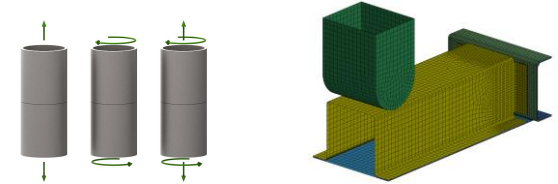


CADFEM[®]



Excellence is our Passion

Simulation ist mehr als Software[®]



Parameteridentifikation für Materialmodelle zur Simulation von Klebstoffverbindungen

Nico Nagl – CADFEM GmbH

Motivation

- Kleben als Schlüsseltechnologie in Verbindungstechnik
 - Fahrzeugindustrie
 - Anteil an Klebstoff wächst
 - Verdrängung herkömmliche Verbindungsmethoden
 - Strukturklebeverbindungen
 - Homogene Spannungsverteilung
 - Zusätzliche Steifigkeit
- Zuverlässige Voraussage des Klebstoffverhaltens mit Simulation notwendig
- Polymer
 - Dünne Schicht



Karosserie mit geklebten ABC-Säulen und Frontscheibe

Kontinuumsmechanische Materialmodelle mit elasto-plastischem Verhalten

- Plastizitätsformulierung

	Von-Mises	Polymerspezifisch
Plastizität	Nur deviatorische Spannungen J_2	Deviatorische Spannungen J_2 und hydrostatischer Druck I_1
Materialmodell	Multilineares Materialmodell	Verfestigende Klebstoffe (TAPO)
Anwendung	Häufig	Nicht etabliert
Notwendige Experimente	Einachsiger Zug	Mehrere Spannungszustände

Beschreibung des Strukturklebstoffes

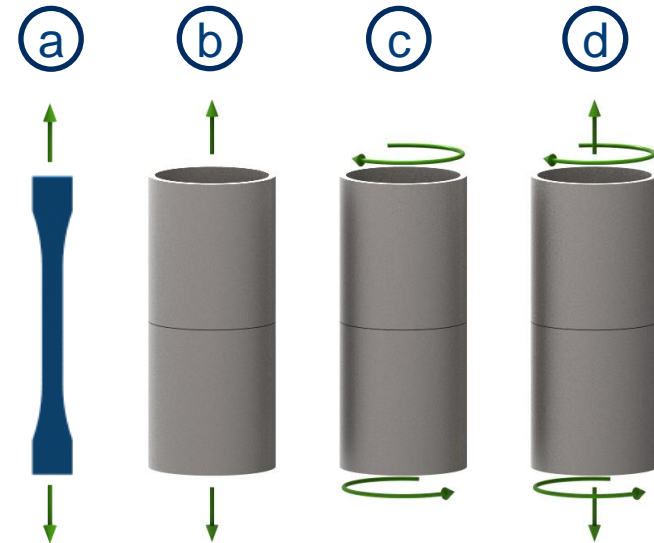
- 1-Komponenten Epoxidharzklebstoff
- Produkt von Henkel AG & Co. KGaA
- Automobilbereich
- Craschanwendung
- Unterschiedliche Materialien ffügbar

- Messdaten stehen zur Verfügung

- Charakterisierung des Klebstoffes
 - Multilineares Materialmodell vs. Modell für verfestigende Klebstoffe TAPO

Materialmodelle und Experimente

Multilineare Plastizität	Verfestigender Klebstoff TAPO
Materialparameteridentifikation	
Reinharzprobe	Stumpf geklebte Hohlzylinder
Uniaxialer Zugversuch (a)	Querbehinderter uniaxialer Zugversuch (b)
	Schub (c)
	Kombinierter Zug-Schub (d)
T-Stoß Validierung	



Materialmodell mit multilinearer Plastizität

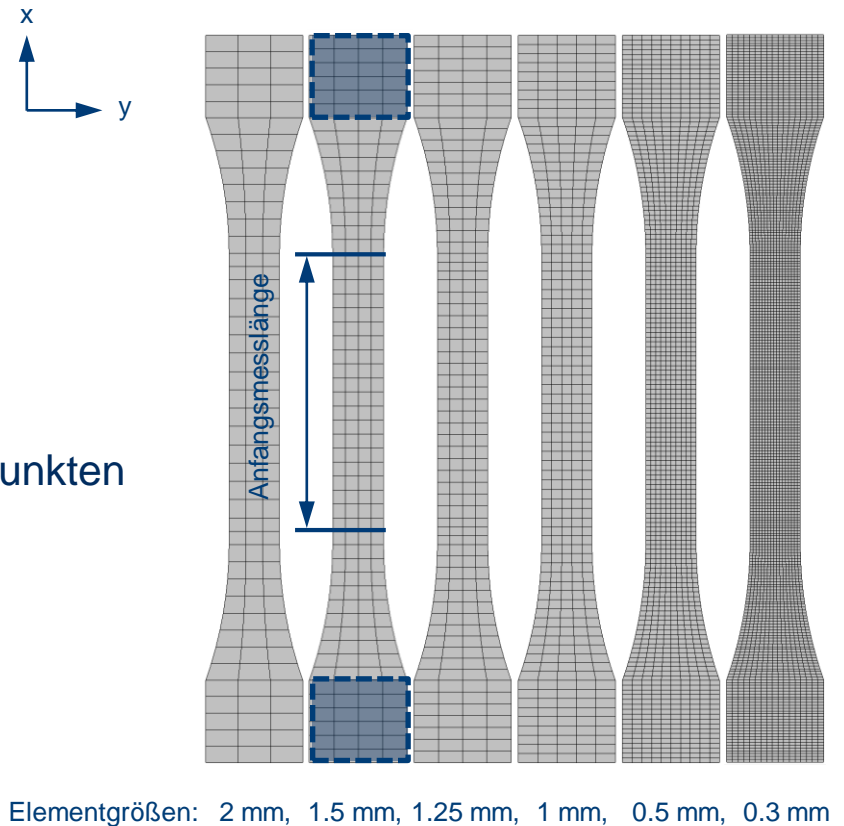
- Von-Mises Fließkriterium
$$f(J_2) = J_2 - \frac{1}{3}\sigma_Y^2 = 0$$
- Assoziierte Fließregel
$$\dot{\varepsilon}^P = \dot{\lambda} \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma}$$
- Kumulierte plastische Dehnung
$$\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^P = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}^P \cdot \dot{\varepsilon}^P} \quad \dot{\lambda} = \dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^P$$
- Elastisch-plastisches Materialverhalten
- 4 Materialkonstanten
- Fließspannung vs. plastische Dehnung in Tabelle
- Berücksichtigung nur von deviatorischen Spannungen J_2

Identifikation der Materialparameter für multilineares Modell

- FE-Modell
 - Volumenelemente
 - Elementgröße 1.5 mm
 - Starrkörper bei Einspannungen
 - Oben: Geschwindigkeit in x-Richtung
 - Unten: fixiert

- Kraft-Verschiebungskurven an den Messpunkten

- Materialparameter
 - Dichte ρ ✓
 - E-Modul E ✓
 - Querkontraktionszahl ν ✓
 - Plastische Dehnung bei Bruch ϵ_p ✓
 - Fließkurve

