Bemessung von SSG
Klebfugen
A. Hagl Ingenieurgesellschaft mbH, München

Vorstellung

- Schwerpunkt ursprünglich Stahl- und Stahlbetonbau
- Ab ca. 1992 auch Glasbau
- Beschäftigung mit Klebtechnik ab 1998 (Herz-Jesu-Kirche)
- 2002 Gründung und Leitung des AK Kleben innerhalb des FKG
- Anregung diverser Forschungsaktivitäten zur Klebtechnik im Bauwesen

- Versuchsdurchführung an Klebstoffen und Verklebungen (Zug, Druck, Schub, zyklische Belastung)
- Forschung zur Klebtechnik und Klebstoffen
- Berechnung von komplexen Silikon-Klebfugen auf der Basis eigens erstellter Werkstoffgesetze
- Begleitung / Organisation von ZiE´s aus dem Bereich Glas- und Klebtechnik
- Monitoring von Fassaden und SSG Konstruktionen

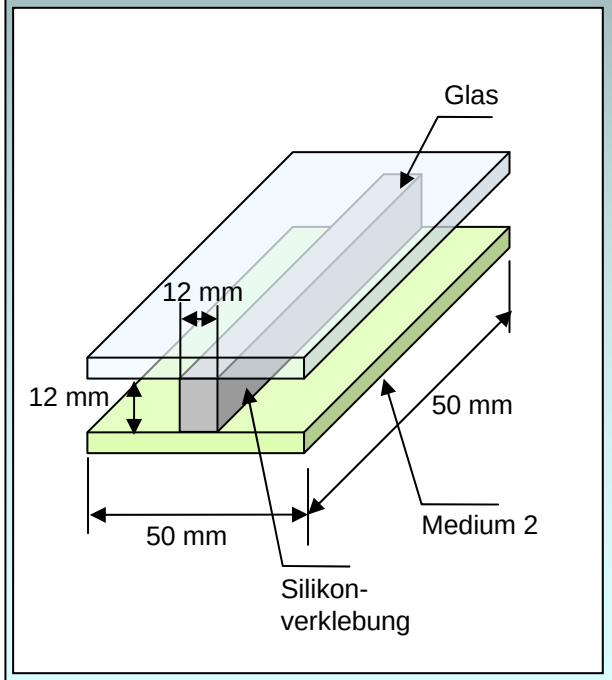
Gliederung

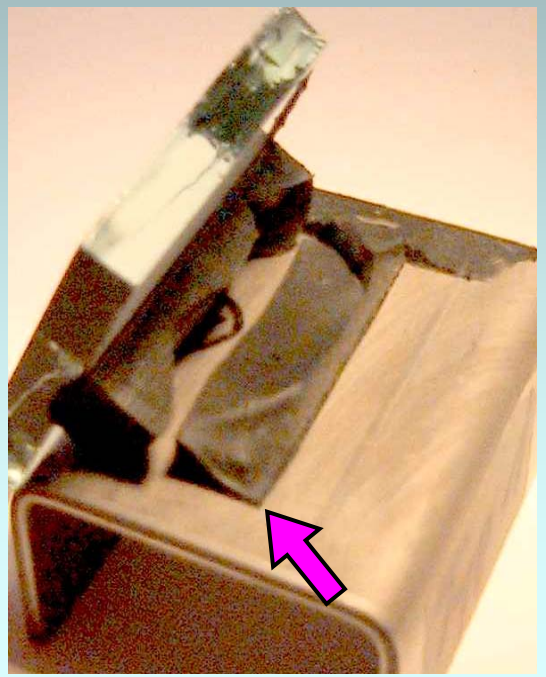
1. Derzeitiger Stand der Bemessungsvorschriften
2. Neuer Ansatz mit Vergleichsspannungen
3. Bemessung auf der Basis von FEM
4. Bemessungsgrafiken für linienförmige Verklebungen
5. Zusammenfassung

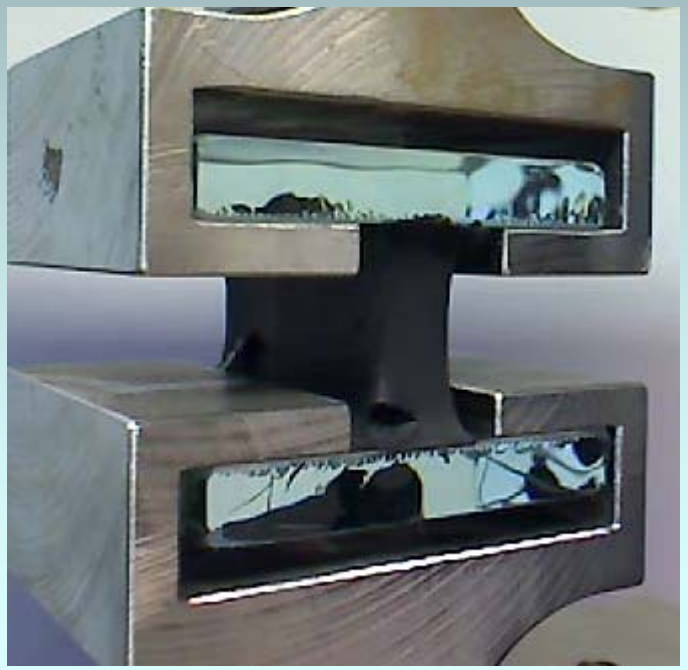
Auslegungsspannung nach ETAG 002

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 (insbesondere an Ecken)**







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.**

Bemessungsvorschrift ... aber !

