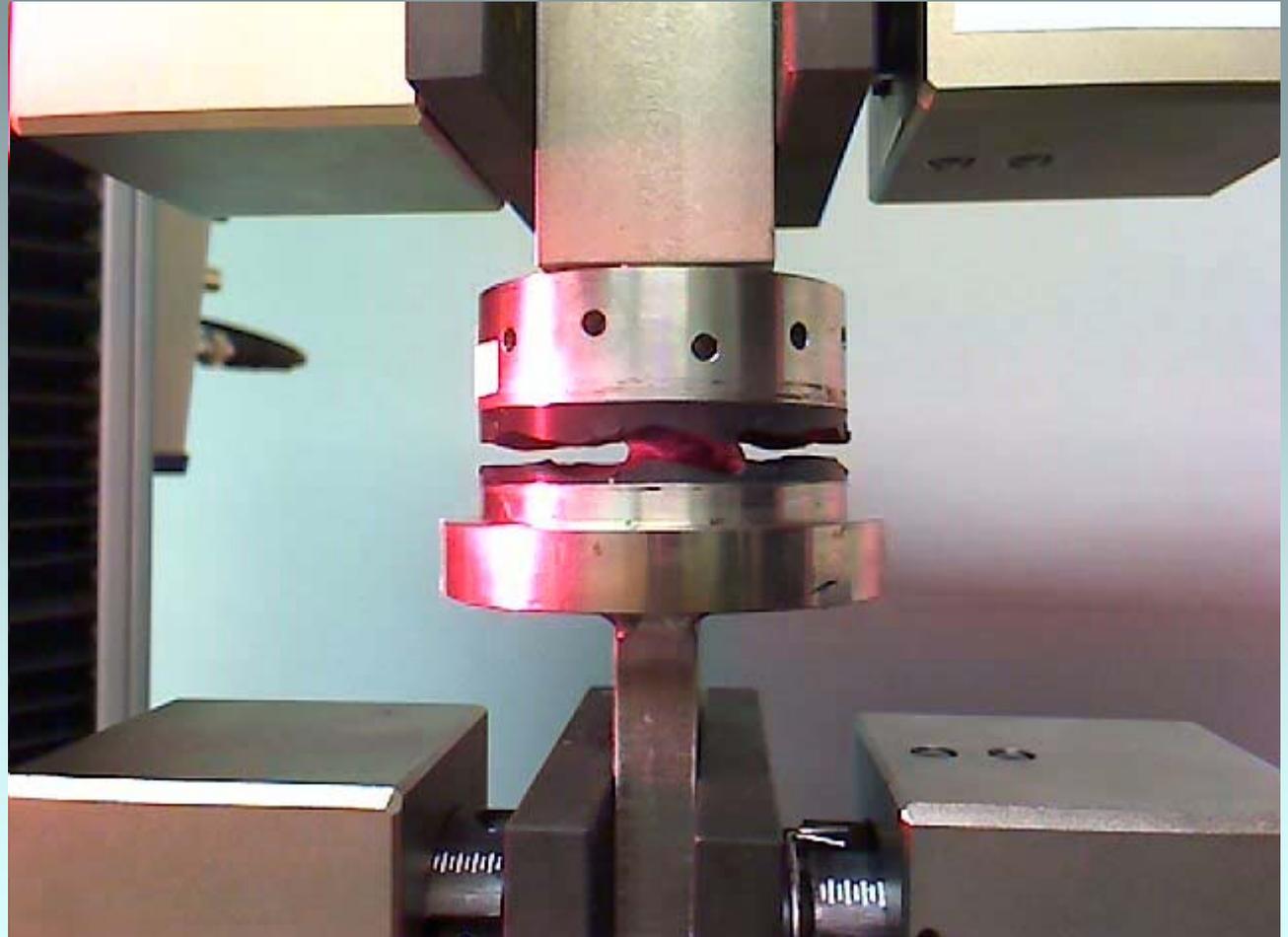
**Steifigkeitsverlust nach
20 Sekunden**