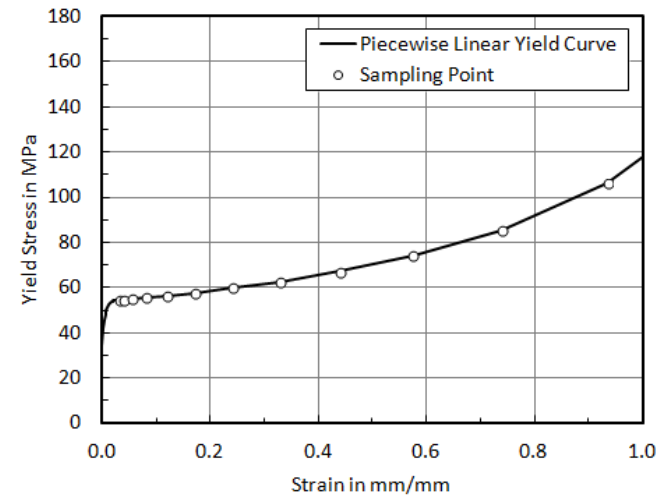
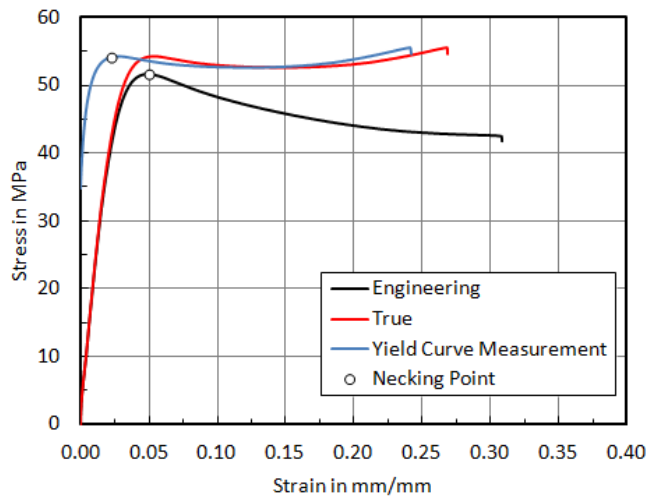


Identifikation der Materialparameter für multilineares Modell

- Parametrische Fließspannung vs. plastische Dehnung
- Umrechnung der Datenpunkte

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng})$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng})$$

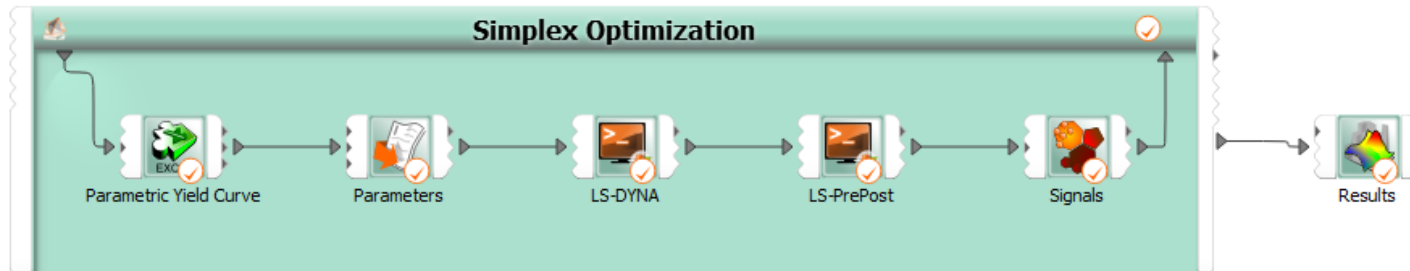
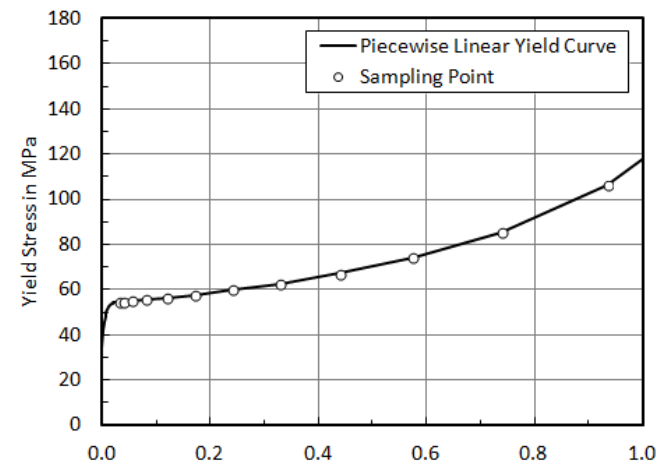


Identifikation der Materialparameter für multilineares Modell

- Parametrische Fließspannung vs. plastische Dehnung
- Inverse Optimierung mit Gleichung

$$\sigma = \sigma_{neck} \cdot e^{[a \cdot (\epsilon - \epsilon_{neck}) + b \cdot (\epsilon - \epsilon_{neck})^2 + c \cdot (\epsilon - \epsilon_{neck})^3]}$$

- 3 Konstanten (a, b und c)
- Stützpunkte Spannung vs. Dehnung
 - Keine äquidistante Verteilung
 - Höhere Genauigkeit im Einschnürpunkt



Inverse Parameteridentifikation

- Experimentelle und berechnete Ergebnisse
- Minimierung der Zielfunktion

$$\min f(p)$$

- Summe der Fehlerquadrate RMSE

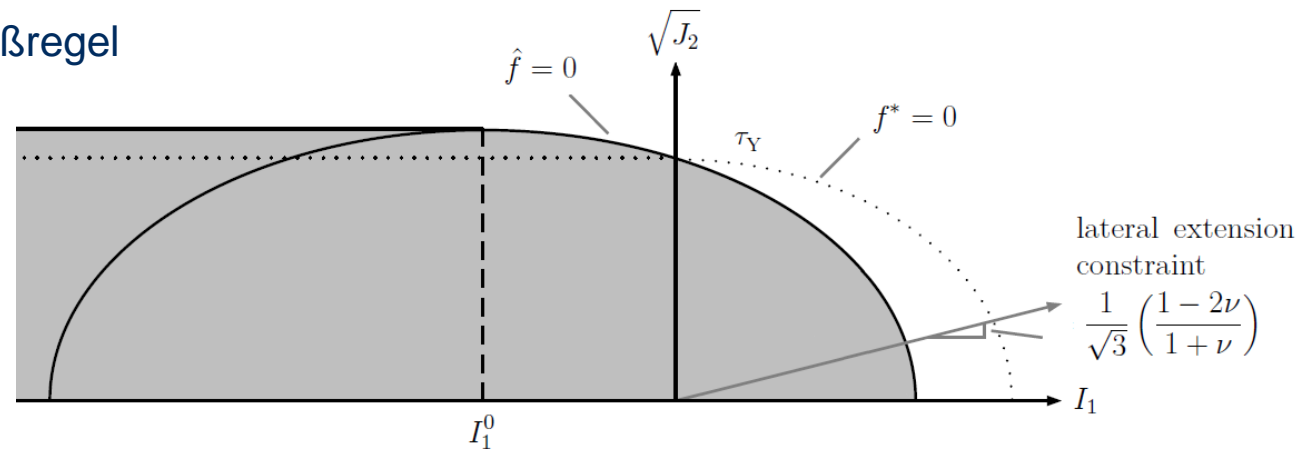
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2}$$

- Mehrere Lastfälle mit gewichteter und normalisierter Summe der Fehlerquadrate

$$NRMSE = \frac{RMSE^{Ref1}}{y_{max}^{Ref1}} + \frac{RMSE^{Ref2}}{y_{max}^{Ref2}}$$