Nach ETAG 002, Anhang 2 – Rechenverfahren

A.2.0 Einleitung:

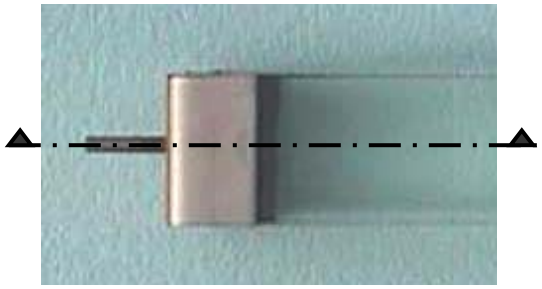
„Dennoch kann ein Antragsteller ein anderes Rechenverfahren vorlegen, das auf Simulationsversuchen oder Forschungsergebnissen basiert.

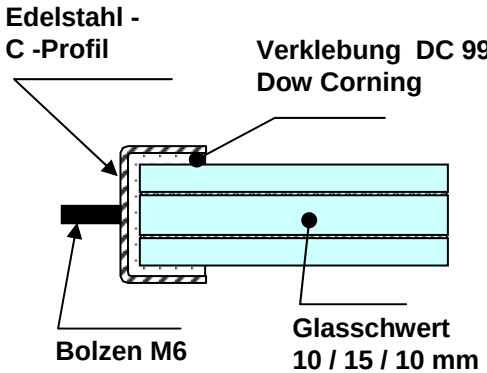
Um es der Zulassungsstelle zu erlauben, eine ETA auf Grundlage eines solchen Rechenverfahrens zu erteilen, müssen vollständige Nachweise geliefert werden.“

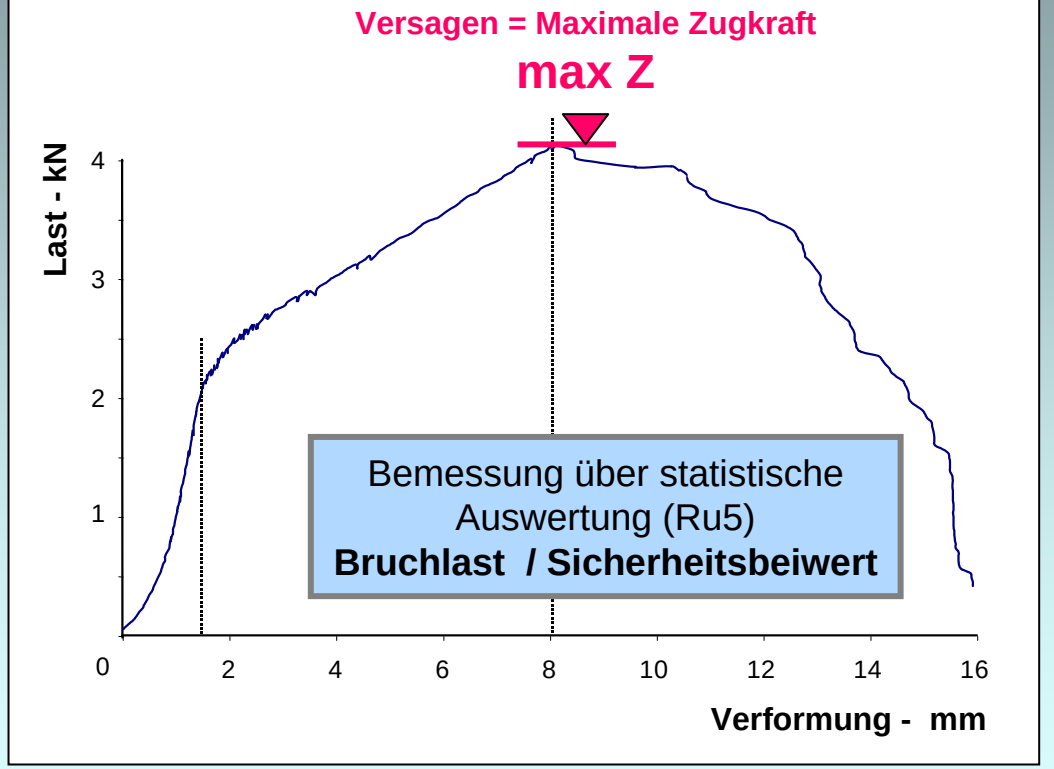
Die später vorgestellten Berechnungen basieren auf Forschungsergebnissen.