Versuchsablauf über die Zeit

gezeigt am Versuch 8



Versuchsablauf



277 sec

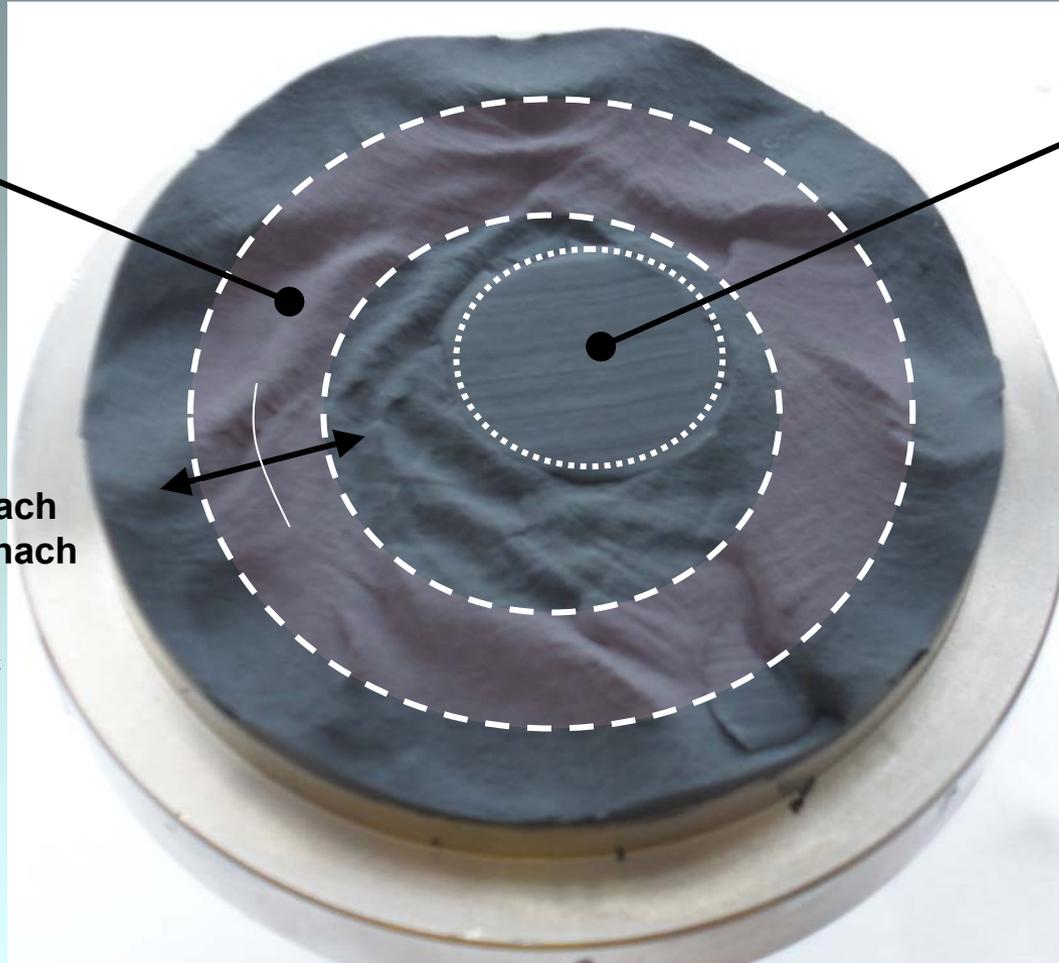
So passiert es offensichtlich..