Materialmodell für verfestigende Klebstoffe TAPO

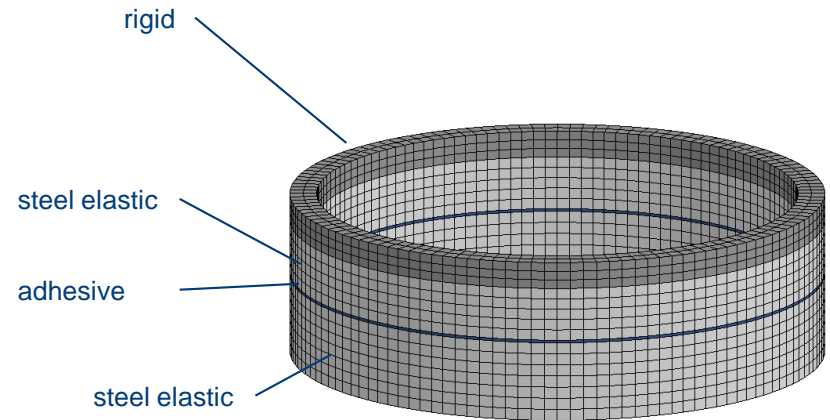
- Elliptische Fließkurve f^\wedge
 - Von-Mises Fließkriterium im Druckbereich
 - Abhängig von I_1 und J_2
- Plastisches Potential f^*
 - Nicht-assoziative Fließregel



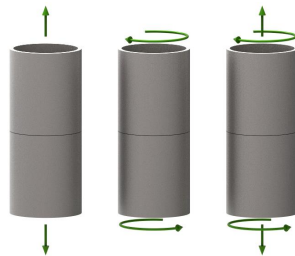
- Verfestigung
- Schädigung und Versagen
- 16 Parameter
- 3 unterschiedliche Spannungszustände notwendig

Parameteridentifikation für TAPO Modell

- FE-Modell
 - Hohlzylinder Stahl (oben und unten)
 - Volumenelemente
 - Klebschichtdicke $d_k = 0.3 \text{ mm}$
 - 1 Element über die Dicke



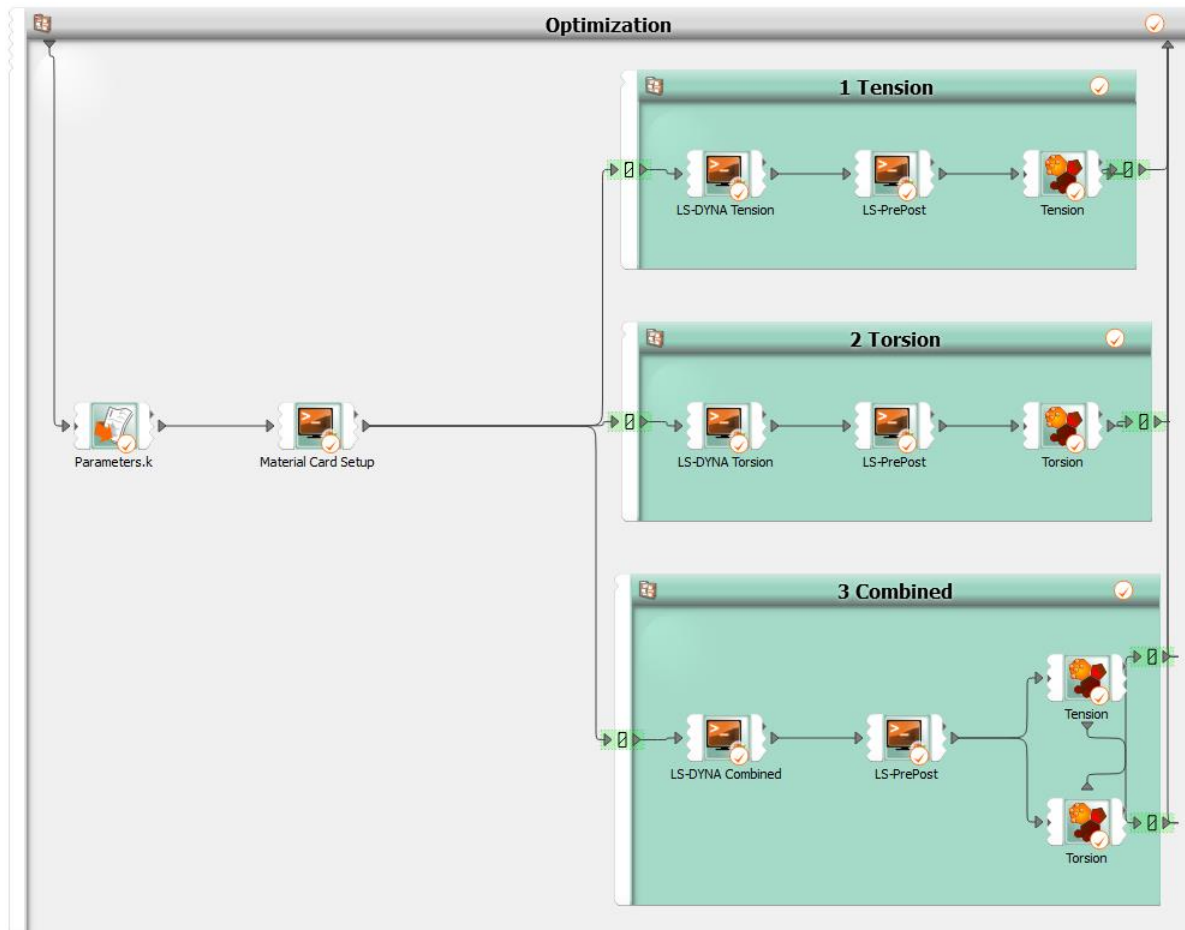
- Randbedingungen für alle 3 unterschiedlichen Spannungszustände



- Kraft-Verschiebung bzw. Moment-Verschiebung

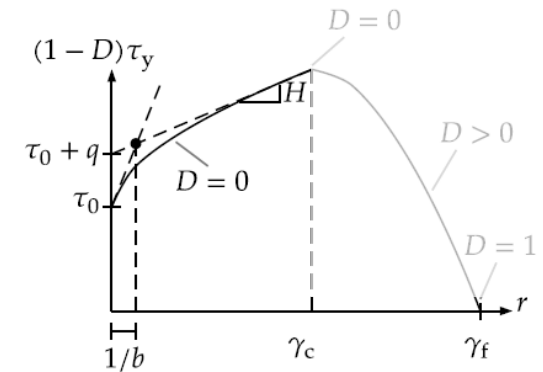
Parameteridentifikation für TAPO Modell

- Optimierungsworkflow

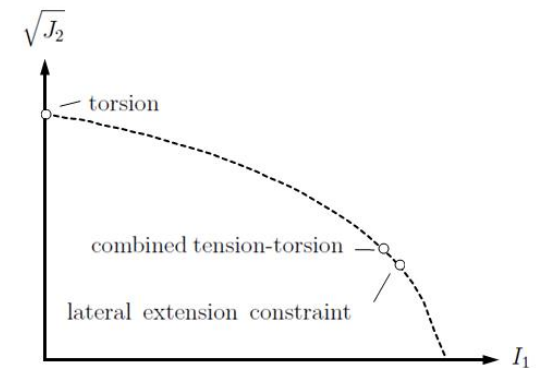
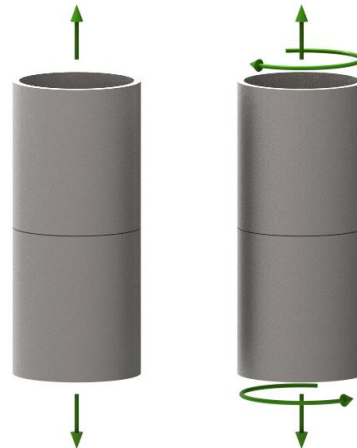