Damit kann im Vorfeld von Bauteilversuchen die Tragfähigkeit einer Klebverbindung berechnet werden.

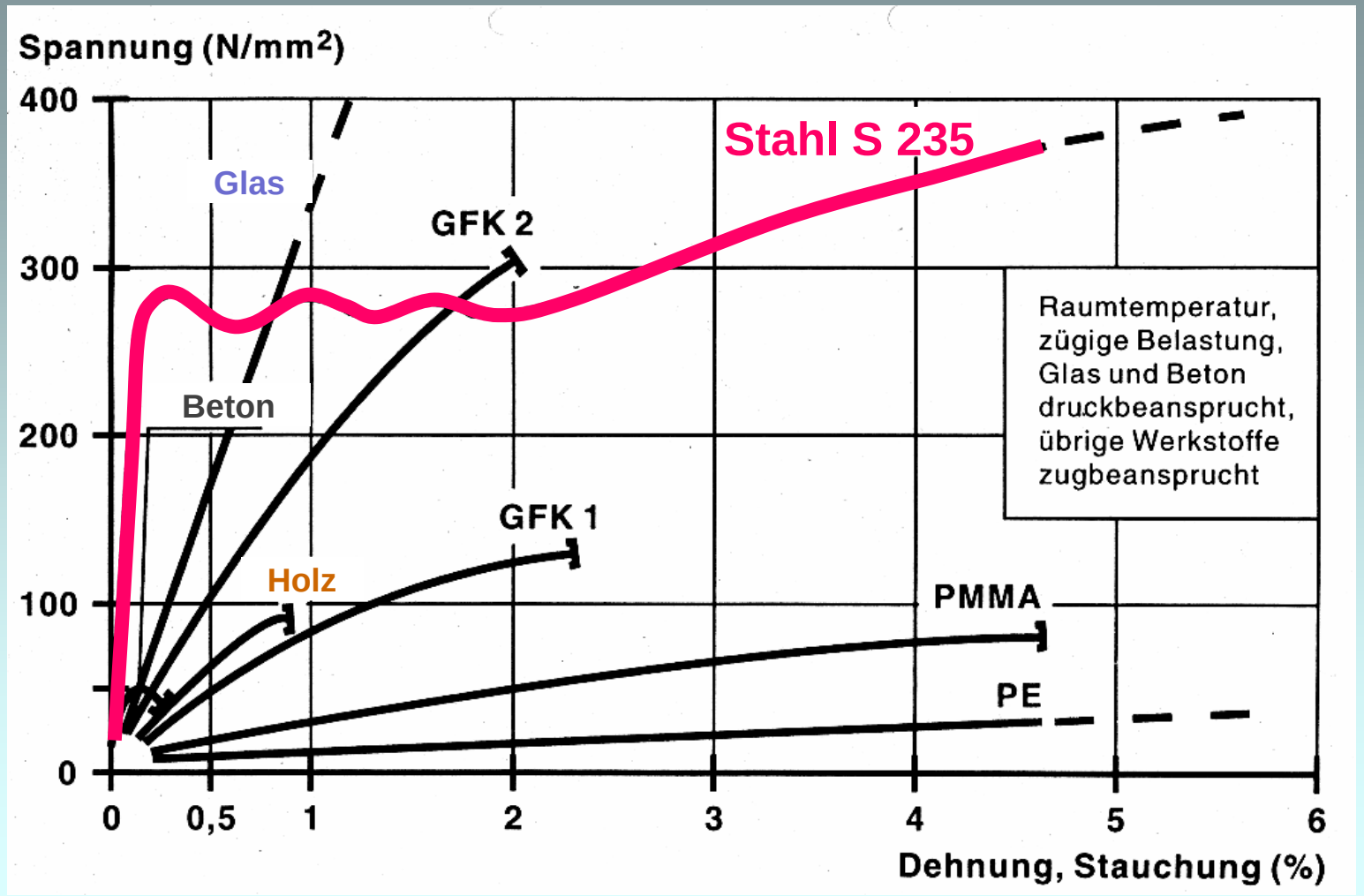
Nachweis einer Klebfuge auf der Basis von Versuchen - bisher