1

Bruchbeginn in
einem Bereich
innen
ab 255 sec

2

Riss läuft nach
außen und nach
innen
255-277 sec



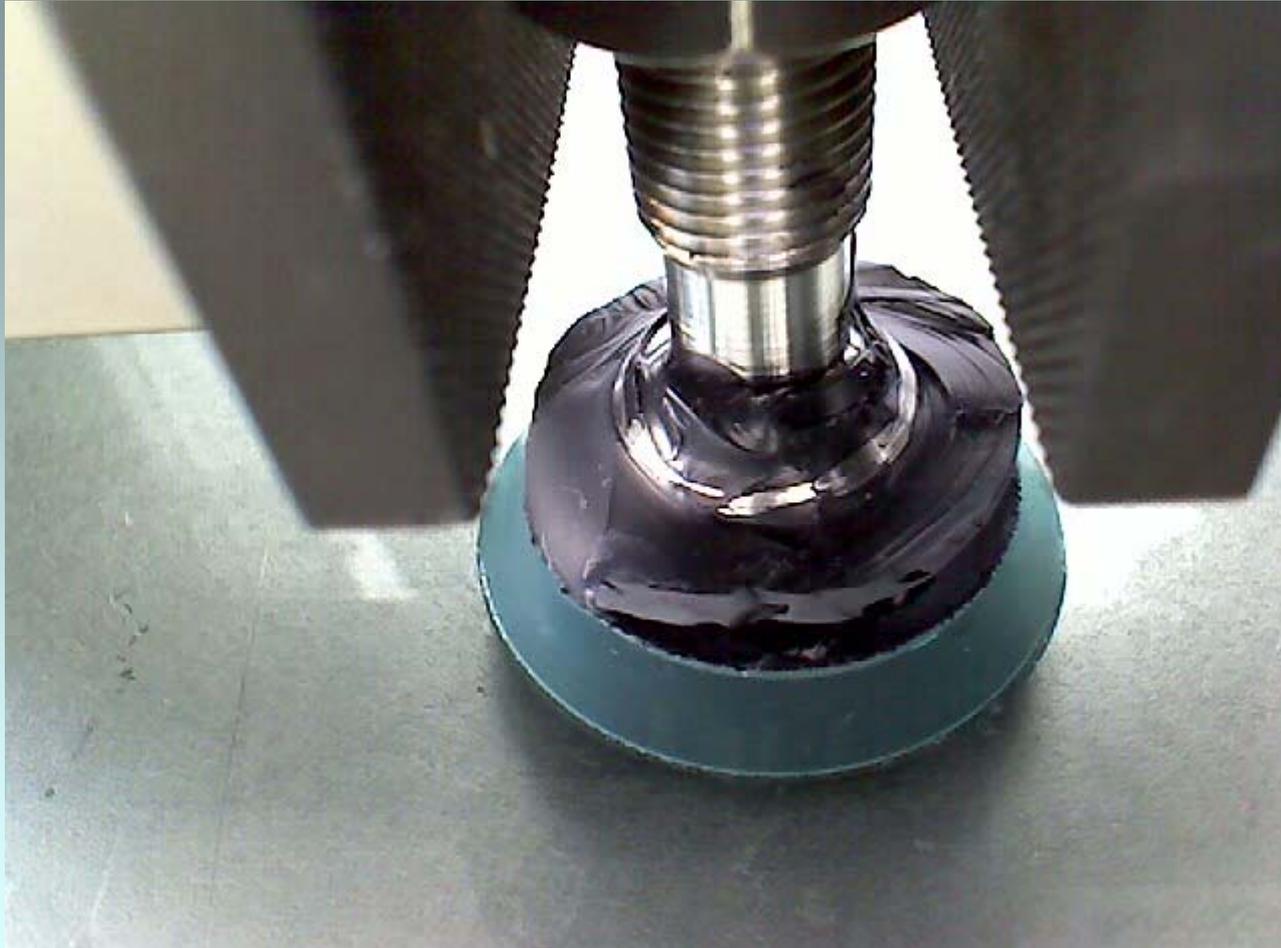