Parameteridentifikation für TAPO Modell

- 1. Schritt
 - 4 Verfestigungsparameter

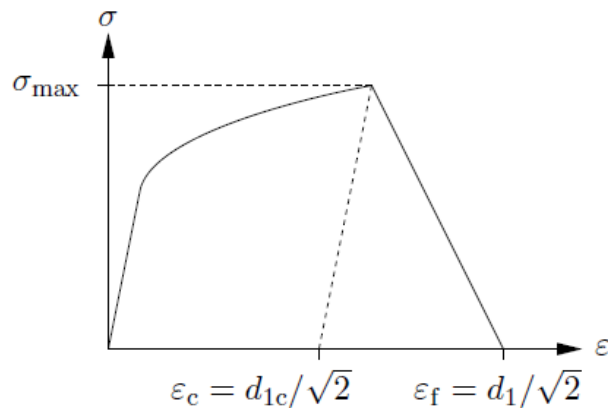
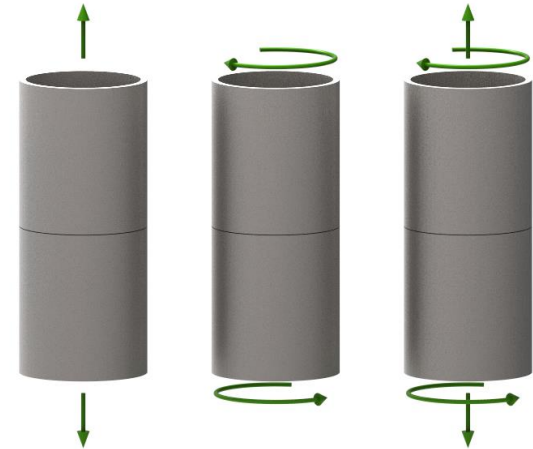


- 2. Schritt
 - 2 Parameter für Fließkurve
 - 1 Parameter für plastisches Potential

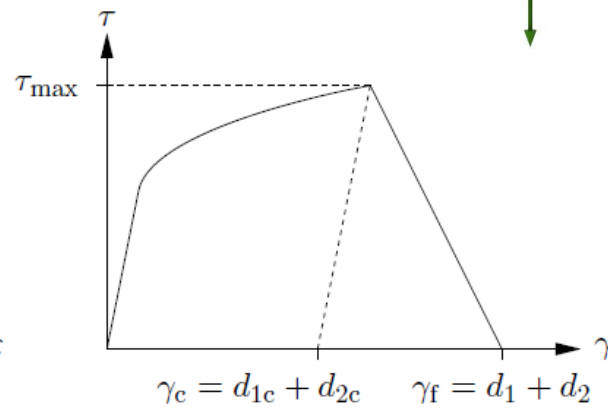


Parameteridentifikation für TAPO Modell

- 3. Schritt
 - 5 Parameter für Schädigung und Versagen

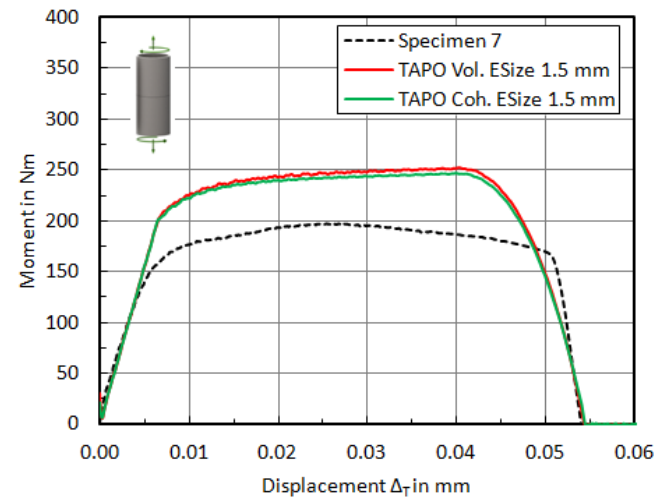
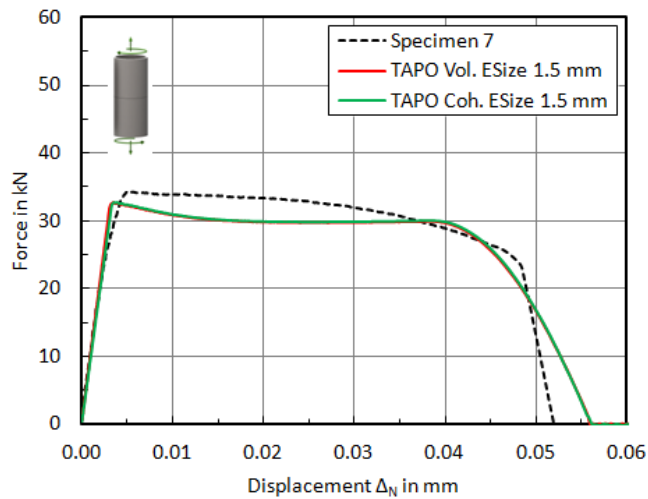
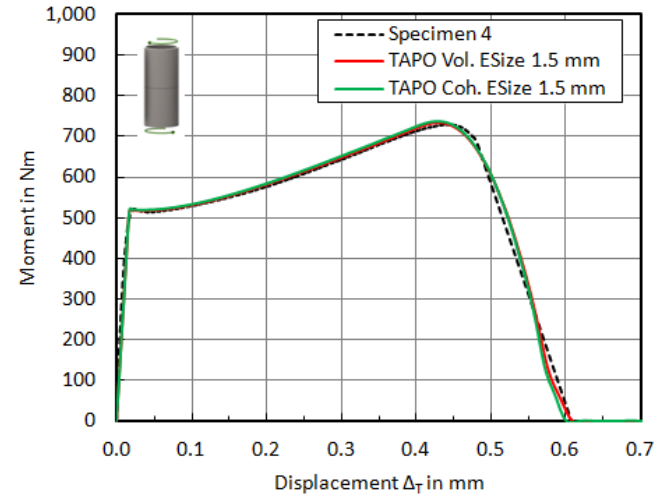
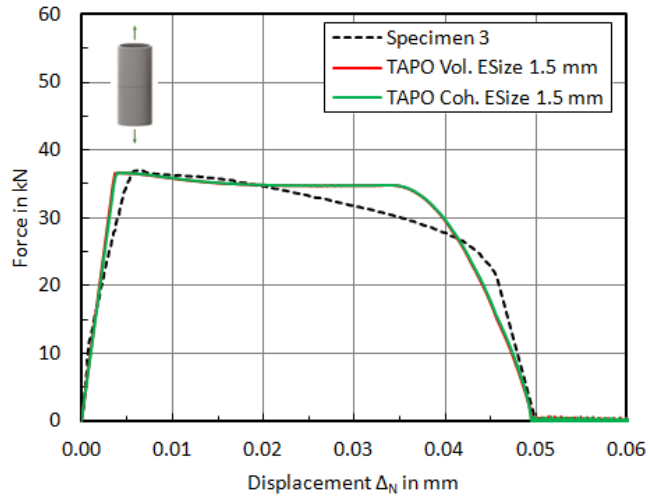