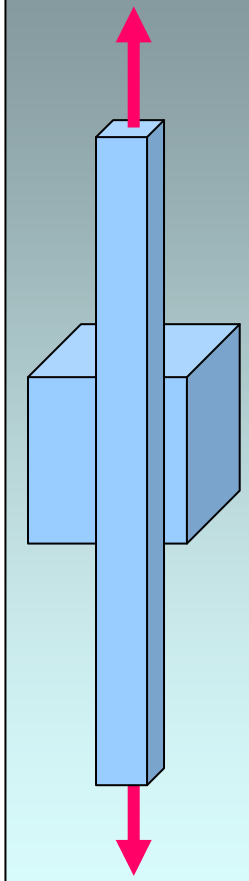




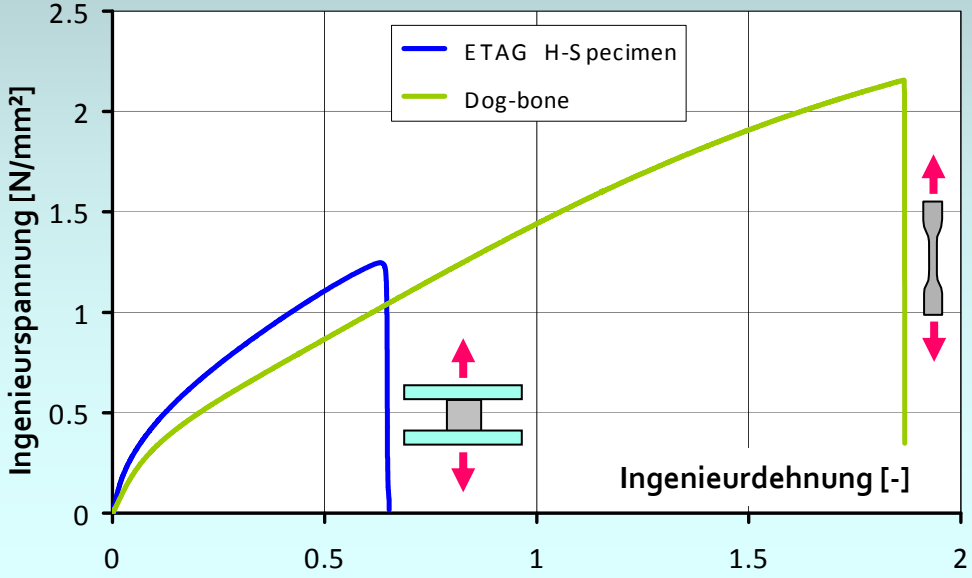
Spannungs-Dehnungslinien für unterschiedliche Werkstoffe