3

Der Kern reißt
zuletzt

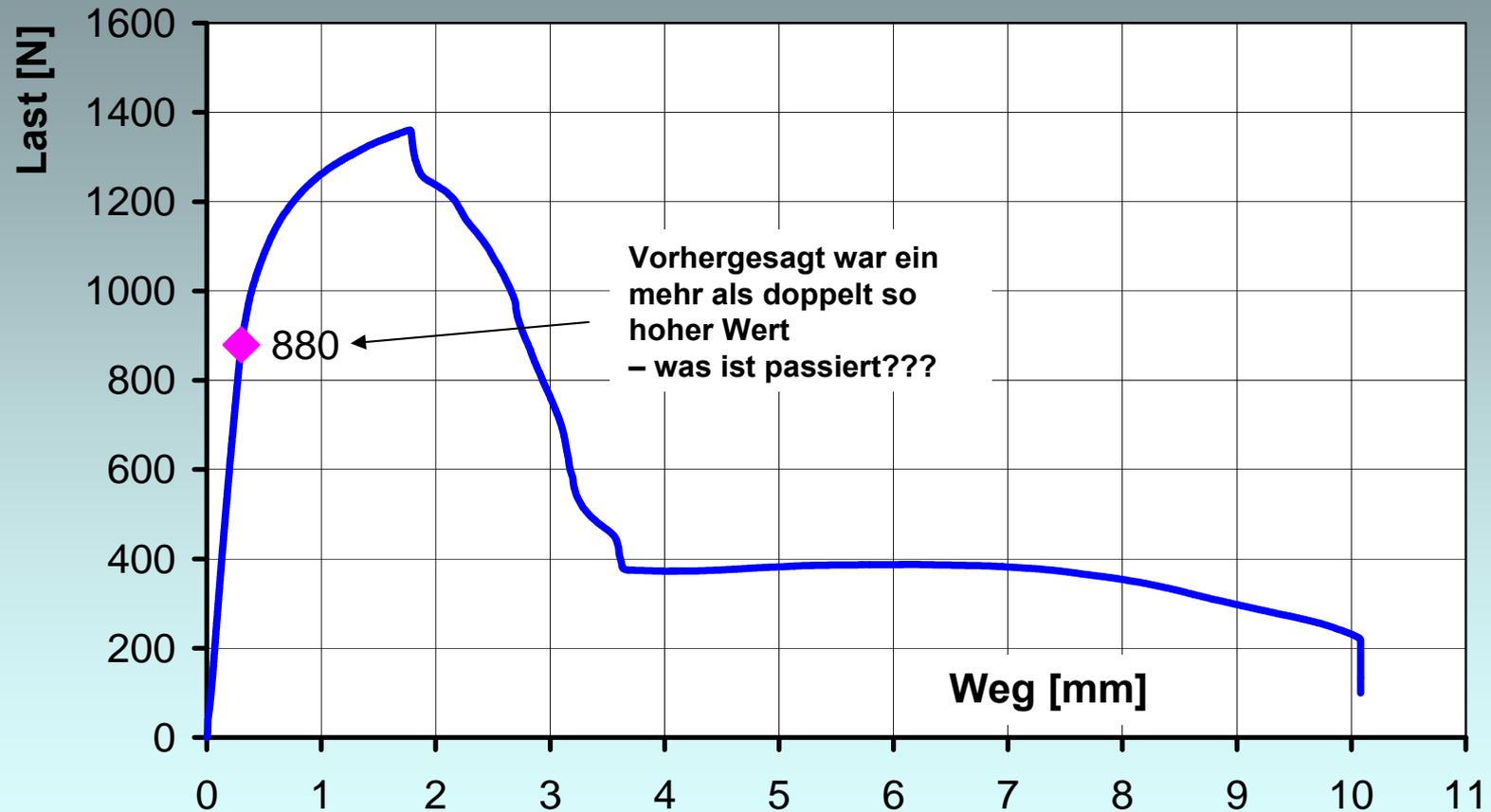
Versuchsdurchführung konischer Punkthalter P1