Zug

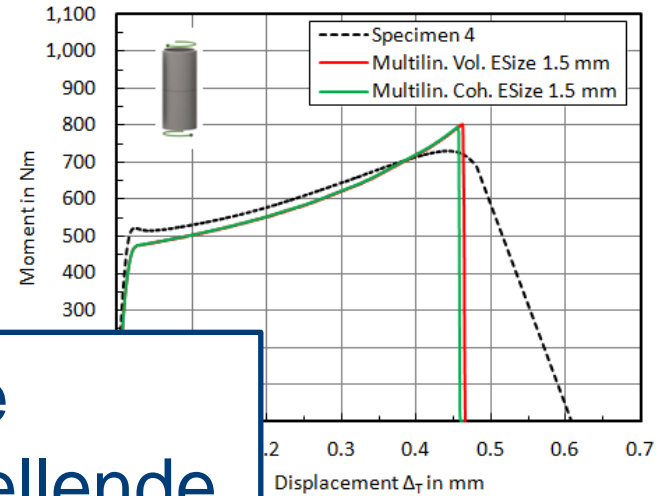
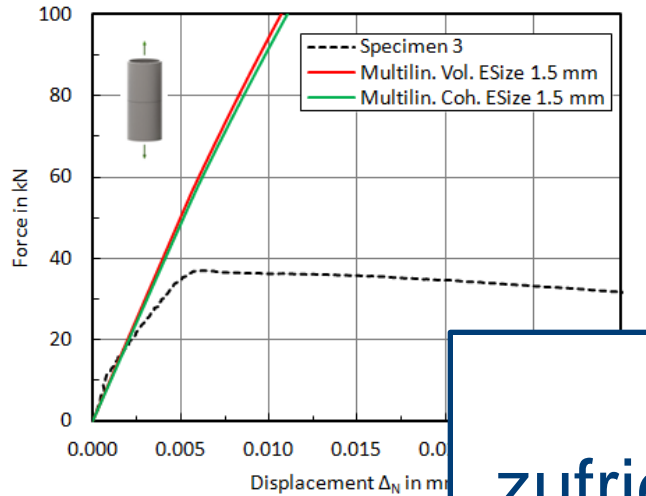


Schub

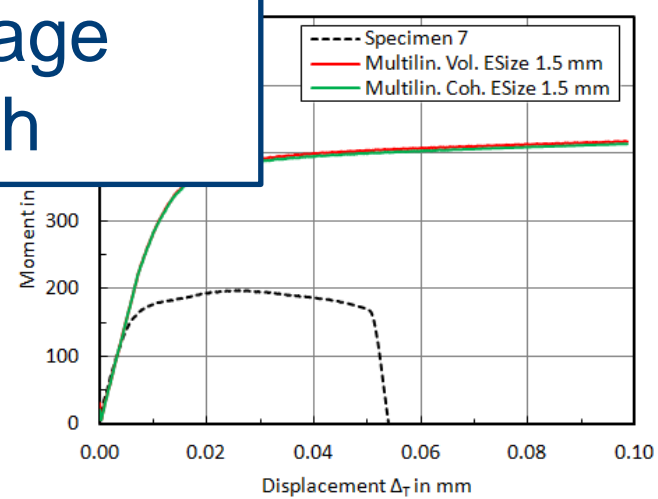
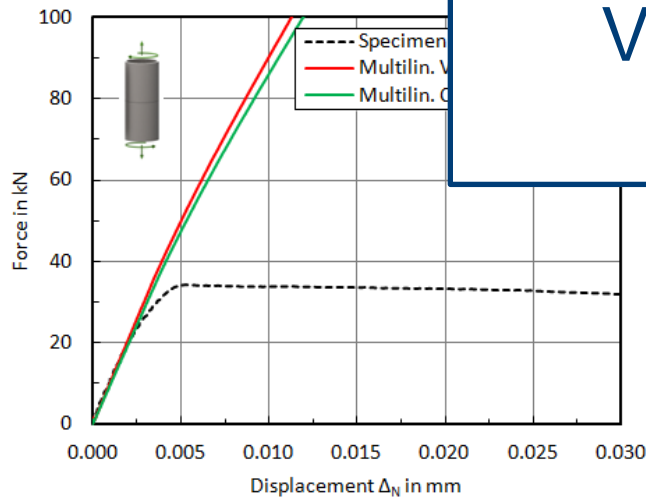
Ergebnisse für TAPO Materialmodell



Ergebnisse für multilineares Materialmodell

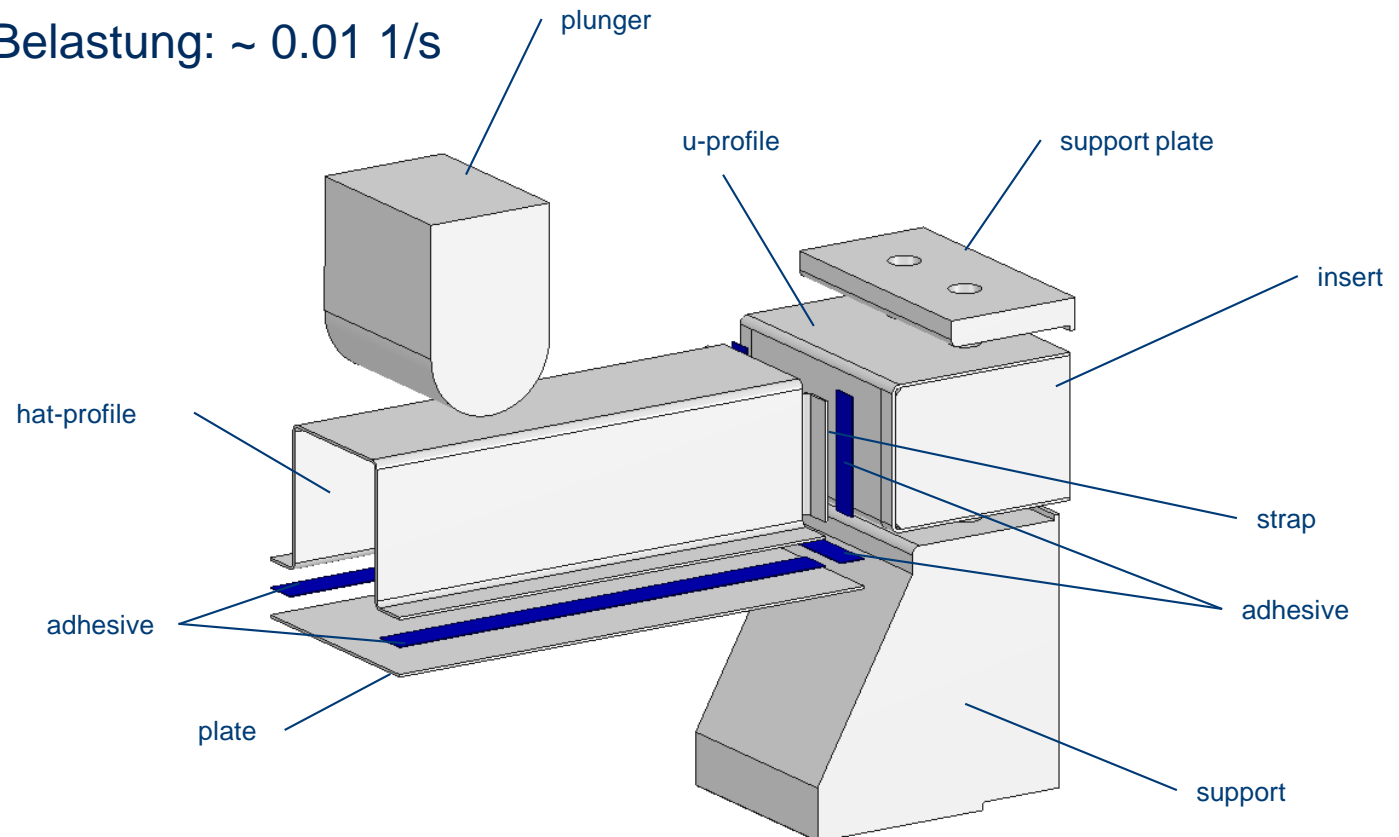


Keine
zufriedenstellende
Voraussage
möglich



Materialmodellvalidierung mit T-Stoß

- Blechdicke hochfester Stahl: 1 mm
- Klebschichtdicke: 0.3 mm
- Quasistatische Belastung: ~ 0.01 1/s
- Schälung