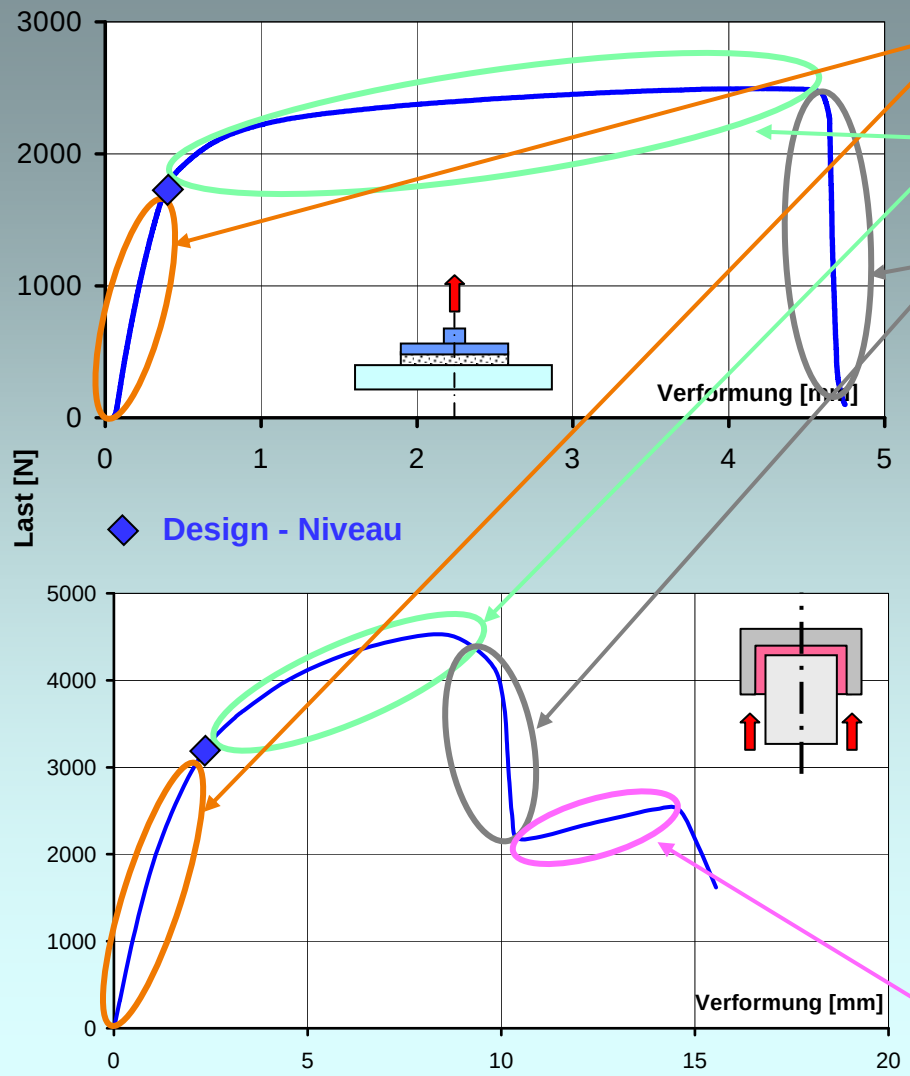
Konventionelle Testverfahren



- **Abruptes Bruchverhalten von Silikonelastomeren ("spröde")**
- **Großer Einfluss der Randbedingungen auf Grund**
  - **geringer E-Modul**
  - **große Querkontraktionszahl (≈ 0,5; d. h. nahezu inkompressibel)**
- **Bruchverhalten Dogbone Test nicht repräsentativ für technische Anwendungen**
- **H-Prüfkörper ETAG ebenfalls wenig repräsentativ für beliebige Klebfugen-Geometrien und Ermittlung von Werkstoff-Kenndaten**



Bruchverhalten verschiedener Verklebungsgeometrien



Funktionsfähige Verklebung

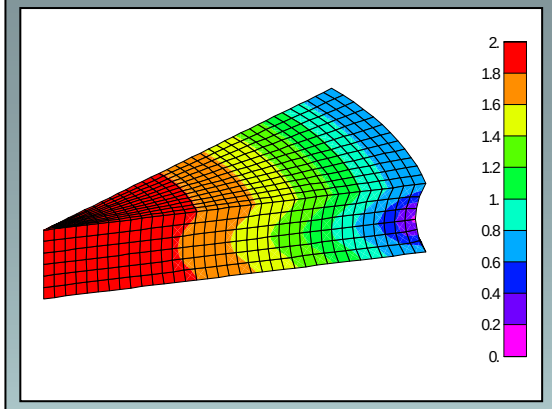
Mikrorisse im Klebstoff bei ansteigender Belastung

Makrorisse entstehen und führen zum Versagen

- Ähnliches "Fließ"- Verhalten für Silikon unter Querkontraktionsbehinderung unter Zugbelastung
- Deutlicher Abfall der Steifigkeit bei bestimmtem Lastniveau
- Ähnliches Spannungsniveau für maximale Hauptspannung für verschiedene Geometrien bei Design-Niveau
- Dargestellte Last- und Spannungsniveaus für untersuchten 2K-Werkstoff

Neuer Lastpfad über Schub in den Flanken

Bemessung beliebiger Klebfugengeometrien

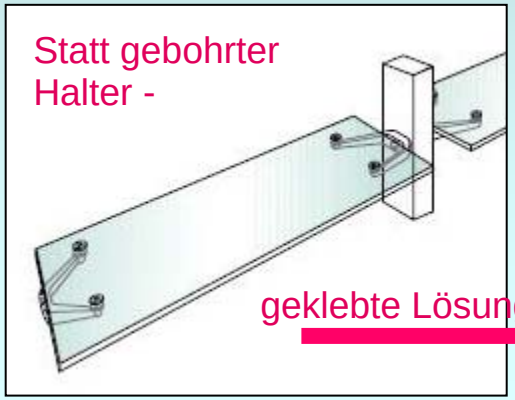


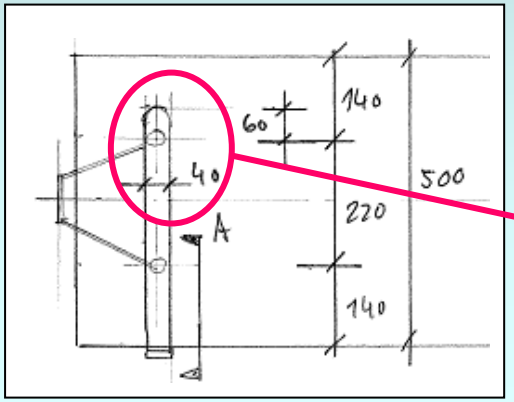
Bei Ansatz des hyperelastischen Werkstoffgesetzes auf der Basis von Werkstoffversuchen beginnt die Schädigung des untersuchten Klebstoffes bei 2,0 N/mm².

Da bekannt ist, dass vor allem an der freien Klebstoffkante Schädigungen durch Umwelteinflüsse auftreten können, wird empfohlen bei komplexeren Verklebungsgeometrien einen geringfügig erhöhten Sicherheitsbeiwert für die äußeren 10 mm einer Verklebung anzusetzen.