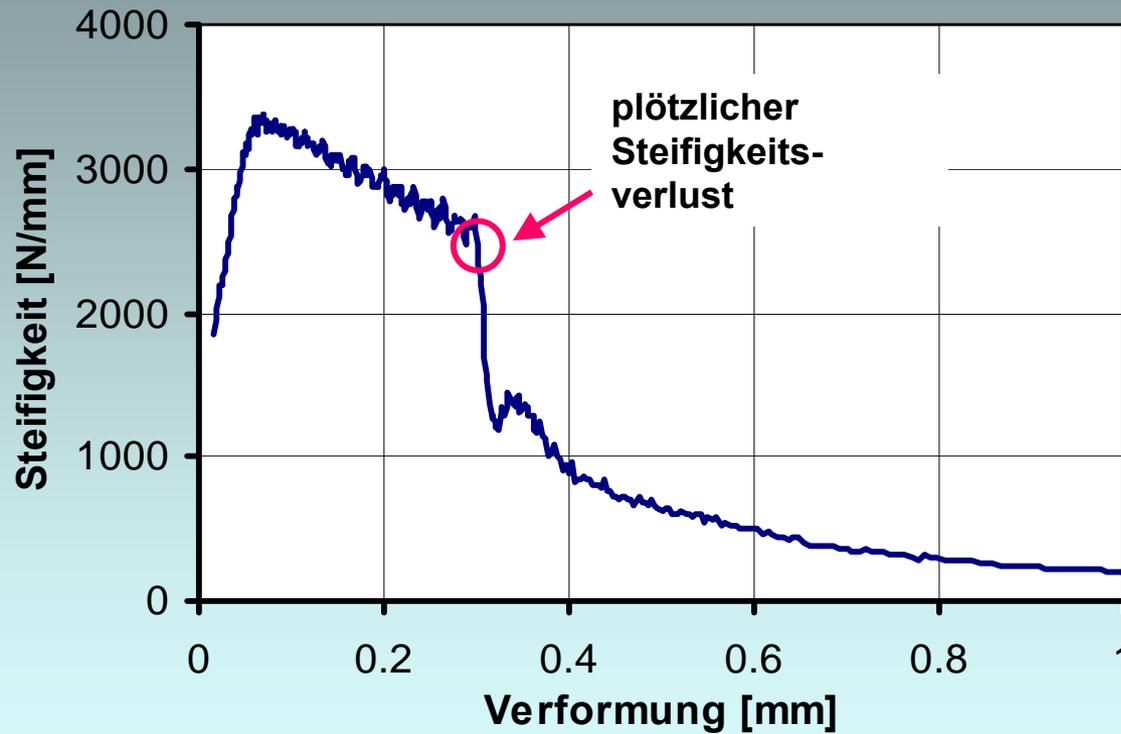
Versuchsdurchführung Punkthalter P1



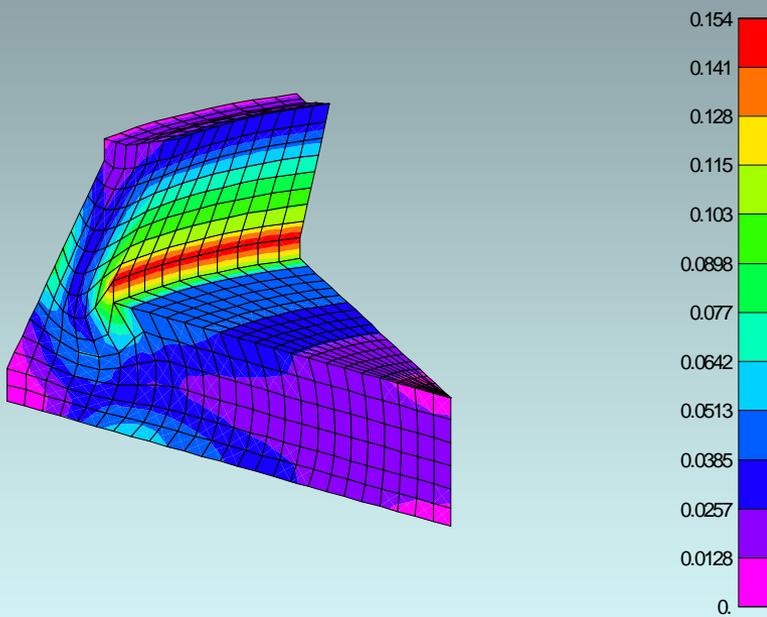
Versuchsergebnis Punkthalter P1



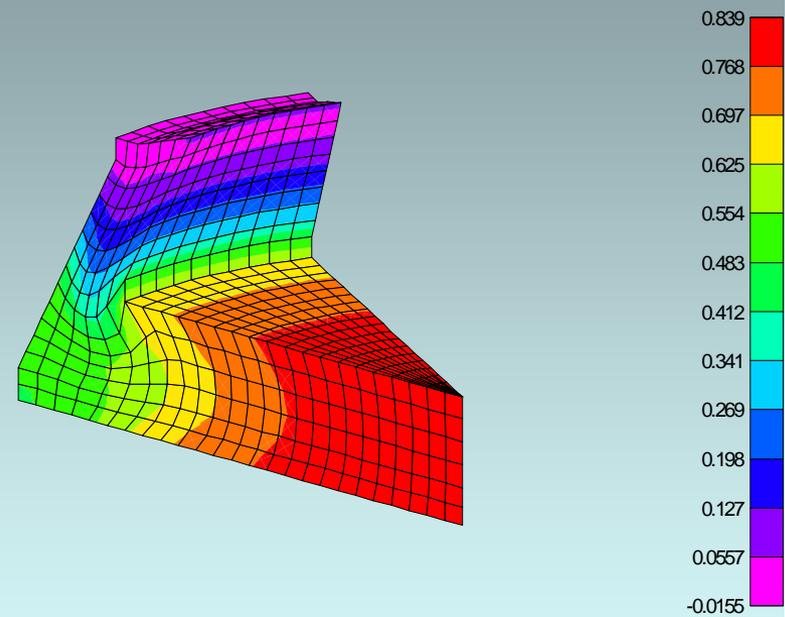
Bruchpunkt EB an der Steifigkeitskurve



Spannungen zum Zeitpunkt des Steifigkeitsabfalls



Schubspannungen



Hauptspannungen

Inhalt

1. Technische Regel für Klebverbindungen: ETAG 002
2. Allgemeine Materialgesetzmäßigkeiten
3. Tragfähigkeit punktueller U-förmiger Verklebungen
4. Tragfähigkeit geklebter Punkthalter
5. **Schlussfolgerung**

Warum Kleben ?

Kleben bietet Vorteile !

- **Punktuelle Verklebungen ermöglichen ästhetisch ansprechende Verbindungen zwischen Glas und Stahl**
- **Auf Bohrungen im Glas kann meist verzichtet werden**
- **„Weiche“ Lasteinleitung – Vermeidung von Spannungsspitzen im Glas ist nur über Klebungen möglich**

Schlussfolgerung 1

- **Spezialkenntnisse der Materialgesetzmäßigkeiten des Werkstoffs Silikon müssen berücksichtigt werden**
- **Experimentelles Wissen über U-förmige punktuelle Klebungen und plane Punkthalter Verklebungen ist vorhanden**
- **Die Möglichkeit analytischer Vorab-Untersuchung mit FEM von beliebigen Verklebungsgeometrien ist gegeben**
- **Besondere Synergieeffekte sind möglich durch einen kombinierten Ansatz: Versuch + FEM**