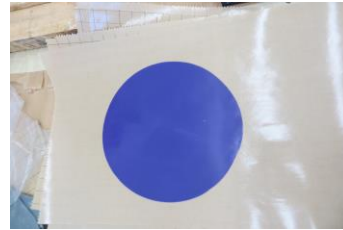


Vorbereitung und Versuchsdurchführung

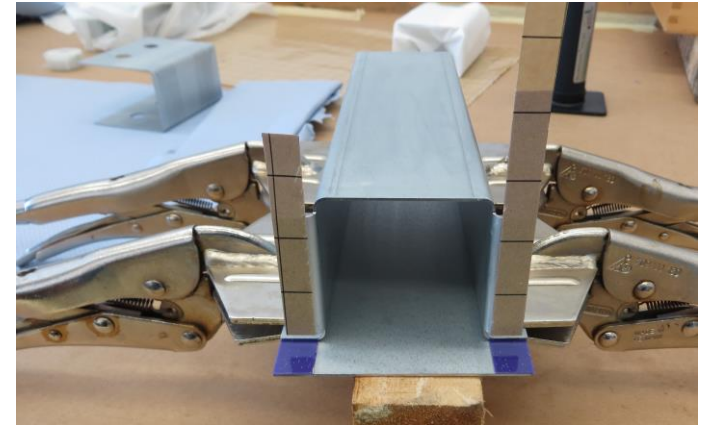
- Vorbereitung und Test bei Henkel AG & Co. KGaA