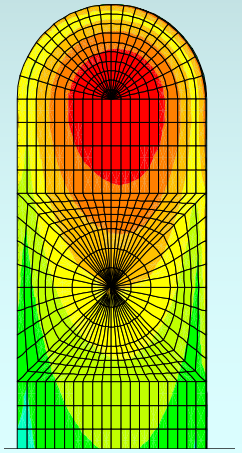
Beispiel: Solarpaneel für eine Fassade

Vorteile:
- **keine Glasbohrungen**
- **geringere Glassdicke erforderlich**

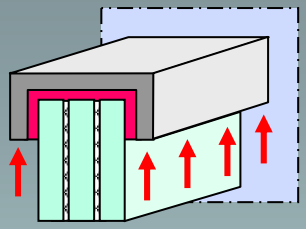




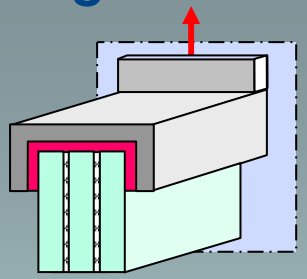
Maximale Hauptspannung in der Klebfuge



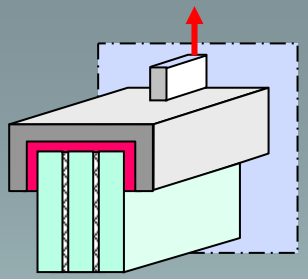
Spannungsverteilung in U-Verklebungen



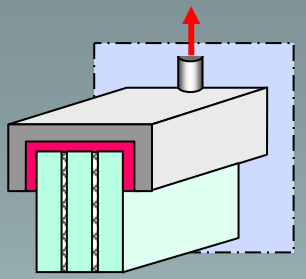
Typ U0 – linienförmige Lasteinleitung



Typ U1



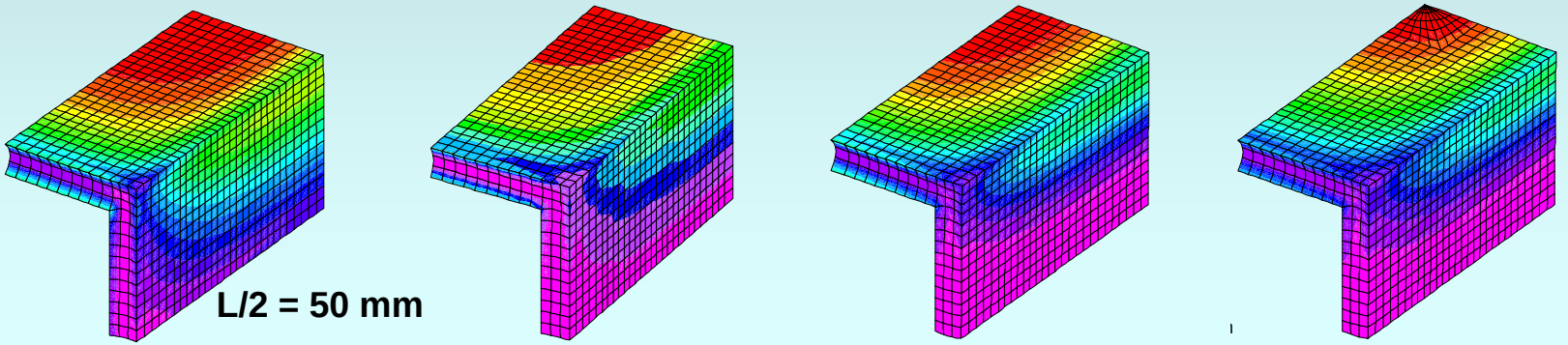