- **Geringerer Versuchsaufwand für die Findung geeigneter Verklebungsgeometrien**
- **Deutlich geringerer Prüfaufwand und reduzierte Risiken bis zu einer Genehmigung (ZiE)**

Schlussfolgerungen 2

Allerdings ist zu beachten !!!

- Eine Bemessung von punktuellen Verklebungen auf der Basis der ETAG 002 ist immer fragwürdig, da hier lediglich $\text{Last} / \text{Fläche} < \text{zul.}\sigma$
- Bei extremen Geometrieformen können Scher- oder Stanzphänomene die Belastbarkeit deutlich herabsetzen
- FEM ist hilfreich für die Optimierung der Verklebungsgeometrie – die Wahrheit kann nur der Versuch zeigen
- Bereits die Wertung von Versuchen erfordert ein spezielles Know How über die Eigenschaften von Silikonklebungen

„Alles“ ist möglich, wenn...

... **rechtzeitig**

- **Die richtigen Fachleute zugezogen werden**
- **Behörden rechtzeitig miteinbezogen werden**
- **Klebstoffhersteller ins Boot geholt werden**

Danke !

Ein herzlicher Dank für die Unterstützung unserer Arbeit gebührt ...

- **Dow Corning, insbesondere Herrn Sitte, der uns neben dem Klebstoff auch mit Rat und Tat unterstützte**
- **Glas Trösch Konstruktiver Glasbau, für die Bereitstellung der konisch gebohrten Scheiben**



Ende

www.a-hagl-ingenieure.de
www.test-ing-material.de