Klebstoff Rohmaterial



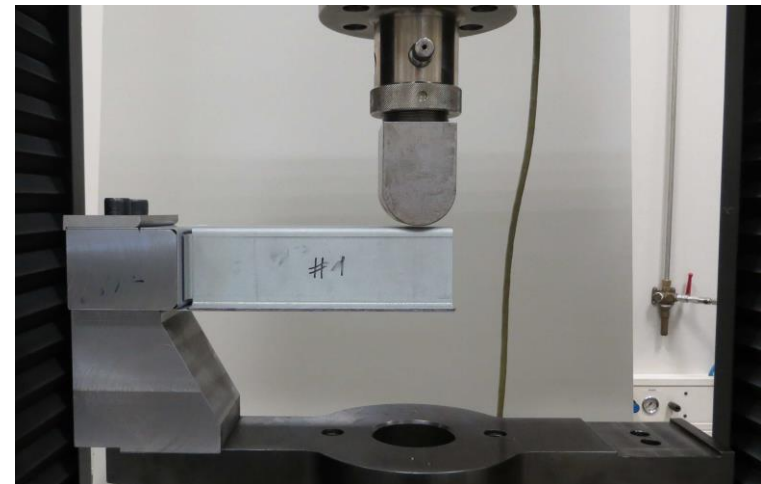
Scheibe mit 0.5 mm Dicke



Klebestreifen appliziert



Proben im Aushärteofen

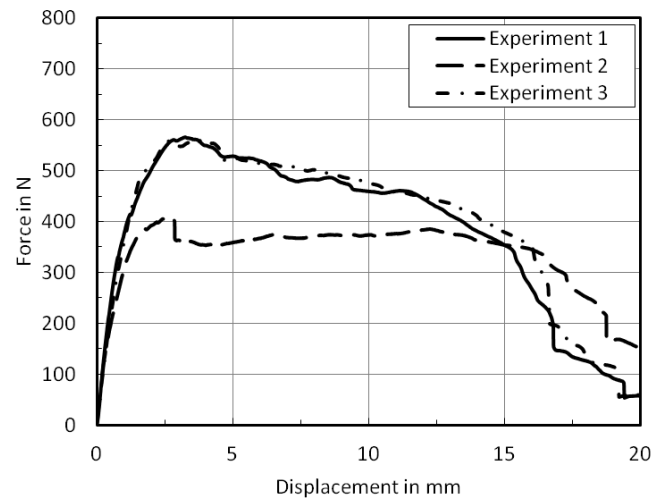


Versuchsaufbau

Ergebnisse T-Stoß Experiment

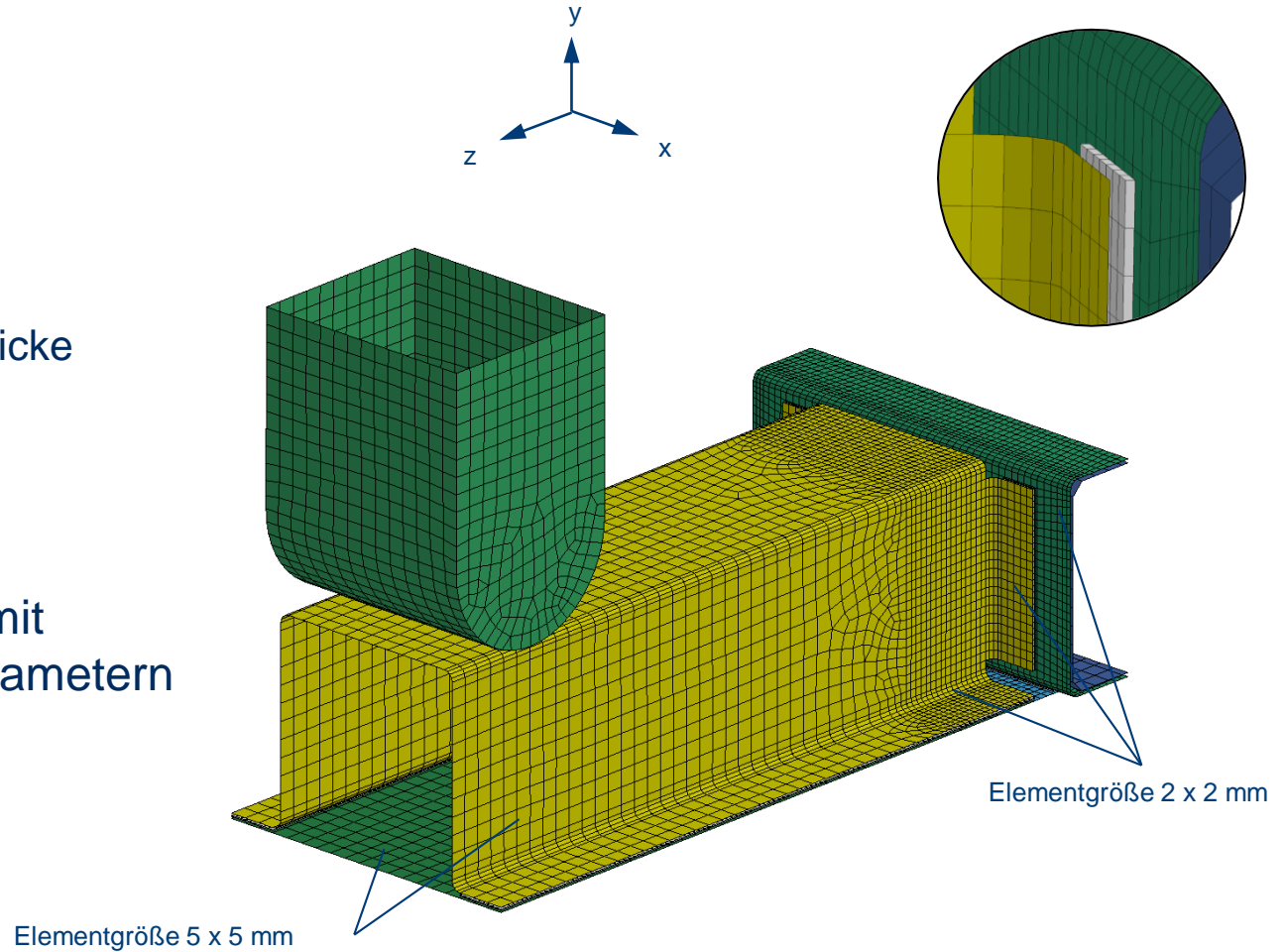
- Experiment 1 und 3
 - Kohäsivversagen

- Experiment 2
 - Adhäsivversagen
 - Ergebnis wird nicht berücksichtigt

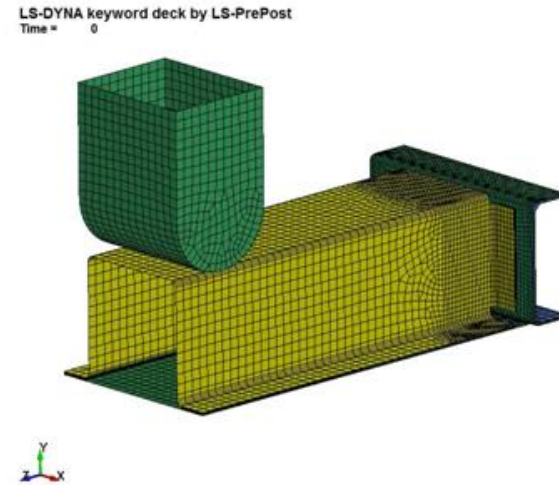
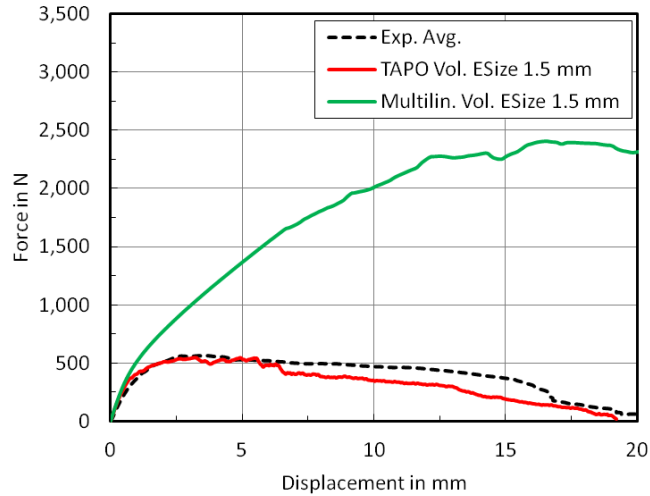


FE-Modell des T-Stoßes

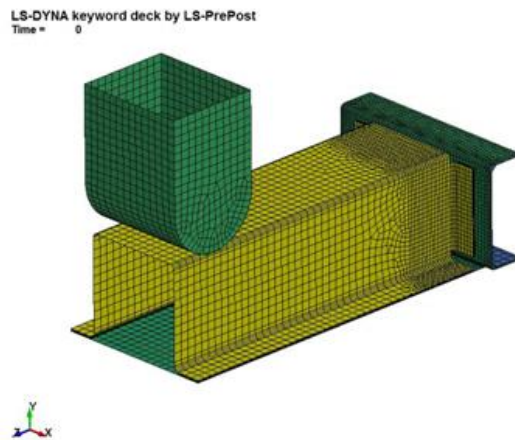
- Blechplatte
 - Schalenelemente
- Klebschicht
 - 1 Element über Dicke
- Verbundkontakt
- Materialmodelle mit identifizierten Parametern



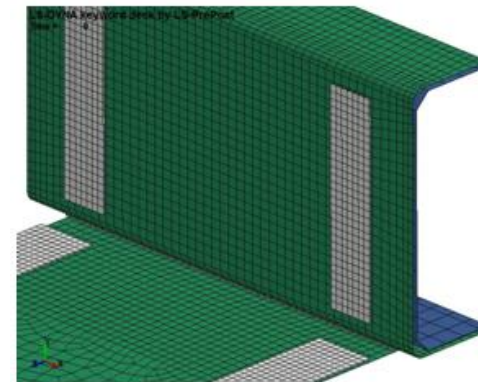
Ergebnisse T-Stoß für multilineares Modell und TAPO Modell