Typ U2



Typ U3

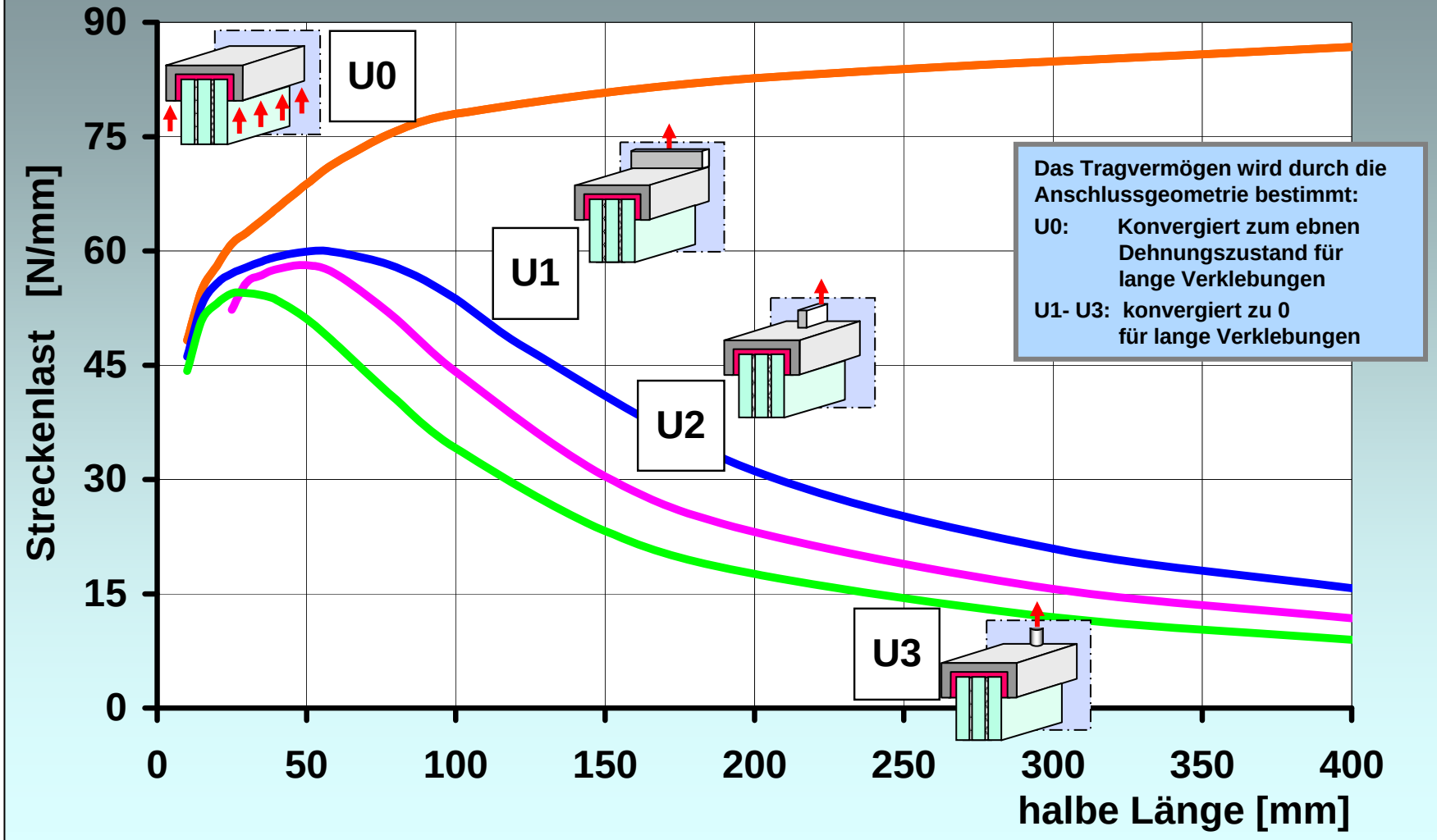
Vergleich von verschiedenen Lasteinleitungsgeometrien zeigt, dass die Spannungsverteilung maßgeblich von der Geometrie der Lasteinleitung und dem Randeinfluss abhängig ist.

Je größer der Bereich hoher Spannungen, je mehr Last kann aufgenommen werden für vorgegebene Maximalwerte der Hauptspannungen (hier 2,0 N/mm² für den untersuchten Klebstoff).



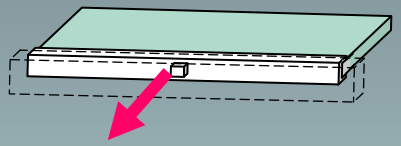
Tragvermögen verschiedener Lasteinleitungen Typ U

Freie Ränder der Klebfuge – ermöglichen Einschnüren der Verklebung

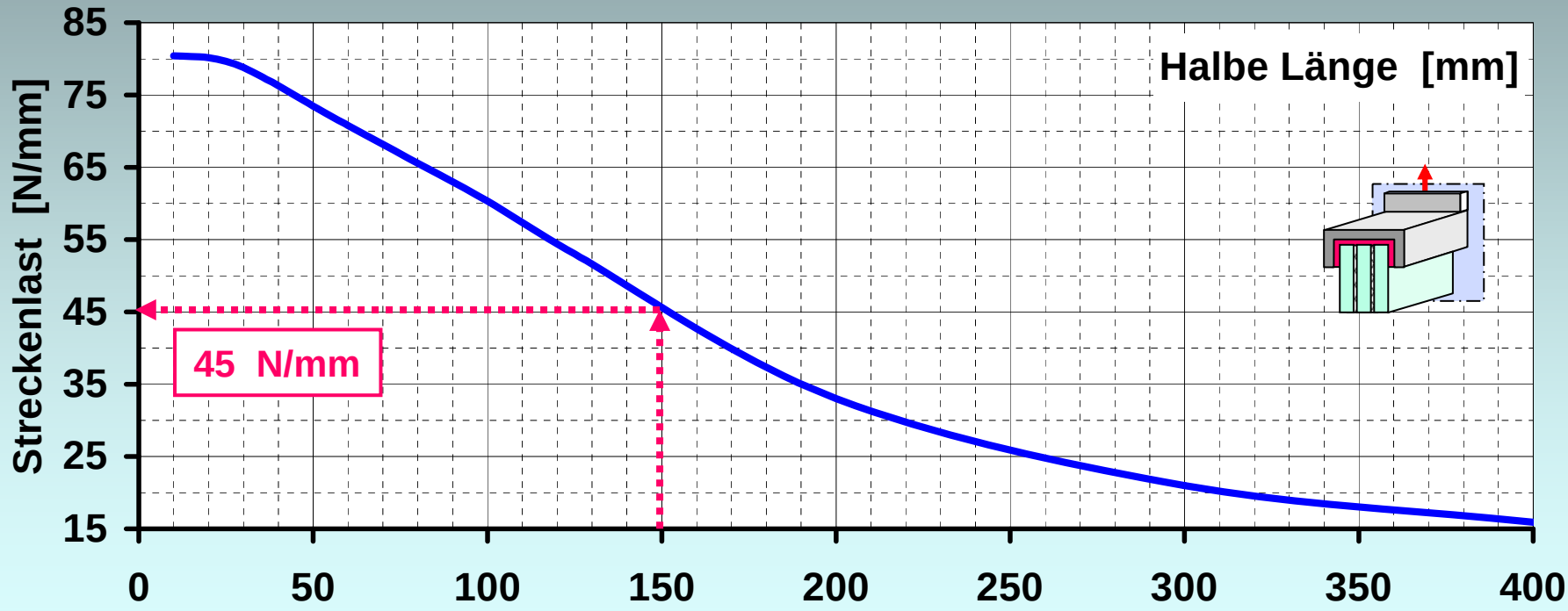


z. B. Bemessungsdiagramm Typ U1a, 3 x 12, d_A = 5 mm

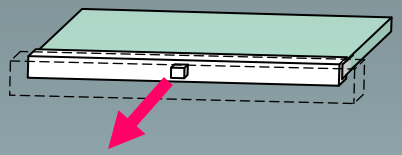
Für mittleren Bereich der Klebfuge – Einschnüren der Verklebung ist unterdrückt



mitwirkende Breite geschätzt mit 30 cm



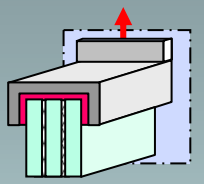
z. B. - Nachweis Anschluss horizontales Glasschwert

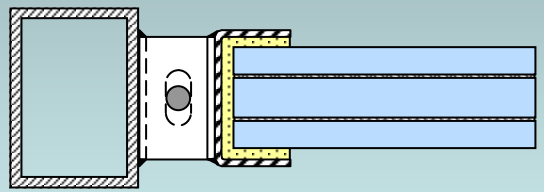


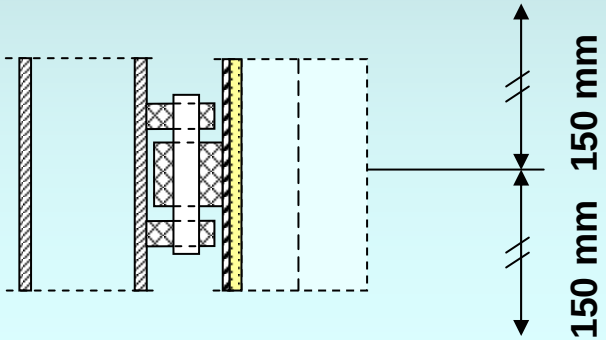
Lastübertragung nur horizontal

1,8 kN = 1800 N

Anschluss Typ U1a







Erwartete Belastbarkeit - Kurzzeitlast:

F_{EB} = 2 x 150 x 45 = 13.500 N / 6

= 2.250 N

= 2,25 kN > 1,8 kN

Sicherheitsbeiwert nach ETAG

Zusammenfassung und Ausblick

- **Zug üblicherweise kritisch für Klebverbindungen mit Silikon**
- **Schub kann näherungsweise über klassische Schubformeln abgedeckt werden**
- **Unterschiedliches Verhalten :**
  - **"sprödes" Verhalten bei Dogbone-Tests**
  - **"Fließ„-ähnliches Verhalten bei starker Querkontraktionsbehinderung**
- **In Versuchen ähnliche Spannungsniveaus für "Fließ"-Beginn (= Design-Niveau) festgestellt für maximale Hauptspannungen**
- **Anwendung von modernen Rechenverfahren (z. B. nichtlineare FEM) ermöglicht gezielte Optimierung von geklebten Konstruktionen**
- **Anwendung von FEM auf parametrisierte Verklebungsgeometrien erlaubt Erstellung von Auslegungsdiagrammen für vereinfachte praxisgerechte Dimensionierung**
- **Erweiterung für transparenten Hochleistungs-Silikonklebstoff in Bearbeitung**

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