Multilineares Modell

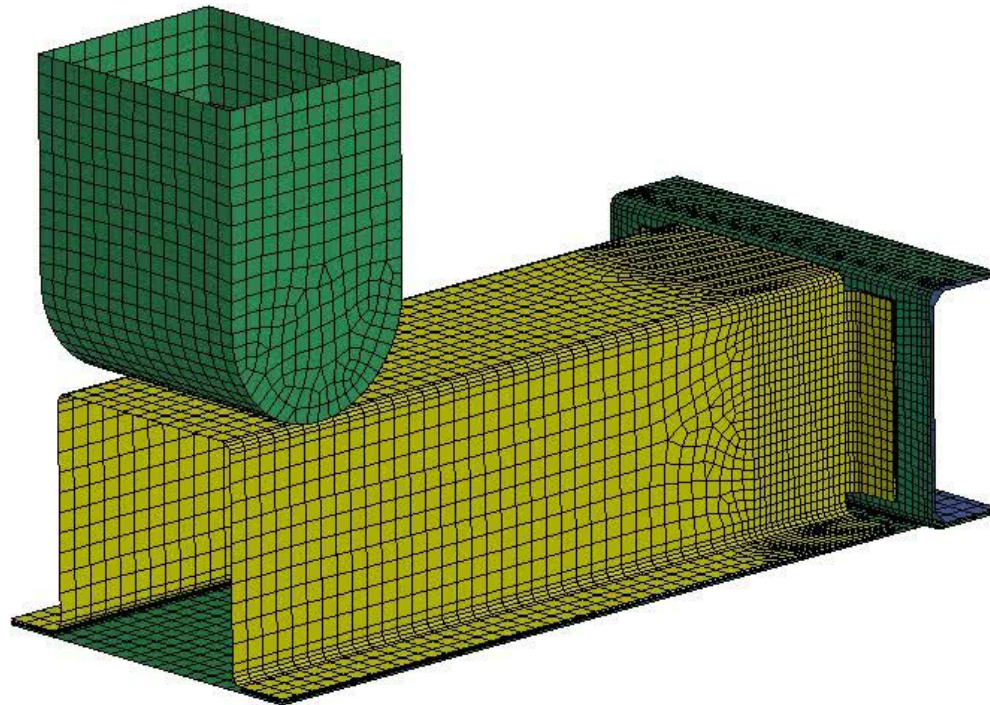


TAPO Materialmodell



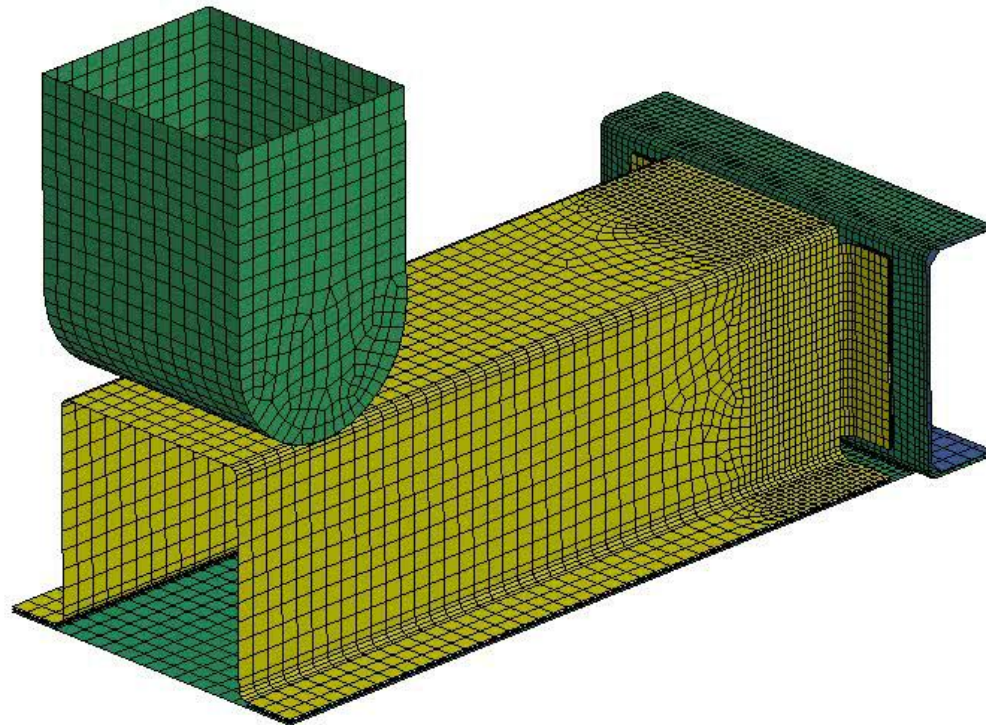
Ergebnisse T-Stoß für multilineares Modell

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0

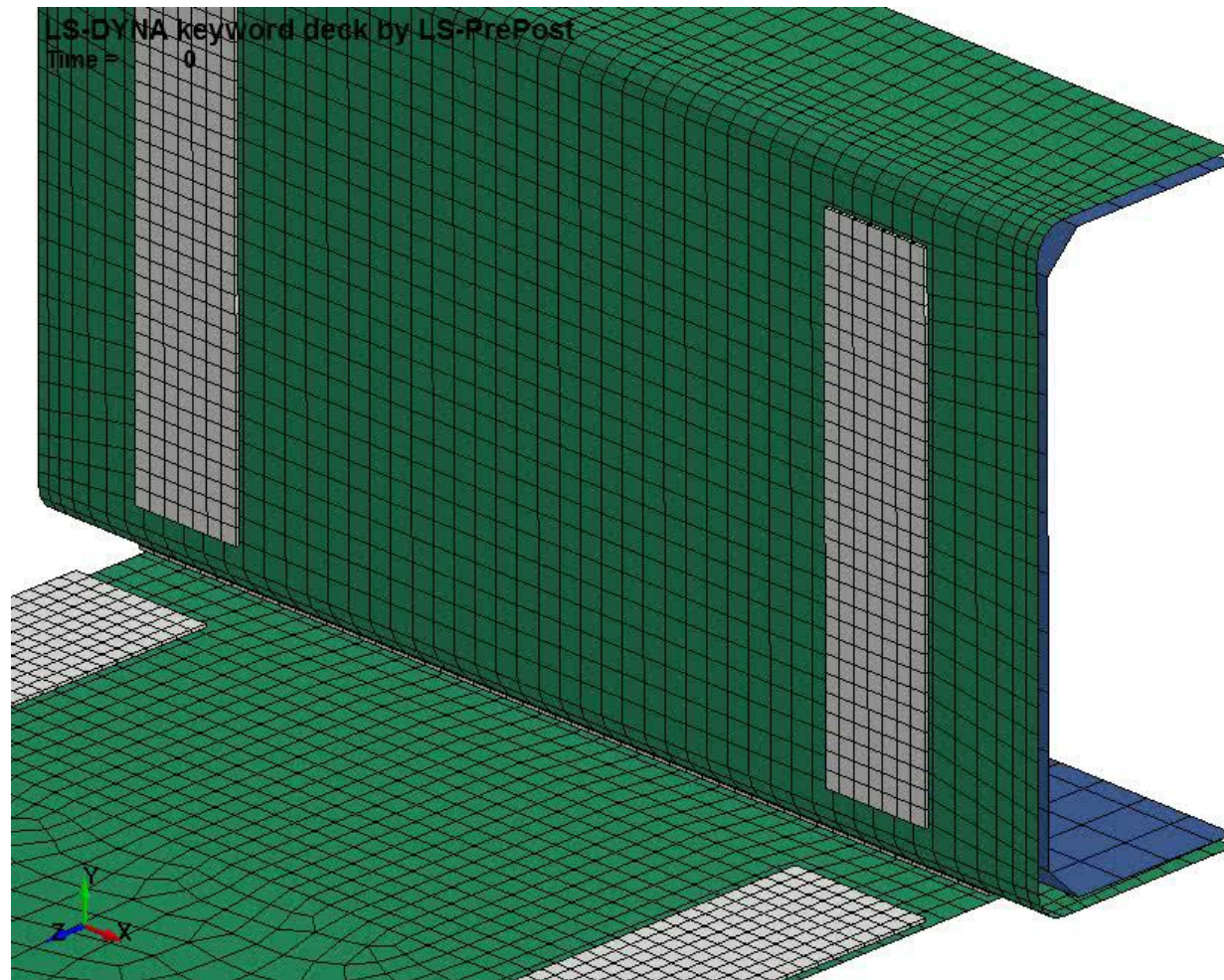


Ergebnisse T-Stoß für TAPO Materialmodell

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0

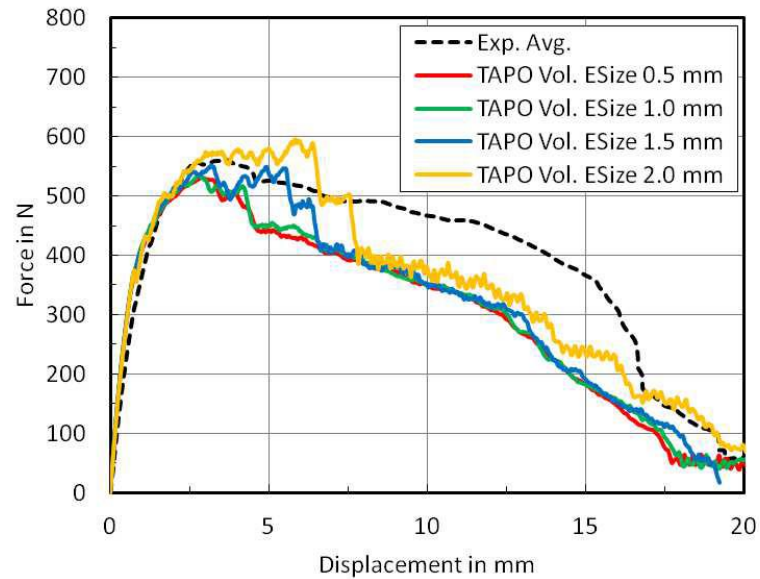


Ergebnisse T-Stoß für TAPO Materialmodell



Ergebnisse T-Stoß für multilineares Modell und TAPO Modell

- Einfluss der Elementgröße bei TAPO Materialmodell



Zusammenfassung und Ausblick

- Zusammenfassung
 - Materialmodell mit multilinearer Plastizität
 - Berücksichtigung nur von deviatorischen Spannungen
 - Voraussage des Klebstoffverhaltens bei Zug und kombinierter Belastung nicht möglich
 - Verwendung bei reiner Schubbelastung
 - Materialmodell für verfestigende Klebstoffe TAPO
 - Deviatorische und hydrostatische Spannungen
 - Sehr gute Übereinstimmung mit Experimenten
- Outlook
 - Ratenabhängigkeit im Materialmodell berücksichtigen
 - Vergleich mit klassischen Kohäsivzonenmaterialmodellen
 - Einfluss des Füllgrades

